

SUSTENTABILIDAD EN PLURAL: DIVERSAS DIMENSIONES Y PERSPECTIVAS

Astrid Wojtarowski Leal
Rene Murrieta Galindo
Coordinadores



SUSTENTABILIDAD EN PLURAL: DIVERSAS DIMENSIONES Y PERSPECTIVAS

Coordinadores:

Astrid Wojtarowski Leal

Rene Murrieta Galindo



El Colegio de Veracruz

Mtra. Erandi Isabel López Herrería

Rectora

Mtra. Diana Olimpia Apodaca Martínez

Subdirectora Académica

Dra. Xochitl del Alba León Estrada

Subdirectora de Investigación y Divulgación Científica

Mtro. Miguel Ángel Barradas Gerón

Subdirector de Educación Continua y a Distancia

Mtra. Erika Anabel Hernández Rivas

Subdirectora Administrativa

Sustentabilidad en plural: diversas dimensiones y perspectivas

Coordinadores: Astrid Wojtarowski Leal, Rene Murrieta Galindo

Número de ISBN: 978-607-8040-54-4

Primera edición: Agosto de 2026

Diseño editorial y formación:

Modesto Ortiz Flores

El Colegio de Veracruz

Carrillo Puerto No. 26

Col. Centro, C.P. 91000

Xalapa, Veracruz

Este libro fue sometido a un proceso de dictaminación a doble ciego por pares académicos, de acuerdo con las normas establecidas por El Colegio de Veracruz.

Todas las personas que participaron en este libro revisaron y aprobaron la versión final de su contribución para su publicación y difusión.

Las opiniones expresadas en las contribuciones de este texto corresponden exclusivamente a las y los autores y no reflejan necesariamente la postura de El Colegio de Veracruz.

Esta publicación es de distribución gratuita y puede consultarse, descargarse y compartirse libremente con fines académicos, educativos y de divulgación cultural. La obra se publica bajo la licencia Creative Commons Atribución–No Comercial 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0), que permite copiar, distribuir, comunicar y adaptar el contenido, siempre que se otorgue el crédito correspondiente a la obra y a sus autores, y que no se utilice con fines comerciales. Queda prohibida su comercialización total o parcial.



Índice

Prefacio.....	v
Astrid Wojtarowski Leal, Rene Murrieta Galindo	
Tejiendo procesos de consumo local para el escalamiento de las agroecologías desde las redes alimentarias alternativas	09
Anabell Rosas-Domínguez, Miguel Ángel Escalona Aguilar, María de los Ángeles Piñar Álvarez, Ofelia Andrea Valdés Rodríguez	
Percepción social sobre la conservación de la Reserva Ecológica Cerro de las Culebras, Coatepec, Veracruz, México	29
Angélica Patricia Figueroa Solís, María de los Ángeles Piñar Álvarez, Pedro Martínez Olivarez	
Investigación en ciencias sociales: un enfoque metodológico orientado hacia el desarrollo sostenible en la comunidad de San Miguel Aguasuelos	49
Emilio Lozano Figueiras, Nathan D. Wilson, Astrid Wojtarowski Leal	
Resiliencia del sistema territorial periurbano en cuatro municipios de la zona metropolitana de Xalapa, Veracruz: un análisis multidimensional	67
Jorge Andrés Santander Espinosa, Hugo López Rosas, Pedro Martínez Olivarez	
Biofertilizante de residuos orgánicos humanos generados en sanitarios secos: una revisión sistemática	91
Nelly Sánchez Gómez, Rene Murrieta Galindo	

Tecnología y sostenibilidad: retos y.....107
perspectivas de la fertilización de
tasa variable en México

Angélica Rodríguez Cortés, María Graciela Hernández y Orduña,
Cynthia Wong Argüelles

Valorización de residuos de piña:.....123
estrategias para la sostenibilidad agrícola
en el estado de Veracruz, México

Guillermina Velázquez Sánchez, María Graciela Hernández y Orduña,
Cynthia Wong Argüelles

Sistemas de humedales de tratamiento de.....139
aguas residuales sembradas con plantas ornamentales
en Pastorías, Actopan, México

Luis Manuel Álvarez-Hernández, José Luis Marín-Muñiz,
Irma Zitácuaro-Contreras

Análisis de indicadores de sustentabilidad de.....151
sistemas convencionales: consideraciones para su
aplicabilidad a sistemas de humedales de tratamiento

Karina Elizabeth Martínez-Aguilar, José Luis Marín-Muñiz



Prefacio

El Desarrollo Regional Sustentable es un área de estudio de las Ciencias Sociales que se distingue por su carácter multidisciplinario. Esta característica le confiere tanto ventajas como desafíos. Por un lado la diversidad de temas que pueden estudiarse enriquecen el conocimiento a partir de combinaciones que ofrecen visiones más completas de los fenómenos socioambientales; por otro, esta misma diversidad limita la conceptualización puntual de su tópico central: la sustentabilidad y, al mismo tiempo, obliga a un importante esfuerzo intelectual para lidiar con la complejidad que implica el diálogo con disciplinas cuyos enfoques y métodos provienen de tradiciones académicas muy distintas entre sí y que, al trabajarse de manera cercana, generan poca comprensión hacia los enfoques que no son propios, además de la competencia por la jerarquía disciplinar. A esto hay que sumar la necesidad de comprender la presencia de un gran número de temas que atender, más los que se van agregando conforme se amplía la perspectiva de este campo de estudio.

En *El Colegio de Veracruz* (COLVER), institución pública de educación superior del estado homónimo, contamos con un Doctorado en Desarrollo Regional Sustentable, con el objetivo de formar estudiantes con las bases metodológicas y teóricas de la Sustentabilidad, con las cuales pueden analizar y buscar soluciones a una diversidad de problemáticas de desarrollo en el ámbito regional. Dado el carácter multidisciplinario de este programa, ingresan estudiantes con formación diversa: antropología, ecología, pedagogía, psicología, ingenierías varias, artes visuales, arquitectura, entre otras.

Durante los tres años que dura el doctorado, los estudiantes avanzan en sus investigaciones con la guía de sus asesores, profesores de Seminario de Investigación y los respectivos Comités Tutoriales, mientras se ejercitan en la escritura de textos académicos, para lo cual algunos hacen uso de su tema de estudio de doctorado, o bien retoman investigaciones previas. Para el quinto semestre, la mayoría cuenta con material suficiente y sistematizado para comunicar sus avances de tesis o los resultados de estudios anteriores, a través de manuscritos académicos.

El libro que presentamos es una selección de este tipo de textos, dispuestos en capítulos que abordan una interesante diversidad temática. De esta manera, el lector podrá acercarse a distintos tópicos vinculados con la sustentabilidad, el territorio, la agroecología y el manejo de recursos naturales, desarrollados a partir de investigaciones académicas rigurosas.

El primer capítulo explora la influencia de las redes alimentarias alternativas en el fortalecimiento de la agroecología; en el segundo, se exponen los resultados de una investigación de percepción social sobre una reserva ecológica que representa un importante pulmón de la ciudad de Coatepec. El tercero propone un enfoque metodológico, con énfasis en el eje social de la sustentabilidad, para el análisis de la actividad alfarera en una pequeña comunidad veracruzana.

En el capítulo cuatro se muestra la caracterización y análisis del sistema territorial periurbano de la zona metropolitana de Xalapa, y se evalúa la resiliencia del mismo; el quinto aborda el uso de residuos sólidos humanos generados en sanitarios secos como alternativa de fertilizante para productos no comestibles. El sexto capítulo presenta una evaluación del uso de la vinaza de caña en la fertilización de tasa variable.

En el séptimo capítulo se evalúa el uso de los residuos de piña en procesos agrícolas como una alternativa de apoyo a la agricultura sustentable del estado de Veracruz; el octavo presenta el funcionamiento de un sistema de humedales construidos, así como el papel de la vegetación allí sembrada en el tratamiento de aguas residuales en una comunidad rural del estado de Veracruz. En el noveno y último capítulo se realiza un análisis de indicadores de sustentabilidad y de su aplicación en humedales de tratamiento de aguas residuales.

El lector podrá asomarse a un caleidoscopio temático con la revisión de este libro. Las experiencias de investigación aquí contenidas realizan aportaciones e incrementan el acervo de conocimientos e información relacionados con la sustentabilidad. Esperamos que disfruten de su lectura, y que sea de utilidad para reflexionar sobre la importancia de seguir investigando

sobre alternativas y caminos que permitan mejorar la calidad de vida colectiva como principio de solidaridad intrageneracional, así como desde la perspectiva de solidaridad intergeneracional, resumida en las intenciones y acciones necesarias para legar un mundo mejor a las generaciones futuras.

**Astrid Wojtarowski Leal y
Rene Murrieta Galindo**
Coordinadores



Tejiendo procesos de consumo local para el escalamiento de las agroecologías desde las redes alimentarias alternativas

Anabell Rosas-Domínguez¹

Miguel Ángel Escalona Aguilar²

María de los Ángeles Piñar Álvarez³

Ofelia Andrea Valdés Rodríguez⁴

1. Introducción

La Revolución Verde, implementada el siglo pasado para enfrentar el hambre y la desnutrición, adoptó una lógica industrial que transformó los alimentos en mercancías. Esta transformación generó efectos adversos, como la brecha entre la producción convencional y la de pequeña escala (Bocco, 2023) o el aumento del consumo de alimentos ultraprocesados y producidos lejos del lugar de consumo. Además de provocar una ruptura con las tradiciones culinarias, esto se ha relacionado con la incidencia de enfermedades crónicas como diabetes, hipertensión y obesidad, agravando a su vez la crisis sanitaria de Covid-19 en México (Arellanes-Cancino y Juárez, 2022; Barrera Bassols y Elizondo, 2022).

En México, la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición 2020-2023 reportó que 40.4 % de la población escolar y adolescente tiene sobrepeso u obesidad; sus dietas son abundantes en azúcares añadidos y escasas en frutas y verduras. Esto es resultado de la dificultad para acceder a alimentos saludables y de las estrategias de mercadotecnia y precios que facilitan la distribución de productos procesados y ultraprocesados (Shamah-Levy et al., 2024).

¹ anabellrd@gmail.com, El Colegio de Veracruz. Maestra en Ingeniería Ambiental por la Universidad Nacional Autónoma de México, estudiante del Doctorado en Desarrollo Regional Sustentable (2022-2025) en El Colegio de Veracruz e integrante de la Plataforma Metropolitana de Formación en Agroecología de Xalapa, Veracruz, México.

² mifana.escalona@gmail.com, Universidad Veracruzana. Máster en Agroecología por la Universidad Internacional de Andalucía y Doctor en Agroecología, Sociología y Desarrollo Rural Sostenible por la Universidad de Córdoba, España. Es profesor de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Veracruzana.

³ mapinara@colver.edu.mx, El Colegio de Veracruz. Maestra en Economía Social y Doctora en Ciencias Económicas y Sociales por la Universidad de Hamburgo, Alemania. Es profesora e investigadora en El Colegio de Veracruz. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel 1.

⁴ oavaldesr@colver.edu.mx, El Colegio de Veracruz. Maestra en ciencias por el Instituto Tecnológico de Chihuahua y Doctora en Ecología por la Universidad Veracruzana. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores, Nivel 2.

En la dimensión ambiental, la expansión de monocultivos en México ha impactado la biodiversidad e intensificado el uso de recursos. En Michoacán, el cultivo de aguacate representó la pérdida de 48,600 ha. de bosques entre 1990 y 2006 y, en Uruapan, utiliza el 80 % del agua extraída de pozos (Borrego y Carlón Allende, 2021). En Veracruz, los cultivos comerciales de caña de azúcar, limón y papa han sustituido cafetales de sombra; el uso intensivo de agroquímicos en su producción se ha asociado a graves casos de contaminación ambiental y afectaciones a la salud humana (Durán Molina et al., 2024; Morales, 2024; Soberanes, 2023).

Ante este panorama, diversas organizaciones de perfil socioecológico han promovido iniciativas que buscan integrar la conservación ambiental con la justicia social, destacando los esfuerzos por defender el territorio y los recursos naturales (Guzmán Ramírez, Galaviz Armenta, Pensado Fernández y Zambrano Bernal, 2021). Así, como señalan Escalona Aguilar y Menchaca Pardow (2023), varios de esos procesos de defensa del territorio, impulsados por una ciudadanía sensibilizada, han propiciado la creación de mecanismos alternativos de producción, distribución y consumo de alimentos.

En este contexto, la Red de Producción y Consumo Sano y Solidario Pixcando (en adelante *Pixcando*) ha sido fundamental en muchas transiciones agroecológicas de la región central de Veracruz. Sus proyectos productivos priorizan la protección de suelos, bosques y cuerpos de agua, y conectan a la población rural con la urbana de Xalapa y Coatepec bajo los principios de economía social y solidaria (Vidriales Chan, 2022).

La Red de Economía Solidaria La Gira⁵ (en adelante *La Gira*) surgió poco después, tras las “Giras de aprendizaje” que permitieron a las personas conocer y respaldar a quienes habitan, aprovechan y conservan cuidadosamente las islas que conforman el Área Natural Protegida Archipiélago de Bosques y Selvas de Xalapa (Hensler et al., 2019). La iniciativa busca crear una comunidad solidaria que fomente relaciones directas, respetuosas y responsables, más allá de la compra y venta de productos (Hensler et al., 2020; Rothschild et al., 2022).

Por su parte, en 2021, la asociación Desarrollo Sustentable del Río Sedeño-Lucas Martín A.C., incorporó la economía social y solidaria en sus actividades en defensa del territorio. Esta organización ha promovido el conocimiento, saneamiento y protección del Río Sedeño desde hace tres décadas (1995-2025). Su gestión logró la construcción de una planta de tratamiento y el decreto de la zona riparia como Área Natural Protegida estatal (Vázquez y Suárez, 2018), así como la instalación de un módulo de agroecología donde cada mes se realiza el Mercado Quetzalcalli (en adelante *Quetzalcalli*).

El Tianguis Agroecológico de Xalapa (TAX) no surgió de la defensa del territorio como los casos anteriores, sino de las ferias de alimentos ecológicos en

⁵ <http://lagira.org>.

Teocelo, Veracruz (Escalona Aguilar, 2010). En el año 2003 las ferias se transformaron en un mercado semanal con sede en Xalapa, Veracruz —el segundo mercado ecológico del país—, inicialmente conocido como Mercado Ecológico Ocelotl. Desde entonces, se ha consolidado como un espacio alternativo no solo para la venta de productos agroecológicos, sino también para educación no formal, convivencia y promoción de un consumo responsable.

Aunque las cuatro Redes Alimentarias Alternativas (RAA) difieran en origen, extensión o motivación, son expresiones de un mismo movimiento agroecológico que en los últimos 30 años ha crecido alrededor de Xalapa. Más allá de lo técnico y productivo, cada iniciativa aporta a la construcción de un sistema alimentario local de base agroecológica, incorporando elementos como la economía circular y solidaria, los valores humanos y sociales, la creación conjunta y el intercambio de conocimientos (Barrios et al., 2020). La actividad, los vínculos y el territorio que comparten estas RAA abren la oportunidad de reflexionar sobre sus posibilidades de cooperación como vía para contribuir al escalamiento de la agroecología en la región.

Por otra parte, varias investigaciones han analizado las RAA en la región. El TAX y el Mercado Biorregional Coatl, en Coatepec, se encuentran entre los más estudiados por ser los pioneros de la oferta de alimentos locales en el área. Hernández Castillo (2019) caracterizó a las personas consumidoras y productoras, así como a los alimentos que ofertan, y encontró que el rango y distancias que recorren estos para llegar a los puntos de venta varía entre 3 y 200 km. Villatoro-Hernández, Vidal-Álvarez, Vázquez-Elorza, Tolentino-Martínez y Wojtarowski-Leal (2024) documentaron las RAA en Xalapa y los municipios aledaños; las autoras identificaron 10 iniciativas en las categorías de tianguis/mercado, cooperativa de consumo, campañas y sellos, que para su fortalecimiento requieren la transición a estrategias de producción agroecológica, la educación alimentaria a las personas consumidoras y la diversidad de productos locales.

Tanto este estudio como el de Menchaca Pardow (2024) sobre el escalamiento de la agroecología en la zona, toman como área de análisis la Zona Metropolitana de Xalapa; no obstante, esta región excluye municipios como Perote, Veracruz y Chilchotla, Puebla, que son origen de varios productos representativos en la oferta de alimentos agroecológicos en las RAA de Xalapa.

Las investigaciones revisadas sobre las RAA de la región muestran una oportunidad para ampliar el conocimiento disponible sobre estas redes y sus integrantes, ya que se identifica la necesidad de actualizar la información estadística y geográfica sobre las iniciativas productivas, así como analizar los resultados en términos de los procesos de transición y escalamiento de la agroecología que llevan a cabo. Por lo anterior, la presente investigación se plantea como objetivo “analizar las contribuciones y los desafíos de cuatro Redes Alimentarias Alternativas, a partir de su ubicación geográfica, para la transición y el escalamiento de la agroecología en la región Capital Xalapa, Veracruz”.

2. Fundamentación teórica

La agroecología es un concepto que ha evolucionado relativamente rápido. De acuerdo con Toledo y Argueta (2024), hace cuatro décadas su estudio se encuadraba en las ciencias biológicas, pero a partir del presente siglo su contenido se amplió mediante trabajos multi, inter y transdisciplinarios que cambiaron la perspectiva, y la escala de análisis pasó del agroecosistema al sistema agroalimentario.

Uno de los enfoques recientes en el abordaje de las agroecologías es la construcción de sistemas alimentarios locales que benefician a un mayor número de familias en territorios más extensos. De acuerdo con Ferguson et al., (2019) y Mier y Terán Giménez Cacho et al. (2018), este abordaje busca integrar a más comunidades –urbanas, rurales y especialmente a los sectores cuyas voces han sido históricamente ignoradas– en el procesamiento, distribución y consumo de alimentos saludables, nutritivos, diversos, ambientalmente compatibles y culturalmente apropiados. A esto se le conoce como escalamiento de las agroecologías. Los autores también resaltan la singularidad de tales procesos de escalamiento, pues son resultado de prácticas, relaciones, políticas y dinámicas de poder propias de cada lugar, lo que moldea de forma particular cada experiencia. Para ello, Giraldo (2022) apuesta por la multiplicación de experiencias pequeñas y locales, de manera horizontal y totalmente articulada.

Para los autores González de Molina, López García y Guzmán Casado (2017) un factor determinante en los procesos de escalamiento de las agroecologías es incrementar el consumo de alimentos “saludables, cultivados de manera sostenible en el propio territorio, con una remuneración justa del trabajo y accesibles al consumo en precio y ubicación física” (p. 41). Los autores también resaltan la importancia de la cooperación entre los distintos actores del sistema alimentario para revertir el aislamiento y la fragmentación de las experiencias agroecológicas. Es decir, además de la producción, distribución y consumo localizados, se busca la generación de sinergias mediante la colaboración efectiva entre iniciativas agroecológicas existentes y las nuevas que se integren.

Cuando esta cooperación facilita la reconexión de los alimentos con el territorio, acorta las cadenas alimentarias, reduce las brechas entre el medio rural y urbano, y fortalece la gobernanza, se configura lo que se llama un Sistema Alimentario Local de Base Agroecológica. Su objetivo es abastecer al consumo local con productos saludables, sostenibles y accesibles, garantizando una justa remuneración del trabajo (González de Molina et al., 2017; González De Molina y Lopez-Garcia, 2021).

La creación de los Sistemas Alimentarios Locales de Base Agroecológica recae, en parte, en las RAA, pues su carácter disidente les convierte en contrapeso natural a los modelos alimentarios convencionales, que dependen de combustibles fósiles para producir y transportar alimentos a gran distancia y, además, desincentivan el acceso a alimentos frescos, de temporada y cercanos al consumidor. Esquemas como mercados de productores, cooperativas, sistemas de canastas

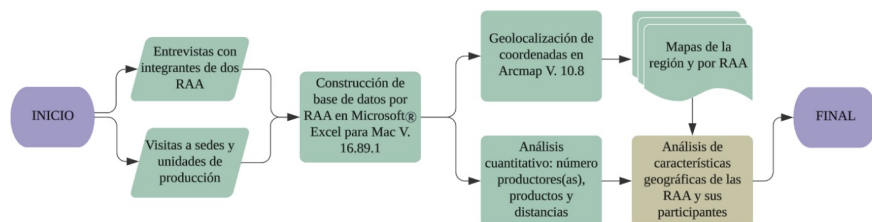
o grupos de compra solidaria fomentan la proximidad geográfica y vinculan a productores⁶, consumidores y otros actores a través de prácticas ambientalmente responsables, impulsadas por la justicia social (López-García y González de Molina, 2021; Michel-Villarreal, Hingley y Bregoli, 2018). Aunado a ello, las RAA favorecen los procesos de transición y escalamiento de las agroecologías a través de la proximidad, la incidencia en los patrones de consumo, los movimientos sociales y el acceso a mercados que representan una diversidad de canales de distribución (Díaz-Castanys Yanguas, 2022; Rosas Domínguez, Piñar-Álvarez, Valdés Rodríguez y Escalona Aguilar, 2024).

La cercanía física que ofrecen las RAA surge de su vinculación natural con el territorio donde actúan. En este sentido, el territorio se concibe como un entramado de relaciones sociales reproducidas por una diversidad de actores a partir de un espacio geográfico donde confluyen, de forma inseparable, las dimensiones política, histórica, social, cultural, ambiental y económica (Sotiru, 2023). Dicho espacio geográfico será plasmado con la ayuda instrumental de Sistemas de Información Geográfica.

3. Metodología

Se llevó a cabo una investigación aplicada desde un enfoque mixto. Según Hernández Sampieri y Mendoza-Torres (2018), este enfoque integra instrumentos cuantitativos y cualitativos para representar de forma más completa un fenómeno y es apropiado cuando agrega valor a un estudio en comparación con el uso de un solo enfoque. En esta investigación se aplicó una metodología cualitativa (entrevistas y observación directa) para la recopilación de datos, y una cuantitativa (integración de una base de datos, georreferenciación de coordenadas y elaboración de mapas), para representar y analizar numéricamente la información recabada. Este análisis permitió identificar desafíos que pueden enfrentar las RAA, a fin de ampliar su alcance y coadyuvar en la transformación del sistema alimentario regional (Figura 1).

Figura 1. Diagrama de la metodología para analizar la información estadística y geográfica de cuatro Redes Alimentarias Alternativas (RAA) de Xalapa, Veracruz.



Fuente: elaboración propia.

⁶ Cuando se mencione productor o productora se entenderá como una persona, familia o iniciativa que cultiva, cría, pesca, recolecta o transforma productos de estas actividades para la preparación de alimentos.

Se trabajó con una muestra no probabilística de participantes voluntarios, integrada por cuatro RAA que distribuyen alimentos agroecológicos en la ciudad de Xalapa, Veracruz: Pixcando, el TAX, La Gira y Quetzalcalli. A continuación, se describe brevemente la forma en que operan:

- *Pixcando*. Es un sistema de distribución de canastas de productos agroecológicos, entregadas semanal o quincenalmente, al cual las personas interesadas deben suscribirse. El sistema cuenta con una sede logística y tienda permanente ubicada en el municipio de Tlalnahuayocan, donde se reciben algunos de los alimentos, y el resto se recolecta en un recorrido por sitios estratégicos en los municipios de Tlalnahuayocan, Coatepec, Xico y Teocelo. Las personas consumidoras recogen sus canastas en la sede logística o en alguno de los puntos de entrega colectiva, distribuidos en diferentes zonas de los municipios de Xalapa y Coatepec. Además, se realizan entregas personalizadas a ciertos restaurantes.
- *Tianguis Agroecológico de Xalapa (TAX)*. Este es un mercado semanal abierto al público en general, que opera los domingos en un horario de 10:00 a 15:00 horas, en el centro de Xalapa, Veracruz. Cada familia productora dispone de un espacio para exhibir sus productos y periódicamente ofrecen talleres sobre su práctica, de tal forma que el espacio se convierte en un lugar de aprendizaje sobre las formas de producción.
- *La Gira*. Es una red autogestiva de economía solidaria en la que sus integrantes se coordinan para adquirir productos locales y entregarlos quincenalmente. Una semana antes de cada entrega, las personas consumidoras reciben una lista de los productos disponibles y seleccionan aquellos que desean comprar. Las encargadas de la gestión de la RAA consolidan los pedidos y los comunican a cada familia productora, quienes entregan los productos en la sede el día acordado. Las personas consumidoras recogen sus pedidos los viernes entre 16:00 y 20:00 horas.
- *Quetzalcalli*. Es un mercado mensual que se instala el último sábado de cada mes en horario de 10:00 a 14:00 horas, en el norte de Xalapa, Veracruz. Al igual que el TAX, hay un espacio designado para cada familia productora y también se organizan talleres para las y los consumidores.

Los datos de Quetzalcalli y Pixcando se obtuvieron mediante entrevistas con las gestoras de cada red y consultas a sus bases de datos; en el caso del TAX y La Gira, se recopilaban directamente de personas productoras y consumidoras en días de venta o entrega. La información obtenida se sistematizó en Microsoft®

Excel para Mac V. 16.89.1, e incluyó datos del municipio, localidad, colonia, coordenadas geográficas y, para personas productoras, también el tipo de productos distribuidos según las categorías establecidas: herbolaria y plantas aromáticas; hortalizas; raíces y tubérculos; frutas; productos de la milpa; huevo; productos cárnicos; semillas y nueces; condimentos; café/cacao; alimentos preparados/procesados; lácteos; hongos y setas; flores y germinados; miel, productos de la colmena y medicinales; cuidado personal; y bebidas fermentadas y preparadas.

Se realizó un análisis cuantitativo para identificar la distribución de los productores(as) por municipio, por RAA y por tipo de producto. Se obtuvieron las coordenadas geográficas de las personas participantes de las RAA y se calcularon las distancias entre los puntos de producción, consumo y las sedes de las redes, empleando la fórmula de Haversine (Azdy y Darnis, 2020).

$$Distancia = 2 \cdot R \cdot \sin^{-1} \sqrt{\left(\sin \frac{\Delta Lat}{2}\right)^2 + \cos(Lat1) \cdot \cos(Lat2) \cdot \left(\sin \frac{\Delta Long}{2}\right)^2} \quad (1)$$

Donde: $\Delta Lat = Lat2 - Lat1$; $\Delta Long = Long2 - Long1$; $R=6371$ km, radio de la tierra.

Los mapas correspondientes a cada RAA, así como de la región conectada mediante los alimentos agroecológicos que estas redes proveen a Xalapa, Veracruz, se elaboraron utilizando el software de Sistemas de Información Geográfica ArcMap v.10.8 (ESRI, 2019).

Para su desarrollo, se emplearon los recursos del Marco Geoestadístico de Veracruz (INEGI, 2022b), el conjunto de datos vectoriales de la carta de aguas superficiales a escala 1:250 000 (INEGI, 2022a), la red hidrográfica digital de México escala 1:250,000 (INEGI, 2006) y el conjunto de datos vectoriales de carreteras y vialidades urbanas, edición 1.0 (INEGI, s/f).

Para delimitar la región agroecológica vinculada a las RAA que operan en Xalapa se incluyeron los municipios que están conectados de manera continua a esa misma ciudad a través de uno o más productores o productoras, participantes de dichas iniciativas.

4. Resultados

4.1 Con relación a las productoras y productores de las RAA

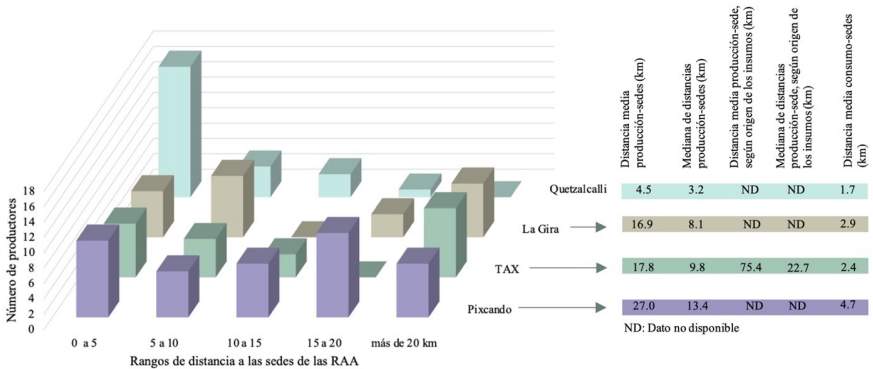
De manera integral se registró un total de 94 productoras(es) en las cuatro RAA estudiadas (Pixcando, el TAX, La Gira y Quetzalcalli). Resalta que Pixcando se organiza con la mayor cantidad de personas productoras (41), superando sustancialmente a las que participan en el TAX (25), Quetzalcalli (25) y La Gira (24). Respecto del municipio desde donde llevan su producción, 58% de las personas productoras se ubican en Xalapa o en municipios colindantes; un análisis más detallado de las distancias se proporciona más adelante.

Se encontró que 15 personas productoras participan en más de una RAA y principalmente en Pixcando y La Gira; además, cada productor o productora distribuye entre una y seis categorías de productos. Los alimentos que distribuyen más productoras(es) son preparados/procesados (30), hortalizas (23) y frutas (19), mientras que hongos y setas (2) es el que menos distribuidores tiene. Si se analiza por RAA, Pixcando tiene mayor actividad con productos frescos, como hortalizas, frutas, raíces/tubérculos e incluso, flores, mientras que en Quetzalcalli se destacan los alimentos preparados o procesados y las bebidas fermentadas o preparadas.

4.2 Con relación a la proximidad de los productos

Las distancias promedio entre las personas integrantes de las RAA y las sedes de gestión, así como un desglose por rangos de distancia, se presentan en la Figura 2. Se observa que los resultados varían considerablemente dependiendo de la RAA. Si se toma en cuenta exclusivamente la ubicación de la unidad de producción, la mayor distancia entre productoras(es) y la sede de gestión ocurre en Pixcando, que se vincula con productoras(es) de municipios cercanos a Xalapa, pero también tiene entregas de temporada o de oportunidad en municipios del sur de Veracruz y de Oaxaca.

Figura 2. Desglose de productoras(es) según el rango de distancias a las sedes de Pixcando TAX, La Gira y Quetzalcalli y distancias medias y medianas de las personas participantes. Cada red está representada por un color en la gráfica.



Fuente: elaboración propia con datos proporcionados por las redes.

Esto no ocurre con el TAX y La Gira, cuyos productores se ubican relativamente cerca. Las distancias tan cortas que presenta Quetzalcalli son representativas de su operación como una RAA local, enfocada en la vinculación de una comunidad específica.

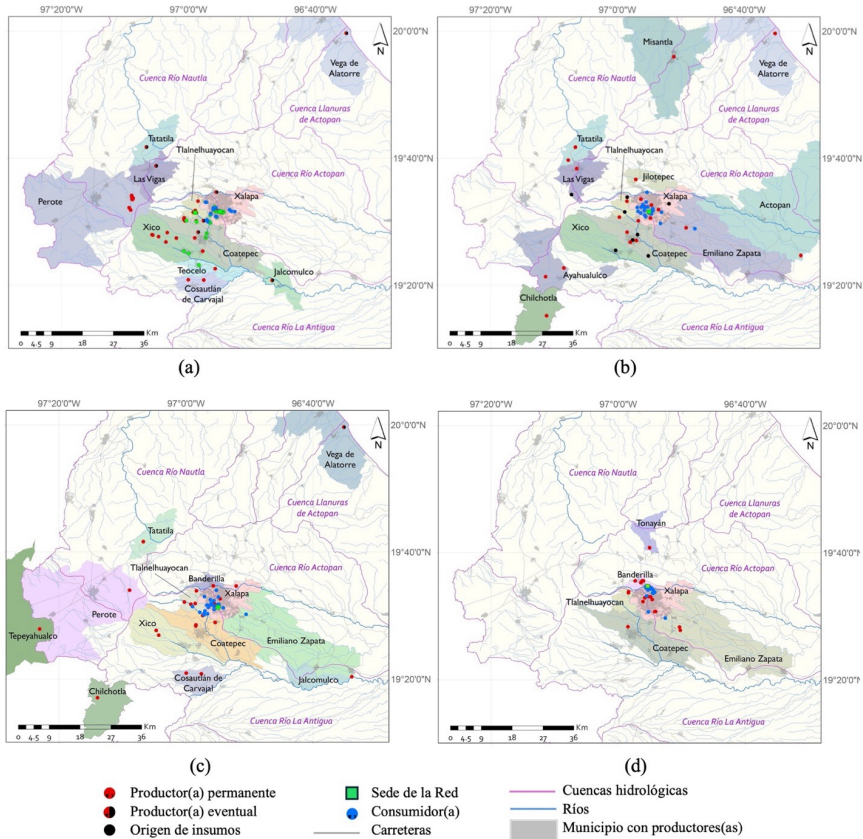
Para el TAX también se presenta un promedio de distancias que incluye el origen de los insumos provenientes de sitios fuera de Veracruz; de esta forma, la distancia promedio aumenta significativamente. Esta RAA se ha caracterizado por los vínculos que ha construido con otras experiencias de economía alternativa

del país, lo que ha permitido el acceso a insumos producidos de forma agroecológica que no se cultivan en el estado de Veracruz.

4.3 Con relación a la representación geográfica de las RAA

Los mapas generados para las RAA visibilizan la extensión de las vinculaciones que se construyen a partir de cada experiencia; en la Figura 3 se presenta la ubicación de las personas productoras, consumidoras y las sedes de gestión de Pixcando, el TAX, La Gira y Quetzalcalli. La densidad de participantes de cada RAA y su ubicación se distinguen claramente.

Figura 3. Ubicación de las y los integrantes de las cuatro Redes Alimentarias Alternativas: (a) Pixcando, (b) Tianguis Agroecológico de Xalapa, (c) La Gira y (d) Quetzalcalli.



Fuente: elaboración propia con datos proporcionados por las redes.

En el caso de Pixcando, se hace evidente su vinculación con proyectos productivos y de conservación de las cuencas asociadas al abasto y distribución de agua para Xalapa, Veracruz.

Para esta red, resalta también una logística más compleja que incluye, además de la sede de gestión (Tienda Pixcando, en el municipio de Tlalnahuayocan), una serie de alternativas para facilitar la entrega a las personas productoras a través de rutas de recolección y entrega de productos; así, reducen significativamente las distancias que recorren sus integrantes.

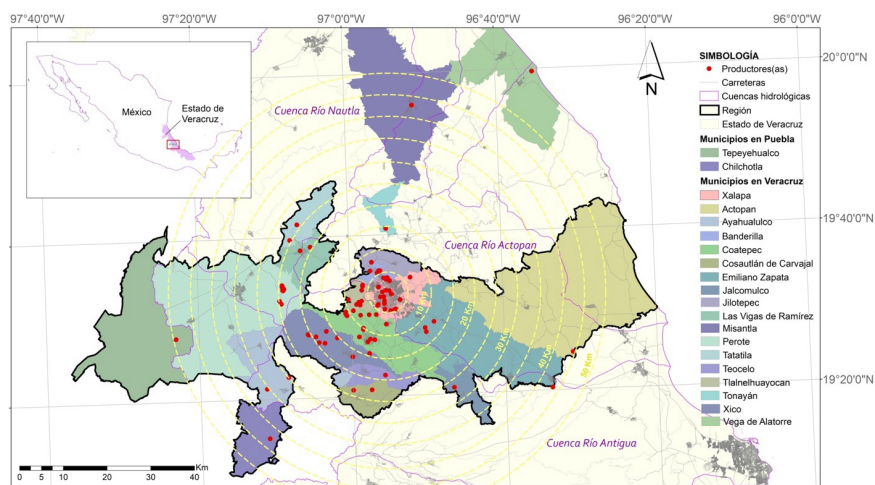
El TAX tiene la mayor extensión de todas las RAA, lo que les permite tener una amplia variedad de productos de diferentes climas, aunque esto implica mayores distancias para sus productoras(es). La Gira y Quetzalcalli tienen una operación más local, lo cual es congruente con el objetivo que tiene cada una, asociado al fortalecimiento de proyectos específicos vinculados a su territorio.

En los mapas se observa la distribución de las personas consumidoras. La mayoría de estas reside en el municipio de Xalapa, con una concentración predominante en las zonas centro y oeste de la ciudad, excepto quienes frecuentan Quetzalcalli, que son principalmente habitantes del norte del municipio.

La región que resulta de esta vinculación se integra con 17 municipios: 15 en Veracruz y dos en Puebla, lo que representa una integración interestatal. En conjunto abarcan una superficie de 3,653 km² en zonas de montaña, valle y de transición hacia la llanura costera. Lo anterior sugiere una diversidad de climas que permite la producción de una amplia variedad de alimentos, como hortalizas y frutas de clima frío y tropical, café y milpas.

El mapa de la región que se presenta en la Figura 4 muestra todos los municipios en un radio de 50 km donde existe por lo menos un productor(a) que distribuya alimentos a través de las RAA estudiadas. Asimismo, se muestra la ubicación de las productoras(es) locales.

Figura 4. Integración de municipios y productores(as) de Pixcando, Tianguis Agroecológico de Xalapa, La Gira y Quetzalcalli.



Fuente: elaboración propia con datos proporcionados por las redes.

La mayoría de las productoras(es) se encuentran en las cercanías de Xalapa, lo que facilita el acceso de la población a alimentos frescos y locales. Además, esta proximidad sugiere que el transporte de los productos hacia los puntos de recolección o sedes de las RAA podría resultar viable en términos de tiempo y costo para quienes están más cercanos; sin embargo, es necesario evaluar el impacto económico del transporte para las personas productoras ubicadas en los municipios más alejados y, como resultado, diseñar estrategias y apoyos logísticos que faciliten su participación en las iniciativas.

La distribución de las productoras y productores agroecológicos en la Figura 4 sugiere una mayor concentración al suroeste y oeste de Xalapa. Esto podría relacionarse con las características geográficas y socioeconómicas de la región; estas zonas de alta biodiversidad y precipitación, que alojan remanentes de bosques y cafetales bajo sombra, ofrecen condiciones favorables para la agricultura agroecológica. No obstante, este patrón también representa una oportunidad para expandir la red hacia el este del municipio de Xalapa y hacia las zonas costeras, con el fin de diversificar la oferta de alimentos de las RAA.

A partir de lo anterior, se identifican desafíos para las transiciones y el escalamiento de las agroecologías. Uno de los principales radica en la inclusión de un mayor número de productoras y productores de zonas actualmente subrepresentadas en la red; esto permitiría integrar nuevas prácticas, experiencias agroecológicas y vínculos que fortalecerían a las RAA y contribuirían a la consolidación de un sistema alimentario regional de base agroecológica. Asimismo, se observa la necesidad de superar el centralismo del consumo y otras actividades en torno a las redes que actualmente ocurren en zonas específicas del municipio de Xalapa; para hablar de un escalamiento real de las agroecologías a nivel de la región, estas dinámicas deberán dirigirse a nuevas colonias y comunidades.

Esto requiere una perspectiva que trascienda la capital del Estado y su zona centro como foco exclusivo de actividad, que fomente las relaciones horizontales y promueva la creación de nuevos nodos donde se impulse tanto el conocimiento como el consumo de productos locales.

Finalmente, resulta importante explorar herramientas que mejoren el acceso de las productoras y productores a diferentes canales de comercialización, como los Sistemas Participativos de Garantía. Estas herramientas no solo refuerzan la transparencia y confianza en los productos, también promueven los procesos horizontales de intercambio de saberes entre las personas y facilitan su integración en mercados más diversos.

5. Discusión

El estudio identificó que las RAA analizadas —Pixcando, TAX, La Gira y Quetzalcalli— vinculan a 94 familias productoras con cientos de consumidoras a través de un entramado agroalimentario que favorece las transiciones agroecológicas, acorta las cadenas de distribución y facilita la comercialización de alimentos.

Estas redes permiten un acceso más eficiente a productos locales, como lo identificó Bocco (2023) para la Provincia de Córdoba, Argentina. En este contexto, las RAA reconfiguran el concepto de *tianquiztli* de los pueblos originarios. Ambos se entienden como espacios sociales y políticos que integran a las regiones, los productos y los saberes sobre diferentes técnicas de producción a través de intercambios que satisfacen necesidades y crean vínculos (García Bustamante, 2015).

En cuanto a la proximidad geográfica, se confirma lo señalado previamente por Escalona Aguilar (2010) en relación con el TAX. Las distancias medias entre las personas productoras y las sedes de las RAA en la región de Xalapa varían de 4.5 a 27.0 km, y hasta 75.4 km al incluir productos de otros estados comercializados en el TAX. No obstante, las distancias se mantienen dentro del perímetro local de 100 km que establecen la Agencia de Transición Agroecológica de Francia y el Centro Común de Investigación de la Unión Europea, y de las 400 millas que define la Ley de Alimentos, Conservación y Energía de 2008 de Estados Unidos de América, como citan Benedetti y Araldi (2024). En su estudio, los autores encontraron una distancia media de 44 km para los alimentos distribuidos en RAA de Francia.

La diversidad de los alimentos ofertados por las cuatro RAA estudiadas también es notable, cubriendo casi todos los grupos alimentarios de la canasta alimentaria de México (CONEVAL, 2022a). Sin embargo, se identificó la necesidad de ampliar la oferta de productos cárnicos, hongos y setas, de los cuales solo se registraron dos productores en las redes estudiadas.

Pixcando, el TAX, La Gira y Quetzalcalli ofrecen productos locales y de temporada, permitiendo que la comunidad consumidora tome un papel activo que requiere, por una parte, conocer, preparar y consumir productos que no se encuentran en canales convencionales, y por otra, valorar el acceso a alimentos cuya producción es parte de proyectos que conservan el entorno y la biodiversidad local, como menciona Vidriales Chan (2022). Este enfoque de consumo consciente, crítico y abierto a nuevos valores alimentarios que transmiten las RAA contribuye directamente al bienestar de la población afectada por el sobrepeso y la obesidad (Shamah-Levy et al., 2024), y promueve la reconfiguración del sistema alimentario local, según lo propuesto por González de Molina et al. (2017).

Los puntos logísticos de las RAA, así como las personas consumidoras que las frecuentan se ubican, en su mayoría, dentro de zonas de bajo y muy bajo rezago social. Quetzalcalli es la excepción; su ubicación al norte del municipio de Xalapa le permite atender a una población en condiciones de rezago social muy bajo, pero también medio y alto (CONEVAL, 2022b).

Por otra parte, la región conectada a través de estas cuatro RAA es más amplia que la reportada en los trabajos de Menchaca Pardow (2024) y Villatoro-Hernández et al. (2024), lo que representa la posibilidad de promover transiciones agroecológicas en territorios más grandes y diversos, siguiendo la noción de “multitudes agroecológicas” que propone Giraldo (2022).

Las acciones que articulan los colectivos detrás de Pixcando, La Gira y Quetzalcalli en su organización y la defensa de su territorio (Hensler et al., 2019; Vázquez y Suárez, 2018; Vidriales Chan, 2022) amplían estas transiciones más allá de las parcelas, lo que según Barrera Bassols y Elizondo (2022) refleja un verdadero escalamiento de la agroecología para la transformación de su sistema alimentario.

Los desafíos para el escalamiento de la agroecología identificados en este estudio coinciden con las barreras señaladas por Díaz-Castanys Yanguas (2022) en el contexto de la distribución alimentaria en tres RAA de Granada, España. La autora destaca la relevancia de acceder a canales de comercialización diversos, y subraya la efectividad de los Sistemas Participativos de Garantía como mecanismos clave para fortalecer estas redes. Asimismo, uno de los principales aportes de las RAA estriba en promover una formación orientada hacia el consumo consciente y crítico, lo que coincide con Rodríguez Guerrero y Leal Martínez (2020) al señalar que este trasciende la simple adquisición de alimentos en espacios como las RAA y fomenta una conciencia integral sobre la alimentación saludable que pone al centro el cuidado del ambiente y el bien común.

Finalmente, será fundamental continuar consolidando las articulaciones entre las RAA de la región y fortalecer el trabajo colaborativo, como lo sugieren Guzmán Ramírez et al. (2021). Este enfoque es esencial para fomentar el intercambio de saberes y experiencias y contribuir a la creación de territorios agroecológicos resilientes.

6. Conclusiones

Las particularidades del origen, objetivos y trayectorias de las Redes Alimentarias Alternativas estudiadas se reflejan en sus dinámicas de operación y en la distribución territorial de sus integrantes.

A partir de las cuatro iniciativas se identificaron factores clave para el escalamiento de la agroecología en la región de estudio, entre los que destacan la diversidad de los alimentos comercializados, la creación de múltiples nodos de distribución y la sensibilización sobre el consumo crítico y consciente hacia la población consumidora. Además, la proximidad entre personas productoras y consumidoras refuerza el carácter local de estas redes, lo que puede ser base para futuros análisis, como el cálculo de la huella de carbono o la reducción de emisiones asociadas al consumo local.

La colaboración entre estas iniciativas, respaldadas por movimientos sociales emblemáticos y por la ampliación de sus vínculos hacia nuevas redes, representa un entramado con capacidad para promover transiciones agroecológicas en un territorio más amplio, hacia un sistema alimentario local más incluyente y saludable.

Para avanzar hacia ese escenario se sugiere, por una parte, impulsar un Sistema Participativo de Garantía regional que fortalezca el acceso de las

productoras y productores a canales de comercialización diversos; por otra parte, generar alianzas entre las iniciativas sociales y las instituciones para aprovechar su trayectoria histórica y experiencias e incidir en el diseño e implementación de políticas públicas que favorezcan las transiciones agroecológicas y el escalamiento de la agroecología alrededor de Xalapa.

Finalmente, se espera que la información generada sea una herramienta útil para las personas y colectivos participantes de las cuatro RAA, que les ayude a visualizarse en el territorio y generar análisis colectivos que integren las perspectivas y visiones de quienes, con su trabajo, hacen posible el acceso a alimentos sanos y culturalmente significativos para la región en Veracruz.

7. Agradecimientos

Este trabajo fue posible gracias a la beca de la SECIHTI para llevar a cabo la investigación en El Colegio de Veracruz, Doctorado en Desarrollo Regional Sustentable (2022-2025), así como a la participación, confianza y generosidad de las personas que integran la Red de Producción y Consumo Sano y Solidario Pixcando, el Tianguis Agroecológico de Xalapa, la Red de Economía Solidaria La Gira y el Mercado Quetzalcalli.

8. Referencias

- Arellanes-Cancino, Y. y Juárez, N. H. (2022). Mercados tianguis tradicionales y experiencias de redes alimentarias alternativas: diferencias y similitudes en torno a la solidaridad económica. En M. Fierro Leyva (Coord), *La solidaridad en la pandemia: economía local en el entorno de Acapulco* (pp.179-202). México: Univ. Autónoma de Guerrero y Plaza y Valdés, S.A. de C.V.
- Azdy, R. A., y Darnis, F. (2020). *Use of Haversine formula in finding distance between temporary shelter and waste end processing sites*. Artículo presentado en el Journal of Physics: Conference Series. doi: 10.1088/1742-6596/1500/1/012104
- Barrera Bassols, N. y Elizondo, C. (2022). Caminos diversos hacia la soberanía alimentaria. En A. Bartra Vergés, E. Pérez Suárez, M. G. Hernández García, S. Medellín Urquiaga, H. García Crespo, H. Robles Berlanga, y W. Castañeda Abad (Coords.), *Revoluciones Agroecológicas en México* (pp. 53-56). México: Instituto de Estudios para el Desarrollo Rural Maya A.C., Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.

- Barrios, E., Gemmill-Herren, B., Bicksler, A., Siliprandi, E., Brathwaite, R., Moller, S., ... Titttonell, P. (2020). The 10 Elements of Agroecology: enabling transitions towards sustainable agriculture and food systems through visual narratives. *Ecosystems and People*, 16(1), 230-247. doi:10.1080/26395916.2020.1808705
- Benedetti, J. y Araldi, A. (2024). Spatial proximity in 'local' Alternative Food Networks: a case study of AMAP in France. *Applied Geography*, 171, 103-401. doi: 10.1016/j.apgeog.2024.103401.
- Bocco, R. M. (2023). Entramados agroalimentarios yuxtapuestos: entre los modos hegemónicos y las formas comunales de producir y comercializar alimentos en Córdoba, Argentina. *Alternativa. Revista de Estudios Rurales*, (13), 55-79. Recuperado de <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/alter-nativa/article/view/45091>
- Borrego, A. y Carlón Allende, T. (2021). Principales detonantes y efectos socioambientales del boom del aguacate en México/ Major Drivers and Socio-Environmental Effects of the Avocado Boom in Mexico. *Journal of Latin American Geography*, 20(1), 154-184. doi: 10.1353/lag.2021.0006.
- CONEVAL. (2022a, 15 de febrero de 2022). ¿Qué son las canastas alimentaria y no alimentaria? *Blog CONEVAL. Evaluar Sirve*. Recuperado de <https://blog.coneval.org.mx/2022/02/15/que-son-las-canastas-alimentaria-y-no-alimentaria/>
- CONEVAL. (2022b). *Grado de Rezago Social en las AGEB urbanas de las localidades de Veracruz de Ignacio de la Llave*. Recuperado de https://www.coneval.org.mx/Medicion/IRS/Paginas/Rezago_social_AGEB_2020.aspx.
- Díaz-Castanys Yanguas, P. (2022). *Barreras legales a la distribución agroecológica. Tres estudios de caso en Granada* (Tesis de maestría, Universidad de Córdoba, España). Recuperado de <http://hdl.handle.net/10396/22537>

- Durán Molina, L. M., García Barradas, O., Díaz Martínez, M. E., Gómez Martínez, M. J., Mendoza Cervantes, G., y Argumedo Delira, R. (2024). Actividades agrícolas y uso de glifosato en el ejido de Bella Esperanza, Coatepec, Veracruz. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 15(2). doi: 10.29312/remexca.v15i2.3204
- Escalona Aguilar, M. Á. (2010). *Los tianguis y mercados locales de alimentos ecológicos en México: su papel en el consumo, la producción y la conservación de la biodiversidad y cultura* (Tesis doctoral, Universidad de Córdoba, España). Recuperado de <http://hdl.handle.net/10396/3516>
- Escalona Aguilar, M. Á. y Menchaca Pardow, A. A. (2023). Construcción de transiciones agroecológicas desde la defensa del territorio en Xalapa, Veracruz. *El Jarocho Cuántico*, 4(41), 5. <https://jornadaveracruz.com.mx/el-jarocho-cuatico-febrero-2023/>
- ESRI. (2019). ArcMap. (Version 10.8).
- Ferguson, B. G., Maya, M. A., Giraldo, O., Mier y Terán Giménez Cacho, M., Morales, H., y Rosset, P. (2019). Special issue editorial: What do we mean by agroecological scaling? *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 43(7-8), 722-723. doi: 10.1080/21683565.2019.1630908.
- García Bustamante, R. (2015). *Tianguis alternativos locales en México, como puntos de encuentro micropolítico: en la búsqueda de posibilidades de vida en el presente* (Tesis doctoral) Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.
- Giraldo, O. F. (2022). *Multitudes agroecológicas*. Yucatán, México: UNAM.
- González de Molina, M., López García, D., y Guzmán Casado, G. I. (2017). Politizando el consumo alimentario: estrategias para avanzar en la transición agroecológica. *REDES: Revista do Desenvolvimento Regional*, 22(2), 31-55. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6354675>.

- González De Molina, M. y Lopez-Garcia, D. (2021). Principles for designing Agroecology-based Local (territorial) Agri-food Systems: A critical revision. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 45(7), 1050-1082. doi: 10.1080/21683565.2021.1913690.
- Guzmán Ramírez, N., Galaviz Armenta, T., Pensado Fernández, J. A., y Zambrano Bernal, X. (2021). Organizaciones y reconfiguración del territorio en la zona metropolitana de Xalapa. *Mirada Antropológica*, 16(20), 32-55. Recuperado de <https://rd.buap.mx/ojs-dm/index.php/mirant/article/view/634>.
- Hensler, L., Jarri, L., Estrada Paulin, I., Castellanos, R., Lucero Rodríguez, E., Cruces, M., y Merçon, J. (2020). Economía solidaria en red. Una experiencia de articulación multiactoral para el cuidado de nuestro territorio en Xalapa, México. En S. A. de Sousa Fernandes (Org.), *Educação e produção de saberes no campo: soberania alimentar e agroecologia em comunidades tradicionais e assentamentos* (pp. 55-73). Curitiba, Brasil: Editora CRV.
- Hensler, L., Merçon, J., Estrada Paulin, I., González-González, R., Paradowska, K., Bravo Reyes, L., y Cesareo López, V. (2019). Metodologías participativas para la coestión del territorio. Una experiencia de aprendizaje colectivo en Veracruz, México. En P. Paño Yáñez, R. Rébola, y M. Suárez Elías (Comps.), *Procesos y metodologías participativas. Reflexiones y experiencias para la transformación social* (pp. 235-260). Uruguay: CLACSO. Recuperado de https://biblioteca.clacso.edu.ar/clacso/gt/20190318060039/Procesos_y_metodologias.pdf
- Hernández Castillo, F. (2019). *Caracterización de productos, productores y consumidores de los circuitos cortos* *Tax y Coalt del estado de Veracruz* (Tesis de maestría), Colegio de Postgraduados, Manlio Fabio Altamirano, Veracruz.
- Hernández Sampieri, R. y Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. México: McGraw-Hill Interamericana Editores.
- INEGI. (2006). *Red Hidrográfica Digital de México escala 1:250 000*. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463598428>

- INEGI. (2022a). *Conjunto de datos vectoriales de la carta de Aguas superficiales. Escala 1:250 000. Serie I*. Recuperado de <https://datos.gob.mx/busca/dataset/conjunto-de-datos-vectoriales-de-la-carta-de-aguas-superficiales-escala-1-250-000-serie-i>.
- INEGI. (2022b). *Marco Geoestadístico (Veracruz). Áreas geoestadísticas municipales*.
- INEGI. (s/f). *Conjunto de datos vectoriales de carreteras y vialidades urbanas edición 1.0*. Recuperado de <https://datos.gob.mx/busca/dataset/conjunto-de-datos-vectoriales-de-carreteras-y-vialidades-urbanas-edicion-1-0/resource/fc8223b3-f0ed-414f-8eea-77433e12b473>.
- López-García, D. y González de Molina, M. (2021). An operational approach to agroecology-based local agri-food systems. *Sustainability*, 13(15), 8443. doi: 10.3390/su13158443.
- Menchaca Pardow, A. A. (2024). *Estrategias de escalamiento de la Agroecología en la Zona Metropolitana de Xalapa, experiencias de trabajo colectivas con actores locales* (Tesis de maestría) Universidad Veracruzana, Xalapa, Ver.
- Michel-Villarreal, R., Hingley, M., y Bregoli, I. (2018). *Defining alternative food networks: A systematic literature review*. Artículo presentado en el International Food Marketing Research Symposium 2018, Bournemouth University, UK.
- Mier y Terán Giménez Cacho, M., Giraldo, O. F., Aldasoro, M., Morales, H., Ferguson, B. G., Rosset, P., Khadse, A., y Campos, C. (2018). Bringing agroecology to scale: Key drivers and emblematic cases. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 42(6), 637-665. doi: 10.1080/21683565.2018.1443313.
- Morales, F. (29 de abril de 2024). Escuela cierra por intoxicación de agroquímicos en la cosecha de papa. Recuperado de <https://avcnoticias.com.mx/reportaje-especial-veracruz/especiales-avc/353418/escuela-cierra-por-intoxicaci-in-de-agroqu-micos-en-la-cosecha-de-la-papa.html>.

- Rodríguez Guerrero, R. y Leal Martínez, G. (2023). Las Redes Alimentarias Alternativas en el occidente de México ante la contingencia sanitaria por Covid-19. En M. Solórzano Gil, M. de la Peña Domene, y P. Vázquez Piombo (Eds.), *Reflexiones ambientales y socioespaciales a partir del Covid-19: En territorios europeos y latinoamericanos*. Editorial ITESO. doi: 10.31391/0yg0wn96.
- Rosas-Domínguez, A., Piñar-Álvarez, M. Á., Valdés-Rodríguez, A. O., y Escalona-Aguilar, M. Á. (2024). Redes Alimentarias Alternativas en procesos de transición y escalamiento de las agroecologías. *Regions and Cohesion*, 14(1), 1-32. doi: 10.3167/reco.2024.140102
- Rothschild, F., Rivera Lara, E., Villatoro, G., Maganda, C., Meseguer, S., Estrada, I., y Dávila, D. (2022). Arte y comunicación comunitaria en la red de economía solidaria La Gira. *El Jarocho Cuántico*, 3(32), 6. Recuperado de <https://jornadaveracruz.com.mx/el-jarocho-cuatico-mayo/>.
- Shamah-Levy, T., Gaona-Pineda, E. B., Cuevas-Nasu, L., Valenzuela-Bravo, D. G., Morales-Ruan, C., Rodríguez-Ramírez, S., Méndez-Gómez-Humarán, I., Ávila-Arcos, M. A., Álvarez-Sánchez, C., y Ávila-Curiel, A. (2024). Sobre peso y obesidad en población escolar y adolescente. *Salud Pública de México*, 66(4, jul-ago), 404-413. doi: 10.21149/15842.
- Soberanes, R. (5 de junio de 2023). La fiebre del limón en Veracruz. *Pie de Página*. Recuperado de <https://piedepagina.mx/la-fiebre-del-limon-en-veracruz/>.
- Sotiru, M. N. (2023). Estrategias territoriales para el impulso de la agroecología en el cinturón hortícola platense: una apuesta a la construcción de un territorio-red. *Estudios Socioterritoriales. Revista de Geografía*, 34, 139-160. Recuperado de <http://hdl.handle.net/11336/232020>.
- Toledo, V. M., y Argueta, Q. (2024). The evolution of agroecology in Mexico, 1920-2023. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 12(1), 00092. doi: 10.1525/elementa.2023.00092.

- Vázquez, F., y Suárez, A. L. (2018). Las iniciativas ciudadanas para el rescate del río Sedeño. En L. Paré y H. García Campos (Coords.), *Gestión para la defensa del agua y el territorio en Xalapa, Veracruz* (pp. 113-142). México: UNAM, Instituto de Investigaciones Sociales. Recuperado de https://ru.iis.sociales.unam.mx/bitstream/IIS/5446/7/gestion_defensa_agua.pdf.
- Vidriales Chan, G. (2022). Más allá de la solidaridad. *El Jarocho Cuántico*, (32), 8. Recuperado de <https://jornadaveracruz.com.mx/el-jarocho-cuatico-mayo/>.
- Villatoro-Hernández, J. G., Vidal-Álvarez, M., Vázquez-Elorza, A., Tolentino-Martínez, J. M., y Wojtarowski Leal, A. (2024). Circuitos cortos de comercialización en la Zona Metropolitana de Xalapa, Veracruz, México, un análisis estructural para su fortalecimiento. *Estudios sociales. Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional*, 34(63). doi: 10.24836(es.v34i63.1399).



Percepción social sobre la conservación de la Reserva Ecológica Cerro de las Culebras, Coatepec, Veracruz, México

Angélica Patricia Figueroa Solís¹
María de los Ángeles Piñar Álvarez²
Pedro Martínez Olivarez³

Eje temático: Desarrollo socioambiental.

1. Introducción

Las Áreas Naturales Protegidas (ANP) surgen con la visión de conservar la naturaleza, perspectiva basada en no tocar y no alterar los espacios (Quirós-Arias, 2017). Así, las ANP son herramientas que permiten lograr la conservación de los recursos naturales (González Rosales y López Torres, 2021) y son necesarias debido a los servicios ecosistémicos que proveen a la humanidad (Minaya Gutiérrez, Chinguel Labán y López García, 2021). En este sentido, Palero Castro (2015) plantea que el manejo de la naturaleza debe ser integral como parte de la cultura. Asimismo, Arenas y Pérez Galán (2020) consideran que la humanidad tiende a transformar el paisaje debido a las actividades socioeconómicas y, en la medida en que la población incrementa, demandan una mayor cantidad de recursos naturales (Jiménez Sánchez, González Vera, Rosas Ferrusca y Calderón Maya, 2021). Ello va asociado a problemáticas ambientales no exclusivas de un territorio (Alva Fuentes, 2018).

En México, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, considera al país entre los 12 “megadiversos” del planeta, lo que significa que tiene entre el 10 al 12 por ciento de la biodiversidad mundial (CONABIO, 2003; CONANP, 2018; SEMARNAT, 2010). La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) define a las ANP como las zonas que necesitan ser preservadas y restauradas, y sobre las cuales, México tiene soberanía y jurisdicción

¹ apfigueroas.ddrs22@colver.edu.mx. El Colegio de Veracruz. Licenciada en Administración de Empresas Turísticas. Maestra en Desarrollo Regional Sustentable.

² mapinara@colver.edu.mx. El Colegio de Veracruz. Profesora e investigadora, SECIHTI-SNII, nivel 1. Estancia académica y de investigación en la Universidad de Granada-Instituto Universitario de Desarrollo Regional.

³ pemartinez@uv.mx. Universidad Veracruzana. Profesor e investigador, SECIHTI-SNII, nivel 1.

(DOF, 2024) por lo que representan el esfuerzo del Estado mexicano por tratar de lograr la sustentabilidad a través de la conservación (CONANP, 2018).

En este contexto, las políticas ambientales mexicanas establecen estrategias de conservación *in situ*⁴, es decir, centradas en proteger especies y ecosistemas en su entorno natural en lugar de trasladarlos a lugares artificiales como zoológicos o bancos de germoplasma (Palero Castro, 2015). En este marco, las ANP, consideradas instrumentos para conservar la biodiversidad (Ávila-López y Pinkus-Rendón, 2018), poseen desde los años noventa las bases legales e institucionales para garantizar su funcionamiento (Paz Salinas, 2005).

Sin importar la modalidad o categoría que adopten, las ANP –sean federales, estatales o municipales– se constituyen en el mecanismo espacial más importante de la política de conservación y manejo de los recursos naturales del país (CONANP, 2020; CONANP, 2025). Su relevancia radica en que concentran los esfuerzos normativos, administrativos y territoriales orientados a la protección de la biodiversidad a escala nacional.

Asimismo, las estrategias de conservación dependen de las características de los ecosistemas, tales como selvas, arrecifes, bosque de niebla, manglar, entre otros, contribuyendo a mantener el patrimonio natural del país (Vázquez-Márquez, Ramírez-García, Palacios-Rangel y Monterroso-Rivas, 2020), en otras palabras, las ANP en México se han creado bajo una visión unidimensional de carácter ecológico, sin considerar de forma suficiente los aspectos sociales y culturales involucrados (Hensler y Merçon, 2020).

Derivado de lo anterior, Zamora Lomelí (2020), señala que uno de los principales desafíos del país en la conservación de las ANP es trabajar con la población y su percepción social (Tuanmu, Viña, Yang, Chen, Shortridge y Liu, 2016).

1.1 Percepción social sobre el Área Natural Protegida como investigación sistematizada

La investigación resulta ser útil como estudio que relaciona la opinión pública y la política, haciendo uso del mapa de actores, las entrevistas y encuestas para explorar percepciones sociales. Desde un abordaje psicológico, la percepción es concebida como un mecanismo básico de conducta, donde el individuo tiene una impresión por alguna cuestión externa a él (Bartley, 1978): aquello externo

⁴ Las estrategias de conservación *in situ* son (1) las Áreas Naturales Protegidas (ANP), (2) los Corredores Biológicos (conectan hábitats fragmentados para permitir el movimiento de especies y mantener la diversidad genética, ayudando a reducir el aislamiento de poblaciones silvestres), (3) las Unidades de Manejo para la Conservación de Vida Silvestre (UMA), entendidos como espacios donde comunidades locales manejan y conservan especies silvestres de forma sustentable, (4) la conservación comunitaria, con el apoyo a comunidades rurales, pescadores y campesinos, que protegen biodiversidad en sus tierras, a través de incentivos económicos y capacitación para prácticas sostenibles, (5) el monitoreo y vigilancia ecológica, para detectar amenazas como incendios, caza furtiva o enfermedades, (6) la bioseguridad y regulación genética y (7) la educación ambiental y turismo sostenible, con la promoción de actividades que sensibilicen a la población y generen ingresos sin dañar el entorno (SEMARNAT, 2010).

al individuo (objeto social) es clasificado, explicado y evaluado, generando una valoración positiva o negativa, puesto que se tiene una representación social. Es así que la percepción social puede variar por la información a la que el ciudadano está expuesto. Si la percepción social se dirige al contexto de un objeto (Áreas Naturales Protegidas), éste influye en el pensamiento, emociones y conducta de los ciudadanos. Al tratarse de ANP sujetas a acciones de gobierno (estatal y municipal), la política pública (acciones) está sujetas a una evaluación constante, a partir del objeto (ANP), por parte de la ciudadanía. En este sentido, la percepción social es clave para valorar la gestión pública (Delgadillo y Castillo, 2010).

En otras palabras, conocer cómo la población percibe la problemática asociada a un Área Natural Protegida resulta fundamental de cara a la formulación de políticas públicas, por lo que el monitoreo continuo de los cambios en la percepción a lo largo del tiempo se vuelve esencial para garantizar la pertinencia y eficacia de la política ambiental implementada. En este sentido, González Rosales y López Torres (2021) señalan la importancia de conocer las percepciones de los actores en torno a la situación actual y a futuro de las ANP para la formulación de políticas públicas dado que dichos espacios, se están convirtiendo en destinos turísticos sin contar con una planeación estratégica previa o una evaluación adecuada. Si bien el objetivo de las ANP es generar la conservación a través del equilibrio entre naturaleza y sociedad, el reto es articular los espacios con los componentes sociales, políticos, económicos, culturales y ecológicos, como parte de un todo. La alteración de uno de los componentes repercute a los demás, tal y como señalan Ayala Arzate, Cruz Jiménez, Segrado Pavón, y Serrano Barquín (2021).

Con estos antecedentes, en el presente trabajo se abordará un Área Natural Protegida del estado de Veracruz, México, declarada con la categoría estatal de reserva ecológica desde 1992. Tras su declaratoria, se elaboró un Programa de Manejo, que nunca fue publicado, lo que dificulta evaluar el éxito o fracaso de su implementación (Vázquez-Márquez et al., 2020). Al deterioro físico del ANP, inserta en el núcleo urbano de Coatepec en el estado de Veracruz, se suma el desconocimiento de la percepción social en torno a la reserva ecológica como proveedora de servicios ecosistémicos (Figueroa-Solís, Martínez-Olivarez y Piñar-Álvarez, 2022).

Sumado a lo anterior, la crisis sanitaria originada por el COVID 19 (Piñar-Álvarez y Silva-Zamora, 2021), hace resurgir una visión en la conservación o uso sustentable de espacios naturales, como una opción para generar fuentes de trabajo y contribuir a la conservación del territorio, teniendo como propósito fundamental la regeneración ambiental y social de los territorios (Miroglio Gouin, Piñar-Álvarez, Moreno Saucedo y García-Contreras, 2024). La conservación, implica desafíos dado que está inmerso el patrimonio cultural, natural y los servicios ecosistémicos ofrecidos a la sociedad (González Bustamante, 2021; DOF, 2024). De ahí que la conservación de los espacios naturales, en términos generales, y de la reserva ecológica *Cerro de las Culebras*, como se le conoce

al ANP en cuestión, en particular, sea una necesidad. Lo que interesa entonces, es acercarse a la percepción social sobre la conservación de dicha reserva, tanto de la comunidad local (propietarios de los terrenos, vecinos alrededor del ANP) como de las instituciones públicas, estatales y municipales, activas en su territorio.

Teniendo en cuenta esta justificación, la pregunta de investigación es ¿cuál es la percepción social de los actores clave (propietarios, vecinos e instituciones) de cara a la conservación de la reserva ecológica *Cerro de las Culebras*, en Coatepec, Veracruz México?

2. Metodología

2.1 Área de estudio

La reserva ecológica *Cerro de las Culebras* se localiza en la localidad urbana de Coatepec, Veracruz, México (Figura 1), siendo un importante espacio captador de agua que evita la erosión y el asolvamiento de las redes de drenaje de la ciudad, representando un patrimonio natural de importante belleza y valor recreativo (GOEV, 1992).

Metodológicamente el objetivo, que era conocer la percepción social de los actores clave (propietarios, vecinos e instituciones) de cara a la conservación de la reserva ecológica, se abordó con un enfoque mixto, con técnicas cualitativas y cuantitativas, tras la realización de un mapa de actores. Desde el punto de vista cualitativo, la percepción social de las instituciones y propietarios, que habitan fuera del ANP, se abordó con la entrevista, haciendo uso de una guía de entrevistas semiestructurada. Cuantitativamente, la percepción social de los vecinos del *Cerro de las Culebras*, se midió a través de la encuesta, con la aplicación de un cuestionario. Ambos instrumentos se aplicaron de forma presencial. Los datos cuali-

Figura 1. Reserva ecológica Cerro de las Culebras en la localidad urbana del municipio Coatepec, Ver., México.



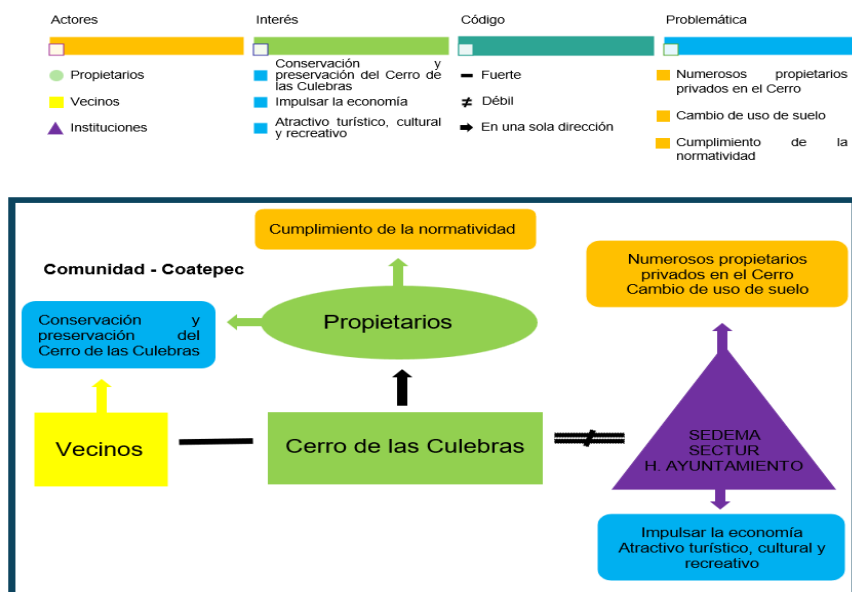
Fuente: Elaboración propia.

tativos se analizaron de forma vertical, horizontal y contrastiva. Los cuestionarios se analizaron haciendo uso de la estadística descriptiva (Figuroa-Solís, 2022).

2.2 Mapa de actores y muestra

El mapeo de actores se define como la relación social que se da entre actores e instituciones sociales (Tapella, 2007) o el esquema que representa la realidad social Ortiz, Matamoro y Psathakis (2016). Igualmente, Reck y Martínez (2010) lo definen como la acción conjunta de las personas, que habitan un espacio o territorio, para lograr la sustentabilidad. Por lo tanto, los grupos sociales y las organizaciones pueden repercutir positiva o negativamente en la conservación de los espacios (Tapella, 2007). Su identificación es crucial, previo al levantamiento de datos. Por ello se plantea un mapeo de actores buscando la problemática y línea de interés que cada uno de ellos manifiesta, y la vinculación existente entre propietarios, vecinos e instituciones (Figura 2).

Figura 2. Mapeo de actores en la reserva ecológica Cerro de las Culebras, Coatepec, Veracruz, México.



Fuente: Elaboración propia.

La interpretación del mapeo en el que se estableció un código para conocer la relación, interés e interacciones que se dan (si bien en el esquema no se manifiestan los niveles de poder, debido a que se quiere reflejar la participación, la comunicación y el involucramiento en la conservación de dicho espacio natural), dicta lo siguiente: *El Cerro de las Culebras* presenta tres tipos de actores: propietarios, instituciones públicas y privadas (sociedad civil sin fines de lucro) y vecinos.

El vínculo más fuerte es el de los *vecinos*, que se encuentran alrededor del *Cerro de las Culebras*. En cuanto a los propietarios su línea se genera en una sola dirección: el interés de hacer uso de sus propiedades. En el caso de las *instituciones gubernamentales de carácter estatal* (SECTUR, SEDEMA) o *municipal* (H. Ayuntamiento de Coatepec), se señala la importancia de este espacio a nivel ambiental y turístico, sin embargo, poseen un código débil debido a la falta de coordinación entre las mismas y su incapacidad de negociar con los propietarios particulares del *Cerro de las Culebras*. Así entonces, para conocer las percepciones en torno al *Cerro de las Culebras*, dentro del mapa de actores que interactúan en la reserva ecológica, se seleccionó una muestra.

2.3 Muestra de instituciones

Las instituciones consideradas para aplicar la guía de entrevistas fueron, a nivel estatal, la Secretaría de Turismo y Cultura (SECTUR) y la Secretaría de Medio Ambiente (SEDEMA), a nivel municipal, la Dirección de Turismo del H. Ayuntamiento de Coatepec, y la Iglesia de San Jerónimo (Tabla 1).

Tabla 1. Instituciones. Datos generales de los entrevistados (2022).

Sector	Nombre de la Institución a nivel estatal	Nivel de formación educativa:	Cargo que desempeña en la institución:	Género / Edad (años):	Fecha de la entrevista:
Público Estatal	SECTUR	Maestría	Director de Pueblos Mágicos	Masculino / 37	17/02/2022
	SEDEMA	Maestría	Director de Recursos Naturales	Femenino / 50	25/03/2022
	SEDEMA	Maestría	Técnico ambientalista	Masculino / 42	07/03/2022
Público Municipal	Dirección General de Turismo	Maestría	Directora	Femenino / 42	09/02/2022
Religioso	Iglesia de San Jerónimo, Coatepec	Licenciatura	Párroco	Masculino / 70	22/03/2022

Fuente: elaboración propia.

Los entrevistados cuentan con amplia trayectoria en las instituciones que representan. Las entrevistas se hicieron entre febrero y marzo de 2022 con una guía de entrevistas semiestructurada. Todos tienen en común su presencia en el *Cerro de las Culebras*, el cual consideran un espacio que se debe conservar y procurar a largo plazo. Las instituciones gubernamentales, tanto de nivel estatal como municipal, están presentes por su vinculación con el espacio natural y la necesidad del aprovechamiento sustentable. SECTUR, a través de su dirección en Planeación y Desarrollo Regional Turístico. SEDEMA como ente regulador de la conservación y preservación del ANP, y la Iglesia de San Jerónimo, interesada en la conservación con acciones de mantenimiento y propietaria de la cúpula del cerro, donde se encuentra el mirador turístico.

2.4 Muestra de propietarios

Se entrevistaron a cuatro de los propietarios originarios que cuentan con la mayor cantidad de superficie en hectáreas dentro del *Cerro de las Culebras* (Tabla 2). Todos están dedicados al comercio o servicio de bienes. A ellos se les aplicó una entrevista semi estructurada de forma presencial.

Tabla 2. Propietarios. Datos generales de los entrevistados (2021-2022).

Propietarios del Cerro de las Culebras	Formación educativa	Género	Edad	Lugar	Día
PCG 1	Sin reportar	Masculino	86 años	Coatepec	08/12/2021
PCG 2	Primaria trunca	Masculino	89 años	Cerro de las Culebras	14/12/2021
PCG 3	Bachillerato	Masculino	53 años	Coatepec	28/02/2022
PCG 4	Licenciatura	Masculino	67 años	Coatepec	18/03/2022

Fuente: elaboración propia.

2.5 Muestra de Vecinos

La muestra de vecinos que iban a participar en la investigación se determinó, a partir de la fórmula para poblaciones definidas. Se utilizó el software de uso libre de INEGI, y la herramienta de mapa digital para la georreferenciación en el *Cerro de las Culebras*. Con un rango de 25 metros alrededor del ANP, dio como resultado la aplicación de 43.3 encuestas, que se redondearon a 45 a aplicar entre vecinos. Se les aplicó un cuestionario a fin de conocer su percepción sobre el *Cerro de las Culebras*, dada su cercanía con la reserva ecológica. De los vecinos entrevistados, 32 eran mujeres y 13 hombres. Un total de 21 cuentan con licenciatura, mientras que 3 grupos integrados por cinco personas reportan estudios de primaria, preparatoria y maestría. Las edades oscilaban entre 18 y 85 años y viven, como mínimo, cinco años en la zona limítrofe con el *Cerro de las Culebras*.

2.6 Levantamiento y análisis de datos cuantitativos y cualitativos: categorías comunes

El diseño del instrumento de investigación constó de preguntas abiertas y cerradas, divididas en ejes analíticos con categorías comunes (Tabla 3), aplicados a instituciones, los propietarios y los vecinos.

3. Resultados

Las categorías sobre la percepción del Cerro de las Culebras giraron en torno a dos ejes analíticos: *Percepción actual del Cerro de las Culebras* (conocimiento del ANP, los programas de fomento existentes en el ANP, los obstáculos para la conservación y preservación del ANP, los beneficios del ANP y la vinculación institucional existente) y *Percepción sobre la perspectiva a futuro del Cerro de las Culebras*, cuestionando el uso necesario y la actitud del actor.

Tabla 3. Levantamiento de datos: Ejes analíticos y categorías.

Ejes analíticos	Categorías
Instituciones (INST)	
Datos generales	Institución entrevistada, nombre del entrevistado, nivel de formación educativa, cargo que desempeña en la institución, edad, género, lugar y fecha de la entrevista.
I. Percepción actual del Cerro de las Culebras (ANP)	1) Conocimiento del ANP. 2) Programas de fomento en el ANP. 3) Obstáculos para la conservación y preservación del ANP. 4) Beneficios del ANP. 5) Vinculación institucional: definición y tipología.
II. Visión futura del Cerro de las Culebras	6) Uso del ANP. 7) Actitud del entrevistado.
Propietarios (PCC)	
Datos generales	Nombre de la entrevistada (o), nivel de formación educativa, edad, género, lugar y fecha de la entrevista.
I. Propiedad en el Cerro de las Culebras (ANP)	1. Superficie que tiene en el ANP. 2. Año de ser propietario. 3. Ocupación de su terreno. 4. Participación a talleres o eventos de educación o cultura ambiental. 5. Acciones de conservación o restauración en su terreno o en el ANP. 6. Gestión de apoyos o estímulos para la protección de la ANP. 7. Organizaciones de la sociedad civil involucradas en el ANP. 8. Eventos o festividades cívicas o religiosas celebradas en el ANP.
II. Percepción actual del Cerro de las Culebras	9. Servicios Ambientales. 10. Programas de preservación o conservación del ANP. 11. Opinión respecto a los visitantes. 12. Actividades del municipio por mantener limpio el ANP. 13. Contribución como propietarios en la conservación del ANP.
III. Visión futura del Cerro de las Culebras	14. Uso del ANP. 15. Contribución del entrevistado ante el ANP.
Vecinos (VC)	
Datos generales	Nombre del entrevistado, nivel de formación educativa, edad, género, lugar y fecha de la entrevista
I. Percepción actual del Cerro de las Culebras (ANP)	1. Conocimiento de servicios ambientales. 2. Programas de preservación o conservación en el ANP. 3. Participación del municipio por mantener limpio el ANP. 4. Situaciones incómodas por estar cerca del ANP. 5. Contribución a la conservación del ANP.
II. Visión futura del Cerro de las Culebras	6. Uso del ANP. 7. Actitud del encuestado ante el ANP.

Fuente: elaboración propia.

3.1 Conocimiento del ANP Cerro de las Culebras

Todas los entrevistados tienen conocimiento de la existencia de la Reserva Ecológica Cerro de las Culebras como Área Natural Protegida.

3.2 Programas de fomento en el ANP

Todos los entrevistados pertenecientes a las instituciones desconocen la presencia de programas de preservación o fomento económico orientados a la conservación

de la reserva ecológica. Ahora bien, en el caso de SEDEMA y la Iglesia de San Jerónimo, señalaron solamente la implementación de un Programa de Empleo Temporal (PET), centrado en la limpieza de maleza y retiro de basura en el cerro.

Mientras que por su parte los *vecinos* exponen que, en cuanto a los programas de fomento, 36 de los 45 vecinos del Cerro de las Culebras manifestaron desconocer la presencia de programas de fomento o reforestación. Sólo se conocen acciones concretas de limpieza de la maleza y de la basura.

Los propietarios entrevistados afirman no haber gestionado recursos desde su declaratoria (1992) para el *Cerro de las Culebras*. Concuerdan todos ellos que la única institución que está presente y conserva el Cerro de las Culebras es la Iglesia de San Jerónimo, lo que está asociado a la presencia del monumento a Cristo Rey. Para los propietarios, la iglesia está presente en el ANP, gracias a las procesiones y eventos de carácter religioso dentro del *Cerro de las Culebras*, especialmente en Semana Santa. Un entrevistado afirma: “Los grupos católicos del monumento de Cristo Rey vienen a limpiar y a reforestar. Sólo la Iglesia de San Jerónimo ha ayudado a conservar este espacio” (PCC3, 2022).

De los cuatro propietarios del Cerro de las Culebras sólo uno de ellos ha participado en eventos de restauración y limpieza, debido a que tiene su hogar dentro del cerro: “Voluntariamente hago lo que puedo para mantener limpio el Cerro de las Culebras, chapeo y levanto la basura que dejan los del pueblo” (PCC2, 2022). Así mismo, los propietarios concuerdan con la inexistencia de programas de conservación, sin embargo, afirman “(...) hay gente que viene de fuera y de otros estados a visitar y reforestar sin preguntar a los propietarios. También vienen las escuelas, pero desconozco programas para la conservación del Cerro” (PCC1, 2022).

Los entrevistados señalan que el cerro no es de todos, es propiedad privada y afirman: “(...) el cerro es de los legítimos propietarios del terreno, sobre los que se realizó la declaratoria en el año 1992” (PCC4, 2022). Para los cuatro propietarios, antes y después de la declaratoria, cualquier acción o actividad a desarrollar en el cerro debe contar con la anuencia o autorización del propietario del terreno donde se tenga programado realizar la actividad.

3.3 Obstáculos para la conservación y preservación del ANP

Las instituciones mencionaron que dentro de los principales obstáculos en la conservación del ANP se encuentra la construcción inmobiliaria, el cambio de uso de suelo y la venta de terrenos. Tan sólo el sector religioso señala la importancia de aclarar la situación jurídica del *Cerro de las Culebras* para su conservación:

El principal obstáculo a la conservación del *Cerro de las Culebras* es que es de todos y de nadie. Lo más importante es plantear la situación jurídica, hay muchos dueños y hay incertidumbre y por eso hay cambio de uso de suelo. (INST 4, 2022)

Otro obstáculo citado es la presencia de residuos sólidos en el ANP y la poca participación de los ciudadanos e instituciones en la limpieza de la reserva ecológica.

En cuanto a los obstáculos que ven los vecinos encuestados, el mayor inconveniente es la inseguridad, no en todo el cerro, sino en zonas específicas. Otro obstáculo que frena la visita del cerro es la presencia, en palabras de los entrevistados, de “mariguanos”, “borrachos y drogadictos”. A ello se suma la sempiterna presencia de basura.

Los propietarios señalan que el principal obstáculo a la conservación que señalan es la escasa limpieza del cerro: todos los propietarios entrevistados manifestaron no contar con el apoyo del municipio: “Lo único que hizo el municipio, hace algunos meses, fue contratar a unas jovencitas unas semanas para que vinieran a limpiar o jóvenes con empleo temporal. Fuera de eso no hacen nada. No hay apoyo” (PCC1, 2022). Asimismo, los propietarios manifestaron que, en sus terrenos, gracias al chapeo, mantienen y conservan el cerro. Sólo un propietario externó no hacer nada por el cerro. Asimismo, señalan que no hay comunicación efectiva: “(...) hace treinta años (1992) éramos 70 propietarios y treinta años después (2022) somos 200 propietarios y varias hectáreas se han perdido (P1, 2022)”. En el momento de la declaratoria (GOEV, 1992) la reserva ecológica contaba con 39 has. Pulido-Salas, Benítez Badillo, Osorio Rosales, Equihua Zamora y Borja Luyando (2007) señalan quince años después (2007) que cuenta con 32 has., por cambio de uso de suelo.

3.4 Beneficios del ANP: servicios ecosistémicos

Todas las instituciones reconocen los servicios ecosistémicos que proporciona el ANP, principalmente la captación y filtración del agua.

Del total de 45 vecinos encuestados, un total de 24 vecinos reconocen lo que son servicios ecosistémicos que proporciona el ANP (captación y filtración de agua, generación de oxígeno, recreación). Los otros 21 vecinos desconocen el concepto.

En cuanto a los propietarios, sólo uno de los propietarios menciona no reconocer lo que son los servicios ecosistémicos. Los otros tres propietarios saben de la importancia de los servicios ecosistémicos que proporciona el *Cerro de las Culebras*: “(...) nosotros nacimos aquí, siempre nos hemos beneficiado de la tierra, comemos de ahí, de ahí vivimos. Por supuesto que sé lo que hace la naturaleza por nosotros” (PCC1, 2022). “El cerro es patrimonio natural de importante belleza y valor recreativo” (PCC4, 2022).

3.5 Vinculación institucional

En relación con la vinculación institucional, SECTUR, no se coordina con ninguna otra institución. El H. Ayuntamiento y la iglesia se coordinan para la limpieza del *Cerro de las Culebras* y para la procesión en Semana Santa, año con año.

Del total de 45 vecinos encuestados, 31 de ellos manifestaron que el H. Ayuntamiento de Coatepec, no hace nada por conservar el *Cerro de las Culebras*; ocho vecinos manifestaron no estar enterados y uno no tener conocimiento de si interviene o no en la reserva ecológica. Tan sólo cinco encuestados nombraron al H. Ayuntamiento de Coatepec y su labor en materia de seguridad, con la salvedad que vigilan solamente la parte alta del cerro.

3.6 Uso del ANP con una visión a futuro del Cerro de las Culebras

Para las instituciones, tanto SECTUR como el H. Ayuntamiento de Coatepec y la Iglesia de San Jerónimo, concuerdan con la idea de que el *Cerro de las Culebras* es un espacio con gran potencial turístico, por lo que la actividad turística puede ayudar a conservar y restaurar. SEDEMA considera que debe seguir siendo un área de conservación y preservación.

En relación con el uso del *Cerro de las Culebras*, los propietarios señalan la importancia del potencial uso turístico. Dos de los cuatro propietarios entrevistados mencionaron que les agrada recibir visitantes en el cerro, mientras que los otros dos tuvieron comentarios encontrados: “(...) el cerro es visitado por su naturaleza, pero no genera dinero para nadie” (PCC1, 2022).

3.7 Actitud del entrevistado ante la conservación del Cerro de las Culebras

De las instituciones, sólo SEDEMA comentó no estar de acuerdo con la idea de que el Cerro de las Culebras incentive la actividad turística, debido a la situación jurídica que enfrenta. Las demás instituciones consideran que puede ser un espacio adecuado para impulsar la regeneración del espacio y el desarrollo turístico de la región. Así mismo, todas las instituciones concuerdan en la necesidad de incentivar medidas de educación ambiental para impulsar la conservación.

De los *vecinos*, casi el 50% de ellos contribuye con la limpieza, con la finalidad de mantener su belleza. En cuanto al uso del espacio del cerro, 34 vecinos declararon que este espacio debe preservarse y conservarse para generaciones futuras; cinco vecinos consideran que tiene potencial como espacio turístico y cuatro consideran que su uso es para realizar ejercicio o deporte, con la instalación de aparatos. La mayoría de los vecinos afirma que el cerro podría ser utilizado como espacio recreativo o turístico, mientras que diez de ellos consideran es inseguro. Asimismo, 34 de los 45 vecinos destacaron la necesidad de implementar medidas de educación ambiental, mientras que 11 vecinos señalaron la inutilidad de éstas.

Los propietarios que participaron en la investigación no ocupan la propiedad, salvo uno de ellos que siembra uvas para consumo personal. Una respuesta unánime de los entrevistados es que todos desearían plantar café de sombra, como forma de conservar el cerro. Respecto a generar estrategias de conservación, están de acuerdo que es necesario conservarlo, sin embargo, la certeza

jurídica es crucial: “El gobierno podría comprarnos las tierras. Si no compran, que nos den opciones y luego que establezcan las estrategias de conservación que quieran” (PCC1, 2022). En relación con la necesidad de talleres de educación ambiental en el cerro, los propietarios están de acuerdo con formar hábitos de comportamiento responsable hacia la reserva, si bien un propietario asevera que “los talleres no sirven para nada, dado que la educación emana de los hogares” (PCC1, 2022).

4. Discusión de resultados

4.1 Conocimiento del Área Natural Protegida Cerro de las Culebras

En relación con el *conocimiento del Área Natural Protegida Cerro de las Culebras*, Olmos Martínez, Arizpe Covarrubias, Contreras Loera, González Ávila y Casas Beltrán (2016) mencionan que la percepción social está estrechamente relacionada con el grado de conocimiento que tienen de la misma y el valor intrínseco de la biodiversidad. Esta percepción determina los juicios y el reconocimiento tanto del ambiente físico como social del entorno (Rojas Casarrubias, Rodríguez Alviso, Aparicio López, Castro Bello, Villerías Salinas y Bedolla Solano, 2023). En el caso de las instituciones, los vecinos y los propietarios hay unanimidad en la percepción social: todos ellos conocen y consideran necesario conservar la reserva ecológica.

Por su parte, Zamora Lomelí (2020) señala que el modelo de conservación de la biodiversidad en México enfrenta constantemente el desafío de trabajar con la población que habita en las ANP. El *Cerro de las Culebras* tiene propietarios y se identifican tensiones y retos para la administración del ANP. Coincidiendo con Zamora Lomelí (2020) y Vázquez-Márquez et al. (2020), las ANP constituyen el instrumento más importante en la política de conservación de los recursos naturales, pero no se trabaja con la población que habita en ellas, propietarios, y vecinos. Por su parte, SECTUR y la Dirección de turismo del H. Ayuntamiento de Coatepec están totalmente desvinculados de SEDEMA y del cerro. Las instituciones no trabajan de forma colaborativa, los vecinos se quejan de las instituciones y los propietarios quieren vender. Tan sólo SEDEMA activó en el año 2020 el Programa de Apoyo de Empleo Temporal, para aquellas personas que se quedaron sin empleo, tras la pandemia de COVID-19. La reserva ecológica fue beneficiada por el Programa (Garizurieta, 2021).

4.2 Obstáculos para la conservación y preservación del ANP

En relación con los *obstáculos para la conservación y preservación del ANP*, el incremento de propietarios y cambio de uso de suelo son el obstáculo más importante: De 1992 al 2022 se han pasado de 70 propietarios a 200 propietarios, lo que dificulta la comunicación. A ello se une la reducción de hectáreas declaradas

como reserva, de 39 a 32 ha en 15 años, tal y como señalan Pulido-Salas et al. (2007): es urgente un Programa de Manejo del ANP. Al respecto Santos (2009) considera que el establecimiento de áreas protegidas genera cambios económicos, sociales y políticos. Esto coincide con Olmos Martínez et al. (2016) quienes afirman que las ANP están continuamente amenazadas por el cambio de uso de suelo por la influencia de las actividades antropogénicas, de ahí la necesidad de formular estrategias de preservación y conservación. Efectivamente, el cerro es parte del paisaje que caracteriza a Coatepec y es no sólo un *geo símbolo*, que forma parte del escudo oficial del municipio, sino también un importante captador de agua, que evita la erosión y el azolvamiento de las redes de drenaje de la ciudad (GOEV, 1992). Coincidiendo con Olmos Martínez et al. (2016), las ANP son instrumentos estratégicos, que conservan recursos naturales y se convierten en fuentes generadoras de múltiples beneficios socioeconómicos y culturales.

4.3 Vinculación institucional

En cuanto a la *vinculación institucional*, Goyenechea-Mayer, Chavarría-Olmedo, Martínez García, y Ortiz-Caballero (2019) sostienen que en México se busca mantener servicios ecosistémicos y costumbres culturales, pero se necesita de los esfuerzos de colaboración entre las instituciones. Son diversas las dificultades que enfrentan las autoridades en los distintos órdenes de gobierno para coordinar esfuerzos, tal y como hemos visto en las entrevistas realizadas. A nivel estatal, la SEDEMA no tiene voluntad política (no existe Programa de Manejo), ni presupuesto anual (tan sólo el Programa de Empleo Temporal de carácter puntual) para la preservación y conservación del ANP. La SECTUR muestra nulo interés en temas ambientales. A nivel municipal, escasea la vigilancia y los recursos por parte de Limpia Pública, para atender el cerro.

4.4 Perspectivas a futuro

En cuanto a las *perspectivas a futuro*, tanto las instituciones como los vecinos y propietarios hacen énfasis en plasmar la conexión e integración de la comunidad local, el viajero y la naturaleza, tal y como propone Araneda (2022). Si bien la federación, a través de la CONANP (2018, 2020), declara que la construcción de una cultura para la conservación requiere orientar y articular las actividades de educación ambiental en programas específicos en cada ANP, la entidad federativa, a través de SEDEMA, no tiene recursos para realizar el Programa de Manejo, donde se plasmen las actividades a desarrollar.

En relación con la propiedad, según refieren los propietarios entrevistados, existen 200 propiedades en la reserva ecológica. Si bien Challenger (2001) afirma que concentrarse en un solo producto en las parcelas agrícolas (monocultivo) genera graves problemas en los ecosistemas, el *Cerro de las Culebras* está cubierto de Bosque Mesófilo de Montaña o Bosque de Niebla y de una escasa producción de café, tal y como señalan Pulido-Salas et al. (2007): el cultivo de café

en mitad del bosque de niebla subsiste en algunos predios del *Cerro de las Culebras*. Asimismo, los autores señalan que una de las mayores extensiones corresponde a la cima de cerro, la cual es propiedad de la Iglesia de San Jerónimo, instancia que construyó un monumento a Cristo Rey incluyendo un mirador. Ello ha fungido como receptor de paseos familiares y de feligreses durante los festejos de Semana Santa y los fines de semana. Esta tradición para la comunidad ha impulsado la apropiación del ANP por parte de la población y ha impulsado su conservación. Por otra parte, Guevara Pérez (2012) destaca la alteración creciente del ambiente y de las ANP, afectando en una forma negativa, el *Cerro de las Culebras* es un ejemplo de ello. Fernández y De la Barrera (2018) afirman además que las ciudades dependen de servicios ecosistémicos generados por las áreas verdes urbanas, por lo que la implementación de estrategias de planificación es una tarea fundamental para asegurar la provisión de estos servicios.

En relación con los *visitantes*, la CONANP (2018) manifiesta que la llegada de visitantes, por un lado, brinda beneficios socioeconómicos (derrama económica, generación de empleo). En el caso del cerro, los beneficios socioeconómicos son nulos. Por el contrario, Hernández Rivera y Torres Hernández (2014), mencionan como el deterioro de la vegetación es resultado del uso predatorio y oportunista de las personas, en particular de los vecinos de las áreas naturales protegidas. En esto no coincidimos con los autores. Las entrevistas a propietarios y las encuestas a vecinos mostraron medidas de conservación (chapeo, limpieza de residuos) e incipientes iniciativas centradas en la educación ambiental y de turismo regenerativo con la visita consciente del cerro (avistamiento de aves, talleres de composta y apicultura) impulsadas por la sociedad civil (Ruta de la Niebla, A.C.) y los vecinos del *Cerro de las Culebras*.

5. Conclusiones

El trabajo da respuesta a la pregunta sobre cuál es la percepción social de los actores clave sobre la conservación de la reserva ecológica estatal *Cerro de las Culebras*, en Coatepec, Veracruz México. Efectivamente, la percepción social en torno a la conservación del ANP es muy variada y arroja elementos que frenan o impulsan la conservación o uso sostenible del *Cerro de las Culebras* para generaciones presentes y futuras en Coatepec, Ver., México.

Las *instituciones gubernamentales* locales (SEDEMA, SECTUR y Ayuntamiento de Coatepec) deben considerar la conservación del cerro no sólo desde un aspecto normativo, biológico-técnico, sino valorar la participación de los propietarios y vecinos, también de los visitantes ávidos por acercarse a la naturaleza, su flora y fauna, y participar en la regeneración.

La participación de la *ciudadanía* en el cuidado de las ANP y los recursos a largo plazo es fundamental para su conservación: el involucramiento causa un impacto positivo sobre la permanencia de la reserva ecológica y su cuidado. Los eventos religiosos suponen un acercamiento de la población a sus recursos

naturales. El sector religioso juega un papel fundamental en la sensibilización ambiental y requiere de un estudio a profundidad.

La mayoría de los *propietarios* desean que se conserve este espacio natural, y se encuentran en la mejor disposición de entablar conversaciones que ayuden al bienestar de la comunidad. La integración de las actividades y estrategias para la conservación deben ir de la mano con el conocimiento y la anuencia de los propietarios. Al ser un espacio protegido con propietarios de la tierra de por medio, es necesaria la integración de estos en las decisiones futuras de conservación del ANP. A nuestro entender, urge la elaboración y publicación en la Gaceta Oficial del Estado de Veracruz de un Programa de Manejo Cerro de las Culebras, donde converjan las percepciones de los distintos actores clave y su participación, impulsando actividades de educación ambiental formal en escuelas de Coatepec, y no formal, con los sectores productivo, social y público.

6. Referencias

- Alva Fuentes, B. (2018). El Desarrollo Urbano Sustentable, ¿Una Utopía o un Proyecto Viable? *Convergencia Revista de Ciencias Sociales*, 17, 97–114. doi.org/10.29101/crcs.v0i17.9522.
- Araneda, M. (2022). Las tres relaciones de la regeneración. *Wellnes Magazine*, 1–13.
- Arenas, Á., y Pérez Galán, B. (2020). Naturaleza, conservación e identidad verde en Costa Rica. *Antropología Experimental*. *Antropología Experimental*, 19, 313–330. doi.org/10.17561/rae.v19.27.
- Ávila-López, C. M., y Pinkus-Rendón, M. J. (2018). Teorías económico-ambientales y su vínculo con la dimensión social de la sustentabilidad en Áreas Naturales Protegidas. *CienciaUAT*, 13(1), 108–122. doi.org/10.29059/cienciauat.v13i1.960.
- Ayala Arzate, J. A., Cruz Jiménez, G., Segrado Pavón, R. G., y Serrano Barquín, R. D. C. (2021). Una Aproximación al turismo sustentable y a las políticas públicas en áreas naturales protegidas, 2010-2020. *Revista de Psicología de la Universidad Autónoma del Estado de México*, 11(21), 141–166. doi.org/10.36677/rpsicologia.v11i21.17468.
- Bartley, H. (1978). *Principios de percepción*. México: Ed. Trillas.

- Challenger, A. (2001). Estrategias para la conservación de ecosistemas. *Gaceta Ecológica*, 61, 22–29.
- CONABIO, (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). (2003). *México megadiverso*. Recuperado de <https://www.biodiversidad.gob.mx/pais/quees>.
- CONANP, (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas). (2018). *Marco Estratégico de Turismo Sustentable en Áreas Naturales Protegidas de México*. Recuperado de <https://www.conanp.gob.mx/acciones/advc/MarcoEstrategico.pdf>.
- CONANP, (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas). (2020). *Programa Nacional de Áreas Naturales Protegidas 2020-2024*. México: Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.
- CONANP, (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas). (2025). *Programa para la Protección y Restauración de Ecosistemas y Especies Prioritarias (PROREST), 2025-2030*. México: Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.
- Delgadillo, G., y Castillo, J. (2010). Evaluación ciudadana del desempeño de la Gestión Pública Municipal. *Innovaciones de negocios*, 7(13), 191-205. doi: <https://doi.org/10.29105/rinn7.13-10>.
- DOF. (2024). *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. Recuperado de <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGEPA.pdf>.
- Fernández, I., y De la Barrera, F. (2018). Biodiversidad urbana, servicios ecosistémicos y planificación ecológica: un enfoque desde la ecología del paisaje. En *Biodiversidad urbana en Chile: Estado del arte y los desafíos futuros* (pp. 115–146). Chile: Univ. Central de Chile.
- Figuerola-Solís, A.P. (2022). *Turismo regenerativo para la conservación de la reserva ecológica Cerro de las Culebras en el pueblo mágico de Coatepec, Veracruz, México* (Tesis de Maestría en Desarrollo Regional Sustentable). Xalapa, México: El Colegio de Veracruz.

- Figueroa-Solís, A. P., Martínez-Olivarez, P., y Piñar-Álvarez, M. Á. (2022). Conservación y desarrollo urbano del área natural protegida «Cerro de las Culebras» en el municipio de Coatepec, Veracruz, México. En Vázquez Honorato, L. A. y Salazar Martínez, B. L. (Eds.), *Aproximaciones al Hábitat II* (pp. 351–372). Xalapa-Enríquez, México: Del Lirio.
- Garizurieta, H. (2021). *Sedema continúa con programa de apoyo de empleo temporal para personas desempleada*. Xalapa-Enríquez, Veracruz, México: RTV, (Radiotelevisión de Veracruz). Recuperado de <https://www.masnoticias.mx/sedema-continua-con-programa-de-apoyo-de-empleo-temporal-para-personas-desempleadas/>.
- GOEV, (Gobierno del Estado de Veracruz). (1992). *Declaratoria de reserva de Área Natural Protegida del Cerro de las Culebras en Coatepec, Veracruz. Xalapa: Gobierno del Estado de Veracruz*.
- González Bustamante, P. (2021). Capacidad de carga turística en los senderos del Parque Nacional Podocarpus sector Cajanuma. *Revista Alfa*, 5(15), 571–581. doi.org/10.33996/revistaalfa.v5i15.139.
- González Rosales, V. M., y López Torres, V. G. (2021). Turismo en Áreas Naturales Protegidas: una discusión sobre su pertinencia. *Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad*, 4, e110. doi.org/10.46380/rias.vol4.e110.
- Goyenechea-Mayer, I., Chavarría-Olmedo, Y., Martínez García, A. L., y Ortiz-Caballero, E. (2019). Evolución en la selección de áreas protegidas en el continente americano: el caso de Estados Unidos, México y Costa Rica. *Padi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 7(13), 47–53. doi.org/10.29057/icbi.v7i13.3433.
- Guevara Pérez, E. (2012). Estrategias de gestión para la sustentabilidad ambiental Ingeniería Industrial. *Actualidad y Nuevas Tendencias*, 3(8), 83–92. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/2150/215025114008.pdf>.

- Hensler, L., y Merçon, J. (2020). Áreas Naturales Protegidas como territorios en disputa: intereses, resistencias y acciones colectivas en la gestión compartida. *Sociedad y Ambiente*, 22, 180–211. doi.org/10.31840/sya.vi22.2101.
- Hernández Juárez, J. L., y Pérez Cervantes, B. (2013). Gestión de los Servicios Públicos Municipales: Un Análisis de la Percepción Ciudadana. *Revista Daena: International Journal of Good Conscience*, 8(3), 01-18.
- Hernández Rivera, M. G., y Torres Hernández, L. (2014). Análisis de dos áreas naturales protegidas en relación con el crecimiento del Área Metropolitana de Xalapa, Veracruz. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, (87), 51–61. doi.org/10.14350/rig.39077.
- Jiménez Sánchez, P. L., González Vera, M. A., Rosas Ferrusca, F. J., y Calderón Maya, J. R. (2021). Impactos socio ambientales de los asentamientos humanos irregulares en zonas y áreas naturales protegidas: Chetumal, Quintana Roo, México. *Revista Ciudades, Estados y Política*, 8(1), 87–99. doi.org/10.15446/cep.v8n1.85013.
- Minaya Gutiérrez, C. A., Chinguel Labán, D. O., y López García, P. (2021). Preferencias declaradas y disposición a pagar por la conservación de biodiversidad en un área natural protegida de Perú: Un análisis exploratorio / Stated preference and willingness to pay for conserving biodiversity in a protected area of Peru: exploratory Analysis. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 4(3), 3018–3034. doi.org/10.34188/bjaerv4n3-020.
- Miroglio Gouin, M. J., Piñar-Álvarez, M. de los Á., Moreno Saucedo, B. del C., y García-Contreras, R. (2024). Evaluación del turismo regenerativo en México: el Flow Map como herramienta metodológica. *El Periplo Sustentable*, 46, 329–353. doi.org/10.36677/elperiplo.v0i46.19452.
- Olmos Martínez, E., Arizpe Covarrubias, O., Contreras Loera, M. R., González Ávila, M. E., y Casas Beltrán, D. A. (2016). Opinión pública y percepción sobre la conservación de la reserva ecológica estatal estero San José del cabo y su zona de influencia. *Vivat Academia*, 135, 24–39. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=525755343003>.

- Ortiz, M., Matamoro, V., y Psathakis, J. (2016). *Guía para confeccionar un mapeo de actores. Bases conceptuales y metodológicas*. Recuperado de <https://cambiodemocratico.org.ar/wp-content/uploads/2017/03/Gu%C3%ADa-para-confeccionar-un-Mapeo-de-Actores.pdf>.
- Palero Castro, A. J. (2015). *Perspectivas sobre conservación en áreas naturales protegidas. Caso el sureste mexicano*. (Tesis de Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo, Instituto de Estudios Ambientales). Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/56042/Tesis%20de%20Maestri%cc%81a%20en%20Medio%20Ambiente%20y%20Desarrollo.pdf?sequence=3&isAllowed=y>.
- Paz Salinas, M. F. (2005). *La participación en el manejo de áreas naturales protegidas: Actores e intereses en conflicto en el Corredor Biológico Chichinautzin, Morelos*. Recuperado de https://biblioteca.clacso.edu.ar/Mexico/crim-unam/20100430012749/Partic_areas_naturales.pdf.
- Piñar-Álvarez, M. Á., y Silva-Zamora, A. P. (2021). Turismo y perspectivas de la gastronomía en tiempos de COVID-19. En Celis-Pérez, M. A. y Mijares-Sánchez, M. R. (Eds.), *El SARS-COV-2 y su impacto político, social y ambiental. Reflexiones panorámicas* (pp. 88–100). Xalapa-Enríquez, México: El Colegio de Veracruz y la Universidad Veracruzana.
- Pulido-Salas, Ma. T., Benítez Badillo, G., Osorio Rosales, Ma. L., Equihua Zamora, M., y Borja Luyando, G. (2007). Conservación en medio de la urbanización: el Cerro de las Culebras en Coatepec, Veracruz, México. En Halfiter, G. Guevara, S. y Melic, A. (Eds.), *Hacia una cultura de conservación de la diversidad biológica* (pp. 329–336). Zaragoza, España: Monografías Tercer Milenio. Recuperado de <http://sea-entomologia.org/PDF/PDFSM3MVOL6/Pdf35329336033PulidoSalasetal.pdf>.
- Quirós-Arias, L. (2017). Tourism and territory in natural protected areas – the case of Santa Rosa National Park: from national monument to the conservation of the tropical forest, Guanacaste Conservation Area, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 1(58E), 91–136. doi.org/10.15359/rgac.58-2.4.

- Reck, G., y Martínez, P. (2010). Áreas protegidas: ¿turismo para la conservación o conservación para el turismo? *Polémika*, 2(5), 1–10. Recuperado de <https://revistas.usfq.edu.ec/index.php/polemika/article/view/375/352>.
- Rojas Casarrubias, C., Rodríguez Alviso, C., Aparicio López, J. L., Castro Bello, M., Villerías Salinas, S., y Bedolla Solano, R. (2023). Problemas socioambientales desde la percepción de la comunidad: Pico del Monte-laguna de Chautengo, Guerrero. *Sociedad y Ambiente*, 26, 1–33. doi.org/10.31840/sya.vi26.2756.
- Santos, C. (2009). Discursos sobre el territorio: conservación, desarrollo y participación en torno a un área protegida. *Espacio Abierto*, 18(4), 627–651. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/122/12211871004.pdf>.
- SEMARNAT, (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2010). *Atlas Geográfico del Medio Ambiente y Recursos Naturales*. Recuperado de http://gisviewer.semarnat.gob.mx/geointegrador/enlace/atlas2010/AtlasMA_vi2010.pdf.
- Tapella, E. (2007). *El mapeo de Actores Claves*. Recuperado de <https://planificacionsocialunsj.wordpress.com/wp-content/uploads/2011/09/quc3a9-es-el-mapeo-de-actores-tapella1.pdf>.
- Tuanmu, M., Viña, A., Yang, W., Chen, X., Shortridge, A. M., y Liu, J. (2016). Effects of payments for ecosystem services on wildlife habitat recovery. *Conservation Biology*, 30(4), 827–835. doi.org/10.1111/cobi.12669.
- Vázquez-Márquez, G. E., Ramírez-García, A. G., Palacios-Rangel, M. I., y Monterroso-Rivas, A. I. (2020). Conceptualización, manejo y monitoreo de áreas naturales protegidas en México: Caso Reserva Estatal Sierra Monte Negro, Morelos. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 79, 24–35. doi.org/10.33064/icycuaa2020792926.
- Zamora Lomelí, C. B. (2020). Tensiones y retos para la Gobernanza Ambiental en las áreas naturales protegidas. El caso de la reserva de la biósfera selva el Ocote en Chiapas. *Collectivus, Revista de Ciencias Sociales*, 7(2), 112–135. doi.org/10.15648/Collectivus.vol7num2.2020.2675.



Investigación en ciencias sociales: un enfoque metodológico orientado hacia el desarrollo sostenible en la comunidad de San Miguel Aguasuelos

Emilio Lozano Figueiras¹

Nathan D. Wilson²

Astrid Wojtarowski Leal³

1. Introducción

En este capítulo, se analiza el diseño metodológico de una investigación en ciencias sociales enfocada en un estudio de caso en la comunidad alfarera de San Miguel Aguasuelos, Veracruz, enfatizando cómo su contexto particular y las necesidades de desarrollo económico influyen en la selección de métodos, técnicas e instrumentos. Se examinan también los principios teóricos que sustentan el diseño metodológico, con énfasis en el enfoque social de la sustentabilidad, la teoría de sistemas mundiales y el materialismo cultural. Se exploran los desafíos específicos de este tipo de investigación y la manera en que las técnicas utilizadas, como la observación directa, la entrevista en profundidad y el uso del diario de campo, contribuyen a una comprensión singular de la actividad alfarera en la comunidad de Aguasuelos, en el marco de un proceso mundial de globalización. Finalmente, se analiza la validación de los estudios de caso y la posible transferencia metodológica a otros contextos similares, promoviendo su aplicabilidad desde un enfoque situado de la sustentabilidad en diálogo con procesos más amplios, de nivel macro, que influyen en los contextos locales.

2. Desarrollo teórico

Independientemente de la disciplina académica, cualquier esfuerzo por generar conocimiento, teórico o práctico, exige una investigación de carácter sistemático. Antes de profundizar, es esencial establecer antecedentes generales y definir los

¹ emlozano@uv.mx, elozanof.ddrs22@colver.info, Maestro en pedagogía de las artes, Universidad Veracruzana, ORCID 0000-0003-3967-8647.

² nwilson@uv.mx, nwilson@colver.info, Doctor en Antropología, Universidad Veracruzana y Colegio de Veracruz, miembro del SNI, nivel 1, ORCID 0000-0003-0975-3968.

³ awojtarowskil@colver.edu.mx, astrid_leal@yahoo.com.mx, Doctora en Investigación Educativa-Línea Ambiental, Profesora Investigadora de Tiempo Completo del Colegio de Veracruz, miembro del SNI, ORCID 0000-0002-7601-0091.

objetos de estudio teóricos y/o empíricos que servirán como guía inicial de la investigación; esto en el entendido de que la investigación empírica podrá arrojar categorías no contempladas que posiblemente requerirá de ajustes a los objetos de estudio o a los conceptos asociados a estos. Esta base conceptual inicial facilitará la comprensión, y permitirá enriquecer las diversas perspectivas que se abordarán a lo largo del estudio. Con este propósito, es fundamental reconocer las diferentes vías de construcción del conocimiento que exigen las ciencias naturales y las ciencias sociales, lo que constituye un aspecto central en la filosofía de la ciencia, que refleja diferencias significativas en objetivos, enfoques y metodologías. Esta distinción adquiere especial relevancia en el contexto del positivismo, que aplica la metodología de las ciencias naturales a todas las áreas del saber, influyendo en la forma en que se genera y valida el conocimiento.

Durante el siglo xx se consolidó la existencia de dos enfoques académicos: la filosófico-humanista y la científica-natural. El centro de esta división radica en que existen dos tipos de estudios y epistemologías: por un lado, las ciencias, que buscan la verdad empíricamente comprobada; por otro, las humanidades, que abordan cuestiones sobre la naturaleza humana, como lo que se considera bueno o bello (Giménez, 2004; Maldonado, 2009; Rosales et al. (Eds), 2006; Wallerstein, 1997). Esta interacción entre diversas disciplinas ha derivado en distintos caminos, en sus extremos se encuentran, por un lado, el de la hegemonía positivista, que representa una visión radical y limitada sobre la construcción del conocimiento, y en la esquina opuesta, una postura igualmente radical, que es el relativismo a ultranza de la era posmoderna. El primero asume que hay una única realidad, observable externamente (relación sujeto-objeto), que es medible y explicable a través de leyes generales. El segundo niega la existencia de “la realidad”, expresando que se trata de una construcción particular de la conciencia. Ambas señalan a la otra como caminos equivocados para el conocimiento y limitan la posibilidad de establecer un diálogo.

El método científico es definido por Pereda, citado por Abalde y Muñoz (1992) como “un proceso sistemático por medio del cual se adquieren conocimientos objetivos del mundo” (p. 89). Este método se ha consolidado como una herramienta fundamental para el estudio del mundo de manera estructurada a través de la observación y la experimentación. Dicho enfoque forma parte esencial de la investigación, y su objetivo principal es describir, explicar, predecir y controlar los fenómenos.

A lo largo de su desarrollo, el método científico sigue varias etapas claramente definidas, que deben seguirse para su implementación. La primera etapa consiste en identificar y formular el problema a investigar, el cual puede surgir por falta de conocimiento, por una pregunta que requiere respuesta o por la necesidad de explicar datos existentes. En la segunda, se plantea una hipótesis con el propósito de ofrecer una solución provisional al problema. La tercera implica la recolección de datos a través de la experimentación u observación,

incluyendo el análisis e interpretación de los resultados obtenidos (Asensi y Parra, 2002, p. 13). En la cuarta, se lleva a cabo la verificación de los resultados obtenidos. Finalmente, en la quinta etapa, se analiza esta información y se elabora un nuevo esquema mental, lo que permite una mejor comprensión del problema estudiado y facilita futuras investigaciones o aplicaciones del conocimiento adquirido (De Hoyos, 2020, p.238).

La investigación según Hernández y colegas (2014), “es un conjunto de procesos sistemáticos, críticos y empíricos que se aplican al estudio de un fenómeno o problema” (p. 4). Puede ser empírica, desarrollada en un contexto de tiempo y espacio específicos; teórica, circunscrita al mundo de las ideas; teórico-empírica, que conecta teorías con realidades empíricas; o aplicada, enfocada en la solución de problemas concretos (Vargas, 2011). Estas modalidades se fundamentan en la metodología de la investigación, la cual tiene sus raíces en el desarrollo del pensamiento científico (Labonia, 1998).

Desde la Antigüedad, los filósofos griegos establecieron las bases para adquirir conocimiento a través de la observación y la lógica. A lo largo del tiempo, se implementaron métodos de investigación fundamentados en estos principios, los cuales han sido cruciales para el avance de la ciencia. Tanto el razonamiento deductivo como el inductivo se formalizan en estos métodos y contribuyeron a definir la comprensión de la realidad.

Durante el Renacimiento, este enfoque científico inició a consolidarse. Pensadores como Francis Bacon y Galileo Galilei promovieron la experimentación y la observación sistemática como métodos para validar hipótesis. Este período representó un cambio notable en la ciencia, alejándose del pensamiento aristotélico, que bajo el principio de autoridad había predominado hasta entonces.

En el siglo xvii, René Descartes introdujo el método deductivo e Isaac Newton estableció las bases del método científico mediante la inducción y la experimentación en las ciencias naturales. Francis Bacon destacó la observación y la evidencia empírica como pilares del conocimiento científico, generando un mayor desarrollo del método inductivo. A medida que las ciencias evolucionan, también lo hacen los métodos de investigación, volviéndose más estructurados y fiables.

Con el tiempo, se incorporó el método hipotético-deductivo, que combina ambos enfoques, permitiendo a los investigadores formular hipótesis a partir de observaciones y deducir consecuencias lógicas que deben ser verificadas empíricamente. (Dávila, 2006; Musso, 2019). Dicha evolución sentó las bases para que, durante el siglo xx, la metodología de la investigación se expandiera más allá de las ciencias naturales, abarcando también las ciencias sociales y humanas.

En este proceso, se incorporaron métodos y técnicas cualitativas –etnografía y entrevista–, junto con métodos y técnicas cuantitativas –estadísticas y encuestas–. La investigación cualitativa ha desempeñado un papel crucial en las ciencias humanas, consolidándose como un camino pertinente en la construcción del conocimiento, que cuenta con valiosas herramientas de indagación.

En las décadas de 1920 y 1930, la Escuela de Chicago destacó la relevancia de este enfoque en la sociología, subrayando su valor para analizar la vida y las dinámicas de los grupos humanos. En el campo de la antropología, estudios pioneros de autores como Franz Boas, Margaret Mead, Ruth Benedict, Gregory Bateson, Edward Evans-Pritchard, Alfred Radcliffe-Brown y Bronislaw Malinowski definieron el método del trabajo de campo. Este enfoque implicaba que el investigador se alojara en un grupo de estudio para analizar de cerca las costumbres y prácticas de una sociedad y cultura diferentes (Azpúrua, 2005; Denzin y Lincoln, 2012).

A partir de lo señalado se pueden identificar dos enfoques principales en el desarrollo de una investigación: cuantitativo y cualitativo, ambos con la posibilidad de ser procesos rigurosos y sistemáticos, lo que asegura la producción de conocimiento fiable. Cada uno de estos métodos responde a distintas concepciones sobre los objetivos de la ciencia, lo que influye en cómo se aplican y se interpretan los resultados. El enfoque cuantitativo se centra en datos numéricos, su medición y su réplica, mientras que el enfoque cualitativo se centra en la interpretación de fenómenos complejos y sus resultados no son replicables. A pesar de sus diferencias, ambos enfoques comparten la misma definición general de investigación, lo que permite su aplicación de manera equitativa según los objetivos del estudio. Esto se ilustrará a través de la Tabla 1; (Bisquerra, 1989; Hernández et al., 2014).

Tabla 1. Enfoques cuantitativos frente a los cualitativos.

Planteamientos	
Cuantitativos	Cualitativos
• Precisos y acotados o delimitados. • Enfocados en variables lo más ex actas y concretas que sea posible. • Direccionados. • Fundamentados en la revisión de la literatura. • Se aplican a un gran número de casos que sean representativos. • El entendimiento del fenómeno se guía a través de ciertas dimensiones consideradas como significativas por estudios previos. • Se orientan a probar teorías, hipótesis y/o explicaciones, así como a evaluar efectos de unas variables sobre otras (los correlacionales y explicativos).	• Abiertos • Expansivos, que paulatinamente se van enfocando en conceptos relevantes de acuerdo con la evolución del estudio. • No direccionados en su inicio. • Fundamentados en la revisión de la literatura, pero igualmente en la experiencia en el contexto y la intuición. • Se aplican a un menor número de casos con que se pueda trabajar hasta comprender el fenómeno o responder al planteamiento. • El entendimiento del fenómeno es en todas sus dimensiones, internas y externas, pasadas y presentes. • Se orientan a aprender de experiencias y puntos de vista de los individuos, valorar procesos y generar teorías fundamentadas en las perspectivas de los participantes.

Fuente: Esquema recuperado de (Hernández et al., 2014, p.361).

Por lo tanto, la metodología cuantitativa aborda el objeto de estudio como algo externo, buscando alcanzar la mayor objetividad posible y alineándose con la perspectiva positivista. Su objetivo es crear reglas generales que se puedan aplicar a un grupo, utilizando un enfoque estándar y basado en la formulación de leyes. Ejemplos de este tipo de investigación incluyen métodos experimentales,

estudios correlacionales y encuestas. Por otro lado, la metodología cualitativa se basa en un enfoque interno, dando prioridad a lo individual y subjetivo, y se relaciona con la perspectiva humanística de la realidad social. Ejemplos incluyen la etnografía, la etnometodología (Abalde y Muñoz, 1992), el método hermenéutico, el interaccionismo simbólico y la investigación acción (Vargas, 2011), entre otros.

Para el caso de la investigación en la comunidad alfarera de San Miguel Aguasuelos (en adelante Aguasuelos o SMA), cuyo objetivo general consiste en analizar los factores socioculturales y económicos que influyen en la actividad alfarera de la comunidad y su relación con la sustentabilidad, se ha elegido el enfoque cualitativo, dado que para dicho análisis se recuperarán las voces de las personas de la localidad, así como sus propias perspectivas al respecto de los elementos que configuran la alfarería del lugar y las problemáticas vinculadas con esta actividad.

Maxwell (2019) define la investigación cualitativa como un enfoque cuyo objetivo es ayudar a comprender: i) los significados y perspectivas de las personas estudiadas. A ver el mundo desde su punto de vista en lugar de basarse únicamente en la perspectiva del investigador; ii) cómo estas perspectivas están influenciadas por sus contextos físicos, sociales y culturales, al mismo tiempo que contribuyen a la construcción de esos contextos; y iii) los procesos específicos que intervienen en el mantenimiento o modificación de estos fenómenos y relaciones. Asimismo, el autor identifica tres características clave de la investigación cualitativa: su enfoque inductivo y de final abierto; su fundamento en datos textuales o visuales en lugar de numéricos; y su propósito principal de lograr una comprensión particular, más que una generalización entre diferentes personas y situaciones.

En este enfoque, las hipótesis pueden aparecer o no, aunque su aplicación difiere notablemente de su uso en los estudios cuantitativos. Estas hipótesis se formulan de manera general, emergente, flexible y contextual, ajustándose conforme avanza el proceso de investigación, y se adaptan a los datos, los resultados preliminares y las circunstancias que surgen a lo largo del estudio. (Hernández et al., 2014). Además, según Gilgun (1994, como se citó en Muñiz 2010), la investigación puede clasificarse como idiográfica o nomotética. La primera se caracteriza por proporcionar una descripción detallada y exhaustiva de un caso específico, sin buscar la formulación de hipótesis ni generalizar los hallazgos. La segunda se enfoca en el análisis de un fenómeno mediante la recopilación de una o más variables en grupos de personas, con el objetivo de generalizar o probar hipótesis y teorías.

Es pertinente aclarar, como menciona Sánchez (2015), que la investigación cualitativa no se fundamenta en “ocurrencias” ni “opiniones”, sino que requiere un enfoque estructurado en su desarrollo y el cumplimiento de las condiciones necesarias para lograr los objetivos establecidos. Esto implica un compromiso con determinados valores, como promover el pensamiento crítico. Ni la investigación cuantitativa ni la cualitativa es intrínsecamente superior a la otra. Ambos enfoques pueden ofrecer información valiosa. Además, en ocasiones, al combinar estos dos tipos de datos se logra un fortalecimiento de la investigación.

La integración de ambos enfoques requiere un diseño metodológico consistente, el cual es un componente esencial que determina la postura del investigador ante la realidad que se estudia. El propósito es armonizar las características del objeto de estudio con los objetivos del investigador y su relación con el contexto en el que se desarrolla la investigación. El diseño depende de diversos factores, algunos relacionados con el referente empírico que se busca problematizar, y otros, vinculados a las conceptualizaciones presentes en las preguntas de investigación (Palazzolo y Vidarte, 2013).

Creswell y Poth (2016), sugieren que, en primer lugar, es fundamental definir de manera clara los objetivos de la investigación, ya que estos guiarán el enfoque cualitativo más apropiado, como la fenomenología o la etnografía. Además, las características socioculturales del entorno en el que se lleva a cabo el estudio influyen en la elección del enfoque y en las técnicas de recolección de datos, como por ejemplo la entrevista y la observación.

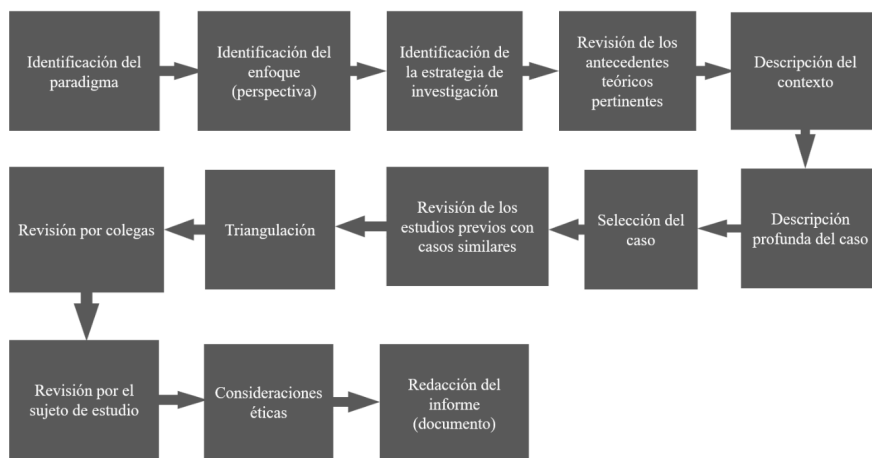
A la luz de lo anterior, el papel del investigador se vuelve fundamental, ya que la interacción y el grado de participación con los sujetos influyen en el diseño metodológico. Branda y Pereyra (2018), señalan que el investigador es considerado un actor clave en la investigación cualitativa, lo que destaca su implicación en el proceso. Las consideraciones éticas son esenciales, especialmente en investigaciones que involucran a poblaciones vulnerables o abordan temas delicados. Por último, se debe considerar las fuentes de datos, ya que la disponibilidad y el tipo de datos, como documentos y testimonios, orientan el diseño del estudio.

El diseño metodológico en la investigación cualitativa debe ser adaptable y considerar todos los elementos señalados para garantizar la relevancia y la ética del estudio. En este orden de ideas, Creswell y Poth (2016), señalan que no existe un consenso definitivo sobre la estructura ideal para diseñar un estudio cualitativo. No obstante, sugieren que entender el problema dentro de un contexto más amplio puede ser suficiente para guiar adecuadamente el diseño del estudio. A pesar de ser “flexible”, el diseño de un estudio cualitativo puede describirse en tres componentes: consideraciones previas al inicio del estudio, pasos a seguir durante su realización y elementos que se integran en todas las fases del proceso de investigación. En este sentido, como lo señalan Gómez y Dorati (2017), una consideración relevante en la investigación cualitativa es el formato de escritura del proyecto, el cual puede variar significativamente, desde enfoques más científicos hasta narrativas literarias y representaciones artísticas como teatro o poesía. A diferencia de la investigación cuantitativa, no existe una estructura estándar o universalmente aceptada. Este carácter flexible permite abordar problemas que, en muchas ocasiones, son emotivos, cercanos a las personas o con un alto componente práctico.

Diversos autores han propuesto una serie de condiciones fundamentales para la realización de un estudio de caso con enfoque cualitativo. La Figura 1 ha sido elaborada con base en la síntesis propuesta por Muñiz (2010). Estas condiciones son más una guía básica que una receta estricta para quienes

comienzan en este campo. La relevancia de cada condición puede variar según el investigador y el problema específico abordado, lo cual sugiere que no es necesario seguirlas de manera rigurosa. Esta flexibilidad permite que cada investigador adapte las condiciones a su contexto particular, enriqueciendo así el proceso de investigación y fomentando un enfoque más reflexivo y dinámico.

Figura 1. Sugerencias sobre las condiciones para un estudio de caso.



Fuente: Esquematización realizada de (Muñiz, 2010, pp. 3-6).

Otro elemento crucial que merece atención es la validez del diseño metodológico. Es un atributo fundamental, ya que un diseño bien estructurado no solo garantiza la calidad de la investigación, sino que también influye en la capacidad del investigador para comprender las realidades locales. Martínez y March (2015), señalan los aspectos que deben considerarse para que una investigación sea válida y confiable, y ofrezcan conclusiones útiles para decisiones futuras. Es fundamental contar con un marco epistémico, ontológico y metodológico coherente, adecuado al tipo y diseño de la investigación. Los instrumentos deben recolectar suficientes evidencias y reflejar las perspectivas de los informantes, ajustándose al contexto histórico y social. Por su parte, Corral (2017), señala que, al hablar de validez y confiabilidad en la investigación cualitativa, no se deben tratar estos conceptos de manera que emulen a los de la investigación cuantitativa, ya que requieren un enfoque distinto. De ser pertinente puede abordarse como procesos integrados, con un enfoque contextualizado.

En el caso de una investigación teórica-empírica, como la nuestra, se entenderá que, desde el inicio, se llevó a cabo un trabajo de indagación teórica sobre el objeto de estudio; durante el desarrollo de la investigación, se realizó una lectura continua y se elaboraron fichas bibliográficas, extrayendo fragmentos de los textos teóricos relevantes. Además, se llevó a cabo un trabajo empírico que incluyó el levantamiento de campo. Al llegar a esta etapa, se dispone de una estructura

empírica de los hallazgos, organizada en términos de categorías, características, nodos y relaciones.

Asimismo, se cuenta con una cantidad considerable de fichas o fragmentos de texto teóricos que se vinculan con los aspectos de la estructura empírica obtenida (Vargas, 2011). Estos textos teóricos no sólo enriquecen el análisis, sino que también sustentan la postura epistemológica adoptada en el estudio.

Según Vargas (2011), la postura epistemológica es una forma particular de comprender qué es el conocimiento y cómo se produce. Para construir conocimiento, es fundamental guiar tanto la interpretación de datos como la integración de teoría y práctica. Este proceso se define por las perspectivas y métodos que los investigadores eligen en su indagación, abarcando cómo abordan los problemas, qué técnicas utilizan y qué valores orientan su búsqueda. Además, estas elecciones influyen en la manera en que se interpreta la realidad y se valida el conocimiento obtenido (Camacho et al., 2011).

En diversos textos, una postura epistemológica también se denomina paradigma epistemológico. En el ámbito científico, un paradigma epistemológico, según Vargas (2011) “es un conjunto de teorías y/o ideas apropiadas para el desenvolvimiento de una investigación” (p. 14).

La relación entre postura y paradigma es fundamental, ya que los paradigmas no sólo orientan la investigación, sino que también afectan la interpretación del conocimiento. Este aspecto destaca la importancia de los paradigmas en cualquier investigación: imponen la lógica que estructura los discursos y teorías, determinando normas y reglas para validar enunciados. En este sentido, un paradigma regula las prácticas, los métodos de verificación y las formas de experimentación (Gómez, 2010).

3. Metodología

3.1 El estudio en San Miguel Aguasuelos

Hemos señalado anteriormente que el enfoque de la investigación en SMA es cualitativo. En el caso del paradigma seleccionado, se trata del hermenéutico o, como le llama Vargas (2011), el hermenéutico-interpretativo. Este paradigma contiene diversas corrientes y métodos, como la etnografía, el enfoque fenomenológico-hermenéutico, la teoría fundamentada, la etnometodología y el interaccionismo simbólico, entre otras variantes cualitativas. Este enfoque tiene como objetivo comprender el significado que los actores sociales atribuyen a sus prácticas en contextos específicos (Finol y Vera, 2020; Vargas, 2011). Asimismo, considera la comunicación como un proceso fundamental de diálogo e intercambio constante, en el que se construyen significados que permiten entender y dar sentido a las relaciones sociales (Navarro, 2008).

Respecto a los métodos utilizados Vargas (2011), describe que los métodos etnográfico y hermenéutico se definen de la siguiente manera: el primero es

un medio para recuperar uno o varios aspectos de la realidad cultural de una comunidad. Su objetivo es reflejar los rasgos más significativos de dicha cultura en relación con un objeto de estudio específico. Por otro lado, el *método hermenéutico* se centra esencialmente en la comprensión de textos mediante su interpretación. Ofrece diversas posibilidades para analizar cualquier tipo de texto, ya sea histórico, periodístico, teórico, discursivo o incluso transcripciones de entrevistas.

3.2 Técnicas cualitativas

La búsqueda y recopilación de literatura resulta valiosa para identificar conceptos clave, generar ideas sobre métodos de recolección y análisis de datos, comprender de manera profunda los resultados, evaluar las categorías pertinentes y enriquecer las interpretaciones. Este enfoque se apoya y fundamenta tanto en investigaciones previas como en el proceso de inmersión en el contexto, la recopilación inicial de datos y su análisis (Hernández et al., 2014).

La observación directa, a través de registros directamente en el sitio, permite ver y documentar con detalle objetos, comportamientos individuales o sociales, procedimientos, relaciones, entre otros. La técnica utilizada implica una mirada curiosa que busca captar y describir la realidad. Para ello, se puede emplear no solo el lenguaje escrito, sino también otros recursos como dibujos, croquis o viñetas (Vargas, 2011).

En dicho contexto, el diario de campo, empleado como bitácora, recopila observaciones y avances de la investigación, incluyendo descripciones detalladas del ambiente, personas, relaciones y eventos, junto con mapas, diagramas, esquemas, listados de objetos, fotografías y videos relevantes para el estudio. Se registran reflexiones sobre el progreso y las tareas pendientes. Las anotaciones abarcan observaciones directas, interpretaciones, temas específicos, reflexiones personales y sobre la reactividad de los participantes, siendo una herramienta clave para organizar y analizar los datos recolectados (Hernández et al., 2014).

En relación con la entrevista en profundidad, Taylor y Bogdan (como se citó en Denzin y Lincoln, 2012), conciben esta técnica como una serie de encuentros entre el entrevistador y los informantes, cuyo objetivo es comprender las perspectivas de estos sobre sus vidas, experiencias o situaciones, expresadas con sus propias palabras.

El mapa de actores sociales se trata de una técnica que facilita la identificación de personas y organizaciones clave para la planificación, diseño e implementación de un proyecto. También permite anticipar quiénes estarán disponibles para apoyar una iniciativa y establecer estrategias que aseguren el respaldo y el nivel de participación multisectorial necesario (Cubas, 2010).

3.3 Metodología estudio de caso SMA

En el marco de la investigación, el estudio de caso de la comunidad alfarera de SMA, se establece una estrategia que minimiza la observación distante y promueve

la observación directa, que en ocasiones se mueve hacia la observación participante en las dinámicas de la comunidad artesanal. Esta participación en la comunidad abarca diversas actividades: visitar los talleres, asistir a exposiciones y participaciones, festividades comunitarias, convivencia con miembros de la comunidad e inmersión en prácticas culturales, productivas y comerciales. Este compromiso se basa en el respeto hacia la identidad y tradiciones de la comunidad, promoviendo un intercambio equitativo que valore sus saberes y experiencias. Así, el objetivo de este enfoque es lograr una comprensión profunda y contextualizada de los fenómenos económicos, sociales y culturales que caracterizan a SMA.

En este contexto, la búsqueda del estudio se centra en comprender en específico la sustentabilidad económica de la alfarería artesanal en una población asentada en un entorno básicamente rural, presionada por las dinámicas propias de la globalización. El estudio se fundamenta en dos ejes: primero, la sustentabilidad económica derivada de la actividad artesanal, y segundo, el papel que desempeña el arte popular en su expresión y en la valoración artístico-económica dentro de nuestro mundo globalizado. Esta doble perspectiva busca no solo entender cómo la alfarería puede contribuir a la economía de subsistencia, sino también explorar su importancia sociocultural y estética en un entorno cada vez más globalizado.

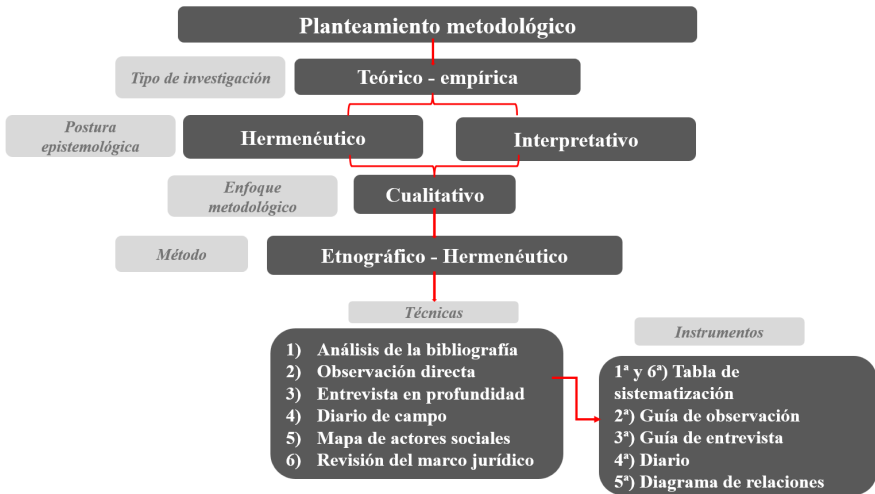
Los factores que determinan la sustentabilidad económica de una actividad artesanal, cuyo producto final es un objeto de arte popular elaborado con procedimientos tradicionales, deben ser analizados a través de técnicas que permitan comprender tanto las dinámicas económicas como las percepciones culturales que influyen en su viabilidad. Para ello, las ciencias sociales ofrecen métodos cualitativos como entrevistas y observación directa y participante, que dependen de la disposición de los actores sociales dentro y fuera de la comunidad, así como de su interacción con el investigador. Estos métodos permiten abordar temas sensibles, como la percepción individual de cada artesano sobre el valor de su producto y su relación con el mercado.

Respecto al planteamiento del problema de investigación, no resultan suficientes los estudios que analizan las dinámicas actuales de los pueblos alfareros y la relevancia de su actividad como expresión de una cultura específica y su arte popular. Esto se observa a pesar de las recomendaciones oficiales, tanto a nivel mundial como nacional y regional, que enfatizan la necesidad de salvaguardar la actividad artesanal como parte del Patrimonio Cultural de la Humanidad. (UNESCO, 1989, *s.f.-a*, *s.f.-b*).

En las décadas de los años 1980 y 1990 la homogeneización de la actividad artesanal en los mercados mundiales, impulsada por la llegada de mercancías baratas producidas en masa, principalmente provenientes en países con mano de obra sobreexplotada, relegó el arte popular a un nivel inferior en cuanto a su reconocimiento artístico. Este fenómeno ha tenido efectos económicos negativos y ha contribuido a la pérdida del sentido de pertenencia cultural (Colombres, 2023; Gallego, 2019; Mordini, 2006; Rosales et al. (Eds.), 2006; Vega, 2019).

El estudio de caso de SMA se trata de una investigación de tipo teórico-empírica, con una postura epistemológica hermenéutico-interpretativos. Utiliza métodos propios del enfoque cualitativo, como el etnográfico y el hermenéutico, los cuales se orientarán hacia la aplicación de técnicas e instrumentos que respondan a los objetivos particulares del estudio. como se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Diseño metodológico del estudio de caso (SMA).



Fuente: Elaboración propia.

3.4 Descripción de la metodología

La incorporación del paradigma hermenéutico-interpretativo es esencial en el estudio de caso que se presenta. Permite una comprensión holística de la realidad de la comunidad al centrarse en el significado que los actores sociales otorgan a sus prácticas. Esto facilita el análisis de las complejidades culturales y las interacciones sociales que configuran su vida cotidiana y su relación con la alfarería, lo cual es crucial para abordar los desafíos que enfrentan, como la globalización y otras problemáticas socioculturales. Además, este enfoque enriquece el análisis de las experiencias de los miembros de la comunidad, revelando significados que podrían pasarse por alto con métodos tradicionales.

Aunque el centro de la investigación es el paradigma hermenéutico, en el análisis del fenómeno aparece el paradigma crítico, permitiendo examinar las estructuras de poder que afectan a la comunidad, identificando acciones para transformar dinámicas opresivas que provienen del poder político, económico o de la realidad social, siendo relevante en un contexto global donde las comunidades artesanales enfrentan presiones externas que amenazan su sustento e identidad cultural. Al identificar las problemáticas y sus causas, se pueden desarrollar estrategias efectivas para mejorar sus condiciones de vida y fomentar su autonomía.

Finalmente, la interacción entre estos paradigmas promueve un conocimiento colectivo basado en la experiencia de los miembros de la comunidad, enriqueciendo el estudio y favoreciendo la convivencia y el intercambio de ideas, lo que contribuye a una construcción más significativa de su realidad y sus desafíos.

La importancia del método etnográfico radica en su capacidad para recuperar aspectos clave de la realidad cultural de la comunidad. Permite reflejar los rasgos más significativos de la cultura alfarera, como las tradiciones, técnicas y valores que están en juego, y cómo estos se relacionan con los desafíos económicos que enfrentan frente a la globalización. A través de esta aproximación, se obtiene una comprensión profunda de la identidad cultural que sustenta la producción artesanal y su vínculo con el sentido de pertenencia de los sanmiguelenses.

Por su parte, la utilidad del método hermenéutico en este contexto es fundamental para interpretar los textos y narrativas relacionadas con la alfarería, ya sean documentos históricos, entrevistas con los artesanos o estudios previos. Este enfoque analiza cómo se han contado y entendido las historias y conocimientos en torno a la producción artesanal, facilitando una visión clara de los retos y oportunidades en la inserción de estos productos en mercados globalizados.

Ambos métodos, en conjunto, permiten una comprensión integral de la comunidad y sus desafíos en la búsqueda de la sustentabilidad económica.

Las técnicas e instrumentos empleados permiten tanto la recolección de datos como un análisis más profundo de las dinámicas locales frente al mercado globalizado. A continuación, se presentan las técnicas utilizadas en el estudio.

En este estudio, se aplicó una tabla de sistematización para identificar conceptos clave, proponer métodos adecuados para la recolección y análisis de datos, y enriquecer la interpretación de los resultados. Este enfoque, fundamentado en investigaciones previas y en una inmersión en el contexto específico del estudio, facilitó la evaluación de categorías pertinentes, fortaleció las interpretaciones y generó soluciones fundamentadas. El resultado, una comprensión de los desafíos y oportunidades presentes en el mercado global abordado en la investigación.

En el estudio, se empleó una guía de observación para captar cambios en las técnicas y producciones cerámicas de la comunidad, documentando cómo las prácticas tradicionales habían sido influenciadas o reemplazadas por nuevas técnicas y materiales, afectando la estética y las relaciones sociales. Las anotaciones en el diario de campo reflejaron estas transformaciones visuales y simbólicas, mientras que el investigador utilizó croquis, dibujos y viñetas para representar la evolución de las formas, colores y estilos de la alfarería, complementando los datos culturales y sociales observados. Además, el registro en el diario de observaciones sobre el entorno, las personas y los eventos facilitó una comprensión más profunda de la realidad cultural y económica de la comunidad. Mediante el uso de mapas, diagramas y fotografías, se identificaron patrones relevantes para el análisis, contribuyendo a una planificación estratégica y a la toma de decisiones informadas.

En la investigación, se emplearon como instrumentos de las entrevistas, las guías de preguntas. A partir de las mismas se analizó el impacto de los cambios en los diseños artesanales, influenciados por el mercado global en una población aproximada a 45 artesanos. A través de las entrevistas en profundidad, se llevaron a cabo encuentros reiterados con los artesanos veteranos, logrando comprender sus perspectivas sobre cómo las transformaciones en sus técnicas y estilos afectaban su sustento económico y la identidad cultural de sus productos. Esta metodología ofreció una visión auténtica al reflejar las experiencias directamente desde los informantes.

Por su parte, las entrevistas semiestructuradas fueron aplicadas a 10 alfareras que aceptaron participar y ofrecieron una mayor flexibilidad, permitiendo ajustar las preguntas a medida que se avanzaba en las conversaciones. Esto facilitó la obtención de información precisa y confiable sobre cómo los artesanos enfrentaban los desafíos del mercado global y la necesidad de adaptarse sin perder su carácter artesanal. Ambas técnicas resultaron complementarias, proporcionando una visión integral y enriquecida de la situación.

En el estudio de caso realizado en SMA, se utilizó un diagrama de relaciones como instrumento para identificar y analizar la interacción entre diferentes actores sociales clave, facilitando la comprensión de los efectos de los cambios en la alfarería debido a la influencia de los mercados globales en su patrimonio cultural. Este proceso se llevó a cabo mediante entrevistas a profundidad, complementadas con una guía de preguntas diseñada específicamente para explorar las perspectivas de representantes de instituciones como el Instituto Veracruzano de Cultura, la Secretaría de Desarrollo Económico y Portuario, la Dirección de Cultura de Naolinco y la agencia municipal de la comunidad.

A través de las entrevistas, se obtuvo información valiosa sobre el papel de cada actor en la preservación y promoción de la alfarería local. El diagrama de relaciones permitió visualizar cómo estos actores interactúan y colaboran en la planificación y ejecución de iniciativas para salvaguardar la tradición alfarera. De este modo, se logró establecer estrategias efectivas para fomentar el respaldo y la participación multisectorial necesaria, contribuyendo a la sostenibilidad del patrimonio cultural de SMA ante las presiones del mercado global.

3.5 Recomendaciones

- I) La investigación en ciencias sociales requiere el uso de métodos, técnicas y procedimientos apropiados para comprender las realidades de interés. Su eficacia depende de una aplicación sistemática y coherente. Solo un enfoque riguroso y bien fundamentado permite estudiar el fenómeno de manera objetiva, garantizando resultados válidos y fiables, y aportando al conocimiento de las dinámicas sociales y culturales.

- II) Abordar la investigación de forma integral y contextualizada, ayuda a comprender las realidades complejas de la comunidad y a identificar relaciones de poder que influyen en su vida cotidiana. Combina enfoques, se promueve un análisis profundo que no solo interpreta significados, sino que también busca generar un impacto transformador en la comunidad. Esto resulta en un diseño que es sensible al contexto, empodera a los actores sociales y facilita el desarrollo de estrategias efectivas para mejorar sus condiciones de vida y fomentar su autonomía.

4. Referencias

- Abalde Paz, E., y Muñoz Cantero, J.-M. (1992). Metodología cuantitativa vs. cualitativa. En E. Abalde Paz y J. M. Muñoz Cantero (Eds.), *Metodología da investigación educativa I* (pp. 89-99). A Coruña, España; Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións.
- Asensi Artiga, V., y Parra Pujante, A. (2002). El método científico y la nueva filosofía de la ciencia. *Anales de Documentación*, (5), 9-19.
- Azpúrua Gruber, F. J. (2005). La Escuela de Chicago. Sus aportes para la investigación en ciencias sociales. *Sapiens. Revista Universitaria de Investigación*, 6(2), 25-35.
- Bisquerra, R. (1989). *Métodos de investigación educativa: Guía práctica*. Barcelona: CEAC.
- Branda, S., y Pereyra, S. (2018). La investigación cualitativa: Métodos flexibles, apertura a la triangulación y el rol del investigador. *Jornadas de Investigación en Educación*, Tercera Jornada de Investigación, Universidad Nacional del Mar de Plata.
- Camacho y López, S. M., Trejo García, C. A., Maldonado Muñiz, G., Álvarez, A., Flores Cerón, T., y Santander Hernández, T. (2011). Perspectivas epistemológicas en la investigación cualitativa. En N. P. Bautista (Ed), *Proceso de la investigación cualitativa*. Epistemología, metodología y aplicaciones (pp. 47-67). Bogotá: El Manual Moderno.
- Colombres, A. (2023). *Teoría de la cultura y del arte popular: Una visión crítica*. La Habana. Ediciones ICAIC.

- Corral, Y. (2017). Validez y fiabilidad en investigaciones cualitativas. *Revista Arjé*, 11(20), 196-209.
- Creswell, J. W., y Poth, C. N. (2016). *Qualitative inquiry and research design: Choosing among five approaches*. Los Angeles: Sage Publications.
- Cubas, D. (2010). Mapeo de actores sociales: VIH y violencia contra las mujeres en Honduras. Washington, D. C.: *Comisión Interamericana de Mujeres*.
- Dávila, Newman. G. (2006). El razonamiento inductivo y deductivo dentro del proceso investigativo en ciencias experimentales y sociales. *Laurus*, 12(Ext), 180-205.
- Finol de Franco, M., y Vera Solórzano, J. L. (2020). Paradigmas, enfoques y métodos de investigación: análisis teórico. *Mundo Recursivo*, 3(1), 1-24.
- De Hoyos Benítez, S. M. (2020). El método científico y la filosofía como herramientas para generar conocimiento. *Revista Filosofía UIS*, 19(1), 229-245
- Denzin, N. K., y Lincoln, Y. S. (Eds.). (2012). *Manual de investigación cualitativa* (Vol. 1). Barcelona. Gedisa Editorial.
- Gallego Cuiñas. A. (2019). Presentación. Los mercados de la literatura del siglo XXI. *Caravelle. Cahiers du monde hispanique et luso-brésilien*(113), 53-60.
- Giménez, G. (2004). Pluralidad y unidad de las ciencias sociales. *Estudios Sociológicos*, xxii(2). 267-282.
- Gómez, M. F., y Dorati, J. (2017). Diseños de investigación en Ciencias Sociales y Psicología. La Plata: Facultad de Psicología. UNLP.
- Gómez Marín, R. (2010). De las nociones de paradigma, episteme y obstáculo epistemológico. *Co-herencia*, 7(12), 229-255.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., y Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación*. México. McGraw Hill. Education.

- Labonia, N. (1998). Metodología de la investigación.
- Maldonado, C. E. (2009). Complejidad de los sistemas sociales: un reto para las ciencias sociales. *Cinta de Moebio*. (36), 146-157.
- Martínez, M., y March, T. (2015). Caracterización de la validez y confiabilidad en el constructo metodológico de la investigación social. *Redhecs*, 20(10), 107-127.
- Maxwell, J. A. (2019). *Diseño de investigación cualitativa. Un enfoque interactivo*. Barcelona. Editorial Gedisa.
- Mordini, E. (2006). La globalización y la pérdida de identidad. *Ethos Gubernamental*, (4), 125-131.
- Muñiz, M. (2010). Estudios de caso en la investigación cualitativa. México: *División de estudios de posgrado Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de psicología*. 1-8.
- Musso, P. (2019). El método científico de Galileo y sus implicancias culturales. *Phainomenon*, 18(1), 89-98.
- Navarro Díaz. L. R. (2008). Aproximación a la comunicación social desde el paradigma crítico: una mirada a la comunicación afirmadora de la diferencia. *Investigación y Desarrollo*, 16(2), 326-345.
- Palazzolo, F., y Vidarte, Asorey, V. (2013). Claves para abordar el diseño metodológico. *Maestría en Diseño Comunicacional*.
- Rosales Ortega, R., Gutiérrez Ramírez, S., y Torres Franco, J. L. (Coords.). (2006). *La interdisciplina en las ciencias sociales*. Barcelona: Anthropos Editorial.
- Sánchez Gómez, M. C. (2015). La dicotomía cualitativo-cuantitativo: posibilidades de integración y diseños mixtos. *Campo Abierto. Revista de Educación*, Volumen Monográfico, 11-30.
- UNESCO. (1989). *Recomendación sobre la Salvaguardia de la Cultura Tradicional y Popular*. Asuntos Jurídicos. <https://www.unesco.org/es/legal-affairs/recommendation-safeguarding-traditional-culture-and-folklore>.

- UNESCO. (s.f.-a). *Salvaguardia del Patrimonio Cultural Inmaterial*. Recuperado 01 de agosto de <https://ich.unesco.org/es/salvaguardia-00012>.
- UNESCO. (s.f.-b). *Técnicas artesanales tradicionales*. Recuperado 01 de agosto de 2023 from <https://ich.unesco.org/es/tnicas-artesanales-tradicionales-00057>.
- Vargas Beal. X. (2011). *¿Cómo hacer investigación cualitativa? Una guía práctica para saber qué es la investigación en general y cómo hacerla, con énfasis en las etapas de la investigación cualitativa*. Zapopan. ETXETA.
- Vega Torres, D. R. (2019). Del trabajo cultural al trabajo creativo: Aproximaciones conceptuales a la transformación de la actividad artesanal. *El Artista: Revista de Investigaciones en Música y Artes Plásticas*(16), 4.
- Wallerstein, I. M. (1997). *La historia de las ciencias sociales* (Vol. 1). México. Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades. UNAM.



Resiliencia del sistema territorial periurbano en cuatro municipios de la zona metropolitana de Xalapa, Veracruz: un análisis multidimensional

Jorge Andrés Santander Espinosa¹

Hugo López Rosas²

Pedro Martínez Olivarez³

1. Introducción

En el umbral del nuevo milenio, la ONU-Hábitat y la FAO reportaron, desde hace casi cuatro décadas que, sobre todo en países en vías de desarrollo, se ha presentado un fenómeno creciente de migración rural hacia las ciudades, atribuido a diversos factores, entre los que destacan la globalización y la búsqueda de una mejor calidad de vida. De acuerdo con estas agencias, las zonas rurales se caracterizan por tener insuficiente o deficiente acceso a infraestructura, suelos poco productivos, escasez y baja calidad de agua; son vulnerables a catástrofes por fenómenos climáticos o por manejo inadecuado de recursos naturales, siendo estos cada vez más agudos y recurrentes (por ejemplo, sequías e inundaciones); además de alta frecuencia de conflictos sociales, políticos y religiosos. En 2020, la ONU-Hábitat reportó que más del 50 % de la población mundial habitaba en zonas urbanas, previéndose que para 2050, cerca del 75 % estará asentada en este tipo de territorios. Para Latinoamérica, señaló que existían 215 metrópolis distribuidas en seis países: Brasil (61), México (54), Colombia (18), Argentina (17), Venezuela (17) y Perú (11). Para el caso de México, el 79% de la población ocupaba 384 ciudades, cifra que ascenderá al 83 % en 961 ciudades para 2030, destacando que las constantes serán la desigualdad, pobreza y el incremento de riesgos por desastres naturales o antropogénicos (ONU-Hábitat, 2016, 2020; FAO, 2019).

¹ jasantandere.ddrs22@colver.info. El Colegio de Veracruz. Maestro en Desarrollo Regional Sustentable por el Colegio de Veracruz, estudiante de Doctorado en Desarrollo Regional Sustentable en El Colegio de Veracruz. (ORCID 0000-0003-2385-0254).

² hlopez@colver.info. Profesor Investigador de Tiempo Completo en El Colegio de Veracruz. Doctor en Ciencias (Ecología y Manejo de Recursos Naturales). Línea de investigación: Manejo sustentable de recursos naturales en socio-ecosistemas costeros del Estado de Veracruz. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel 1. (ORCID 0000-0001-8167-6675).

³ pemartinez@uv.mx. Profesor de Tiempo Completo, Facultad de Arquitectura Xalapa, Universidad Veracruzana. Doctor en Diseño y Estudios Urbanos. Líneas de investigación: Desarrollo urbano sustentable y Planificación urbano-territorial. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel 1. (ORCID 0000-0003-4629-4975).

La Zona Metropolitana de Xalapa (ZMX), al igual que otras de México, ha tenido un incremento significativo en población y superficie. Entre 1990 y 2020 su población pasó de 462,281 a 798,858 habitantes, en tanto que la superficie se incrementó de 4,305 a 8,844 hectáreas (Centro de información Estadística y Geográfica de Veracruz [CIEGVER], 2021; Gaceta Oficial del Estado de Veracruz, 2022; SEDATU-CONAPO-INEGI, 2023). La ocupación fue a expensas de zonas rurales, ejidales, bosques, zonas de ganadería lechera y tierras de cultivos tradicionales (cafetales, naranjales, plataneros y humedales) que, en conjunto, se fueron sumando a la mancha urbana.

Así, entre las variables que explican esta expansión, el aumento demográfico incidió de manera directa en el surgimiento y crecimiento del denominado Sistema Territorial Periurbano (STPU), entendido como el territorio resultante de procesos de urbanización dispersa entorno a la expansión de las ciudades (metropolización). Este proceso se conjuga con la expulsión de población de zonas rurales hacia zonas suburbanas y con el establecimiento de asentamientos en terrenos originalmente destinados a actividades agropecuarias.

Este tipo de territorios de difusa transición entre lo urbano y lo rural, en los que no existe planificación ni estrategias para un desarrollo sustentable (Capel, 1975, 1991; Cara, 2002), son de alta fragilidad socioambiental y económica, sujetos a eventos catastróficos (naturales o antropogénicos) cada vez más agudos y recurrentes, además de retroalimentar el ciclo pobreza-deterioro-pobreza en grupos o comunidades vulnerables (Benítez, 2011, Benítez et al., 2011; Morales, 2014).

El presente estudio surge de la necesidad de comprender la complejidad del periurbano, históricamente invisibilizado por políticas públicas tradicionales que mantienen una visión dicotómica urbano-rural. Su importancia radica en que más del 30 % de la población latinoamericana habita en territorios periurbanos, espacios que enfrentan desafíos particulares y crecientes brechas socio-territoriales (Salazar, 2023). El periurbano representa espacios críticos donde convergen procesos de transformación acelerada que comprometen tanto la sustentabilidad ambiental como la viabilidad de actividades productivas tradicionales.

Entre estos procesos destacan la pérdida de suelos agrícolas productivos, la fragmentación de ecosistemas y la especulación inmobiliaria, los cuales constituyen dinámicas interrelacionadas que erosionan progresivamente la capacidad de estos territorios para mantener sus funciones esenciales y adaptarse a los cambios (González-Arellano et al., 2021).

La relevancia académica de este trabajo se fundamenta en la necesidad de desarrollar aproximaciones teórico-metodológicas específicas para el análisis del periurbano mexicano, superando el abordaje urbano-rural tradicional. Desde la perspectiva del desarrollo regional sustentable, resulta fundamental comprender cómo la resiliencia de estos territorios se ve afectada por la interacción de factores económicos, sociales, ambientales y de gobernanza (Sánchez-Zamora et al., 2016).

Asimismo, se busca contribuir al debate sobre las políticas territoriales en México, evidenciando la urgencia de transitar hacia instrumentos de planeación y gestión que reconozcan la especificidad del periurbano y promuevan su desarrollo sustentable.

El objetivo de esta investigación es examinar los principales factores naturales, sociales y económicos que al interactuar han impactado en las últimas tres décadas la resiliencia del sistema territorial periurbano de cuatro municipios de la Zona Metropolitana de Xalapa de Enríquez, Veracruz, México. Para ello, se desarrolló un sistema de indicadores multidimensional para evaluar el nivel de resiliencia territorial considerando las particularidades del periurbano; se aplicaron entrevistas semiestructuradas a actores clave para comprender las percepciones locales sobre los procesos de cambio, y se realizó un análisis espacial para delimitar y caracterizar estos territorios de transición.

2. Desarrollo teórico

El uso inicial del término *sustentabilidad* vinculado con lo ambiental, se dio en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Ambiente Humano. En 1983, la ONU creó la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (WCED), la cual elaboró diversos informes cuyo objetivo fue analizar y replantear las políticas del desarrollo económico globalizador, reconociendo que el avance o crecimiento social y económico implicaba un alto costo medioambiental.

En el Informe Brundtland se definió la sustentabilidad como la habilidad de lograr una prosperidad económica sostenida en el tiempo, protegiendo a la vez los sistemas naturales del planeta y proveyendo una alta calidad de vida para las personas; mientras que el desarrollo sostenible se concibió como la satisfacción de las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades.

Con respecto al citado informe, Castillo y Chaves (2016) señalaron que el concepto *desarrollo sostenible* tenía como eje el enfoque economicista, orientado a mantener el modelo de crecimiento económico mediante el ajuste de parámetros para garantizar su continuidad en el tiempo. Sin embargo, las principales bases del modelo de producción depredador se abordaban únicamente de manera tangencial: se reconocía la existencia de un problema, pero no se asumía plenamente la relación causa-efecto, ni se profundizaba en las consecuencias del modelo económico liberal ni su vinculación con la creciente brecha entre ricos y pobres.

Otro término, aún hoy en discusión, es el de “sustentable”, pues al buscar un punto de equilibrio entre ambiente, economía y sociedad, tendencialmente disminuiría el crecimiento económico. Un aspecto significativo de la discusión fue su posición frente al denominado progreso económico, buscando avanzar hacia una relación diferente entre economía, ambiente y sociedad, fomentando el progreso no solo desde la óptica del crecimiento económico, sino desde un enfoque incluyente y de desarrollo sustentable.

Es en este enfoque integrador donde reside el principal desafío, ya que el sistema rector de la sustentabilidad son los sistemas socioecológicos y sus componentes esenciales para un verdadero desarrollo. En este sentido, Calvente (2007) destaca que es fundamental conocer y analizar las interacciones entre los componentes del territorio: sociedad, economía y medio ambiente, así como sus intra e interregulaciones que ocurren como eje fundamental de procesos sistémicos.

Gómez Orea y Gómez Villarino (2013); Costamagna y Pérez (2015); y Rehren et al., (2018) señalan que, para la vinculación entre sustentabilidad y territorio, es importante diferenciar los conceptos de espacio y de territorio. En el primero, se prioriza la naturaleza y los factores físicos presentes en una superficie como producto de una interacción de los elementos físico-naturales –relieve, geomorfología, clima, suelo, flora y fauna–, mientras que, en el segundo, son fundamentales el individuo y la sociedad a la que pertenece y que transforman el territorio viviéndolo y construyéndolo día a día.

Al ser una construcción social, el territorio es dinámico y está sujeto a una transformación constante, representando el estilo de desarrollo de una sociedad. Se conforma a partir de las actividades que la población realiza, las interacciones y dinámicas en las que se articulan factores internos y externos, así como de un marco legal que regula dichas relaciones.

Para su estudio, generalmente se consideran los siguientes tipos: I) político-administrativo, II) homogéneos (formales), III) funcionales, IV) estratégicos y V) de escala. Al estar organizado por subsistemas –según escalas o niveles jerárquicos–, no se puede ni se debe planificar desde niveles inferiores estrategias de intervención que corresponden a niveles superiores, ni a la inversa.

Por su parte, Villatoro (2017) anota que en cualquier sistema territorial existen cinco subsistemas en interrelación permanente: ambiental, económico, político-institucional, cultural y el de identidad o pertenencia.

Las tipologías tradicionales del sistema territorial dualista son urbano y rural. El primero se caracteriza por su dinamismo, alta densidad poblacional, predominio de actividades secundarias y terciarias, así como por la diversidad de servicios e infraestructuras; mientras que el segundo presenta baja densidad poblacional, predominio de actividades productivas primarias, grandes extensiones territoriales y acceso insuficiente o deficiente a infraestructura y servicios.

Existe un tercer sistema territorial que no ha sido reconocido ni considerado formalmente en las políticas territoriales: el periurbano (alrededor de lo urbano). Este término se utiliza para describir territorios ubicados entre la ciudad y el campo, formados por procesos de urbanización fragmentada de antiguas áreas rurales en las márgenes urbanas, con procesos de crecimiento disperso, en los que se presentan paisajes híbridos de características urbanas y rurales de manera fragmentadas y mixtas, con consecuencias socioambientales poco sustentables (Cara, 2002; González-Arellano et al., 2021; Salazar, 2023).

Si bien no existe consenso sobre su significado, sí hay acuerdo de que estos espacios surgen no solo por el avance de la urbanización, sino por la forma en que se conjugan dos variables: los usos del suelo —mezcla de actividades productivas primarias con asentamientos e infraestructura de tipo urbana— y precio de la tierra, mayor que en zona rural, pero menor que en zona urbana. Estos territorios son de creciente interés por la complejidad de sus procesos, caracterizados por fragmentación social, segmentación espacial, ausencia de políticas públicas y avance del mercado especulativo inmobiliario (Puebla, 2009).

Tampoco existe consenso respecto de su delimitación y categorización, las cuales suelen determinarse de manera arbitraria. Para Iaquina y Drescher (2000) y Allen (2003), los enfoques más utilizados para identificar, caracterizar y delimitar este tipo de territorios son: i) aquel que considera variables como tamaño y densidad de población, características infraestructurales, límites administrativos y actividades económicas predominantes; ii) el enfoque dominante en el debate, utilizado por la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE) que prioriza la densidad poblacional y la distancia a los centros urbanos; y iii) el propuesto por Korcelli-Olejniczak, E., Kozubek, E. (2008); Aguilera, F., Valenzuela, L., Botequilha-Leitão, A. (2011) y Brinkmann et al., (2012), quienes manifiestan que la caracterización del periurbano debe tener como eje central, en todo momento, los patrones de uso y cobertura del suelo.

Gonçalves et al., (2017) destacan que, independientemente del enfoque utilizado, los estudios sobre el periurbano deben considerar la enorme variabilidad de estos territorios desde una perspectiva multidimensional, incorporando patrones de asentamiento, accesibilidad a la infraestructura, diversificación de la economía, impactos territoriales con cambios estructurales en el uso de la tierra, relaciones sociales, así como mantenimiento y mejora del capital natural. Asimismo, debe incluirse la dimensión simbólico-legitimadora para comprender cómo los actores sociales perciben su calidad de vida en este tipo de territorio.

Estos territorios, con rasgos únicos y originales, presentan conflictos derivados del uso de un suelo no planificado e informal (Pryor, 1968; Urruela, 1987; Puig, 2016). Entre sus principales características se encuentran la ocupación del territorio en continuo cambio, transformaciones aceleradas del paisaje, explotaciones agrícolas a pequeña escala como consecuencia del incremento del valor de la tierra previo a un desarrollo urbano, producción agrícola intensiva por tener la demanda asegurada de los mercados urbanos cercanos, población móvil de baja a moderada densidad con alta proporción de viajeros que trabajan en la ciudad, pero residen en el periurbano, rápida expansión residencial representando el área de mayor crecimiento de la ciudad, dotación de servicios y equipamientos públicos incompleta y con disparidades, así como operaciones especulativas frecuentes que elevan artificialmente el precio del suelo.

En América Latina, estos territorios albergan más del 30 % de la población total de la región, espacios donde un abordaje desde la óptica urbano-rural tradicional resulta inadecuado (Salazar, 2023). La interdependencia territorial es absoluta: mientras las zonas rurales dinamizan a las zonas urbanas proveyendo alimentos, mano de obra y servicios ecosistémicos, los centros urbanos permiten la transformación rural mediante mercados, tecnología y servicios especializados.

Desde la óptica de la nueva ruralidad, es indispensable superar la limitada visión producción-comercialización centrada en el crecimiento económico, debiendo considerarse un enfoque territorial incluyente que aproveche las capacidades locales y remonte el esquema tradicional dualista que contrapone las zonas rurales y las urbanas. Este enfoque reconoce la existencia de ambas, así como los distintos e importantes grados de interacción constante que presentan (Gómez Oliver y Tacuba Santos, 2017; Beach et al., 2019; Martínez Chapa y Salazar Castillo, 2022).

Esta perspectiva propone entender lo rural no como un espacio residual o atrasado respecto a lo urbano, sino como territorios con funciones múltiples que incluyen producción de alimentos, la conservación de la biodiversidad, la regulación hídrica, la captura de carbono, la preservación cultural y recreación. En el contexto del periurbano, esta multifuncionalidad se complejiza aún más por la superposición de lógicas urbanas y rurales, las cuales generan tanto conflictos como oportunidades.

Al referirnos al territorio, es imperativo vincularlo con el concepto de resiliencia, entendida como la capacidad para recuperar la forma y posición después de una alteración o desajuste de cualquier tipo. El uso inicial del concepto se remonta a 1858, cuando se empleó para significar la capacidad de un material para resistir la aplicación de una fuerza (rigidez) y absorberla mediante la deformación (ductilidad). Posteriormente, durante la década de 1940, el término fue incorporado en los campos de la psicología y la psiquiatría.

En 1973, Holling introdujo el concepto en su trabajo “Resiliencia y Estabilidad de Sistemas Ecológicos”, conceptualizándolo como una herramienta para comprender cómo los ecosistemas persisten y se adaptan frente a perturbaciones, manteniéndose funcionales a pesar de la volatilidad ambiental. Esta aportación permitió ampliar la comprensión de la resiliencia más allá de los sistemas físicos e individuales, incorporándola al análisis de sistemas complejos.

Para Metzger (2014), la resiliencia territorial es un concepto teórico no tangible ni medible cuantitativamente. Su valoración estriba en un constructo sobre el hábitat humano, partiendo de reconocer las dimensiones ecológica, social, económica y política, y elaborando matrices específicas con categorías delimitadas para determinar rangos y tendencias (Calvente, 2007; Truffino, 2010; Sánchez-Zamora et al., 2016). A pesar de que no existe consenso sobre un significado aceptado universalmente, sí existe coincidencia en que la resiliencia territorial implica la capacidad de responder eficazmente al cambio —especialmente

al impredecible y repentino—, que no puede definirse a partir de un solo indicador ya que requiere la inclusión de distintos dominios, y que es dinámica, con fases cíclicas adaptativas de adquisición, conservación, liberación y reorganización.

Para el equipo de trabajo del Proyecto de Resiliencia de la Universidad de Cambridge, la resiliencia de un sistema complejo implica la cantidad de cambios que un sistema puede presentar manteniendo su funcionalidad y estructura, el grado de autoorganización del sistema, y su habilidad para incrementar su capacidad de aprendizaje, innovación, reorganización y adaptación (Berkes et al., 2008). Common y Perrings (1992) anotan que, desde el inicio de los noventa, las ideas sobre resiliencia han sido construcciones teórico-prácticas del paradigma del desastre de fines del siglo xx, agudizándose en el siglo xxi. Señalan, además, que las graves y crecientes implicaciones ambientales globales de los modelos de desarrollo convencional, basados exclusivamente en indicadores económicos, han debilitado la sustentabilidad de los ecosistemas y su resiliencia.

En este orden de ideas, la Nueva Agenda Urbana (ONU-Hábitat, 2021) señala que la adaptación es un ajuste en los sistemas naturales o humanos como respuesta a estímulos climáticos reales o esperados, o sus efectos, con el fin de moderar el daño o aprovechar las oportunidades benéficas. Por su parte, la resiliencia se define como la capacidad de un sistema, comunidad o sociedad expuesta a amenazas, para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de los efectos de una amenaza de manera oportuna y eficiente, incluso mediante la preservación y restauración de sus estructuras y funciones básicas esenciales.

Reyes y Ballesteros (2011) consideran que, en el análisis de la resiliencia territorial, es imperativa una comprensión compleja de los territorios y su vinculación con nociones de sistema complejo adaptativo y socio-ecosistema. Para Simmie y Martín (2010), la resiliencia comunitaria y regional debe entenderse como un proceso de desarrollo continuo frente a la adversidad, más que como un resultado fijo o estable. No obstante, el concepto de resiliencia ha sido utilizado de manera insuficiente desde un enfoque territorial que incorpore integralmente todos los elementos que conforman el territorio (Sánchez-Zamora et al., 2016).

En la literatura científica se han identificado dos enfoques o aplicaciones de la resiliencia territorial: la resiliencia estática, referida a la capacidad para soportar presiones externas manteniendo atributos estructurales y funcionales y respondiendo positivamente; y la resiliencia dinámica, entendida como la capacidad para desplegar nuevos recursos que permitan adaptarse a largo plazo a los cambios externos e internos (Hassink, 2010; Hamdouch y Depret, 2012). A diferencia de los sistemas físicos o ecológicos, un sistema territorial no necesariamente se encuentra en equilibrio, sino que puede caracterizarse por una trayectoria constante de crecimiento y desarrollo relativamente estable.

En el caso de México, Ávila Sánchez, 2001; Barsky, 2005; González-Arellano et al., (2021) anotan que históricamente la política territorial ha sido la lineal urbano-rural. Asimismo, que un detonador del acelerado fenómeno de

periurbanización fue la modificación a la legislación agraria de 1992 (reforma al Artículo 27 constitucional), que posibilitó privatizar el ejido. Reforma orientada a otorgar seguridad jurídica a los poseedores de tierras, pero que paralelamente provocó un incremento en la especulación del suelo.

El Estado Mexicano, con la intención de materializar la vinculación de los territorios y las actividades antropogénicas, publicó en 2012 en el Diario Oficial de la Federación (DOF) la Ley General de Cambio Climático, con el objetivo de garantizar el derecho a un medio ambiente sano aplicando políticas públicas orientadas a la adaptación al cambio climático, la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero y la reducción de la vulnerabilidad de la sociedad y los ecosistemas frente al cambio climático.

Adicionalmente, con la finalidad de establecer normas básicas e instrumentos para ordenar el uso del territorio y los asentamientos humanos, en 2016 se publicó en el Diario Oficial de la Federación (DOF) la Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano, encaminada a planear, regular y gestionar los asentamientos humanos para prevenir, contener y revertir la ocupación de zonas de alto riesgo, de suelos agropecuarios de alta calidad y de áreas naturales protegidas y/o bosques naturales, así como lograr el uso racional de recursos naturales renovables.

En los estudios sobre el territorio, la percepción social de los ocupantes es un factor sustantivo para un pertinente desarrollo territorial. Esta percepción consta de dos elementos que se conjugan: la normatividad vigente en materia de desarrollo urbano y desarrollo territorial, y la percepción individual y colectiva sobre cómo las personas perciben, interpretan, valoran y viven su entorno (Tuan, 1974; Viqueira, 1977).

Esta percepción, resultante de experiencias, cultura, historia y necesidades cotidianas, se conforma de hechos percibidos de la realidad y del contexto espacio-temporal de los receptores de la información proveniente del mundo físico. Comprende procesos fundamentales de remodificación o selección del caudal de datos que llegan del exterior, reduciendo su complejidad y facilitando su almacenamiento y recuperación en la memoria, así como un proceso de ir más allá de la información obtenida para predecir acontecimientos futuros y reducir la sorpresa (Carterette y Friedman, 1996; Castilla, 2006; Khzam, 2008).

La formulación de hipótesis y toma de decisiones se determinan por necesidades, valores sociales, aprendizajes y las características permanentes y temporales de los individuos. La percepción incluye componentes cognitivos relacionados con pensamientos y conocimientos, afectivos vinculados con emociones y sentimientos, interpretativos asociados a significados y símbolos, y evaluativos expresados en actitudes y apreciaciones, los cuales operan conjuntamente en función de las necesidades, oportunidades y su contexto espacio-temporal.

Las personas no perciben la realidad ambiental en su totalidad ni de la misma manera: algunos fenómenos quedan registrados, otros son parcialmente detectados y otros totalmente bloqueados. Esta percepción parcial se integra a la actitud de las personas, generando una visión del mundo individual y social de manera simultánea.

Con la publicación del artículo de Catton y Dunlap en 1978 sobre sociología medioambiental como nuevo paradigma, se desmiente la idea de que los seres humanos no estamos sometidos a restricciones por parte de la naturaleza (Pardo, 1996, 1998). Esta ruptura del paradigma dominante posibilitó transitar de una postura antropocentrista a una holística, en la que el ser humano forma parte de la naturaleza, los fenómenos sociales ocurren en un universo espacio-temporal y las sociedades son dependientes de la naturaleza en energía, recursos, sustento y referentes simbólico-sociales.

En el análisis de cualquier sistema territorial es indispensable considerar, además de los subsistemas socioeconómico, ambiental y político, la percepción socioambiental y el sentido de pertenencia de sus ocupantes.

3. Metodología

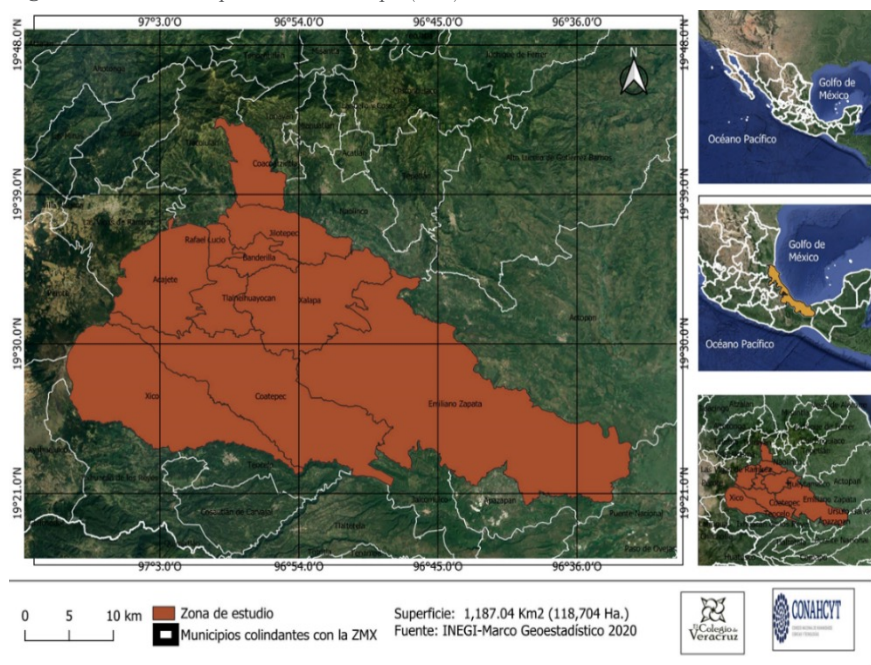
Se empleó un enfoque mixto que integró métodos cuantitativos y cualitativos en tres fases complementarias. La primera fase consistió en la recopilación y sistematización de información documental y cartográfica de fuentes secundarias, utilizando buscadores académicos especializados para construir el estado del arte sobre resiliencia territorial y sistemas periurbanos. Asimismo, se consultaron bases de datos oficiales para obtener información sociodemográfica, económica y territorial de la zona de estudio. Esta información se organizó en tablas de sistematización que permitieron identificar patrones y tendencias en el período 1990-2020.

La segunda fase se centró en la delimitación y caracterización espacial del sistema territorial periurbano mediante la plataforma ArcMap de ArcGIS versión 10.5. Se seleccionaron cuatro localidades representativas del STPU: Xaltepec, en Banderilla; Mundo Nuevo, en Coatepec; Cerro Gordo, en Emiliano Zapata; y Xocotla, en Tlalnelhuayocan. Estas localidades fueron elegidas por presentar características típicas del periurbano, tales como la persistencia de actividades primarias, la presión inmobiliaria creciente, la transformación del paisaje y acceso diferenciado a servicios (figura 1).

La tercera fase involucró trabajo de campo mediante la aplicación de 24 entrevistas semiestructuradas a informantes clave, distribuidas equitativamente entre las cuatro localidades seleccionadas. Se entrevistaron 12 informantes de entre 30 y 60 años y 12 mayores de 60 años, con el propósito de capturar perspectivas intergeneracionales sobre los procesos de cambio territorial. El muestreo fue no probabilístico por conveniencia, buscando representatividad de diferentes actores. Las entrevistas exploraron temas como permanencia de actividades agropecuarias, los cambios en las condiciones para actividades primarias, la organización

social y los programas comunitarios, las condiciones de vida actuales y su comparación con el pasado, la disponibilidad y calidad de servicios básicos, la percepción sobre el aumento del uso habitacional y la especulación del suelo, así como la calidad del ambiente y sus transformaciones y los principales problemas ambientales identificados. Las entrevistas fueron transcritas y codificadas temáticamente.

Figura 1. Zona Metropolitana de Xalapa (ZMX).



Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI (Marco Geoestadístico 2020).

Para la evaluación cuantitativa de la resiliencia, se construyó un sistema de indicadores estructurado en tres dimensiones fundamentales (Tabla 1). La dimensión económico-productiva incluyó indicadores sobre permanencia de actividades agropecuarias, calculada como el porcentaje de entrevistados que realizan actividades primarias respecto a quienes anteriormente las realizaban; los cambios desfavorables en las condiciones para las actividades primarias, medidos por la proporción de entrevistados que reportaron deterioro; y la inexistencia de organización social y de programas para fortalecer el campo. La dimensión socio-territorial consideró las condiciones de vida actuales según la satisfacción manifestada por los entrevistados, la comparación de condiciones actuales respecto a las anteriores, la cobertura de servicios básicos y el aumento del uso habitacional con especulación del suelo. Finalmente, la dimensión ambiental evaluó la calidad del ambiente según la percepción de los entrevistados, los cambios en la calidad ambiental reportados y la identificación de los principales problemas ambientales.

Figura 1. Sistema de indicadores de resiliencia territorial.

Dimensión	Indicador	Fórmula
Económico-productiva (EP)	Permanencia de actividades agropecuarias	Entrevistados que realizan actividades primarias/ entrevistados que anteriormente realizaban actividades primarias
	Cambios en las condiciones para actividades primarias	Entrevistados que respondieron que sí ha habido cambios desfavorables/total entrevistados
	Organización social, programas comunitarios para fortalecer el campo	Entrevistados que respondieron que no existe organización social ni programas para el campo/ total entrevistados
Socio-territorial (ST)	Condiciones de vida actuales	Entrevistados que manifiestan que son satisfactorias/total entrevistados
	Condiciones actuales de vida con respecto a las anteriores	Entrevistados que respondieron que las condiciones de vida son mejores que antes/total entrevistados
	Servicios existentes (agua potable, energía, drenaje, recolección de basura, seguridad, transporte, salud, educación, recreación)	Entrevistados que respondieron que sí cuentan con los servicios/total entrevistados
	Aumento uso habitacional y especulación del suelo	Entrevistados que respondieron que sí hay aumento de asentamientos humanos y especulación en el valor del suelo/total entrevistados
Ambiental (DA)	Calidad del ambiente	Entrevistados que consideran que el ambiente es bueno/ total entrevistados
	Cambios desfavorables en la calidad del ambiente	Entrevistados que consideran que ha disminuido la calidad del ambiente/total entrevistados
	Principal problema ambiental	Entrevistados anotan cuál es el principal problema/total entrevistados

Fuente: Elaboración propia.

Cada indicador fue valorado en una escala de resiliencia de tres niveles: alta, con valores entre 60.1 y 100 %, asignando ponderación de 3; media, con valores entre 30.1 y 60 %, con ponderación de 2; y baja, con valores entre 0.1 y 30 %, con ponderación de 1. El valor de resiliencia para cada dimensión se calculó como el promedio de sus indicadores, y el índice integral de resiliencia como el promedio ponderado de las tres dimensiones. Este sistema permitió obtener una valoración cuantitativa comparable entre localidades y dimensiones.

El análisis de la información integró métodos estadísticos para caracterizar las variables socioeconómicas y territoriales. Para los datos cualitativos de las entrevistas se aplicó análisis de contenido, identificando categorías emergentes y patrones recurrentes en las narrativas. La triangulación metodológica permitió contrastar la información obtenida de fuentes secundarias con datos primarios del trabajo de campo, validando los hallazgos mediante la convergencia de evidencias.

Se utilizaron diagramas de causalidad para representar las interrelaciones entre factores, aplicando el enfoque de sistemas complejos para comprender dinámicas no lineales presentes en el STPU. Para la integración final, se utilizó triangulación convergente: los datos cuantitativos proporcionaron el contexto estructural y tendencias generales, mientras que los cualitativos aportaron profundidad y

comprensión desde la perspectiva de los actores locales. Esta aproximación metodológica mixta permitió capturar las dimensiones objetivas y subjetivas de la resiliencia territorial para comprender la capacidad adaptativa del STPU.

4. Resultados

La ZMX es una de las 48 zonas metropolitanas de México y una de las siete del Estado de Veracruz que en los últimos 30 años tuvo un incremento demográfico del 58.4%, mientras que la zona urbana creció un 50.9 %. La investigación en los cuatro municipios seleccionados con presencia de STPU, de los diez que conforman la ZMX, reveló un panorama complejo de transformaciones territoriales que han impactado la resiliencia de estos espacios de transición. Los municipios estudiados, Banderilla, Coatepec, Emiliano Zapata y Tlalnelhuayocan, abarcan una superficie conjunta de 525.27 kilómetros cuadrados con una población de 225,057 habitantes distribuidos en 330 localidades, de las cuales 17 son urbanas concentrando el 69 % de la población y 313 son rurales con el 31 % restante (CIEGVER, 2021; SEDATU-CONAPO-INEGI, 2023). Esta distribución evidencia un patrón de concentración urbana con atomización de asentamientos rurales, característico de los procesos de periurbanización en México.

El análisis espacial mediante sistemas de información geográfica permitió identificar que el 64.54 % del territorio estudiado, equivalente a 339 kilómetros cuadrados, presenta atributos característicos del periurbano con un gradiente altitudinal que va desde los 140 hasta los 2,900 metros sobre el nivel del mar, con una diversidad bioclimática que, históricamente, han sustentado actividades agropecuarias diversificadas. La delimitación del STPU mostró un patrón fragmentado entre lo urbano y lo rural donde coexisten parcelas agrícolas activas con terrenos en barbecho, desarrollos habitacionales de diferentes densidades, infraestructura urbana incompleta y remanentes de vegetación natural. El análisis temporal de cambio de uso del suelo entre 1990 y 2020 evidenció transformaciones profundas. La superficie destinada a actividades agrícolas disminuyó de 36,100 a 20,600 ha (pérdida del 42.8 %), siendo los cultivos más afectados: cafetales, naranjales, plataneros y milpas. Paralelamente, la superficie urbana se incrementó de 3,120 a 8,844 ha, principalmente sobre suelos de alta productividad agrícola en pendientes menores al 15 %. Los pastizales cultivados también experimentaron reducción, pasando de 4,440 a 2,890 ha. La vegetación secundaria aumentó de 7,470 a 9,230 ha, mientras que los bosques y selvas primarias disminuyeron de 1,360 a 980 ha, evidenciando procesos paralelos de degradación ambiental (PHINA-RAN, 2023).

La población económicamente activa (PEA) en los cuatro municipios es del 54.8 %, pero solo el 8.4 % se dedica al sector primario, mientras que el 20.3 % labora en el sector secundario y el 70 % en el terciario (DENUE-INEGI, 2018). Esta distribución contrasta marcadamente con la de 1990, cuando el 29 % de la PEA se dedicaba a actividades agropecuarias. El análisis de las cifras etarias indica que el 68.6 % de la población está en el rango de 15 y los 65 años (en edad laboral),

el 34.5 % tiene menos de 14 años, en tanto que sólo el 8.5 % tiene más de 65 años. Los adolescentes y adultos jóvenes son lo que, mayormente, optan por trabajar en los sectores secundarios y terciarios fuera de la localidad, no participando en labores del campo. Lo anterior, deriva en el escaso o nulo relevo generacional, factor que —conforme a lo manifestado por los informantes— es el principal motivo del declive de las actividades primarias (Secretaría de Economía, 2023).

En materia de infraestructura y servicios, los datos muestran coberturas aparentemente aceptables: 81.2 % de las viviendas cuenta con agua entubada y 78.7 % con drenaje (CIEGVER, 2021). Sin embargo, estas cifras no reflejan las disparidades territoriales. En las localidades urbanas la cobertura de agua potable alcanza el 94 % y drenaje el 91 %, mientras que en las rurales estos porcentajes descienden a 52 % y 43 % respectivamente. Además, la calidad y continuidad del servicio es deficiente: el 67 % de los entrevistados reportó escasez en el suministro de agua y el 45 % mencionó problemas de calidad del agua. La infraestructura de saneamiento es crítica ya que solo existen 7 plantas de tratamiento de aguas residuales para atender 330 localidades y ninguno de los municipios cuenta con relleno sanitario. En servicios de salud, existen 23 unidades de consulta externa y un hospital general, resultando en 2.4 médicos por cada mil habitantes, inferior al promedio estatal de 3.1. Los servicios educativos muestran mejor cobertura en nivel básico, pero carencias en los niveles medio superior y superior, obligando a desplazamientos hacia la capital del estado.

Los indicadores de desarrollo humano y marginación presentan un panorama heterogéneo. El 52 % de la población se encuentra en situación de pobreza (42 % pobreza moderada y 10 % en pobreza extrema). El rezago social es bajo en el 75 % del territorio y medio en el 25 % restante. El Índice de Desarrollo Humano promedio es de 0.742, considerado alto, pero con variaciones importantes (CIEGVER, 2021). Estas diferencias reflejan desigualdades en acceso a servicios, oportunidades y calidad de vida entre áreas urbanas y rurales.

La evaluación de resiliencia mediante el sistema de indicadores construido arrojó los siguientes resultados.

En la dimensión económico-productiva, la resiliencia promedio fue de 1.33 en escala de 3, clasificada como baja. Solo el 31% de quienes realizaban actividades agropecuarias hace 30 años continuaban haciéndolo, y de estos, el 73 % son mayores de 65 años. El 89 % de los entrevistados reportó cambios desfavorables para actividades primarias, mencionando como principales factores la baja rentabilidad con precios que no cubren costos de producción, falta de apoyos gubernamentales efectivos, escasez de agua para riego, plagas, enfermedades e inseguridad. La organización social para actividades productivas es prácticamente nula: el 83% señaló ausencia de programas comunitarios para fortalecer el campo.

La dimensión socio-territorial mostró una resiliencia media de 2.0. El 58 % de los entrevistados considera que sus condiciones de vida actuales son satisfactorias, principalmente por el acceso a servicios básicos y vías de comunicación.

El 64 % percibe que las condiciones han mejorado respecto al pasado, aunque esta mejora se asocia con infraestructura urbana que con prosperidad económica. El 76 % identificó el aumento acelerado del uso habitacional y la especulación del suelo como problemas graves. Los entrevistados reportaron incrementos en el precio de la tierra en los últimos 10 años, lo que, si bien representa una oportunidad de venta para algunos propietarios, genera presión para abandonar actividades productivas primarias y debilitamiento del tejido social comunitario. El 81 % mencionó que las decisiones comunitarias son cada vez más difíciles de consensuar por la llegada de nuevos residentes con diferentes valores y expectativas.

La dimensión ambiental presentó una resiliencia de 1.67, entre baja y media. El 33 % considera que la calidad ambiental es buena, mientras que el 92 % percibe cambios desfavorables durante las últimas tres décadas. Los principales problemas ambientales identificados fueron la contaminación de cuerpos de agua por descargas sin tratamiento, mencionada por el 78 % de entrevistados; la escasez de agua con disminución de manantiales y pozos, reportada por el 65 %; la deforestación y pérdida de vegetación natural señalada por el 59 %; la contaminación por agroquímicos y residuos sólidos, indicada por el 53 %; la erosión del suelo y los deslizamientos, mencionados por el 47 %; la pérdida de biodiversidad con desaparición de especies nativas reportada por el 41 %; y los cambios en el clima local, con temperaturas más extremas y lluvias irregulares, señalados por el 38 %.

Los entrevistados establecieron conexiones entre estos problemas y la urbanización, la deforestación que incrementa la temperatura local, las descargas que contaminan los ríos y el suelo, así como la fragmentación del hábitat que afecta las funciones de control biológico de plagas.

El índice integral de resiliencia, calculado como promedio ponderado de las tres dimensiones, resultó en 1.67, indicando una resiliencia media-baja del STPU. Las narrativas evidencian transformaciones materiales y cambios profundos en las relaciones sociales, los valores comunitarios y la identidad territorial.

5. Discusión

Los resultados obtenidos en esta investigación revelan que el STPU de la ZMX enfrenta un proceso acelerado de deterioro en su resiliencia, manifestado de manera diferenciada en sus dimensiones económico-productiva, socio-territorial y ambiental. El índice integral de resiliencia de 1.67 en escala de 3 indica una condición de vulnerabilidad que compromete la sustentabilidad de estos territorios. Este hallazgo es consistente con lo reportado por Benítez et al., (2011) para la periferia de Xalapa y con estudios en otros contextos latinoamericanos donde la expansión urbana descontrolada genera territorios fragmentados con alta vulnerabilidad socioambiental (Barsky, 2005; Salazar, 2023). La ZMX presenta una velocidad de transformación que supera los promedios nacionales y una pérdida acelerada de agrobiodiversidad en una región históricamente caracterizada por su riqueza productiva.

La dimensión económico-productiva emerge como la más crítica, con una resiliencia de apenas 1.33, evidenciando el colapso del modelo agrícola tradicional en el periurbano. La reducción del 42.8 % en superficie agrícola entre 1990 y 2020 supera significativamente el promedio nacional del 35 % reportado para zonas metropolitanas (SEDATU-CONAPO-INEGI, 2023). Esta pérdida no es solo cuantitativa sino también cualitativa: los sistemas productivos diversificados que caracterizaban la región han sido reemplazados por monocultivos de menor valor ecológico o por el abandono. La permanencia de solo 31 % de productores agropecuarios respecto a hace tres décadas, con predominio de población mayor a 65 años, evidencia una crisis de relevo generacional que amenaza la continuidad de prácticas agrícolas tradicionales.

Lo resultados contrastan con los postulados de la nueva ruralidad (Gómez Oliver y Tacuba Santos, 2017), que sugiere procesos de diversificación productiva y pluriactividad en territorios rurales cercanos a ciudades. En el caso estudiado, no se observa tal diversificación, sino más bien un abandono progresivo de las actividades primarias sin desarrollo de alternativas productivas sustentables, lo que sugiere que el marco teórico de la nueva ruralidad requiere ajustes para contextos de periurbanización acelerada.

Los factores que explican el deterioro de la dimensión económico-productiva son múltiples e interrelacionados. La crisis de rentabilidad agrícola, mencionada por el 89 % de los entrevistados, resulta del incremento en costos de insumos y de los bajos precios de garantía, y de la inexistente organización social para la producción. Lo anterior refleja el debilitamiento del tejido social comunitario que históricamente sustentó la agricultura campesina mediante prácticas de reciprocidad y cooperación (Martínez Chapa y Salazar Castillo, 2022). La inseguridad creciente desincentiva la inversión productiva y acelera el abandono de tierras. La escasez de agua para riego, exacerbada por los usos urbanos y la disminución de la recarga de acuíferos, limita las posibilidades productivas. Estos factores configuran un círculo vicioso donde la baja rentabilidad conduce al abandono productivo, facilitando el cambio de uso del suelo y la urbanización fragmenta las áreas agrícolas restantes, reduciendo su viabilidad.

La dimensión socio-territorial, con resiliencia media de 2.0, presenta una aparente paradoja. Por un lado, 58 % de los entrevistados considera satisfactorias sus condiciones de vida actuales y el 64 % percibe mejoras respecto al pasado, principalmente por acceso a servicios urbanos e infraestructura. Por otro lado, el 81 % reporta pérdida de cohesión social y 76 % identifica la especulación inmobiliaria como fenómeno creciente. Esta contradicción revela la complejidad de los procesos de periurbanización, donde coexisten mejoras en infraestructura con un deterioro del capital social y transformación de valores comunitarios (Puebla, 2009). La llegada de nuevos residentes genera procesos de gentrificación rural que modifican las dinámicas sociales tradicionales. Los incrementos en precios de la tierra representan un atractivo para propietarios empobrecidos, pero

también implican la pérdida irreversible del patrimonio productivo familiar y de valores simbólicos y culturales que trascienden lo económico (González-Arellano et al., 2021).

Por lo que respecta a la dimensión ambiental, con una resiliencia de 1.67, se evidencian las consecuencias ecológicas del abandono productivo y la urbanización desordenada. La percepción de deterioro ambiental expresada por el 92 % de entrevistados es consistente con indicadores objetivos: pérdida de 380 hectáreas de bosques y selvas, incremento de 1,760 hectáreas de vegetación secundaria indicativa de degradación, contaminación de cuerpos de agua por ausencia de tratamiento de aguas residuales, y fragmentación del paisaje que afecta la conectividad ecológica (CIEGVER, 2021).

La relación entre deterioro ambiental y pérdida de resiliencia territorial es bidireccional: la degradación ambiental reduce la productividad agrícola y la calidad de vida, incentiva el abandono productivo y la venta de tierras, mientras que la urbanización genera nuevas presiones ambientales que profundizan la degradación (Common y Perrings, 1992). Los servicios ecosistémicos que provee el periurbano se ven comprometidos, particularmente la regulación hídrica, por pérdida de cobertura vegetal e impermeabilización; la regulación climática, por islas de calor urbanas; la polinización, por pérdida de hábitat; el control biológico de plagas, por simplificación del paisaje; y los valores culturales y recreativos, por transformación del paisaje rural. La heterogeneidad espacial de resiliencia sugiere que las estrategias de intervención deben ser diferenciadas según las condiciones y potencialidades específicas de cada territorio, evitando soluciones genéricas que no consideran la diversidad del periurbano (Sánchez-Zamora et al., 2016).

El análisis revela una desconexión preocupante entre el marco normativo existente y la realidad territorial del periurbano. Aunque México cuenta con legislación avanzada en materia de cambio climático y ordenamiento territorial, estas normativas mantienen una visión predominantemente urbano-rural que no reconoce la especificidad del periurbano ni establece instrumentos adecuados para su gestión. La Ley General de Cambio Climático de 2012 no desarrolla mecanismos específicos para territorios de transición, y la Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano de 2016 que busca contener el crecimiento urbano sobre suelos agrícolas, carece de instrumentos efectivos de implementación y no considera la complejidad del periurbano. Esta invisibilización perpetúa la vulnerabilidad del periurbano al no existir políticas públicas diseñadas para sus características específicas (Ávila Sánchez, 2001).

La percepción de los actores locales, captada mediante las entrevistas, revela dimensiones de la crisis que escapan a los indicadores cuantitativos. La pérdida de identidad territorial, el desarraigo de las nuevas generaciones, la erosión de conocimientos tradicionales, y la transformación de valores comunitarios son procesos intangibles pero fundamentales para entender la pérdida de resiliencia (Tuan, 1974; Khzam, 2008). Las posibles estrategias adaptativas requieren

condiciones de organización social sólidas, acceso a mercados diferenciados, asistencia técnica apropiada y, sobre todo, contención de la presión inmobiliaria que encarece la tierra más allá de su valor productivo agrícola (Puig, 2016). El fortalecimiento de la resiliencia en el periurbano, además del apoyo a la producción requiere de un ordenamiento territorial que proteja los espacios productivos con instrumentos económicos que compensen los servicios ecosistémicos que proveen estos territorios, así como el fortalecimiento del capital social como base para la acción colectiva (Berkes et al., 2008).

La investigación evidencia que el modelo actual de expansión urbana, basado en la ocupación extensiva de suelo agrícola sin planificación integral, genera territorios fragmentados, ambientalmente degradados y socialmente vulnerables (Morales, 2014). La pérdida de resiliencia afecta al periurbano y compromete la sustentabilidad de todo el sistema metropolitano al eliminar los servicios ecosistémicos, la producción local de alimentos y los espacios de amortiguamiento entre lo urbano y lo natural. La construcción de resiliencia territorial requiere un cambio paradigmático en la conceptualización y gestión del periurbano: de espacio residual y reserva de suelo urbano a territorio estratégico para la sustentabilidad regional mediante políticas públicas apropiadas (Holling, 1973; Metzger, 2014).

6. Conclusiones

La resiliencia del STPU de los cuatro municipios se encuentra en declive progresivo, evidenciado principalmente por la reducción sistemática de actividades primarias, transformación acelerada del uso de suelo y el deterioro de las condiciones ambientales. Existen patrones diferenciados determinados por la topografía, proximidad a vías de comunicación y cercanía a zonas urbanas consolidadas.

El factor económico es el detonante y la constante en todo el proceso. La escasa rentabilidad de actividades agrícolas, la insuficiencia de apoyos gubernamentales y el incremento de la inseguridad han generado un círculo vicioso que debilita la economía local tradicional. Este fenómeno se manifiesta en el abandono progresivo de tierras productivas y su posterior reconversión hacia otros usos.

La ausencia de relevo generacional es un elemento sustantivo. Contrario a lo que señala la literatura sobre grandes conurbaciones –donde el principal impulsor del cambio es la expansión urbana directa–, en las localidades estudiadas el envejecimiento de productores rurales y el desinterés de los jóvenes por las actividades agropecuarias preceden y facilitan la transformación territorial.

Sobre la percepción de bienestar, la mayoría de entrevistados reconoce mejoras en sus condiciones generales de vida, particularmente en infraestructura, servicios básicos y comunicaciones; sin embargo, identifican deterioros en los ámbitos productivo, ambiental y social. La degradación de los socioecosistemas es evidenciada en la contaminación hídrica, el empobrecimiento de los suelos, las alteraciones climáticas, la reducción de la biodiversidad, la afectación a la productividad y el incremento de la vulnerabilidad frente a eventos climáticos.

La dimensión económico-productiva presenta la menor resiliencia de las tres analizadas, configurándose como el punto crítico del sistema. Su débil desempeño influye negativamente sobre las dimensiones socioterritorial y ambiental, comprometiendo la sostenibilidad integral del STPU.

Las políticas territoriales actuales perpetúan la dualidad urbano-rural, ignorando la especificidad del periurbano con sus características y dinámicas propias. Esta invisibilización dificulta el desarrollo de estrategias específicas para estos territorios; sin embargo, el periurbano representa un área de oportunidad para el desarrollo regional.

La investigación abre líneas para futuros estudios sobre el periurbano, particularmente en torno a los servicios ecosistémicos y su valoración económica, los modelos de gobernanza territorial, los escenarios futuros a la luz del cambio climático, las dinámicas demográficas y las transformaciones socioeconómicas. La crisis de resiliencia que enfrenta el periurbano de la ZMX compromete su sustentabilidad y la del sistema metropolitano en su conjunto, por lo que se requiere un cambio paradigmático que lo reconozca como territorio estratégico para una sustentabilidad regional.

7. Referencias

- Aguilera, F., Valenzuela, L. M., & Botequilha-Leitão, A. (2011). Landscape metrics in the analysis of urban land use patterns: A case study in a Spanish metropolitan area. *Landscape and Urban Planning*, 99(3-4), 226-238.
- Allen, A. (2003). Environmental planning and management of the peri-urban interface: perspectives on an emerging field. *Environment and Urbanization*, 15(1), 135-148.
- Ávila Sánchez, H. (2001). Ideas y planteamientos teóricos sobre los territorios periurbanos: Las relaciones campo-ciudad en algunos países de Europa y América. *Investigaciones Geográficas*, (45), 108-127.
- Barsky, A. (2005). El periurbano productivo, un espacio en constante transformación. Introducción al estado del debate, con referencias al caso de Buenos Aires. *Scripta Nova*, 9(194). <https://www.raco.cat/index.php/scriptanova/article/view/64121>.

- Beach, D., Johansson, M., Öhrn, E., Rönnlund, M., & Per-Åke, R. (2019). Rurality and education relations: Metro-centricity and local values in rural communities and rural schools. *European Educational Research Journal*, 18(1), 19-33.
- Benítez Badillo, G. (2011). Crecimiento de la población y expansión urbana de la ciudad de Xalapa, Veracruz y sus efectos sobre la vegetación y agroecosistemas. Tesis de Doctorado, Colegio de Postgraduados, México.
- Benítez, G., Pérez-Vázquez, A., Nava-Tablada, M., Equihua, M., & Álvarez-Palacios, J. L. (2011). Expansión urbana y sus efectos ambientales en la periferia de la Ciudad de Xalapa, Veracruz México. *Medio Ambiente y Urbanización*, 75(1), 47-70.
- Berkes, F., Colding, J., & Folke, C. (Eds.). (2008). *Navigating social-ecological systems: building resilience for complexity and change*. Cambridge University Press.
- Brinkmann, K., Schumacher, J., Dittrich, A., Kadaore, I., & Buerkert, A. (2012). Analysis of landscape transformation processes in and around four West African cities over the last 50 years. *Landscape and Urban Planning*, 105(1-2), 94-105.
- Brundtland, G. H. (1987). *Our common future*. Oxford University Press.
- Calvente, A. (2007). Resiliencia: un concepto clave para la sustentabilidad. Universidad Abierta Latinoamericana-UASIS.
- Capel, H. (1975). La definición de lo urbano. *Estudios Geográficos*, 36(138), 265-302.
- Capel, H. (1991). La geografía y las periferias urbanas. Reflexiones para arquitectos. *Anthropos*, 43, 18-29.
- Cara, R. B. (2002). Los sistemas territoriales. Etapas de estructuración y desestructuración en Argentina. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 22, 113-129.
- Carterette, E. C., & Friedman, M. P. (1996). *Cognitive Ecology*. Academic Press.

- Castilla, C. A. A. (2006). Enfoques teóricos sobre la percepción que tienen las personas. *Horizontes Pedagógicos*, 8(1), 1-9.
- Castillo, R. M., & Chaves, D. M. (2016). Perspectivas de la sustentabilidad: teoría y campos de análisis. *Pensamiento Actual*, 16(26), 123-145.
- Centro de Información Estadística y Geográfica del Estado de Veracruz [CIEGVER]. (2021). *Anuario estadístico del Estado de Veracruz*. Gobierno del Estado de Veracruz.
- Common, M., & Perrings, C. (1992). Towards an ecological economics of sustainability. *Ecological Economics*, 6(1), 7-34.
- Costamagna, P. y Pérez Rozzi, S. (2015). Enfoque, estrategias e información para el desarrollo territorial. Los aprendizajes desde ConectADEL. https://otu.opp.gub.uy/sites/default/files/docsBiblioteca/Conectadel_web_150final.pdf.
- DENUE-INEGI. (2018). Directorio estadístico nacional de unidades económicas. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/default.aspx>.
- Diario Oficial de la Federación [DOF]. (2012). Ley General de Cambio Climático. México. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC.pdf>.
- Diario Oficial de la Federación [DOF]. (2016). Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano. México. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGAHOTDU.pdf>.
- Gaceta Oficial del Estado de Veracruz. (2022). Programa de ordenamiento territorial de la Zona Metropolitana de Xalapa, Veracruz.
- Gómez Oliver, L., & Tacuba Santos, A. (2017). La política de desarrollo rural en México. ¿Existe correspondencia entre lo formal y lo real? *Economía UNAM*, 14(42), 93-117.
- Gómez Orea, D. y Gómez Villarino, A. (2013). *Ordenación territorial*. Ediciones Mundi-Prensa.

- Gonçalves, J., Gomes, M. C., Ezequiel, S., Moreira, F., & Loupa-Ramos, I. (2017). Differentiating peri-urban areas: A transdisciplinary approach towards a typology. *Land Use Policy*, 63, 331-341.
- González-Arellano, S., Larralde-Corona, A. H., & Cruz-Bello, G. M. (2021). El periurbano en México: identificación y caracterización sociodemográfica y territorial. *Papeles de Población*, 27(108), 119-145.
- Hamdouch, A. y Depret, M. H. (2012). Geographical landscape of the green economy: actors, scales and strategies. *Finisterra*, 7(94), 49-80.
- Hassink, R. (2010). Regional resilience: a promising concept to explain differences in regional economic adaptability? *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, 3(1), 45-58.
- Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, 1-23.
- Iaquinta, D. L., & Drescher, A. W. (2000). Defining the peri-urban: rural-urban linkages and institutional connections. *Land Reform*, 2, 8-27.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2020). Marco Geoestadístico Nacional.
- Khzam, E. (2008). La percepción ambiental como significación del paisaje: implicancias teóricas desde la relación del ser humano y el entorno. *Revista Ambiente Total*, 1(1), 1-8.
- Korcelli, P., Korcelli-Olejniczak, E., & Kozubek, E. (2008). Typologies of European urban - rural regions: a review and assessment. *Geografia Polonica*, 81(2), 25-42.
- Martínez Chapa, O., & Salazar Castillo, J. E. (2022). Desafíos presentes en el México rural: problemas y posibilidades. *Espacio Abierto*, 31(3), 87-105.
- Metzger, J. (2014). Spatial Planning and/as Caring for More-Than-Human Place. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 46(5), 1001-1011.

- Morales Hernández, A. (2014). *La interfase urbano-rural como espacio estructurador de la expansión urbana*. Tesis de Maestría, Universidad Veracruzana.
- ONU-Hábitat. (2016). *Reporte nacional de tendencias de la prosperidad urbana en México*.
- ONU-Hábitat. (2020). *Estado global de las metrópolis 2020*.
- ONU-Hábitat. (2021). *Nueva Agenda Urbana*.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2019). *Panorama de la seguridad alimentaria y nutricional en América Latina y el Caribe 2019*.
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos [OCDE]. (2010). *Tipología regional de la OCDE*. OCDE.
- Pardo, M. (1996). Sociología y medioambiente: hacia un nuevo paradigma relacional. *Política y Sociedad*, (23), 33-51.
- Pardo, M. (1998). Sociología y medio ambiente: estado de la cuestión. *Revista Internacional de Sociología*, (19-20), 329-367.
- PHINA-RAN. (2023). Padrón e Historial de Núcleos Agrarios. Registro Agrario Nacional.
- Pryor, R. J. (1968). Defining the rural-urban fringe. *Social Forces*, 47(2), 202-215.
- Puebla, G. (2009). Caracterización del periurbano en países centrales y periféricos a través de cuatro autores: breve recopilación y análisis bibliográfico. *Breves Contribuciones del Instituto de Estudios Geográficos*, (21), 135-155.
- Puig, S. H. (2016). El periurbano, un espacio estratégico de oportunidad. *Biblio3W Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales*, 21(1160), 1-21.

- Rehren, A., Orellana, A., Arenas, F., & Hidalgo, R. (2018). La regionalización en un contexto de urbanización regional: Desde los desafíos a las propuestas de nuevos criterios de zonificación para el caso chileno. *Revista de Geografía Norte Grande*, (69), 191-209.
- Reyes, J. E., & Ballesteros, E. R. (2011). Resiliencia socioecológica: aportaciones y retos desde la Antropología. *Revista de Antropología Social*, 20, 109-135.
- Salazar, C. (2023). *Vínculos urbano-rurales: Entendiendo el multiverso territorial*. Banco Interamericano de Desarrollo.
- Sánchez-Zamora, P., Gallardo-Cobos, R., & Ceña-Delgado, F. (2016). La noción de resiliencia en el análisis de las dinámicas territoriales rurales: Una aproximación al concepto mediante un enfoque territorial. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 13(77), 93-116.
- Secretaría de Economía. (2023). *DataMéxico: Veracruz*. Secretaría de Economía.
- SEDATU-CONAPO-INEGI. (2023). *Metrópolis de México 2020*. SEDATU-CONAPO-INEGI.
- Simmie, J., & Martin, R. (2010). The economic resilience of regions: towards an evolutionary approach. *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, 3(1), 27-43.
- Truffino, J. C. (2010). Resilience: An approach to the concept. *Revista de Psiquiatría y Salud Mental*, 3(4), 145-151.
- Tuan, Y. F. (1974). *Topophilia: A study of environmental perception, attitudes, and values*. Prentice-Hall.
- Urruela, E. G. (1987). La evolución de los estudios sobre áreas periurbanas. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 7, 439-448.
- Villatoro, F. (2017). El territorio como sistema complejo. *ECA: Estudios Centroamericanos*, 72(749), 165-176.
- Viqueira, C. (1977). *Percepción y cultura: un enfoque ecológico*. CIESAS.



Biofertilizante de residuos orgánicos humanos generados en sanitarios secos: una revisión sistemática

Nelly Sánchez Gómez¹
Rene Murrieta-Galindo²

1. Introducción

Debido al aumento de la población, la demanda de alimentos también es mayor, siendo la agricultura una de las fuentes principales. Se han buscado estrategias que permitan incrementar los rendimientos de los cultivos utilizando productos agroquímicos, como pesticidas y fertilizantes, que contienen compuestos químicos tóxicos y dañinos que ponen en riesgo la seguridad alimentaria y ocasionan deterioros ambientales. Por ello, se han tratado de implementar alternativas que tengan mayor congruencia entre la producción de alimentos, el ambiente y la salud.

Una opción es el uso de productos que ocasionen menores impactos negativos como los biofertilizantes, que se han hecho muy populares actualmente, siendo los más producidos los basados en estiércol de animales, que ofrecen resultados favorables en la nutrición del suelo y desarrollo de las plantas. A pesar de que se ha demostrado que las heces y orina humanas, así como los biofertilizantes generados a partir de ellas, ofrecen los nutrimentos que el suelo requiere, también son una fuente de patógenos que no garantizan la inocuidad de los alimentos si no se les da un tratamiento adecuado, provocando mala percepción y baja aceptación de los usuarios, al no contar con un sustento que asegure la fiabilidad en su uso para la producción agrícola. Por ello, esta revisión busca proporcionar una visión general acerca de distintos tratamientos utilizados para transformar los residuos orgánicos humanos (heces y orina), generados en sistemas de sanitarios secos, en biofertilizante para la producción de alimentos a nivel mundial, considerando las directrices de PRISMA. Este análisis se enfoca en los métodos para el tratamiento de este tipo de residuos y evalúa la viabilidad en su implementación

¹ nesago84@gmail.com. El Colegio de Veracruz. Doctorante en Desarrollo Regional Sustentable, ingeniera química y maestra en Desarrollo Regional Sustentable, dedicada a la educación y desarrollo de proyectos de ingeniería con enfoque social y ambiental.

² murrieta13@gmail.com. El Colegio de Veracruz. Especialista en conservación de recursos naturales en contexto multidisciplinario, ecología cultural y bioestadística enfocado a la investigación para la integración y fortalecimiento de pensamiento crítico y reflexivo. Miembro del SNI, nivel 1.

como biofertilizantes, tomando en cuenta la importancia de su correcta gestión para garantizar que sean seguros y efectivos en la agricultura.

2. Fundamentación teórica

A nivel mundial, se ha incrementado la necesidad de alimentos debido al aumento poblacional, ya que hay alrededor de 7.9 mil millones de personas en el mundo, esto de acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2023). Por tanto, la demanda de alimentos también lo hará, sin tener en cuenta las causalidades de hambre y hambruna que esto provocará (Mahanty et al., 2017; Merino y Vilà, 2021). Esta situación va de la mano con la crisis mundial de costo de vida debido a los requerimientos energéticos y a las variables socioeconómicas (Sniatala, Kurniawan, Sobotka, Makinia, y Othman, 2023). Una solución para reducir el tiempo y rendimiento de los cultivos para satisfacer estas demandas ha sido el uso de pesticidas, fertilizantes e insecticidas sintéticos o que contienen compuestos químicos contaminantes en la agricultura, que desafortunadamente han provocado efectos adversos a la seguridad alimentaria y la sostenibilidad (Augustine et al., 2022) e incrementan los costos de producción de alimentos.

Esta forma de satisfacer la demanda de los mismos requiere ser mejorada para que el suelo obtenga los nutrientes requeridos empleando productos que disminuyan los impactos adversos al ambiente y la salud durante las prácticas agrícolas. Todo ello enfocado con directrices internacionales tal como los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS): el ODS 3 salud y bienestar; el ODS 6 agua limpia y saneamiento; el ODS 11 ciudades y comunidades sostenibles; y el ODS 13 acción por el clima, principalmente. Es decir, para que las actividades agrícolas se desarrollen desde el punto de vista de la sostenibilidad ambiental se deben identificar y aprovechar las opciones que tiene el humano para disminuir la generación de residuos, así como su aprovechamiento eficiente para prevenir la contaminación del aire, suelo y agua de una forma eficiente, factible y confiable (Elleuch, Bouhamed, Elloussaief y Jaghbir, 2018), tal es el caso de los abonos orgánicos o llamados también biofertilizantes. Estos mejoran la absorción de nutrientes en las plantas, coadyuvando al incremento de la productividad y rendimiento de los cultivos, además de ser rentables económica y ambientalmente, ya que mejoran la calidad del suelo, y para su generación se reutilizan generalmente residuos orgánicos (Augustine et al., 2022); este tipo de productos han sido aceptados y utilizados como una óptima fuente de nutrientes –como el nitrógeno, fósforo y potasio (NPK)– para las plantas (Sharuddin et al., 2022). No obstante, los residuos orgánicos humanos a partir de los procesos metabólicos, comprendiendo las excretas y orina principalmente, no han sido planteados en su forma de uso de forma tan precisa en la agricultura.

En este contexto, a pesar de contar con evidencia científica de que las excretas humanas resultan ser fuente de nutrientes para el suelo y plantas, además de tener bajos costos (Tran-Thi et al., 2017), y que por esto se les ha utilizado como

fertilizantes, se sabe que son una fuente importante de patógenos, si no se le da un tratamiento correcto, poniendo en riesgo la salud de personas y animales (Niwagaba, Nalubega, Vinnerås, Sundberg y Jönsson, 2009). Esto ha generado que se tenga una percepción negativa acerca de su uso por las personas, y éstas se encuentren renuentes a implementar, probar y gestionar este tipo de productos en sus cultivos (Buit y Jansen, 2016) pese a los beneficios ambientales, económicos y alimentarios derivados de su uso (Niwagaba et al., 2009).

La situación es paradójica, cuando incluso en las zonas urbanas de países industrializados se utiliza el agua para transportar los desechos humanos (excretas y orina) por los sistemas de drenaje y alcantarillado hacia las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), donde las aguas tratadas producen biosólidos que se han utilizado comúnmente para aplicarlos en los suelos agrícolas con la intención de nutrirlos, aunque la cantidad de nutrientes que poseen después del tratamiento es limitada (Winker, Vinnerås, Muskulus, Arnold y Clemens, 2009). Sin embargo, siguen existiendo muchas preocupaciones aun sobre los contaminantes orgánicos, metales pesados y organismos patógenos que puedan contener, y los riesgos que esto provoca (Harder, Wielemaker, Larsen, Zeeman y Öberg, 2019).

De acuerdo con lo anterior, si bien en la mayoría de las zonas urbanas se han implementado sistemas para el acceso al agua potable y saneamiento seguro como el drenaje y el alcantarillado, así como para el tratamiento de los residuos, estos son costosos (Montgomery y Elimelech, 2007), pues requieren de infraestructura específica y un alto consumo de energía, además de los gastos en el tratamiento de lodos, si se quisieran implementar para la producción de biofertilizantes (Brands, 2014). Por esa razón, es que tener este tipo de sistemas resulta inaccesible para todos los habitantes del planeta, por lo que se calcula que en 2023 aún 1500 millones de personas carecían de servicios básicos de saneamiento de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud y el Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (WHO y UNICEF, 2023).

Resulta importante implementar tecnologías que puedan dar cumplimiento a las necesidades básicas de la población, que resulten económicas y que permitan reutilizar los residuos en productos seguros como los biofertilizantes. Por tanto, las ecotecnologías para resolver este problema han sido una de las opciones mejor aceptadas, ya que estas se pueden definir como los distintos dispositivos, tecnologías, procesos o métodos que ofrecen a los usuarios diversos beneficios económicos, sociales y ambientales (Ortiz Moreno, Malagón García y Masera Cerutti, 2015). Tal es el caso en las zonas donde hay una carencia de servicios y donde sí hacen uso adecuado de los productos residuales de tal infraestructura sustentable (Najjar, Normandin, Strait y Esvelt, 2017).

Dentro de las ecotecnologías, los sanitarios secos resultan ser una de las alternativas viables para satisfacción de necesidades básicas de los humanos, en este caso a falta de agua potable y alcantarillado, y cuya función, si son bien diseñados, con base en las características y necesidades de la población, ofrecen

múltiples beneficios por medio del almacenamiento de los residuos orgánicos (excretas y orina) ya sea juntos o separados (dependiendo del diseño), que al ser tratados generan un biofertilizante para emplearse en los cultivos agrícolas en todo el mundo (Harroff et al., 2019).

3. Materiales y métodos

La revisión sistemática de artículos científicos se realizó a nivel internacional en materia de biofertilizantes producidos a partir de residuos orgánicos humanos generados por el uso de la ecotecnología de sistemas sanitarios secos. En la realización se consideraron las directrices de la declaración PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses), debido a que permite definir claramente los temas de investigación, y seleccionar los criterios de inclusión y exclusión que garanticen la pertinencia de los artículos en el contexto del estudio (Page et al., 2021).

Para una búsqueda inicial se plantearon tres preguntas base que fueron:

- 1) ¿Cuáles son los tratamientos de residuos de sanitarios secos que garantizan un biofertilizante seguro?
- 2) ¿Se debe separar la orina de las excretas para el tratamiento de los residuos producidos en un sanitario seco?
- 3) ¿Qué ventajas posee el biofertilizante obtenido a través de los residuos orgánicos humanos de un sanitario seco?

Se gestionaron tres bases de datos científicas a partir de la búsqueda en: PubMed, ScienceDirect y Dimensions, utilizando los términos “biofertilizer”, “dry toilet” y “excreta and urine treatment”, y se obtuvieron 6 resultados en PubMed, 497 en ScienceDirect y 861 en Dimensions para un total de 1364 resultados, los cuales se revisaron por título, y en su mayoría no coincidían con la temática a analizar. Posteriormente se emplearon los operadores booleanos AND y OR, que al combinarse con las palabras clave integraron la fórmula: (“biofertilizer”) AND (“human organic waste” OR “human excreta” OR “human waste”) AND (“dry toilets” OR “dry sanitation”) AND (“composting” OR “waste treatment” OR “nutrient recycling”) encontrando un total de 59 publicaciones en Dimensions, 7 en ScienceDirect y ninguna en PubMed, por lo que se agregó la base de datos más que fue Google Scholar para fortalecer y complementar la revisión con otros artículos, encontrando en ella un total de 49 artículos.

Una vez completada la búsqueda se continuó con la primera fase del cribado que consistió en la revisión de títulos para eliminar los duplicados y se realizó la revisión de resúmenes para identificar la relación y aporte con la investigación. Se continuó con la segunda fase en la cual se revisaron los textos completos para verificar su cumplimiento respecto con los criterios de inclusión y exclusión (Tabla 1) para terminar el cribado.

Tabla 1. Criterios de selección.

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
1. Año de publicación de 2015 a 2024.	1. Artículos que no abordan específicamente el uso de los residuos humanos transformados como biofertilizante. Por ejemplo, si solo abordan el tratamiento de residuos sin evaluar su uso agrícola.
2. Artículos que se centren específicamente en la transformación de residuos humanos (excretas y orina) provenientes de sanitarios secos en biofertilizantes.	2. Artículos de investigaciones con diseños metodológicos deficientes, sin controles adecuados, o con sesgos claros que limitan la validez de los resultados.
3. Artículos sobre la seguridad, riesgos sanitarios, y consideraciones ambientales del uso de biofertilizantes provenientes de residuos humanos.	3. Artículos de estudios que sólo presenten resúmenes o que no brinden datos suficientes para evaluar la calidad del estudio o la relevancia de los resultados.
4. Artículos en inglés o español.	4. Estudios en los que no se tenga acceso al texto completo para evaluar la metodología y los resultados de manera adecuada.

Fuente: Elaboración propia.

Los artículos seleccionados para la análisis y revisión fueron organizados en una matriz de datos en Microsoft® Excel® que contiene la información: autor, título, año, país, DOI (Digital Object Identifier), tipo de sistema sanitario utilizado, tratamiento, materiales, cultivo donde se implementó, así como las ventajas y desventajas de los biofertilizantes obtenidos; esto con el fin de facilitar su análisis.

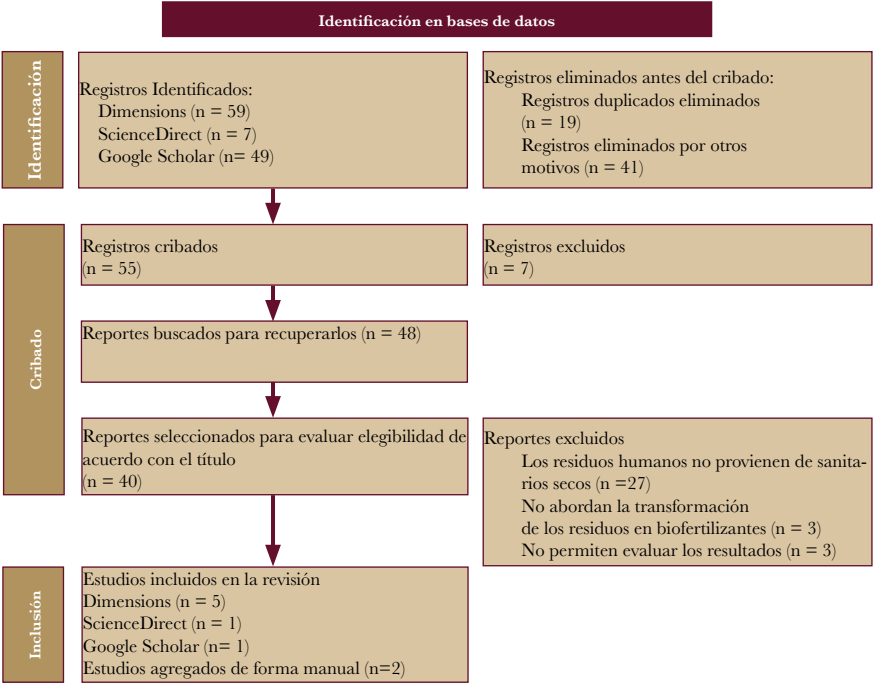
4. Resultados

De acuerdo con la búsqueda realizada con los operadores booleanos, se encontraron un total de 115 artículos antes de pasar a la etapa del cribado. Se eliminaron aquellos que no correspondían a artículos, si no a otro tipo de textos. También se filtró el periodo de publicación seleccionado en los criterios de inclusión (2015-2024) y se obtuvieron 67 resultados. Posteriormente, se eliminaron los artículos duplicados, para quedar con un total de 48 artículos que pudieron recuperarse para su análisis por resumen y texto completo. De estos, 41 fueron descartados al no cumplir con alguno de los criterios de inclusión o exclusión planteados. Los resultados se presentan en el diagrama de flujo PRISMA en 3 niveles: Identificación, cribado e inclusión (Figura. 1).

Con base en lo anterior, se puede observar que a nivel mundial no se han publicado suficientes investigaciones que se basen en la transformación de residuos orgánicos humanos, específicamente excretas y orina obtenidos de sistemas de sanitarios secos para su transformación en biofertilizantes seguros para poder utilizarlos en la producción de alimentos.

Los 9 artículos seleccionados para la revisión son de diferentes países, siendo Brasil el único que cuenta con 2 publicaciones de relevancia para esta investigación. Los 7 artículos restantes provienen de Ghana, Haití, Madagascar, India, Etiopía, Uganda y Vietnam. Estos países tienen en común algunas características socioeconómicas como dependencia de sectores primarios, principalmente la

Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA.



Fuente: Elaboración propia.

agricultura, conforme a lo indicado por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2021), además de desigualdad de ingresos y carencias en infraestructura básica, de acuerdo con la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE, 2022). Se encontró un artículo del año 2008, dos de 2017, un artículo de 2021, tres de 2023 y dos de 2024. De cada uno de ellos, se identificó el objetivo principal para conocer su relevancia y pertinencia en esta revisión (Tabla 2).

Tabla 2. Objetivos, países y años de publicación.

País	Año	Objetivo
2008	Uganda	Investigar cómo alcanzar temperaturas sanitizantes al compostar mezclas de excretas y cenizas, para determinar cómo el proceso responde a diferentes mezclas de residuos alimentarios.
2017	Madagascar	Evaluar la eficacia de tres tipos de fertilizantes derivados de excretas humanas (digestato, compost y vermicompost) en comparación con fertilizantes inorgánicos, así como investigar su aceptabilidad entre los agricultores en la zona periurbana de Antananarivo, Madagascar.
2017	Vietnam	Evaluar la viabilidad económica y los riesgos de infección por helmintos transmitidos por el suelo (STH) asociados con la reutilización de excretas humanas como fertilizante en la agricultura, específicamente en el cultivo de arroz en Vietnam
2021	Haití	Determinar las respuestas de las plantas y el suelo a enmiendas de materia orgánica derivadas de excretas humanas, así como estimar el potencial de reciclaje de estas excretas para satisfacer la demanda de nutrientes de cultivos a nivel nacional en Haití.

2023	Brasil	Evaluar la supervivencia y el transporte de bacterias entéricas (como <i>E. coli</i> y <i>Salmonella</i> entérica) y virus entéricos (como MS2 y ΦX-174) cuando se aplican como contaminantes en biofertilizadores elaborados a partir de heces humanas y orina, en el contexto de la producción de cultivos, específicamente <i>Lactuca sativa</i> (lechuga).
2023	Etiopía	Evaluar el potencial de biogás y compostaje de las heces humanas frescas en Etiopía, con el fin de contribuir al desarrollo de tecnologías de saneamiento sostenibles y promover una economía circular a partir de los flujos de desechos.
2023	Brasil	Evaluar la contaminación por <i>Escherichia coli</i> y adenovirus humano en el suelo y en los tejidos de las plantas, específicamente en lechugas cultivadas con biofertilizantes elaborados a partir de excretas humanas compostadas.
2024	Ghana	Evaluar la percepción de la comunidad local sobre el uso de inodoros secos que desvían la orina (UDDT) y la adopción de la agricultura de baobab en el distrito de Adaklu, Ghana.
2024	India	Investigar el reciclaje de nutrientes de heces humanas (HF) separadas en origen, utilizando biochar inmovilizado con bacterias psicotróficas indígenas, con el fin de sustentar los agroecosistemas de la región del noroeste de los Himalayas.

Fuente: Elaboración propia.

En los artículos analizados se identificaron las características de los sistemas sanitarios secos utilizados para la recolección de los residuos. Aunque en uno de ellos no se mencionaba, ya que se centraba en el tratamiento de los residuos, sí se especificaba que se separa la orina de las excretas, y en otro se mencionaba que los residuos eran recolectados a través de estos sistemas, pero no se daban detalles.

Una característica relevante para considerar antes de conocer los tratamientos es que tipo de sanitarios secos utilizaron y si cuentan con desviación de orina, ya que esto implicaría que las excretas se tratan por separado (Tabla 3).

Tabla 3. Sistema sanitario utilizado.

Año	País	Características del sistema sanitario	Desviación de orina
2008	Uganda	El artículo únicamente menciona que son inodoros que desvían la orina y las heces, permitiendo la recolección separada de estos excrementos.	Sí
2017	Madagascar	No menciona qué tipo de baño seco utilizan, solo menciona el tratamiento.	Sí
2017	Vietnam	Inodoro de doble pozo (double vault latrine) con dos compartimentos: El diseño incluye dos pozos separados, lo que permite que uno se use mientras el otro se llena. Esto facilita el almacenamiento y la descomposición de las excretas y ayuda a reducir los olores y los patógenos. Cuenta con fácil acceso para la recolección de excretas una vez que están llenos, lo que facilita su uso como fertilizante.	No lo menciona
2021	Haití	Sistema emergente de saneamiento ecológico (EcoSan) que se implementa en Haití y en varios otros contextos a nivel global. Este sistema acopla inodoros domésticos basados en contenedores con compostaje aeróbico y termofílico. Este sistema de saneamiento en bucle cerrado genera recursos orgánicos nutritivos que pueden ser utilizados como parte de un enfoque ecológico para la gestión de nutrientes del suelo.	Sí
2023	Brasil	Se emplean lisímetros, que son tanques de polietileno diseñados para simular condiciones de suelo y permitir el drenaje y la recolección de lixiviados para el análisis, pero no menciona el tipo de sanitarios.	No lo menciona

Sustentabilidad en plural: diversas dimensiones y perspectivas

2023	Etiopía	Únicamente se menciona que es un inodoro seco de separación de orina, diseñado para facilitar el manejo de las heces humanas, minimizando la exposición a olores y moscas, y asegurando la comodidad de los usuarios	Sí
2023	Brasil	Solo mencionan sanitarios secos, pero sin dar detalles	Sí
2024	Ghana	Inodoros secos que desvían la orina (UDDT) y el compost derivado de estos inodoros.	Sí
2024	India	Inodoros de compostaje (CT, por sus siglas en inglés) que son utilizados en la región del Himalaya.	Sí

Fuente: Elaboración propia.

En siete de los nueve estudios se identificó la separación de la orina en los sistemas sanitarios mientras que en los dos restantes no se menciona si cuentan con ello. Sin embargo, en el estudio de Vietnam se hace referencia al almacenamiento y tratamiento de las excretas, sin mencionar la orina, por lo que se infiere que se separan antes de su conversión en biofertilizante.

Los tratamientos, entonces, se realizan de manera general con previa separación de orina. Para facilitar su comprensión se dividieron en pasos para cada estudio, y así conocer a detalle en qué consiste cada uno de ellos.

Para el caso de Uganda, Niwagaba et al. (2009) realizan el tratamiento en 6 pasos: 1) recolección y separación de excretas y orina; 2) mezcla de materiales, es decir, de las excretas y residuos de alimentos en diferentes proporciones para crear un sustrato con mejores condiciones; 3) control de humedad y temperatura durante el compostaje añadiendo agua y monitoreando la temperatura; 4) insulación y mezcla, utilizando espuma de poliestireno para mantener la temperatura por encima de los 50 °C; 5) mantenimiento de temperaturas superiores a los 50 °C durante al menos una semana para reducir los patógenos, y 6) Monitoreo de la reducción de patógenos mediante la medición de la reducción de organismos indicadores de contaminación fecal. Para el composteo se emplean las excretas, residuos alimentarios, enmiendas (compost viejo), espuma de poliestireno, reactores de compostaje, agua y herramientas para el mezclado. Se menciona que el tiempo total sería de 20 días para la obtención del biofertilizante y no se especifica en que cultivo fue probado.

De acuerdo con Moya Diaz-Aguado, Parker, Sakrabani y Mesa (2017), en la investigación realizada en Madagascar, el biofertilizante obtenido se aplicó en cultivos de maíz, considerando un tiempo de compostaje de un mes, y el tratamiento se realizó en 3 pasos: 1) digestión anaeróbica en la que se obtiene un digestato; 2) compostaje del digestato mezclado con materiales como paja de arroz, y 3) vermicompostaje. Para el compostaje únicamente se utilizó el digestato producido por la digestión anaerobia de las excretas y la paja de arroz.

En Tran-Thi et al. (2017), el estudio se realizó en Vietman, pero no fue posible dividir el tratamiento en pasos, debido a que solo se menciona que el tiempo de composteo no debe ser menor de 6 meses para inactivar los huevos y larvas de helmintos transmitidos por el suelo. Sin embargo, por las condiciones

de las cosechas, se sugirió a los agricultores compostar las excretas durante 153 días añadiendo un 10 % de cal para acelerar la inactivación de los patógenos y materiales con contenido de carbono como hojas secas, paja o cartón, que equilibran la relación carbono-nitrógeno.

Ryals et al. (2021) determinaron las respuestas de las plantas y el suelo a enmiendas de materia orgánica derivadas de excretas humanas, y estimaron el potencial de reciclaje de estas excretas para satisfacer la demanda de nutrientes de cultivos a nivel nacional en Haití. Esto por medio de la obtención de un biofertilizante probado en cultivos de rábano, para el tratamiento de implementaron dos pasos: 1) el composteo aeróbico termofílico, combinando las excretas humanas con residuos de caña de azúcar, y 2) Monitoreo de temperaturas para reducir el contenido de patógenos, pero no se especifica la temperatura adecuada ni el tiempo de compostaje.

Por otro lado, Carlon, Ferreira, Carloto, Fongaro y Magri (2023), en su estudio realizado en Brasil, trataron las excretas en 3 pasos: 1) tratamiento con 0.5 % de urea por medio de una mezcla de cenizas y conchas de ostra para inactivar los patógenos; 2) compostaje a través de pilas de compost en una proporción de 1:3 de excretas con residuos orgánicos no especificados, y 3) almacenamiento en contenedores de plástico durante 3 meses, para que el biofertilizante obtenido fuera seguro en cuanto al contenido de patógenos, y se aplicó en cultivos de lechuga.

En el trabajo presentado por Donacho et al. (2023) en Etiopía, el tratamiento de las excretas se divide en 4 pasos para la obtención del biofertilizante: 1) recolección de las muestras del contenedor del sanitario seco; 2) digestión anaerobia en un reactor de biogás para lograr la descomposición de la materia orgánica, donde se obtiene biogás y un digestato (biofertilizante); 3) análisis de nutrientes para evaluar el potencial del digestato como biofertilizante en cuanto a nitrógeno, fósforo y potasio (NPK), y 4) compostaje del digestato. En este trabajo no se menciona el tiempo de tratamiento y considera únicamente a las excretas humanas como material para el compostaje.

En Gonçalves, Carlon, Fongaro y Magri (2024), la investigación se centra en el reciclaje de heces humanas para la producción de cultivos en Brasil, para evaluar la contaminación por *Escherichia coli* y adenovirus humano en el suelo y en los tejidos de las plantas, aunque no mencionan las características del sanitario seco utilizado o si requiere de la separación de orina. Se consideraron 4 pasos para la generación del biofertilizante: 1) recolección de las excretas sin mencionar la orina; 2) almacenamiento durante 6 meses; 3) compostaje con una mezcla de chips de madera, y durante los primeros 10 días se añaden grandes cantidades de materia orgánica como hojas, paja, y otros residuos biodegradables, y 4) Fase termofílica que inicia a partir del décimo día y se añaden las excretas humanas manteniendo la alimentación de los residuos orgánicos hasta el final para una relación de 4:1 (residuos: excretas). El biofertilizante se aplicó en cultivos de lechuga.

En otro estudio Horlu, Egbadzor, Afetorgbor y Akumah (2024), en Ghana, especifican el uso de sanitarios secos con separación de orina (UDDT), debido a que es fácil de mantener y no produce malos olores, además de facilitar la recolección de los residuos por separado. No es posible separar el tratamiento en pasos ya que solo menciona que tanto la orina como las excretas se pueden utilizar como biofertilizantes, y que a las segundas se les debe secar y compostar para que el producto final sea seguro para su uso agrícola.

Por último, Borker et al. (2024) muestran en su trabajo realizado en India los pasos para el tratamiento de residuos: 1) separación en el lugar de origen de los inodoros de compostaje, 2) uso de microorganismos psicotrópicos indígenas para degradar las excretas a bajas temperaturas, aproximadamente $10 \pm 2^{\circ}\text{C}$; 3) inmovilización en biochar, que actúa como soporte, para mejorar la actividad microbiana y las características del suelo; 4) compostaje de las excretas en tambores de plástico modificados en un periodo de 90 días, y 5) evaluación de la calidad del compost, como niveles de patógenos y ausencia de efectos fitotóxicos, así como su capacidad para mejorar las plantas de los cultivos probados (guisante, cebada y rábano blanco).

De acuerdo con el análisis anterior y dando respuesta a las tres preguntas base de la búsqueda, se encontró que, en relación con la primera pregunta acerca de los tratamientos que garantizan un biofertilizante seguro, la mayoría de los países mencionados aplican procesos de compostaje controlado. Estos pueden incluir una etapa termofílica pero siempre van acompañados de enmiendas (cenizas, cal, biochar, paja, etc.) o almacenamiento por tiempo prolongado de hasta seis meses. La combinación de estas prácticas, si son adaptadas de manera correcta a las condiciones locales, han podido reducir la carga de patógenos.

En cuanto a la segunda pregunta, si se debe separar la orina de las excretas para el tratamiento de los residuos producidos en un sanitario seco, en la mayoría de los estudios analizados se implementaron sanitarios secos con separación de orina. Incluso en los que no se menciona de manera clara, se infiere que lo manejan por separado, pero no se especifica en ninguno de ellos cuál es la razón de realizar la separación.

Por último, para dar respuesta a la tercera pregunta, sobre las ventajas que posee el biofertilizante obtenido a través de los residuos orgánicos humanos de un sanitario seco, y con base en este análisis, se pudo identificar que los biofertilizantes obtenidos en cada caso presentan ventajas específicas dependiendo de cada tratamiento, siendo las que se repiten en todos los casos el aporte nutricional al suelo y las plantas, los bajos costos para su producción, la reutilización de los residuos, y reducción de uso de productos agroquímicos contaminantes, y de manera general la sostenibilidad desde sus tres ejes principales, ya que en su mayoría mencionan la alineación de la investigación a los Objetivos del Desarrollo Sostenible, y en otros casos se encuentran implícitos en el texto. En cuanto a las desventajas, se encuentran la mala percepción y poca aceptación de los

usuarios, riesgos a la salud por contenido de patógenos si el tratamiento no se realiza de manera adecuada, inversión inicial y los requerimientos de manejo.

5. Conclusiones

Esta revisión muestra la falta de investigaciones que se enfoquen en la recuperación de los residuos obtenidos de los sanitarios secos (excretas y orina) para su aprovechamiento como un producto útil y seguro para su uso en la agricultura. Sin embargo, por medio de los presentados se observa que, si las condiciones de tratamiento se llevan a cabo de una manera adecuada, se pueden generar biofertilizantes que ofrezcan beneficios a los productores de alimentos.

Resulta interesante que los países donde se realizaron estas investigaciones coinciden en algunas características socioeconómicas, como la fuerte dependencia de su economía en la agricultura, lo que podría justificar su búsqueda por alternativas que mejoren la calidad del suelo y rendimiento de los cultivos con menores impactos ambientales.

Los tratamientos son específicos y existen muchas variaciones entre los tiempos de composteo y los materiales a utilizar, por lo que asegurar un tiempo mayor a seis meses reduciría el riesgo de contaminación por patógenos y utilizar materiales carbonosos disponibles en cada zona, que no representen costos excesivos o adicionales, continuaría con el enfoque sustentable de este tipo de trabajos.

Es importante realizar una caracterización fisicoquímica y microbiológica de los biofertilizantes obtenidos para comprobar su calidad, así como probarlos en diferentes cultivos y observar su rendimiento. Estos dos factores podrían influir en la creación de políticas para el uso de este tipo de productos, así como legislación y normatividad que garanticen su uso a los usuarios al momento de su aplicación en un corto plazo.

6. Referencias

- Aguilera, Augustine, D., Adewale, F., Gokul, G., Olalekan, B., Omolola, A., Stacey, F., Ashwil, K. (2022) Biofertilizer: *the future of food security and food safety*. *Microorganisms*, 10 (6), 12-20. doi: <https://doi.org/10.3390/microorganisms10061220>.
- Borker, S. S., Thakur, A., Pandey, K. K., Sharma, P., Manyapu, V., Khatri, A., y Kumar, R. (2024). Nutrient recycling of source-separated human faeces using biochar immobilized indigenous psychrotrophic bacteria for sustaining the agroecosystems of north-western Himalaya. *Applied Biological Chemistry*, 67(1), 37.

- Brands, E. (2014). Prospects and challenges for sustainable sanitation in developed nations: a critical review. 22(4), 346-363.
- Buit, G., y Jansen, K. (2016). Acceptance of human feces-based fertilizers in fecophobic Ghana. *Human Organization*, 75(1), 97-107.
- Carlón, P., Ferreira, F. D. G., Carloto, C. F. M., Fongaro, G., y Magri, M. E. (2023). Fate of enteric bacteria and viruses in silt loam soil amended with biofertilizers made from human feces and urine for crop production. *Hygiene and Environmental Health Advances*, 7.
- Donacho, D. O., Tucho, G. T., Olani, D. D., Kabtiyimer, H. E., Hailu, A. B., y Wolde, A. D. (2023). Experimental evaluation of fresh human feces biogas and compost potential: Evidence for circular economy from waste streams in Ethiopia. *Heliyon*, 9(12).
- Elleuch, B., Bouhamed, F., Elloussaief, M., y Jaghbir, M. (2018). Environmental sustainability and pollution prevention. *Environmental Science Pollution Research*, 25, 18223-18225. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0619-5>.
- FAO. (2021) *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2021: lograr que los sistemas agroalimentarios sean más resilientes a las perturbaciones y las tensiones*. Recuperado de <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/ca5ef61c-f764-4308-b752-e9a094bb3cf8/content/cb4476es.html>
- Gonçalves, F. G., Carlón, P., Fongaro, G., y Magri, M. E. (2024). Recycling Human Feces for Crop Production: Assessment of Soil and Plant Tissue Contamination by Escherichia Coli and Human Adenovirus. *Science of The Total Environment*, 928, 172-375.
- Harder, R., Wielemaker, R., Larsen, T. A., Zeeman, G., y Öberg, G. (2019). Recycling nutrients contained in human excreta to agriculture: Pathways, processes, and products. *Critical reviews in environmental science technology*, 49(8), 695-743.

- Harroff, L. A., Liotta, J. L., Wangolo, E. E., Egan, T. J., Bowman, D. D., y Angenent, L. T. (2019). Field-scale co-fermentation of solid waste from urine-diverting dry toilets (UDDT-SW) and banana waste to produce undissociated carboxylic acids to inactivate ascaris eggs. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 139.
- Horlu, G. S. A., Egbadzor, K. F., Afetorgbor, E., y Akumah, A. M. (2024). Perception of urine diverting dry toilet and baobab cultivation in Adaklu District of Ghana. *Sustainable Environment*, 10(1), 2391630.
- Mahanty, T., Bhattacharjee, S., Goswami, M., Bhattacharyya, P., Das, B., Ghosh, A., y Tribedi, P. (2017). Biofertilizers: a potential approach for sustainable agriculture development. *Environmental Science Pollution Research*, 24, 3315-3335. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8104-0>.
- Merino, A. G. P., & Vilà, M. B. (2021). *Alimentación, salud y sustentabilidad: hacia una agenda de investigación*: UNAM, Secretaría de Desarrollo Institucional.
- Montgomery, M. A., y Elimelech, M. (2007). Water And Sanitation in Developing Countries: Including Health in the Equation. *Environmental Science & Technology*, 41(1), 17-24. DOI:10.1021/es072435t.
- Moya Diaz-Aguado, B., Parker, A., Sakrabani, R., y Mesa, B. (2017). Evaluating the efficacy of fertilisers derived from human excreta in agriculture and their perception in Antananarivo, Madagascar. *Waste Biomass Valor*. 10, 941-952. DOI: 10.1007/s12649-017-0113-9.
- Najjar, D. A., Normandin, A. M., Strait, E. A., y Esvelt, K. M. (2017). Driving towards ecotechnologies. *Pathogens global health*, 111(8), 448-458.
- Niwagaba, C., Nalubega, M., Vinnerås, B., Sundberg, C., y Jönsson, H. (2009). Bench-scale composting of source-separated human faeces for sanitation. *Waste Management*, 29(2), 585-589.

- OCDE (Producer). (2022). Seguimiento y evaluación de políticas agrícolas. Retrieved from <https://www.oecd.org>.
- ONU. (2023). Naciones Unidas Retrieved from <https://www.un.org/es/global-issues/population>.
- Ortiz Moreno, J. A., Malagón García, S. L., y Masera Cerutti, O. R. (2015). Ecotecnología y sustentabilidad: una aproximación para el Sur global. *INTER DISCIPLINA*, 3(7). <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485705e.2015.7.52391>.
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., . . . Brennan, S. E. (2021). Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista española de cardiología*, 74(9), 790-799.
- Ryals, R., Bischak, E., Porterfield, K. K., Heisey, S., Jeliarovski, J., Kramer, S., y Pierre, S. (2021). Toward zero hunger through coupled ecological sanitation-agriculture systems. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 716140.
- Sharuddin, S. S., Ramli, N., Yusoff, M. Z. M., Muhammad, N. A. N., Ho, L. S., y Maeda, T. (2022). Advancement of metatranscriptomics towards productive agriculture and sustainable environment: a review. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(7), 3737.
- Sniatala, B., Kurniawan, T. A., Sobotka, D., Makinia, J., y Othman, M. H. D. (2023). Macro-nutrients recovery from liquid waste as a sustainable resource for production of recovered mineral fertilizer: Uncovering alternative options to sustain global food security cost-effectively. *Science of the Total Environment*, 856, 159283.
- Tran-Thi, N., Lowe, R. J., Schurer, J. M., Vu-Van, T., MacDonald, L. E., y Pham-Duc, P. (2017). Turning poop into profit: Cost-effectiveness and soil transmitted helminth infection risk associated with human excreta reuse in Vietnam. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 11(11). doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0006088>.

WHO y UNICEF. (2023). *Water, sanitation, hygiene, waste and electricity services in health care facilities: progress on the fundamentals. 2023 global report*: World Health Organization.

Winker, M., Vinnerås, B., Muskolus, A., Arnold, U., y Clemens, J. (2009). Fertiliser products from new sanitation systems: their potential values and risks. *Bioresource technology*, 100(18), 4090-4096.



Tecnología y sostenibilidad: retos y perspectivas de la fertilización de tasa variable en México

Angélica Rodríguez Cortés¹

María Graciela Hernández y Orduña²

Cynthia Wong Argüelles³

1. Introducción

El sector agrícola desempeña un papel fundamental en el desarrollo de los países, como motor esencial para generar crecimiento económico y como herramienta para reducir la pobreza, mejorar la seguridad alimentaria, disminuir las disparidades de ingresos y proporcionar servicios ambientales. Si bien la agricultura ha sido históricamente la piedra angular del desarrollo en muchos países, su importancia ha sido subestimada por los gobiernos y las políticas de desarrollo internacionales, lo que ha resultado en un crecimiento limitado de este sector y en un incremento de la pobreza, sobre todo en el ámbito rural (Byerlee, De Janvry, y Sadoulet, 2009).

Este sector posee gran relevancia económica y de desarrollo en México. Según el censo agropecuario de 2022 publicado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), se contabilizó una superficie agrícola de 29,806,776 hectáreas, de las cuales el 18.79% se mantuvo sin cultivo por diversas razones, como condiciones climáticas adversas, falta de crédito, enfermedades o recursos económicos insuficientes. Los principales productos agrícolas incluyen maíz blanco, sorgo, maíz amarillo, trigo, papa, frijol, caña de azúcar, alfalfa, limón, naranja, agave y plátano. Por otra parte, la mano de obra permanente es de 11,120,516, mientras que 15,863,731 son eventuales. Y la mayoría de los productores son personas mayores a los 45 pero menores de los 65 años (46 %). Además de la población dedicada a este sector el 46.3 % se identifican como indígenas (INEGI, 2023).

¹ rodriguezac26@gmail.com, El Colegio de Veracruz. Doctorante en Desarrollo Regional Sustentable en El Colegio de Veracruz. Maestra en Ingeniería Química con una especialidad en Proyectos con una carrera enfocada en el tratamiento de aguas residuales industriales.

² gracielahernandez.orduna@gmail.com, Profesora investigadora en El Colegio de Veracruz, miembro del SNI, nivel 1 y directora general del Consejo Veracruzano de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico.

³ cynthia.wong@tecvalles.mx, Tecnológico Nacional de México campus Ciudad Valles. Profesor en el Tecnológico Nacional de México, miembro del SNI y miembro activo de la Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC).

De acuerdo con el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2023), en cuanto a los cultivos industriales se registró una producción total de 64.1 millones de toneladas, siendo la caña de azúcar la más significativa con 59.6 millones de toneladas, de las cuales el 35 % proviene del estado de Veracruz. Además, seis entidades federativas concentran el 75 % de este tipo de producción, destacándose Chihuahua con algodón, Jalisco con agave, Chiapas, Puebla y Veracruz con café y caña de azúcar, y Campeche con soya.

Con lo anterior podemos empezar a caracterizar el campo mexicano, el cual enfrenta diversos desafíos multidimensionales. Entre ellos se encuentran la baja productividad agrícola, la lenta adopción de innovaciones tecnológicas, la fragmentación de la propiedad de la tierra, las limitaciones de acceso a recursos financieros y los impactos del cambio climático. Este ha experimentado transformaciones especializadas significativas en las últimas décadas, con la adopción del modelo de la Revolución Verde desempeñando un papel fundamental. La cual permitió obtener importantes aumentos de productividad, en particular a través de la introducción de variedades de cultivos de alto rendimiento y el mayor uso de fertilizantes sintéticos. A pesar de estos avances, el sistema agrícola actual basado en la aplicación de grandes cantidades de fertilizantes químicos, plantea serios desafíos ambientales, como el deterioro del suelo, el desequilibrio de los nutrientes y la contaminación del agua (Camargo Bonilla, 2022; Savci, 2012).

Una de las tecnologías más prometedoras en este contexto es la fertilización de tasa variable (FTV). La FTV es una tecnología innovadora dentro de la agricultura de precisión que permite aplicar los nutrientes necesarios de forma diferenciada y precisa en función de las características específicas del suelo y las necesidades del cultivo. Esta técnica optimiza el uso de fertilizantes y contribuye a la reducción de costos y al menor impacto ambiental, en comparación con las aplicaciones uniformes tradicionales (Späti, Huber, y Finger, 2021).

Este capítulo tiene como objetivo analizar, a través de una revisión bibliográfica, la fertilización de tasa variable como herramienta para el manejo eficiente y sostenible de los insumos en el campo mexicano. Se explorarán los principales desafíos que limitan su adopción, así como las perspectivas y oportunidades que ofrece para impulsar la productividad de manera responsable con el medio ambiente, asegurando un uso más racional de los recursos naturales y fomentando un desarrollo agrícola más equilibrado y sostenible.

2. Metodología

Para este capítulo se realizó una extensa revisión de la literatura científica, bases de datos institucionales e informes oficiales para inspeccionar el estado actual de las investigaciones referentes a la fertilización de tasa variable (FTV). Se prestó especial atención a las tecnologías empleadas en su implementación y cómo estas pueden ser aplicadas en el contexto del campo mexicano. Durante las búsquedas se establecieron las palabras claves que ofrecieron mejores

resultados: “agricultura de precisión”, “fertilización de tasa variable”, “dosificación variable”, “agricultura campesina”, “agricultura familiar” y “agricultura en pequeña escala”, tanto en español como en inglés. Eliminados los registros repetidos o irrelevantes tras revisar títulos y resúmenes, se recuperaron los artículos seleccionados. Después de la lectura a profundidad, la información recopilada fue organizada en tres grandes bloques: (1) fundamentos conceptuales de la agricultura de precisión y la FTV, (2) revisión del contexto agrícola mexicano y su vinculación con la tecnología, y (3) perspectivas de implementación enfocadas a los recursos disponibles de los pequeños agricultores.

2.1 Agricultura de precisión y fertilización en tasa variable

Desde su introducción en la década de 1990, el concepto de Agricultura de Precisión (AP) ha evolucionado a la par de los avances tecnológicos. La Sociedad Internacional de Agricultura de Precisión (ISPA, 2024) lo define como una estrategia de gestión que recopila, procesa y analiza datos temporales, espaciales e individuales de plantas y animales, combinándolos con otra información para respaldar las decisiones de manejo acordes a la variabilidad estimada. De esta manera, se busca mejorar la eficiencia en el uso de recursos, la productividad, la calidad, la rentabilidad y la sostenibilidad de la producción agrícola.

Esta AP abarca una amplia gama de tecnologías y procedimiento que puede incluir: Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS); los sistemas de información geográfica (SIG); mapeo del suelo; monitoreo del rendimiento; aplicación variable para siembra; y aplicación de dosis variables de fertilización.

Los sistemas globales de navegación por satélite, como el GPS (siendo el más extendido y disponible a nivel mundial), tuvieron sus orígenes en aplicaciones militares, pero paulatinamente se abrieron a la comunidad civil, revolucionando la medición de áreas, distancias y navegación dentro del campo rural. Estos sistemas permiten obtener información sobre la localización espacial con una precisión cada vez mayor, lo que ha facilitado el desarrollo de la agricultura de precisión. Otra herramienta que hace posible este desarrollo son los Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Sena y Carvalho, 2014).

Los GNSS son tecnologías que permiten conocer la posición geográfica precisa de algún objeto o persona a través de receptores que se encuentran en el suelo, los cuales captan las señales de radio emitidas por una red de satélites en órbita. Esto permite calcular trayectorias y distancias recorridas. Por otro lado, los SIG son software que capturan, almacenan y visualizan datos geográficos o espaciales; estos sistemas permiten analizar patrones, integrar y modelar información espacial, además de monitorear y simular datos con precisión. Los SIG presentan una gran variedad de información en diferentes formatos, como mapas y gráficos, convirtiéndose en herramientas valiosas para resolver problemas concretos y gestionar adecuadamente el espacio geográfico. Los mapas generados por los SIG pueden representar desde la distribución de recursos

naturales (ríos, arroyos, lagos, represas) hasta las propiedades físicas, químicas y biológicas específicas de un suelo (Landau, Guimarães, y Hirsch, 2014; Sena y Carvalho, 2014). Dichos mapas son herramientas importantes para tomar decisiones en la gestión eficiente del campo agrícola, ya que conociendo la variabilidad de las propiedades del suelo permite agrupar los lotes en áreas de características similares que influyen directamente en el rendimiento del cultivo. Estas zonas de manejo se agrupan para adecuar las prácticas agrícolas de manera similar, y que son específicas para lograr el mayor rendimiento, logrando la optimización de los insumos, reduciendo el desperdicio y minimizando el impacto ambiental (Kazlauskas, Bručienė, Jasinskas, y Šarauskis, 2021; Landau et al., 2014).

Mediante sensores y sistemas de posicionamiento global, se pueden medir de forma continua las propiedades del suelo y determinar los requerimientos específicos de cada área, creando mapas de rendimientos y mapas de disponibilidad de nutrientes. Esto permite ajustar la dosis de fertilizantes en tiempo real, aplicándose más en las zonas con mayor necesidad y menos en las áreas más fértiles. Esta tecnología ha demostrado ser eficaz para mejorar el aprovechamiento de los nutrientes por parte de los cultivos, reducir las pérdidas por lixiviación y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (Quintana, 2014). Por ejemplo, un sistema de este tipo puede estar compuesto por una terminal que recibe información de mapas de prescripción de fertilizantes y de la posición GPS en tiempo real. Estos datos se envían a un controlador de tasa variable que ajusta de forma automática la posición de la palanca de engranajes para modificar la tasa de aplicación según las necesidades de cada zona. Otros enfoques más simples utilizan sensores para medir de forma continua las propiedades del suelo, sin necesidad de mapas o sistemas de posicionamiento (Resende y Coelho, 2014).

Dicho de otra manera, los principios básicos de la fertilización en tasa variable incluyen el entendimiento de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo y los requerimientos nutricionales de los cultivos. Esto implica realizar un análisis detallado del campo, identificando áreas con diferentes características y niveles de fertilidad. Una vez conocidas las necesidades específicas, se pueden desarrollar mapas de aplicación que indiquen la dosis óptima de fertilizante para cada zona, logrando una distribución homogénea de nutrientes y una reducción en el uso excesivo de insumos. Las tecnologías habilitantes para la fertilización en tasa variable incluyen sensores de suelo y cultivo, sistemas de posicionamiento global y sistemas de manejo de información geoespacial. Los sensores permiten evaluar en tiempo real el estado nutricional de las plantas y las propiedades del suelo, mientras que los sistemas de posicionamiento global brindan la georreferenciación necesaria para generar los mapas de aplicación.

La aplicación precisa de nutrientes, adaptada a las condiciones locales, puede mejorar significativamente la eficiencia en el uso de los fertilizantes, reduciendo los costos para los productores y minimizando los impactos ambientales. Los estudios han demostrado que la fertilización en tasa variable puede mejorar

la eficiencia de uso de nutrientes y reducir el impacto ambiental en comparación con las aplicaciones uniformes (Kazlauskas et al., 2021; Shi et al., 2020). Además, se han investigado la posibilidad de desarrollar paquetes que incluyan sistemas de aplicación variable específicamente diseñado para pequeños agricultores, buscando que esta tecnología sea accesible y fácil de usar (Malek, Gatzweiler, y Von Braun, 2017; Nowak, 2021; Späti et al., 2021; Van Loon, et al, 2018).

Los métodos de fertilización en tasa variable se dividen principalmente en dos tipos: la FTV basada en mapas y la FTV en tiempo real. Ambos enfoques buscan aumentar la eficiencia, reducir costos y minimizar el impacto ambiental, pero se diferencian en la forma de recopilar y utilizar la información para la aplicación de fertilizantes.

La FTV basada en mapas depende de la recopilación y análisis exhaustivo de datos sobre el suelo y los cultivos antes de la aplicación de fertilizantes. Con esta información, se crean mapas de prescripción que indican la cantidad óptima de fertilizante para cada zona específica del campo. El proceso comienza con la recolección de datos geoespaciales y agronómicos, como la textura del suelo, niveles de nutrientes, humedad y rendimientos anteriores. Estos datos se obtienen mediante sensores, imágenes satelitales, drones o análisis de suelo tradicionales. Posteriormente, se elaboran mapas de prescripción que reflejan la variabilidad de las condiciones del suelo a lo largo del terreno. Utilizando sistemas de información geográfica, se generan representaciones visuales detalladas que permiten ajustar con precisión las dosis de fertilizante según las necesidades específicas de cada zona. Con estos mapas, las máquinas de fertilización equipadas con sistemas de dosificación variable aplican la cantidad exacta de nutrientes en las áreas correspondientes, optimizando el uso de insumos. Este enfoque es especialmente útil en campos con alta variabilidad espacial, donde las características del suelo difieren significativamente entre zonas. Una de las principales ventajas de la FTV basada en mapas es la capacidad de personalizar la aplicación de insumos a largo plazo, lo que mejora la eficiencia del uso de fertilizantes y minimiza el desperdicio. Sin embargo, la creación de estos mapas puede ser costosa y requiere conocimientos técnicos especializados. Además, esta tecnología tiene una capacidad de respuesta limitada, ya que los mapas no pueden adaptarse rápidamente a cambios en las condiciones del campo, como variaciones meteorológicas inesperadas (Quintana, 2014; Reetz, 2014).

A diferencia de la fertilización basada en mapas, la FTV en tiempo real se basa en la capacidad de las máquinas agrícolas para detectar las condiciones del campo en el mismo momento de la aplicación y ajustar la dosificación de fertilizantes en función de los datos obtenidos en tiempo real. Este enfoque utiliza sensores montados en las máquinas de fertilización para medir variables como el contenido de nutrientes, la conductividad eléctrica o la biomasa a medida que la máquina avanza por el campo. Los sensores recopilan los datos directamente del suelo o del cultivo y los procesan de inmediato para determinar la dosis

óptima de fertilizante para esa zona específica. Con estos datos en tiempo real, la máquina ajusta automáticamente la cantidad de fertilizante que se aplica a medida que se desplaza por el terreno. Esto permite que la fertilización sea altamente reactiva, respondiendo directamente a las condiciones actuales del campo en lugar de depender de un mapa predefinido.

La principal ventaja de la FTV en tiempo real es su capacidad para adaptarse dinámicamente a las condiciones cambiantes del suelo y del cultivo, lo que la convierte en una tecnología ideal para campos donde las condiciones pueden cambiar rápidamente, como en climas con variabilidad de precipitaciones. Además, elimina la necesidad de crear mapas detallados, reduciendo el costo inicial asociado a su creación y análisis. Sin embargo, una limitación importante es que los sensores utilizados pueden ser costosos y, en algunos casos, menos precisos que datos obtenidos mediante un análisis de suelo exhaustivo. La tecnología en tiempo real requiere un alto nivel de especialización técnica para su operación y mantenimiento (Melchiori, Kemerer, y Albarenque, 2014; Quintana, 2014; Reetz, 2014).

Ambos tipos de fertilización de tasa variable tienen sus propias ventajas y desventajas. La elección entre ellos dependerá de las características del terreno, las necesidades específicas del agricultor y el presupuesto disponible. En campos con alta variabilidad espacial, la fertilización de tasa variable basada en mapas puede proporcionar un control más preciso y detallado sobre la aplicación de nutrientes. Por el contrario, en campos donde las condiciones pueden cambiar rápidamente, la fertilización de tasa variable en tiempo real ofrece una mayor flexibilidad y capacidad de respuesta.

2.2 Contexto actual de la agricultura en México y perspectivas de la FTV

La agricultura mexicana tiene una larga trayectoria que se remonta al período posclásico, cuando los habitantes mexicas implementaron el sistema de cultivo en chinampas, una forma rudimentaria de hidroponía. Posteriormente, durante la época colonial, la llegada de los europeos introdujo el uso de herramientas metálicas y la incorporación de animales para labores de tiro y transporte. Asimismo, se introdujeron monocultivos como la caña de azúcar y el café.

La etapa moderna de la agricultura mexicana se caracteriza, en primera instancia, por la caída de los precios del petróleo y el endeudamiento externo, y, en segundo lugar, por la diversificación de productos y el aumento en el uso de tecnología agrícola, impulsada por la apertura de los mercados a través del TLCAN. Esto ha tenido importantes implicaciones a largo plazo, como el ahondamiento de la desigualdad en el sector rural, desplazando a muchos pequeños productores y orientando la producción hacia el mercado global, en detrimento de la producción de alimentos básicos. Esto se refleja hoy en la dependencia de México de las importaciones para satisfacer la demanda interna de

productos como el maíz, un reto importante para la seguridad alimentaria del país (Chávez-Díaz et al., 2020).

En la segunda mitad del siglo pasado, el aumento en la demanda mundial de alimentos impulsó el surgimiento de la llamada Revolución Verde. Esta introdujo un conjunto de innovaciones tecnológicas orientadas a incrementar la productividad agrícola, como el uso de variedades de cultivos de alto rendimiento, fertilizantes, pesticidas y sistemas de irrigación avanzados. Si bien estos avances tecnológicos trajeron beneficios, también tuvieron un impacto negativo en los pequeños productores, quienes, sin acceso al capital necesario para adquirir estas tecnologías, quedaron excluidos, mientras que los grandes agricultores se vieron enormemente favorecidos. Esto amplió la brecha económica en el campo y dejó a muchos pequeños productores en condiciones de pobreza. Asimismo, el gobierno mexicano, a través de subsidios, promovió el uso intensivo de fertilizantes y pesticidas, incrementando paulatinamente su aplicación desde 1960 hasta alcanzar una dosis promedio de 250 kg/ha en la actualidad (Camargo Bonilla, 2022; Chávez-Díaz et al., 2020; McCullough y Matson, 2016).

Estas prácticas han generado pérdidas importantes de estos insumos a la atmósfera y por lixiviación durante las etapas de plantación y riego. Estas pérdidas pueden traducirse en un aumento en la concentración de gases de efecto invernadero y en la proliferación de algas en los cuerpos de agua receptores, especialmente de nitrógeno y fósforo, lo que a su vez causa la reducción del oxígeno disuelto y la muerte de la vida acuática en dichos ecosistemas. Además, la acumulación de nitratos y fosfatos afecta la calidad del agua representando un riesgo para la salud humana debido a la formación de nitrilos en el organismo, los cuales pueden llegar a ser muy tóxicos. Mientras que metales pesados y radionúclidos (compuestos como el uranio-238, el torio-232 y el polonio-210) pueden entrar en la cadena alimentaria. Igualmente pueden ser causantes de alteraciones químicas, físicas y biológicas del suelo, que desembocan en una baja fertilidad y permeabilidad (Savci, 2012).

2.3 Implementación de la FTV.

Un acercamiento a los pequeños productores

A partir del reconocimiento del desperdicio y el impacto ambiental derivado del uso excesivo de fertilizantes, a principios de la década de 1990, productores e investigadores emprendieron iniciativas para implementar prácticas de fertilización más sostenibles. Matson, Naylor y Ortiz Monasterio (1998) desarrollaron una herramienta basada en sensores que permitió a los agricultores de trigo monitorear en tiempo real los niveles de nitrógeno en el suelo, posibilitando a los productores agregar nitrógeno solo cuando es necesario: evitando la aplicación excesiva de fertilizantes y manteniendo el potencial máximo de rendimiento en los años con condiciones climáticas óptimas. En este mismo estudio se determinó que, una reducción de hasta el 25 % en la aplicación de nitrógeno

por hectárea durante y después de la etapa de plantación disminuye drásticamente las pérdidas, sin afectar el rendimiento o la calidad del grano. Además, realizaron un análisis económico el cual demostró que este tipo de prácticas representa un ahorro del 12 al 17 % en los costos de producción. Actualmente, el uso de esta tecnología basada en sensores está ampliamente extendido en el Valle del Yaqui en Sonora, y se expande a otras regiones de México y Asia; estas iniciativas han fomentado la diversificación de la estructura agraria regional, logrando una complementariedad entre los cultivos básicos y los nuevos cultivos agrarios y comerciales (Matson et al., 1998; McCullough y Matson, 2016).

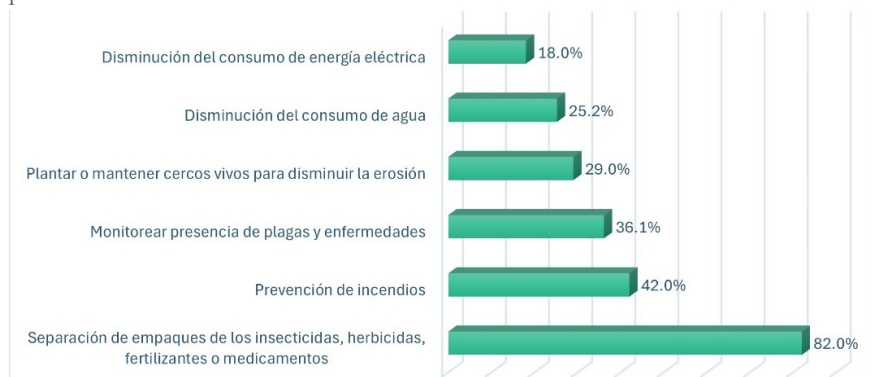
En nuestro país, a pesar de la rápida urbanización, la pobreza se mantiene principalmente concentrada en las zonas rurales, donde la mayor parte de la población depende de la agricultura. Estudios como el realizado por Byerlee et al. (2009) han resaltado la necesidad de un nuevo paradigma que reconozca las múltiples funciones de la agricultura para el desarrollo: impulsar el crecimiento económico, reducir la pobreza, disminuir las disparidades de ingresos, garantizar la seguridad alimentaria y proporcionar servicios ambientales.

La capacidad de la agricultura para reducir la pobreza radica no solo en su contribución directa a los ingresos rurales, sino también en su efecto multiplicador en la economía rural no agrícola. El crecimiento en la agricultura genera empleos, reduce los precios de los alimentos y mejora la seguridad alimentaria, lo que, a su vez, beneficia a los sectores más pobres de la población, incluidos los agricultores pequeños y los trabajadores rurales. Las políticas que promueven la agricultura, como las inversiones en investigación y desarrollo agrícola, infraestructura rural (como caminos y sistemas de riego), y acceso a crédito y tecnologías mejoradas, son fundamentales para incrementar la productividad agrícola. El estudio de Byerlee et al. (2009) señala que, en los casos donde los gobiernos implementaron políticas proactivas para el desarrollo agrícola, los resultados han sido aumentos sustanciales en el PIB. Por ejemplo, las inversiones en tecnologías como semillas de alto rendimiento y mejores prácticas agrícolas han demostrado un gran potencial para aumentar la producción agrícola y, por ende, el crecimiento económico (Dethier y Effenberger, 2012).

Para Dethier y Effenberger (2012), los pequeños productores serán un elemento crucial en el cambio de paradigma, no solo por el crecimiento económico, sino también por su papel fundamental en la sostenibilidad ambiental. La agricultura es responsable de una gran parte del uso de la tierra y el agua, así como de una considerable proporción de las emisiones de gases de efecto invernadero. No obstante, también tiene el potencial de ofrecer soluciones ambientales clave, como la captura de carbono, la conservación de la biodiversidad y la gestión sostenible de los recursos hídricos. Los pequeños productores, con su conocimiento y prácticas tradicionales, pueden ser líderes en la implementación de estos enfoques sostenibles y en la demostración de que es posible conciliar la producción agrícola con la protección del medio ambiente.

La gráfica 1 muestra los porcentajes de Unidades Productivas Agropecuarias (UPA) que ejecutan actividades dirigidas a la protección del medio ambiente. Sin embargo, es importante destacar que dentro de estas acciones no se contempla la reducción ni el control del uso de pesticidas y fertilizantes, aspectos clave para minimizar el impacto ambiental en el sector agropecuario. La Unidad de Producción Agropecuaria se define como la unidad económica conformada por uno o más predios ubicados en un mismo municipio, donde se desarrollan actividades agrícolas, pecuarias o forestales bajo la gestión de un solo productor. Además, estas unidades operan con los mismos recursos productivos, tales como maquinaria, equipos, vehículos y personal laboral. Según el último censo agrícola se registraron un total de 4,629,134 UPA activas (INEGI, 2023), lo que refleja la magnitud y relevancia de estas unidades en el panorama agropecuario nacional.

Gráfica 1. Porcentaje de unidades de producción agropecuaria que realizan acciones para protección del medio ambiente.



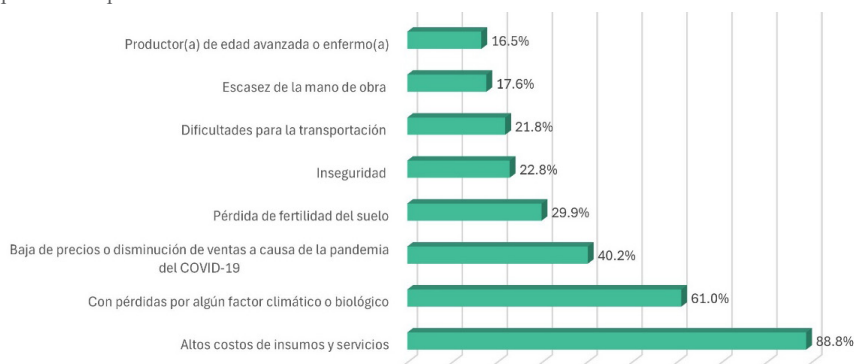
Fuente: INEGI, 2023.

No obstante, al analizar las barreras que enfrentan estas unidades para realizar sus actividades, se identifica en primer lugar el alto costo de los insumos y, en cuarto lugar, la pérdida de fertilidad del suelo (gráfica 2). Por lo cual, la adopción de estas tecnologías como la FTV en México podría transformar el sector agrícola, enfrentando desafíos apremiantes como la degradación del suelo y la necesidad de mejorar la eficiencia en el uso de recursos. Sin embargo, su implementación masiva enfrenta diversos retos, como la falta de acceso a tecnología avanzada, la infraestructura deficiente en zonas rurales y la necesidad de capacitar a los productores para manejar estas innovaciones de manera efectiva.

A nivel mundial, los pequeños productores rurales enfrentan importantes desafíos. El cambio climático tiene efectos cada vez más notables en la producción de alimentos, con el aumento de las precipitaciones causando daños a los cultivos por erosión o inundaciones, y también impactando en la salinización de los

mantos freáticos. Además, en las zonas semiáridas se esperan condiciones extremas de calor y sequía. Este incremento en las temperaturas del suelo podría acelerar la descomposición de la materia orgánica, afectando gravemente la fertilidad. Otro aspecto clave es el alza en los precios de los combustibles fósiles, lo cual aumenta el costo de los fertilizantes sintéticos y reduce la disponibilidad energética para las actividades agrícolas. Estos y otros factores dificultan que los pequeños productores puedan acceder a insumos agrícolas de calidad, equipos de precisión y servicios financieros completos.

Gráfica 2. Porcentaje de unidades de producción agropecuaria que reportan los principales problemas para realizar su actividad.



Fuente: INEGI, 2023.

Si bien la intensificación sustentable a través de la FTV podría ser una alternativa, pues aumentaría los rendimientos en las áreas destinadas a la producción sin incrementar el impacto ambiental, la inversión inicial requerida para el equipo especializado y la experiencia técnica necesaria para operar dichos sistemas pueden ser obstáculos significativos para los pequeños agricultores con recursos limitados (Camargo Bonilla, 2022; Van Loon et al., 2018).

Similar a lo elaborado por McCullough y Matson (2016), Van Loon et al. (2018) desarrollaron un sistema de aplicación de fertilizante a tasa variable diseñado específicamente para agricultores de pequeña escala en países en desarrollo. Este sistema utiliza sensores de nitrógeno (N) para medir el estado nutricional de las plantas en tiempo real y ajustar la cantidad de fertilizante en función de las necesidades específicas de la planta, lo cual ayuda a optimizar el uso de recursos y a reducir el impacto ambiental. Aunque a este sistema todavía necesita mejoras de precisión y calibración, es prometedor. Este prototipo es un paso hacia herramientas de agricultura de precisión que puedan ser económicamente viables para pequeños agricultores, ya que lograron una reducción importante en costos (10 veces menor que los sistemas disponibles en los mercados internacionales).

En el contexto mexicano, la fertilización de tasa variable en tiempo real puede ser útil en áreas con climas variables, como las regiones semiáridas del

norte, ya que responde dinámicamente a los cambios en el campo. Por otro lado, la fertilización variable basada en mapas podría ser más apropiada donde la variabilidad del suelo (fertilidad, textura, contenido de materia orgánica, etc.) es alta y donde el soporte y disponibilidad de los datos está más optimizado, esto permitiría un control más detallado de la aplicación de nutrientes dependiendo de sus cambiantes características (McCullough y Matson, 2016).

Malek et al. (2017) estudiaron las innovaciones tecnológicas e institucionales que puedan mejorar la productividad agrícola de pequeños agricultores marginados, quienes a menudo residen en condiciones socioeconómicas y agroecológicas desfavorables. A diferencia del enfoque tradicional que imponía tecnologías de manera uniforme, esta investigación aboga por un enfoque más personalizado, basado en las necesidades y capacidades de los agricultores previamente identificadas, concluyendo que el aumento de la productividad agrícola en las áreas marginadas es viable y sostenible si se implementan correctamente tanto las innovaciones tecnológicas como los ajustes institucionales. La aplicación de este tipo de análisis en el campo mexicano podría ayudar a diagnosticar las áreas de mayor potencial y los medios para lograr el desarrollo agrícola de estas.

La adopción de tecnologías de agricultura de precisión todavía presenta desafíos, con una tasa de adopción un 17 % mayor en granjas de América del Norte que en Europa. Además, las tecnologías relacionadas con la aplicación de tasa variable han experimentado un crecimiento más lento, con solo un tercio de las granjas de cultivos de campo en países desarrollados utilizando métodos automatizados para gestionar la variabilidad espacial de los cultivos y del suelo dentro de un campo (Nowak, 2021). Para lograr una adopción exitosa y sostenible de la agricultura de precisión, es fundamental integrar la participación de los usuarios finales. Además, se requieren enfoques interdisciplinarios que incorporen el diseño centrado en el usuario y el aprendizaje colaborativo entre científicos, agricultores y desarrolladores (Lindblom, Lundström, Ljung, y Jonsson, 2017).

3. Discusión

La fertilización de tasa variable (FTV) constituye una innovación tecnológica con el potencial de impulsar una transición sustantiva en el sector agrícola mexicano hacia modelos más sostenibles y eficientes. No obstante, su adopción requiere un análisis exhaustivo de los recursos y limitaciones que enfrentan los pequeños productores, considerando dimensiones como el capital humano, financiero, natural, físico y social. Este diagnóstico resulta esencial para la implementación de cualquier paquete tecnológico, pues su éxito depende de la apropiación por parte de los actores comunitarios.

Si bien la estructura conceptual y tecnológica propuesta por Malek et al. (2017) ofrece un marco potencialmente eficaz para este propósito, presenta limitaciones propias. La recopilación de información detallada sobre las vulnerabilidades y oportunidades de las comunidades demanda la aplicación de

herramientas tanto cualitativas como cuantitativas, entre ellas entrevistas, encuestas, cartografía social y métodos participativos, lo que a su vez implica una inversión considerable de recursos humanos, financieros y logísticos. Por lo cual la participación de las dependencias gubernamentales y expertos en el tema es esencial para el cumplimiento de este punto. En este sentido, la colaboración estrecha entre dependencias gubernamentales, instituciones académicas y especialistas en desarrollo rural resulta fundamental para garantizar que la información recopilada sea precisa, completa y pertinente.

Este trabajo conjunto no solo permite diseñar estrategias técnicamente sólidas, sino también adaptadas a la realidad social, económica y cultural de cada comunidad. Al reconocer y valorar el conocimiento local, se favorece que las personas se sientan parte activa del proceso, lo que incrementa las posibilidades de que las soluciones tecnológicas propuestas sean aceptadas, utilizadas y mantenidas en el tiempo.

De acuerdo con McCullough y Matson (2016), el caso particular del Valle Yaqui, ubicado en el estado de Sonora, México, constituye un claro ejemplo de la complejidad y dinamismo que caracterizan las interacciones entre los actores principales de los sectores público, privado y académico a lo largo del tiempo. Estas interacciones resultan más eficaces cuando se establecen canales de comunicación multidireccionales, lo cual facilita que las innovaciones se diseñen considerando el contexto y las necesidades de los usuarios finales, quienes a su vez pueden transmitir en tiempo real sus requerimientos y preocupaciones. Posteriormente, dicha información puede ser canalizada hacia organizaciones financieras o gubernamentales para su evaluación y apoyo.

Más allá de las barreras técnicas y económicas, la adopción de la FTV en México requiere de un cambio de paradigma en las políticas de desarrollo rural. Es indispensable reconocer el papel estratégico de los pequeños productores en la sostenibilidad ambiental y la seguridad alimentaria, y que fomentar su participación en la transición tecnológica. La inclusión, el diseño centrado en el usuario y el acompañamiento técnico son elementos claves para garantizar que los beneficios de la agricultura de precisión no queden restringidos a grandes unidades de producción, sino que contribuyan a un desarrollo rural más equitativo y resiliente.

4. Conclusiones

La FTV permite optimizar el uso de fertilizantes al ajustar la aplicación de nutrientes a las características específicas del suelo, lo cual reduce costos, mejora la productividad y minimiza el impacto ambiental. Su implementación generalizada enfrenta diversos retos, factores como el acceso limitado a tecnología avanzada, infraestructura rural deficiente y la necesidad de capacitación de los productores limitan su adopción en muchas áreas de México, especialmente entre pequeños productores que disponen de recursos económicos limitados. A pesar de estos obstáculos, la FTV se presenta como una herramienta viable para reducir la

dependencia en prácticas agrícolas tradicionales que suelen ser intensivas en insumos y poco sostenibles a largo plazo.

La integración de la FTV podría ser particularmente beneficiosa en contextos de alta variabilidad climática y de suelo. En zonas semiáridas o con condiciones meteorológicas cambiantes, la FTV en tiempo real puede adaptarse a las necesidades dinámicas del terreno, mientras que, en áreas con alta variabilidad espacial de suelo, la FTV basada en mapas ofrece un mayor control en la aplicación de nutrientes. Ambas modalidades deben evaluarse según las características de cada región para maximizar sus beneficios.

La FTV ofrece no solo la posibilidad de aumentar la productividad agrícola, sino también de avanzar hacia un modelo de producción que equilibre las necesidades de producción y la preservación de los recursos naturales, contribuyendo al desarrollo rural y a la seguridad alimentaria en México.

Es importante señalar que lo propuesto en este artículo surge de un análisis bibliográfico y que su validación, a través de un diseño experimental, es necesaria para su implementación en contextos reales para comprobar su viabilidad.

5. Referencias

- Byerlee, D., De Janvry, A., & Sadoulet, E. (2009). Agriculture for development: Toward a new paradigm. *Annu. Rev. Resour. Econ.*, 1(1), 15-31. <https://doi.org/10.1146/annurev.resource.050708.144239>.
- Camargo Bonilla, Y. (2022). La adopción del modelo de Revolución Verde en el Bajío mexicano: fitomejoramiento y tecnificación 1940-1970. *Mundo agrario*, 23(54), 196-196. <https://doi.org/10.24215/15155994e196>.
- Chávez-Díaz, I. F., Zelaya Molina, L. X., Cruz Cárdenas, C. I., Rojas Anaya, E., Ruíz Ramírez, S., & Santos Villalobos, S. d. I. (2020). Consideraciones sobre el uso de biofertilizantes como alternativa agro-biotecnológica sostenible para la seguridad alimentaria en México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 11(6), 1423-1436.
- Dethier, J.-J., & Effenberger, A. (2012). Agriculture and development: A brief review of the literature. *Economic systems*, 36(2), 175-205.
- INEGI. (2023). Censo Agropecuario. Resultados definitivos. <https://www.inegi.org.mx/programas/ca/2022/>.

- ISPA. (2024). Precision Ag Definition. Retrieved 27 de Octubre 2024
<https://www.ispag.org/resources/definition>.
- Kazlauskas, M., Bručienė, I., Jasinskas, A., & Šarauskis, E. (2021). Comparative analysis of energy and GHG emissions using fixed and variable fertilization rates. *Agronomy*, 11(1), 138. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010138>.
- Landau, E., Guimarães, D. P., & Hirsch, A. (2014). Uso de Sistema de Informaciones Geográficas para espacialización de datos del área de producción agrícola. In E. C. Mantovani (Ed.), *Manual de Agricultura de Precisión* (pp. 22-29). Montevideo: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
- Lindblom, J., Lundström, C., Ljung, M., & Jonsson, A. (2017). Promoting sustainable intensification in precision agriculture: review of decision support systems development and strategies. *Precision agriculture*, 18, 309-331.
- Malek, M. A., Gatzweiler, F. W., & Von Braun, J. (2017). Identifying technology innovations for marginalized smallholders-A conceptual approach. *Technology in Society*, 49, 48-56.
- Matson, P. A., Naylor, R., & Ortiz-Monasterio, I. (1998). Integration of environmental, agronomic, and economic aspects of fertilizer management. *Science*, 280(5360), 112-115.
- McCullough, E. B., & Matson, P. A. (2016). Evolution of the knowledge system for agricultural development in the Yaqui Valley, Sonora, Mexico. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(17), 4609-4614.
- Melchiori, R., Kemerer, A., & Albarenque, S. (2014). Monitores de rendimiento y mapeo. In E. C. Mantovani (Ed.), *Manual de Agricultura de Precisión* (pp. 32-37). Montevideo: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).

- Nowak, B. (2021). Precision agriculture: Where do we stand? A review of the adoption of precision agriculture technologies on field crops farms in developed countries. *Agricultural Research*, 10(4), 515-522. <https://doi.org/10.1007/s40003-021-00539-x>.
- Quintana, R. (2014). Técnicas avanzadas de análisis para los cultivos a tiempo real. In E. C. Mantovani (Ed.), *Manual de Agricultura de Precisión* (pp. 58-70). Montevideo: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
- Reetz, H. (2014). Tecnología de precisión paramgestión de nutrientes. In E. C. Mantovani (Ed.), *Manual de Agricultura de Precisión* (pp. 120-130). Montevideo: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
- Resende, Á. V., & Coelho, A. M. (2014). Muestreo para mapeo y manejo de la fertilidad del suelo. In E. C. Mantovani (Ed.), *Manual de Agricultura de Precisión* (pp. 47-57). Montevideo: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
- Savci, S. (2012). An agricultural pollutant: chemical fertilizer. *International Journal of Environmental Science Development*, 3(1), 73.
- Sena, D. G. J., & Carvalho, F. d. A. P. (2014). Uso del Sistema de Posicionamiento Global en la caracterización de áreas agrícolas. In E. C. Mantovani (Ed.), *Manual de Agricultura de Precisión* (pp. 12-21). Montevideo: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
- Shi, Y., Zhu, Y., Wang, X., Sun, X., Ding, Y., Cao, W., & Hu, Z. (2020). Progress and development on biological information of crop phenotype research applied to real-time variable-rate fertilization. *Plant methods*, 16, 1-15. doi:10.1186/s13007-020-0559-9.
- SIAP. (2023). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Recuperado de https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/.

- Späti, K., Huber, R., & Finger, R. (2021). Benefits of increasing information accuracy in variable rate technologies. *Ecological Economics*, 185, 107047. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107047>.
- Van Loon, J., Speratti, A. B., Gabarra, L., & Govaerts, B. (2018). Precision for smallholder farmers: a small-scale-tailored variable rate fertilizer application kit. *Agriculture*, 8(4), 48.



Valorización de residuos de piña: estrategias para la sostenibilidad agrícola en el estado de Veracruz, México

Guillermina Velázquez Sánchez¹
María Graciela Hernández y Orduña²
Cynthia Wong Argüelles³

1. Introducción

Veracruz, ubicado en la vertiente central del Golfo de México, es el principal productor de piña miel (*Ananas comosus* L., cv. MD2) en México, concentrando alrededor del 80 % de la producción nacional con un volumen anual de 859,419.65 toneladas (SIAP, 2020). Sin embargo, solo entre el 30 % y el 40 % de esta producción se destina a la elaboración de subproductos, generando grandes volúmenes de residuos, como coronas, cáscaras, corazones y tallos (Nava-Pacheco et al., 2022). Cada hectárea cultivada produce cerca de 250 toneladas de rastrojo —raíces, tallos y hojas— cuya gestión ineficiente no solo implica una pérdida económica, sino que también impacta negativamente el ambiente (Satyanarayana et al., 2004).

Prácticas tradicionales como la quema o trituración, contribuyen a la emisión de gases de efecto invernadero y a la degradación del suelo y el aire (López Chávez, 2018). Ante este problema, resulta fundamental desarrollar estrategias para transformar estos desechos en insumos de valor. Investigaciones recientes han identificado en los residuos de piña compuestos bioactivos como antioxidantes y polifenoles, con aplicaciones en las industrias alimentaria, cosmética y farmacéutica, impulsando así un modelo de economía circular en Veracruz.

¹ gvelazquez8@hotmail.com, estudiante de doctorado en Desarrollo Regional Sustentable en el Colegio de Veracruz, con interés en gestión de residuos agroindustriales y desarrollo rural. Profesora de matemáticas en el CBTA No. 86.

² gracielahernandez.orduna@gmail.com, Profesora investigadora en El Colegio de Veracruz, miembro del SNI, nivel 1 y directora general del Consejo Veracruzano de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico.

³ cynthia.wong@tecvalles.mx, Tecnológico Nacional de México campus Ciudad Valles. Profesor en el Tecnológico Nacional de México, miembro del SNI y miembro activo de la Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC).

A nivel mundial, la piña es la tercera fruta tropical más producida después de los cítricos y los plátanos, destinándose aproximadamente el 70 % al consumo fresco en los países productores y el 30 % a la exportación y la agroindustria (Porter, 2002; UNCTAD, 2020). En México, el 70 % se comercializa en fresco, el 20 % se destina a la agroindustria y el 10 % a la exportación. La valorización de los residuos agroindustriales de piña se presenta como una estrategia clave para reducir su impacto ambiental y generar oportunidades en distintos sectores industriales (Preciado-Saldaña et al., 2022).

El cultivo de piña en México se remonta a principios del siglo XX, cuando Frank Peters identificó en Loma Bonita, Oaxaca, condiciones óptimas para la variedad Cayena Lisa, impulsando su expansión en el país. Hoy, Veracruz encabeza la producción nacional y en 2022 México se ubicó entre los diez principales productores de piña a nivel mundial, con más de 1.2 millones de toneladas (FAOSTAT, 2022). Sin embargo, el alto volumen de producción en municipios como Isla y Juan Rodríguez Clara genera un desafío en la gestión de residuos agroindustriales, subrayando la necesidad de adoptar estrategias sostenibles (OCDE, 2020).

Optimizar el aprovechamiento de estos residuos reduciría su impacto ambiental, fortalecería la economía local y fomentaría un desarrollo agrícola más sostenible (González, 2023). La caracterización de estos subproductos ha evidenciado su potencial para generar productos innovadores e integrarlos en la cadena productiva, reforzando así el modelo de economía circular.

2. Desarrollo teórico

La valorización de residuos agroindustriales constituye un pilar fundamental para avanzar hacia sistemas agrícolas sostenibles. En el caso de la piña los subproductos (cáscara, corona, núcleo, tallos, hojas y rastrojo) han demostrado ser una fuente relevante de compuestos bioactivos como bromelina, polifenoles, flavonoides, alcaloides y polisacáridos, con aplicaciones en sectores como el alimentario, cosmético, farmacéutico, de biopolímeros y biocombustibles.

Esta investigación plantea una revisión sistemática sobre el manejo eficiente de los residuos de piña, la caracterización de sus compuestos bioactivos y la evaluación de metodologías de extracción adecuadas. Su aplicación permitiría establecer un modelo de producción sostenible y replicable en otros sectores agrícolas, promoviendo prácticas más limpias, reduciendo emisiones contaminantes y fortaleciendo la economía circular en Veracruz, en alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030.

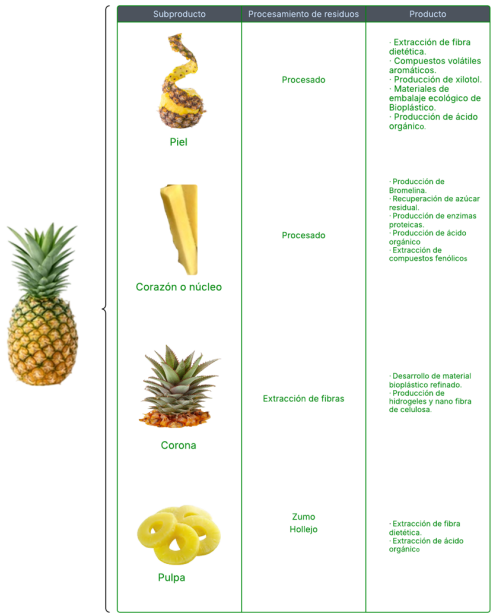
A nivel global, los principales productores de piña incluyen Indonesia, Filipinas, Costa Rica, Brasil, China e India. En 2022, Indonesia lideró la producción con más de 3.2 millones de toneladas, seguida de Filipinas y Costa Rica. México, con más de 1.2 millones de toneladas, se mantiene entre los diez primeros lugares (FAOSTAT, 2022).

Veracruz se consolida como el mayor productor de piña en México, con una superficie cultivada de 38,642 hectáreas y una producción anual de 840,317 toneladas (SIAP, 2023). Otros estados con aportes significativos incluyen Oaxaca, Nayarit, Tabasco y Quintana Roo. Dentro de Veracruz, los municipios con mayor producción son Isla, Juan Rodríguez Clara y José Azueta, con más de 600,000 toneladas en conjunto. Sin embargo, este alto volumen de producción genera grandes cantidades de residuos, lo que hace urgente desarrollar métodos sostenibles de gestión (OECD, 2022).

Las diferencias en rendimiento por hectárea entre municipios sugieren oportunidades para mejorar la productividad y sostenibilidad del sector. La valorización de los residuos no solo reduciría el impacto ambiental, sino que también fortalecería la economía local (González, 2023).

El crecimiento de la agroindustria de la piña ha impulsado la economía global, pero también ha incrementado la generación de residuos, planteando desafíos ambientales y económicos. Se estima que entre el 40 % y el 50 % del peso total de la piña se convierte en residuos, principalmente cáscaras, corazones y coronas (Preciado-Saldaña et al., 2022). La gestión eficiente de estos subproductos es clave para mitigar su impacto y aprovechar su potencial en distintos sectores industriales, alineándose con un enfoque de economía circular y desarrollo sostenible.

Figura 1. Aprovechamiento de los residuos de la piña en diferentes procesos industriales.



Fuente: Adaptado de Tran et al., (2023). A critical review on pineapple (Ananas comosus) wastes for water treatment, challenges and future prospects towards circular economy. Science of the Total Environment, 856 (Pt 1), 158817. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.158817.

Estudios recientes sobre valorización de residuos y extracción de compuestos bioactivos destacan la relevancia de avanzar hacia modelos productivos basados en la economía circular. Estas iniciativas enfrentan los desafíos ambientales y económicos derivados de la acumulación de desechos, además, abren la posibilidad de generar productos innovadores que aporten valor a la cadena productiva de la piña (Preciado-Saldaña et al., 2022). Así, la agroindustria de la piña no solo se posiciona como un motor económico, sino que representa un modelo de sostenibilidad y aprovechamiento eficiente de recursos.

La figura 1 ilustra un ejemplo de cómo aprovechar los residuos de la piña para diversos usos industriales, promoviendo la sostenibilidad y la eficiencia en el uso de recursos. Este enfoque reduce el impacto ambiental y ofrece oportunidades económicas al transformar desechos en productos valiosos.

3. Metodología

La investigación empleó una revisión sistemática siguiendo las directrices de PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). La búsqueda de artículos inició en noviembre de 2023 y empleó bases de datos y motores de búsqueda como PubMed, ScienceDirect, Dialnet, Redalyc, CORE, LaReferencia, Springer, SCILIT, Refseek y Google Scholar. En un primer momento, se utilizaron palabras clave generales relacionadas con la piña, como “Extraction of pineapple waste” y “agroindustrial waste pineapple”, lo cual generó un gran volumen de artículos. No obstante, muchos estudios incluían otros frutos o no resultaban relevantes para los objetivos de la investigación.

Para optimizar los resultados, la búsqueda se refinó con términos como (“pineapple waste” OR “pineapple by-products”) AND (“peel” OR “skin”) AND (“stem” OR “stalk”) AND (“crown” OR “top”) AND (“core” OR “heart”) AND (“valorization” OR “industrial use”). Las bases de datos más pertinentes fueron Dimensions, Dialnet, Refseek y Google Scholar, ya que permitían el uso de operadores booleanos, facilitando el filtrado preciso de literatura relevante para este estudio. Para iniciar la revisión de artículos, se establecieron los siguientes criterios:

Tabla 1. Criterios de inclusión y exclusión.

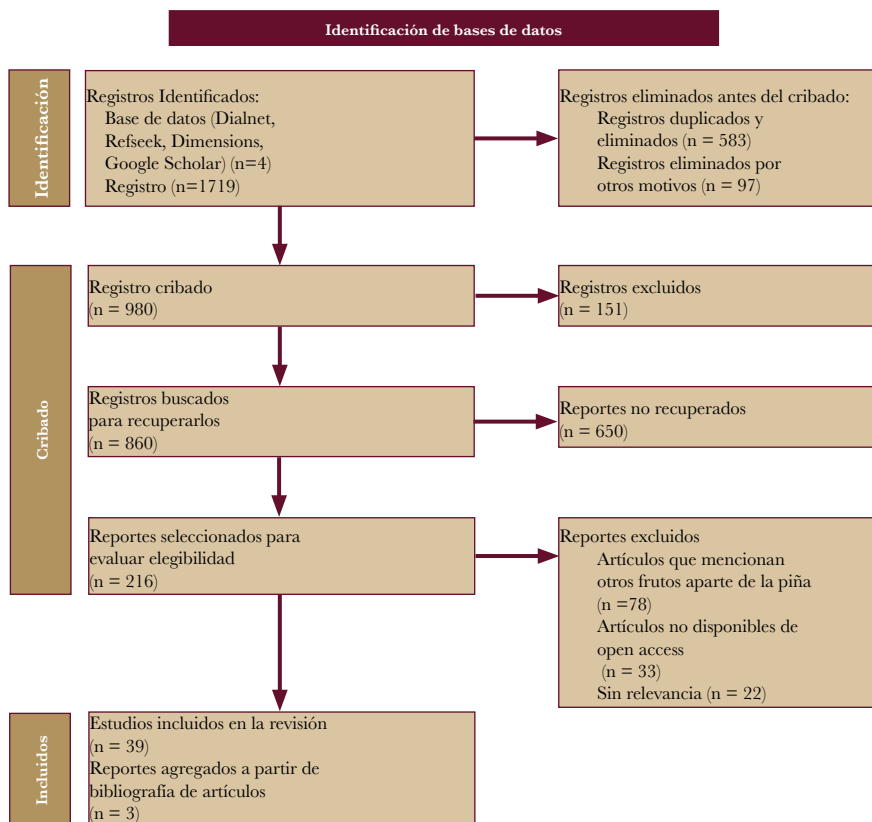
Inclusión	Exclusión
• Artículos publicados en el periodo de 2018-2023. • Open Access o proporcionados por el autor. • Artículos en español o inglés. • Artículos de revista indexada. • Revisión en pares o por arbitraje de par ciego (no capítulos de libros, tesis, memorías o resúmenes de congresos). • Tratarse de investigaciones o revisiones. • Artículos que mencionaran los métodos de extracción utilizados para cada parte de la planta.	• Artículos que mencionaran otros frutos aparte de la piña. • Artículos no disponibles de Open Access. • Artículos poco relevantes para la investigación.

Fuente: Elaboración propia.

El objetivo de la revisión es realizar una síntesis exhaustiva de los compuestos bioactivos presentes en las diferentes partes de la planta de piña. Se incluye un análisis crítico de la literatura, destacando métodos de extracción y usos potenciales de cada compuesto. La información recopilada se organiza en hojas de cálculo, clasificando cada artículo por motor de búsqueda, autor, año de publicación, país, parte de la planta de piña utilizada, métodos de extracción, y aplicaciones potenciales. Esta clasificación facilitó la identificación de tendencias y vacíos en la investigación, contribuyendo a una mejor comprensión de los beneficios industriales y ambientales del aprovechamiento de la piña.

La figura 2 muestra el proceso de selección de estudios, utilizando el diagrama de flujo PRISMA. Inicialmente, se identificaron 273 registros (258 de bases de datos y 15 de otras fuentes), eliminando 48 duplicados. Tras evaluar títulos y resúmenes, 128 estudios se descartaron, por no cumplir con los criterios de inclusión, se evaluaron 97 artículos en su totalidad. 62 artículos adicionales se excluyeron por no cumplir los criterios de elegibilidad, resultando 35 estudios finales incluidos en la revisión y 8 artículos agregados de manera manual.

Figura 2. Diagrama de flujo PRISMA para la revisión sistemática de base de datos.



Fuente: Elaboración propia.

4. Resultados

Los hallazgos de la revisión sistemática muestran que, en cuanto al aprovechamiento de los residuos de piña, Malasia y Costa Rica lideran con un 14.71 % de participación, lo que indica un fuerte enfoque en la valorización de estos residuos, probablemente impulsado por la alta producción de piña y políticas de sostenibilidad en estos países. Colombia sigue con un 11.76 %, reflejando un compromiso significativo con la economía circular y el uso eficiente de recursos agrícolas. Brasil, India y Portugal presentan una participación del 8.82 % cada uno, lo que evidencia esfuerzos en la reducción del desperdicio y la creación de valor en las cadenas de suministro. China, México y Tailandia registran un 5.88 % cada uno, lo que sugiere un interés creciente en la reutilización de estos residuos, aunque con menor implementación que los países líderes.

Por otro lado, los países con menor participación (2.94 % cada uno) son África occidental, Etiopía, Catar, Taiwán y Vietnam, lo que podría atribuirse a menores niveles de producción de piña o a la falta de políticas e infraestructuras adecuadas para procesar estos residuos de manera efectiva.

Los subproductos de piña, como cáscaras, hojas, rastrojos, coronas, tallos y núcleos, han sido ampliamente estudiados por su potencial en diversas industrias. Cada subproducto contiene compuestos específicos con aplicaciones en los sectores alimenticio, cosmético y farmacéutico, lo que resalta la importancia de maximizar su aprovechamiento y reducir residuos. La extracción de compuestos bioactivos de la planta de piña ha sido un área de investigación extensa, con diversas técnicas convencionales y no convencionales que influyen en la recuperación de compuestos valiosos. Entre los métodos empleados se encuentran la agitación con rotavapor, fermentación, extracción sólido-líquido y en solución, así como técnicas más innovadoras como la extracción por microondas y ultrasonido. Cada método posee características que afectan la eficiencia de extracción, la calidad del extracto, los costos y los requerimientos energéticos (Eixenberger et al., 2024; Anbesaw, 2021).

La agitación y la extracción en solución son métodos ampliamente utilizados debido a su simplicidad. En Costa Rica, se empleó la agitación de la cáscara de piña en una mezcla de extracto crudo y alcohol al 80 % a 5 °C para extraer bromelina, una enzima con propiedades cicatrizantes (Eixenberger et al., 2024). En Etiopía, la extracción en solución con tampón fosfato permitió la recuperación de plata de películas de rayos x, garantizando precisión y reproducibilidad (Anbesaw, 2021). La combinación de fermentación en estado sólido con ultrasonido ha demostrado ser eficaz en Colombia para la extracción de compuestos fenólicos aplicables en alimentos funcionales (Polanía et al., 2023). Además, el corazón y la corona de la piña han sido utilizados para aislar polisacáridos con propiedades hipoglucemiantes mediante extracción ultrasónica combinada con enzimas como celulasa (Hu et al., 2019).

En Brasil e India, la extracción Soxhlet se ha empleado para obtener nanocristales de celulosa y compuestos lignocelulósicos a partir de la corona de piña con solventes como etanol y agua. En Brasil, estos nanocristales se han utilizado en la creación de refuerzos para materiales compuestos (Prado & Spinacé, 2019; Premkumar et al., 2024), mientras que en India se han extraído alcaloides y flavonoides con propiedades antioxidantes y antihelmínticas in vitro (Sahu et al., 2020; Rodrigues et al., 2020). La fermentación en estado sólido y la encapsulación han sido estrategias exitosas en la extracción de antioxidantes como los fenoles de la cáscara de piña en Colombia, mejorando su estabilidad y biodisponibilidad para aplicaciones en alimentos funcionales (Polanía et al., 2023).

La extracción ultrasónica ha demostrado efectividad en la recuperación de polifenoles y enzimas como la bromelina, con aplicaciones desde la industria cosmética hasta la recuperación de materiales valiosos, como la plata de películas de rayos x en Etiopía (Yahya et al., 2022; Anbesaw, 2021). Estas técnicas no convencionales han avanzado hacia procesos más sostenibles al reducir el uso de disolventes tóxicos y disminuir los tiempos de extracción. Para subproductos con aplicaciones en biopolímeros y fibras naturales, se emplean técnicas avanzadas de análisis como la espectroscopía de infrarrojo (FTIR) y la resonancia magnética nuclear (NMR) para caracterizar los compuestos obtenidos. En Colombia, estos métodos han sido fundamentales para el desarrollo de biopolímeros, permitiendo un control preciso sobre su composición y propiedades (Vega-Castro et al., 2016).

Los polifenoles presentes en las cáscaras de piña han sido valorados en cosméticos y suplementos funcionales. En Malasia, la catequina y el ácido gálico, extraídos mediante ultrasonido, han sido empleados en productos de belleza por sus propiedades antioxidantes y su capacidad para reducir el estrés oxidativo (Yahya et al., 2022). La bromelina, por su parte, tiene aplicaciones en alimentación animal e industrial. En Brasil, la microfiltración ha permitido su recuperación a partir del jugo de piña, optimizando su uso en alimentos y fármacos (Lopes et al., 2007), mientras que en Costa Rica su suplementación en la dieta de cabras ha mostrado mejoras en la producción lechera (Alpizar-Solís et al., 2019).

Los nanocristales de celulosa y la celulosa bacteriana derivados de residuos de piña se han utilizado en la fabricación de aerogeles y nanocompuestos con aplicaciones en el tratamiento de aguas y la sustitución de plásticos (Le et al., 2023; Prado & Spinacé, 2019). La extracción de ácidos orgánicos ha abierto nuevas oportunidades industriales. En Malasia, se ha obtenido ácido acético para la producción de xilitol, un edulcorante con efectos prebióticos (Nasoha et al., 2023), mientras que otros ácidos fenólicos, como el ácido ferúlico, han demostrado potencial en el tratamiento de enfermedades metabólicas (Azizan et al., 2020).

El aprovechamiento de residuos de piña en biocombustibles y remediación ambiental está en aumento. En Taiwán, el biocarbón de hojas de piña se usa para absorber metales pesados en aguas contaminadas (Iamsaard et al., 2022). En Catar, los materiales lignocelulósicos extraídos de hojas de piña se usan en la eliminación de colorantes de aguas residuales (Hassan et al., 2020). En México, el rastrojo de piña se ha transformado en fertilizante orgánico mediante precompostaje y vermicompostaje (Castillo-González et al., 2019), mientras que en Tailandia la inclusión de polvo de cáscara de piña en dietas de tilapia mejoró su crecimiento y resistencia a enfermedades (Van Doan et al., 2021). Este panorama refleja el potencial de los residuos de piña dentro de la economía circular, con aplicaciones desde la producción agrícola hasta la biotecnología, optimizando su aprovechamiento en función de los recursos y necesidades de cada país.

5. Discusión

La presente revisión sistemática ha puesto de manifiesto la relevancia de la valorización de los subproductos de la piña en múltiples sectores industriales. El análisis de 43 estudios clave ha revelado un enfoque creciente hacia la sostenibilidad y la economía circular, en particular en países como Malasia y Costa Rica, donde la producción de piña es significativa. Estos países no solo destacan en la investigación, sino que también implementan políticas que favorecen el aprovechamiento de los residuos agroindustriales, lo que refleja una tendencia positiva hacia la minimización del desperdicio y la maximización del uso de recursos (Alpízar-Solís et al., 2019; Uribe-Clavijo et al., 2012).

El hallazgo de compuestos bioactivos en diversas partes de la planta, como la cáscara, el núcleo y las hojas, muestra el potencial de estos subproductos en industrias como la alimentaria, cosmética y farmacéutica. Los métodos de extracción, convencionales y no convencionales, han demostrado eficacia en la obtención de bromelina, polifenoles y otros compuestos de interés, lo que abre oportunidades para su aplicación en alimentos funcionales y productos de salud (Eixenberger et al., 2024; Polanía et al., 2023).

A pesar de estos avances, existen vacíos en la investigación, en especial en términos de la implementación de tecnologías de extracción más sostenibles y el aprovechamiento de subproductos en economías en desarrollo. Es crucial fomentar la colaboración entre investigadores, industrias y gobiernos para promover prácticas que permitan una valorización integral de los residuos de piña, así como la innovación en tecnologías que optimicen la extracción y el uso de compuestos bioactivos.

6. Conclusión

La valorización de los subproductos de la piña representa una estrategia prometedora para la sostenibilidad y el aprovechamiento de recursos en diversas industrias. Los compuestos bioactivos identificados, como la bromelina y los

polifenoles, poseen aplicaciones significativas que pueden contribuir al desarrollo de productos innovadores en los sectores alimentario, cosmético y farmacéutico. Además, el análisis de las metodologías de extracción revela la necesidad de adoptar técnicas más eficientes y ecológicas que reduzcan el impacto ambiental asociado a la producción y procesamiento de estos subproductos.

Se recomienda que futuras investigaciones se centren en el desarrollo de métodos de extracción más sostenibles y en la evaluación del potencial económico de los subproductos de la piña en distintas regiones. También es fundamental promover políticas públicas que incentiven la valorización de residuos agrícolas, fomentando la creación de un modelo de economía circular que beneficie tanto a los productores como al medio ambiente. En este sentido, la cooperación internacional y el intercambio de conocimientos serán clave para maximizar el impacto positivo de la valorización de los residuos de piña a nivel global.

7. Referencias

- Abraham, R. A., Joshi, J., & Abdullah, S. (2023). A comprehensive review of pineapple processing and its by-product valorization in India. *Food Chemistry*, 399, 100416 <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100416>.
- Ali, M. M., Hashim, N., Aziz, S. A., & Lasekan, O. (2020). Pineapple (*Ananas comosus*): A comprehensive review of nutritional values, volatile compounds, health benefits, and potential food products. *Food Research International*, 137, 109675. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109675>.
- Alpízar-Solís, C., Elizondo-Salazar, J. A., Alpízar-Solís, C., & Elizondo-Salazar, J. A. (2019). Utilización de residuos de piña para alimentación de cabras: Efecto sobre la producción y composición láctea. *Agronomía Costarricense*, 43(1), 113–124. <https://doi.org/10.15517/rac.v43i1.35673>.
- Amores-Monge, V., Goyanes, S., Ribba, L., Lopretti, M., Sandoval-Barrantes, M., Camacho, M., Corrales-Ureña, Y., & Vega-Baudrit, J. R. (2022). Pineapple Agro-Industrial Biomass to Produce Biomedical Applications in a Circular Economy Context in Costa Rica. *Polymers*, 14(22), 4864. <https://doi.org/10.3390/polym14224864>.
- Anbesaw, M. S. (2021). Characterization and Potential Application of Bromelain from Pineapple (*Ananas comosus*) waste (Peel) in recovery of silver from x-Ray Films. *Artículo*, 2021,9964337. <https://doi.org/10.1155/2021/9964337>.

- Azizan, A., Lee, A. X., Abdul Hamid, N. A., Maulidiani, M., Mediani, A., Abdul Ghafar, S. Z., Zolkeflee, N. K. Z., & Abas, F. (2020). Potentially bioactive metabolites from pineapple waste extracts and their antioxidant and α -Glucosidase inhibitory activities by ^1H NMR. *Foods*, 9(2), 173. <https://doi.org/10.3390/foods9020173>.
- Banerjee, R., Chintagunta, A. D., & Ray, S. (2019). Laccase mediated delignification of pineapple leaf waste: An ecofriendly sustainable attempt towards valorization. *BMC Chemistry*, 13(1), 58. <https://doi.org/10.1186/s13065-019-0576-9>.
- Campos, D. A., Ribeiro, T. B., Teixeira, J. A., Pastrana, L., & Pintado, M. M. (2020). Integral valorization of pineapple (*Ananas comosus* L.) by-products through a green chemistry approach towards added value ingredients. *Foods*, 9(1), 60. <https://doi.org/10.3390/foods9010060>.
- Casabar, J. T., Ramaraj, R., Tipnee, S., & Unpaprom, Y. (2020). Enhancement of hydrolysis with *Trichoderma harzianum* for bioethanol production of sonicated pineapple fruit peel. *Fuel*, 279, 118437. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118437>.
- Castillo-González, E., Giraldi-Díaz, M. R., De Medina-Salas, L., & Sánchez-Castillo, M. P. (2019). Pre-Composting and vermicomposting of pineapple (*Ananas Comosus*) and vegetable waste. *Applied Sciences*, 9(17), 3564. <https://doi.org/10.3390/app9173564>.
- da Silva, A. I. C., Paranha, G., Maia, L. S., & Mulinari, D. R. (2022). Development of activated carbon from pineapple crown wastes and its potential use for removal of methylene blue. *Journal of Natural Fibers*, 19(13), 5211–5226. <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1875365>.
- FAOSTAT. (2022). Datos sobre la producción de piña. *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. Recuperado de <https://www.fao.org/faost>.
- Gómez-García, R., Vilas-Boas, A. A., Oliveira, A., Amorim, M., Teixeira, J. A., Pastrana, L., Pintado, M. M., & Campos, D. A. (2022). Impact of simulated human gastrointestinal digestion on the bioactive fraction of upcycled pineapple by-products. *Foods*, 11(1), 126. <https://doi.org/10.3390/foods11010126>.

- González, F. (2023). Estrategias sostenibles para la gestión de residuos agrícolas en México. *Revista Mexicana de Agricultura Sostenible*, 10(2), 45-53.
- Hassan, S. S., El-Shafie, A. S., Zaher, N., & El-Azazy, M. (2020). Application of pineapple leaves as adsorbents for removal of rose bengal from wastewater: Process optimization operating face-centered central composite design (FCCCD). *Molecules*, 25(16), 3552. <https://doi.org/10.3390/molecules25163752>.
- Hu, H., Zhao, Q., Xie, J., & Sun, D. (2019). Polysaccharides from pineapple pomace: New insight into ultrasonic-cellulase synergistic extraction and hypoglycemic activities. *International Journal of Biological Macromolecules*, 121, 1213–1226. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.10.054>.
- Iamsaard, K., Weng, C.-H., Yen, L.-T., Tzeng, J.-H., Poonpakdee, C., & Lin, Y.-T. (2022). Adsorption of metal on pineapple leaf biochar: Key affecting factors, mechanism identification, and regeneration evaluation. *Bioresource Technology*, 344, 126-131. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126131>.
- Jaikel, J., & Brenes, A. (2021). Evaluación del efecto del pretratamiento del rastrojo de piña para la producción de hidrógeno vía reformado en fase acuosa (APR). *Artículo*, 31(2), 1–21. <https://doi.org/10.15517/ri.v31i2.43545>.
- Johny, V., Kuriakose Mani, A., Palanisamy, S., Rajan, V. K., Palaniappan, M., & Santulli, C. (2023). Extraction and physico-chemical characterization of pineapple crown leaf fibers (PCLF). *Fibers*, 11(1), 5. <https://doi.org/10.3390/fib11010005>.
- Kiatti, D. donné, Vastolo, A., Koura, B. I., Vitaglione, P., Cutrignelli, M. I., & Calabrò, S. (2023). The chemical characteristics and in vitro degradability of pineapple by-products as potential feed for ruminants. *Animals*, 13(20), 3238. <https://doi.org/10.3390/ani13203238>.
- Leal, F., & Coppens d'Eekenbrugge, G. (2018). Utilización sostenible de residuos vegetales de piña en biorrefinerías. En *Piña: botánica, producción y usos* (pp. 45-60). CABI Publishing.

- Le, H. V., Dao, N. T., Bui, H. T., Kim Le, P. T., Le, K. A., Tuong Tran, A. T., Nguyen, K. D., Mai Nguyen, H. H., & Ho, P. H. (2023). Bacterial cellulose aerogels derived from pineapple peel waste for the adsorption of dyes. *ACS Omega*, 8(37), 33412–33425. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c03130>.
- Lopes, F. L. G., Junior, J. B. S., Santana, J. C. C., Souza, R. R. de, & Tambourgi, E. B. (2007). Avaliação de fenômenos redutores do fluxo de permeado em microfiltrações do suco do abacaxi (*Ananas comosus* L. Merrill). *Exacta*, 5(2), 1182. <https://doi.org/10.5585/exacta.v5i2.1182>.
- Lourenço, S. C., Campos, D. A., Gómez-García, R., Pintado, M., Oliveira, M. C., Santos, D. I., Corrêa-Filho, L. C., Moldão-Martins, M., & Alves, V. D. (2021). Optimization of natural antioxidants extraction from pineapple peel and their stabilization by spray drying. *Foods*, 10(6), 1255. <https://doi.org/10.3390/foods10061255>.
- Micanquer-Carlosama, A., Cortés-Rodríguez, M., & Serna-Cock, L. (2020). Formulation of a fermentation substrate from pineapple and sacha inchi wastes to grow *Weissella cibaria*. *Artículo*, 6(4), 7. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03790>.
- Nasoha, N. Z., Luthfi, A. A. I., Roslan, M. F., Hariz, H. B., Bukhari, N. A., & Manaf, S. F. A. (2023). Exploring pineapple peel hydrolysate as a sustainable carbon source for xylitol production. *Scientific Reports*, 13(1), 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46061-8>.
- OECD. (2022). Sustainable waste management in agriculture. *Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos*. Recuperado de <https://www.oecd.org/>.
- Ortega-Hernández, E., Martínez-Alvarado, L., Acosta-Estrada, B. A., & Antunes-Ricardo, M. (2023). Solid-state fermented pineapple peel: a novel food ingredient with antioxidant and anti-inflammatory properties. *Foods*, 12(22), 2315–2331. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28329.40802>.
- Polanía, A. M., Ramírez, C., Londoño, L., Bolívar, G., & Aguilar, C. N. (2023). Encapsulation of pineapple peel extracts by ionotropic gelation using corn starch, weissella confusa exopolysaccharide, and sodium alginate as wall materials. *Foods*, 12(15), 15. <https://doi.org/10.3390/foods12152943>.

- Prado, K. S., & Spinacé, M. A. S. (2019). Isolation and characterization of cellulose nanocrystals from pineapple crown waste and their potential uses. *International Journal of Biological Macromolecules*, 122, 410–416. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.10.187>.
- Preciado-Saldaña, A. M., Ruiz-Canizales, J., Villegas-Ochoa, M. A., Domínguez-Avila, J. A., & González-Aguilar, G. A. (2022). Aprovechamiento de subproductos de la industria agroalimentaria. Un acercamiento a la economía circular. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 23(2), 92.
- Py, C., Lacoëuilhe, J.J., & Teisson, C. (1987). La piña: cultivo y usos. GP Maisonneuve et Larose.
- Rebolledo Martínez, A., Jiménez Delgadillo, M., & Hernández Durán, A. (1998). Historia y cultivo de la piña en México. *Revista Mexicana de Agroindustria Tropical*, 14(1), 23-31.
- Satyanarayana, T., Gowda, S., Ayllón, M. A., & Dawson, W. O. (2004). Closterovirus bipolar virion: Evidence for initiation of assembly by minor coat protein and its restriction to the genomic RNA 5' region. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(3), 799–804. <https://doi.org/10.1073/pnas.0307747100>.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2023). *Estadísticas de producción de piña en México*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Recuperado de <https://www.gob.mx/siap>.
- Sistema de Información Agropecuaria y Oceanográfica (SIAO). (2023). *Producción de piña en México por estado*. Recuperado de <https://www.siao.mx>.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera SIAP. (2023). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. <https://www.gob.mx/siap>.
- Tallet, B. (2008). La piña en México: Historia de su cultivo y comercialización.

- Tang, P. L., & Hassan, O. (2020). Bioconversion of ferulic acid attained from pineapple peels and pineapple crown leaves into vanillic acid and vanillin by *Aspergillus niger* I-1472. *BMC Chemistry*, 14(1), 7. <https://doi.org/10.1186/s13065-020-0663-y>.
- Tran, T. V., Nguyen, D. T. C., Nguyen, T. T. T., Nguyen, D. H., Alhassan, M., Jalil, A. A., Nabgan, W., & Lee, T. (2023). A critical review on pineapple (*Ananas comosus*) wastes for water treatment, challenges and future prospects towards circular economy. *The Science of the Total Environment*, 856(Pt 1), 158817. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158817>.
- Uribe-Clavijo, M., Álvarez-Gómez, Á. M., Arango, V., Cortes-Mancera, F. M., Cadavid-Jaramillo, Á. P., & Cardona-Maya, W. D. (2012). Efecto in vitro del extracto vegetal de ananas comosus sobre espermatozoides humanos. *TecnoLógicas*, 28, 55–70.
- Van Doan, H., Hosseinifar, S. H., Harikrishan, R., Khamlor, T., Punyatong, M., Tapinake, W., Yousefi, M., Palma, J., & El-Haroun, E. (2021). Impacts of pineapple peel powder on growth performance, innate immunity, disease resistance, and relative immune gene expression of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Fish & Shellfish Immunology*, 114, 311–319. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2021.04.002>.
- Vargas, J., & Rodríguez, K. (2021). Funcionalización de nanocelulosa a partir de rastrojo de piña y raquis de palma africana. *Artículo*, 25(2), 01–19. <https://doi.org/10.46842/ipn.cien.v25n2a08>.
- Vega-Castro, O., Contreras-Calderon, J., León, E., Segura, A., Arias, M., Pérez, L., & Sobral, P. J. A. (2016). Characterization of a polyhydroxyalkanoate obtained from pineapple peel waste using *Ralstonia eutropha*. *Journal of Biotechnology*, 231, 232–238. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2016.06.018>.
- Vega-Rodríguez, M. C., & Hernández-Chaverri, R. A. (2020). Crecimiento de *Trichoderma* en rastrojo de piña para obtener esporas para uso agrícola. *Artículo*, 31(3). <https://doi.org/10.15517/am.v31i3.40275>.

- Yahya, N. A., Abdul Wahab, R., Attan, N., Abdul Hamid, M., Mohamed Noor, N., & Kobun, R. (2022). *Ananas comosus* Peels Extract as a New Natural Cosmetic Ingredient: Oil-in-Water (o/w) Topical Nano Cream Stability and Safety Evaluation. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2022, e2915644. <https://doi.org/10.1155/2022/2915644>.
- Yang, C., Zhao, W., Tian, H., Wang, M., Gao, C., Guo, Y., & Sun, B. (2022). A preliminary study on the possibility of fermented pineapple peel residue partially replacing whole corn silage in feeding Chuanzhong black goats. *Frontiers in Microbiology*, 13. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2022.959857>.



Sistemas de humedales de tratamiento de aguas residuales sembradas con plantas ornamentales en Pastorías, Actopan, México

Álvarez-Hernández L.M.¹

Marín-Muñiz J.M.²

Zitácuaro-Contreras I.³

1. Introducción

A pesar de que el 71 % de la superficie terrestre está cubierta por agua, solo el 0.77 % está disponible para el consumo humano (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2023). El abastecimiento de agua potable y el saneamiento constituyen un servicio público que el Estado debe proveer a los individuos de manera obligatoria; sin embargo, dichos servicios no se han dado satisfactoriamente por los gobiernos en diversos países, sobre todo en aquellos donde prevalecen condiciones de subdesarrollo (Betancur Flórez & Upegui Sosa, 2020).

De acuerdo con los datos de la CONAGUA, (2023), los recursos hidrológicos en México se encuentran sujetos a una presión considerada baja. Pero la situación se vuelve delicada si se considera el grado de contaminación y sobre explotación de las fuentes de agua, lo que persiste a pesar de las regulaciones existentes en cuanto a las condiciones de descarga y la presencia de sitios de monitoreo para determinar la calidad del recurso (Ley de Aguas Nacionales, 1992).

La mayoría de los cuerpos de agua superficiales reciben descargas de aguas residuales de origen industrial, agrícola, de servicios, pecuario y/o doméstico, sin ningún tipo de tratamiento, convirtiéndose en una fuente de contaminación que limita el uso directo de estos recursos hídricos (Arroyo-Quiroz & Wyatt, 2018).

¹ lmalvarezh.ddrs22@colver.info; Licenciado en Economía. Especialista en Economía Financiera. Ingeniero Industrial. Maestro en Desarrollo Regional Sustentable y estudiante del Doctorado en Desarrollo Regional Sustentable en El Colegio de Veracruz.

² soydrew@gmail.com; Dr. en Ecología Tropical, Mtro. en Ciencias Ambientales e Ingeniero Químico por la Universidad Veracruzana, con posdoctorado en Desarrollo Regional Sustentable en El Colegio de Veracruz. Líneas de investigación: ecotecnologías sustentables para el tratamiento de aguas residuales y sus implicaciones socioambientales. Miembro del SNI.

³ irma.zitacuaro@colver.info Licenciada en Ciencias Atmosféricas. Maestría y Doctorado en Desarrollo Regional Sustentable por El Colegio de Veracruz. Línea de investigación: Planeación y ecotecnologías para el buen uso del agua. Miembro del SNI.

De acuerdo con datos de la CONAGUA (2023), el 33.3% de las aguas residuales municipales y el 22.58% de las de origen industrial no reciben tratamiento, lo que refuerza la afirmación de Zitácuaro-Contreras, Marín-Muñoz y Vidal-Álvarez (2021) en el sentido de que la problemática relacionada con la disponibilidad y calidad del recurso hídrico se ha acentuado debido al aumento de las descargas como consecuencia de las actividades humanas, además de la falta de involucramiento tanto por parte de las entidades gubernamentales como de la sociedad. Sumado a esto, la falta de infraestructura adecuada para el tratamiento del agua, así como los altos costos de inversión para su implementación, han resultado poco viables (Solís-Silván, López-Ocaña, & Bautista-Margulis, 2016); lo que, de acuerdo con el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL, 2020), agrava la situación de disponibilidad de agua limpia, principalmente en las comunidades rurales.

Muchas de estas comunidades dependen de fuentes de agua superficiales, como ríos, lagos o pozos poco profundos, que pueden agotarse durante períodos de sequía o verse contaminados debido a la falta de sistemas de tratamiento adecuados.

En este contexto, los avances en la investigación sobre los (HM) han demostrado que constituyen una alternativa eficiente y sostenible, basada en procesos naturales, orientada a abordar los retos vinculados con el tratamiento, la calidad y la gestión integral del recurso hídrico; por lo cual el presente estudio tiene como objetivo evaluar de la funcionalidad del HM para el tratamiento de aguas residuales comunitarias en Pastorías, Actopan, México; centrándose en la eficiencia de remoción de contaminantes de acuerdo con el tipo de vegetación empleada (*Canna hybrids* y *Heliconia spp.*) con el fin de determinar su viabilidad como una solución sustentable para el tratamiento y reutilización del agua en comunidades rurales.

2. Desarrollo teórico

Los HM son estructuras de ingeniería diseñadas para imitar los procesos naturales de transformación y eliminación de contaminantes propios de los humedales, pero en un entorno controlado (Vymazal, 2023) en el que se aprovechan los mecanismos físicos, químicos y biológicos para depurar el agua, pudiéndose dotar, además, de capacidades adicionales para generar múltiples servicios ambientales.

En México, los HM han demostrado ser efectivos en la remoción de contaminantes de las aguas residuales, gracias a múltiples factores, entre ellos la diversidad de especies vegetales que se utilizan en estos sistemas. De acuerdo con Marín-Muñoz et al. (2023), en los últimos veintidós años se han acumulado experiencias significativas en cuanto al uso de vegetación específica para el tratamiento de este tipo de agua, logrando diferentes niveles de eficiencia en la eliminación de contaminantes.

Esta visión coincide con lo reportado por Zurita-Martínez y Sandoval-Herazo (2024), quienes afirman que el rendimiento de los HM depende fundamentalmente de la interrelación del tipo de humedal, sustrato, selección/densidad vegetal y operación, factores considerados en la elección de *Canna hybrids* y *Heliconia spp.* en este estudio. En este contexto, diversos estudios indican que la selección de especies vegetales es clave en la optimización de la eficiencia de los HM; en este sentido, las especies ornamentales como la *Canna hybrids* y *Heliconia spp.* han demostrado sus capacidades de remoción en las aguas residuales, así como su valor estético, que puede fomentar su aceptación social y aprovechamiento económico (Zitácuaro-Contreras et al., 2022), características que fortalecen la resiliencia comunitaria al ampliar los beneficios ambientales más allá de su función de saneamiento (Cohen-Shacham et al., 2016).

Los HM representan un enfoque innovador dentro de las soluciones basadas en la naturaleza, al integrar en un mismo sistema la depuración del agua, la conservación de biodiversidad y la generación de múltiples beneficios ambientales para las comunidades (Phewnil et al., 2024). Esta diversidad de propósitos se logra gracias a su diseño adaptable, que permite combinar diferentes tipos de flujo (superficial y subsuperficial), densidades, especies vegetales, sustratos y tiempos de retención hidráulica (TRH), optimizando así los procesos de sedimentación, filtración y asimilación de nutrientes. La versatilidad de los HM facilita su aplicación en entornos rurales, donde los recursos para sistemas de tratamiento convencionales suelen ser limitados.

3. Metodología

El sistema de tratamiento evaluado se ubica en la Localidad de San José Pastorías, perteneciente al municipio de Actopan, Veracruz, México, ubicado en 19°33'51" N, 96°34'14" O.

Figura 1. Ubicación de la Localidad de San José Pastorías, Actopan, Veracruz.



Fuente: Álvarez-Hernández (2020).

El sistema de tratamiento tiene construidas dieciocho celdas de 4 m de largo, 0.90 m de ancho y 0.80 m de profundidad. Dos de las celdas no tienen relleno debido a que son de flujo superficial y las otras 16 celdas tienen como relleno sustrato compuesto de piedra porosa de río, grava volcánica y trozos rugosos de botellas de PET (tereftalato de polietileno), principalmente los cuellos y bases o fondos de botella, así como las taparrosas (polipropileno), recolectados en la comunidad de Pastorías; todo esto se distribuyó como sigue: Se colocó una capa de 10 cm de piedra porosa de río como base, sobre esta se dispuso otra capa de PET de 60 centímetros; finalmente, se añadió una capa de 10 centímetros de grava volcánica para evitar olores, la proliferación de larvas y mosquitos, además de evitar que el plástico flotara.

Para el experimento reportado en este estudio, se utilizaron cuatro celdas: dos sembradas con *Canna hybrids hybrids* y dos con *Heliconia spp.*, cada una con su respectiva réplica. El sistema cuenta con un pretratamiento donde, por gravedad, el agua llega a una fosa que también actúa como sedimentador; luego pasa a un separador de sólidos y a una trampa de grasas; cada uno de estos componentes mide 1 m x 0.60 m x 0.80 m. Por último, el agua pretratada es conducida a las celdas del humedal.

Respecto a las mediciones in situ, las muestras se tomaron dos veces al mes en cada una de las cuatro celdas y en el punto de entrada, utilizando frascos de 250 ml. La altura máxima de las plantas fue medida mensualmente con un flexómetro, y los resultados se registraron en una base de datos en Excel con la fecha y el valor obtenido. Todas las celdas tienen un flujo de agua constante de 1 m³/día proveniente de la comunidad, con un TRH de un día.

Cada muestra se analizó como sigue: para cuantificar la concentración los Sólidos Disueltos Totales (SDT) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) se utilizó un medidor portátil modelo BA y los resultados se registraron en una base de datos en Excel con la fecha y el valor obtenido.

4. Resultados

4.1 Remoción de contaminantes en HM

El tratamiento de aguas residuales mediante humedales ha sido ampliamente estudiado como una alternativa sostenible para la eliminación de contaminantes. En México, el empleo de estos se ha limitado en su gran mayoría a estudios experimentales a nivel de laboratorio, siendo escasos los proyectos que implementan humedales para abordar la problemática a escala real (Marín-Muñiz et al., 2023).

4.2 La remoción de la DQO

La DQO es la cantidad necesaria de oxígeno para descomponer químicamente la materia orgánica e inorgánica (CONAGUA, 2005). Es un parámetro utilizado para medir la cantidad total de contaminantes orgánicos presentes en las aguas

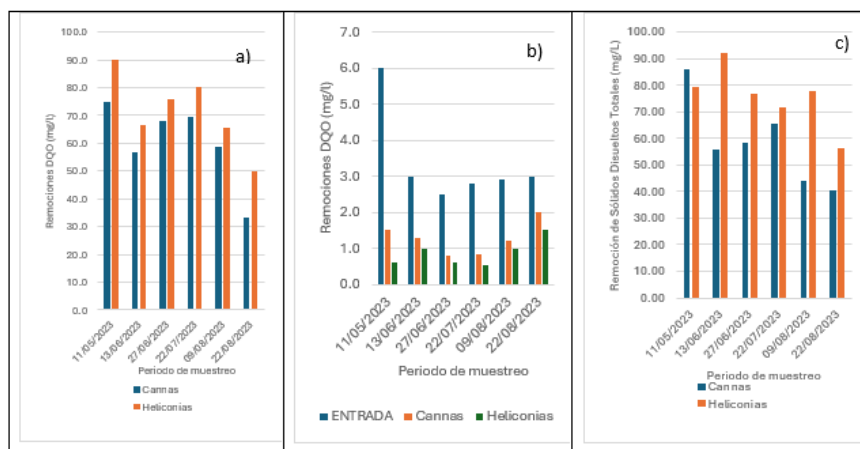
residuales, permitiendo reconocer valores normales hasta aportaciones importantes de descargas residuales industriales o municipales.

Durante el periodo de análisis (103 días), se observaron reducciones notables en las concentraciones de DQO en las celdas que se encontraban sembradas con dos especies de vegetación. En las celdas con vegetación de *Canna hybrids*, las concentraciones iniciales de DQO variaron entre 250 y 600 mg/L, mientras que a la salida del sistema se detectaron valores entre 80 y 165 mg/L. Por otro lado, las celdas sembradas con *Heliconia spp.* mostraron una reducción aún mayor, con concentraciones en la salida que variaron entre 60 y 88 mg/L (Figura 2a y 2b). Este resultado evidencia la mayor remoción de la *Heliconia spp.* en DQO.

4.3 Remoción de SDT

Para SDT las concentraciones en la entrada oscilaron entre los 250 y 1,480 mg/L, mientras que en la salida se observaron variaciones significativas en función de la vegetación utilizada. Las celdas sembradas con *Canna hybrids* redujeron los SDT a concentraciones entre 110 y 450 mg/L, logrando una eficiencia de remoción del 67 %. Por su parte, las celdas con *Heliconia spp.* mostraron una mayor capacidad de remoción, con concentraciones finales entre 40 y 310 mg/L, lo que resultó en una eficiencia de remoción de hasta el 92 % (véase Figura 2c). Estos datos indican que las *Heliconia spp.* mostraron una mayor remoción de SDT que las *Canna hybrids*.

Figura 2. Remoción de DQO como porcentaje de la entrada al sistema; 2b. Remoción de DQO 2c. Remoción de Sólidos Disueltos Totales como porcentaje con respecto a la entrada.



Fuente: Elaboración propia.

4.4 Crecimiento de las plantas

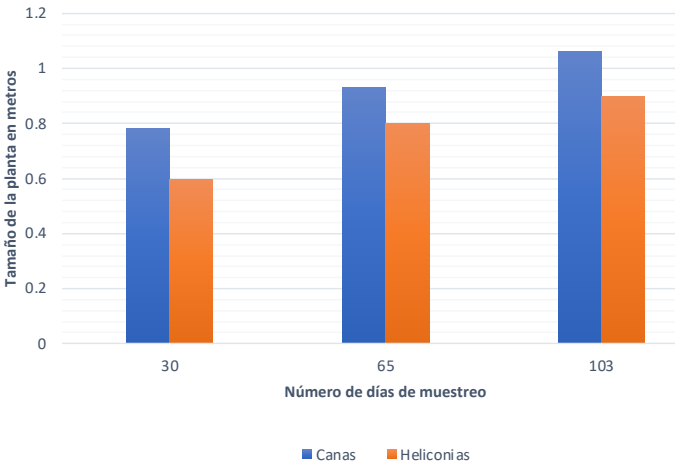
Durante el periodo de evaluación, se observó una diferencia significativa en el crecimiento de las especies vegetales utilizadas en las celdas del humedal. Las plantas sembradas en las celdas desempeñaron un papel clave en la eficiencia

del sistema para la remoción de contaminantes, siendo su desarrollo monitoreado en función de su altura máxima.

En este contexto, las *Canna hybrids*, mostraron un incremento en altura del 36 % en comparación con su altura inicial. Este crecimiento relativamente moderado se atribuye a las condiciones ambientales y a la composición del agua residual tratada, las cuales, si bien proporcionaron un entorno adecuado para su desarrollo, no lograron promover un crecimiento más acelerado en esta especie. Por otro lado, las *Heliconia spp.* presentaron un crecimiento significativamente mayor, alcanzando un incremento en altura del 51 % (véase Figura 3). Este resultado sugiere que las *Heliconia spp.* son más adaptables a las condiciones del humedal y tienen una mayor capacidad de respuesta ante las características del agua tratada.

La estructura y capacidad de adsorción de nutrientes de su sistema radicular podrían explicar este desempeño superior en términos de crecimiento, lo que a su vez podría estar vinculado a una mayor eficiencia en la remoción de contaminantes.

Figura 3. Crecimiento de *Canna hybrids* y *Heliconias* durante el periodo del muestreo.



Fuente: Elaboración propia.

5. Discusión de resultados

El nivel de reducción de DQO representa una eficiencia de remoción de hasta el 90 %, lo que posiciona a la *Heliconia spp.* como una especie vegetal altamente eficiente para la depuración del agua residual. Comparativamente, las celdas con *Canna hybrids* tuvieron un rendimiento en remoción del 71 % en promedio. Este último resultado es similar al documentado por Phewnil, Chunkao, Prabhuddham y Pattamapitoon, (2024) en el que celdas con iguales condiciones sembradas con *Canna hybrids* presentaron remociones de entre 67.9 y 83.4 %, al igual que lo documentado por Li et al. (2008) donde obtuvieron remociones del 70.5 % en un

humedal sembrado con especies no ornamentales como el *Phragmites australis*, *Typha latifolia* y *Scirpus validus* (caña, tule y junco), respectivamente.

Esta diferencia en la capacidad de remoción de contaminantes entre las dos especies vegetales puede atribuirse a factores como la tasa de crecimiento, el sistema radicular y la adaptación de cada planta a condiciones acuáticas. Estudios previos han demostrado que las especies con sistemas radiculares más desarrollados, como la *Heliconias spp.* tienden a ser más eficientes en la adsorción de contaminantes y en la generación de ambientes anóxicos que facilitan la remoción de materia orgánica y sólidos (Stottmeister et al., 2003; Wang et al., 2018). Por otro lado, las diferencias en la remoción de SDT sugieren que la *Heliconia spp.* presenta una ventaja sobre la *Canna hybrids*, probablemente debido a una mayor interacción entre las raíces y el sustrato del humedal, lo que favorece procesos tan importantes como el de la sedimentación y la filtración de partículas.

Estos resultados son congruentes con estudios realizados en otros sistemas de humedales de tratamiento, donde se ha reportado que plantas con sistemas radiculares más robustos y con una mayor superficie de contacto tienden a incrementar la eficiencia en la remoción de contaminantes sólidos (Wu et al., 2015). En contraste, Ali, Min, Yu, Kooch, Marnn y Ahmed, (2024) documentaron una remoción de este tipo de contaminante del 78 % utilizando *Lemna minor L.*, por lo que se puede afirmar que la *Heliconia spp.*, siendo una especie ornamental, en estas condiciones muestra una mayor eficiencia en la remoción de este contaminante que la *Lemna minor L.*, una especie no ornamental.

Los resultados obtenidos en cuanto al crecimiento de las especies vegetales utilizadas en el HM revelan diferencias importantes que tienen implicaciones directas sobre la eficiencia del sistema de tratamiento de aguas residuales. El mayor crecimiento observado en la *Heliconias spp.* (51 %) en comparación con la *Canna hybrids* (36 %) sugiere una ventaja competitiva de las primeras en términos de adaptabilidad y absorción de nutrientes en este tipo de ambiente. En este sentido, las heliconias parecen haber optimizado su capacidad de interacción con el sistema radicular y la rizosfera, maximizando la absorción de compuestos como el nitrógeno y el fósforo, lo que podría haber favorecido su mayor desarrollo.

Las cannas, aunque efectivas, presentaron menores porcentajes de remoción de contaminantes, con valores máximos del 88 % para DQO y del 86 % para SDT. Además, su crecimiento más limitado del 36 % podría estar relacionado con una menor capacidad de absorción de nutrientes y adaptación al entorno del humedal.

Ambos tipos de vegetación mostraron su capacidad para adaptarse y desarrollarse dentro del sistema de humedales. Sin embargo, el comportamiento diferencial observado entre las cannas y las heliconias sugiere que éstas últimas podrían ser más eficientes en la absorción de nutrientes y en el crecimiento bajo las condiciones específicas del experimento, lo que podría repercutir en su mayor

contribución a la remoción de contaminantes del agua residual tratada. Este análisis del crecimiento de la vegetación proporciona un enfoque integral sobre la importancia de seleccionar especies vegetales adecuadas para mejorar la eficiencia de los humedales de tratamiento en la depuración de aguas residuales, destacando la relevancia de la diversidad y adaptabilidad de las plantas en estos sistemas.

Estos resultados obtenidos son comparables con investigaciones previas realizadas en México y en otras partes del mundo, donde los HM han demostrado ser una solución viable para el tratamiento de aguas residuales en comunidades rurales y urbanas. Es importante resaltar que la tasa de crecimiento de la vegetación influye directamente en la eficiencia de los humedales para remover contaminantes del agua (Maucieri, Barbera, Vymazal, & Borin, 2017).

El crecimiento más limitado de las cannas, por otro lado, sugiere que, aunque estas plantas son efectivas en la remoción de contaminantes, podrían estar menos adaptadas a las condiciones del agua residual en comparación con las heliconias. Esta diferencia de comportamiento podría deberse a factores tales como la estructura de las raíces, la fisiología de la planta y su capacidad de establecer simbiosis con microorganismos presentes en la rizosfera, lo que afectaría su capacidad de crecimiento y, en consecuencia, a su contribución en el tratamiento del agua residual.

Por otro lado, el crecimiento más rápido de las heliconias no solo representa una mayor capacidad de absorción de nutrientes y contaminantes, sino que, de acuerdo con Vymazal y Březinová (2016), también podría implicar una mejora en el proceso de evapotranspiración, ayudando a reducir el volumen de agua tratada y acelerar el ciclo de tratamiento del humedal. Sin embargo, este crecimiento acelerado de las heliconias necesita un mayor mantenimiento de la biomasa vegetal en comparación con el de las cannas para evitar la saturación del sistema y garantizar su rendimiento a lo largo del tiempo.

Además de su eficiencia en la remoción, la elección de estas especies puede tener beneficios adicionales; Zitácuaro-Contreras, Marín-Muñiz, Celis Pérez, Vidal-Álvarez, León-Estrada y Zamora-Castro (2022) destacan que la vegetación ornamental utilizada en fitorremediación no solo es eficaz en la eliminación de contaminantes, sino que también ofrece beneficios ambientales, económicos y sociales. De este modo, plantas como *Canna hybrids* y *Heliconia spp.* aportan valor estético al entorno, y pudieran representar una fuente de ingresos para la comunidad local si se aprovechan comercialmente. Estos beneficios multifuncionales hacen de estas especies una opción valiosa para HM en otras localidades, incentivando su adopción en proyectos de fitorremediación en México y en otras regiones. Zitácuaro-Contreras, Marín-Muñiz y Vidal-Álvarez, (2021) trabajaron con sistemas de humedales en zonas rurales de México, destacando la importancia del capital social y la participación comunitaria para la sostenibilidad de estos proyectos.

6. Conclusiones

En general, ambos tipos de vegetación contribuyeron de manera significativa a la mejora de la calidad del agua residual tratada, lo que demuestra la viabilidad de los HM como una solución para las comunidades rurales. Sin embargo, el mayor rendimiento de las heliconias sugiere que esta especie podría ser preferible para futuros proyectos de tratamiento de aguas residuales mediante humedales. Además, los resultados refuerzan la idea de que la selección de especies vegetales es crucial en la optimización de los HM, ya que diferentes plantas ofrecen distintos grados de eficiencia en la remoción de contaminantes. En futuros estudios, sería pertinente explorar cómo otras especies vegetales, quizás en combinación con las heliconias, podrían mejorar aún más el rendimiento del sistema.

Por lo tanto, los hallazgos presentados subrayan la necesidad de seguir evaluando diferentes especies en estos sistemas de tratamiento, no solo en términos de remoción de contaminantes, sino también considerando factores como el crecimiento, la resistencia a las condiciones ambientales y la capacidad de adaptación al tipo de agua tratada. Esto permitiría diseñar HM más eficientes y sostenibles para el tratamiento de aguas residuales en diferentes contextos ambientales.

La implementación de sistemas de HM en zonas rurales no solo puede mejorar la calidad del agua, sino también promover el desarrollo sostenible y la conservación de los recursos hídricos locales, a través de un enfoque ecológico.

Finalmente, este estudio reafirma la importancia de seguir investigando sobre la selección de especies vegetales en los HM y su impacto en la eficiencia del tratamiento de aguas residuales, con el fin de optimizar su desempeño en diferentes escenarios ambientales.

7. Referencias

- Ali, H., Min, Y., Yu, X., Kooch, Y., Marnn, P., & Ahmed, S. (2024). Composition of the microbial community in surface flow-constructed wetlands for wastewater treatment. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1421094. doi.org/10.3389/fmicb.2024.1421094.
- Álvarez-Hernández, L. M. (2020). Evaluación de la sustentabilidad de un humedal bioingenieril utilizado para el tratamiento de aguas residuales domiciliarias rurales que contaminan la cuenca del río Actopan, México (Tesis de maestría). El Colegio de Veracruz, Xalapa, Veracruz, México.
- Arroyo-Quiroz, I., & Wyatt, T. (Eds.). (2018). *Criminología verde en México*. Universidad Nacional Autónoma de México, Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias. doi.org/10.22201/crim.9786073004398e.2018.

- Betancur Flórez, Á. M., & Upegui Sosa, S. A. (2020). Comparación de técnicas alternativas de potabilización de agua, y su posible aplicación en el área rural del territorio nacional colombiano. *Activa Revista Científica de la Facultad de Ingeniería*, Institución Universitaria Tecnológico de Antioquia. Recuperado de <https://dspace.tdea.edu.co/handle/tdea/946>.
- Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C., & Maginnis, S. (Eds.). (2016). *Nature-based Solutions to address global societal challenges*. IUCN. doi.org/10.2305/IUCN.CH.2016.13.
- Comisión Nacional del Agua. (2005). Saneamiento, calidad del agua y aspectos de salud. En *Estadísticas del agua en México* (pp. 61-65). Recuperado de https://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM_JUNIO2005.pdf.
- Comisión Nacional del Agua. (2023). *Estadísticas del Agua en México 2023*. Recuperado de: https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/Descargas/pdf/EAM2023_f.pdf.
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL). (2020). *Estudio diagnóstico sobre el derecho al agua en México*. CONEVAL. Recuperado de <https://www.coneval.org.mx/>
- Estados Unidos Mexicanos. Congreso de la Unión. (1992). *Ley de Aguas Nacionales* (última reforma publicada DOF 06-01-2020). Diario Oficial de la Federación. Recuperado de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5582791&fecha=06/01/2020
- Li, J., Wen, Y., Zhou, Q., Xingjie, Z., Li, X., Yang, S., & Lin, T. (2008). Influence of vegetation and substrate on the removal and transformation of dissolved organic matter in horizontal subsurface-flow constructed wetlands. *Bioresource Technology*, 99(11), 4990–4996. doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.012
- Marín-Muñiz, J. L., Sandoval-Herazo, L. C., López-Méndez, M. C., Sandoval-Herazo, M., Meléndez-Armenta, R. Á., González-Moreno, H. R., & Zamora-Castro, S. A. (2023). Treatment wetlands in Mexico for control of wastewater contaminants: A review of experiences during the last twenty-two years. *Processes*, 11(2), 359. doi.org/10.3390/pr11020359

- Maucieri, C., Barbera, A. C., Vymazal, J., & Borin, M. (2017). A review on the main affecting factors of greenhouse gases emission in constructed wetlands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 227, 105846. doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.01.006
- Phewnil, O., Chunkao, K., Prabhuddham, P., & Pattamapitoon, T. (2024). Application of different aquatic plants in an alternated fill and drain wetland system of Phetchaburi municipal wastewater treatment in Thailand. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(1), 1304-1313. doi.org/10.1007/s11356-023-31266-1
- Solís-Silván R., López-Ocaña G., & Bautista-Margulis R. G. (2016). Evaluación de humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial en la remoción de contaminantes de aguas residuales utilizando diferentes especies de vegetación macrófita. *Interciencia*, 41(1), 40-47. https://www.interciencia.net/wp-content/uploads/2017/10/40-LOPEZ-41-1.pdf
- Stottmeister, U., Wiessner, A., Kusch, P., Kappelmeyer, U., Kästner, M., Bederski, O., ... Moormann, H. (2003). Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology Advances*, 22(1-2), 93-117. doi.org/10.1016/j.biotechadv.2003.08.010
- Vymazal, J., & Březinová, T. (2016). Accumulation of heavy metals in aboveground biomass of *Phragmites australis* in horizontal flow constructed wetlands for wastewater treatment: A review. *Chemical Engineering Journal*, 290, 232-242. doi:10.1016/j.cej.2015.12.108
- Vymazal, J. (2023). Thirty years of constructed wetlands for municipal wastewater treatment in the Czech Republic. *Ecological Engineering*, 194, 107054. doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.107054
- Wang, Q., Hu, Y, Xie, H., & Yang, Z. (2018). Constructed wetlands: A review on the role of radial oxygen loss in the rhizosphere by macrophytes. *Water*, 10(6), 678. doi.org/10.3390/w10060678
- Wu, H., Zhang, J., Ngo, H. H., Guo, W., Hu, Z., Liang, S., & Fan, J. (2015). A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation. *Bioresour. Technology*, 175, 594-601. doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.068

- Zitácuaro-Contreras, I., Marín-Muñíz, J. L., & Vidal-Álvarez, M. (2021). Capital social y humedales construidos como estrategias para impulsar el desarrollo rural sustentable en México. *Revista Ingeniantes*, 8(2), 2. Recuperado de <https://citt.itsm.edu.mx/ingeniantes/articulos/ingeniantes8no2vol2/4%20Capital%20social%20y%20humedales%20construidos%20como%20estrategias%20para%20impulsar%20el%20desarrollo.pdf>
- Zitácuaro-Contreras, I., Marín-Muñíz, J. L., Celis-Pérez, M. del C., Vidal-Álvarez, M., León-Estrada, X. del A., & Zamora Castro, S. A. (2022). Vegetación ornamental utilizada en fitorremediación y sus potencialidades ambientales, económicas y sociales. *Journal of Basic Sciences*, 8(23), 133-145. doi.org/10.19136/jobs.a8n23.5353
- Zurita-Martínez, F., & Sandoval-Herazo, L. C. (2024). La tecnología de los humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales. *Tendencias en energías renovables y sustentabilidad*, 3(1), 6–10. doi.org/10.56845/terys.v3i1.186



Análisis de indicadores de sustentabilidad de sistemas convencionales: consideraciones para su aplicabilidad a sistemas de humedales de tratamiento de aguas residuales

Karina Elizabeth Martínez-Aguilar¹

José Luis Marín-Muñoz²

1. Introducción

El tratamiento de las aguas residuales data de fines de 1800 y principios del 1900, y fueron desarrolladas como consecuencia de la relación entre la contaminación de los cuerpos de agua y las enfermedades de origen hídrico (Rojas, 2002).

A lo largo de su evolución, han surgido diferentes técnicas, procesos y modelos para el tratamiento del agua residual, diseñando tecnologías cada vez más eficientes, y ofreciendo una amplia variedad de posibilidades de acuerdo a las necesidades de cada generador.

Con el paso de los años, se ha procurado diseñar sistemas basados en procesos ecológicos, diferentes a los métodos convencionales de tratamiento, considerando implementar soluciones basadas en la naturaleza (SBN) como son los humedales de tratamiento. Las SBN, acorde a la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, son “acciones para proteger, gestionar de manera sostenible y restaurar ecosistemas naturales o modificados que aborden los desafíos sociales de manera efectiva y adaptativa, proporcionando simultáneamente beneficios para el bienestar humano y la biodiversidad” (Arias, Vera, & Chaparro, 2023).

Dentro de las SBN, encontramos los Humedales de Tratamiento, los cuales se han implementado desde 1950 en distintas partes del mundo (Palma-Cabrera, Marín-Muñoz, & Ruelas-Monjardín, 2022), comenzando a replicarse cada vez más debido a la sencillez en su operación y a los altos rendimientos alcanzados en la eliminación de contaminantes del agua (Rivas, 2021).

¹ karina.m.aguilar@hotmail.com; El Colegio de Veracruz. Ingeniera Ambiental, Especialista en Diagnóstico y Gestión Ambiental, Maestra en Ingeniería Industrial, y alumna del Doctorado en Desarrollo Regional Sustentable.

² soydrew@gmail.com; Tecnológico Nacional de México, Campus Tecnológico de Misantla. Ingeniero Químico, Maestro en Ciencias Ambientales y Doctor en Ecología Tropical. Línea de investigación: Ecotecnologías sustentables. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores, miembro del SNI.

Debido a las ventajas que ofrecen estos sistemas, estos podrían considerarse como sistemas “sustentables”, sin embargo, esta afirmación debe hacerse con base en resultados palpables que puedan arrojar datos duros respecto a la sustentabilidad de estos sistemas.

Desde la década de los 90's ha habido un énfasis creciente en definir y medir la sostenibilidad de los sistemas, para lo cual los sistemas de tratamiento de aguas residuales no han quedado excluidos de esta tendencia, propiciando la necesidad de implementar sistemas más sostenibles, basados en tecnologías cuyo rendimiento se equilibre con la sostenibilidad ambiental, económica y social (Molinos-Senante, Gómez, Garrido-Baserba, Caballero, & Sala-Garrido, 2014).

La medición de la sustentabilidad permite establecer qué tan lejos se está en la práctica de ese esquema idealista de desarrollo; además, los indicadores de sustentabilidad permiten conocer de manera particularizada las necesidades de manejo de cada sistema, con miras a mantener o mejorar la productividad, reducir riesgos e incertidumbre, aumentar los servicios ecológicos y socio-económicos, proteger la base de recursos y prevenir la degradación de suelos, agua y biodiversidad, sin disminuir la viabilidad económica del sistema (Valarezo Beltrón, Julca-Otiniano, & Rodríguez Berrío, 2020).

La evaluación de la sostenibilidad de diferentes tecnologías de tratamiento de aguas residuales proporciona información muy útil para apoyar el proceso de toma de decisiones, ya que, actualmente, el proponer alternativas que fomenten un mejor uso de los recursos naturales es un desafío que debe incorporarse en las propuestas de tratamiento de aguas residuales.

Sin embargo, dada la diferencia entre los ejes económico, social y ambiental, se requiere de metodologías diferentes para poder medir estos componentes; por lo anterior, para poder medir la sustentabilidad, es necesario basarnos en indicadores o metodologías específicas aplicables a cada componente evaluado.

Para lograr medir la sustentabilidad de los sistemas, es necesario identificar y evaluar las variables sociales, económicas y ecológicas involucradas en el desarrollo, mediante procesos integradores, que generen indicadores, que sean holísticos para analizar y evaluar el estado del ambiente y las funciones ecológicas, así como el impacto y las consecuencias del desarrollo en los recursos naturales (González Flores, Guajardo Hernández, Almeraya-Quintero, Pérez-Hernández, & Sangerman-Jarquín, 2020).

Algunos autores han desarrollado propuestas de indicadores de sustentabilidad con excelentes resultados (Balkema, Preisig, Otterpohl, & Lambert, 2002; Molinos-Senante et al., 2014), los han sido aplicados en la evaluación y comparación de diferentes tipos de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales, que no incluyen soluciones basadas en la naturaleza, por lo cual surge el interés de desarrollar una metodología para la evaluación de humedales de tratamiento y poder analizar los resultados de sustentabilidad de este tipo de sistemas.

Por lo anterior, el objetivo de esta investigación, es realizar una adaptación a las metodologías encontradas para el uso de indicadores de evaluación de la sustentabilidad en sistemas de tratamiento de agua convencionales, que puedan ser aplicables en la evaluación de la sustentabilidad de humedales de tratamiento de aguas residuales.

2. Desarrollo teórico

2.1 El concepto de Sustentabilidad

Un objetivo que ha sido adoptado progresivamente en el discurso ecotecnológico, y que está presente en casi todas las iniciativas contemporáneas de los distintos planteamientos, consiste en contribuir a la sustentabilidad, un espectro conceptual muy amplio, generalmente orientado a vivir en armonía, en sociedad y con la naturaleza (Mebratu, 1998), que parte del reconocimiento de que el bienestar humano está íntimamente relacionado con el equilibrio de los ecosistemas naturales (Kates et al. 2000; Ortiz Moreno, Malagón García, & Masera Cerutti, 2015).

El auge de este concepto proviene de la publicación del reporte “Nuestro futuro común” de las Naciones Unidas, en el que se definió operacionalmente al desarrollo sustentable como “el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades” (WCED, 1987).

Para algunos autores, es a partir del Informe Brundtland que se acotó el término inglés *sustainable development* como desarrollo sostenible, y de ahí mismo nace la confusión entre si existe o no diferencia alguna entre los términos «desarrollo sostenible» y «desarrollo sustentable». La única diferencia que existe entre desarrollo sostenible y desarrollo sustentable es la traducción al español que se le hizo al término inglés que, en el caso mexicano, se tradujo como desarrollo sostenible y en otros países de habla hispana, como desarrollo sustentable (Zarta, 2018).

Por otro lado, Calvente (2007) establece que la sustentabilidad es la habilidad de lograr una prosperidad económica sostenida en el tiempo, protegiendo al mismo tiempo los sistemas naturales del planeta y proveyendo una alta calidad de vida para las personas.

Adicionalmente, se considera más adecuado el uso de los términos “sustentabilidad ambiental” o simplemente “sustentabilidad”, debido a la polisemia del concepto de sostenibilidad, el cual primero surgió en los países anglosajones como “sustainability” en inglés, e incorpora dos significados diferentes: el primero de ellos traducible como sustentable, implicando la internalización de las condiciones ecológicas en las cuales se soporta el proceso económico; y el otro, traducible como sostenible, refiriéndose a la durabilidad del proceso económico mismo (Gómez, 2014).

El principio fundamental detrás de estos conceptos es aceptar que todos los individuos humanos tienen iguales derechos, ya sea que vivan hoy o en el futuro, por lo tanto, la sostenibilidad puede y será interpretada de manera diferente por diferentes personas, evocando la crítica de que el término “sostenibilidad” podría significar casi cualquier cosa, ya que diferentes generaciones tendrán que afrontar diferentes problemas, y diferentes culturas y circunstancias locales darán diferentes perspectivas sobre estos problemas (Balkema et al., 2002).

Sin embargo, aunque el margen de interpretación que queda demuestra que las ideas sobre sostenibilidad están destinadas discutirse en el tiempo y el lugar, el término “sustentabilidad” ha sufrido transformaciones a lo largo del tiempo hasta llegar al concepto actual, y aunque la sostenibilidad puede ser y será interpretada de manera diferente por diferentes personas, lo que está claro es que involucra tres dimensiones: económica, ambiental y social (WCED, 1987).

La sustentabilidad constituye una prioridad ante la necesidad de desarrollo que no solo involucra a los recursos naturales, sino que también se interrelaciona con aspectos económicos y sociales (González et al., 2020).

Los humedales de tratamiento, al ser considerados como una tecnología ecológica, basado en los principios de las soluciones basadas en la naturaleza, se presentan como una opción ideal que puede aportar valor añadido a la depuración de aguas residuales, promoviendo los servicios ecosistémicos y la circularidad hídrica; su diseño, basado en replicar y optimizar los procesos naturales de los humedales naturales en condiciones controladas, genera beneficios ambientales, económicos y sociales, fomentando el carácter sustentable de estos sistemas (Stefanakis, 2019).

A diferencia de los sistemas de tratamiento convencionales, los humedales de tratamiento no solo cumplen funciones de depuración del agua, si no que proporcionan un conjunto integral de servicios ecosistémicos, como son el control de inundaciones y aguas pluviales, conservación de la biodiversidad, regeneración de hábitats, creación de sitios como áreas verdes, de recreación o laboratorios sociales, lo que los convierte en herramientas clave para fomentar la sustentabilidad (Cid, 2003; Brix et al., 2010; Stefanakis, 2019).

2.2 Indicadores de sustentabilidad

La medición de la sustentabilidad permite establecer qué tan lejos se está en la práctica de ese esquema idealista de desarrollo; además, los indicadores de sustentabilidad constituyen herramientas de decisión que simplifican multicriterios cualitativos. También estos indicadores permiten conocer de manera particularizada las necesidades de manejo de cada sistema (Valarezo et al., 2020).

En la vertiente ambiental, el desarrollo sostenible asume la protección del planeta mediante el consumo y la producción limpia, así como en una gestión sostenible de los recursos naturales, de forma que se garantice el satisfacer las necesidades de las generaciones presentes y futuras (Brundtland,

1987). El cumplir estos lineamientos reta a proponer alternativas de un mejor uso de los recursos naturales, como medio para la protección de los ecosistemas y frenar el daño ambiental (Zitácuaro Contreras, Marín-Muñoz, León Estrada, Vidal Álvarez, & Dos Santos Argueta, 2022).

La sustentabilidad en el contexto de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, debe considerar la implementación de sistemas eficientes, que distribuyan los costos y beneficios, sin afectar el rendimiento del sistema.

Para lograr medir la sustentabilidad, es necesario identificar y evaluar las variables sociales, económicas y ambientales involucradas, mediante metodologías que generen indicadores que permitan analizar y evaluar los componentes involucrados.

2.3 Sistemas de Humedales de tratamiento de aguas residuales

Los humedales de tratamiento (HT), también conocidos como humedales artificiales, humedales construidos o humedales bioingenieriles, son considerados como una tecnología sustentable para el tratamiento de aguas residuales. Esta estrategia se basa en procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en los humedales naturales para la degradación y eliminación de contaminantes, incluyendo aportes de ingeniería, en un ambiente controlado en comparación con los ecosistemas naturales. Esta ecotecnología involucra tres componentes importantes: medios filtrantes porosos, microorganismos y vegetación (hidrófitas). Los HT se utilizan para eliminar contaminantes de aguas pluviales, municipales, industriales y agrícolas con procesos de fitorremediación (Marín-Muñoz et al., 2024).

Su uso se ha incrementado durante los últimos veinte años en todo el mundo, debido principalmente a que proporcionan un tratamiento económico, a que su mantenimiento es fácil, su operación sencilla y a que son amables con el medio ambiente (Rivas, 2021).

Algunas de las ventajas adicionales que pueden aportar los HT es el cultivo de especies de ornato, la producción de plantas que pueden ser utilizadas como materia prima en la fabricación de objetos, como el Tule (*Typha* sp.), además de generar microhábitats para especies de aves o anfibios (Rivas, 2021), y la utilización de estos sitios como áreas verdes (Brix, Koottatep, Fryd & Laugesen, 2011), o áreas experimentales para investigaciones académicas, también conocidos como “laboratorios sociales” (Cid, 2003). Dichos beneficios adicionales contribuyen en que este tipo de sistemas se sigan replicando pues, además del tratamiento del agua, se obtiene un valor agregado.

Los HT, son considerados sistemas alternativos viables ecológica y económicamente, además de ser recomendables para su construcción en comunidades rurales de escasos recursos (Marín-Muñoz, 2016). En México actualmente constituyen el 5.29 % de la infraestructura de tratamiento y su uso va en aumento (Conagua, 2023). Por sus características generales están considerados como una ecotecnología, es decir, que puede considerarse como una

alternativa socio-ecológicas que contribuyen a la sustentabilidad (Ortiz Moreno, Malagón Garía, & Masera Cerutti, 2015).

3. Metodología

El estudio es una investigación documental de publicaciones realizadas en materia de “Evaluación de la Sustentabilidad”, considerando como base los indicadores de sustentabilidad señalados por Molinos-Senante et al. (2014). Para esto se propone ir desarrollando los resultados obtenidos de acuerdo a las dimensiones ambiental, económica y social, lo que permitirá evaluar, comparar y adaptar los parámetros de sustentabilidad en cada eje central. La estructura de la investigación se muestra en la figura 1.

Figura 1. Metodología de la investigación.



Fuente: Elaboración propia.

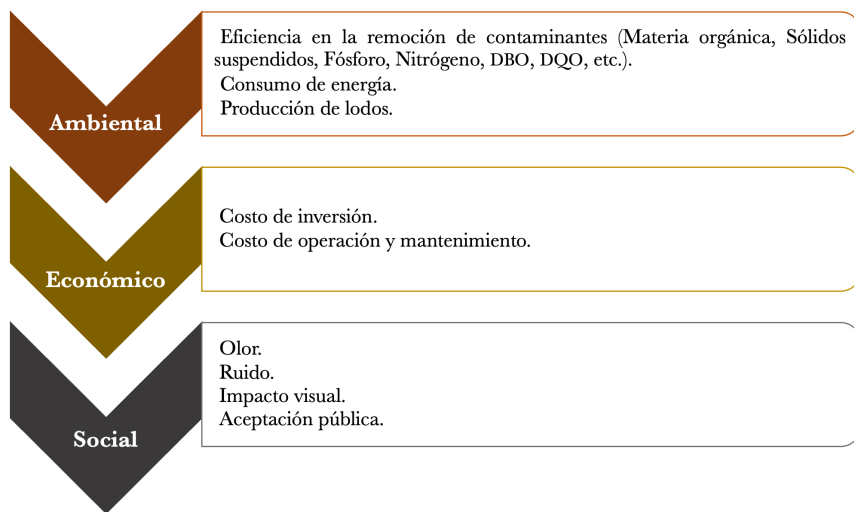
La investigación se realizó considerando la información existente en el portal de Google Académico, Academia.edu, Research Gate, utilizando las palabras clave “evaluación de la sustentabilidad”. Cabe señalar que se consideraron resultados de evaluaciones de sustentabilidad en diferentes tipos de investigaciones, sin limitarse a sistemas de tratamiento de agua residual.

Aplicando este primer criterio, se consideraron publicaciones científicas, artículos de libro, memorias de congreso, entre otros textos, los cuales se fueron depurando según las categorías de análisis.

El proceso de revisión de la información se realizó a través de una técnica de análisis de contenido, revisando inicialmente el título y resumen de las publicaciones seleccionadas, para posteriormente efectuar un análisis de los resultados más relevantes; posteriormente, se recopiló la información obtenida en una base de datos, considerando categorías de clasificación de acuerdo a los diferentes indicadores de sustentabilidad (Ver Figura 2).

Considerando lo anterior, se pudo obtener una sistematización de los resultados con base en indicadores de las categorías de análisis ambiental, económico y social.

Figura 2. Indicadores de sustentabilidad.



Fuente: Elaboración propia.

4. Resultados

4.1 Indicadores ambientales

La primera categoría de análisis de esta investigación, corresponde a los indicadores de tipo ambiental, para lo cual se seleccionaron aquellos que están directamente relacionados con las cuestiones de calidad del agua residual, consumo de energía y generación de lodos; estos indicadores son los que cuentan con más información disponible, ya que la metodología para su análisis es ampliamente conocida, pues se sustenta en cálculos y operaciones aritméticas para estimar porcentajes de remoción de contaminantes, considerando datos de concentraciones de los parámetros a medir en la entrada de agua, y datos de esto mismo a la salida.

Cabe señalar que, para la medición de cada tipo de contaminante, existen metodologías y procesos establecidos, algunos de los cuales se encuentran registrados bajo Normas Mexicanas (NMX-AA-026-SCFI-2010, NMX-AA-029-SCFI-2001, NMX-AA-030/1-SCFI-2012, NMX-AA-030/2-SCFI-2011, NMX-AA-079-SCFI-2001, NMX-AA-099-SCFI-2006), entre otros documentos técnicos publicados, por lo cual se cuenta con información referente a las técnicas para medición de este tipo de parámetros; cabe señalar que el cumplimiento de estas normas es voluntario, resaltando el carácter de responsabilidad ambiental de los generadores. Algunos de los parámetros más medidos incluyen materia orgánica, sólidos suspendidos, fósforo, nitrógeno, DBO, DQO, entre otros.

Considerando lo anterior, para determinar la eficiencia de remoción, es decir, la eficiencia en la eliminación de contaminantes, puede utilizarse la siguiente fórmula, de acuerdo con los resultados o datos de la entrada (influyente) y salida (efluente):

$$E = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} \times 100$$

Donde:

E = Eficiencia de remoción de contaminantes (porcentaje)

C_i = Concentración inicial (influyente)

C_f = Concentración final (efluente)

Con respecto al consumo de energía y producción de lodos, Molinos-Senante et al. (2014), considera estos indicadores como directamente proporcionales al volumen de agua tratada, es decir, a mayor volumen de agua tratada habrá una mayor generación de lodos y un mayor consumo de energía; aunque debe considerarse, que la mayoría de los sistemas de humedales de tratamiento no utilizan energía para su funcionamiento, ya que comúnmente se diseñan para que el agua de entrada llegue por gravedad al HT, por lo cual en algunos de estos sistemas este indicador no es considerado.

Para determinar los valores de estos indicadores, se propone la utilización de la siguiente fórmula:

$$\text{Producción de lodos} = \frac{\text{Kg de lodos}}{\text{m}^3 \text{ de agua tratada}}$$

$$\text{Consumo de energía} = \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3 \text{ de agua tratada}}$$

4.2 Indicadores económicos

El análisis de los indicadores económicos se elaboró con base en los costos de inversión y los costos de operación y mantenimiento, considerando la población atendida con el sistema y el volumen de agua tratada, con la finalidad de obtener información respecto a la relación del costo-beneficio de la implementación de este tipo de sistemas, ya que mucho se ha señalado respecto a que son tecnologías considerados más “económicos” en comparación con otro tipo de sistemas de

tratamiento de aguas residuales, pero poco se ha publicado respecto a datos duros de este aspecto.

Para la medición de estos indicadores, se propone la utilización de las siguientes fórmulas:

$$\text{Indicador económico 1} = \frac{\text{Costo de inversión}}{\text{Población atendida}}$$
$$\text{Indicador económico 2} = \frac{\text{Costo de operación y mantenimiento}}{m^3 \text{ de agua tratada}}$$

Los resultados de estos indicadores podrían aportar información valiosa al momento de tomar decisiones respecto a la selección de sistemas de tratamiento de aguas residuales, considerando que los recursos destinados al tratamiento de las aguas residuales han sido insuficientes, anteponiendo siempre la dotación del recurso —y su red de drenaje— al saneamiento ambiental del agua residual.

4.3 Indicadores Sociales

Los indicadores sociales representan el impacto de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales en la sociedad, por lo cual la valoración de estos indicadores está directamente relacionada con la población en la que se instalan estos sistemas. Con base en la información de la figura 2, se han considerado 4 indicadores de sustentabilidad para el componente social, entre los cuales encontramos olor, ruido, impacto visual y aceptación pública; cabe señalar que la metodología base analizada, cataloga estos indicadores como “cualitativos”, considerando como fuente de información la revisión de literatura y el conocimiento de expertos. En este sentido, y a partir de análisis efectuado, se han encontrado algunas metodologías con las cuales se podría complementar la metodología para evaluación de estos indicadores.

Para el caso del indicador “ruido”, se considera que este parámetro podría ser analizado a través de la utilización de un “sonómetro” o también conocido como “decibelímetro digital”. El sonómetro es un equipo que permite cuantificar objetivamente el nivel de presión sonora. En esencia se compone de un elemento sensor primario (micrófono), circuitos de conversión, manipulación y transmisión de variables (módulo de procesamiento electrónico) y un elemento de presentación o unidad de lectura. Cumpliendo, así, con todos los aspectos funcionales inherentes a un instrumento de medición (Felipe, 2007); así mismo el mercado actual ofrece una amplia variedad de modelos, marcas, que hacen accesible el uso de este tipo de aparatos.

La naturaleza subjetiva de la percepción humana de los olores y la complejidad química de las emisiones odoríferas de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, hacen que la caracterización de los olores sea una tarea difícil (Ramos, 2023). Para la medición del olor, se analizaron metodologías aplicables en otras investigaciones (Vera Puerto et al., 2024; Dincer, Diner, Sari, Ceylan, & Ercan, 2020; Ren, Zhao, Lyczko, & Nzihou, 2019; Giraldo & Lozada, 2019; Ramos-Castellon, 2023). Algunas metodologías referían el uso de mediciones analíticas para caracterizar olores en términos de su composición química, sin embargo, dado que se busca obtener información referente al aspecto social, es decir, al impacto sensorial en los receptores, se propone obtener información de los usuarios o población cercana a los humedales de tratamiento mediante la aplicación de encuestas, las cuales serán cuantificadas a través de una escala de Likert, para obtener información estadística y ponderar los resultados.

Cuadro 1. Indicador: Olor. ¿Como considera que es el olor proveniente del sistema de tratamiento de aguas residuales (humedal)?

Viviendas	Nulo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto
1					
2					
3					
...					

Fuente: Elaboración propia.

Para la medición de impacto visual y la aceptación pública, se analizaron algunas metodologías utilizadas para la evaluación del paisaje, valoración de la calidad y fragilidad visual, estimación del potencial estético, entre otras, enfocadas a la evaluación de la aceptación pública (Fernández, Arcila & García, 2019; Muñoz-Pedrerros, 2004; Solari & Cazorla, 2009; Sala et al., 2022; Vila, 2022). Considerando el carácter social de estos indicadores, al igual que en el apartado anterior, para estos aspectos se considera la aplicación de técnicas cuantitativas para la toma de datos, para lo cual se seleccionó la aplicación de una encuesta en la población en la que operan los humedales de tratamiento.

Cuadro 2. Indicador: Impacto Visual. Visualmente, ¿Como considera el sitio del sistema de tratamiento de aguas residuales? ¿Como un lugar _____?

Viviendas	Feo	Sin interés	Agradable
1			
2			
3			
...			

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 3. Indicador: Aceptación Pública ¿Considera que el sistema de tratamiento de aguas residuales (humedal) es _____ para la población?

Viviendas	Necesario	Innecesario	¿Por qué?
1			
2			
3			
...			

Fuente: Elaboración propia.

Los ejemplos que aquí se describen, pueden ser adaptados según las características que se pretenden evaluar del componente social. Tales puntos deberán considerarse en la aplicación de esta metodología en una investigación experimental, considerando redireccionar los lineamientos propuestos y adaptarlos a cada caso particular.

5. Conclusiones

La selección para implementar un sistema de tratamiento de aguas residuales debe considerar aspectos ambientales, económicos y sociales. Sin embargo, generalmente las metodologías utilizadas para determinar la viabilidad de implementación de un proyecto para tratamiento de aguas residuales se centran en la eficiencia del sistema y en los costos de su construcción, sin considerar los aspectos relacionados al componente social, es decir, a la población en la cual será instalado dicho sistema.

La metodología descrita presenta una propuesta para realizar la evaluación de aspectos económicos, sociales y ambientales, a través de la aplicación de indicadores de sustentabilidad que podría ser aplicable a sistemas de humedales de tratamiento de aguas residuales.

Cada dimensión cuenta con puntos críticos que habrá que considerar de manera particular, siendo la dimensión social la que contó con mayores variables subjetivas, derivadas de opiniones particulares, lo que le confiere un mayor grado de susceptibilidad en sus resultados.

Con lo anterior, es posible generar una evaluación de los diferentes componentes ambientales, económicos y sociales que integran un sistema de humedales de tratamiento, que conduzcan a una selección estratégica y que fomenten la implementación de tecnologías sustentables.

7. Referencias

- Arias, C. A., Vera, I. L., & Chaparro, T. R. (2023). Soluciones basadas en la naturaleza para el tratamiento de aguas residuales. *IWA Publishing*.
- Balkema, A. J., Preisig, H. A., Otterpohl, R., & Lambert, F. J. (2002). Indicators for the sustainability assessment of wastewater treatment systems. *Urban Water*, 4(2), 153-161.
- Brix, H., Koottatep, T., Fryd, O., & Laugesen, C. H. (2011). The flower and the butterfly constructed wetland system at Koh Phi Phi—System design and lessons learned during implementation and operation. *Ecological Engineering*, 37(5), 729-735.
- Brundtland, G. H. (1987). Informe Brundtland. Comisión Mundial para el Medio Ambiente y el Desarrollo de la ONU. Recuperado de http://www.ecominga.uqam.ca/PDF/BIBLIOGRAPHIE/GUIDE_LECTURE_1/CMMAD-Informe-Comision-Brundtland-sobre-Medio-Ambiente-Desarrollo.pdf
- Calvente, A. (2007). El concepto moderno de sustentabilidad (pp. 1-3). UAI-SDS-100-002). Buenos Aires.
- Cid, Óscar. (2003). “Zonas húmedas, espacios educativos. Primera parte: de la educación ambiental en los humedales a la educación ambiental para el uso racional de los humedales.” *Ciclos: cuadernos de comunicación, interpretación y educación ambiental*. 12: 5-8.
- Comisión Nacional del Agua. (2023). Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2023). Estadísticas del Agua en México.
- Dinçer, F., Dinçer, F. K., Sarı, D., Ceylan, Ö., & Ercan, Ö. (2020). Dispersion modeling and air quality measurements to evaluate the odor impact of a wastewater treatment plant in İzmir. *Atmospheric Pollution Research*, 11(12), 2119-2125.

- Dirección General de Normas. (2001). Norma Mexicana NMX-AA-029-SCFI-2001, Análisis de aguas-Determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba. Diario Oficial de la Federación.
- Dirección General de Normas. (2001). Norma Mexicana NMX-AA-079-SCFI-2001, Análisis de aguas-Determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas-Método de prueba. Diario Oficial de la Federación.
- Dirección General de Normas. (2006). Norma Mexicana NMX-AA-099-SCFI-2006, Análisis de Agua-Determinación de nitrógeno de nitritos en aguas naturales y residuales-Métodos de prueba. Diario Oficial de la Federación.
- Dirección General de Normas. (2011). Norma Mexicana NMX-AA-026-SCFI-2010, Análisis de agua-Medición de Nitrógeno Total Kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba. Diario Oficial de la Federación.
- Dirección General de Normas. (2013). NMX-AA-030/1-SCFI-2012, Análisis de Agua-Medición de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.-Método de prueba-parte 1-Método de reflujo abierto. Diario Oficial de la Federación.
- Dirección General de Normas. (2013). Norma Mexicana NMX-AA-030/2-SCFI-2011, Análisis de Agua-Determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba-parte 2-Determinación del índice de la demanda química de oxígeno-Método de tubo sellado a pequeña escala. Diario Oficial de la Federación.
- Felipe S., L. (2007). ¿Cómo elegir un sonómetro? La Habana, Cuba.
- Fernández, A., Arcila, M., & García, J. (2019). Metodología de valoración de impacto visual. aplicación en la playa Del Palmar de Vejer (Cádiz). *Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 23, 141-162.
- Giraldo J., E. A., & Lozada C., D. L. (2019). Origen de los olores en plantas de tratamiento de aguas residuales. Escuela Colombiana de Ingeniería.

- Gómez Contreras, J. L. (2014). Del desarrollo sostenible a la sustentabilidad ambiental. *Revista Facultad de Ciencias Económicas: Investigación y Reflexión*, 22(1), 115-136.
- González Flores, S., Guajardo Hernández, L. G., Almeraya-Quintero, S. X., Pérez-Hernández, L. M., & Sangerman-Jarquín, D. M. (2020). Evaluación de la sustentabilidad del cultivo de maíz en Villaflores y La Trinitaria, Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(7), 1565-1578.
- Kates, Robert W., William C. Clark, Robert Corell, Michael Hall, Carlo C. Jaeger, Ian Lowe & J. James. (2000). Research and Assessment Systems for Sustainability Program Discussion Paper. *Sustainability Science*. 2000: 2000-33.
- Marín-Muñiz, J. L., Zitácuaro-Contreras, I., Ortega-Pineda, G., López-Roldán, A., Vidal-Álvarez, M., Martínez-Aguilar, K. E., ... & Zamora-Castro, S. (2024). Phytoremediation Performance with Ornamental Plants in Monocultures and Polycultures Conditions Using Constructed Wetlands Technology. *Plants*, 13(7), 1051.
- Mebratu, Desta. (1998). Sustainability and Sustainable Development: Historical and Conceptual Review. *Environmental Impact Assessment Review*, 18, n° 6: 493-520.
- Molinos-Senante, M., Gómez, T., Garrido-Baserba, M., Caballero, R., & Sala-Garrido, R. (2014). Assessing the sustainability of small wastewater treatment systems: A composite indicator approach. *Science of the Total Environment*, 497, 607-617.
- Muñoz-Pedrerros, A. (2004). La evaluación del paisaje: una herramienta de gestión ambiental. *Revista Chilena de Historia Natural*, 77(1), 139-156.
- Ortiz Moreno, J. A., Malagón García, S. L., & Masera Cerutti, O. R. (2015). Ecotecnología y sustentabilidad: una aproximación para el Sur global.
- Palma-Cabrera, E. M., Marín-Muñiz, J. L., & Ruelas-Monjardín, L. C. (2022). Limitantes para la adopción de humedales artificiales: estudio de caso con perspectiva de género en Pastorías, Actopan, Veracruz. *Journal of Basic Sciences*, 8(23), 170-178.

- Ramos-Castellón, B. (2023). Evaluación de medidas de mitigación de olores en un tanque de homogeneización de la PTAR de la UCR finca 2, sede Rodrigo Facio.
- Ren, B., Zhao, Y., Lyczko, N., & Nzihou, A. (2019). Current status and outlook of odor removal technologies in wastewater treatment plant. *Waste and Biomass Valorization*, 10, 1443-1458.
- Rivas, A.H. (2021). Reflexiones sobre las causas que limitan el uso de humedales de tratamiento en México. *Perspectivas IMTA*. N. 09. DOI: doi.org/10.24850/b-imta-perspectivas-2021-09
- Rojas, R. (2002). Sistemas de tratamiento de aguas residuales. *Gestión integral de tratamiento de aguas residuales*, 1(1), 8-15. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. OMS.
- Sala, R., Germán, S., Alonso-García, M. C., García-Rosillo, F., Gómez, R., Garrain, D., ... & Mejuto, E. Aceptación pública de los módulos fotovoltaicos. Una revisión de la literatura. In *CIES 2022-XVIII Congreso Ibérico y XIV Congreso Iberoamericano de Energía Solar*, p. 287.
- Solari, F. A., & Cazorla, L. (2009). Valoración de la calidad y fragilidad visual del paisaje. *Cuadernos del Centro de Estudios en Diseño y Comunicación. Ensayos*, (30), 213-226.
- Stefanakis, A. I. (2019). The role of constructed wetlands as green infrastructure for sustainable urban water management. *Sustainability*, 11(24), 69-81.
- Valarezo Beltrón, C. O., Julca-Otiniano, A., & Rodríguez Berrío, A. (2020). Evaluación de la sustentabilidad de fincas productoras de limón en Portoviejo, Ecuador. *Rivar (Santiago)*, 7(20), 108-120.
- Vera-Puerto, I. L., Sarkar, S., Moris, G., Valdés, H., Quiroz, M., López, J., ... & Arias, C. A. (2024). First report of components responsible for odor sensation from a vertical flow constructed wetland treating combined sewer overflow. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 10(9), 2013-2019.

- Vila T., S. (2022). La reutilización de aguas residuales: factores psicológicos para su aceptación pública. Doctoral dissertation, Universidade de Santiago de Compostela.
- WCED, S. W. S. (1987). World commission on environment and development. *Our common future*, 17(1), 1-91.
- Zarta Ávila, P. (2018). La sustentabilidad o sostenibilidad: un concepto poderoso para la humanidad. *Tabula Rasa*, (28), 409-423. Doi: <https://doi.org/10.25058/20112742.n28.18>
- Zitácuaro Contreras, I.; Marín-Muñiz, J. Luis; León Estrada, Xochitl del Alba; Vidal Álvarez, Monserrat; Dos Santos Argueta, Lourdes Brazil. 2022. *Sostenibilidad, Ambiente y Sociedad*, 381.



Esta obra fue editada por El Colegio de Veracruz y
publicada en el mes de agosto de 2026, en la ciudad de
Xalapa de Enríquez, Veracruz, México.

SUSTENTABILIDAD EN PLURAL: DIVERSAS DIMENSIONES Y PERSPECTIVAS



El Desarrollo Regional Sustentable se distingue por su carácter multidisciplinario y por la complejidad de los fenómenos socioambientales que estudia. Esta diversidad permite construir visiones más amplias y completas, al tiempo que plantea importantes desafíos para el diálogo entre distintas disciplinas, enfoques y métodos.

Este libro reúne una selección de investigaciones académicas desarrolladas en el marco del Doctorado en Desarrollo Regional Sustentable de El Colegio de Veracruz. Sus capítulos conforman un caleidoscopio temático que permite acercarse a distintos tópicos vinculados con la sustentabilidad, el territorio, la agroecología y el manejo de los recursos naturales.

A partir de investigaciones rigurosas, la obra aborda temas como las redes alimentarias alternativas y la agroecología; la percepción social de una reserva ecológica; la actividad alfarera; los sistemas territoriales periurbanos; el aprovechamiento de diversos residuos en procesos agrícolas; y el tratamiento de aguas residuales mediante humedales construidos y el análisis de indicadores de sustentabilidad.

Las experiencias de investigación aquí contenidas contribuyen al acervo de conocimientos e información relacionados con la sustentabilidad y abren posibilidades para reflexionar sobre la necesidad de seguir investigando alternativas y caminos que permitan mejorar la calidad de vida colectiva y legar un mundo mejor a las generaciones futuras.