

Bioecotecnología como Enfoque Integrador para el Desarrollo Comunitario Sustentable: Revisión Bibliográfica y Propuesta Conceptual

Sergio Reyes-Rosas ^{1,3,*}, Rubén Daniel Hernández-Cruz ¹, Luis Alfredo Hernández-Vásquez ¹, Mauricio Rojas-Ascensión ¹, Gregorio Hernández-Salinas ², Alejandro Alvarado Lassman ³, Óscar Marín Peña ⁴

¹ Laboratorio de BioEcoTecnología, Ingeniería en Desarrollo Comunitario, Instituto Tecnológico Superior de Zongolica, Veracruz, México

² Ingeniería en Innovación Agrícola Sustentable, Instituto Tecnológico Superior de Zongolica, Veracruz, México

³ División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba, Av. Oriente 9, 852. Col. Emiliano Zapata Orizaba, Veracruz C.P. 94320, México

⁴ Estancia Posdoctoral SECIHTI (Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación), Tecnológico Nacional de México/ITSde Misantla, Km 1.8 Carretera a Loma del Cojolite, Misantla 93821, Veracruz, México

* Autor de correspondencia: sergio_reyes_pd0225@zongolica.tecnm.mx

Desarrollo Sustentable (Ecotecnologías y Desarrollo Comunitario Sustentable)

Recibido: 10 de julio de 2026 Aceptado: 20 de septiembre de 2026 Publicado: 19 de octubre de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i2.732>

Resumen: La atención de problemáticas ambientales y productivas en comunidades rurales y periurbanas requiere enfoques integradores que articulen conocimiento científico, recursos locales y tecnologías apropiadas. Aunque la biotecnología ambiental, la ecotecnología, la agroecología y la economía circular son campos consolidados, el término bioecotecnología presenta usos previos, sin delimitación conceptual unificada orientada al desarrollo comunitario sustentable. El objetivo fue analizar fundamentos, aplicaciones y convergencias entre estos campos y antecedentes de uso del término, para proponer la bioecotecnología como enfoque integrador. Se realizó una revisión bibliográfica analítico-conceptual basada en 23 artículos científicos publicados entre 2015 y 2025 e identificados mediante Scopus, complementada con dos fuentes institucionales. La literatura analizada permitió identificar humedales artificiales, digestión anaerobia, cultivo de hongos comestibles y manejo agroecológico de semillas como ejemplos de aplicación potencial del enfoque propuesto. Se proponen criterios de integración biológica, ecológica y tecnológica, adaptación territorial, participación comunitaria y evaluación de beneficios ambientales, productivos y sociales.

Palabras clave: bioecotecnología, desarrollo comunitario sustentable, ecotecnología, economía circular, tecnologías apropiadas

Bioecotechnology as an Integrative Approach for Sustainable Community Development: A Literature Review and Conceptual Proposal

Abstract: Addressing environmental and productive challenges in rural and peri-urban communities requires integrative approaches that bring together scientific knowledge, local resources, and appropriate technologies. Although environmental biotechnology, ecotechnology, agroecology, and the circular economy are established fields, the term bioecotechnology has been used previously but lacks a unified conceptual definition oriented toward sustainable community development. This study aimed to analyze the foundations, applications, and convergences among these fields, as well as previous uses of the term, to propose bioecotechnology as an integrative approach. An analytical-conceptual literature review was conducted based on 23 scientific articles published between 2015 and 2025 and identified through Scopus, complemented by two institutional sources. The literature analyzed identified constructed wetlands, anaerobic digestion, edible mushroom cultivation, and agroecological seed management as potential application areas of the proposed approach. Criteria are proposed for integrating biological, ecological, and technological processes, territorial adaptation, community participation, and the evaluation of environmental, productive, and social benefits.

Keywords: bioecotechnology, sustainable community development, ecotechnology, circular economy, appropriate technologies

Introducción

Los desafíos ambientales y productivos presentes en comunidades rurales y periurbanas requieren enfoques capaces de integrar soluciones sustentables, de bajo impacto y adaptadas a las condiciones territoriales. Problemáticas como el manejo inadecuado de aguas residuales, la acumulación de residuos agropecuarios, el desaprovechamiento de biomasa lignocelulósica, la pérdida de semillas nativas y la limitada transferencia de tecnologías apropiadas demandan estrategias que articulen conocimiento científico, recursos locales y participación comunitaria. En este contexto, diferentes campos de estudio han aportado fundamentos relevantes para la sustentabilidad, entre ellos la ecotecnología, la biotecnología ambiental, la agroecología, la economía circular y las tecnologías apropiadas.

La ecotecnología se ha desarrollado como un campo interdisciplinario orientado a la aplicación de tecnologías para la gestión ambiental y socioecológica sustentable; sin embargo, continúa siendo un concepto amplio y en proceso de delimitación teórica (Ruiz-Sánchez *et al.*, 2024). De manera complementaria, la economía circular plantea la necesidad de reducir el consumo de recursos y cerrar ciclos materiales mediante estrategias de reutilización, reciclaje y valorización de residuos (Geissdoerfer *et al.*, 2017). A su vez, la agroecología ha demostrado potencial para fortalecer la seguridad alimentaria y nutricional mediante prácticas basadas en diversificación productiva, uso de enmiendas orgánicas, integración agrícola-pecuaria y recuperación de saberes locales (Bezner Kerr *et al.*, 2021). Estos enfoques comparten principios relacionados con la sustentabilidad, el aprovechamiento de recursos y la interacción entre sistemas naturales y productivos, pero frecuentemente se abordan de manera diferenciada en la literatura científica.

En términos de aplicación, la evidencia reciente muestra que tecnologías como los humedales artificiales pueden contribuir al tratamiento descentralizado y reúso de aguas residuales mediante procesos naturales de remoción de contaminantes (Biswal & Balasubramanian, 2022). Asimismo, la digestión anaerobia permite valorizar residuos agropecuarios mediante la producción de biogás y digestato, contribuyendo a la recuperación de energía y nutrientes (Kovačić *et al.*, 2022). Por otra parte, el cultivo de *Pleurotus ostreatus* sobre residuos lignocelulósicos representa una alternativa para transformar biomasa agrícola en alimento y subproductos aprovechables (Sözbir *et al.*, 2015; Zárate-Salazar *et al.*, 2020), mientras que el manejo agroecológico de semillas nativas contribuye a la conservación de la agrobiodiversidad, la soberanía alimentaria y el fortalecimiento de la agricultura local (Monroy-Sais *et al.*, 2024).

En este marco, la búsqueda bibliográfica permitió identificar usos puntuales de los términos “bioecotecnología”, “bioecotecnologia”, “bioecotechnology” y “биоэкотехнология” en contextos académicos, formativos e institucionales. Entre ellos se encuentran propuestas educativas de Satbayev University, donde la bioecotechnology se aborda como aplicación de conocimientos biológicos, químicos e ingenieriles para atender problemas ambientales y productivos (Satbayev University, 2020), así como iniciativas de investigación formativa como el Semillero de Investigación Bioecotecnología y Desarrollo Sostenible (BIOINDES) de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia de Colombia, orientado a la articulación de bioeconomía, ecotecnologías, sostenibilidad y fortalecimiento de comunidades (Universidad Nacional Abierta y a Distancia, 2024). Estos antecedentes evidencian que el término no es completamente inédito; sin embargo, los usos localizados presentan alcances heterogéneos y no permiten identificar una delimitación conceptual unificada que establezca criterios para su aplicación como enfoque integrador del desarrollo comunitario sustentable.

A partir de esta revisión, en el presente trabajo se propone delimitar conceptualmente la bioecotecnología como un enfoque integrador que articula procesos biológicos y ecológicos con tecnologías apropiadas, criterios de circularidad, adaptación territorial y participación comunitaria para el diseño, adaptación y aplicación de soluciones sustentables. Desde esta perspectiva, la bioecotecnología no se plantea como una tecnología específica ni como sustituto de campos consolidados, sino como un marco de articulación que permite relacionar conocimientos y prácticas provenientes de la biotecnología ambiental, la ecotecnología, la agroecología, la economía circular y las tecnologías apropiadas. Su aplicación puede expresarse en ámbitos como el tratamiento de aguas residuales, la valorización de residuos orgánicos, el aprovechamiento de biomasa, la producción de bioinsumos, el manejo de semillas y la transferencia tecnológica con pertinencia territorial.

Por lo anterior, el objetivo de esta revisión bibliográfica fue analizar los fundamentos, aplicaciones y convergencias entre biotecnología ambiental, ecotecnología, agroecología, economía circular, tecnologías apropiadas y desarrollo comunitario sustentable, así como examinar los usos previos del término bioecotecnología, con el propósito de proponer una delimitación conceptual de este enfoque para atender problemáticas ambientales y productivas en comunidades rurales y periurbanas. Esta propuesta busca contribuir a la construcción de un marco de análisis útil para la formación académica, la investigación aplicada y la transferencia de soluciones sustentables con pertinencia territorial.

Materiales y Métodos

El presente trabajo se desarrolló como una revisión bibliográfica de carácter analítico-conceptual, orientada a identificar y articular fundamentos científicos para delimitar la bioecotecnología como un enfoque integrador para el desarrollo comunitario sustentable. La búsqueda de literatura científica se realizó en Scopus durante junio de 2026,

considerando publicaciones del periodo 2015–2025. Se emplearon combinaciones de términos relacionados con ecotecnología, biotecnología ambiental, economía circular, agroecología, tecnologías apropiadas, tratamiento de aguas residuales, valorización de residuos, biomasa lignocelulósica, semillas y desarrollo comunitario sustentable.

Los registros recuperados fueron revisados inicialmente por título y resumen y, posteriormente, mediante la consulta del texto completo, seleccionándose 23 artículos científicos que cumplieron los criterios establecidos de pertinencia temática, periodo de publicación y disponibilidad de fundamentos teóricos, evidencia experimental o revisiones científicas relacionadas con los ejes de análisis. Los trabajos seleccionados se organizaron en seis ejes: fundamentos conceptuales; tratamiento descentralizado de aguas residuales; valorización de residuos agropecuarios; aprovechamiento de biomasa lignocelulósica; manejo agroecológico de semillas; y formación, innovación y transferencia de conocimiento.

De manera complementaria, se realizó una búsqueda específica de antecedentes de uso del término “bioecotecnología” y sus variantes bioecotecnología, bioecotechnology y bio-ecotechnology, mediante la cual se identificaron dos fuentes institucionales, utilizadas exclusivamente para documentar usos previos del término. La información obtenida fue sometida a una síntesis cualitativa y comparativa, contrastando los principales campos relacionados con la propuesta y sus posibilidades, requerimientos y limitaciones de aplicación.

Finalmente, a partir de la integración de la literatura se formularon seis criterios propuestos por los autores para delimitar la bioecotecnología: integración de procesos biológicos o ecológicos; adaptación tecnológica de bajo impacto; valorización y recirculación de recursos; pertinencia territorial; participación y apropiación local; y evaluación de beneficios ambientales, productivos y sociales. Estos criterios sustentaron la construcción de la propuesta conceptual presentada en los Resultados y Discusión.

Resultados y Discusión

Fundamentos conceptuales para proponer la bioecotecnología como enfoque integrador

La bioecotecnología se propone en esta revisión como un enfoque integrador en proceso de delimitación conceptual, orientado a articular conocimientos, procesos y herramientas provenientes de la biotecnología, la ecotecnología, la agroecología, la economía circular y las tecnologías apropiadas, con el propósito de atender problemáticas ambientales y productivas en contextos comunitarios. La propuesta parte del reconocimiento de que estos campos poseen desarrollos conceptuales y aplicaciones consolidadas, pero con frecuencia se estudian de manera diferenciada. En consecuencia, la bioecotecnología no se plantea como una disciplina cerrada ni como sustituto de dichos campos, sino como una categoría articuladora que permite relacionar procesos biológicos y ecológicos con tecnologías sustentables, aprovechamiento de recursos, adaptación territorial y apropiación comunitaria.

La búsqueda de antecedentes específicos mostró que el término bioecotecnología no es completamente inédito. Se identificaron usos puntuales de bioecotechnology y биоэкотехнология en contextos académicos, particularmente en Satbayev University, donde la bioecotechnology se incorpora en programas de formación relacionados con la ingeniería bioecológica. En uno de sus programas, el término se utiliza para abordar la aplicación de la biotecnología en la solución de problemas ambientales mediante la combinación de conocimientos químicos, biológicos e ingenieriles, incluyendo el tratamiento biológico de agua, suelo y residuos (Satbayev University, 2020). Asimismo, la Universidad Nacional Abierta y a Distancia de Colombia registra desde 2024 el Semillero de Investigación Bioecotecnología y Desarrollo Sostenible (BIOINDES), cuya orientación vincula la bioeconomía, las ecotecnologías, la sostenibilidad, la investigación aplicada y el fortalecimiento de comunidades (Universidad Nacional Abierta y a Distancia, 2024).

Estos antecedentes son relevantes porque muestran que la palabra y algunas aproximaciones al término ya han sido utilizadas, particularmente para describir la relación entre biotecnología, ambiente, tecnología y sostenibilidad. Sin embargo, los usos identificados presentan alcances diferentes: mientras que en Satbayev University el término se encuentra asociado principalmente con la aplicación de la biotecnología a problemas ambientales y productivos, en el caso de BIOINDES se relaciona con bioeconomía, ecotecnologías, sostenibilidad y comunidades. Por ello, los antecedentes localizados no permiten identificar una delimitación conceptual unificada que establezca criterios comunes para reconocer la bioecotecnología como un enfoque orientado específicamente al desarrollo comunitario

sustentable. En este trabajo, por tanto, la aportación no consiste en atribuir novedad al término, sino en proponer una articulación conceptual explícita y sistematizada de sus dimensiones y criterios de aplicación.

Desde el campo de la ecotecnología, Ruiz-Sánchez et al. (2024) señalan que este ámbito se relaciona con la aplicación estratégica de la tecnología en la gestión de ecosistemas, así como con la construcción de estrategias socioambientales sustentables. Los autores destacan que la ecotecnología continúa siendo un campo amplio, interdisciplinario y aún en proceso de delimitación conceptual. Este antecedente resulta particularmente relevante porque permite reconocer a la ecotecnología como uno de los campos de referencia de la propuesta, pero también evidencia la necesidad de establecer con claridad los elementos que diferencian una categoría integradora de la simple agrupación de tecnologías. Bajo esta lógica, la bioecotecnología enfatiza la interacción entre procesos biológicos, funciones ecológicas y herramientas tecnológicas, con aplicaciones orientadas al agua, los residuos orgánicos, la producción de alimentos y la agricultura local.

La economía circular constituye otro fundamento relevante para esta propuesta, debido a que plantea la necesidad de reducir la entrada de recursos, minimizar residuos, emisiones y pérdidas de energía mediante el cierre, la reducción y la prolongación de ciclos materiales y energéticos. Geissdoerfer et al. (2017) definen la economía circular como un sistema regenerativo en el que se minimizan los residuos y las fugas de energía mediante estrategias de reutilización, reciclaje, reparación, remanufactura y cierre de ciclos. Desde esta perspectiva, la bioecotecnología incorpora el principio de valorización y recirculación de recursos en el territorio, de manera que los residuos agropecuarios, lignocelulósicos y orgánicos puedan dejar de concebirse exclusivamente como desechos y convertirse en insumos para la producción de biofertilizantes, biogás, hongos comestibles, compostas, sustratos o mejoradores del suelo. La circularidad, por tanto, constituye un criterio transversal de la propuesta y no una tecnología en sí misma.

Asimismo, la agroecología aporta una base esencial para vincular la dimensión técnica con las dimensiones social, productiva y alimentaria. Bezner Kerr et al. (2021) documentaron que las prácticas agroecológicas, como la diversificación de cultivos, el uso de enmiendas orgánicas, la agroforestería, la integración agrícola-pecuaria y el fortalecimiento de redes campesinas, pueden contribuir positivamente a la seguridad alimentaria y nutricional. Estos elementos son relevantes para la propuesta de bioecotecnología, ya que permiten incorporar el manejo agroecológico de semillas, la conservación de recursos fitogenéticos, el uso de bioinsumos y la recuperación de saberes locales como componentes de una estrategia sustentable más amplia. En este sentido, la dimensión biológica y ecológica de la propuesta no se limita al funcionamiento de los sistemas tecnológicos, sino que también comprende su relación con los sistemas productivos y alimentarios locales.

Por otra parte, las tecnologías apropiadas permiten sustentar la pertinencia comunitaria de la bioecotecnología. Patnaik y Bhowmick (2019) señalan que la tecnología apropiada debe analizarse dentro de paisajes sociotécnicos cambiantes, particularmente en países emergentes donde persisten desigualdades, necesidades básicas no resueltas y limitaciones de acceso a tecnologías convencionales. Desde esta perspectiva, una solución bioecotecnológica no debe evaluarse únicamente por su eficiencia técnica, sino también por su adaptabilidad territorial, viabilidad económica, simplicidad operativa, mantenimiento local, aceptación y apropiación por parte de los usuarios. Así, sistemas como humedales artificiales, biodigestores, módulos de cultivo de hongos comestibles y estrategias de manejo de semillas pueden constituir expresiones bioecotecnológicas cuando, además de utilizar procesos biológicos o ecológicos, se diseñan o adaptan de acuerdo con las condiciones ambientales, productivas y sociales del territorio.

La integración de estos fundamentos permite identificar que la bioecotecnología requiere criterios de delimitación que vayan más allá de la presencia aislada de una tecnología biológica o ambiental. En esta propuesta se consideran como elementos articuladores: a) el aprovechamiento de procesos biológicos y ecológicos; b) la aplicación o adaptación de tecnologías de bajo impacto; c) la valorización y recirculación de recursos; d) la adaptación a condiciones territoriales específicas; e) la participación y apropiación comunitaria; y f) la generación de beneficios ambientales, productivos o sociales verificables. Estos criterios no pretenden establecer una definición normativa definitiva, sino proporcionar una primera estructura analítica para diferenciar la bioecotecnología de la simple aplicación independiente de tecnologías ambientales, prácticas agroecológicas o procesos biotecnológicos.

Con base en estos fundamentos y criterios, en este artículo se propone definir la bioecotecnología como un enfoque integrador que articula procesos biológicos, ecológicos y tecnológicos, bajo principios de circularidad, adaptación

territorial y apropiación comunitaria, para el diseño, adaptación y aplicación de soluciones sustentables orientadas a atender problemáticas ambientales y productivas. Dentro de este marco pueden incluirse, entre otras, soluciones para el tratamiento descentralizado de aguas residuales, la valorización de residuos orgánicos, el aprovechamiento de biomasa lignocelulósica, la producción de bioinsumos y el fortalecimiento de sistemas agrícolas locales. Esta definición busca diferenciar la bioecotecnología tanto de una tecnología específica como de una simple suma de disciplinas, al establecer condiciones de articulación entre sus componentes.

Desde esta perspectiva, la bioecotecnología puede entenderse como un puente conceptual entre la innovación ambiental y el desarrollo comunitario, en el que la eficiencia técnica debe coexistir con la pertinencia territorial, la circularidad de recursos, la conservación de los sistemas productivos y la capacidad de apropiación local. La Tabla 1 sintetiza las principales convergencias conceptuales que fundamentan esta propuesta, destacando los aportes de distintos campos disciplinarios y su posible contribución a soluciones sustentables orientadas al desarrollo comunitario.

Tabla 1. Convergencias conceptuales que sustentan la propuesta de bioecotecnología

Campo de referencia	Aporte conceptual a la bioecotecnología	Aplicación dentro del enfoque bioecotecnológico
Ecotecnología	Aplicación estratégica de tecnologías para la gestión ambiental y socioecológica sustentable.	Humedales artificiales, sistemas naturales de tratamiento, tecnologías de bajo impacto.
Biotecnología ambiental	Uso de organismos, microorganismos y procesos biológicos para transformar contaminantes, residuos o biomasa.	Tratamiento biológico de aguas, digestión anaerobia, producción de bioinsumos y degradación de residuos orgánicos.
Economía circular	Cierre de ciclos materiales y energéticos mediante reducción, reutilización, reciclaje y valorización de residuos.	Conversión de residuos agropecuarios y lignocelulósicos en biogás, digestato, compost, sustratos y alimentos.
Agroecología	Integración de principios ecológicos y sociales en sistemas agrícolas sustentables.	Manejo de semillas nativas, biofertilizantes, diversificación productiva y fortalecimiento de agricultura local.
Tecnologías apropiadas	Diseño de soluciones de bajo costo, adaptables, mantenibles y socialmente pertinentes.	Sistemas comunitarios de saneamiento, biodigestores, cultivo de hongos y módulos demostrativos adaptados al territorio.
Desarrollo comunitario sustentable	Articulación de capacidades locales, bienestar social, sustentabilidad ambiental y aprovechamiento territorial.	Transferencia tecnológica, apropiación social, formación práctica y solución de problemáticas ambientales locales.

Por lo tanto, la bioecotecnología puede considerarse una propuesta conceptual en construcción para organizar y relacionar alternativas sustentables que, aunque provienen de campos distintos, presentan puntos de convergencia en el uso de procesos biológicos y ecológicos, el aprovechamiento de recursos, la reducción de impactos ambientales, la generación de valor y la adaptación a condiciones territoriales. Su valor no radica únicamente en agrupar tecnologías, sino en proporcionar un marco de análisis mediante el cual pueda evaluarse la articulación entre tecnología, procesos naturales, circularidad, territorio y comunidad. En este sentido, la propuesta constituye una base conceptual susceptible de ser contrastada y refinada mediante futuras investigaciones aplicadas y estudios de implementación en diferentes contextos comunitarios.

Tratamiento descentralizado de aguas residuales mediante humedales artificiales

El tratamiento descentralizado de aguas residuales mediante humedales artificiales constituye una alternativa pertinente para comunidades rurales y periurbanas con limitada infraestructura sanitaria, debido a que estos sistemas emplean procesos físicos, químicos y biológicos para remover contaminantes con bajo consumo energético. Desde el enfoque bioecotecnológico, los humedales artificiales integran sustratos, vegetación macrófita y comunidades microbianas para depurar aguas residuales domésticas, agropecuarias o de pequeña escala productiva. Hernández-

Vasquez et al. (2026) señalan que estos sistemas utilizan plantas, microorganismos y sustratos naturales para remover sólidos suspendidos, materia orgánica, nutrientes, metales y contaminantes microbianos, lo que los posiciona como soluciones basadas en la naturaleza para recuperación y reúso del agua.

La evidencia cuantitativa reportada muestra que su desempeño puede ser considerable, aunque depende del tipo de humedal, carga contaminante, tiempo de retención hidráulica, temperatura, sustrato y especie vegetal. En la revisión de Biswal y Balasubramanian (2022), se documentan sistemas con remociones cercanas al 100 % de nitrógeno y entre 94 y 100 % de fósforo en humedales alimentados con aguas salinas bajo ciertas condiciones experimentales; asimismo, se reportan remociones de 35–60 % de nitrógeno total y 77–80 % de DQO en sistemas verticales de laboratorio después de 23 días de operación. Estos datos permiten mostrar que los humedales no solo son tecnologías ecológicas, sino sistemas con capacidad medible para reducir cargas contaminantes relevantes.

En términos de configuración, los humedales de flujo subsuperficial horizontal suelen favorecer procesos de filtración, sedimentación y desnitrificación, mientras que los de flujo vertical incrementan la transferencia de oxígeno y pueden favorecer la nitrificación. Los sistemas híbridos combinan ambas condiciones y, por tanto, pueden mejorar la remoción integral de materia orgánica y nutrientes. Hernández-Vasquez et al. (2026) indican que los humedales subsuperficiales e híbridos son efectivos para remover contaminantes químicos y microbianos, mientras que parámetros como baja carga hidráulica, mayor tiempo de retención y condiciones de mayor oxigenación favorecen el desempeño del sistema.

Desde una perspectiva comunitaria, los humedales artificiales son relevantes porque permiten integrar saneamiento, reúso del agua y educación ambiental en sistemas de bajo mantenimiento. Sin embargo, su aplicación debe considerar limitaciones como requerimiento de área, riesgo de colmatación, necesidad de pretratamiento, variabilidad climática y selección adecuada de especies vegetales. Por ello, su incorporación dentro de la bioecotecnología debe entenderse como una estrategia técnicamente evaluable y territorialmente adaptable, no como una solución universal.

Valorización de residuos agropecuarios y producción de bioinsumos

La valorización de residuos agropecuarios constituye una línea clave de la bioecotecnología porque transforma residuos orgánicos en productos de valor ambiental, energético y agrícola. En este campo, la digestión anaerobia permite convertir estiércoles, residuos agrícolas y efluentes orgánicos en biogás y digestato, reduciendo la carga contaminante y recuperando energía y nutrientes. Alengebawy et al. (2024) describen la digestión anaerobia de residuos agrícolas como una estrategia para mitigar la acumulación de residuos, fortalecer la seguridad energética y reducir emisiones de gases de efecto invernadero dentro de una economía circular.

El biogás generado durante la digestión anaerobia contiene principalmente metano y dióxido de carbono, además de componentes menores como nitrógeno, oxígeno, compuestos sulfurados, amoníaco, siloxanos y compuestos orgánicos volátiles. Calbry-Muzyka et al. (2022), mediante una compilación de literatura, datos de planta y muestreos en cinco digestores anaerobios en Suiza, reportaron que los compuestos sulfurados, especialmente H_2S y otros compuestos de azufre, representan un reto importante para el uso energético del biogás; incluso indicaron que la suma de compuestos sulfurados distintos al H_2S puede superar 0.5 ppmv. Este tipo de datos es importante porque muestra que la valorización energética requiere no solo producir biogás, sino también evaluar su composición y posibles necesidades de purificación.

Además del biogás, el digestato representa un producto central en la valorización de residuos agropecuarios. Kovačić et al. (2022) señalan que el digestato es una fuente rica en nitrógeno, fósforo, potasio, azufre, micronutrientes y materia orgánica, por lo que puede estimular la actividad microbiana del suelo y mejorar su función ecosistémica si se estabiliza adecuadamente. Sin embargo, Chojnacka y Moustakas (2024) advierten que el digestato sin procesar puede presentar riesgos ambientales y de seguridad, incluyendo emisiones de gases de efecto invernadero y posible contaminación del suelo, por lo que recomiendan procesos de acondicionamiento y manejo para mejorar su calidad antes de la aplicación agrícola.

Martín-Sanz-Garrido et al. (2025) analizaron el digestato mediante una revisión enfocada en su composición, tecnologías de tratamiento, eficiencia fertilizante y análisis de ciclo de vida. Los autores destacan que procesos como el compostaje y la separación sólido-líquido mejoran la estabilidad y el rendimiento agronómico de este subproducto,

aunque advierten que la heterogeneidad de los sustratos, unidades y límites del sistema dificulta la comparación entre estudios.

Por lo anterior, estos datos permiten interpretar que la valorización de residuos agropecuarios no debe limitarse a la instalación de biodigestores, sino que requiere un sistema de gestión integral. La producción de biogás aporta un componente energético, mientras que el digestato, biol, biosólidos o compost pueden funcionar como bioinsumos agrícolas si cumplen criterios de estabilidad, inocuidad y calidad nutricional. Por ello, dentro de la bioecotecnología, esta línea articula recuperación de energía, reciclaje de nutrientes, reducción de residuos y fortalecimiento de la fertilidad del suelo.

Aprovechamiento de residuos lignocelulósicos mediante hongos comestibles

El aprovechamiento de residuos lignocelulósicos mediante hongos comestibles constituye una línea bioecotecnológica relevante porque permite transformar biomasa agrícola de bajo valor, como rastrojo de maíz, paja de arroz, cascarillas, bagazo, aserrín o residuos de café, en alimento y subproductos aprovechables. En particular, *Pleurotus ostreatus* ha sido ampliamente estudiado por su capacidad para crecer sobre materiales ricos en celulosa, hemicelulosa y lignina, lo que permite reducir la acumulación de residuos agrícolas y generar biomasa fúngica con valor nutricional y económico.

La eficiencia del proceso depende directamente de la composición del sustrato, la relación carbono/nitrógeno, el pretratamiento, la humedad, la cepa utilizada y las condiciones de incubación. Sözbir et al. (2015) evaluaron cáscara de semilla de algodón, cáscara de nuez y aserrín de encino como sustratos para *P. ostreatus*, reportando que la mezcla de 25 % aserrín de encino y 75 % cáscara de semilla de algodón presentó el mayor rendimiento y la mayor eficiencia biológica; además, señalaron que el incremento en el contenido de nitrógeno del sustrato favoreció la productividad del hongo.

En residuos agrícolas de mayor pertinencia para comunidades rurales productoras de maíz, Zárate-Salazar et al. (2020) compararon rastrojo de maíz y paja de arroz como sustratos para *P. ostreatus*. Los autores reportaron que las cepas cultivadas en rastrojo de maíz alcanzaron 93.93 % de eficiencia biológica y una tasa de producción de 2.07 %, valores superiores a los obtenidos con paja de arroz; además, indicaron que una de las cepas presentó mayor precocidad, con aproximadamente 10 días para la cosecha. Estos datos son relevantes porque muestran que los residuos de maíz pueden convertirse en una matriz productiva para generar alimento, reducir residuos y diversificar actividades económicas locales.

La evidencia reciente también confirma que *P. ostreatus* puede modificar estructuralmente diferentes residuos lignocelulósicos durante su crecimiento. Akcay et al. (2023) cultivaron hongo ostra en materiales como ramas y cáscara de avellana, paja de trigo, cascarilla de arroz y residuos de café, y analizaron los cambios en la biomasa mediante FTIR. Este tipo de estudios permite interpretar el cultivo de hongos no solo como una práctica productiva, sino como un proceso biológico de conversión de biomasa residual en productos de mayor valor.

Desde la perspectiva bioecotecnológica, el cultivo de hongos comestibles integra tres beneficios: reduce residuos lignocelulósicos, genera biomasa alimentaria y produce sustrato agotado que puede reincorporarse a procesos de compostaje o mejoramiento de suelos. No obstante, su implementación requiere controlar la calidad del inóculo, la pasteurización del sustrato, la humedad, la temperatura, la ventilación y la inocuidad del proceso. Por ello, su adopción en contextos comunitarios debe acompañarse de capacitación técnica y evaluación de sustratos locales.

Manejo agroecológico de semillas y fortalecimiento de la agricultura local

El manejo agroecológico de semillas es un componente estratégico para fortalecer la agricultura local, debido a que las semillas nativas y criollas no solo representan material genético, sino también memoria biocultural, adaptación territorial y autonomía productiva. Desde el enfoque bioecotecnológico, el estudio de semillas puede integrar pruebas de germinación, vigor, sanidad, conservación, respuesta a bioinsumos, tratamientos pregerminativos y evaluación participativa de variedades locales. La evidencia sobre agroecología muestra que las prácticas basadas en diversificación, enmiendas orgánicas, integración agrícola-pecuaria, agroforestería y redes campesinas pueden mejorar los sistemas alimentarios. Bezner Kerr et al. (2021), en una revisión de literatura, seleccionaron 56 estudios con

evidencia sobre seguridad alimentaria y nutricional; de ellos, 78 % reportó resultados positivos asociados con prácticas agroecológicas. Esta revisión respalda la importancia de vincular el manejo de semillas con sistemas productivos diversificados y prácticas agrícolas sustentables.

En el caso del maíz, las semillas nativas poseen un valor estratégico para México por su diversidad genética, alimentaria y cultural. Monroy-Sais et al. (2024) señalan que la conservación de razas nativas de maíz en México es crítica para la agricultura sustentable, aunque muchos agricultores han reducido su uso frente a variedades modernas e híbridas. Su estudio en Chiapas destaca que los agricultores conservan maíces nativos por valores instrumentales, relacionales y bioculturales, no únicamente por criterios de rendimiento.

El manejo agroecológico de semillas también puede fortalecerse mediante microorganismos promotores del crecimiento vegetal. Chavéz-Díaz et al. (2022) evaluaron cepas nativas de *Pseudomonas* asociadas a la rizósfera del maíz Amarillo Zamorano y reportaron incrementos de 38–66 % en peso seco de plántulas, inhibición de 23–63 % del crecimiento de cepas de *Fusarium* y, en el caso de *Pseudomonas* sp. 4L, aumentos de 20–51 % en semillas germinadas, 30–140 % en longitud de raíz y reducción de 75–96 % del daño causado por *Fusarium* en semillas naturalmente infectadas. Esta evidencia muestra que las semillas nativas también pueden funcionar como reservorios de microorganismos útiles para el desarrollo de bioinsumos agrícolas.

De manera complementaria, los tratamientos pregerminativos pueden mejorar el establecimiento inicial del cultivo. Villalobos-González et al. (2025) evaluaron peróxido de hidrógeno en semillas de maíz nativo e híbrido, y reportaron que las dosis de 50 y 100 mM tuvieron efectos positivos sobre germinación y desarrollo inicial de plántulas bajo condiciones de riego y estrés hídrico. Aunque este tipo de tratamientos requiere validación local, evidencia que el manejo de semillas puede integrarse con estrategias de bajo costo para mejorar emergencia, vigor y adaptación temprana.

Por lo anterior, el manejo agroecológico de semillas no debe limitarse a conservar germoplasma, sino que puede articularse con bioinsumos, microorganismos benéficos, tratamientos pregerminativos y sistemas agrícolas diversificados. Así, la semilla se convierte en un eje biocotecnológico donde convergen biología, agricultura, cultura local y sustentabilidad.

Formación académica, investigación aplicada y transferencia tecnológica

La formación académica orientada a la sustentabilidad requiere modelos educativos capaces de vincular el conocimiento científico con problemáticas reales del territorio. En este sentido, la biocotecnología puede constituirse como un eje formativo pertinente, debido a que articula procesos biológicos, ecológicos y tecnológicos con necesidades comunitarias relacionadas con el agua, los residuos orgánicos, la producción de alimentos, la agricultura local y la gestión ambiental. A diferencia de una enseñanza exclusivamente teórica, este enfoque favorece el aprendizaje experimental, la resolución de problemas, la observación de procesos naturales, el diseño de prototipos y la evaluación de alternativas sustentables en condiciones contextualizadas.

La literatura sobre laboratorios vivos universitarios permite sustentar esta perspectiva, ya que plantea que las instituciones de educación superior pueden funcionar como espacios de experimentación, co-producción de conocimiento e innovación aplicada para la sustentabilidad. Evans et al. (2015) señalan que los *living labs* universitarios ofrecen un marco holístico e iterativo para la co-producción de conocimiento, al transformar los campus en plataformas de enseñanza e investigación aplicada vinculadas con desafíos de sustentabilidad. Esta idea resulta coherente con la biocotecnología, porque las actividades formativas pueden organizarse alrededor de problemáticas concretas, como el tratamiento descentralizado de aguas residuales, la valorización de residuos agropecuarios, la producción de bioinsumos, el cultivo de hongos comestibles y la conservación de semillas locales.

Desde esta lógica, la formación académica no solo debe centrarse en la operación técnica de sistemas, sino también en la comprensión integral de sus dimensiones ambientales, sociales y productivas. Herth et al. (2025) indican que los *campus living labs* permiten abordar desafíos sociales complejos y fomentar soluciones sustentables e innovadoras dentro de las instituciones de educación superior; sin embargo, también señalan que estas iniciativas requieren coordinación institucional, participación de actores, métodos de evaluación y continuidad en sus distintas fases de

desarrollo. Esto implica que la bioecotecnología, como enfoque formativo, debe acompañarse de planeación académica, protocolos de trabajo, monitoreo de resultados, vinculación con actores locales y estrategias de transferencia tecnológica.

La investigación aplicada constituye otro componente central, debido a que permite generar evidencia sobre el desempeño de las alternativas propuestas. En este caso, los estudiantes de nivel licenciatura y posgrado pueden desarrollar proyectos relacionados con la eficiencia de remoción en humedales artificiales, la producción de biogás y digestato en biodigestores, el rendimiento biológico de hongos comestibles sobre distintos sustratos lignocelulósicos, la calidad fisiológica de semillas nativas o la respuesta de cultivos a bioinsumos orgánicos. Estos ejercicios no solo fortalecen competencias técnicas, sino que también promueven habilidades de diseño experimental, análisis de datos, interpretación de resultados, comunicación científica y toma de decisiones basada en evidencia.

La transferencia tecnológica, por su parte, debe comprenderse como un proceso participativo y bidireccional. No consiste únicamente en trasladar una tecnología desde el ámbito académico hacia las comunidades, sino en adaptar, validar y mejorar las alternativas con base en las condiciones ecológicas, económicas, culturales y organizativas del territorio. Morales et al. (2023) destacan que los laboratorios urbanos vivos pueden utilizarse como estrategia de enseñanza-aprendizaje para la educación orientada al desarrollo sostenible, al promover innovación, experimentación y trabajo en entornos reales. Desde este enfoque, la bioecotecnología puede favorecer procesos de apropiación social cuando los usuarios participan en el diagnóstico, diseño, operación y evaluación de las soluciones.

La bioecotecnología no solo tiene valor conceptual y tecnológico, sino también formativo, ya que permite articular procesos de enseñanza, investigación aplicada y transferencia de soluciones sustentables hacia contextos comunitarios. En la Tabla 2 se presentan las principales líneas de aplicación del enfoque bioecotecnológico, vinculándolas con actividades formativas, competencias profesionales, productos de investigación aplicada y posibles formas de transferencia comunitaria.

Tabla 2. Bioecotecnología para la formación académica, la investigación aplicada y la transferencia tecnológica

Línea de aplicación	Actividad formativa	Competencia desarrollada	Producto de investigación aplicada	Posible transferencia comunitaria
Tratamiento de aguas residuales	Diseño y monitoreo de humedales artificiales	Análisis de calidad del agua y operación de sistemas naturales	Evaluación de remoción de DQO, sólidos, nitrógeno, fósforo o coliformes	Sistemas descentralizados de saneamiento
Valorización de residuos agropecuarios	Operación de biodigestores y compostaje	Gestión de residuos, bioenergía y recuperación de nutrientes	Caracterización de biogás, digestato, biol o composta	Producción local de bioinsumos
Hongos comestibles	Cultivo de <i>Pleurotus</i> spp. en residuos agrícolas	Manejo de sustratos, inoculación y evaluación de rendimiento	Comparación de eficiencia biológica en diferentes residuos	Aprovechamiento alimentario y emprendimiento rural
Semillas y agricultura local	Pruebas de germinación, vigor y conservación	Evaluación de calidad fisiológica y manejo agroecológico	Caracterización de semillas nativas o criollas	Conservación, intercambio y fortalecimiento agrícola
Integración comunitaria	Diagnóstico, capacitación y validación participativa	Comunicación, transferencia y apropiación social	Prototipos contextualizados y manuales técnicos	Soluciones adaptadas al territorio

Por lo tanto, la articulación entre formación académica, investigación aplicada y transferencia tecnológica representa una condición necesaria para que la bioecotecnología trascienda el nivel conceptual y se convierta en una herramienta práctica para el desarrollo comunitario sustentable. Su valor formativo radica en que permite integrar conocimientos de microbiología, ecología, química ambiental, agricultura sustentable, gestión de residuos, diseño de sistemas y

participación comunitaria. A su vez, su valor social depende de que las soluciones generadas sean técnicamente viables, económicamente accesibles, ambientalmente seguras y culturalmente pertinentes.

Tendencias, oportunidades y retos para el desarrollo comunitario sustentable

Las tendencias actuales relacionadas con la bioecotecnología se orientan hacia la integración de soluciones basadas en la naturaleza, economía circular, bioeconomía, saneamiento descentralizado, recuperación de nutrientes, producción de bioinsumos, agricultura regenerativa, seguridad alimentaria y co-producción de conocimiento. Estas tendencias responden a la necesidad de transitar desde modelos lineales de extracción, consumo y disposición hacia esquemas más circulares, descentralizados y territorialmente adaptados. En este sentido, la bioecotecnología puede entenderse como una propuesta conceptual que organiza diversas alternativas sustentables bajo un mismo marco de análisis, donde los residuos, el agua, la biomasa y las semillas son considerados recursos estratégicos para fortalecer sistemas comunitarios.

Una tendencia relevante es la convergencia entre economía circular y bioeconomía. Ferraz et al. (2023) señalan que la integración entre economía circular y bioeconomía, denominada bioeconomía circular, puede contribuir al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, aunque advierten que aún es necesario fortalecer su relación con dimensiones sociales como educación de calidad, reducción de pobreza y equidad. Esta observación es importante para la bioecotecnología, ya que su aplicación en contextos comunitarios no debe limitarse a la eficiencia ambiental o productiva, sino que debe incorporar procesos educativos, participación local, apropiación tecnológica y beneficios sociales tangibles.

Otra tendencia importante corresponde a las soluciones basadas en la naturaleza y su relación con la gestión del agua y la circularidad. Biswal y Balasubramanian (2022) destacan que los humedales artificiales pueden contribuir a la recuperación y reúso de aguas residuales y pluviales mediante procesos naturales, mientras que Ramírez-Escamilla et al. (2025) señalan que la literatura reciente busca integrar críticamente las intersecciones entre soluciones basadas en la naturaleza y economía circular. Desde el enfoque bioecotecnológico, esta convergencia permite diseñar estrategias donde el tratamiento del agua, el reúso seguro, la restauración ambiental y la generación de servicios ecosistémicos se articulen con necesidades locales de saneamiento.

La valorización de residuos orgánicos también constituye una tendencia central. Procesos como digestión anaerobia, compostaje, producción de digestato, recuperación de nutrientes y generación de biofertilizantes permiten transformar residuos agropecuarios en insumos útiles para la agricultura. Kovačić et al. (2022) sostienen que el manejo del digestato requiere estrategias de procesamiento que incrementen su valor agronómico y reduzcan riesgos ambientales, tales como separación sólido-líquido, compostaje, secado, recuperación de nutrientes y precipitación de estruvita. Esta tendencia resulta fundamental para comunidades rurales, donde los residuos agropecuarios pueden dejar de ser un problema ambiental y convertirse en una fuente local de energía, fertilización orgánica y mejoramiento de suelos.

En el ámbito agrícola, la bioecotecnología también se relaciona con la agroecología, la conservación de semillas nativas y la diversificación productiva. Bezner Kerr et al. (2021) reportan que las prácticas agroecológicas pueden contribuir positivamente a la seguridad alimentaria y nutricional, especialmente cuando integran diversificación de cultivos, enmiendas orgánicas, redes campesinas y conocimiento local. Este hallazgo permite identificar una oportunidad importante: vincular los bioinsumos derivados de residuos orgánicos con sistemas agrícolas locales, el manejo de semillas y la producción sustentable de alimentos. Así, la bioecotecnología puede articular la dimensión ambiental con la dimensión alimentaria y comunitaria.

Entre las principales oportunidades se encuentra la posibilidad de desarrollar sistemas integrados de bajo costo y alta pertinencia territorial. Por ejemplo, los residuos agropecuarios pueden transformarse en biogás y digestato; los residuos lignocelulósicos pueden utilizarse como sustratos para hongos comestibles; el agua residual tratada puede destinarse a usos no potables bajo criterios sanitarios; y las semillas locales pueden evaluarse y conservarse para fortalecer la agricultura comunitaria. Esta integración permite construir modelos circulares en los que cada proceso genera productos, subproductos o aprendizajes aprovechables por otros componentes del sistema. No obstante, existen retos importantes para la aplicación real de este enfoque. En primer lugar, se requiere validación científica de

las alternativas propuestas, ya que no toda tecnología ecológica o biológica garantiza resultados adecuados en cualquier contexto. En segundo lugar, es necesario contar con protocolos de monitoreo, criterios de calidad, capacitación técnica y mecanismos de seguimiento. En tercer lugar, la adopción comunitaria depende de factores sociales como confianza, participación, costo, mantenimiento, apropiación cultural y beneficios percibidos. Herth et al. (2025) advierten que las iniciativas de innovación sustentable en instituciones de educación superior requieren liderazgo, coordinación, colaboración y métodos de evaluación para mantenerse en el tiempo, lo que también puede extrapolarse a la implementación de soluciones bioecotecnológicas en territorios comunitarios.

Además de los campos que sustentan conceptualmente la propuesta, la bioecotecnología puede relacionarse con tendencias actuales como la bioeconomía, las soluciones basadas en la naturaleza y la co-producción de conocimiento. Estas relaciones no implican que dichos conceptos formen parte de la definición propuesta, sino que permiten reconocer puntos de convergencia con enfoques contemporáneos orientados al aprovechamiento sustentable de recursos, la atención de problemáticas ambientales y la generación colaborativa de soluciones. La Figura 1 sintetiza estas relaciones y ubica la bioecotecnología dentro del conjunto de enfoques con los que mantiene vínculos conceptuales y de aplicación.

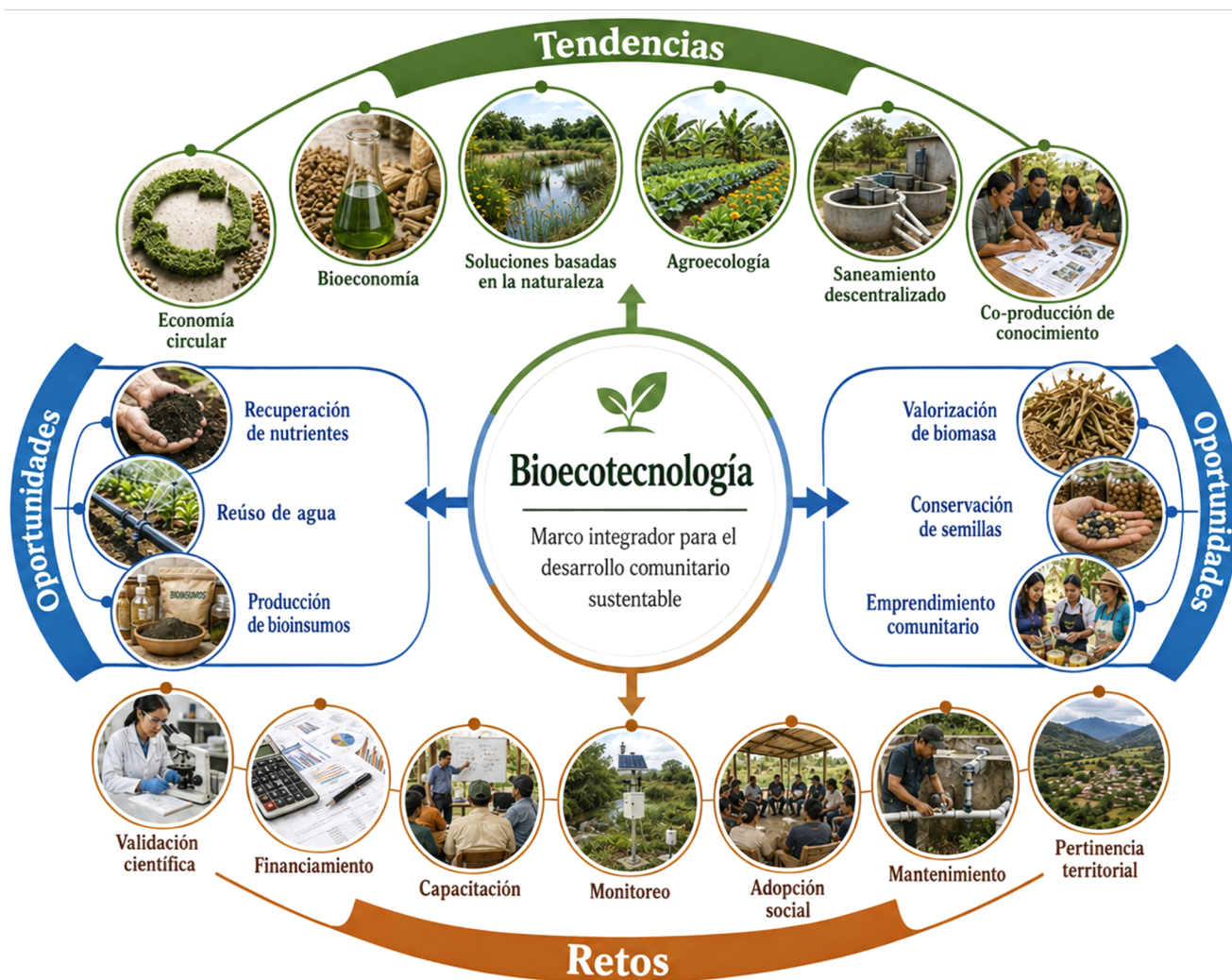


Figura 1. Bioecotecnología para el desarrollo comunitario sustentable.

Por todo lo anterior, la bioecotecnología representa una oportunidad conceptual y práctica para integrar tecnologías biológicas, ecológicas y apropiadas en favor del desarrollo comunitario sustentable. Su consolidación dependerá de la capacidad de articular investigación científica, formación académica, participación social, pertinencia territorial y evaluación continua. Más que una tecnología específica, se plantea como un marco integrador que permite diseñar

soluciones adaptadas a comunidades rurales y periurbanas, donde los problemas ambientales y productivos suelen estar interrelacionados.

Conclusiones

La revisión bibliográfica permitió establecer una base para delimitar la bioecotecnología como un enfoque integrador orientado a la atención de problemáticas ambientales y productivas en contextos rurales y periurbanos. Si bien se identificaron usos previos del término en ámbitos académicos e institucionales, estos presentan alcances heterogéneos; por ello, la propuesta desarrollada en este trabajo busca establecer una articulación conceptual explícita con campos consolidados como la biotecnología ambiental, la ecotecnología, la agroecología, la economía circular y las tecnologías apropiadas.

La literatura analizada permitió reconocer diversos ámbitos de aplicación potencial, entre ellos el tratamiento descentralizado de aguas residuales, la valorización de residuos agropecuarios, el aprovechamiento de biomasa lignocelulósica y el manejo agroecológico de semillas. Su incorporación al enfoque propuesto depende de condiciones como la pertinencia territorial, la viabilidad técnica, la participación comunitaria, la apropiación tecnológica y la posibilidad de evaluar sus beneficios ambientales, productivos y sociales.

La principal contribución de esta revisión consiste en establecer una base conceptual inicial para la bioecotecnología como enfoque integrador, cuya delimitación podrá ser fortalecida y validada mediante futuras investigaciones aplicadas en diferentes contextos territoriales. En este sentido, la propuesta no pretende sustituir campos existentes, sino ofrecer un marco de articulación que facilite el diseño, adaptación y evaluación de soluciones sustentables vinculadas con las necesidades y capacidades de las comunidades.

Agradecimientos: Los autores agradecen al Instituto Tecnológico Superior de Zongolica por el respaldo académico para el desarrollo de esta propuesta y la apertura del Laboratorio de BioEcoTecnología en la Unidad Académica de Tequila, Veracruz.

Bibliografía

- Akcay, C., Ceylan, F., & Arslan, R. (2023). Production of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) from some waste lignocellulosic materials and FTIR characterization of structural changes. *Scientific Reports*, 13, 12897. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-40200-x>
- Alengebaw, A., Ran, Y., Osman, A. I., Jin, K., Samer, M., & Ai, P. (2024). Anaerobic digestion of agricultural waste for biogas production and sustainable bioenergy recovery: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 22, 2641–2668. <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01789-1>
- Bezner Kerr, R., Madsen, S., Stüber, M., Liebert, J., Enloe, S., Borghino, N., Parros, P., Mutyambai, D. M., Prudhon, M., & Wezel, A. (2021). Can agroecology improve food security and nutrition? A review. *Global Food Security*, 29, 100540. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2021.100540>
- Biswal, B. K., & Balasubramanian, R. (2022). Constructed wetlands for reclamation and reuse of wastewater and urban stormwater: A review. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 836289. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.836289>
- Calbry-Muzyka, A., Madi, H., Rüsche-Pfund, F., Gandiglio, M., & Biollaz, S. (2022). Biogas composition from agricultural sources and organic fraction of municipal solid waste. *Renewable Energy*, 181, 1000–1007. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.09.100>
- Chavéz-Díaz, I. F., Cruz-Cárdenas, C. I., Sandoval-Cancino, G., Calvillo-Aguilar, F. F., Ruiz-Ramírez, S., Blanco-Camarillo, M., Rojas-Anaya, E., Ramírez-Vega, H., Arteaga-Garibay, R. I., & Zelaya-Molina, L. X. (2022). Seedling growth promotion and potential biocontrol against phytopathogenic *Fusarium* by native rhizospheric *Pseudomonas* spp. strains from Amarillo Zamorano maize landrace. *Rhizosphere*, 24, 100601. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2022.100601>
- Chojnacka, K., & Moustakas, K. (2024). Anaerobic digestate management for carbon neutrality and fertilizer use: A review of current practices and future opportunities. *Biomass and Bioenergy*, 180, 106991. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106991>
- Evans, J., Jones, R., Karvonen, A., Millard, L., & Wendler, J. (2015). Living labs and co-production: University campuses as platforms for sustainability science. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 16, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2015.06.005>
- Ferraz, D., & Pyka, A. (2023). Circular economy, bioeconomy, and sustainable development goals: A systematic literature review. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 119884–119903. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29632-0>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The circular economy: A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Hernández-Vásquez, L. A., Rojas-Ascensión, M., Reyes Rosas, S., Hernández Cruz, R. D., Vega-Ortega, M. Á., Hernández-Salinas, G., Benítez-Espíndola, M. A., & Sandoval Herazo, L. C. (2026). Growth of *Chrysopogon zizanioides* in floating treatment wetlands with different substrates for the remediation of an urban river. *Limnological Review*, 26(1), 7. <https://doi.org/10.3390/limnolrev26010007>
- Herth, A., Verburg, R., & Blok, K. (2025). How can campus living labs thrive to reach sustainable solutions? *Cleaner Production Letters*, 8, 100078. <https://doi.org/10.1016/j.clpl.2024.100078>
- Kovačić, Đ., Lončarić, Z., Jović, J., Samac, D., Popović, B., & Tišma, M. (2022). Digestate management and processing practices: A review. *Applied Sciences*, 12(18), 9216. <https://doi.org/10.3390/app12189216>

- Martín-Sanz-Garrido, C., Revuelta-Aramburu, M., Santos-Montes, A. M., & Morales-Polo, C. (2025). A review on anaerobic digestate as a biofertilizer: Characteristics, production, and environmental impacts from a life cycle assessment perspective. *Applied Sciences*, 15(15), 8635. <https://doi.org/10.3390/app15158635>
- Monroy-Sais, A. S., Tobin, D., Bellon, M. R., Astier, M., Cibrián-Jaramillo, A., Gálvez-Reyes, N., Mastretta-Yanes, A., Ruiz-Arocho, J., Wegier, A., & Chen, Y. H. (2024). Smallholder farmers' diverse values in maize landrace conservation: A case study from Chiapas, Mexico. *Journal of Rural Studies*, 110, 103347. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2024.103347>
- Morales, I., Segalás, J., & Masseck, T. (2023). Urban living labs: A higher education approach to teaching and learning about sustainable development. *Sustainability*, 15(20), 14876. <https://doi.org/10.3390/su152014876>
- Patnaik, J., & Bhowmick, B. (2019). Revisiting appropriate technology with changing socio-technical landscape in emerging countries. *Technology in Society*, 57, 8–19. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2018.11.004>
- Ramírez-Escamilla, H. G., Martínez-Rodríguez, M. C., Domínguez-Solís, D., Cervantes-Nájera, A. L., & Campos-Villegas, L. E. (2025). Identifying circularity in nature-based solutions: A systematic review. *Sustainability*, 17(19), 8722. <https://doi.org/10.3390/su17198722>
- Ruiz-Sánchez, R., Arencibia-Jorge, R., Tagüña, J., Jiménez-Andrade, J. L., & Carrillo-Calvet, H. (2024). Exploring research on ecotechnology through artificial intelligence and bibliometric maps. *Environmental Science and Ecotechnology*, 21, 100386. <https://doi.org/10.1016/j.esec.2023.100386>
- Satbayev University. (2020). *Bioecological engineering M 1.5* [Documento académico]. <https://satbayev.university/>
- Sözbir, G. D., Bektaş, İ., & Zülkadir, A. (2015). Lignocellulosic wastes used for the cultivation of *Pleurotus ostreatus* mushrooms: Effects on productivity. *BioResources*, 10(3), 4686–4693. <https://doi.org/10.15376/biores.10.3.4686-4693>
- Universidad Nacional Abierta y a Distancia. (2024). *Semillero de Investigación Bioecotecnología y Desarrollo Sostenible - BIOINDEXES*. Sistema de Gestión de la Investigación y la Innovación (SIGIIP). <https://investigaciones.unad.edu.co/PSemilleros/Ver/2143>
- Villalobos-González, A., López-Hernández, M. B., Haas-Bacab, D., Salvador-Morales, P., Romero-Félix, C. S., González-Valdivia, N. A., Mendoza-Arroyo, G. E., & Arcocha-Gómez, E. (2025). Hydrogen peroxide in seed germination and initial development of maize seedlings (*Zea mays* L.). *Agro Productividad*, 18(4), 95–101. <https://doi.org/10.32854/bfsk2k51>
- Zárate-Salazar, J. R., Santos, M. N., Muñoz Caballero, E. N., Martins, O. G., & Palomo Herrera, Á. A. (2020). Use of lignocellulosic corn and rice wastes as substrates for oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus* Jacq.) cultivation. *SN Applied Sciences*, 2, 1904. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03720-z>