

Residuos que dan vida: Biotecnología microbiana para regenerar los suelos agrícolas

Angeles Iveth Licon-Aguilar¹, Vladimir Tonatiuh Pelcastre-Campos¹, Juana Álvaro-Arcos¹, Carlos Fernando Méndez-Díaz¹, Miguel Ángel Nuricumbo-Guzmán¹, Heidy Manuela López-López¹, María Guadalupe Pérez Gómez, Rita Karen Pacheco-Cabañas^{1*}

¹Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Palenque, Departamento de Ingeniería Biotecnológica, Carretera Federal 199, tramo Catazajá - Rancho Nuevo KM24.5, Col. Pakal-na, 29960, Palenque, Chiapas.

*Autor para la correspondencia: rpachecoc@ipn.mx (R.K.P.C.)

RESUMEN

Para enfrentar la degradación de suelos agrícolas por agroquímicos, una solución innovadora se genera desde el aprovechamiento de la capacidad natural de los microorganismos para limpiar el suelo. Aprovechando sus cualidades naturales, los microorganismos pueden degradar diversos contaminantes presentes en el suelo. En este artículo, presentamos un panorama sobre estrategias de biorremediación mediante los denominados consorcios y soportes microbianos. Su poder de acción radica en su forma de crecimiento en laboratorio y en su forma de agruparlos en un soporte microscópico. Los residuos vegetales, generalmente considerados como elementos de desecho por la industria agrícola, pueden emplearse como medios de cultivos y soportes para la creación de materiales capaces de restaurar la calidad de suelo. Residuos como la fibra de palma de aceite y el pseudotallo de plátano pueden ofrecer propiedades nutritivas para ser empleadas como medios de cultivo no convencionales y superficiales como alta porosidad desarrollada para su aplicación en soportes de fijación. Además, su bajo costo y abundante producción contribuyen a su valorización e introducción a la economía circular. Finalmente, bajo este enfoque exponemos un caso de estudio orientado hacia el uso de los residuos generados por actividades agroindustriales en el sureste del país, en el municipio de Seybaplaya Campeche.

Palabras clave: Microorganismo, residuos agroindustriales, soportes, inmovilización.



ABSTRACT

To address agricultural soils degradation caused by agrochemicals, an innovative solution stems from harnessing the natural ability of microorganisms to clean the soil. Leveraging their inherent qualities, microorganisms can degrade various contaminants present in the soil. This article presents an overview of bioremediation strategies using microbial consortia and scaffolds. Their effectiveness lies in their growth patterns in the laboratory and their ability to be grouped on microscopic support. Plant residues, generally considered waste by the agricultural industry, can be used as culture media and support for creating materials capable of restoring soil quality. Residues such as oil palm fiber and banana pseudostems offer nutritive properties for use as unconventional culture media and high surface porosity ideal for application in fixation supports. Furthermore, their low cost and abundant production contribute to their valorization and integration into the circular economy. Finally, under this approach, we present a case study focused on utilizing waste generated by agro-industrial activities in the southeastern part of the country, specifically in the municipality of Seybaplaya, Campeche.

Keywords: microorganisms, agroindustrial waste, supports, immobilization.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional ha incrementado la demanda de alimentos y la expansión de la agroindustria, generando grandes volúmenes de residuos que, al no manejarse adecuadamente, afectan el suelo, el agua y los ecosistemas. Frente a esta situación, la agricultura mexicana vive un punto de quiebre que la impulsa a adoptar prácticas agroecológicas orientadas a la producción sostenible (SADER, 2023) (Figura 1). El modelo agrícola predominante continúa generando grandes volúmenes de residuos que aún no se aprovechan de forma eficiente.

En el sureste del país, los cultivos de plátano y palma de aceite son un pilar de la economía local, generando grandes volúmenes de producción y divisas. Se estima que por cada 100 toneladas (t) de racimos de palma se generan aproximadamente 14 t de fibra del mesocarpio que es la parte fibrosa del fruto que queda después de la extracción del aceite. Estas fibras son comúnmente usadas por la comunidad en la producción de compost y alimento animal; sin embargo, aún no es valorizada en su totalidad (Ordoñez et al., 2020). Esta acumulación plantea un desafío ambiental, pero también una oportunidad: transformar los desechos agrícolas en materiales útiles mediante los principios de la economía circular. Desde Palenque, Chiapas, surge una propuesta innovadora para aprovechar estos residuos como soporte y fuente de nutrientes para microorganismos nativos. Dicha propuesta se centra en el desarrollo de "equipos" de microorganismos, conocidos como consorcios microbianos, capaces de limpiar y restaurar suelos contaminados de manera más eficiente que un solo microorganismo o que los adsorbentes convencionales (Qattan, 2025). Sin embargo, estos "equipos" todavía necesitan de un medio de soporte que les permita realizar su acción en el suelo. Materiales vegetales como la fibra de palma y el pseudotallo de plátano son elementos naturales que tratados adecuadamente favorecen la inmovilización y estabilidad de los microorganismos gracias a sus propiedades po-



Figura 1. El paisaje agrícola de Campeche, uno de los pilares de la industria azucarera mexicana, permanece inactivo. Más que un simple periodo de reposo, esta pausa se ha convertido en una vigilia tensa mientras los productores observan el cielo, esperando las lluvias retrasadas que son indispensables para asegurar la cosecha del próximo año.

rosas y resistentes. De esta manera, los consorcios microbianos junto con sus medios de soporte constituyen los denominados bioformulados, cuyo propósito es ayudar en la regeneración los suelos agrícolas de una manera eficiente, natural y sostenible (Astudillo et al., 2023; Qattan, 2025).

2

DE LOS RESIDUOS A LA INNOVACIÓN: PROPUESTA DESDE EL SURESTE DE MÉXICO

2.1. Los medios de cultivo alternativos

Lo primero que debemos hacer es identificar a los microorganismos. En la microbiología tradicional, los microorganismos se aíslan y cultivan en medios estandarizados que requieren insumos costosos y difíciles de escalar. En respuesta, la biotecnología ha impulsado el uso de medios alternativos elaborados con residuos agroindustriales como cáscaras, fibras, tallos, bagazo, melaza o pulpas (Figura 2) (Astudillo et al., 2023; Sharma et al., 2020). Estos subproductos aportan carbono, nitrógeno y minerales esenciales, reducen los costos de producción entre 38 % y 73 %, y favorecen el aprovechamiento sustentable de desechos orgánicos (Lopes et al., 2021).

A diferencia de los medios sintéticos, los naturales contienen múltiples compuestos bioactivos que estimulan el metabolismo microbiano de manera natural (Vučurović & Razmovski, 2024). Entre los principales compuestos bioactivos presentes en los residuos agroindustriales se encuentran los fenoles y compuestos aromáticos (como el ácido ferúlico, p-cumárico, vainillina y catequina), que actúan como inductores enzimáticos en la producción de lacasas y peroxidasas. Los ácidos orgánicos (acético, cítrico, málico, láctico y oxálico) ayudan a regular el pH y mejoran la absorción de nutrientes, mientras que los azúcares reductores y oligosacáridos (glucosa, fructosa, xilosa, arabinosa, maltosa) proporcionan energía rápida y estimulan el crecimiento microbiano. Asimismo, los aminoácidos y péptidos (glutamina, lisina, alanina) favorecen la síntesis de biomasa, vitaminas, minerales traza (B1, B2, B6, hierro, zinc, magnesio) y actúan como cofactores enzimáticos. Finalmente,



Figura 2. Fibras de plátano y palma de aceite, antes consideradas residuos, ahora son procesadas para crear sustratos de cultivo líquido. Un paso adelante hacia una producción de alimentos más autosuficiente y ecológica.

los flavonoides y antioxidantes naturales (quercetina, rutina, taninos, antocianinas) contribuyen a proteger a los microorganismos del estrés oxidativo y pueden modular la expresión génica (Saini et al., 2025; Lemes et al., 2022; Shirahigue et al., 2020).

2.2. La inmovilización de microorganismos

Una vez obtenidos los microorganismos, es necesario inmovilizarlos. La inmovilización microbiana consiste en fijar bacterias, hongos o levaduras sobre materiales sólidos como fibras vegetales, con el fin de potenciar su aplicación en procesos como la biorremediación. Esta técnica destaca por aprovechar residuos vegetales agroindustriales, también llamados residuos lignocelulósicos, como soportes a los cuales se les modifica física y químicamente para optimizar la adhesión y mantenimiento celular (Ogundolie et al., 2024). Dichas modificaciones buscan generar materiales poro-

sos, resistentes y que puedan ser funcionalizados con grupos químicos (carboxilos, hidroxilos, carbonilos), además de garantizar su biodegradabilidad y baja toxicidad (Girelli et al., 2020).

Entre los métodos de inmovilización utilizados se encuentran la encapsulación, formación de biopeículas y el enlace covalente, aunque la adsorción superficial es la más utilizada. En esta técnica, los microorganismos se adhieren al soporte mediante interacciones físico-químicas, como fuerzas de Van der Waals, puentes de hidrógeno, dipolo-di-

polo, entre otras; conservando su viabilidad y reduciendo el uso de reactivos, lo que la convierte en una alternativa ambientalmente favorable (Zhang et al., 2021; Zhang et al., 2024; Ogundolie et al., 2024).

2.3. Los residuos agroindustriales del plátano y la palma

Entre los subproductos lignocelulósicos más prometedores para ser utilizados como insumos en la obtención de medios de cultivo alternativos y soporte para inmovilización están el pseudotallo de plátano y la fibra de palma de aceite. Ambos residuos tienen una composición rica en carbohidratos, fibras y compuestos lignocelulósicos que favorecen el crecimiento de consorcios microbianos (Díaz et al., 2023; Moretti et al., 2025; Liu et al., 2025). En tanto que, para la inmovilización, la creación de biocarbón se perfila como una alternativa adecuada de aprovechamiento de estos residuos. La conversión de estas fibras a carbono

(biocarbón) o carbono modificado químicamente (carbono activado) ha sido altamente apreciada para su uso y nobleza como inmovilizador. Estos materiales son ideales por su particular estructura microscópica y su gran variedad de tamaños de poro. Esto facilita el intercambio de nutrientes y sustancias, lo que favorece la actividad microbiana. Además, la funcionalización con agentes químicos promueve la fijación de enzimas y otras células. Además, al provenir de biomásas naturales, tampoco liberan sustancias tóxicas que puedan inhibir el crecimiento de los microorganismos.



2.3.1 Pseudotallo de plátano

El pseudotallo de plátano, uno de los residuos agrícolas más abundantes en el sureste mexicano, está compuesto principalmente por agua, celulosa, hemicelulosa y lignina (Figura 3). Además de carbohidratos solubles, minerales y compuestos bioactivos como el ácido gálico y el ácido succínico que favorecen el metabolismo microbiano (Badanayak et al. 2013). Este residuo ha sido empleado como fuente de carbono en fermentaciones sólidas de microorganismos como *Trichoderma* y *Aspergillus*, promoviendo una alta producción enzimática y de biomasa (Astudillo et al., 2023). Otros estudios han demostrado que, como sus-

trato, puede inducir la producción de enzimas y metabolitos de interés, incluyendo amilasas, pectinasas y celulasas, así como en el crecimiento de bacterias probióticas (Moretti et al., 2025). Su biodegradación microbiana libera azúcares fermentables y oligosacáridos que favorecen la proliferación de consorcios microbianos con capacidad de degradar contaminantes (Díaz et al., 2023). Estas aplicaciones confirman la versatilidad del pseudotallo de plátano como un medio de cultivo no convencional y de bajo costo, con gran potencial para impulsar procesos de biorremediación.

2.3.2 Fibra de palma

La fibra de palma de aceite es otro residuo abundante en regiones productoras de aceite en los estados de Tabasco y Chiapas. La fibra es rica en celulosa, hemicelulosa y lignina, lo que le confiere una estructura porosa ideal para alojar comu-

nidades microbianas (Shinoj, et al., 2011) (Figura 3). Cuando se somete a la acción de microorganismos, particularmente con hongos celulolíticos y levaduras, la fibra libera azúcares fermentables y compuestos solubles que estimulan el desarro-

llo microbiano y la síntesis de enzimas de interés como celulasas, mananasas y xilanasas (Sathitkowitchai et al., 2022). Investigaciones recientes en fibras similares han demostrado que mediante

una co-fermentación con microorganismos específicos se aumenta la disponibilidad de nutrientes y mejora su digestibilidad (Liu et al., 2025).

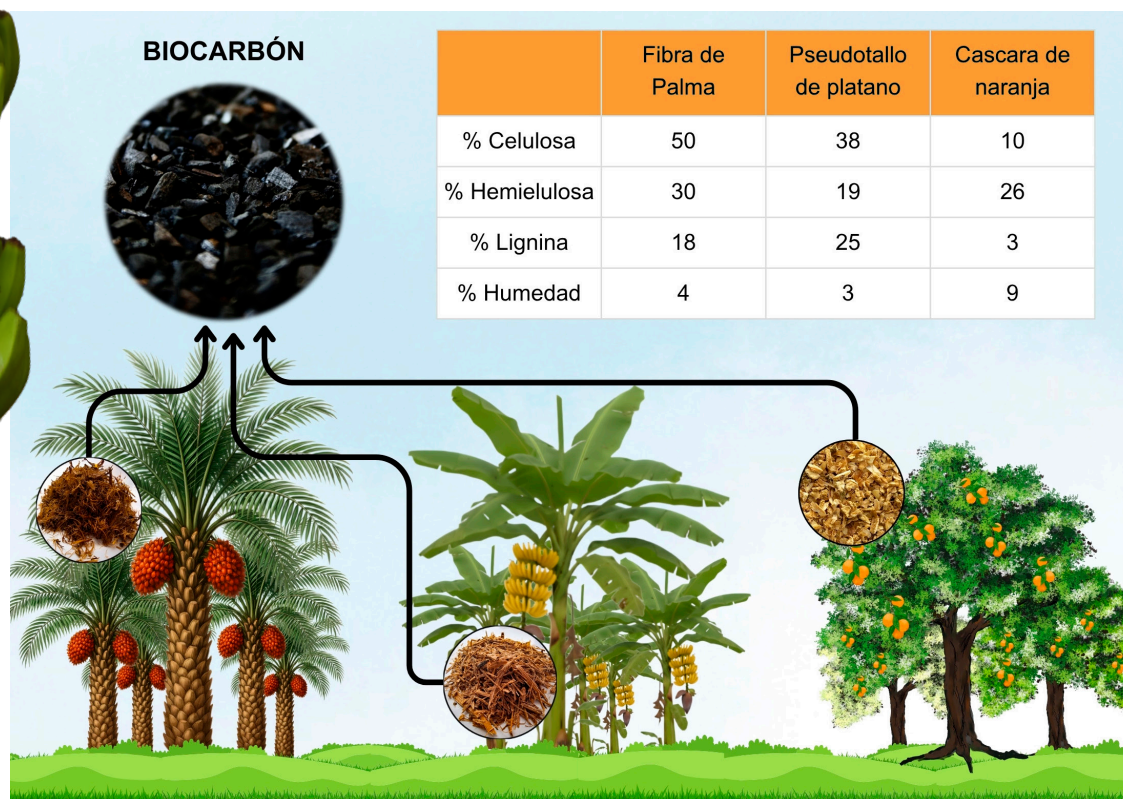


Figura 3. Transformación de residuos agroindustriales en biocarbón y su composición lignocelulósica. El esquema ilustra la obtención de biocarbón a partir de la fibra de palma, el pseudotallo de plátano y la cáscara de naranja. La tabla anexa detalla la composición porcentual de celulosa, hemicelulosa, lignina y humedad de cada una de estas biomásas residuales, destacando su potencial como materia prima para la creación de soportes de inmovilización microbiana y soluciones de biorremediación. Elaboración propia con información de Hernández-Leal y colaboradores (2025).

2.4. ¿Cómo funcionan estos residuos en su uso directo en una parcela?

Para hacer un ejemplo sobre el aprovechamiento de residuos lignocelulósicos hasta su aplicación práctica, imaginemos el proceso en tres grandes etapas (Figura 4). Hay que tener en cuenta que el objetivo es aprovechar el poder natural de bacterias y hongos para limpiar los suelos contaminados por pesticidas y, al mismo tiempo, ayudar a que las plantas crezcan mejor.

2.4.1 Producción de microorganismos en el laboratorio

Todo comienza en el laboratorio, donde se cultivan bacterias y hongos seleccionados por su capacidad para degradar contaminantes. En condiciones controladas como temperatura, aireación y nutrientes, estos microorganismos crecen dentro de fermentadores, equipos que permiten producirlos en gran cantidad y mantenerlos activos. Aquí, se busca que las comunidades microbianas trabajen en equipo, formando consorcios capaces de transformar y eliminar residuos tóxicos (Liu et al., 2022; Jaiswal et al., 2023).



2.4.2 Pruebas de limpieza en suelos contaminados

Algunas bacterias y hongos tienen la sorprendente capacidad de limpiar el suelo gracias a su metabolismo. Este proceso de biorremediación se lleva a cabo a través de diversas técnicas. Por ejemplo, bacterias como *Bacillus mucitagnosus*, *Bacillus subtilis*, *Citrobacter sp.*, *Bacillus thuringiensis* pueden inmovilizar componentes mediante coprecipitación o adsorción; además, estos microorganismos pueden ser tolerantes y adaptables en suelos contaminados, logrando degradar o descomponer moléculas complejas de pesticidas y metales pesados. Asimismo, hongos del género *Trichoderma* y *Aspergillus* secretan enzimas que desintegran contaminantes orgánicos difíciles de eliminar. En nuestro trabajo, una vez listas las poblaciones microbianas de hongos (género *Trichoderma* y *Aspergillus*) se realizan ensayos en pequeñas muestras de suelo contaminado para observar si los microorganismos realmente pueden degradar los pesticidas en condiciones similares a las del campo. Durante estas pruebas se mide cuánto contaminante desaparece y se analizan los cambios en el suelo para verificar que los microorganismos no afecten su equilibrio natural. Así se comprueba su eficiencia y seguridad ambiental (Bi et al., 2023).



2.4.3 Elaboración de formulado

Cuando se identifica el consorcio más efectivo, se da paso a la formulación del producto final. La biomasa microbiana se mezcla con materiales naturales y residuos agroindustriales como biocarbons, a fibras vegetales o polímeros biodegradables que funcionan como soporte para mantener vivos a los microorganismos (Figura 4). El resultado es un bioformulado estable y fácil de aplicar en suelos agrícolas. Finalmente, se hacen pruebas en invernadero con plantas, para observar si los suelos tratados con este bioformulado no solo se limpian, sino que también favorecen el crecimiento de las plantas y la salud del ecosistema (Khan et al., 2023).

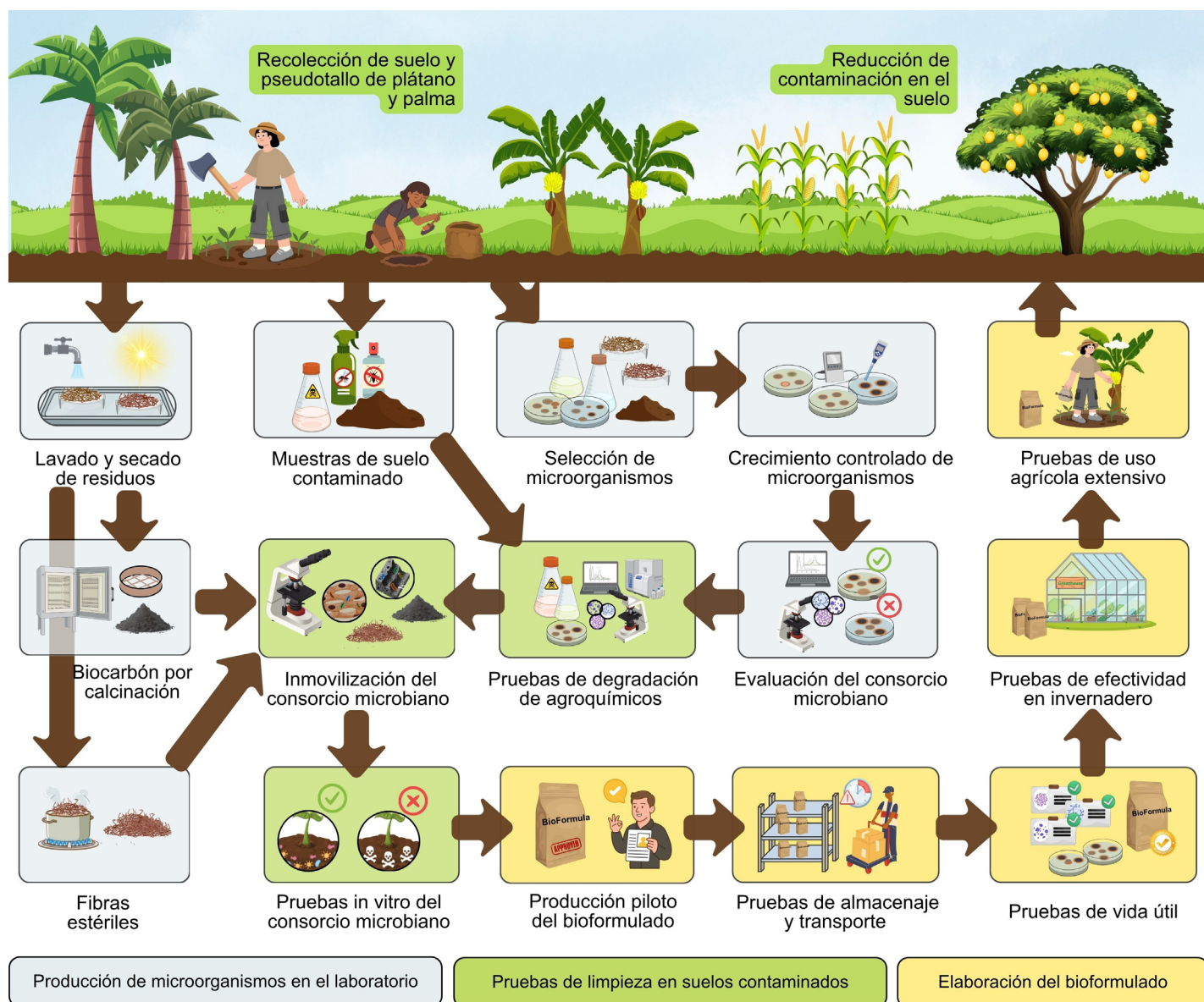


Figura 4. Este material oscuro y poroso es biocarbón, producido mediante incineración en ausencia de oxígeno a partir de fibras de desecho agrícola, fibras de pseudotallo de plátano y fibra de palma de aceite. La estructura microscópica del biocarbón, está repleta de poros. Esta porosidad le permite funcionar como un "arrecife" en el suelo, ofreciendo refugio a microorganismos benéficos y mejorando drásticamente la función del suelo.



3

CASO DE ESTUDIO: VINCULACIÓN Y DIAGNÓSTICO PARA LA REGENERACIÓN DE SUELOS EN SEYBAPLAYA.

En el centro de la costa de Campeche, la vida del Municipio de Seybaplaya siempre ha estado ligada a la tierra y el mar. Durante generaciones, la pesca ha sido el pulso de la comunidad, complementada por la agricultura de caña de azúcar. Sin embargo, en los últimos años, un cambio sutil pero implacable ha comenzado a transformar el paisaje vislumbrando un problema mayúsculo. Lo que antes era suelo fértil, ahora presenta signos de deterioro. El monocultivo, el uso continuo de agroquímicos y la alteración del régimen de lluvias compromete los cultivos y el sustento de las familias. No solo de los agricultores cañeros, sino de toda la comunidad de Seybaplaya.

Aquí es donde la biotecnología entra en juego, no como una imposición externa, sino como un aliado. Un equipo de investigadores y alumnos de la Unidad Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Palenque del Instituto Politécnico Nacional

(UPIIP-IPN) ha iniciado un proyecto (actualmente en fase de diagnóstico y vinculación) que se distingue por su enfoque colaborativo (Figura 5). Tras escuchar las historias, preocupaciones y conocimientos tradicionales de agricultores de Seybaplaya sobre el cultivo de caña, comprendieron que la ciencia debe caminar de la mano con la experiencia local. Con el permiso y confianza de los ejidatarios, se recolectaron muestras de suelo para un análisis detallado en laboratorio, buscando entender la composición química y biológica del suelo, para comprender cuánto ha sido afectada por las prácticas agrícolas basadas en el uso de agroquímicos.

Aunque el proyecto está en una etapa de diagnóstico y vinculación, el objetivo del equipo es ambicioso y a la vez práctico: desarrollar un bioformulado que utilice la biorremediación para contrarrestar la degradación del suelo. Este bio-



Figura 5. Estudiantes e investigadores de la UPIIP (Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Palenque) en su encuentro con productores de caña en Seybaplaya Campeche. El trabajo de campo permite a la nueva generación de ingenieros comprender los desafíos directos del cultivo para proponer soluciones tecnológicas viables.

formulado se basaría en la inmovilización de consorcios microbianos que derivan de microorganismos extraídos de este tipo de suelos. Además, en el uso de residuos lignocelulósicos locales, de pseudotallo de plátano y la fibra de palma que se generan en localidades cercanas a Seybaplaya. Los primeros resultados del suelo ya están por publicarse: análisis fisicoquímico del suelo, aislamiento y crecimiento de microorganismos tolerantes a agroquímicos; y desarrollo de biocarbón con disponibilidad para ser utilizado en pruebas de inmovilización.

Aunque hay un largo camino que recorrer, los resultados son alentadores y esperanzadores para ofrecer una tecnología sostenible y económicamente viable para remediar el suelo en esta región y buscar un futuro más sostenible al cultivo de caña en Seybaplaya.

4 CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Los residuos lignocelulósicos y su proceso hasta la conformación de un bioformulado surge como una alternativa de remediación sostenible y de bajo costo. La estrategia se basa en consorcios microbianos, aislados de los mismos suelos afectados cuya capacidad probada les permite no solo resistir las condiciones del sitio, sino también degradar los contaminantes presentes. Más aún, los biocarbones donde se ejerce la inmovilización ofrecen otra ventaja competitiva de sostenibilidad, dado que provienen de residuos generados en el mismo contexto agrícola. Por todo esto, el impacto es doble: por un lado, ofrecer una solución biotecnológica viable para la biorremediación de suelos contaminados, como el caso de Seybaplaya, y por otro fomentar una economía circular en la región al transformar un residuo en un producto de valor.

En este contexto, la ciencia nos recuerda que las soluciones a los grandes problemas ambientales pueden encontrarse en lo más pequeño. Este proyecto demuestra cómo la biotecnología, basada en microorganismos nativos y prácticas



sostenibles, puede ser clave para una agricultura más limpia, resiliente y justa.

Sin embargo, el tema de biorremediación con residuos lignocelulósicos aun enfrenta retos que deben considerarse para garantizar la viabilidad y eficiencia a largo plazo del proyecto. Uno de ellos es la variabilidad en la composición de los residuos agrícolas, debido a que depende de los tipos de cultivo, la época del año y el manejo postcosecha. Aunado a pretratamientos como molienda, secado o hidrólisis para liberar nutrientes accesibles que aún se deben investigar. En este sentido, para avanzar en la estandarización de protocolos y garantizar los resultados es necesario tener un control de composición y calidad de la materia prima (Figura 6).

Como grupo de trabajo, superar estos retos requerirá de una planificación interdisciplinaria que integre los conocimientos y experiencias en Ingeniería Biotecnológica, microbiología, ciencia de biomateriales y gestión ambiental. Aún con estos desafíos, el aprovechamiento de residuos como el pseudotallo de plátano y la fibra de palma de aceite representa una estrategia sustentable, alternativa real y prometedora para transformar desechos en recursos valiosos que impulsen la biotecnología y la agricultura sostenible en México.

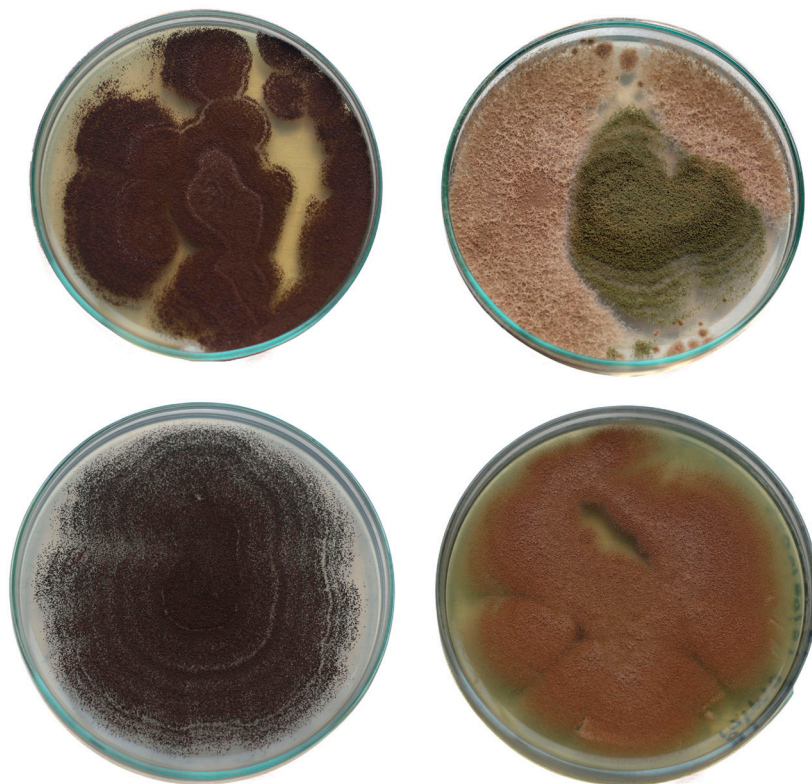


Figura 6. Estos cultivos bacterianos y fúngicos, extraídos de suelos agrícolas campechanos, crecen en medios alternativos. En lugar de usar agares de laboratorio costosos, se prueban sustratos más económicos, a menudo basados en los mismos desechos agrícolas de la región. El objetivo: encontrar una forma sostenible y escalable de reproducir microorganismos benéficos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Palenque (UPI-IP-IPN) y a la Asociación Cañera de Seybaplaya Campeche dirigida por la Ingeniería Industrial en Producción Landy Rivera por las atenciones presentadas para el trabajo de campo.



REFERENCIAS

- Arias-Castro, E., Castrejón-Godínez, M. L., Mussali-Galante, P., Tovar-Sánchez, E., & Rodríguez, A. (2025). *Pesticides degradation through microorganisms immobilized on agro-industrial waste: A promising approach for their elimination from aquatic environments*. *Processes*, 13(4), 1073. <https://doi.org/10.3390/pr13041073>
- Astudillo, Á., Rubilar, O., Briceño, G., Diez, M. C., & Schalchli, H. (2023). *Advances in agro-industrial waste as a substrate for fermentation processes*. *Sustainability*, 15(4), 3467. <https://doi.org/10.3390/su15043467>
- Badanayak, P., Jose, S., & Bose, G. (2023). *Banana pseudostem fiber: A critical review on fiber extraction, characterization, and surface modification*. *Journal of Natural Fibers*, 20(1). <https://doi.org/10.1080/15440478.2023.2168821>
- Bi, R., Ou, M., Zhou, S., Geng, S., Zheng, Y., Chen, J., ... Fang, B. (2023). *Degradation strategies of pesticide residue: From chemicals to synthetic biology*. *Synthetic and Systems Biotechnology*, 8(2), 302–313. <https://doi.org/10.1016/j.synbio.2023.03.005>
- Choudhury, D., Hossen, M. S., Karim, R., & Hasan, M. M. (2017). Oil palm fiber biodegradation: Physico-chemical and structural relationships. *Industrial Crops and Products*, 109, 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.08.002>
- Cuadrado-Orsorio, P. D., et al. (2022). *Agro-industrial residues for microbial bioproducts*. *Science of the Total Environment*, 823, 153611. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153611>
- Díaz, S., Romero, A., Rodríguez, F., & Pérez, L. (2023). Oligosaccharides production by enzymatic hydrolysis of banana pseudostem pulp (BPP). *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(2), 1231–1242. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02033-4>
- E.J. Ordoñez-Frías, J.A. Azamar-Barrios, E. Mata-Zayas, O. Silván-Hernández, L. Pampillón-González, (2020) Bioenergy potential and technical feasibility assessment of residues from oil palm processing: A case study of Jalapa, Tabasco, Mexico. *Biomass and Bioenergy*, 142 (105668). <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105668>.
- Girelli, A. M., Astolfi, M. L., & Scuto, F. R. (2020). Agro-industrial wastes as potential carriers for enzyme immobilization: A review. *Chemosphere*, 244, 125368. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125368>
- Hernández-Leal, R., Licona-Aguilar, Á. I., Domínguez-Crespo, M. A., Ramírez-Meneses, E., Rodríguez-Salazar, A. E., Juárez-Balderas, C., Brachetti-Sibaja, S. B., & Torres-Huerta, A. M. (2025). Engineering to Improve Mechanical Properties of Nanocellulose Hydrogels from Aloe Vera Bagasse and Banana Pseudostem for Biomedical Applications. *Polymers*, 17(12), 1642. <https://doi.org/10.3390/polym17121642>
- Jaiswal, D. K., et al. (2023). Microbial co-cultures: A new era of synthetic biology and environmental restoration. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1235565. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1235565>
- Jayaweera, M. W., Bandara, W. M. S., Soysa, R., Ruwandeepika, H. A. D., & Gunatilake, S. R. (2022). Bioremediation of pesticide-contaminated soil: A review on the indispensable role of soil bacteria. *Environmental Technology & Innovation*, 28, 102841. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102841>
- Khan, A., et al. (2023). Microbial bioformulation: Immobilizing microbial cells and using carriers to preserve efficacy of bioinoculants. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11, 1054438. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1054438>
- Liu, J., et al. (2022). Construction and comparison of synthetic microbial consortia for acetochlor degradation. *Journal of Hazardous Materials*, 438, 129502. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129502>
- Liu, Y., Liu, Y., Cao, Y., & Wang, C. (2025). Pretreatment of palm kernel cake by enzyme-bacteria and its effects on growth performance in broilers. *Animals*, 15(2), 116. <https://doi.org/10.3390/ani15020116>
- Lopes, F. C., Nunes, J. A., & Belo, I. (2021). Agro-industrial residues: Eco-friendly and inexpensive substrates for microbial pigment production. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 589414. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.589414>
- Moretti, R., Dos Santos, L. A., & Silva, F. A. (2025). Banana pseudostem as a supplementary medium for the growth of probiotic strains. *Fermentation*, 11(8), 476. <https://doi.org/10.3390/fermentation11080476>
- Ogundolie, F. A., Babalola, O. O., Adetunji, C. O., Aruwa, C. E., Manjia, J. N., & Muftaudeen, T. K. (2024). A review on bioremediation by microbial immobilization, An effective alternative for wastewater treatment. *AIMS Environmental Science*, 11(6), 918–939. <https://doi.org/10.3934/envirosci.2024046>
- Pereira, R. S., et al. (2024). Application of an agro-waste for the immobilization of an extracellular fructosyltransferase from *Aspergillus oryzae*. *Journal of the Brazilian Chemical Society*. <https://doi.org/10.1002/jbchs.202400045>
- Sathitkowitzai, W., Phusantisampan, T., Riansa-ngawong, W., & Krajang, M. (2022). Selection of pretreatment method and mannanase enzyme for efficient utilization of palm kernel cake in lignocellulose hydrolysis. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 198, 112012. <https://doi.org/10.1016/j.molcatb.2022.112012>
- SADER. (2023). *Producción para el Bienestar, parte fundamental del cambio paradigmático de políticas para el campo*. <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/produccion-para-el-bienestar-parte-fundamental-del-cambio-paradigmatico-de-politicas-para-el-campo>
- Sharma, A., Sharma, P., Singh, J., Singh, S., & Nain, L. (2020). Prospecting the potential of agroresidues as substrate for microbial flavor production. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 18. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00018>
- Shinoj, S., Visvanathan, R., Panigrahi, S., & Kochubabu, M. (2011). Oil palm fiber (OPF) and its composites: A review. *Industrial Crops and Products*, 33(1), 7–22. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.09.009>
- Vučurović, D., & Razmovski, R. (2024). Biotechnological utilization of agro-industrial residues: A review. *Foods*, 13(5), 711. <https://doi.org/10.3390/foods13050711>
- Zhang, C. L., Wang, C., Dong, Y. S., Yang, H., & Li, X. (2024). Dynamic immobilization of bacterial cells on biofilm in a polyester nonwoven chemostat. *Bioresources and Bioprocessing*, 11, 17. <https://doi.org/10.1186/s40643-024-00732-0>
- Zhang, T., Li, Y., & Zhou, Y. (2022). Microbial consortia are needed to degrade soil pollutants. *Environmental Microbiology Reports*, 14(3), 440–454. <https://doi.org/10.1111/1758-2229.13080>
- Zhang, Z., Fan, Z., Zhang, G., Qin, L., & Fang, J. (2021). Application progress of microbial immobilization technology based on biomass materials. *Bioresources*, 16(4), 8798–8812. <https://doi.org/10.15376/biores.16.4.8798-8812>