

MICROORGANISMOS EFICIENTES EN EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES: REVISIÓN DE TÉCNICAS Y APLICACIONES

EFFICIENT MICROORGANISMS IN EFFLUENT TREATMENT: REVIEW OF TECHNIQUES AND APPLICATIONS

Figueroa-Barrios. T.^{1*}, Pérez-Pino. L.¹, Entrena-García. A.¹, Herrera-Cárdenas. J. A.²

¹Centro Nacional de Producción de Animales de Laboratorio. Calle 3^{ra} No. 40759, entre 6^a y Carretera de Tirabeque, Reparto La Unión; Municipio Boyeros, Provincia La Habana Cuba.
Teléfono: (+52) 72152279 ext. 403

²Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros. Prolongación Reforma 168 Barrio de Santiago Mihuacan, C. P. 74420 Izúcar de Matamoros, Puebla, México.

*Autor de correspondencia: teresa.figueroa@cenpalab.cu

Recibido: 26/mayo/2025

Aceptado: 20/junio/2025

RESUMEN

Los microorganismos han jugado un papel fundamental en diferentes procesos de biorremediación, debido a su eficiencia para la degradación de múltiples contaminantes, casi hasta la completa mineralización. Se ha observado que el uso de consorcios microbianos potencializa el efecto degradador de los microorganismos en diferentes matrices contaminadas. Desde hace algunas décadas, surgió una tecnología denominada “microorganismos eficientes, de montaña, o autóctonos”, la cual consiste en la obtención de un consorcio de microorganismos aislados de áreas naturales poco perturbadas, las cuales se cultivan y se activan bajo condiciones controladas para aplicarse a diversos procesos. El objetivo de este trabajo fue hacer una revisión sistemática los trabajos publicados de 2007 a 2024, con la finalidad de identificar aspectos analíticos que permita replicar esta tecnología en la depuración de agua. Se identificaron, la melaza, residuos de cereales, y suero de leche, como componentes comunes para la obtención de la masa madre y activación de los microorganismos. Algunos trabajos reportaron que la densidad microbiana del consorcio oscila entre 22,000 y 36,000 UFC/ml. Con relación a la eficiencia de remoción, se reportaron reducciones de: 54% de DBO₅, 62% de sólidos sedimentables, 67% de DQO, y 97% de cromo hexavalente. Se

concluye que, es una tecnología prometedora, pero que requiere una evaluación más detallada para determinar las dosis, frecuencia, y condiciones de aplicación en la descontaminación de efluentes urbanos.

Palabras clave: *Tratamiento biológico, Cepas nativas, Contaminación del agua.*

ABSTRACT

Microorganisms have played a fundamental role in various bioremediation processes due to their efficiency in degrading multiple contaminants, almost to the point of complete mineralization. The use of microbial consortia has been observed to enhance the degrading effect of microorganisms in various contaminated matrices. For several decades now, a technology called “efficient, mountain, or native microorganisms” has emerged. This technology involves obtaining a consortium of microorganisms isolated from undisturbed natural areas. These microorganisms are cultivated and activated under controlled conditions for application in various processes. The objective of this paper was to review published works from 2007 to 2024, with the aim of identifying analytical aspects that will allow this technology to be replicated in water purification. A total of 100 studies were reviewed, reporting that components such as molasses, cereal residues, and whey are common sources of sourdough starter and microbial activation. Microbiological characterization of this consortium is performed for each family of microorganisms, and microbial densities in commercial products or experimentally obtained inoculant range from 36,000 to 22,000 CFU/ml. Data on the dosage of this inoculum are unclear; however, its effectiveness in removing organic matter and heavy metals is reported. It is concluded that this technology is promising, but requires more detailed evaluation to determine the dosage, frequency, and application conditions for urban effluent remediation.

Key words: *Biological treatment, Native strains, Water contamination.*

INTRODUCCIÓN

Las descargas de aguas residuales urbanas sin tratar siguen representando un serio problema de contaminación, sobre todo en países subdesarrollados o en vías de desarrollo (Jarvis, 2020). El acceso a fuentes de agua limpia es una prioridad para la población, debido a que los efluentes urbanos son la causa de múltiples problemas de salud. Ante esta problemática, las políticas e

iniciativas gubernamentales juegan un papel primordial en su manejo adecuado (Obaideen et al., 2022). No obstante, las propuestas de solución deben diseñarse considerando prioridades y limitaciones locales, que garanticen los resultados esperados, y de esta manera, se avance hacia el cumplimiento de los ODS de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas para el desarrollo sostenible (Delanka et al., 2021).

Desde principios del siglo XXI la reutilización se ha considerado como una alternativa sostenible para cumplir con la demanda de agua en la población (Miller, 2006). Sin embargo, para poder reutilizarla, deben cumplirse ciertos parámetros de calidad que garanticen su uso seguro (Paranychianakis et al., 2015). En este contexto, las plantas de tratamiento emergieron como soluciones eficientes para la eliminación o reducción de la carga contaminante. Las primeras surgieron a mediados del siglo XX (Armenta, 2024), como una solución a la contaminación de los cuerpos receptores, derivado del vertido de aguas crudas. Sin embargo, debido al crecimiento de la actividad industrial, y el incremento poblacional, continuamente surgen nuevos contaminantes, lo que dificulta su saneamiento por los tratamientos convencionales (Chatzisyneon, 2021).

De acuerdo con “Estadísticas del Agua en México 2023”, publicado por la Comisión Nacional del Agua (2024), en 2022 las 2,774 plantas de tratamiento de aguas residuales instaladas en el país trataron 143.5 m³/s, lo que equivale a poco más del 60% de los efluentes colectados por los sistemas de alcantarillado. Los procesos biológicos como, lodos activados, lagunas, filtros biológicos y lagunas aireadas, representan el 73.56%, 11.56%, 4.39% y 3.65%, respectivamente, de los procesos utilizados para el tratamiento de aguas residuales urbanas en el país. Lo que posiciona a los tratamientos biológicos como técnicas viables y eficientes para el manejo de efluentes urbanos (Ahammad et al., 2020).

Los tratamientos biológicos poseen múltiples aplicaciones, se han implementado en mineralización, degradación, y neutralización de un gran número de contaminantes orgánicos e inorgánicos, presentes en aguas residuales y ecosistemas perturbados (Saini et al., 2023). Se ha reportado su uso para, control de olores en plantas tratadoras de aguas residuales (Fan et al., 2020), manejo de lixiviados (Ilmasari et al., 2022), generación de biogas y su potencial en la recuperación

de nutrientes para la agricultura, como el nitrógeno y el fósforo (Chojnacka et al., 2020; Kesari et al., 2021; Aslam et al., 2022).

Los procesos biológicos, al estar basados en la naturaleza, suelen ser menos mecanizados y pueden implementarse en cualquier escenario geográfico, por lo que contribuyen significativamente a la reducción de la carga contaminante (Gupta et al., 2021; Sathya et al., 2023). Se pueden desarrollar en condiciones aerobias, anaerobias y anóxicas (Azanaw et al., 2022). Algunos de los procesos biológicos que se han implementado para la depuración de efluentes domésticos son: lagunas facultativas, lodos activados, filtros percoladores, reactor discontinuo secuencial, biorreactor de membrana, contactor biológico rotatorio, reactor de biopelícula de lecho móvil y manto anaeróbico de lodos de flujo ascendente (Musa e Idrus, 2021; Khalil y Liu, 2021).

Estos procesos de biorremediación son técnicas modernas, alternativas a los procesos convencionales, por lo que desempeñan una función crucial para el manejo de aguas residuales (Saini et al., 2023). Su capacidad de depuración depende de parámetros fisicoquímicos como: el pH, la temperatura, el tiempo de retención, la capacidad de carga, las características del efluente y la biomasa (Musa e Idrus, 2021). Los cuales, además de influir sobre la eficiencia de remoción, también determinan la composición de la comunidad bacteriana (Acharya et al., 2020). Por lo que, cualquier cambio en el desarrollo de la microbiota determinará su eficiencia de depuración (Tang et al., 2022). En este contexto, se ha demostrado que, el uso de consorcios microbianos mejora significativamente la eficiencia de remoción a diferencia de los cultivos puros (Ahmed et al., 2020). Un consorcio microbiano es una asociación natural de dos o más poblaciones de microorganismos que actúan de manera conjunta para un objetivo en específico (Ochoa y Montoya, 2010).

El uso de consorcios es efectivo para la degradación de contaminantes complejos, debido a que son más adaptables y estables a las condiciones del entorno. Proporcionan un medio catalítico idóneo para cada proceso enzimático que se requiera durante la degradación (Cao et al., 2022). Generalmente, estos consorcios provienen de sedimentos, suelos contaminados y lodos de depuradoras (Lü et al., 2024). Sin embargo, con el uso de herramientas de ingeniería metabólica, se logran procesos de depuración más específicos y estables (Li et al., 2021). El uso de la biotecnología y la manipulación microbiológica, son técnicas potenciales para optimizar la

capacidad de depuración, por lo que, se consideran metodologías innovadoras para mitigar los desafíos ambientales que representa el manejo de las aguas residuales (Mohan et al., 2024).

Para optimizar el rendimiento de los procesos de biorremediación, se requiere estudiar la variedad y sus proporciones relativas para la determinación de especies y cepas estables que se puedan aplicar al tratamiento de efluentes (Mu et al., 2021). Así como los procesos microbianos y nutrientes requeridos (Jefferson et al., 2001). En este contexto, con la ayuda de la ingeniería metabólica y la biología sintética se pueden obtener consorcios con alto potencial de degradación, lo que facilitaría el uso eficiente de sustratos y la remediación del entorno (Cao et al., 2022). La exploración e implementación de nuevas comunidades microbianas permitirá la modernización de los procesos de tratamiento convencional, con lo que se resolverían nuevos desafíos, incluida la eliminación de contaminantes emergentes (Wu y Yin, 2020).

Se han reportado la eficiencia de estos consorcios en la remoción de: fenantreno y dibenzotiofeno como única fuente de carbono, logrando una eliminación del 100% en 5 días con un sistema a escala (Zhang et al., 2021). En otro estudio se logró una remoción máxima de la demanda química de oxígeno (DQO) y nitrógeno, de 75.9% y 79.7%, respectivamente, en un sistema que utilizó un consorcio inmovilizado sobre fibra de coco (Memon et al., 2020). Por otra parte, Aguilar-Romero et al., (2024) reportaron un 66% de la mineralización del ibuprofeno con 3 días de tratamiento, y después del enriquecimiento de la bacteria *Sphingomonas wittichii*, se logró el 99% de la mineralización con 16 días de tratamiento.

Al respecto, a nivel Latinoamérica se han publicado trabajos donde se reporta el uso de un consorcio microbiano, denominado “microorganismos eficientes (ME), microorganismos de montaña o autóctonos” (Calero-Hurtado, et al., 2019a). El cual está conformado por, bacterias ácido-lácticas, bacterias fotosintéticas, levaduras, actinomicetos, y hongos filamentosos con potencial fermentativo (Tanya-Morocho et al., 2019). Estos microorganismos se extraen de sitios no perturbados y se propagan bajo condiciones controladas. La tecnología fue desarrollada por el profesor Teuro Higa, profesor de horticultura de la Universidad de Ryukyus en Okinawa, Japón, quien observó que estos trabajan en sinergia, y que el efecto de la mezcla es mayor al que poseen individualmente (Faife-Pérez et al., 2018).

Los ME se han estudiado como una alternativa sustentable para diferentes aplicaciones en agricultura (Calero-Hurtado et al., 2020) ganadería (Zamora-Dávila et al., 2020) y tratamiento de efluentes contaminados (Esperanza-Pérez et al., 2022). A pesar de los reportes dispersos sobre ME, falta un análisis unificado de parámetros críticos (dosis, condiciones óptimas) para su escalado en tratamiento de aguas urbanas. Por lo que, el objetivo de este trabajo fue realizar una revisión sistemática de los trabajos publicados en los principales bancos de información científica, con la finalidad de identificar, técnicas de inoculación, activación, aplicaciones, dosis, y beneficios de los ME.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó una búsqueda bibliográfica en *Google Scholar* y *sciencedirect* a través de las siguientes palabras: microorganismos eficientes y su traducción al inglés *efficient microorganisms*. No se estableció un periodo específico, sin embargo, se recuperaron publicaciones del 2007 al 2024. Se consideraron todos los trabajos reportados, omitiendo tesis, presentaciones en congreso y otros trabajos que no cumplieran con los componentes básicos de una publicación científica (resumen, introducción, materiales y métodos, resultados y discusión, y conclusiones). No se consideraron presentaciones en congresos y tesis, bajo el supuesto de que no se trata de resultados validados.

De cada trabajo se identificó la siguiente información: origen del inóculo, formulación de la masa madre, activación, días de maduración, el uso de los ME, la forma y dosis de aplicación, y las técnicas analíticas empleadas para analizar la densidad microbiana de los inóculos empleados (tipo de agar, dilución y condiciones de incubación). La información fue organizada en una matriz de Excel y los resultados se evaluaron, mediante, nubes de palabras, gráficos de frecuencias y otras herramientas estadísticas.

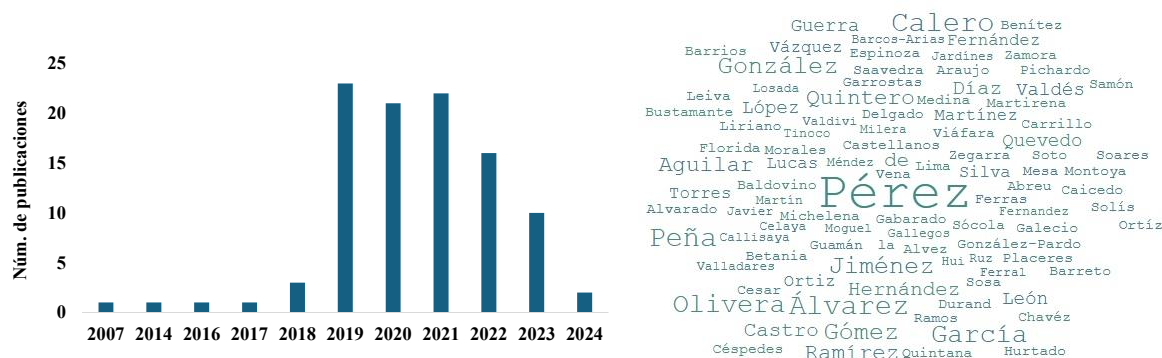
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se identificaron 100 trabajos publicados de 2007 a 2024, de los cuales, el 84% corresponden a resultados de investigaciones relacionadas con el tema de los microorganismos eficientes, y el resto a trabajos de revisión. En la Figura 1 se observa que el máximo de publicaciones generadas fue en el periodo 2019-2022, con un promedio anual de 22 publicaciones. Los apellidos que se identificaron con mayor frecuencia, de acuerdo con la nube de palabras que se muestra en la figura

1 son: Pérez, Calero, Álvarez, Olivera, García, y Quintero, cuyas instituciones de adscripción corresponden a instituciones de educación superior, o empresas, establecidas en Cuba y Brasil.

Los trabajos revisados corresponden a publicaciones generadas por 10 países de América Latina, sin embargo, Cuba, Ecuador, México y Brasil, han contribuido con el 80.4% de los trabajos revisados. El 44% de las publicaciones reportan la aplicación de los ME en agricultura, el 19.8% en ganadería, el 14.3% para el tratamiento de residuos, el 12% para la depuración de agua, 2.2% para tratamiento de semillas, y el resto para aplicaciones diversas. Entre las aplicaciones agrícolas, el 55.5% de los trabajos reportan su uso como biofertilizantes, el 18.5% para el control de plagas y el 25.9% como bioestimulante. Los cultivos con los que más se ha experimentado el efecto de los ME (tres o más trabajos reportados), son: frijol, jitomate, pepino, pimiento, y café.

Figura 1. Evolución de las publicaciones y contribución de autores, en trabajos relacionados con los ME.



Fuente: elaboración propia.

Depuración de agua

Con relación al uso de ME para el tratamiento de aguas residuales. Gómez (2021) reportó el uso de ME como biofloculantes para el tratamiento del agua en estanques de crianza de tilapias. Carreño et al., (2020) estudió su uso para el control de parámetros de calidad del agua en el río “El Carrizal”, en Ecuador, acoplando con un sistema de filtración por zeolitas. Esperanza-Pérez et al., (2022) aplicaron ME como bioactivadores para un sistema de humedales construidos para el tratamiento de efluentes de un rastro en Villa Clara, Cuba. Vidal et al., (2022) evaluaron su efecto sobre la reducción de metales pesados en aguas de un río en Ecuador; Ortiz et al., (2021) evaluó el efecto de bacilos Grampositivos para la reducción de carga orgánica en aguas residuales vertidas en dos ríos de Ecuador. Asimismo, se han reportado aplicaciones en el tratamiento de aguas

subterráneas (Guanilo et al., 2021), y para remoción de cromo hexavalente en agua residuales derivadas del curtido de pieles (Ordoñez y Benítez, 2019; Delgado-Sarmiento et al., 2020).

Con relación a la eficiencia de remoción, se ha observado que, incrementan significativamente la reducción de la carga orgánica mediante sistemas de humedales construidos inoculados con ME, (Esperanza-Pérez et al., 2022), disminuyen la concentración de metales pesados, utilizando una dosis de 15 ml/L de un consorcio conformado por: *Saccharomices cereviceae*, *Bacillus spp*, y *Lactobacillus spp*, mediante un sistema de filtración con zeolitas (Ortiz et al., 2021), y reducen más del 90% de la concentración de cromo hexavalente en aguas residuales de curtidurías (Ordoñez y Benítez, 2019).

Técnica de propagación

Captura de microorganismos

Para la obtención del consorcio de ME, el procedimiento consiste en la captura de los ME, obtención de la masa madre, seguido de la activación y posterior aplicación. La captura de los ME por lo regular se realiza en sitios naturales y con poca o nula actividad humana, los lugares de donde comúnmente se han obtenido las cepas son; bosques, montañas y suelos de reservas geobotánicas. Se identificaron dos formas de obtener las cepas, la primera mediante la obtención de materia orgánica en descomposición, y la segunda, colocando trampas de arroz cocido, las cuales se dejan durante un periodo y posteriormente se recuperan, seleccionan y se emplean para la preparación de la masa madre.

Obtención de la masa madre

La obtención de la masa madre consiste en la preparación de una mezcla que está conformada por: materia orgánica en descomposición, melaza y residuos de cereales. Con relación al primer componente, se reportan: mantillo de bosque, residuos de frutas, y hojarasca; respecto a los residuos de cereales se ha utilizado: polvillo de arroz, polvillo de trigo, harina de maíz, o salvado de trigo. También se ha reportado el uso de suero de leche o yogurt, y algunos otros componentes como hígado, sal y carbonato de calcio. La humedad de la mezcla, según Torres et al., (2022) debe ser del 70%, por lo que está se debe ajustar utilizando agua libre de cloro. Una vez que se mezclan estos componentes se tapa el recipiente y de acuerdo con los 21 trabajos que reportaron tiempo de maduración de la masa madre, se deja reposar durante un periodo de 10 a 30 días.

Una alternativa al uso de materia orgánica en descomposición de sitios con poca actividad antropogénica es la reportada por Callisaya y Fernández (2017) y Alarcón et al., (2019) quienes mencionaron que, para la obtención de la masa madre, se colocaron recipientes con arroz cocido, sin sal y sin condimentos, en sitios estratégicos, los cuales se cubren con hojarasca, y se recolectan después de 10 días. Una vez obtenidos los microorganismos, se mezclan con, miel de caña, agua sin cloro, y en algunos casos, con suero de leche (Zamora-Davila et al., 2020; Valdéz et al., 2020; Quintana-Utra, et al., 2021; Ramírez et al., 2022) y harina de pescado (Camacho et al., 2019).

Activación

Una vez obtenida la masa madre de ME, se procede a la activación de los microorganismos, este proceso consiste en mezclar una porción de la masa madre, con agua de buena calidad (sin cloro) y melaza (Faife et al., 2018), con la finalidad de conseguir la coexistencia de los microorganismos en un medio líquido (de Araujo et al., 2021). Las proporciones recomendadas, según los trabajos revisados son, del 5 al 10% de melaza y del 80 al 95% de agua. También se reportaron otros componentes como, el suero de leche, yogurt natural y miel de café. Los tiempos de maduración para el proceso de activación oscilan entre 3 y 150 días, siendo 7 días el periodo más reportado. En la figura 2 se observa el esquema general para la producción de ME, desde la obtención de la masa madre, hasta la activación. Los componentes que se muestran en el esquema no son limitativos, ya que, como se mencionó previamente, se ha reportado la adición de otros elementos como, el suero de leche.

Determinación de la densidad microbiana

Para garantizar la eficiencia de estos consorcios microbianos, se requiere hacer un seguimiento de la densidad microbiana de cada familia de microorganismos que componen la mezcla, para ello, de los trabajos revisados, se extrajeron datos como: medio de cultivo, diluciones utilizadas para la cuantificación, y condiciones de incubación. Se reportó el uso de medios de cultivo como: Luria Bertani, caldo nutritivo, y agar con sales de curtiduría. Liriano-González et al., (2019) mencionó que para la caracterización utilizó tres tipos de agar, nutritivo para bacterias, Sabouraud para hongos, y papa dextrosa para levaduras. Por otra parte, Álvarez et al., (2019) reportó los siguientes medios de cultivo, agar Sabouraud para levaduras, agar nutritivo para *Bacillus spp.*, agar Rogosa para *Lactobacillus spp.*, agar avena para *Actinomicetos*, y agar Cetrimide para *Pseudomonas*.

Figura 2. Esquema general de la producción de microorganismos eficientes



Fuente: elaboración propia.

Con relación a las condiciones de incubación, Andrade et al., (2024) reportó 48 h a 35°C para bacterias anaerobias, 120 h a 25° para hongos y 70 h a 30°C para levaduras, estas condiciones son similares a las reportadas por Liriano-González et al., (2019). Por otra parte, Álvarez et al., (2019), menciona en su metodología para caracterización microbiológica las siguientes condiciones: 48 h a temperatura ambiente para levaduras, 24 h a 32°C para *Bacillus*, 48 h a 36°C para *Lactobacillus*, 12 días a temperatura ambiente para *Actinomicetos*, y 48 h a 32°C para *Pseudomonas*. Para la determinación de la densidad microbiana en el producto final, se tomaron alícuotas del producto y se reportó la preparación de diluciones en un rango que oscila entre 10^{-1} y 10^{-13} , las cuales fueron inoculadas de acuerdo con las condiciones que se describieron previamente, las diluciones que se reportaron con mayor frecuencia son de 10^{-4} y 10^{-6} (Zamora-Davila et al., 2020; Medina-Saavedra et al., 2021; Torres et al., 2022).

Productos comerciales

El 52% de los trabajos revisados reportaron el uso de productos comerciales, o consorcios obtenidos en centros de investigación. Los nombres de los productos comerciales que se identificaron en los trabajos son: EM, VIGORTEM, IHPLUS®, ME-50, ME-AgroAmbiental, FitoMas-E®, ME (BioEM), y MEF-32. Con relación al producto ME-50, se reporta que este es elaborado y comercializado por la empresa Labiofam de Sancti Spíritus, Cuba (Negrín et al., 2023).

Las instituciones de las que se reportó el origen del inóculo fueron, Labiofam de Sancti Spiritus, Labiofam de la municipalidad de Matanzas, Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar, Bbo Agro, S. A. de Guayaquil, Ecuador, Universidad de Cienfuegos, y Obra Social Célio Lemos, una institución ubicada en el municipio de São José dos Campos, Brasil. En el Cuadro 1 se observa la composición, y la densidad microbiana, que reportaron siete de los trabajos revisados. Se puede ver que, en los trabajos reportados por Calero Hurtado se mencionan únicamente tres microorganismos, por su parte, Liriano-González reporta tres familias y la manera en que se componen.

Cuadro 1. Composición microbiana de dos productos comerciales reportados en los trabajos revisados.

Nombre comercial	Géneros de bacterias (DM)*	Géneros de hongos y DM*	Géneros de levaduras y DM*	Referencia
ME50	<i>Bacillus subtilis</i> ($5,40 \times 10^4$ UFC/mL), <i>Lactobacillus bulgaricum</i> ($3,60 \times 10^4$ UFC/mL)	NA	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> ($22,30 \times 10^5$ /UFC mL)	Calero et al., 2019, 2019a, 2019b, 2019c, 2020; López-González et al., 2021
FitoMas-E®	<i>Bacillus spp.</i> y <i>Pseudomonas spp</i> (13×10^8 /UFC mL)	<i>Trichoderma</i> , <i>Aspergillus</i> , <i>Rhizopus</i> , <i>Mucor</i> y <i>Penicillium</i> (18×10^5 /UFC mL)	<i>Saccharomyces sp</i> (21×10^6 UFC/mL)	(Liriano-González et al., 2019)

*DM; densidad microbiana. Fuente: elaboración propia.

Esta información ha permitido concentrar la evidencia existente sobre la eficiencia de la tecnología de los ME. Sin embargo, su implementación en sistemas urbanos requiere estandarizar parámetros operativos, un vacío en el que esta revisión contribuyó, y deja las pautas para que en futuras investigaciones se consideren aspectos relevantes que permitan su aplicación para la atención de problemáticas relacionadas con, el rescate de ecosistemas acuáticos perturbados.

CONCLUSIONES

Los ME representan una alternativa para el tratamiento biológico con múltiples aplicaciones para la recuperación de suelos y cuerpos de agua contaminados.

Es una tecnología económicamente viable ya que las fuentes de microorganismos pueden obtenerse de diferentes sitios naturales. Asimismo, existen opciones comerciales que, de acuerdo con los autores, poseen una composición estándar.

Los componentes para la formulación de la masa madre y la activación del consorcio, son fáciles de conseguir, lo cual es una ventaja para aplicar esta tecnología a mayor escala.

En la depuración de agua, los ME han sido utilizados como inoculantes en sistemas de depuración natural y procesos de filtración acoplados con materiales adsorbentes.

Se ha caracterizado la densidad microbiana de este consorcio, tanto en los productos obtenidos a nivel práctico como en los comerciales. Sin embargo, los datos sobre la dosificación del producto no han sido completamente detallados.

Si bien con en esta revisión se concentraron aspectos relevantes sobre la obtención y aplicación de los ME para el tratamiento de agua, es necesario realizar investigaciones más profundas sobre los parámetros operativos de esta tecnología, para que se pueda implementar en el tratamiento de residuales, previo al vertido en cuerpos de agua.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Agencia Española de Cooperación Internacional, a través del Programa Fondo de Cooperación Triangular Unión Europea –Cuba – América Latina y El Caribe, en el marco de ADELANTE 2 DCI/LA/2021/428-793. Por el financiamiento recibido para participar en el Taller teórico – práctico, sobre la tecnología de producción de microorganismos eficientes por métodos biotecnológicos en Cuba y su aplicación en el tratamiento de residuales.

REFERENCIAS

- Acharya, S. M., Chakraborty, R., & Tringe, S. G. (2020). Emerging trends in biological treatment of wastewater from unconventional oil and gas extraction. *Frontiers in Microbiology*, 11, 569019.
- Aguilar-Romero, I., Madrid, F., Villaverde, J., & Morillo, E. (2024). Ibuprofen-enhanced biodegradation in solution and sewage sludge by a mineralizing microbial consortium. Shift in associated bacterial communities. *Journal of Hazardous Materials*, 464, 132970.

Ahammad, S. Z., Graham, D. W., & Dolfing, J. (2020). Wastewater treatment: biological. In *Managing Water Resources and Hydrological Systems* (pp. 561-576). CRC Press.

Ahmed, P. M., de Figueroa, L. I., & Pajot, H. F. (2020). Application of microbial consortia in degradation and detoxification of industrial pollutants. *Microorganisms for sustainable environment and health*, 401-418.

Alarcón, J., Recharte, D., Yanqui, F., Moreno, S., Montes, I., & Buendía, M. (2019). *Elaboración de un biofertilizante a partir de microorganismos eficientes autóctonos en Perú. Anales Científicos*, 80 (2), 515-522.

Álvarez-Vera, M. S., Soto-Valenzuela, J. O., Quevedo-Vázquez, J. O., & Giler-Escandón, L. V. (2019). Obtención de consorcios microbianos benéficos y su incidencia en la población microbiana nativa de la rizósfera de plantas de fresa (*Fragaria sp.*). *Polo del conocimiento*, 4(11), 149-179.

Andrade, G. J. P., Carlos, L. J., Novaes, S. M., Santos, J. A. C., Moreira, M. M. (2021). Uso de microorganismos eficientes y FitoMas-E® para aumentar el crecimiento y la calidad de plántulas de pimiento (*Capsicum annuum* L.). *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín*. 74(3): 9699-9706.

Armenta H. (13 de febrero de 2024). Plantas de tratamiento de aguas residuales. HUMBERTO ARMENTA. <https://humbertoarmenta.mx/plantas-de-tratamiento-de-aguas-residuales/#:~:text=En%201956%20se%20construy%C3%B3%20la,capacidad%20de%20160%201%2Fs>.

Aslam, A., Khan, S. J., & Shahzad, H. M. A. (2022). Anaerobic membrane bioreactors (AnMBRs) for municipal wastewater treatment-potential benefits, constraints, and future perspectives: An updated review. *Science of the total Environment*, 802, 149612.

Azanaw, A., Birlie, B., Teshome, B., & Jemberie, M. (2022). Textile effluent treatment methods and eco-friendly resolution of textile wastewater. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 6, 100230.

Calero Hurtado, A., Olivera Viciado, D., Pérez Díaz, Y., González-Pardo Hurtado, Y., Yáñez Simón, L. A., & Peña Calzada, K. (2020). Manejo de diferentes densidades de plantación y aplicación de microorganismos eficientes incrementan la productividad del arroz. *Idesia (Arica)*, 38(2), 109-117.

Calero Hurtado, A., Pérez Díaz, Y., Quintero Rodríguez, E., Olivera Viciado, D., & Peña Calzada, K. (2019). Efecto de la aplicación asociada entre *Rhizobium leguminosarum* y microorganismos eficientes sobre la producción del fríjol común. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 20(2), 295-322.

Calero Hurtado, A., Quintero Rodríguez, E., Pérez Díaz, Y., González-Pardo Hurtado, Y., & González Lorenzo, T. N. (2019a). Microorganismos eficientes y vermicompost lixiviado aumentan la producción de pepino. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 22(2).

Calero, A., Quintero, E., Pérez, Y., Olivera, D., Peña, K., Castro, I., & Jiménez, J. (2019b). Evaluación de microorganismos eficientes en la producción de plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista de Ciencias Agrícolas*, 36(1), 67-78.

Calero, H. A. (2020). Respuesta agroproductiva de la habichuela (*Phaseolus vulgaris* L.) a la aplicación de vermicompost lixiviado y microorganismos eficientes. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 9(1), 112-124.

Calero-Hurtado, A., Pérez Díaz, Y., Olivera Viciado, D., Quintero Rodríguez, E., Peña Calzada, K., Theodore Nedd, L. L., & Jiménez Hernández, J. (2019c). Efecto de diferentes formas de aplicación de microorganismos eficientes en la productividad agronómica de dos cultivares de fríjol. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 72(3), 8927.

Callisaya Quispe, Y., & Fernández Chávez, C. M. (2019). Evaluación del efecto que tienen los microorganismos eficientes (EM), en el cultivo de pepinillo (*Cucumis sativus* L.), municipio de Achocalla. *Apthapi*, 3, 652.

Camacho, J. A., Pineda, D. C. R., Díaz, F. Y., LLacza, M. M., Yarasca, I. M., & Molina, M. A. B. (2019). Elaboración de un biofertilizante a partir de microorganismos eficientes autóctonos en Perú. In *Anales Científicos* (Vol. 80, No. 2, pp. 515-522). Universidad Nacional Agraria La Molina.

Cao, Z., Yan, W., Ding, M., & Yuan, Y. (2022). Construction of microbial consortia for microbial degradation of complex compounds. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, 1051233.

Carreño, Á., Lucas, L., Hurtado, E., Barrios, R., & Silva, R. (2020). Adecuación para consumo humano de propiedades físicas de aguas del río Carrizal, Ecuador, a través de microorganismos eficientes y filtración con zeolitas. *Tecnología y ciencias del agua*, 11(6), 368-399.

Chatzisyneon, E. (2021). Application of biological and chemical processes to wastewater treatment. *Water*, 13(13), 1781.

Chojnacka, K., Skrzypczak, D., Szopa, D., Izydorczyk, G., Moustakas, K., & Witek-Krowiak, A. (2023). Management of biological sewage sludge: Fertilizer nitrogen recovery as the solution to fertilizer crisis. *Journal of Environmental Management*, 326, 116602.

Comisión Nacional del Agua. (2024). Estadísticas del Agua en México 2023. Gobierno de México. https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/port_publicaciones.html

de Araujo Avila, G. M., Gabardo, G., Clock, D. C., & de Lima Junior, O. S. (2021). Use of efficient microorganisms in agriculture. *Research, Society and Development*, 10(8), e40610817515-e40610817515.

Delanka-Pedige, H. M. K., Munasinghe-Arachchige, S. P., Abeysiriwardana-Arachchige, I. S. A., & Nirmalakhandan, N. (2021). Evaluating wastewater treatment infrastructure systems based on UN Sustainable Development Goals and targets. *Journal of Cleaner Production*, 298, 126795.

Delgado-Sarmiento, P., Durand, A., Zegarra, P., Jiménez, H., Alvarez, V., & Vena, G. (2020). Biorremediación de cromo VI mediante el uso de *rhodopseudomonas palustris* en efluentes industriales provenientes de curtiembres. *Revista Boliviana de Química*, 37(1), 21-27.

Esperanza Pérez, G., Jiménez Prieto, Y., & Rasúa, M. D. C. M. (2022). Humedales construidos bioactivados con microorganismos eficientes: una vía para la gestión de residuales en el matadero Chichí Padrón. *Centro Azúcar*, 49(3), 57-68.

Faife-Pérez, E., Roget-Guevara, D., Fandiño-Rodríguez, C. A., Pérez-Bermúdez, I., de la Hoz-Izquierdo, Y., Tortoló-Cabañas, K., & Michelena-Álvarez, G. (2018). Empleo de microorganismos eficientes como alternativa para el tratamiento de residuales. Revisión bibliográfica. *sobre los derivados de la caña de azúcar*, 52 (2), 30-40.

Fan, F., Xu, R., Wang, D., & Meng, F. (2020). Application of activated sludge for odor control in wastewater treatment plants: approaches, advances and outlooks. *Water Research*, 181, 115915.

- Gómez, A. (2021). Uso de microorganismos eficientes con tecnología biofloc en la producción de tilapias. *Revista Oratores*, (15), 24-44.
- Guanilo, R., Cornejo, J., Zamora, C., Quevedo, T., & García-Seminario, R. (2021). Microorganismos eficientes en la descontaminación de agua subterránea y su implicancia en la producción y calidad de lechuga hidropónica. *Manglar*, 18(1), 77-82.
- Gupta, S., Mittal, Y., Panja, R., Prajapati, K. B., & Yadav, A. K. (2021). Conventional wastewater treatment technologies. *Current developments in biotechnology and bioengineering*, 47-75.
- Ilmasari, D., Kamyab, H., Yuzir, A., Riyadi, F. A., Khademi, T., Al-Qaim, F. F., Kirpichnikova, I. & Krishnan, S. (2022). A review of the biological treatment of leachate: Available technologies and future requirements for the circular economy implementation. *Biochemical Engineering Journal*, 187, 108605.
- Jarvis, P. (2020). Environmental technology for the sustainable development goals (SDGs). *Environmental Technology*, 41(17), 2155-2156.
- Jefferson, B., Burgess, J. E., Pichon, A., Harkness, J., & Judd, S. J. (2001). Nutrient addition to enhance biological treatment of greywater. *Water research*, 35(11), 2702-2710.
- Kesari, K. K., Soni, R., Jamal, Q. M. S., Tripathi, P., Lal, J. A., Jha, N. K., Siddiqui, M. H., Kumar, P., Tripathi, V. & Ruokolainen, J. (2021). Wastewater treatment and reuse: a review of its applications and health implications. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232, 1-28.
- Khalil, M., & Liu, Y. (2021). Greywater biodegradability and biological treatment technologies: A critical review. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 161, 105211.
- Li, X., Wu, S., Dong, Y., Fan, H., Bai, Z., & Zhuang, X. (2021). Engineering microbial consortia towards bioremediation. *Water*, 13(20), 2928.
- Liriano Gonzáles, R., Pérez Ramos, J., Pérez Hernández, Y., Placeres Espinosa, I., Rodríguez Jiménez, S. L., & Peña Alonso, D. (2019). Mejoramiento de la productividad agrícola de la lechuga y el rábano con el uso de microorganismos eficientes.
- Lü, H., Wei, J. L., Tang, G. X., Chen, Y. S., Huang, Y. H., Hu, R., Mo, C. H., Zhao, H. M., Xiang, L., Li, H. W., Cai, Q. Y., & Li, Q. X. (2024). Microbial consortium degrading of organic pollutants:

Source, degradation efficiency, pathway, mechanism and application. *Journal of Cleaner Production*, 141913.

Medina-Saavedra, T., Dzul-Cauich, J., Arroyo-Figueroa, G., García-Vieyra, I., Quiñones-Páramo, M., & Mexicano-Santoyo, L. (2021). Microorganismos de montaña y ensilado de maíz como probióticos en la engorda de conejos. *Abanico veterinario*, 11.

Memon, H., Lanjewar, K., Dafale, N., & Kapley, A. (2020). Immobilization of microbial consortia on natural matrix for bioremediation of wastewaters. *International Journal of Environmental Research*, 14(4), 403-413.

Miller, G. W. (2006). Integrated concepts in water reuse: managing global water needs. *Desalination*, 187(1-3), 65-75.

Mohan, C., Robinson, J., Vodwal, L., & Kumari, N. (2024). Sustainable Development Goals for addressing environmental challenges. In *Green chemistry approaches to environmental sustainability* (pp. 357-374). Elsevier.

Mu, R., Jia, Y., Ma, G., Liu, L., Hao, K., Qi, F., & Shao, Y. (2021). Advances in the use of microalgal–bacterial consortia for wastewater treatment: Community structures, interactions, economic resource reclamation, and study techniques. *Water environment research*, 93(8), 1217-1230.

Musa, M. A., & Idrus, S. (2021). Physical and biological treatment technologies of slaughterhouse wastewater: a review. *Sustainability*, 13(9), 4656.

Negrín, A. M. E., González, L. L., & Hernández, J. J. (2023). Effect of pretreatment with efficient microorganisms on anaerobic digestion of rice drying residue. *Afinidad. Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry*, 80(600), 261-266.

Obaideen, K., Shehata, N., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., Mahmoud, M. S., & Olabi, A. G. (2022). The role of wastewater treatment in achieving sustainable development goals (SDGs) and sustainability guideline. *Energy Nexus*, 7, 100112.

Ochoa Carreño, D. C., & Montoya Restrepo, A. (2010). Consorcios microbianos: una metáfora biológica aplicada a la asociatividad empresarial en cadenas productivas agropecuarias. *Revista Facultad de Ciencias Económicas: Investigación y Reflexión*, 18(2), 55-74.

- Ordoñez Burbano, D. E., & Benítez-Campo, N. (2019). Remoción de cromo trivalente en aguas residuales de curtiembres mediante un proceso biótico-abiótico basado en el uso de *Yarrowia lipolytica* y *Candida fluvialis*. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 35(4), 945-956.
- Ortiz, D., Anrango, M. J., Pérez, H., Chela, L., Villagrán, G., & Fernandez, L. (2021). Uso de microorganismos eficientes para la depuración de contaminantes orgánicos en aguas residuales urbanas. *Ecuadorian Science Journal*, 5(3), 355-362.
- Paranychianakis, N. V., Salgot, M., Snyder, S. A., & Angelakis, A. N. (2015). Water reuse in EU states: necessity for uniform criteria to mitigate human and environmental risks. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(13), 1409-1468.
- Quintana Utra, M. D., Hernández González, A., & Saraiba Macias, A. (2021). Efecto probiótico de microorganismos eficientes (ME-AgroAmbiental) sobre indicadores bioproductivos en cerdos Yorkland de preceba. *Revista de Salud Animal*, 43(3).
- Ramírez, E., Prin, J. L., & de Astudillo, L. R. (2022). Evaluación del Efecto de los Microorganismos eficientes en el suelo usando Microscopía Electrónica de Barrido Analítica. *Acta Microscopica*, 31(1), 63-71.
- Saini, S., Tewari, S., Dwivedi, J., & Sharma, V. (2023). Biofilm-mediated wastewater treatment: a comprehensive review. *Materials Advances*, 4(6), 1415-1443.
- Sathya, R., Arasu, M. V., Al-Dhabi, N. A., Vijayaraghavan, P., Ilavenil, S., & Rejiniemon, T. S. (2023). Towards sustainable wastewater treatment by biological methods—A challenges and advantages of recent technologies. *Urban Climate*, 47, 101378.
- Tang, X., Fan, C., Zeng, G., Zhong, L., Li, C., Ren, X., Song, B. & Liu, X. (2022). Phage-host interactions: the neglected part of biological wastewater treatment. *Water Research*, 226, 119183.
- Tanya Morocho, M., & Leiva-Mora, M. (2019). Microorganismos eficientes, propiedades funcionales y aplicaciones agrícolas. *Centro agrícola*, 46(2), 93-103.
- Torres Pérez, J. C., Aguilar Jiménez, C. E., Vázquez Solís, H., Solís López, M., Gómez Padilla, E., & Aguilar Jiménez, J. R. (2022). Evaluación del uso de microorganismos de montaña activados en el cultivo de rosas, Zinacantán, Chiapas, México. *Siembra*, 9(1).

Valdés, A., García, Y., Álvarez, V. M., Samón, A., Pérez, E., Serrano, J. O., Rodríguez, Y. & Berenguer, A. (2020). Efecto de microorganismos eficientes, autóctonos de Guantánamo, Cuba, en indicadores bioproductivos y hematológicos de precebas porcinas. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 54(3), 365-373.

Vidal, L. R. L., Gómez, O. T., & Mendoza, Á. L. C. (2022). Eficiencia de microorganismos y filtros de zeolita en la remoción de metales pesados en aguas de la microcuenca del Río Carrizal, Ecuador. *Agromía Tropical*, 72, e8305949.

Wu, G., & Yin, Q. (2020). Microbial niche nexus sustaining biological wastewater treatment. *NPJ Clean Water*, 3(1), 33.

Zamora-Davila, A., Ortiz-Milán, A., & Utria-Borges, E. (2020). Efecto de microorganismos eficientes vs. probióticos Vitafer en el control de desórdenes digestivos en preceba porcina. *Hombre, Ciencia y Tecnología*, 24(4), 100-109.

Zhang, L., Qiu, X., Huang, L., Xu, J., Wang, W., Li, Z., Xu, P. & Tang, H. (2021). Microbial degradation of multiple PAHs by a microbial consortium and its application on contaminated wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 419, 126524.