

MICROORGANISMOS EFICIENTES EN AGUAS RESIDUALES DE LA CERVECERA HABAGUANEX: ESTUDIO COMPARATIVO

IN SITU E IN VITRO

EFFICIENT MICROORGANISMS IN WASTEWATER FROM HABAGUANEX BREWERY:

A COMPARATIVE *IN SITU* AND *IN VITRO* STUDY

Figuroa Barrios. T.^{1*}, González Triana C.¹, Entrena García. A.¹, Pérez Pino. L.B¹, Riera Ojeda. L.¹,
Herrera Cárdenas. J. A.², Navarro Frómata. A. E.²

¹Centro Nacional de Producción de Animales de Laboratorio. Calle 3ra No. 40759, entre 6ª 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: autor.decorrespondencia@email.com

Recibido: 02/marzo/2026

Aceptado: 19/junio/2026

RESUMEN

La industria cervecera genera aguas residuales con alta carga contaminante que ejerce presión sobre los ecosistemas acuáticos. Por tanto, el objetivo de este trabajo fue evaluar la efectividad de los Microorganismos Eficientes (producto ME Agroambiental®) en el tratamiento de efluentes de la Cervecería Habaguanex, La Habana, Cuba, con el fin de lograr el cumplimiento de la normativa de vertido. Se realizó un estudio longitudinal (2015-2017) comparando aguas sin tratar y tratadas con ME. Se aplicaron dosis de 0,1 % y 0,2 % en ensayos *in situ* durante ciclos productivos e *in vitro* con dosis de choque del 0,2 % durante 21 días. Se monitorearon parámetros fisicoquímicos (DBO₅, DQO) y microbiológicos (coliformes totales, CT, y fecales, CF). Los efluentes iniciales excedían los límites máximos permisibles (LMP) de la Norma Cubana NC 521:2007. Tras dos meses de tratamiento *in situ* se logró una reducción significativa (DBO₅ = 145 mg/l, DQO = 169 mg/l), y en un segundo ensayo se alcanzó el cumplimiento normativo (DBO₅ = 75 mg/l, DQO = 153,6 mg/l). Microbiológicamente, se redujeron CT de >1600 a 540 NMP/100 ml y CF de >1600 a 240 NMP/100 ml. Los ensayos *in vitro* con 0,2 % mostraron mayor eficacia, reduciendo CT a 23--49 NMP/100 ml y CF a 23 NMP/100 ml al séptimo día. La aplicación de ME Agroambiental®

demonstró ser una tecnología efectiva para el tratamiento de aguas residuales cerveceras, reduciendo significativamente la carga orgánica y microbiológica.

Palabras clave: *Tratamiento biológico, Química del agua, Regulación de descargas industriales.*

ABSTRACT

The brewing industry generates wastewater with a high pollutant load, exerting pressure on aquatic ecosystems. Therefore, the aim of this study was to evaluate the effectiveness of Efficient Microorganisms (ME Agroambiental® product) in treating effluents from the Habaguanex Brewery, Havana, Cuba, in order to achieve compliance with discharge regulations. A longitudinal study (2015-2017) was conducted comparing untreated and ME-treated water. Doses of 0.1 % and 0.2 % were applied *in situ* trials during production cycles and *in vitro* with a shock dose of 0.2 % for 21 days. Physical-chemical (BOD₅, COD) and microbiological (total coliforms, TC, and fecal coliforms, FC) parameters were monitored. The initial effluents exceeded the maximum permissible limits (MPL) of Cuban Standard NC 521:2007. After two months of *in situ* treatment, a significant reduction was achieved (BOD₅ = 145 mg/l, COD = 169 mg/l), and in a second test, regulatory compliance was reached (BOD₅ = 75 mg/l, COD = 153.6 mg/l). Microbiologically, TC was reduced from >1600 to 540 NMP/100 ml and FC from >1600 to 240 NMP/100 ml. *In vitro* tests with 0.2 % showed greater efficacy, reducing TC to 23-49 NMP/100 ml and FC to 23 NMP/100 ml on the seventh day. The application of ME Agroambiental® proved to be an effective technology for brewery wastewater treatment, significantly reducing both the organic and microbiological load.

Key words: Biological treatment, water chemistry, regulation of industrial discharges.

INTRODUCCIÓN

La industria cervecera genera volúmenes significativos de aguas residuales con elevada carga contaminante. La cerveza, como bebida fermentada, requiere importantes cantidades de agua en su proceso productivo; aproximadamente el 90 % de la cerveza final es agua. Sin embargo, los residuales generados en la fabricación de cerveza contienen múltiples fuentes de contaminación: levadura del proceso de fermentación, mosto (fluido acuoso con sustancias solubles y suspendidas

de los ingredientes), afrecho cervecero, grasas, aceites y compuestos químicos procedentes de los procesos de limpieza y desinfección (González et al., 2017).

Estos residuales presentan elevadas demandas de oxígeno tanto bioquímica (DBO₅) como química (DQO), junto con presencia de microorganismos patógenos (CT y CF). La Cervecería Habaguanex, ubicada en la Bahía de La Habana, genera aproximadamente 30 m³/d de residuales que se vierten directamente en un cuerpo de agua clasificado como Clase E según la Norma Cubana NC 521:2007 (2007). Esta clasificación implica una zona marina en bahías con actividad marítimo-portuaria y requisitos ambientales estrictos. Los parámetros de calidad de este efluente superan significativamente los límites máximos permisibles (LMP) establecidos en la normativa vigente, presentando valores de DBO₅ hasta 1000 mg/l y DQO hasta 500 mg/l, comparados con los LMP de 75 mg/l y 190 mg/l, respectivamente (González et al., 2017).

El vertido continuo de aguas residuales no tratadas genera una fuerte presión sobre los ecosistemas acuáticos, altera los parámetros de calidad, incrementa el riesgo para la salud de la población, afecta a la micro y macrofauna, y favorece el deterioro del entorno (Chukwuma y Anayo, 2020; Logez et al., 2025; Chandel et al., 2026). Esta problemática es más frecuente en zonas costeras, sobre todo en países subdesarrollados o en vías de desarrollo, donde la legislación ambiental no se implementa adecuadamente; lo que representa un riesgo para la conservación de los ecosistemas acuáticos (Landrigan et al., 2020; Maliga et al., 2025). Para minimizar el alcance de esta problemática, es urgente implementar estrategias de mitigación adecuadas (Maliga et al., 2025).

Existen tecnologías eficientes para la descontaminación de aguas residuales, tanto domésticas como industriales, con lo que se ha logrado reducir la carga orgánica (DQO) hasta en un 90 %. Swain et al. (2020) reportaron el 26 % de remoción de DQO mediante un proceso de electrocoagulación, utilizando electrodos de aluminio. Por otra parte, Shabangu et al. (2022) lograron remover más del 90 % de DQO con un proceso de coagulación química, utilizando clorhidrato de aluminio y poliamina. Resultados similares fueron reportados por Hosseinlou (2022), quien consiguió remover el 92 % de la carga orgánica en aguas residuales de una cervecería utilizando una técnica de oxidación anaeróbica simultánea/nitrificación-desnitrificación parcial.

Los tratamientos biológicos también han sido evaluados y se han conseguido eficiencias de remoción significativas. Por ejemplo, Tian et al. (2023) evaluaron la eficiencia de un biorreactor de biopelícula de membrana aireada acoplado a un proceso de coagulación/floculación, con el que obtuvieron una eficiencia de remoción de DQO mayor al 85 %. Una tecnología similar reportó

Khumalo et al. (2022), quienes lograron remover 65 % de la carga orgánica en aguas residuales de una cervecería con un reactor discontinuo secuencial anaerobio/aerobio. Por otro lado, Papadopoulos et al. (2020) reportaron el 92 % de remoción de DQO en residuales de una cervecería, mediante el uso de un consorcio cianobacteriano-bacteriano dominado por la cianobacteria filamentosa *Leptolyngbya sp.* en forma agregada.

Pese al desarrollo y la innovación de nuevas tecnologías para el saneamiento de aguas residuales, los tratamientos biológicos son los más utilizados debido a su viabilidad económica, fácil operación y alta eficiencia de depuración (Vasileva et al., 2021). En este contexto, se ha reportado el uso de una tecnología denominada microorganismos eficientes (ME). La cual ofrece una solución sostenible y ecológica para el tratamiento *in situ* de aguas residuales, controlando la carga microbiana y orgánica (Kaur et al., 2024). Los ME constituyen una tecnología de bajo costo y de origen natural, desarrollada originalmente en Japón en la década de 1980. Los productos comerciales contienen cultivos mixtos de microorganismos beneficiosos incluyendo bacterias ácido lácticas, levaduras fotosintéticas, actinomicetos y hongos, que actúan de manera sinérgica para mejorar la descomposición de materia orgánica y reducir la proliferación de microorganismos patógenos. En el contexto del tratamiento de aguas residuales, los ME han demostrado efectividad en la reducción de DBO₅ y DQO en sistemas de tratamiento tanto aerobios como anaerobios. El mecanismo de acción se basa en la fermentación de compuestos orgánicos, la producción de ácidos orgánicos débiles que inhiben patógenos, y la mejora de la actividad microbiana nativa del sistema (Higa y Parr, 1994; ISO, 2015).

Estudios previos en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales han mostrado reducciones de DBO₅ del 40–60 % y DQO del 30–50 % con aplicaciones regulares de ME (Higa y Parr, 1994; ISO, 2015). Sin embargo, hay escasa documentación específica sobre la aplicación de ME en la industria cervecera, lo que representa una laguna en el conocimiento que el presente estudio busca subsanar. Por tanto, el objetivo de este trabajo es demostrar la efectividad de la tecnología de ME, mediante la aplicación del producto comercial ME Agroambiental® en el tratamiento de aguas residuales de la Cervecería Habaguanex bajo condiciones naturales (*in situ*) y controladas (*in vitro*) y evaluar su efectividad en el saneamiento del agua residual de esta empresa.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño del estudio y sitio de investigación

Se realizó un estudio longitudinal prospectivo de enero de 2015 a febrero de 2017, estructurado en tres fases secuenciales: 1) caracterización inicial de los residuales (2015–2016); 2) primer ensayo *in situ* e *in vitro* con aplicación de ME (enero 2017); y 3) segundo ensayo *in situ* e *in vitro* con aplicación optimizada de ME (febrero 2017). Todos los análisis se realizaron bajo Buenas Prácticas de Laboratorio (BPL) conforme a la Norma Cubana NC 26:2012 (2012) y la ISO 9001:2015 (ISO, 2015).

El estudio se llevó a cabo en la Cervecería Habaguanex, ubicada en la Bahía de La Habana, Cuba, con una generación aproximada de 30 m³/d de aguas residuales. Su planta de tratamiento consta de foso colector/trampa de grasas (3 m³), tanque de aireación (48 m³), sedimentador (36 m³), concentrador de lodos, filtros prensa y dosificador de hipoclorito de sodio, con un tiempo de retención de líquidos de 72 h. El efluente final se descarga en la Bahía de La Habana, clasificada como Clase E (áreas marinas portuarias) según la Norma Cubana NC 521:2007 (2007), que establece los LMP para el vertido de efluentes industriales.

Puntos de muestreo y protocolo

Se establecieron cuatro puntos de muestreo representativos del flujo de tratamiento: Punto 1 (agua potable de entrada, solo para caracterización inicial); Punto 2 (residuales sin tratar a la entrada del concentrador/ecualizador); Punto 3 (entrada al tanque de aireación); y Punto 4 (salida del sedimentador hacia la bahía, residuales tratados). Para los ensayos *in situ*, se recolectaron muestras compuestas durante ciclos productivos completos (14 h). Para los ensayos *in vitro*, se tomaron alícuotas del Punto 2, colocándose en recipientes de 2 l con tres réplicas y un control negativo por ensayo.

Producto biológico y dosificación

Se utilizó el producto ME Agroambiental® del CENPALAB, un consorcio de microorganismos benéficos que incluye bacterias ácido lácticas (*Lactobacillus spp.*), levaduras fotosintéticas y hongos beneficiosos. La aplicación se realizó en dos regímenes:

- Dosis de mantenimiento (0.1 %): aplicación regular cada 48 h durante dos meses en los sistemas *in situ*.
- Dosis de choque (0.2 %): aplicación única inicial para los ensayos *in vitro*, con seguimiento hasta 21 días.

Parámetros analíticos y métodos

Se evaluaron parámetros fisicoquímicos y microbiológicos claves, comparando siempre con los LMP de la NC 521:2007, siendo los más relevantes: Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días (DBO₅, 75 mg/l), Demanda Química de Oxígeno (DQO, 190 mg/l), CT (1000 NMP/100 ml) y CF (1000 NMP/100 ml).

Todos los análisis se realizaron en los laboratorios acreditados del CENPALAB y de la Empresa Nacional de Análisis y Servicios Técnicos de Recursos Hidráulicos (ENAST), siguiendo los métodos estándar:

1. DBO₅: prueba de incubación a 20 °C durante 5 días.
2. DQO: método acelerado con dicromato de potasio.
3. CT y CF: técnica de fermentación en tubos múltiples (NMP/100 ml).
4. Nutrientes y sólidos: métodos Kjeldahl (nitrógeno), espectrofotometría UV-Vis (fósforo) y gravimetría (grasas, SST).

Protocolo experimental por fase

- **Fase 1** (Caracterización inicial, 2015–2016): evaluación comparativa de la calidad de los residuales para establecer una línea base y cuantificar el impacto de la recolección de mosto y levadura como medida de minimización.
- **Fase 2** (Primer ensayo *in situ*, enero 2017): tras dos meses de aplicación de ME en dosis de mantenimiento (0,1–0,2 %), se tomaron muestras en los Puntos 2 (control sin tratar) y 4 (efluente tratado) para análisis fisicoquímico y microbiológico comparativo.
- **Fase 3** (Primer ensayo *in vitro*, enero 2017): se incubaron muestras del Punto 2 con dosis de choque de ME (0,2 %). Se realizaron mediciones en los días 0, 7, 14 y 21 para evaluar la cinética de degradación y de reducción microbiana en condiciones controladas.
- **Fase 4** (Segundo ensayo *in situ*, febrero 2017): se repitió el monitoreo *in situ* tras un mes adicional de tratamiento, optimizando la frecuencia de aplicación a cada 48 h, para evaluar la mejora a largo plazo y el cumplimiento normativo.
- **Fase 5** (Segundo ensayo *in vitro*, febrero 2017): se repitió el ensayo de laboratorio con condiciones optimizadas, acortando el seguimiento a los días 0, 3 y 7 para confirmar los hallazgos previos.

Análisis de datos

Se realizó un análisis estadístico descriptivo, calculando promedios y desviaciones estándar para cada parámetro por punto de muestreo y por fase. Para los ensayos *in vitro*, que contaron con réplicas independientes ($n = 4$) y mediciones seriadas en el tiempo, se aplicó análisis de varianza (ANOVA) de un factor para evaluar el efecto del tiempo de tratamiento sobre los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. Cuando el ANOVA resultó significativo ($p < 0,05$), se realizaron pruebas *post hoc* de Tukey para identificar las diferencias específicas entre pares de medias.

Los ensayos *in situ*, al realizarse a escala real de operación con condiciones productivas variables (ciclos de 14 h), no permitieron la obtención de réplicas técnicas bajo las mismas condiciones operativas; por tanto, para estos ensayos se empleó únicamente análisis descriptivo comparativo, expresando las diferencias como porcentajes de reducción respecto al control sin tratar. El cumplimiento normativo se determinó por comparación directa con los LMP de la NC 521:2007.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El estudio demostró una evolución clara en la calidad de los efluentes de la Cervecería Habaguanex, ubicada en La Habana, Cuba, a lo largo de las fases evaluadas, evidenciando la efectividad de la aplicación de Microorganismos Eficientes (ME Agroambiental®) como tecnología de tratamiento biológico.

Fase 1: línea base y efecto de la minimización en origen (2015-2016)

La caracterización inicial reveló una carga contaminante elevada. Los datos del Punto 4 (salida a la bahía) mostraron valores de DBO₅ y DQO que, en 2015, alcanzaron 1000 mg/l y 500 mg/l, respectivamente (Cuadro 1), superando significativamente los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos en la Norma Cubana NC 521:2007 (75 mg/l para DBO₅ y 190 mg/l para DQO).

Cuadro 1. Evolución de parámetros fisicoquímicos en residuales de la Cervecería Habaguanex sin aplicación de ME (línea base 2014–2016).

Año/Origen del dato	DBO ₅ (mg/l)	DQO (mg/l)
Laboratorio CIMAB 2014	462.5	961
Laboratorio CIMAB 2015	1000	500
Laboratorio CENPALAB 2016	156	150
Laboratorio CIMAB 2016	110	250

Nota: Los datos corresponden a la caracterización inicial del efluente antes de la implementación de medidas de minimización y tratamiento biológico. **Fuente:** elaboración propia.

Estos resultados confirmaron la necesidad crítica de un tratamiento efectivo para proteger el ecosistema de la Bahía de La Habana, clasificada como área Clase E (Norma Cubana NC 521:2007, 2007).

Para 2016, la implementación de la recolección de mosto y levadura como subproductos generó una mejora sustancial, reduciendo la DBO₅ a un rango de 110–156 mg/l y la DQO a 150–250 mg/l (Cuadro 1). Este avance subraya la importancia de las prácticas de minimización en origen como complemento a cualquier tratamiento terciario. Sin embargo, el persistente incumplimiento de la normativa indicó que estas medidas no eran suficientes por sí solas, haciendo imperativa la aplicación de una tecnología correctiva como los ME.

Fase 2: primer ensayo *in situ* e *in vitro* – Respuesta inicial (enero 2017)

Tras dos meses de aplicación inicial de ME, el primer monitoreo *in situ* mostró una reducción relativa pero insuficiente. Los parámetros en la salida (Punto 4) fueron de 145 mg/l para DBO₅ y 169 mg/l para DQO (Cuadro 2), aún por encima de los LMP, aunque se evidenció una tendencia decreciente desde el agua sin tratar (DBO₅: 202 mg/l; DQO: 230 mg/l).

Cuadro 2. Controles fisicoquímicos *in situ* en la Cervecería Habaguanex (enero y febrero 2017).

Muestra	Enero 2017		Febrero 2017		LMP
	DBO ₅ (mg/l)	DQO (mg/l)	DBO ₅ (mg/l)	DQO (mg/l)	NC 521:2007
Control (sin tratar)	202	230	102	384	-
Tratada - Tanque Colector	183	223	82	307,2	-
Tratada - Salida a Bahía	145	169	75	153,6	75 / 190
LMPP NC 521:2007	No	No	Si	Si	-

Nota: LMP = Límites máximos permisibles. El cumplimiento se evaluó comparando los valores de la salida a bahía con los LMP establecidos para zonas costeras Clase E. Los valores en negrita indican cumplimiento normativo. **Fuente:** elaboración propia.

Microbiológicamente, en este primer ensayo no se observó mejora, manteniéndose CT) y CF en >1600 NMP/100 ml en todos los puntos (Cuadro 3), muy por encima del LMP de 1000 NMP/100 ml.

Esta respuesta limitada sugiere que el período de dos meses con dosis regulares (0,1–0,2 %) fue un tiempo de aclimatación insuficiente para que el consorcio microbiano estableciera su plena actividad sinérgica en el sistema a escala real (Higa y Parr, 1994).

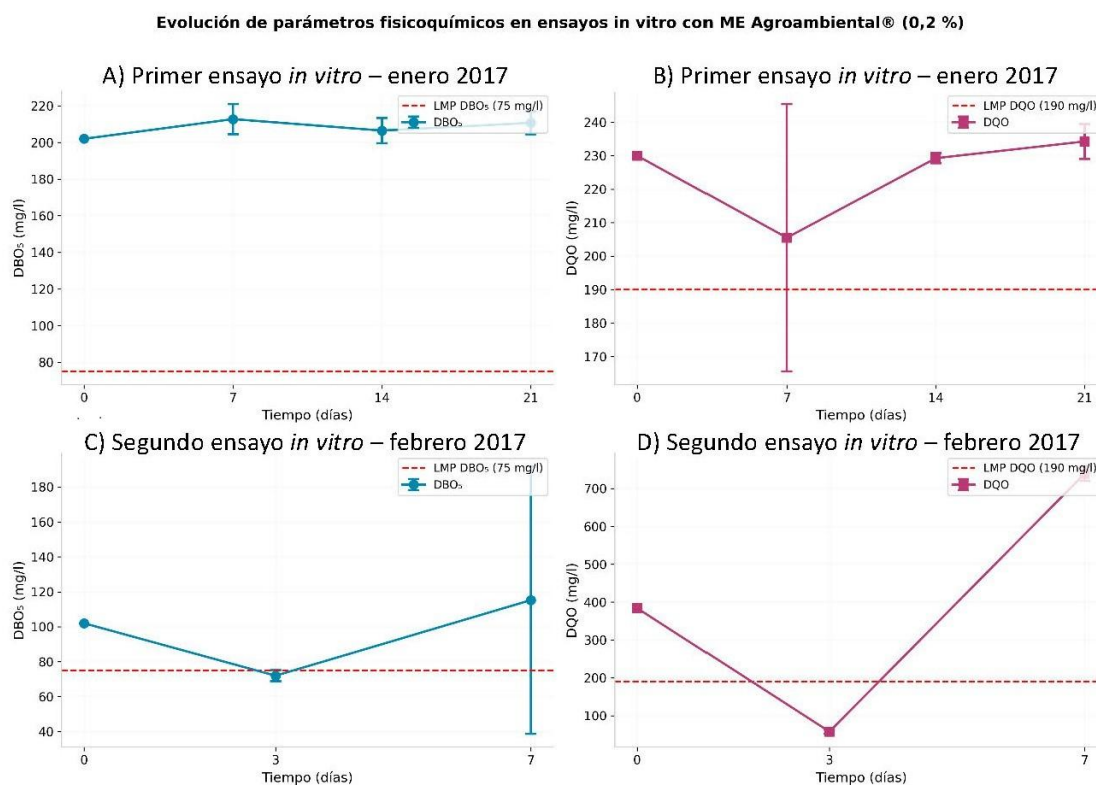
Cuadro 3: Controles microbiológicos *in situ* en la Cervecería Habaguanex (enero y febrero 2017).

Muestra	Enero 2017		Febrero 2017		LMP
	CT (NMP/100 ml)	CF (NMP/100 ml)	CT (NMP/100 ml)	CF (NMP/100 ml)	NC 521:2007
Control (sin tratar)	>1600	>1600	>1600	>1600	-
Tratada – Tanque Colector	>1600	>1600	>1600	>1600	-
Tratada - Salida a Bahía	>1600	>1600	540	240	1000 / 1000
LMPP NC 521:2007	No	No	Si	Si	-

Nota: CT = coliformes totales; CF = coliformes fecales; LMP = límites máximos permisibles. Los valores en negrita indican cumplimiento normativo. **Fuente:** elaboración propia.

Los ensayos *in vitro* realizados en paralelo con dosis de choque (0,2 %) arrojaron hallazgos valiosos sobre la cinética del tratamiento. Mientras los parámetros químicos (DBO₅, DQO) no mostraron variaciones significativas en 21 días (Figura 1A y 1B), los coliformes fecales se redujeron drásticamente a 23 NMP/100 ml al día 7, cumpliendo ampliamente la norma (Figura 2B).

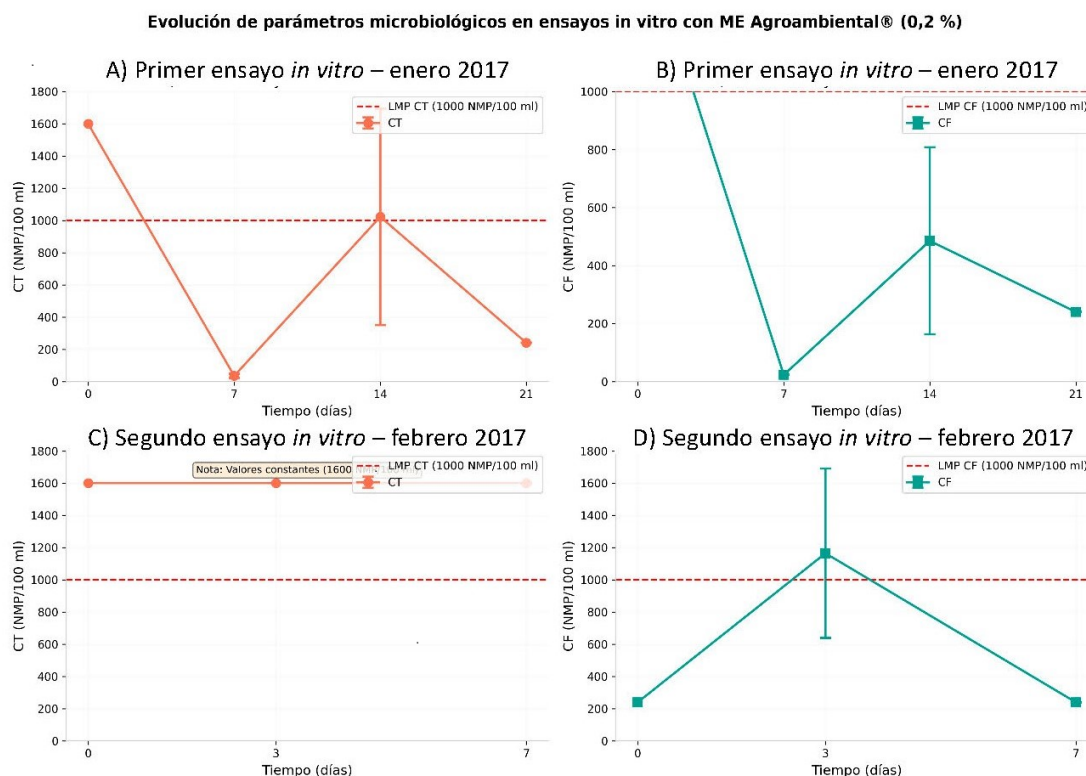
Figura 1: Evolución fisicoquímica *in vitro* (4 paneles: DBO₅ y DQO para enero y febrero)



Fuente: elaboración propia

Esta disociación entre la respuesta química y microbiológica indica que los mecanismos antagonistas de los ME, como la producción de ácidos orgánicos y la competencia por nutrientes (Higa y Parr, 1994; Sangkhobol y Skerman, 1981), actúan con mayor rapidez sobre los microorganismos indicadores que los procesos de degradación enzimática de la materia orgánica compleja presente en los residuales cerveceros.

Figura 2: Evolución microbiológica *in vitro* (4 paneles: CT y CF para enero y febrero).



Fuente: elaboración propia.

Fase 3: segundo ensayo *in situ* e *in vitro* – Optimización y cumplimiento (febrero 2017)

La optimización del tratamiento, intensificando la aplicación a cada 48 h, resultó en un avance decisivo. El segundo monitoreo *in situ* demostró cumplimiento total con la NC 521:2007. En la salida a la bahía, la DBO₅ alcanzó exactamente el LMP (75 mg/l) y la DQO se redujo a 153,6 mg/l, por debajo del límite de 190 mg/l (Cuadro 2).

Este logro evidencia que la eficacia del tratamiento con ME es dependiente del tiempo y del régimen de aplicación, permitiendo la aclimatación, proliferación y establecimiento de una comunidad microbiana sinérgica capaz de degradar eficientemente los sustratos orgánicos (Higa y

Parr, 1994). La reducción observada en DBO₅ y DQO puede atribuirse a la acción combinada de bacterias ácido lácticas y actinomicetos que fermentan compuestos complejos, y a la estimulación de la microbiota nativa del sistema de tratamiento. El progreso microbiológico fue aún más significativo. En la salida, los CT y CF se redujeron a 540 NMP/100 ml y 240 NMP/100 ml, respectivamente (Cuadro 3), cumpliendo holgadamente la norma y representando reducciones del 66 % y 85 % respecto al control.

Dado que el sistema de desinfección con hipoclorito de sodio no fue modificado, esta drástica mejora es directamente atribuible a la acción de los ME, probablemente mediante la exclusión competitiva y la acidificación del medio, creando un ambiente desfavorable para los coliformes (Sangkhobol y Skerman, 1981).

Los ensayos *in vitro* de febrero confirmaron estos patrones. Se observó una reducción sustancial de la DQO al día 3 (hasta 51–65 mg/l), aunque con un repunte al día 7 (Figura 1D). Este comportamiento podría indicar una rápida degradación inicial de compuestos lábiles, seguida de la lisis celular o liberación de metabolitos, un aspecto a considerar para optimizar los tiempos de retención.

Microbiológicamente *in vitro*, se mantuvo la eficacia, con CF en 240 NMP/100 ml desde el día 0 (Figura 2D), consistente con el efecto residual del tratamiento *in situ* y confirmando la estabilidad del control microbiano.

Análisis estadístico de los ensayos *in vitro*

Los resultados del ANOVA de un factor para el primer ensayo *in vitro* (enero 2017) revelaron diferencias significativas en los parámetros microbiológicos en función del tiempo de tratamiento (Cuadro 4). Los CT presentaron una variación significativa entre los días evaluados ($F(2,9) = 6.656$; $p = 0.026$), con una reducción drástica entre el día 7 (promedio: 35 NMP/100 ml) y el día 14 (promedio: 772.5 NMP/100 ml), según la prueba de Tukey ($p = 0,033$). No se observaron diferencias significativas entre los días 7 y 21 ($p = 0.796$), ni entre los días 14 y 21 ($p = 0.064$), lo que sugiere que la reducción microbiológica más efectiva se alcanzó durante la primera semana de tratamiento. De manera similar, los CF mostraron diferencias significativas entre tiempos ($F(2,9) = 5.353$; $p = 0.044$), con la mayor reducción entre el día 7 (promedio: 23 NMP/100 ml) y el día 14 (promedio: 485 NMP/100 ml) (Tukey: $p = 0.037$). En contraste, los parámetros fisicoquímicos (DBO₅ y DQO) no evidenciaron variaciones significativas durante el período evaluado (DBO₅: $F(2,9) = 0.786$; $p = 0.485$; DQO: $F(2,9) = 1.743$; $p = 0.229$), lo que confirma la observación de una

disociación cinética entre la remoción microbiológica (rápida) y la degradación de la materia orgánica (más lenta), visualizada claramente en las Figuras 1 y 2.

Cuadro 4. Resultados del análisis de varianza (ANOVA) para los ensayos *in vitro* de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.

Ensayo	Parámetro	Fuente de variación	SC	gl	CM	F	p-valor
Primer <i>in vitro</i> (enero 2017)	CT	Tiempo (días)	2 000 279.6	2	1 000 139.8	6.656	0.026 *
		Error	1 352 419.0	9	150 268.8		
		Total	3 352 698.6	11			
	CF	Tiempo (días)	371 526.9	2	185 763.5	5.353	0.044 *
		Error	312 300.0	9	34 700.0		
		Total	683 826.9	11			
	DBO ₅	Tiempo (días)	—	2	—	0.786	0.485 ns
		Error	—	9	—		
		Total	—	11	—		
	DQO	Tiempo (días)	—	2	—	1.743	0.229 ns
		Error	—	9	—		
		Total	—	11	—		
Segundo <i>in vitro</i> (febrero 2017)	DQO	Tiempo (días)	929 566.1	1	929 566.1	4719.608	<0.001 ***
		Error	1 181.8	6	197.0		
		Total	930 747.9	7			
	CF	Tiempo (días)	1 711 250.0	1	1 711 250.0	12.384	0.013 *
		Error	829 100.0	6	138 183.3		
		Total	2 540 350.0	7			
	DBO ₅	Tiempo (días)	—	1	—	1.276	0.302 ns
		Error	—	6	—		
		Total	—	7	—		
	CT	No aplicable (ausencia de variación intergrupala)					

Nota. SC = suma de cuadrados; gl = grados de libertad; CM = cuadrado medio; F = estadístico de Fisher; p = nivel de significancia. * $p < 0,05$; *** $p < 0,001$; ns = no significativo. **Fuente:** elaboración propia.

En el segundo ensayo *in vitro* (febrero 2017), el ANOVA detectó diferencias altamente significativas en la DQO entre los días 3 y 7 ($F(1,6) = 4719.608$; $p < 0.001$), con un incremento notable de la carga orgánica al día 7 (promedio: 739.5 mg/l) respecto al día 3 (promedio: 57.8 mg/l). Este comportamiento, consistente con el repunte observado en la DBO₅ (Figura 1C), sugiere una fase de lisis celular o removilización de metabolitos tras la degradación inicial de compuestos lábiles. Los CF también mostraron diferencias significativas ($F(1,6) = 12.384$; $p = 0.013$), manteniéndose en valores bajos (240 NMP/100 ml) al día 7 respecto a la variabilidad observada al día 3 (promedio: 1065 NMP/100 ml). Los CT, sin embargo, permanecieron invariables (1600 NMP/100 ml) en ambos periodos de muestreo (Figura 2C), sin variación intergrupala detectable, lo

que indica que la reducción de CT en esta fase ocurrió predominantemente en el sistema *in situ* y no en las condiciones controladas de laboratorio (Cuadro 4).

Para CT en el segundo ensayo *in vitro*, todos los valores fueron idénticos (1600 NMP/100 ml), impidiendo el cálculo del ANOVA. Las comparaciones *post hoc* de Tukey para CT y CF en el primer ensayo mostraron diferencias significativas entre el día 7 y el día 14 (CT: $p = 0.033$; CF: $p = 0.037$).

Los resultados *in situ* validan la hipótesis de que la aplicación regular de ME Agroambiental® es efectiva para alcanzar el cumplimiento normativo en aguas residuales cerveceras. La trayectoria de mejora entre enero y febrero de 2017 subraya la importancia del tiempo de aclimatación para esta tecnología biológica. Los hallazgos son congruentes con la literatura que reporta la eficacia de los ME en el tratamiento de aguas residuales (Higa y Parr, 1994), a la vez que aportan evidencia novedosa para la industria cervecera específicamente. La efectividad demostrada, particularmente en la reducción microbiológica, posiciona a esta tecnología como una solución sostenible y de bajo costo para la remediación ambiental en contextos similares, contribuyendo directamente a la protección de la Bahía de La Habana según lo estipulado en la Norma Cubana NC 521:2007 (2007).

CONCLUSIONES

La aplicación de Microorganismos Eficientes (ME Agroambiental®), en dosis de 0.1–0.2 % es efectiva para reducir la carga contaminante de aguas residuales de la Cervecería Habaguanex, en condiciones de operación natural *in situ*.

Tras aproximadamente dos meses de aplicación regular de ME, con optimización de frecuencia cada 48 h, los residuales de la Cervecería Habaguanex logran el cumplimiento total con los límites máximos permisibles de la Norma Cubana NC 521:2007 para vertimiento en zonas costeras marinas.

Los resultados evidencian una mejora progresiva entre la primera evaluación (enero 2017) y la segunda (febrero 2017), sugiriendo que la efectividad del tratamiento se incrementa con el tiempo, probablemente debido a la aclimatación y proliferación de la microbiota beneficiosa.

El tratamiento logró reducciones de 66 % en CT y de 85 % en CF, comparados con residuales sin tratar (>1600 NMP/100 ml), siendo esta reducción microbiológica probablemente el mecanismo de acción más rápido y efectivo de los ME.

Se observó reducción de 63 % en DBO₅ (de 202 a 75 mg/l) y de 33 % en DQO (de 230 a 153,6 mg/l) entre el control sin tratar y los residuales tratados en la salida hacia la bahía.

Los ensayos de laboratorio confirmaron la efectividad del tratamiento con ME, aunque con dinámicas temporales diferentes entre parámetros químicos y microbiológicos, con la reducción microbiológica ocurriendo más rápidamente.

La tecnología de ME representa una solución ambientalmente sostenible, de bajo costo y de fácil implementación para el tratamiento de aguas residuales cerveceras, con potencial de aplicación generalizada en industrias similares en contextos donde la infraestructura de tratamiento avanzado es limitada o costosa.

Los resultados contribuyen a la protección de la Bahía de La Habana, asegurando que los residuales industriales se adecuen a los estándares ambientales de la Norma Cubana NC 521:2007 (2007), que previenen eutrofización y contaminación microbiológica del ecosistema marino costero.

Se recomienda realizar evaluaciones a largo plazo (6–12 meses mínimos) con protocolos de muestreo más frecuentes para confirmar la sostenibilidad del tratamiento y optimizar los protocolos de dosificación según variaciones estacionales de producción y características de los residuales.

AGRADECIMIENTOS (opcional)

Los autores agradecen al personal técnico de la Cervecería Habaguanex y en especial al Especialista Responsable de Medio Ambiente, por su colaboración en la implementación del tratamiento con Microorganismos Eficientes (ME Agroambiental®), y la facilitación del acceso a puntos de muestreo. Se extiende especial agradecimiento a la especialista y técnicos del Laboratorio de Química Analítica, a los especialistas y técnicos de Producción de Biológicos de Biotecnología, del CENPALAB y a los analistas del Laboratorio de Análisis y Servicios Técnicos de Recursos Hidráulicos (ENAST) por la realización de los análisis con estrictos protocolos de calidad. Agradecen además a los especialistas docentes e investigadores de la Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros (UTIM).

REFERENCIAS

- American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation. (1998). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (20th ed.). APHA.
- Chandel, H., Srivastava, H., Murugesan, S., Saxena, G., Sharma, G., Yadav, R., & Kumar, N. (2026). Sustainable management of distillery effluent: Environmental impacts, treatment approaches, and resource recovery. *Water, Air, & Soil Pollution*, 237(3), 155. <https://doi.org/10.1007/s11270-026-07152-x>
- Chukwuma, O. H., & Anayo, O. D. (2020). Unsustainable management of wastewater and brewing effluents: The impacts on socioeconomy and environment, Lagos and Niger Delta region, Nigeria. *E3S Web of Conferences*, 211, 03006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021103006>
- González, C., Carballo, N., Entrena, A., & Figueroa, T. (2017). *Informe técnico del primer ensayo in situ en la cervecera: Muestreo compuesto y análisis físico-químicos y microbiológicos de residuales* [Informe técnico no publicado]. CENPALAB.
- Higa, T., & Parr, J. F. (1994). Beneficial and effective microorganisms for a sustainable agriculture and environment. *International Nature Farming Research Center Publications*, 1, 1–16.
- Hosseinelou, D. (2022). Application of an efficient, cost-effective and newly developed single-process SAO/PND technology for treating brewery industry effluent. *South African Journal of Chemical Engineering*, 41, 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2022.06.001>
- ISO. (2015). *ISO 9001:2015 Quality management systems — Requirements* (5th ed.). International Organization for Standardization.
- Kaur, B., Choudhary, R., Sharma, G., & Brar, L. K. (2024). Sustainable and effective microorganism's method for wastewater treatment. *Desalination and Water Treatment*, 319, 100419. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100419>
- Khumalo, S. M., Bakare, B. F., Tetteh, E. K., & Rathilal, S. (2022). Sequencing batch reactor performance evaluation on orthophosphates and COD removal from brewery wastewater. *Fermentation*, 8(7), 296. <https://doi.org/10.3390/fermentation8070296>
- Landrigan, P. J., Stegeman, J. J., Fleming, L. E., Allemand, D., Anderson, D. M., Backer, L. C., Brucker-Davis, F., Chevalier, N., Corra, L., Czerucka, D., Bottein, M. D., Demeneix, B., Depledge, M., Deheyn, D. D., Dorman, C. J., Fénichel, P., Fisher, S., Gaill, F., Galgani, F., ... Rampal, P.

- (2020). Human health and ocean pollution. *Annals of Global Health*, 86(1), 151. <https://doi.org/10.5334/aogh.2831>
- Logez, M., Bouraï, L., Hette-Tronquart, N., Trémolières, M., & Azémard, C. (2025). Ecological vulnerability of aquatic ecosystems—A review. *Environmental Management*, 75, 192–204. <https://doi.org/10.1007/s00267-024-02076-z>
- Maliga, I., Purwono, S., & Harini, R. (2025). Marine pollution in small island ecosystems and the impact of domestic wastewater. *Global Journal of Environmental Science & Management*, 11(1), 177–192.
- Oficina Nacional de Normalización. (2007). Vertimiento de aguas residuales a zonas costeras y aguas marinas: Especificaciones (NC 521:2007).
- Oficina Nacional de Normalización. (2012). Buenas prácticas de laboratorio (NC 26:2012).
- Papadopoulos, K. P., Economou, C. N., Dailianis, S., Charalampous, N., Stefanidou, N., Moustakagouni, M., Tekerlekopoulou, A. G., & Vayenas, D. V. (2020). Brewery wastewater treatment using cyanobacterial-bacterial settleable aggregates. *Algal Research*, 49, 101957. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.101957>
- Sangkhobol, V., & Skerman, V. B. D. (1981). Taxonomic position of *Campylobacter* species in the family *Spirillaceae*. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 31(4), 422–425. <https://doi.org/10.1099/00207713-31-4-422>
- Shabangu, K. P., Bakare, B. F., & Bwapwa, J. K. (2022). The treatment effect of chemical coagulation process in South African brewery wastewater: Comparison of polyamine and aluminum-chlorohydrate coagulants. *Water*, 14(16), 2495. <https://doi.org/10.3390/w14162495>
- Swain, K., Abbassi, B., & Kinsley, C. (2020). Combined electrocoagulation and chemical coagulation in treating brewery wastewater. *Water*, 12(3), 726. <https://doi.org/10.3390/w12030726>
- Tian, H., Zhang, J., Zheng, Y., Zheng, G., Li, Y., Yan, Y., Zhiwen, L., & Hui, M. (2023). Evaluating the performance of an integrated membrane-aerated biofilm reactor (MABR) system for high-strength brewery wastewater treatment. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 9(8), 2053–2064. <https://doi.org/10.1039/d3ew00215a>
- Vasileva, E., Parvanova-Mancheva, T., & Beschkov, V. (2021). Biological approaches in wastewater treatment. *Journal of Chemical Technology & Metallurgy*, 56(6), 1133–1148.