



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), mayo-junio 2025,
Volumen 9, Número 3.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i1

ANÁLISIS DE LA BIODEGRADACIÓN DE ESTRÓGENOS EN AGUA MEDIANTE BACTERIAS

**ANALYSIS OF THE BIODEGRADATION OF
ESTROGENS IN WATER USING BACTERIA**

Carlos Mendoza Hernández

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México

Juana Deisy Santamaría Juárez

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México

Sayra Guillen Reyna

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México

Andrea Sofía Minueza Luna

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México

Gabriela Pérez Osorio

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i3.18057

Análisis de la Biodegradación de Estrógenos en Agua Mediante Bacterias

José Carlos Mendoza Hernández¹josecarlos.mendoza@correo.buap.mx<https://orcid.org/0000-0003-2539-8177>Facultad de Ingeniería Química. Benemérita
Universidad Autónoma de Puebla
México**Sayra Guillen Reyna**sayra.reynaa@gmail.com<https://orcid.org/0009-0005-4719-4775>Facultad de Ingeniería Química. Benemérita
Universidad Autónoma de Puebla
México**Gabriela Pérez Osorio**gabriela.perez@correo.buap.mx<https://orcid.org/0000-0003-0251-3443>Facultad de Ingeniería Química. Benemérita
Universidad Autónoma de Puebla
México**Juana Deisy Santamaría Juárez**deisy.santamaria@correo.buap.mx<https://orcid.org/0000-0003-0935-5468>Facultad de Ingeniería Química. Benemérita
Universidad Autónoma de Puebla
México**Andrea Sofía Minueza Luna**sophilyy15@gmail.com<https://orcid.org/0009-0005-0964-9468>Facultad de Ingeniería Química. Benemérita
Universidad Autónoma de Puebla
México

RESUMEN

La contaminación del agua por contaminantes emergentes es un problema actual porque estos no se eliminan con los métodos de tratamiento convencionales. Entre los contaminantes emergentes encontramos hormonas como el estradiol, que pueden bioacumularse y provocar alteraciones entre la flora y la fauna. En este trabajo fue efectivo el proceso de biodegradación de las hormonas algestona-estradiol por las bacterias *Pantoea agglomerans* NM1 2.1, *Escherichia coli* KM4 3.2 y *Citrobacter freundii* KM1 3.1 en medio mineral mínimo, y el Consorcio 2, formado por *Pantoea agglomerans* NM2 1.1, *Klebsiella pneumoniae* KM2 3.2, *Pantoea agglomerans* NM1 2.1 y *Pantoea agglomerans* KM1 2.1 mejoraron la biodegradación de las hormonas estradiol-algestona en comparación con las cepas individuales.

Palabras clave: estrógeno, algestona, estradiol, bacterias, agua

¹ Autor principal

Correspondencia: josecarlos.mendoza@correo.buap.mx

Analysis of the biodegradation of estrogens in water using bacteria

ABSTRACT

Water contamination by emerging contaminants is a current problem because these contaminants are not eliminated by conventional treatment methods. Among the emerging contaminants we find hormones such as estradiol, which can bioaccumulate and cause alterations between flora and fauna. In this work, the biodegradation process of the algestone-estradiol hormones was effective by the bacteria *Pantoea agglomerans* NM1 2.1, *Escherichia coli* KM4 3.2, and *Citrobacter freundii* KM1 3.1 in Minimal mineral medium, and Consortium 2, formed by *Pantoea agglomerans* NM2 1.1, *Klebsiella pneumoniae* KM2 3.2, *Pantoea agglomerans* NM1 2.1, and *Pantoea agglomerans* KM1 2.1, enhanced the biodegradation of the estradiol-algestone hormones compared to the individual strains.

Keywords: estrogen, algestone, estradiol, bacteria, water

Artículo recibido 05 mayo 2025

Aceptado para publicación: 30 mayo 2025



INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional ocasiona graves problemas de contaminación en cuerpos de agua superficiales que reciben descargas de aguas residuales, lo que puede conllevar a una baja calidad del agua. Una de las consecuencias del crecimiento poblacional es la gran cantidad de diferentes productos químicos que se vierten en las aguas residuales, provocando una mayor contaminación y daño ambiental (Barrios-Estrada *et al.*, 2018). Los contaminantes son tóxicos y prevalecen por largos periodos en el ambiente. Muchos de estos contaminantes se consideran emergentes, definidos como sustancias químicas no reguladas cuyos efectos pueden ser desconocidos. Estas sustancias se encuentran en concentraciones del orden de μg o ng , y causan daños a los organismos acuáticos (Martínez *et al.*, 2021; Sultan *et al.*, 2024; Ghai *et al.*, 2024). Entre estos contaminantes emergentes (CE) se encuentran plaguicidas, herbicidas, nanomateriales, ftalatos, aditivos para plásticos, compuestos no halogenados, productos de cuidado personal, parafinas, compuestos bromados, fitoestrógenos, y algunos productos farmacéuticos como antibióticos, hormonas y analgésicos (Barrios-Estrada *et al.*, 2018). Dentro de los CE se encuentran los disruptores endócrinos, incluidos los estrógenos naturales y sintéticos. Los estrógenos naturales son hormonas esteroides producidas principalmente por los ovarios y las glándulas suprarrenales, siendo responsables del desarrollo del sistema reproductor femenino. Los estrógenos de origen sintético son utilizados por muchas mujeres como tratamiento de reemplazo hormonal y anticonceptivos, siendo la principal fuente de contaminación debido a su eliminación por medio de excreciones como las heces y la orina que terminan en la red de alcantarillado lo que conlleva a la feminización de peces y al llegar a productos de consumo humano alteraciones en los niveles hormonales por los procesos de bioacumulación (Ramírez, *et al.*, 2015).

Entre los CE se encuentran los disruptores endócrinos, incluidos los estrógenos naturales y sintéticos. Los estrógenos naturales son hormonas esteroides producidas principalmente por los ovarios y las glándulas suprarrenales, siendo responsables del desarrollo del sistema reproductor femenino. Los estrógenos de origen sintético son utilizados por muchas mujeres como tratamiento de reemplazo hormonal y anticonceptivos, siendo la principal fuente de contaminación debido a su eliminación a través de excreciones, como las heces y la orina, que terminan en la red de alcantarillado.

Esto conlleva a la feminización de peces y, al llegar a productos de consumo humano, puede provocar alteraciones en los niveles hormonales debido a procesos de bioacumulación (Ramírez *et al.*, 2015).

Los procesos de tratamiento convencionales empleados en las plantas de tratamiento de aguas residuales no suelen ser lo suficientemente eficaces para eliminar dichas sustancias ya que no han sido diseñadas para ello (Ramírez *et al.* 2015). Un estudio realizado por Ayala (2017) encontró que algunos de los contaminantes emergentes se mantienen en las mismas concentraciones en aguas industriales o de uso doméstico ya tratadas. Es aquí donde surge el reto de su eliminación y evitar que sigan acumulándose en el ambiente, por lo que se propone el uso de sistemas de biotecnología ambiental en los cuales, a través de la acción metabólica de las bacterias, estos contaminantes se degraden en productos más simples, considerando que utilicen los compuestos como única fuente de carbono.

METODOLOGÍA

El aislamiento de bacterias con capacidad degradadora de estrógenos se realizó de muestras obtenidas de cuerpos de agua superficial de sitios contaminados con estos compuestos ubicados en la ciudad de Puebla, México con coordenadas 19°00'16.2" N, 98°12'20.6" W; 18°57'04.4" N, 98°16'12.7" W; 19°01'18.0" N, 98°13'42.5" y 19°03'08.5" N, 98°25'43.14" W, de acuerdo con la norma mexicana PROY-NMX-AA-003-SCFI-2009. Las muestras de agua se colocaron en caldo Luria Bertani (LB), conteniendo algestona - estradiol en una concentración de 7.5 mg mL⁻¹ y 0.5 mg mL⁻¹ respectivamente, incubándose durante 48 horas a 30 °C a 800 rpm. Posteriormente, se aislaron en agar Mc Conkey, King A y nutritivo; su identificación se realizó mediante pruebas bioquímicas.

El aislamiento de bacterias con capacidad degradadora de estrógenos se realizó a partir de muestras obtenidas de cuerpos de agua superficiales en sitios contaminados con estos compuestos, ubicados en la ciudad de Puebla, México, con coordenadas 19°00'16.2" N, 98°12'20.6" W; 18°57'04.4" N, 98°16'12.7" W; 19°01'18.0" N, 98°13'42.5" W y 19°03'08.5" N, 98°25'43.14" W, de acuerdo con la norma mexicana PROY-NMX-AA-003-SCFI-2009. Las muestras de agua se colocaron en caldo Luria-Bertani (LB), conteniendo algestona y estradiol en concentraciones de 7.5 mg/mL y 0.5 mg/mL, respectivamente, incubándose durante 48 horas a 30 °C y 800 rpm. Posteriormente, se aislaron en agar MacConkey, King A y nutritivo; su identificación se realizó mediante pruebas bioquímicas.

En la generación del inóculo las cepas se propagaron en caldo LB, durante 48 h a 30 °C, posteriormente se centrifugaron a 11 000 rpm durante 10 minutos, se separó el sobrenadante y el pellet se resuspendió en Medio Mínimo Mineral (MMM), ajustándose a 0.5 Å, a 600 nm que equivale aproximadamente a 1×10^9 UFCml⁻¹.

En la generación del inóculo, las cepas se propagaron en caldo LB durante 48 horas a 30 °C. Posteriormente, se centrifugaron a 11,000 rpm durante 10 minutos; se separó el sobrenadante y el pellet se resuspendió en Medio Mínimo Mineral (MMM), ajustándose a 0.5 Å a 600 nm, lo que equivale aproximadamente a 1×10^9 UFC/mL.

La determinación de la biodegradación por las cepas aisladas se hizo en caldo LB y MMM conteniendo los estrógenos algestona-estradiol a 15 mgmL⁻¹ y 1 mgmL⁻¹ respectivamente, incubándose durante 6 días a 30°C, 800 rpm. Transcurridos 6 días las muestras se centrifugaron a 11.000 rpm durante 10 minutos; el sobrenadante se separó y se hicieron las lecturas en un espectrofotómetro FTIR-ATR.

La evaluación de la biodegradación mediante dos consorcios (C1 y C2) formados de cuatro cepas cada uno (con la misma proporción) se llevó a cabo en caldo LB y MMM conteniendo estradiol-algestona a una concentración de 1 mg mL⁻¹ y 15 mg mL⁻¹ respectivamente, se incubó por 3 días a 30 °C, 80 rpm. Posteriormente las muestras fueron centrifugadas a 11 000 rpm, durante 10 min; se separó el sobrenadante y se leyó en el espectrofotómetro FTIR-ATR.

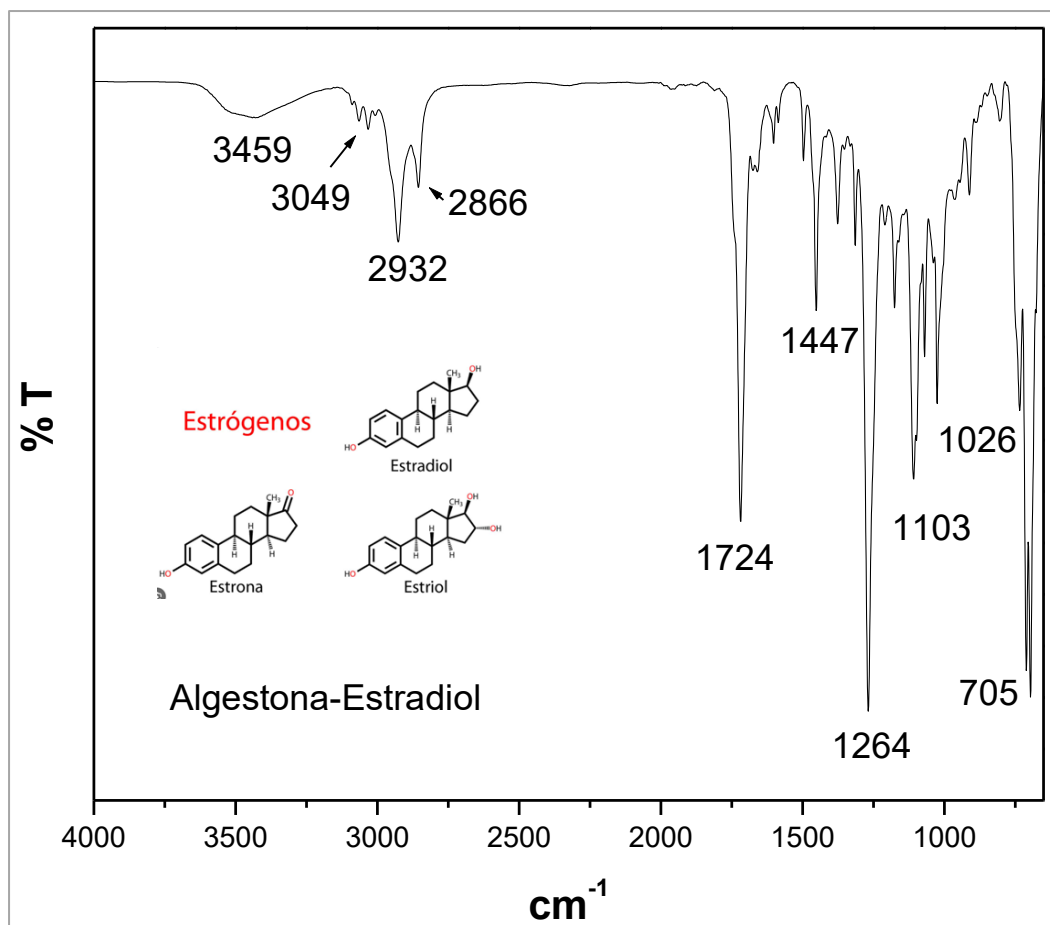
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las cepas aisladas e identificadas que correspondieron a los géneros *Citrobacter freundii*, *Pantoea agglomerans*, *Escherichia Coli* y *Klebsiella pneumoniae*, de las cuales se formaron los consorcios que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Consorcios bacterianos para la biodegradación de estrógenos.

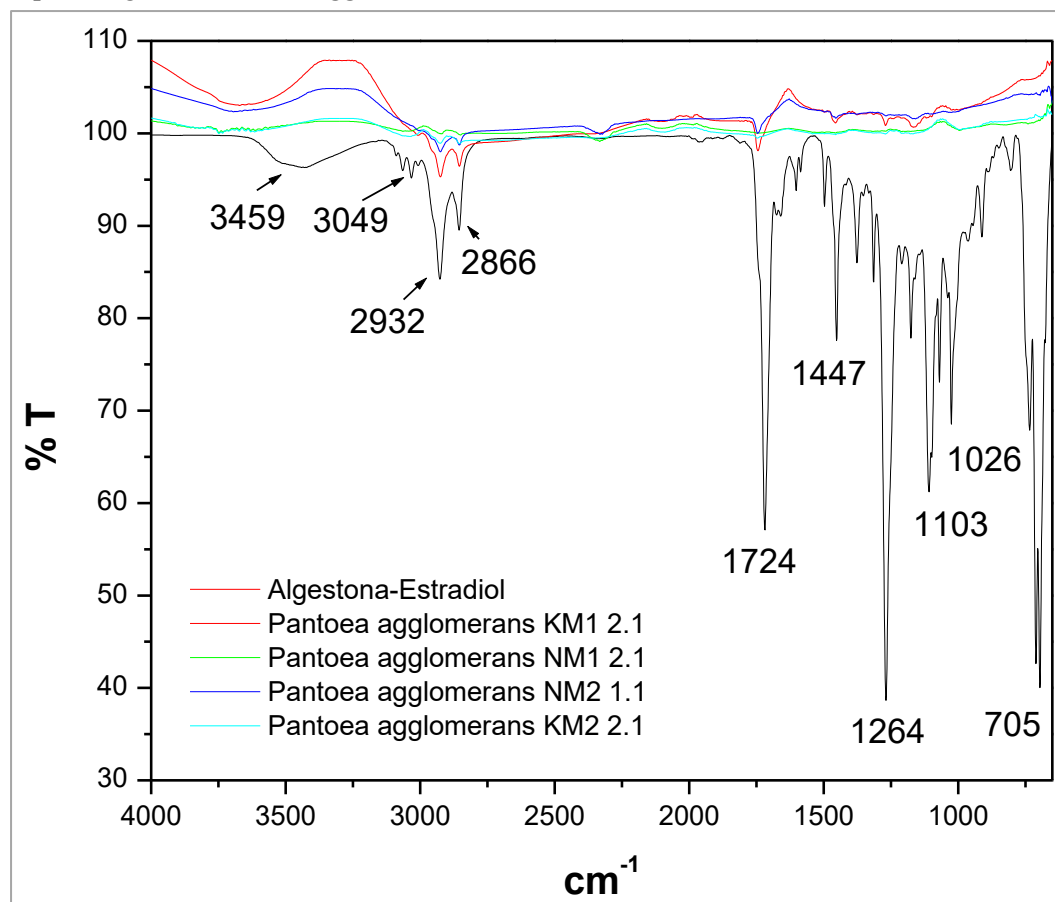
	Cepa	Género
Consortio 1	NM 1 1.1	Citrobacter freundii
	KM1 2.1	Pantoea agglomerans
	KM1 3.1	Citrobacter freundii
	KM4 3.2	Escherichia coli
Consortio 2	NM2 1.1	Pantoea agglomerans
	KM2 3.2	Klebsiella pneumoniae
	NM1 2.1	Pantoea agglomerans
	KM2 2.1	Pantoea agglomerans

Figura 1. Espectro FTIR-ATR de la hormona algestona-estradiol.



En la Figura 1 se muestra el espectro FTIR-ATR de la hormona algestona-estradiol. Se observa en la región de frecuencias de grupo la banda en 3459 cm^{-1} , la cual se asignó a la vibración de estiramiento O-H de los grupos -OH; seguida por la vibración de estiramiento de C-H del anillo aromático (-Ar) en 3049 cm^{-1} . Las bandas en 2932 cm^{-1} y 2866 cm^{-1} corresponden al estiramiento simétrico y asimétrico C-H de los grupos funcionales $-\text{CH}_2$ y CH_3 , respectivamente. La banda en 1724 cm^{-1} fue asignada a la vibración del grupo carbonilo (C=O) de la algestona. En la región de frecuencias de huella digital, se encontró la banda en 1447 cm^{-1} , asignada a la vibración C=C de compuestos aromáticos. La banda en 1264 cm^{-1} corresponde a la vibración Ar-OH de los alcoholes aromáticos, mientras que las bandas en 1103 cm^{-1} y 1206 cm^{-1} se asignaron a la vibración C-C de los cicloalcanos. Finalmente, la banda en 705 cm^{-1} se asignó a la vibración C=C de cicloalquenos (Nakanishi, K., 1962).

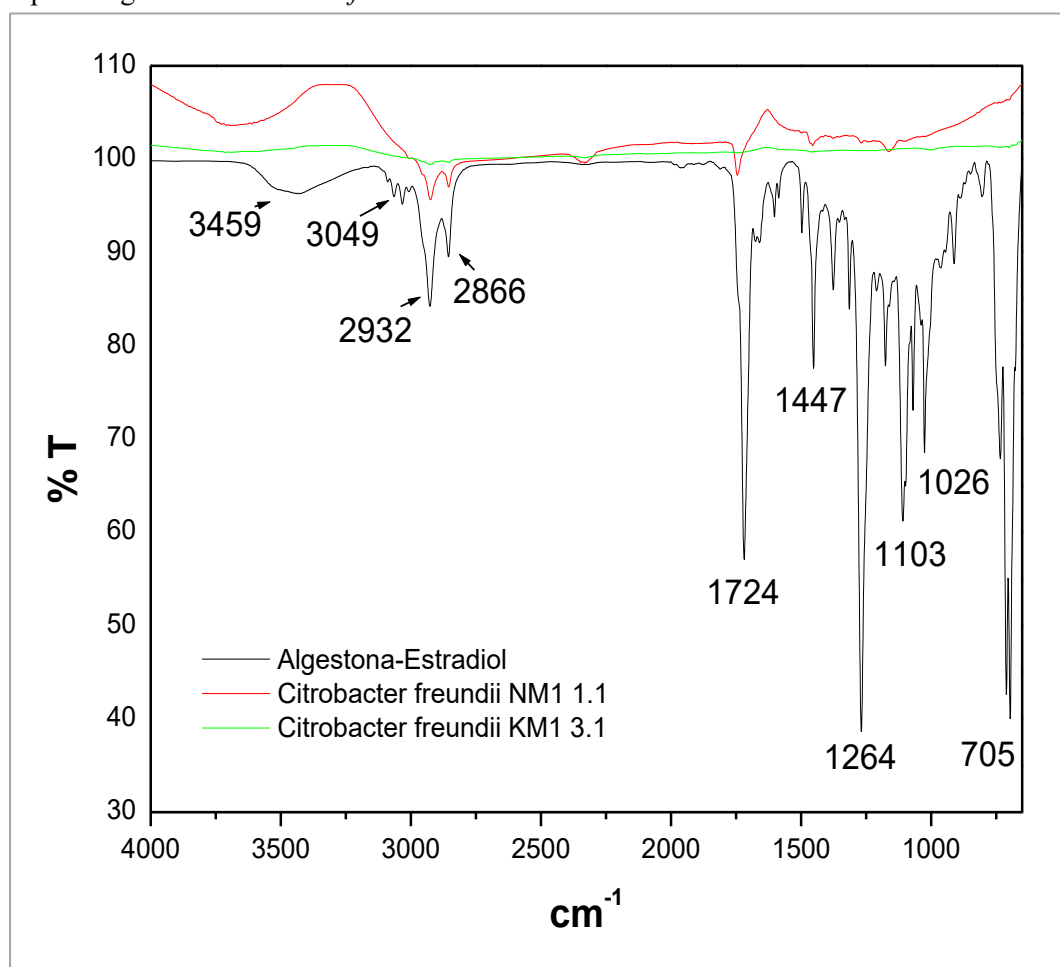
Figura 2. Espectro FTIR-ATR de la biodegradación de la hormona algestona-estradiol por medio de las cepas del género *Pantoea agglomerans* en caldo LB.



El resultado del tratamiento biológico de la algestona-estradiol en caldo LB realizado por el género *Pantoea agglomerans* en un periodo de 3 días, se muestra en la Figura 2. En los espectros que corresponde a las cepas *Pantoea agglomerans*, *KM1 2.1* y *NM1 2.1*, se observa un comportamiento similar, con la disminución de la intensidad relativa de las bandas que corresponden a las frecuencias de grupo y huella dactilar descritas en la Figura 1. Se observa que las bandas en la región de frecuencia de grupo, para *Pantoea agglomerans* *KM1 2.1* y *NM2 1.1*, mantienen la misma forma, lo que indica que se conserva el ambiente químico que rodea a la molécula, además de que la posición de las bandas de vibración no cambia. Sin embargo, en la banda en 3459 cm^{-1} , que se asignó a la vibración de estiramiento O-H de los grupos -OH, se observa un desplazamiento hacia la izquierda. Esto sugiere que la frecuencia de vibración del enlace químico en la molécula ha disminuido, lo cual indica que la estructura química se ha debilitado o han cambiado.

Este fenómeno puede deberse a que la molécula presenta una menor fuerza de enlace, posiblemente a causa de interacciones como la formación de enlaces de hidrógeno o cambios en la hibridación de los átomos involucrados, dando como resultado un compuesto con estructura química más simple. En los espectros de *Pantoea agglomerans* NMI 2.1 y KM2 2.1 no se observan bandas de vibración, lo que indica la biodegradación del estrógeno en componentes básicos como CO₂, agua y moléculas inorgánicas, las cuales no son activas en el espectro de infrarrojo medio para su detección.

Figura 3. Espectro FTIR-ATR de la biodegradación de la hormona algestona-estradiol por medio de las cepas del género *Citrobacter freundii* en caldo LB.

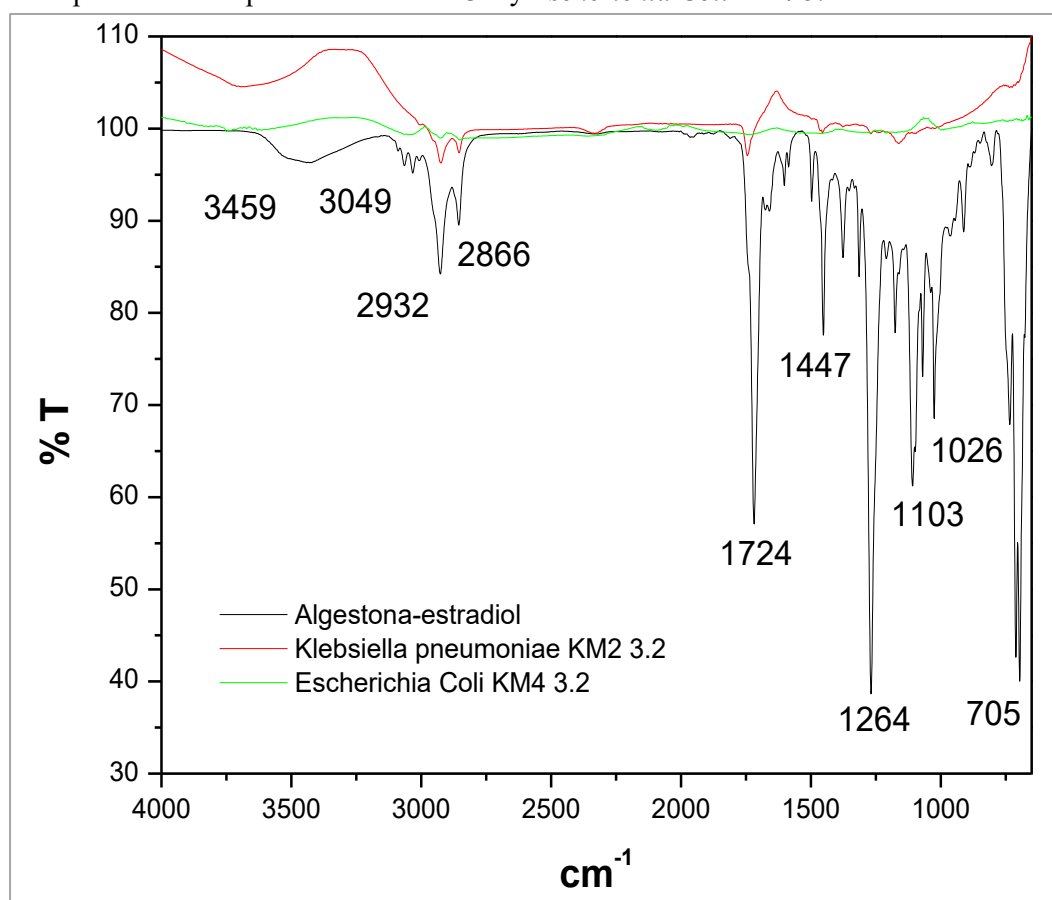


El proceso de biodegradación de la hormona algestona-estradiol, realizado por las cepas *Citrobacter freundii* NMI 1.1 y KM1 3.1 (figura 3) en caldo LB, muestra en el espectro de la *Citrobacter freundii* NMI 1.1 un desplazamiento hacia la izquierda de la banda en 3459 cm⁻¹, asignada a la vibración de estiramiento O-H de los grupos -OH, lo que evidencia un cambio en la estructura química de la molécula, transformando a la hormona en un compuesto más simple en un periodo de tiempo de 72 horas.

Por otro lado, en el espectro de *Citrobacter freundii* KM1 3.1, no se observan bandas de vibración características de la estructura química de hormona en la región de 4000 a 650 cm^{-1} , lo que indica la ausencia de los grupos funcionales característicos de la molécula o grupos activos, debido a la formación de productos como metabolitos, resultado de la degradación parcial de la hormona algestona-estradiol.

Con base en lo anterior, se puede deducir que se llevó a cabo la biodegradación completa, generándose una mineralización.

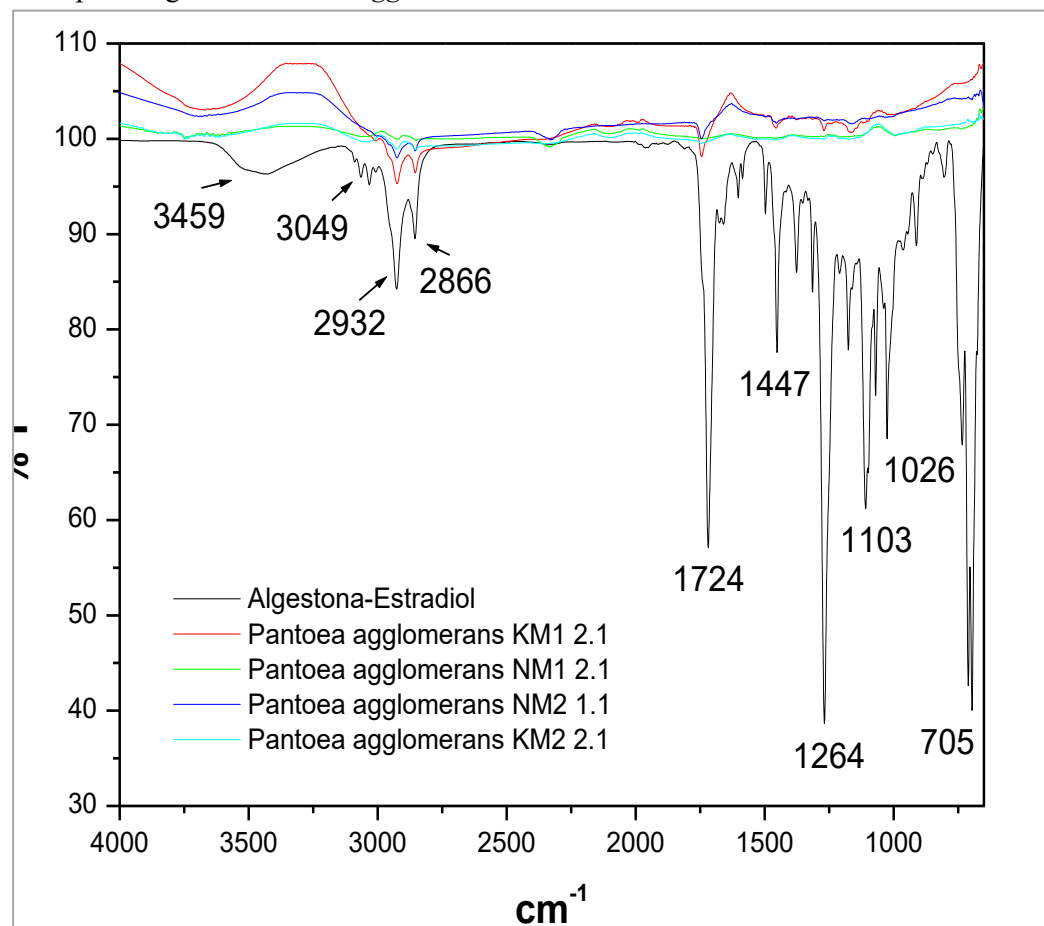
Figura 4. Espectro FTIR-ATR de la biodegradación de la hormona algestona-estradiol por medio de las cepas *Klebsiella pneumoniae* KM2 3.2 y *Escherichia Coli* KM4 3.2 en caldo LB.



El análisis de la biodegradación de las hormonas a las 72 horas, utilizando las cepas *Klebsiella pneumoniae* KM2 3.2 y *Escherichia Coli* KM4 3.2 (Figura 4), muestran en el espectro de la cepa *Klebsiella pneumoniae* KM2 3.2 un comportamiento similar al desplazamiento en la banda en 3459 cm^{-1} , la cual se asignó a la vibración de estiramiento O-H de los grupos -OH, tal como se observó al utilizar *Pantoea agglomerans* KM1 2.1 y *Pantoea agglomerans* NM1 2.1 (Figura 2), así como la cepa *Citrobacter freundii* KM1 1.1 y *Citrobacter freundii* KM1 3.1 (figura 3).

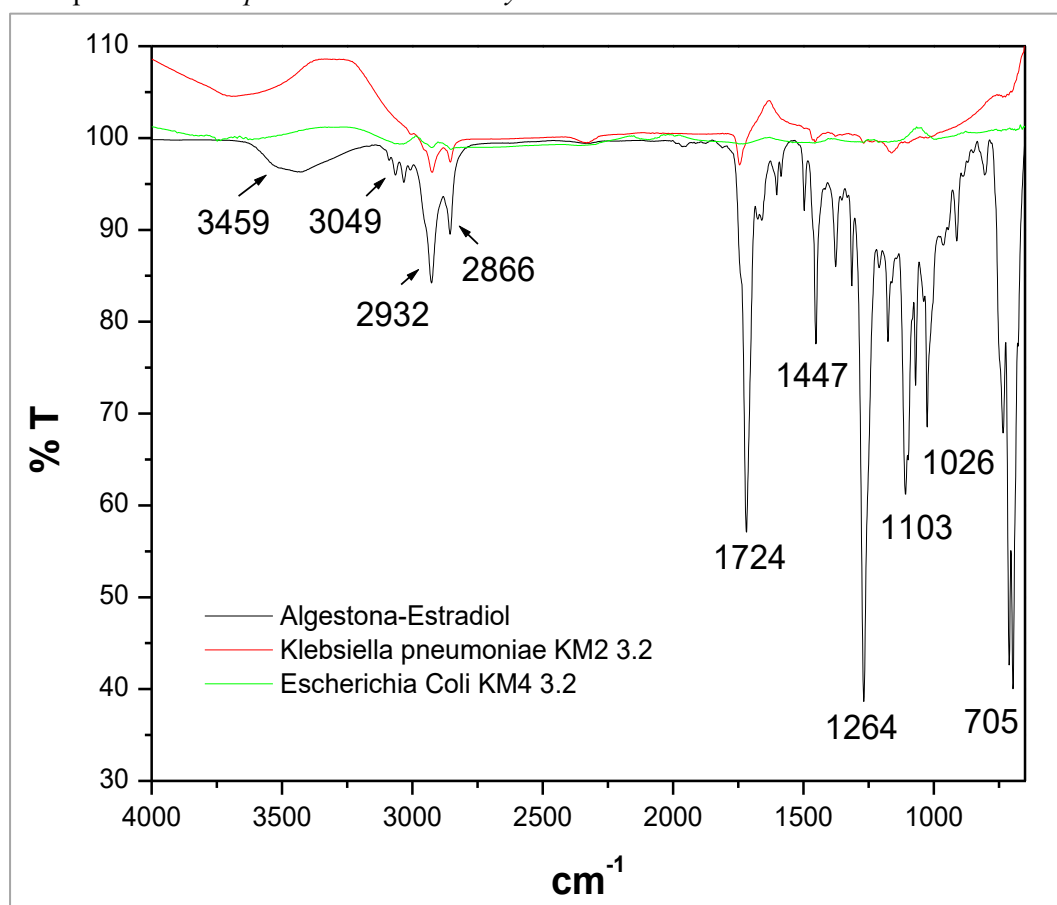
Además, se observa la degradación completa de la hormona algestona-estradiol al utilizar *Escherichia Coli* KM4 3.2 en caldo LB.

Figura 5. Espectro FTIR-ATR de la biodegradación de la hormona algestona-estradiol por medio de las cepas del género *Pantoea agglomerans* en MMM.



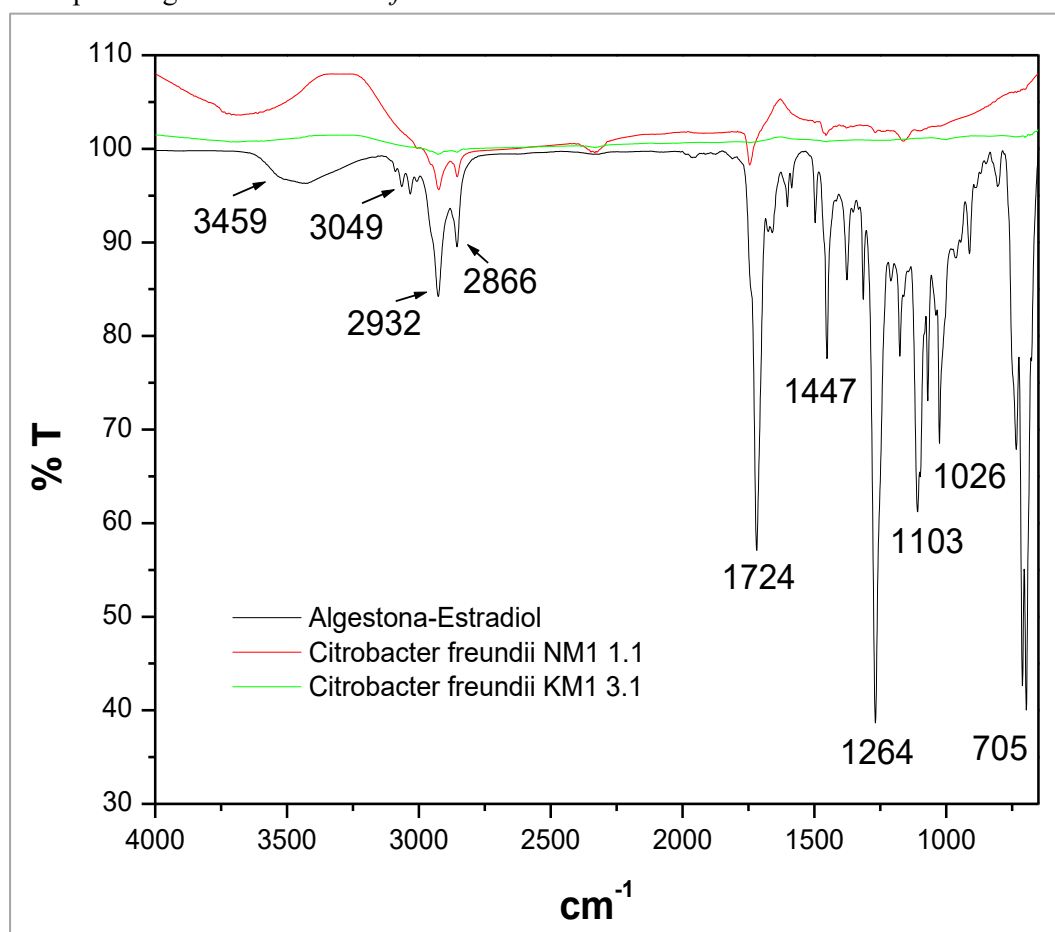
En la evaluación de la biodegradación de los grupos funcionales presentes en la hormona algestona-estradiol por diversas cepas microbianas del género *Pantoea agglomerans* (Figura 5), se observó un patrón general de biodegradación en todas las cepas estudiadas. Sin embargo, un hallazgo distintivo se presentó en el espectro de la cepa KM1 2.1, en el cual aún se observan, aunque con menor intensidad, las bandas de los grupos funcionales característicos de la estructura de la hormona algestona-estradiol, lo que indica una biodegradación primaria sin llegar al proceso de oxidación o mineralización.

Figura 6. Espectro FTIR-ATR de la biodegradación de la hormona algestona-estradiol por medio de las cepas *Klebsiella pneumoniae* KM2 3.2 y *Escherichia Coli* KM4 3.2 en MMM.



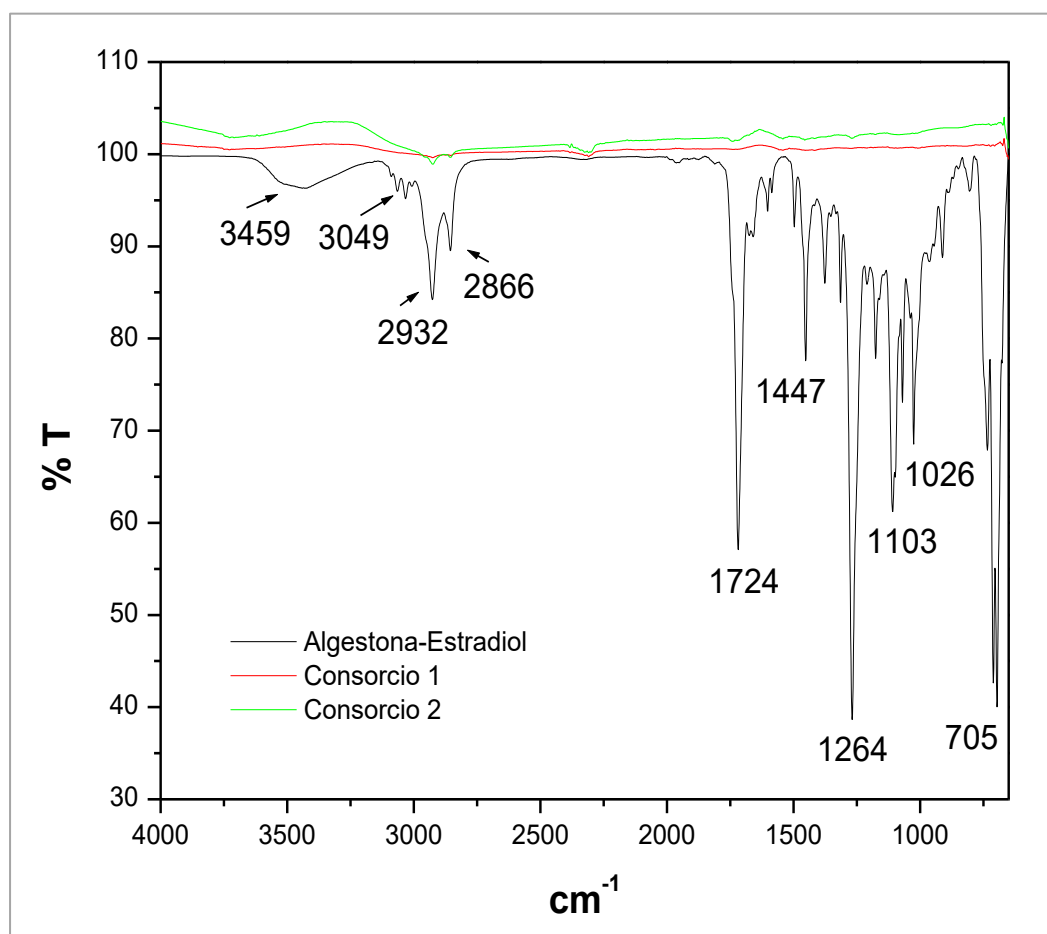
En el estudio comparativo de la biodegradación de los grupos funcionales presentes en la hormona algestona-estradiol (Figura 6), se observó que la cepa de *Escherichia coli* demostró una mayor eficacia en la degradación de estos componentes en comparación con *Klebsiella pneumoniae*. Mientras *Escheria coli* logró degradar de manera efectiva la estructura de la hormona algestona-estradiol, *Klebsiella pneumoniae* mostró limitaciones, ya que aún se observan bandas de vibración de grupos funcionales en el espectro.

Figura 7. Espectro FTIR-ATR de la biodegradación de la hormona algestona-estradiol por medio de las cepas del género *Citrobacter freundii* en caldo MMM.



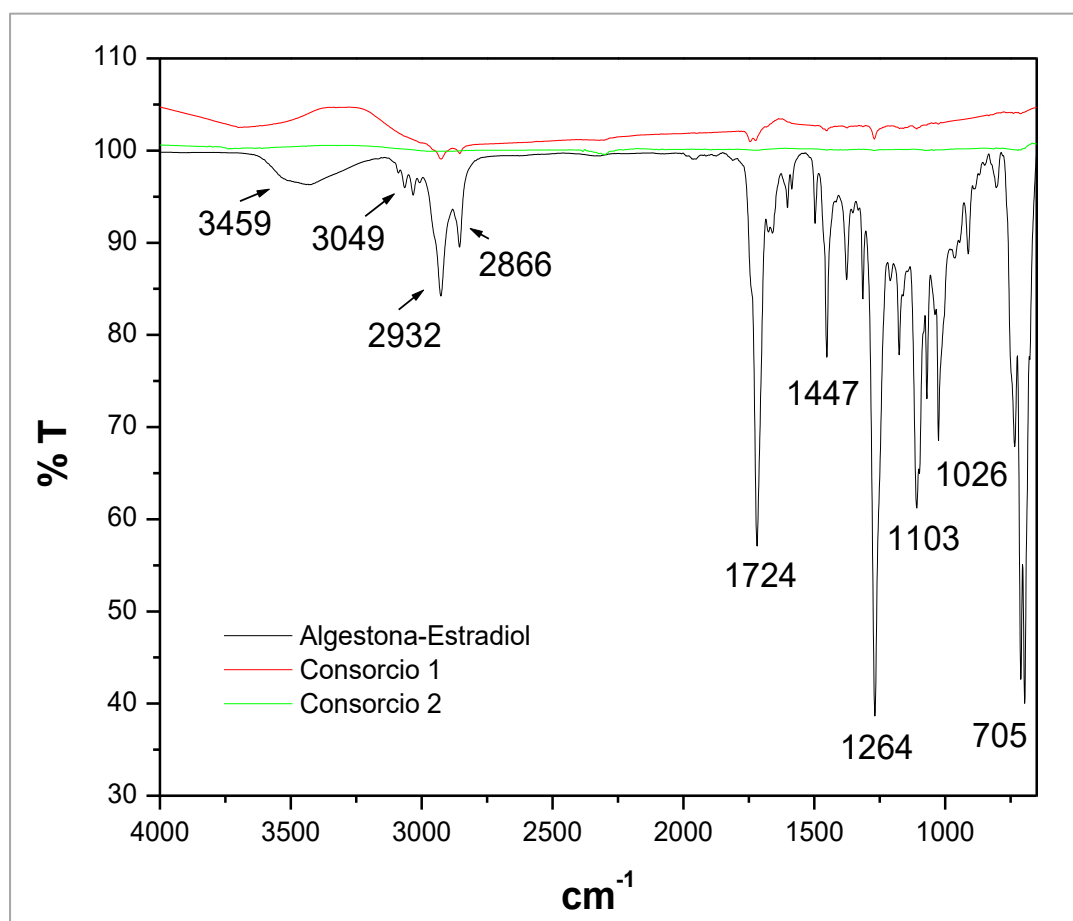
En el estudio de la biodegradación de la hormona algestona-estradiol utilizando cepas del género *Citrobacter freundii* en caldo MMM (Figura 7), se observaron diferencias significativas en la eficiencia de degradación entre las cepas analizadas, ya que se observan bandas de baja intensidad características de los grupos funcionales. La cepa NM1 1.1 no logró biodegradar completamente la estructura de la hormona algestona-estradiol. Por otro lado, la cepa KM1 3.1 demostró una capacidad diferente, logrando biodegradar la estructura hasta su mineralización.

Figura 8. Espectro FTIR-ATR de la biodegradación de la hormona estradiol- algestona por medio de consorcios bacterianos en caldo LB.



La figura 8 muestra la mineralización de la hormona algestona-estradiol mediante los consorcios 1 y 2 en caldo LB, observándose la ausencia de las bandas de vibración de los grupos funcionales de la estructura química.

Figura 9. Espectro FTIR-ATR de la biodegradación de la hormona estradiol- algestona por medio de consorcios bacterianos en MMM.



En la biodegradación de las hormonas estradiol-algestona en MMM (Figura 9), el consorcio 1 mostró la biodegradación de la estructura de las hormonas, evidenciada por la desaparición y la baja intensidad de las bandas de vibración de los grupos funcionales. Para el consorcio 2, se observa una mineralización debido a la ausencia de bandas de vibración.

Las bacterias aisladas en este estudio, correspondientes a *Citrobacter freundii*, *Pantoea agglomerans*, *Escherichia coli* y *Klebsiellae pneumoniae*, mostraron capacidad para la biodegradación de contaminantes emergentes como el estradiol en condiciones aerobias. Esto concuerda con estudios en los que se ha demostrado que diversos tipos de microorganismos presentan esta capacidad de biorremediación de contaminantes emergentes, como *Rhodococcus sp.* RCBS9 (Hao *et. al.*, 2024), aislada de una granja lechera, así como *Oleigrimonas*, *Pseudomonas*, *Terrimonas* y *Nitratreductor*, aisladas de sedimentos de manglares, que degradaron el estradiol a estrona mediante un metabolismo aerobio, vía deshidrogenación por la actividad enzimática de la 17 β -hidroxiesteroide deshidrogenasa,

según lo reportado por Zhang *et. al.* (2024). Las bacterias en el presente estudio lograron degradar el estradiol en compuestos más simples mediante la actividad enzimática, lo cual concuerda con Bala y colaboradores (2022), quienes demostraron que, mediante técnicas de biorremediación, los contaminantes se degradan y se convierten en formas menos tóxicas.

La utilización de cepas y consorcios bacterianos para la eliminación de compuestos disruptores endocrinos del agua, como los estrógenos, específicamente la hormona estradiol- algestona, es eficaz como tratamiento biológico. Las bacterias logran utilizar estas hormonas como su única fuente de carbono, y en conjunto, dentro de un consorcio, presentan un efecto sinérgico, como lo reportaron Weber y colaboradores (2005), quienes utilizaron un cultivo mixto para la degradación de estradiol y etinilestradiol mediante cepas como *Acinetobacter calcoaceticus*, *Pseudomonas putida* y *Comamonas testosteroni*.

La eliminación de estradiol encontrada en este trabajo coincide con lo reportado por Xiong *et. al.* (2020), con una biodegradación del 90% de una concentración de 10 mg/L de E2 en 7 días mediante *Stenotrophomonas maltophilia* SJTH1, utilizándolo como única fuente de carbono; por Ismanthus *et. al.* (2022), donde la bacteria *Cellulosimicrobium funkei* degrada el 90% del E2; por Nawaz *et. al.* (2024), donde las enzimas lacasas de *Bacillus ligniniphilus* L1 lograron eliminar el 62%; por Prakash y Chaturvedi (2023), quienes reportaron que *Pseudomonas citronellolis* BHUWW1 metaboliza el 94% de 10 mg/L de E2 después de 8 días, utilizando acetato de sodio como suplemento; por Cao *et. al.* (2024), quienes lograron una degradación del 80% del E2 a concentraciones de 10 mg/L mediante *Sphingobacterium sp.* GEMBCS-01; y por Zhang *et. al.* (2022), quienes reportaron que la cepa *Ochrobactrum sp. FJI* degrada el $98 \pm 1\%$ del estradiol en 10 días, en un tiempo significativamente más corto en comparación con lo reportado por Estrada *et. al.* (2013). En este último estudio, se evaluó el desempeño de un biorreactor de membrana sumergida (SMBR) a nivel planta piloto para la eliminación de estrógenos (E1, E2 y EE2) presentes en las aguas residuales del área metropolitana de la Ciudad de México (CDMX). En ese estudio, se obtuvieron resultados favorables después de 94 días de operación, con las mejores tasas de eliminación alcanzadas a los 234 días, lo que representa un tiempo significativamente mayor en contraste con el sistema evaluado en la presente investigación.

Los resultados de biodegradación en ambos medios utilizados en el experimento (MMM y caldo LB) fueron favorables. Sin embargo, el uso de un medio mínimo promueve la utilización de hormonas como única fuente de carbono, como lo reportado por Xiong *et. al.* (2023), donde la bacteria *Microbacterium hominis* SJTG1 degradó casi el 100% de 10 mg/L de E2 en un medio mínimo en 6 días. Esto implica un sistema de bajo costo y factible para su aplicación a gran escala.

CONCLUSION

Las cepas que lograron una mejor biodegradación de la hormona estradiol-algestona en caldo LB fueron *Pantoea agglomerans* NM1 2.1 y *Citrobacter freundii* KM1 3.1, mientras que en MMM fueron *Pantoea agglomerans* NM1 2.1, *Escherichia Coli* KM4 3.2 y *Citrobacter freundii* KM1 3.1, utilizando el contaminante como única fuente de carbono.

El consorcio 2, formado por *Pantoea agglomerans* NM2 1.1, *Klebsiella pneumoniae*, KM2 3.2, *Pantoea agglomerans* NM1 2.1 y *Pantoea agglomerans* KM1 2.1, amplificó la biodegradación de las hormonas estradiol-algestona en comparación con las cepas individuales, utilizándolas como única fuente de carbono y mineralizándolas. Esto indica que el consorcio puede emplearse como un proceso biotecnológico para la eliminación de estos contaminantes emergentes sin generar subproductos tóxicos.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos al laboratorio de análisis instrumental de la facultad de ingeniería química.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ayala, M. (2017). *Boletín UNAM-DGCS-034: Preocupante, presencia de estrógenos en cuerpos de agua como contaminantes emergentes*. Universidad Nacional Autónoma de México. https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2017_034.html
- Bala, S., Garg, D., Thirumalesh, B. V., Sharma, M., Sridhar, K., Inbaraj, B. S., & Tripathi, M. (2022). Recent strategies for bioremediation of emerging pollutants: A review for a green and sustainable environment. *Toxics*, 10(484). <https://doi.org/10.3390/toxics10080484>
- Barrios-Estrada, C., Rostro-Alanis, M. J., Muñoz-Gutiérrez, B. D., Iqbal, H. M. N., Kannan, S., & Parra-Saldivar, R. (2018). Emergent contaminants: Endocrine disruptors and their laccase-assisted degradation – A review. *Science of the Total Environment*, 612, 1516–1531. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.013>



- Cao, S., Duan, M., Zhang, X., Yang, Z., & Zhuo, R. (2024). Bacterial community structure analysis of sludge from Taozi lake and isolation of an efficient 17 β -estradiol (E2) degrading strain *Sphingobacterium sp.* GEMB-CSS-01. *Chemosphere*, 355, 141806.
- Estrada, E. B., Mijaylova, P., Moeller, G., Mantilla, G., Ramírez, N., & Sánchez, M. (2013). Presencia y tratamiento de compuestos disruptores endócrinos en aguas residuales de la Ciudad de México empleando un biorreactor con membranas sumergidas. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 14(2), 201-212.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432013000200011
- Ghai, M. K., Khatri, A., Kumar, K., & Thakur, I. S. (2024). Multi-omics and advanced technologies in biodegradation of emerging contaminants and eco-estrogens in environmental waste. *Total Environment Advances*, 11, 200113. <https://doi.org/10.1016/j.teadva.2024.200113>
- Martínez, R., Bassin, J., Bila, D., & Dezotti, M. (2021). Biodegradation of natural and synthetic endocrine-disrupting chemicals by aerobic granular sludge reactor: Evaluating estrogenic activity and estrogens fate. *Environmental Pollution*, 277, 116770.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116770>
- Nakanishi, K. (1962). *Infrared absorption spectroscopy* (2nd ed.). Holden-Day.
- Nawaz, M. Z., Haider, S. Z., Zhe, L., Usman, M. M., Rameez, K. H., Ahmad, A. H., & Zhu, D. (2024). Evaluating the estrogen degradation potential of laccase and peroxidase from *Bacillus ligniniphilus* L1 through integrated computational and experimental approaches. *International Journal of Biological Macromolecules*, 282, 137187.
- Prakash, C., & Chaturvedi, V. (2023). Degradation of 17 α -ethynyl estradiol by *Pseudomonas citroneolis* BHUWW1 and its degradation pathway. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 54, 102937.
- Ramírez, I., Martínez, P., Quiroz, M., & Bandala, E. (2015). Efectos de los estrógenos como contaminantes emergentes en la salud y el ambiente. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(5), 69-84.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222015000500003



- Sultan, M. B., Nik, A. H., & Rahman, M. (2024). Emerging contaminants and their potential impacts on estuarine ecosystems: Are we aware of it? *Marine Pollution Bulletin*, 199, 115982. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115982>
- Weber, S., Leuschner, P., Kämpfer, P., Dott, W., & Hollender, J. (2005). Degradation of estradiol and ethinyl estradiol by activated sludge and by a defined mixed culture. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 67(1), 106-112. <https://doi.org/10.1007/s00253-004-1772-7>
- Xiong, W., Yin, C., Wang, Y., Lin, S., Deng, Z., & Liang, R. (2020). Characterization of an efficient estrogen-degrading bacterium *Stenotrophomonas maltophilia* SJTH1 in saline-, alkaline-, heavy metal-contained environments or solid soil and identification of four 17 β -estradiol-oxidizing dehydrogenases. *Journal of Hazardous Materials*, 385, 121616.
- Zhang, S., Ye, X., Lin, X., Zeng, X., Meng, S., Luo, W., & Hu, Z. (2024). Novel insights into aerobic 17 β -estradiol degradation by enriched microbial communities from mangrove sediments. *Journal of Hazardous Materials*, 133045. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.133045>
- Zhang, Q., Xue, C., Owens, G., & Chen, Z. (2022). Isolation and identification of 17 β -estradiol degrading bacteria and its degradation pathway. *Journal of Hazardous Materials*, 423, 127185. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127185>

