



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
COLEGIO DE INGENIERÍA AMBIENTAL



BIODEGRADACIÓN DE CONTAMINANTES EMERGENTES (ALGESTONA CON ESTADIOL) 201729325

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO
AMBIENTAL

PRESENTA

ANDREA SOFÍA MINUEZA LUNA

DIRECTOR DE TESIS

DR. JOSÉ CARLOS MENDOZA HERNÁNDEZ

NOVIEMBRE 2023

Lista de imágenes

Imagen 1. Aislamiento de cepas en placas	23
Imagen 2. Aislamiento de distintas cepas en placa	24
Imagen 3. Preparación de pruebas bioquímicas	25
Imagen 4. Pruebas bioquímicas.....	25
Imagen 7. Inoculación de la hormona con consorcios microbianos.....	27
Imagen 8. Consorcios microbianos en caldo Lb con hormona.....	28
Imagen 9. Consorcios microbianos en MMM con hormona	28

Lista de figuras y tablas

Figura 1. Contaminantes del agua (Elaboración propia)	6
Figura 2. Esquema con ejemplos de contaminantes emergentes (Elaboración propia).....	7
Figura 3. Estructura química de la estrona obtenida de (The National Center for Biotechnology Information, 2023).....	10
Figura 4. Estructura química del estriol obtenida (Ayacop, 2006).....	10
Figura 5. Estructura química del estradiol obtenida de (The National Center for Biotechnology Information, 2023).....	12
Figura 6. Estructura química de la algestona obtenida de (The National Center for Biotechnology Information, 2023).....	14
Figura 7. Obtenida de Google Maps 2023.....	21
Figura 8. Obtenida de Google Maps 2023.....	22
Figura 9. Obtenida de Google Maps 2023.....	22
Tabla 1. Resultados de las pruebas bioquímicas	30
Tabla 2. Composición de los consorcios microbianos	38

Contenido

1. Introducción	4
1. Planteamiento del problema	5
2. Justificación	5
3. Marco teórico	5
3.1. Contaminación del agua	5
3.2. Contaminantes del agua.....	6
3.3. Contaminantes emergentes.....	7
3.4. Hormonas	8
3.5. Estrógenos	9
3.6. Estradiol	11
3.7. Algestona.....	13
3.8. Tratamiento de aguas residuales.....	14
3.9. Tratamiento microbiológico	15
3.10. Biodegradación.....	15
3.11. Biorremediación	15
3.12. Sinergia del tratamiento microbiológico	16
3.13. Interacción hormona- microorganismo	17
3.14. Tipos de microorganismos degradadores de hormonas.....	17
3.15. Tratamientos biológicos ante los fisicoquímicos.....	18
3. Objetivos	20
3.16. Objetivo general	20
3.17. Objetivos específicos	20
4. Hipótesis	20
5. Metodología	21
a. Muestreo	21
b. Aislamiento de cepas microbianas	23
c. Conservación	24
d. Identificación de bacterias	24
e. Generación del inóculo	26
f. Ensayos con bacterias	26
g. Lecturas en espectro IR de bacterias individuales	26
h. Formación de consorcios	27

i. Ensayo con consorcios.....	27
j. Lecturas en espectro IR de consorcios microbianos.....	28
6. Resultados	29
6.1. Aislamiento de bacterias	29
6.2. Identificación de las cepas	29
7. Discusión de resultados	40
8. Conclusión.....	41
Referencias.....	42

Título

“Biodegradación de contaminantes emergentes (algestona con estradiol) 201729325.”

1. Introducción

La contaminación del agua es un problema ambiental global que afecta a la calidad y disponibilidad de este recurso, esta se refiere a la introducción de sustancias que alteran la pureza del agua, haciéndola peligrosa o no apta para su uso. Esta contaminación puede tener graves consecuencias para la salud humana, la vida acuática, la agricultura y el ecosistema en general.

Existen diversas fuentes de contaminación del agua, incluyendo, contaminantes químicos, contaminantes biológicos, contaminantes físicos y contaminantes emergentes.

Los contaminantes emergentes incluyen una amplia gama de sustancias químicas provenientes de actividades industriales, farmacéuticas y agrícolas son una clase de compuestos que están adquiriendo cada vez más importancia debido a su creciente presencia en el medio ambiente y su impacto potencial en los ecosistemas acuáticos y terrestres.

Dentro de ellos tenemos a las hormonas, un ejemplo son la algestona y el estradiol, la algestona es una progesterona sintética comúnmente utilizada en anticonceptivos y terapias de reemplazo hormonal, mientras que el estradiol es la forma activa de estrógeno que se encuentra en medicamentos y desechos humanos y animales. Se ha demostrado que ambos compuestos tienen efectos adversos sobre la vida acuática y, debido a su persistencia en el medio ambiente, pueden representar una amenaza para la salud de los ecosistemas y la vida silvestre. En este contexto, la biodegradación parece ser una estrategia prometedora para prevenir la presencia de estos nuevos contaminantes. Este proceso biológico implica la acción de microorganismos que descomponen y transforman estos compuestos en productos más simples y menos tóxicos. Comprender y explotar este proceso es fundamental para desarrollar métodos de descontaminación eficaces y sostenibles y mantener la salud y la integridad de los ecosistemas.

1. Planteamiento del problema

La contaminación del agua es un tema de primordial atención, debido a la presencia de diversos agentes en efluentes y cuerpos hídricos que están ocasionando graves problemas ambientales. Entre estos contaminantes destacan los contaminantes emergentes, donde se encuentran las hormonas, particularmente los estrógenos que son ampliamente demandados en la medicina y ganadería. (Cruza, y otros, 2023)

Uno de los estrógenos más utilizados en los últimos años es el estradiol, la presencia de estradiol en las aguas residuales representa un problema ambiental y de salud pública debido a su potencial impacto negativo en los ecosistemas acuáticos y en la salud humana. El estradiol, puede alterar el equilibrio hormonal de los organismos acuáticos y tener efectos adversos en la reproducción y desarrollo de la fauna acuática.

2. Justificación

Actualmente los estrógenos presentan una problemática medioambiental en todo el mundo derivado del consumo indiscriminado de hormonas en tratamientos humanos y veterinarios (Silva, Otero, & Esteves, 2012), sin embargo, estas moléculas no son metabolizadas en su totalidad por lo que se encuentran en efluentes de agua residuales y aunado a que los sistemas de tratamiento no cuentan con la tecnología necesaria para poder removerlos, su destino final son cuerpos de agua como los ríos, mares y lagos.

La identificación de microorganismos degradadores de la algestona con estradiol en aguas residuales adquiere relevancia debido a la contaminación hormonal emergente, sus impactos ambientales y en la salud. La presencia de hormonas en aguas residuales puede alterar ecosistemas acuáticos y sistemas agrícolas, mientras que la resistencia a la degradación agrava la problemática. La investigación de microorganismos capaces de degradar la algestona con estradiol ofrece la posibilidad de desarrollar estrategias de tratamiento y conservación del agua más efectivas y sostenibles, así como comprender su impacto en la salud humana y la gestión de recursos hídricos.

3. Marco teórico

3.1. Contaminación del agua

La contaminación del agua es un problema grave que afecta la calidad y disponibilidad de este recurso. Se produce de forma natural o antropogénica, cuando sustancias nocivas que provienen de diversas fuentes, como la descarga de desechos industriales, la agricultura intensiva, el vertido de

productos químicos y la contaminación urbana entran en contacto con los efluentes (arroyos, ríos, lagos, océanos, acuíferos u otras masas de agua). (Denchat, 2023) Los contaminantes del agua pueden ser químicos, biológicos o físicos, estos alteran su composición, volviéndolos peligrosos para los seres vivos y el medio ambiente.

La contaminación del agua tiene diversos efectos negativos, puede afectar la salud humana, ya que el consumo de agua contaminada puede causar enfermedades como diarrea, intoxicación y problemas gastrointestinales. Además, puede dañar los ecosistemas acuáticos, afectando a los organismos acuáticos, provocando la degradación de los ecosistemas y la pérdida de biodiversidad. (Nuñez, 2023)

3.2. Contaminantes del agua

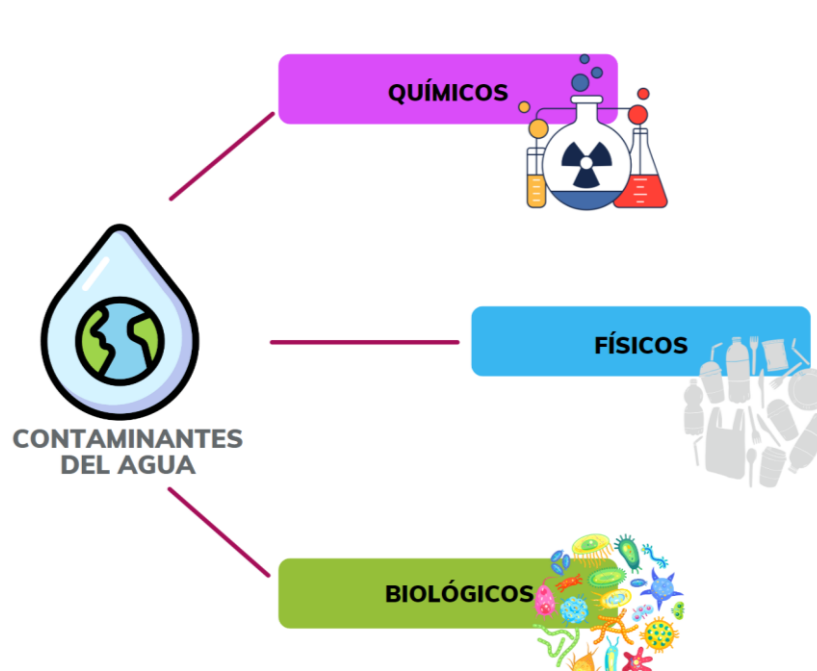


Figura 1. Contaminantes del agua (Elaboración propia)

Los contaminantes químicos incluyen productos químicos industriales, pesticidas, herbicidas, metales pesados y productos farmacéuticos. Estos contaminantes pueden ser tóxicos para los seres vivos y pueden persistir en el agua durante mucho tiempo. Los contaminantes biológicos son bacterias, virus y parásitos que pueden provenir de aguas residuales no tratadas o de fuentes naturales como la descomposición de materia orgánica. Los contaminantes físicos incluyen

sedimentos, plásticos y otros desechos sólidos que pueden obstruir los cuerpos de agua y afectar la vida acuática.

Además de los contaminantes químicos, biológicos y físicos mencionados, también es importante mencionar a los contaminantes emergentes.

3.3. Contaminantes emergentes

Los contaminantes emergentes (CE) son compuestos químicos previamente desconocidos o no considerados como contaminantes, pero que ahora generan preocupación por sus potenciales repercusiones en el medio ambiente y la salud.

En la actualidad, los seres humanos emplean una amplia gama de sustancias químicas en su rutina diaria, con un estimado de 30,000 a 70,000 compuestos registrados, de los cuales alrededor de 4,000 se incorporan activamente. Se ha detectado la presencia de estos compuestos en cantidades mínimas, que van desde ng L^{-1} a mg L^{-1} , en cuerpos de agua naturales, identificados como contaminantes emergentes (CE). (Lukač Reberski, Terzić, Maurice, & Lapworth, 2022).



Figura 2. Esquema con ejemplos de contaminantes emergentes (Elaboración propia).

Los contaminantes emergentes (CE), abarcan una variedad de compuestos de diversa procedencia y composición química (Miriam Janet Gil, 2012). Los cuales incluyen fármacos (medicamentos humanos o veterinarios que pueden llegar al agua a través de la excreción de pacientes o la eliminación inadecuada de medicamentos vencidos), compuestos perfluorados (sustancias presentes en productos como recubrimientos antiadherentes y repelentes al agua, que pueden contaminar el agua mediante la liberación de productos y la disposición de residuos), productos de cuidado personal productos como detergentes, cremas, al igual que drogas de abuso, nanomateriales y hormonas. (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2018).

3.4. Hormonas

Las hormonas son sustancias químicas las cuales se producen en algunas células del cuerpo y circulan a través de la sangre para llegar a los órganos y tejidos del organismo, en ocasiones unidas a proteínas transportadoras (Bombí, 2021).

Las hormonas son sustancias químicas producidas por las glándulas endocrinas en el cuerpo humano. Desempeñan un papel crucial en la regulación de diversas funciones corporales, como el crecimiento, el metabolismo, la reproducción y el equilibrio hormonal. Las hormonas se clasifican en diferentes grupos según su función y origen. A continuación, se presentan algunos subgrupos de hormonas según la clasificación ATC (Anatomical Therapeutic Chemical Classification System, s.f.) :

- Grupo H de la clasificación ATC: Preparados hormonales sistémicos, excluyendo hormonas sexuales e insulinas. Este grupo incluye hormonas hipotalámicas e hipofisarias y sus análogos, corticoides sistémicos, terapia tiroidea, hormonas pancreáticas y homeostasis del calcio.
- Grupo G de la clasificación ATC: Sistema genitourinario y hormonas sexuales. Este grupo incluye antiinfecciosos y antisépticos ginecológicos, otros productos ginecológicos, hormonas sexuales y moduladores genitales, y preparados urológicos.

Es importante destacar que existen otros grupos de hormonas y clasificaciones, pero estos son algunos ejemplos relevantes según la clasificación ATC.

3.4.1. Funciones y ejemplos de hormonas

Las hormonas desempeñan diversas funciones en el cuerpo humano, por mencionar algunas y sus funciones principales, tenemos:

- **Hormona del crecimiento:** Afecta el crecimiento y el desarrollo, promueve la producción de proteínas y afecta la distribución de la grasa corporal.
- **Hormona luteinizante y hormona foliculoestimulante :** Regulan la producción de hormonas sexuales (estrógeno y progesterona) y la producción de óvulos y espermatozoides.
- **Oxitocina:** Estimula la contracción del útero y la liberación de leche durante la lactancia. También puede estar involucrada en la confianza y la formación de vínculos, especialmente entre padres e hijos.
- **Prolactina:** Inicia y mantiene la producción de leche en las mamas y afecta los niveles de hormonas sexuales.
- **Hormona estimulante de la tiroides:** Estimula la producción y secreción de hormonas tiroideas.
- **Renina:** Regula la presión arterial.

Las hormonas desempeñan un papel de suma importancia en el equilibrio y la regulación de diversas funciones corporales. Son responsables de regular el crecimiento, el metabolismo, la reproducción, el estado de ánimo y entre otras funciones vitales.

Además de las hormonas mencionadas anteriormente, es crucial destacar la importancia de los estrógenos en el sistema hormonal. Los estrógenos son un grupo de hormonas esteroideas producidas principalmente en los ovarios y glándulas suprarrenales en el caso de las mujeres. Cumplen un papel fundamental en el desarrollo y regulación del sistema reproductivo femenino, así como en otras funciones vitales en el organismo. (Biblioteca nacional de medicina (EE.UU), 2022).

3.5.Estrógenos

Los estrógenos constituyen un conjunto de hormonas sexuales femeninas cruciales para el desarrollo y funcionamiento del sistema reproductivo en las mujeres. Aunque principalmente son producidos por los ovarios, también se generan en otras áreas del cuerpo, como las glándulas suprarrenales y el tejido adiposo. Los estrógenos se destacan como los más activos en su capacidad

para estimular tanto la tiroides como el sistema reproductivo femenino. Estas hormonas son responsables de las características sexuales distintivas de las mujeres. (Grupo Hospital Clinic, s.f.)

Existen varios tipos de estrógenos que desempeñan diferentes funciones en el cuerpo. Los tipos de estrógenos más comunes reportados por (Biblioteca nacional de medicina (EE.UU), 2022) son:

- Estrona (E1): Se produce principalmente en los tejidos grasos, pero también en los ovarios y la placenta. Es considerado un estrógeno débil.

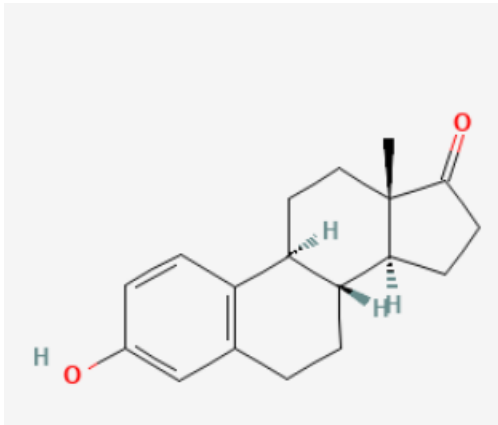


Figura 3. Estructura química de la estrona obtenida de (The National Center for Biotechnology Information, 2023)

- Estradiol (E2): Es el tipo más activo de los estrógenos y tiene influencia sobre el ciclo menstrual. Es producido principalmente en los ovarios.
- Estriol (E3): Es un estrógeno que se produce en grandes cantidades durante el embarazo. Se utiliza en pruebas de laboratorio para evaluar la salud del feto.

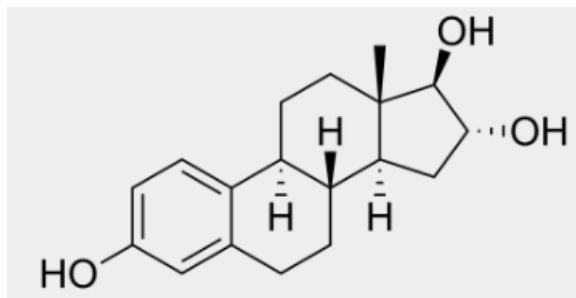


Figura 4. Estructura química del estriol obtenida (Ayacop, 2006)

Además de los estrógenos mencionados, es esencial destacar el papel fundamental del estradiol (E2) en el sistema hormonal femenino. Producido principalmente en los ovarios, el estradiol se distingue por ser el tipo de estrógeno más activo, ejerciendo una fuerte influencia sobre el ciclo menstrual y otros procesos reproductivos. Esta relevancia no se limita solo al ámbito biológico, ya que los estrógenos, incluido el estradiol, también desempeñan un papel crucial en la contaminación ambiental. Estos compuestos, presentes en anticonceptivos orales y terapias de reemplazo hormonal, llegan al ambiente a través de diversas vías, como la excreción por humanos y animales, así como la incorrecta disposición de medicamentos caducos en la basura doméstica. Como resultado, los estrógenos, incluyendo el estradiol, pueden contaminar el agua y llegar a plantas de tratamiento de aguas residuales, convirtiéndose en una de las principales fuentes de contaminación en el entorno acuático. Este fenómeno ha sido detectado en varias matrices ambientales, abarcando desde aguas superficiales y subterráneas hasta suelos, sedimentos y agua potable, con concentraciones que pueden alcanzar desde nanogramos (ng/L) hasta microgramos por litro (µg/L).

3.6. Estradiol

El estradiol es una hormona perteneciente al grupo de los estrógenos, que son hormonas sexuales femeninas. Es una forma específica de estrógeno que desempeña un papel crucial en el desarrollo y la regulación del sistema reproductor femenino. Se produce principalmente en los ovarios, aunque también se encuentra en cantidades más pequeñas en los testículos en los hombres.

El estradiol juega un papel fundamental en el ciclo menstrual, el desarrollo de características sexuales secundarias en las mujeres, el mantenimiento del tejido vaginal y uterino, así como en la regulación de los huesos y el metabolismo lipídico. (Instituto Bernabeu, 2021).

Químicamente, el estradiol pertenece a la familia de los esteroides, y contiene varios grupos funcionales importantes. (Hernández, 2014)

Los grupos funcionales presentes en la molécula de estradiol (Figura 5):

- Anillo A de ciclopentanoperhidrofenantreno: Esta es la estructura básica de un esteroide, que consta de tres anillos de seis átomos de carbono y un anillo de cinco átomos de carbono fusionados. En el caso del estradiol, esta estructura se encuentra en el núcleo central de la molécula.

- Grupo Alcohol (-OH): El estradiol contiene varios grupos hidroxilo (-OH) que son funcionales en varias partes de la molécula.
- Grupo Alqueno: Hay un doble enlace C=C en el anillo B del estradiol. Esto proporciona una cierta rigidez a la molécula.
- Grupo Arilo: Es cualquier grupo funcional o sustituyente derivado de un anillo aromático, generalmente un hidrocarburo aromático.

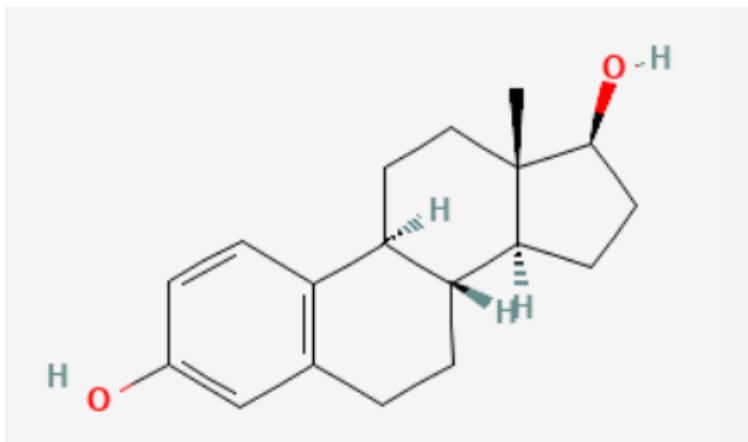


Figura 5. Estructura química del estradiol obtenida de (The National Center for Biotechnology Information, 2023).

Además de producirse de manera natural, también es producido de forma sintética, el cual es utilizado como tratamiento de reemplazo hormonal en las mujeres, a pesar de su importancia médica el estradiol tiene efectos significativos en el ambiente.

Una fuente importante de exposición al estradiol en el medio ambiente proviene de las aguas residuales, ya que las hormonas y los productos farmacéuticos que contienen hormonas a menudo son excretados por humanos y luego llegan a las aguas residuales a través de los sistemas de alcantarillado.

El estradiol y otros compuestos hormonales como la algestona en el agua pueden tener efectos perjudiciales en la vida acuática y en los ecosistemas en general. Pueden afectar el desarrollo y la reproducción de los organismos, como los peces, al alterar su equilibrio hormonal. Los peces expuestos a niveles elevados de estradiol en el agua pueden experimentar cambios en su desarrollo sexual, incluyendo la feminización de los machos y la reducción de la fertilidad.

3.7. Algestona

La algestona es un progestágeno sintético, es decir, una sustancia similar a la progesterona, una hormona producida de manera natural en el cuerpo humano. Se utiliza en medicina como un componente activo en algunos tipos de anticonceptivos y terapias de reemplazo hormonal.

Algunas formulaciones de anticonceptivos contienen algestona combinada con estrógeno para proporcionar una protección eficaz contra el embarazo.

La algestona es una hormona sintética que pertenece al grupo de los progestágenos. Químicamente, pertenece a la clase de los esteroides. A nivel estructural (Figura 6), contiene varios grupos funcionales característicos de los esteroides y progestágenos como:

- Núcleo Estructural de Esteroides

La algestona tiene un núcleo básico de estructura esteroide que consiste en cuatro anillos fusionados (tres anillos de ciclohexano y un anillo de ciclopentano). Este núcleo es característico de los esteroides y es fundamental en la estructura de hormonas sexuales como los progestágenos.

- Grupo Funcional Cetona (Algestona)

La algestona contiene un grupo funcional cetona ($C=O$) en su estructura. Este grupo funcional es lo que le da su nombre a la hormona.

- Grupo Funcional Éster

En algunas formulaciones, la algestona puede estar presente como un éster, que es una molécula derivada de un ácido carboxílico. Este grupo éster puede estar presente en la forma de acetato de algestona.

- Grupos Funcionales Oxigenados

Los grupos oxigenados, como hidroxilos ($-OH$), pueden estar presentes en diferentes posiciones de la molécula y pueden ser importantes para su actividad biológica.

Estos grupos funcionales son fundamentales para la actividad biológica de la algestona y determinan cómo interactúa con los receptores hormonales en el cuerpo humano.

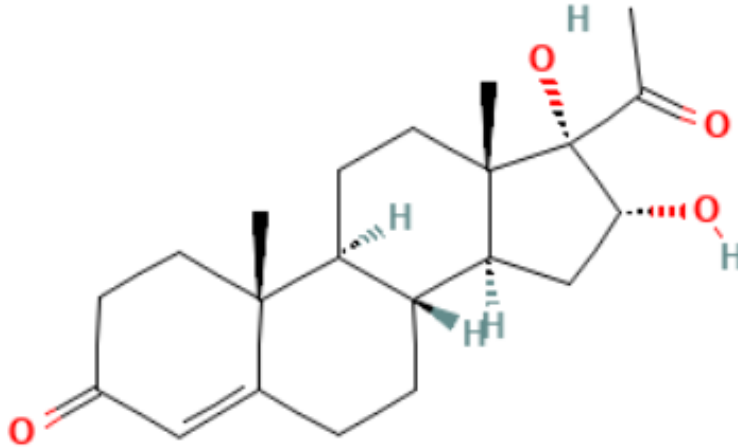


Figura 6. Estructura química de la algestona obtenida de (The National Center for Biotechnology Information, 2023).

Estas sustancias pueden ser difíciles de eliminar en las plantas de tratamiento de aguas residuales convencionales y, en consecuencia, pueden terminar en cuerpos de agua naturales causando alteraciones en ellos.

3.8. Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales es un proceso el cual consiste en la separación de la carga orgánica que contienen las aguas residuales, eliminando al máximo la cantidad de residuos presentes en el agua, este proceso se lleva a cabo a través de una serie de procesos físicos, químicos y biológicos. (FONATOUR, 2018).

El tratamiento de aguas residuales tiene varios beneficios, además de eliminar los contaminantes, el agua tratada puede ser utilizada en el riego de áreas verdes, lo que contribuye al ahorro de agua potable, también ayuda a proteger el medio ambiente y la salud pública, al evitar la contaminación de las aguas subterráneas y superficiales.

En resumen, el tratamiento de aguas residuales es un proceso importante para eliminar los contaminantes presentes en el agua residual y proteger el medio ambiente y la salud pública.

Sin embargo, en ocasiones, existen ciertos contaminantes que no son eliminados por completo durante el proceso de tratamiento, lo que puede resultar en su liberación al medio acuático. (Ferreira, 2017)

Por lo que se han buscado alternativas para degradar estos contaminantes, tales como:

- Oxidación avanzada
- Adsorción en carbón activado
- Filtración de membrana
- Tratamientos biológicos

3.9. Tratamiento microbiológico

El tratamiento microbiológico implica el uso de microorganismos (bacterias, hongos, etc.) para biodegradar y metabolizar contaminantes. Estos microorganismos pueden ser naturales o modificados genéticamente para ser más eficientes en la eliminación de contaminantes específicos, se busca que sean capaces de mineralizar, biotransformar o al menos inmovilizar el contaminante objetivo. (López & García, 2021)

Este enfoque se utiliza en sistemas de tratamiento de aguas residuales, donde los microorganismos descomponen los contaminantes orgánicos a través de procesos biológicos, como la biodegradación aeróbica o anaeróbica. (Condorchem Enviro Solutions, s.f.)

3.10. Biodegradación

La biodegradación es un proceso natural en el cual organismos vivos, como bacterias, hongos y otros microorganismos, descomponen materiales orgánicos complejos en sustancias más simples y no tóxicas. Esto ocurre gracias a las enzimas producidas por estos organismos, las cuales descomponen los compuestos orgánicos en componentes más básicos, como agua, dióxido de carbono y otros elementos. Este proceso es fundamental para el ciclo de la vida y es esencial para la eliminación de materiales orgánicos en el medio ambiente.

3.11. Biorremediación

La (EPA, 2012) define a la biorremediación como un proceso de descontaminación ambiental que utiliza organismos vivos, como bacterias, hongos o plantas, para degradar o transformar sustancias tóxicas o contaminantes presentes en el suelo, agua o aire en formas menos perjudiciales o no tóxicas. Este enfoque aprovecha la capacidad natural de ciertos microorganismos y plantas para metabolizar o absorber compuestos químicos dañinos, contribuyendo así a la restauración de áreas afectadas por contaminación y la mejora del estado de los ecosistemas.

La biorremediación puede ser utilizada para tratar diferentes tipos de contaminantes, como hidrocarburos, compuestos orgánicos volátiles, metales pesados y productos químicos tóxicos. Los

microorganismos utilizados en la biorremediación pueden ser autóctonos (naturales del lugar) o exógenos (introducidos en el medio ambiente).

(Darwingbiopostpecting, 2020) nos menciona que este proceso de limpieza ambiental tiene varias ventajas, como ser una alternativa más sostenible y menos invasiva que otros métodos de remediación, como la excavación y eliminación de suelos contaminados. Además, la biorremediación puede ser más rentable y eficiente en ciertos casos.

Existen diferentes enfoques y técnicas de biorremediación, como la biorremediación *in situ* (realizada en el lugar contaminado) y la biorremediación *ex situ* (los suelos o aguas contaminadas se retiran y se tratan fuera del lugar). Algunas de las técnicas utilizadas incluyen la bioestimulación (agregar nutrientes para promover el crecimiento de microorganismos), la bioaumentación (introducir microorganismos específicos) y la fitorremediación (utilizar plantas para absorber y degradar contaminantes).

Es importante destacar que la efectividad de la biorremediación puede variar dependiendo de varios factores, como el tipo y la concentración de contaminantes, las condiciones ambientales y la presencia de otros compuestos que puedan interferir con el proceso de degradación.

3.12. Sinergia del tratamiento microbiológico

La sinergia en el tratamiento microbiológico se refiere a la colaboración y la interacción beneficiosa entre diferentes tipos de microorganismos la cual mejora la función y la capacidad de adaptación ambiental (Mingtang, Xingmin, Xiufang, Di, & Su, 2018)

En el contexto del tratamiento de aguas residuales y la eliminación de hormonas, la sinergia del tratamiento microbiológico implica la combinación estratégica de microorganismos para maximizar la eliminación de sustancias contaminantes, como hormonas y otros compuestos emergentes, de manera más efectiva que si se usaran de manera individual.

Este enfoque se basa en la diversidad de funciones y habilidades metabólicas que poseen diferentes grupos de microorganismos. Algunos microorganismos pueden ser viables en la descomposición de ciertos contaminantes, mientras que otros pueden estar especializados en la mineralización de productos intermedios. (López & García, 2021).

Al combinar microorganismos complementarios en un sistema de tratamiento, se pueden aprovechar estas fortalezas para lograr una degradación más completa y eficiente de los contaminantes.

En última instancia, la sinergia del tratamiento microbiológico busca maximizar la eficiencia de los procesos de degradación y eliminación de contaminantes mediante la explotación de las interacciones positivas entre diferentes tipos de microorganismos. (Mingtang, Xingmin, Xiufang, Di, & Su, 2018). Este enfoque puede ser especialmente útil en la eliminación de contaminantes complejos y resistentes, como las hormonas, y contribuir así a la mejora de la calidad del agua y la protección del medio ambiente.

3.13. Interacción hormona- microorganismo

La interacción entre hormonas y microorganismos es un fenómeno biológico fundamental que tiene implicaciones tanto en la salud ambiental como en la humana. Los microorganismos, como bacterias y hongos, pueden influir en la presencia y el destino de hormonas en el medio ambiente a través de procesos de degradación, transformación y retención. Algunos microorganismos tienen la capacidad de degradar hormonas como el estradiol y otros disruptores endocrinos presentes en aguas residuales y fuentes de contaminación, contribuyendo así a su eliminación. Estas reacciones metabólicas microbianas pueden ser esenciales para mantener un equilibrio en los ecosistemas acuáticos y terrestres al reducir el impacto de las hormonas en la vida silvestre y la salud humana. Además, las interacciones entre microorganismos y hormonas pueden influir en la composición y función de las comunidades microbianas en el suelo, el agua, lo que a su vez puede tener consecuencias en la regulación hormonal y la salud. Comprender estas interacciones es esencial para abordar la contaminación hormonal, desarrollar enfoques de tratamiento efectivos y comprender cómo los sistemas biológicos interactúan en un mundo cada vez más influenciado por actividades humanas y la liberación de compuestos hormonales en el medio ambiente.

3.14. Tipos de microorganismos degradadores de hormonas

Los microorganismos degradadores de hormonas son microorganismos, como bacterias y hongos, que tienen la capacidad de descomponer o degradar hormonas en el medio ambiente. Esto es importante porque las hormonas pueden ser liberadas en el entorno a través de diferentes fuentes, como desechos animales, aguas residuales humanas, y productos farmacéuticos, entre otros.

Algunas hormonas, como los estrógenos, progesterona y otras sustancias químicas relacionadas, pueden persistir en el medio ambiente y causar impactos negativos en los ecosistemas y la vida acuática si no se degradan de manera adecuada. Los microorganismos degradadores de hormonas juegan un papel crucial en el ciclo natural de descomposición de estas sustancias.

Algunos microorganismos previamente identificados por (Mingtang, Xingmin, Xiufang, Di, & Su, 2018) que tienen la capacidad degradadora de los disruptores endocrinos son:

- *Acinetobacter calcoacético*
- *Pseudomona putida*
- *Comamonas testosteroni*

Es importante destacar que la capacidad de un microorganismo para degradar hormonas puede variar dependiendo de la cepa y las condiciones ambientales. Además, la eficiencia de degradación puede ser influenciada por factores como la concentración de hormonas, la temperatura, el pH y la disponibilidad de nutrientes.

3.15. Tratamientos biológicos ante los fisicoquímicos

Según (Ze-hua Liu, 2008) los procesos involucrados en la eliminación de estrógenos se dividen en tres categorías: procesos de eliminación física, químicos y de biodegradación. Los métodos físicos, como la ósmosis inversa y la adsorción sobre carbón activado, transfieren contaminantes de una fase a otra, aunque no se consigue la degradación de los estrógenos. Como proceso de oxidación avanzado, la oxidación química se ha utilizado como un medio alternativo eficiente para eliminar niveles bajos de estrógeno (Koch, y otros, 2015). Sin embargo, no es una herramienta tecnológica económicamente viable y los productos químicos son reactivos y producen efectos desconocidos como subproductos. Los procesos de tratamiento biológico suelen ser los más viables económicamente para la eliminación de compuestos orgánicos de las aguas residuales y pueden lograr altas tasas de eliminación de materia orgánica de las aguas residuales, lo que permite el tratamiento de grandes volúmenes. (Jianzhong, Jiang, Xiang, & Jiachen, 2013).

Los tratamientos biológicos de aguas residuales ofrecen varias ventajas en comparación con los tratamientos químicos, (Condorchem Enviro Solutions, s.f.) menciona algunas de estas ventajas, tales como:

- **Eficiencia en la eliminación de contaminantes:** Los tratamientos biológicos son altamente efectivos en la eliminación de materia orgánica y nutrientes presentes en las aguas residuales. Los microorganismos utilizados en estos procesos tienen la capacidad de descomponer y metabolizar los contaminantes, lo que resulta en una reducción significativa de la carga contaminante en el agua.
- **Menor consumo de energía:** Los tratamientos biológicos suelen requerir menos energía en comparación con los tratamientos químicos. Esto se debe a que los procesos biológicos aprovechan la actividad metabólica de los microorganismos para llevar a cabo la descomposición de los contaminantes, mientras que los tratamientos químicos pueden requerir el uso de productos químicos y procesos físicos que consumen más energía.
- **Menor generación de residuos:** Los tratamientos biológicos generan menos residuos sólidos en comparación con los tratamientos químicos. Esto se debe a que los microorganismos utilizados en los procesos biológicos tienen la capacidad de convertir los contaminantes en productos biológicos estables o gases, lo que reduce la cantidad de residuos sólidos generados.
- **Mayor capacidad de adaptación:** Los tratamientos biológicos son más flexibles y pueden adaptarse a cambios en la composición y carga de las aguas residuales. Los microorganismos utilizados en estos procesos tienen la capacidad de adaptarse a diferentes condiciones ambientales y de carga, lo que permite un tratamiento más eficiente y estable a lo largo del tiempo.
- **Menor impacto ambiental:** Los tratamientos biológicos tienen un menor impacto ambiental en comparación con los tratamientos químicos. Esto se debe a que los procesos biológicos utilizan microorganismos naturales y no requieren el uso de productos químicos agresivos. Además, los tratamientos biológicos pueden contribuir a la mejora de la calidad del agua y la conservación de los ecosistemas acuáticos.

3. Objetivos

3.16. Objetivo general

- Biodegradar contaminantes emergentes mediante consorcios bacterianos.

3.17. Objetivos específicos

- Identificar y caracterizar los microorganismos presentes en aguas residuales municipales que son capaces de degradar la algestona con estradiol.
- Analizar la capacidad microbiológica para la eliminación de algestona con estradiol mediante espectrofotometría de IR.

4. Hipótesis

El uso de bacterias degradadoras de algestona con estradiol resultará en una degradación eficiente del algestona con estradiol presente en aguas residuales

5. Metodología

a. Muestreo

Se recolectaron 4 muestras de cuerpos de agua superficial que reciben descargas residuales de distintos puntos de la ciudad Puebla de acuerdo con la norma PROY-NMX-AA-003-SCFI-2008.

La primera muestra fue obtenida del lago de ciudad universitaria BUAP con coordenadas (19°00'16.2" N, 98°12'20.6" W)

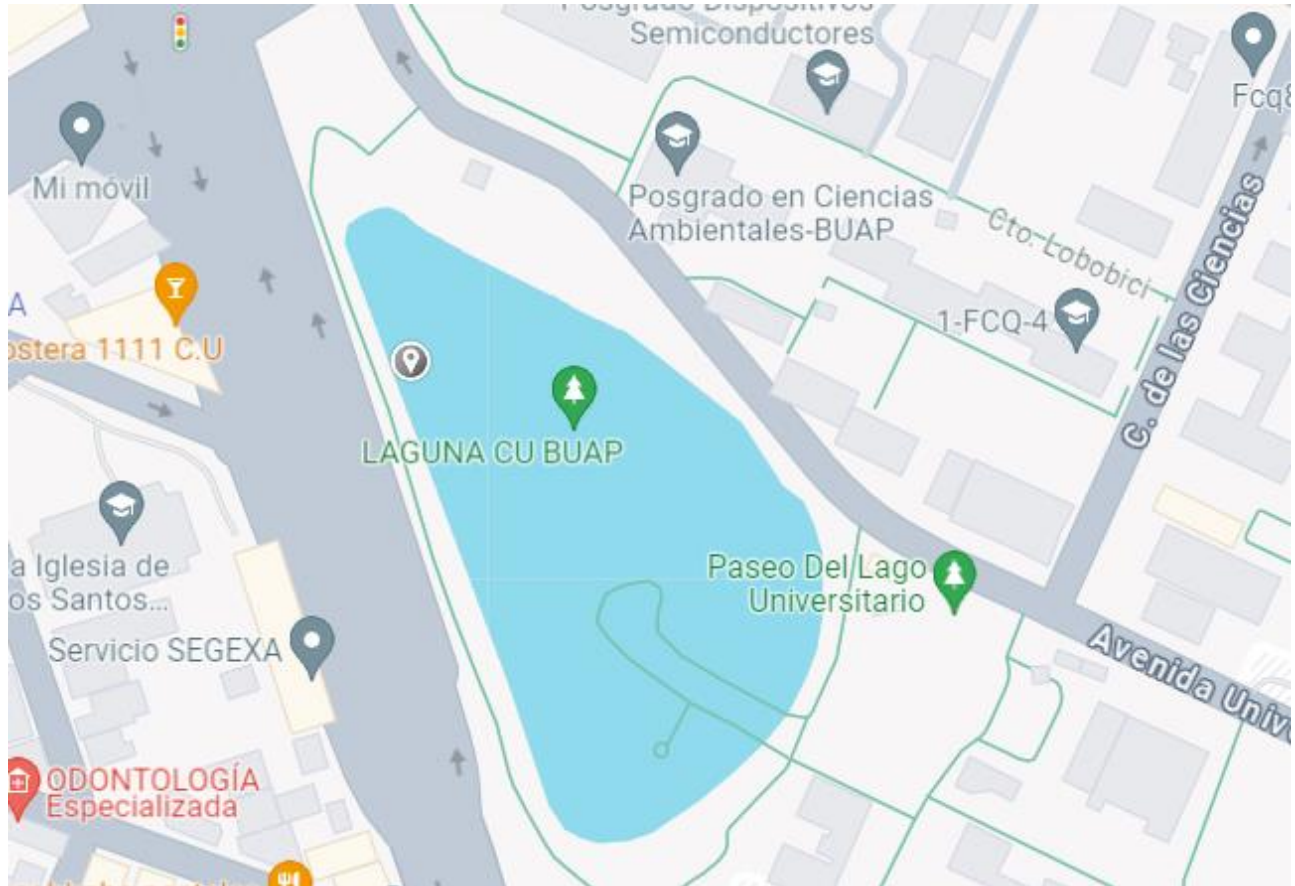


Figura 7. Obtenida de Google Maps 2023

La segunda muestra fue obtenida del río denominado Zapatero con las coordenadas 19°03'08.5" N, 98°25'43.14 W"

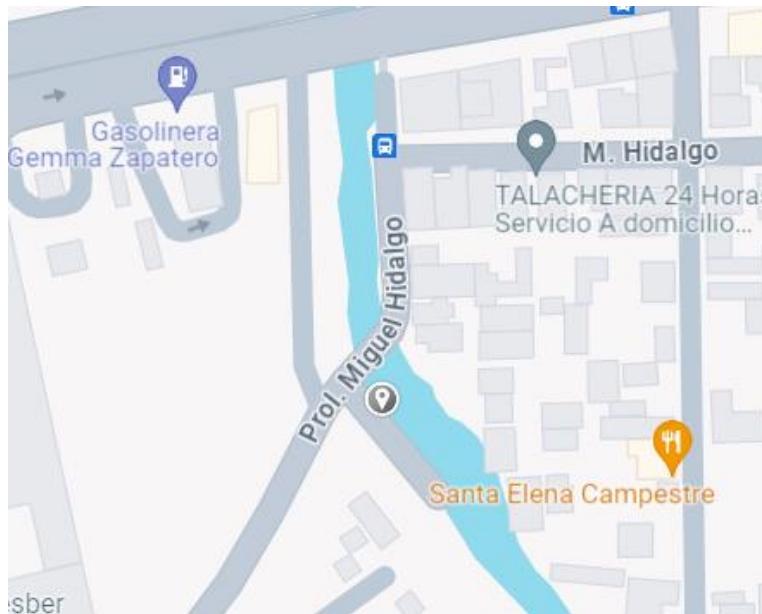


Figura 8. Obtenida de Google Maps 2023

La tercera y cuarta muestra fueron recolectadas del río Atoyac en distintos puntos del efluente, con las coordenadas (18°57'04.4" N, 98°16'12.7" W) y 19°01'18.0" N, 98°13'42.5" W.



Figura 9. Obtenida de Google Maps 2023

b. Aislamiento de cepas microbianas

Se prepararon 4 matraces de 50 mL de caldo Luria Bartani (LB) con una concentración de 7.5 mg/mL de alegstona con 0.5 mg/mL de estradiol y se adicionaron 3 mL de cada muestra, se incubo durante 48 horas a una temperatura 30°C.

Posteriormente se sembraron las cepas en agar Mc Conkey, Nutritivo y King A para lograr el aislamiento de las bacterias con capacidad de biodegradación de hormonas.



Imagen 1. Aislamiento de cepas en placas



Imagen 2. Aislamiento de distintas cepas en placa

c. Conservación

Las cepas aisladas que mostraron efectividad en la degradación de la hormona fueron propagadas en caldo LB, centrifugadas a 11,000 rpm durante 10 minutos. Para finalizar se decantó el sobrenadante y se resuspendió el pellet con 1.5 mililitros de Medio Mínimo Mineral (MMM) para mantenerlas en refrigeración a una temperatura de 4°C.

d. Identificación de bacterias

La identificación de las cepas se realizó mediante pruebas bioquímicas, las cuales fueron, LIA, KIA, MIO, urea, MR/BP y citrato y mediante morfología colonial.

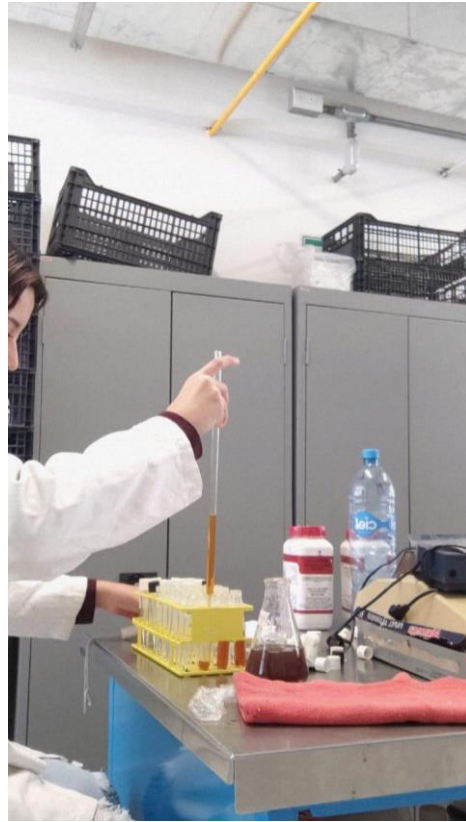


Imagen 3. Preparación de pruebas bioquímicas



Imagen 4. Pruebas bioquímicas

e. Generación del inóculo

Se realizó una propagación en caldo Luria Bartani (LB), posteriormente se centrifugó y se tiró el sobrenadante para re suspender en medio mínimo mineral, donde se realizó un ajuste de absorbancia del 0.5 a 600 nm.

f. Ensayos con bacterias

Se realizó un ensayo con cada una de las cepas aisladas en caldo Luria Bartani y medio mínimo mineral con una concentración de hormona de 15 mg/m L de algestona y 1 mg/ m L de estradiol, se incubaron durante 6 días a una temperatura de 30°C.



Imagen 5. Inoculo de cepa en caldo LB con hormona

g. Lecturas en espectro IR de bacterias individuales

Transcurridos 6 días, se leyeron las muestras en el equipo de espectroscopia infrarroja para la lectura de las muestras, fueron centrifugadas 11.000 rpm durante 8 minutos, la toma la muestra se realizó la cabina de seguridad.



Imagen 6. Lectura de muestra en espectrofotómetro

h. Formación de consorcios

Se formaron 3 consorcios con 4 cepas aisladas cada uno.

i. Ensayo con consorcios

Se prepararon 2 matraces de 3.5 mL de caldo Luria Bartani (LB) y 3.5 mL medio mínimo mineral (mmm) con una concentración de 15 mg/mL de alegstona con 1 mg/mL de estradiol y se adicionaron 400 microlitros ($\mu\text{g/L}$) de cada cepa aislada, se incubo durante 48 horas a una temperatura 30°C.

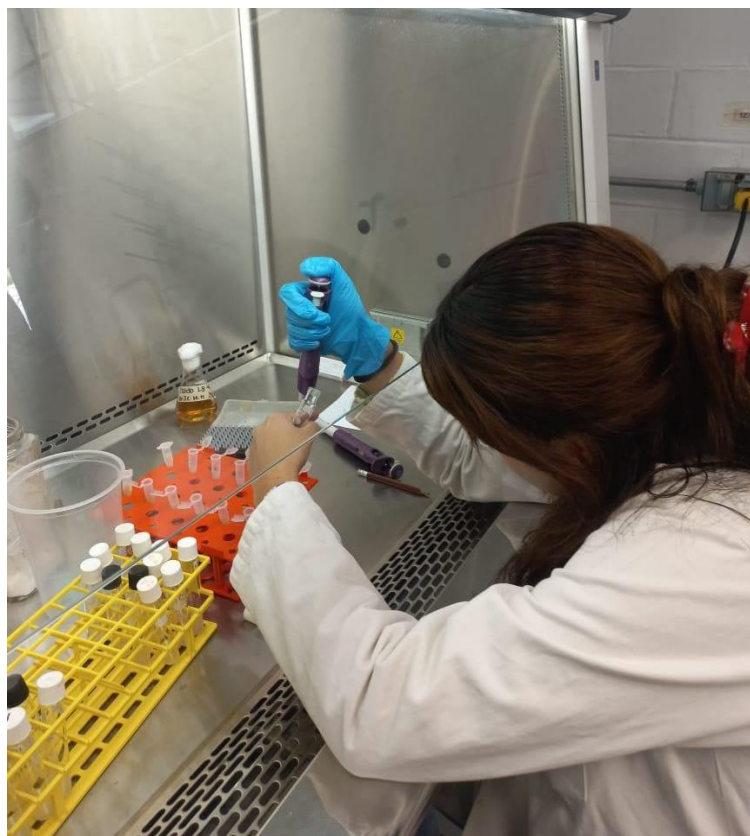


Imagen 7. Inoculación de la hormona con consorcios microbianos

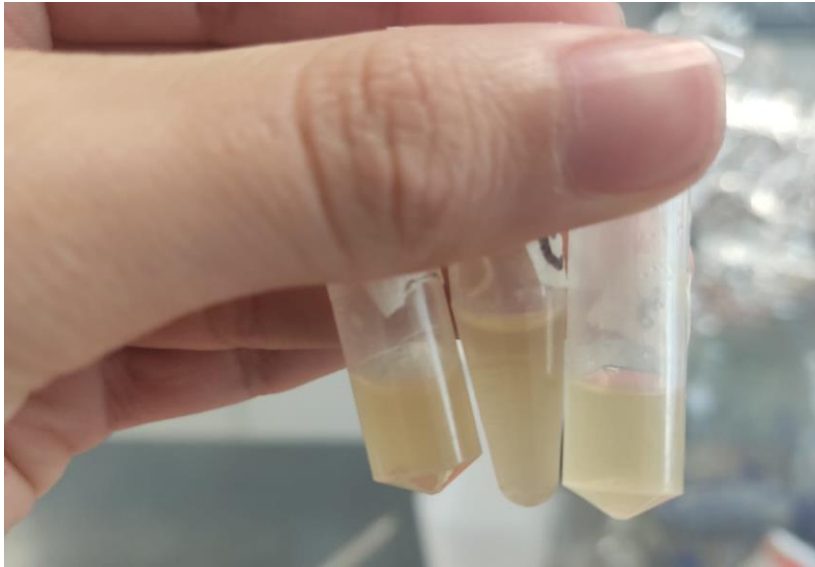


Imagen 8. Consorcios microbianos en caldo Lb con hormona

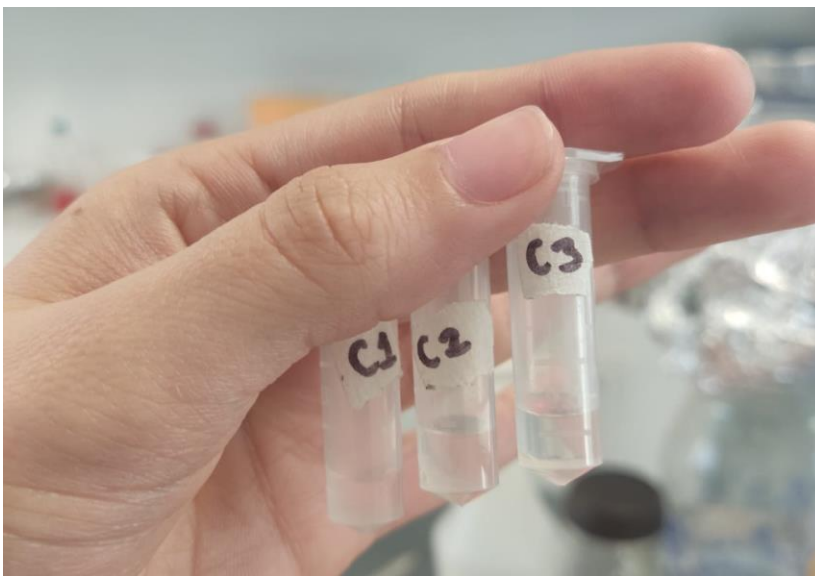


Imagen 9. Consorcios microbianos en MMM con hormona

j. Lecturas en espectro IR de consorcios microbianos

Transcurridos 6 días, se realizó la lectura de las muestras en el equipo de espectroscopia infrarroja.

Para la lectura de las muestras, fueron centrifugadas 11,000 rpm durante 8 minutos, la toma la muestra se realizó la cabina de seguridad.

6. Resultados

6.1. Aislamiento de bacterias

Se aislaron 20 cepas de las cuales se usaron 12 debido a que son las que presentaron biodegradación de algostona con estradiol en MMM y caldo LB en el ensayo preliminar (resultados no mostrados).

6.2. Identificación de las cepas

Mediante las pruebas bioquímicas se lograron identificar 4 géneros de cepas, los cuales fueron:

- *Escherichia*
- *Proteus*
- *Pantoea*
- *Enterobacter*

En la tabla 1 se muestran los resultados obtenidos de las pruebas bioquímicas, (Citrato, LIA, MIO, KIA, UREA, RM/VP) Las pruebas bioquímicas mencionadas son comúnmente utilizadas en microbiología para caracterizar bacterias y ayudar en su identificación.

Estas pruebas son útiles para identificar diferentes géneros y especies bacterianas, ya que las bacterias pueden tener diferentes capacidades bioquímicas.

Donde citrato determinar la capacidad de una bacteria para utilizar citrato como única fuente de carbono, cambiando de un color verde a azul cuando es positiva.

LIA diferencia bacterias enterobacterias basándose en su capacidad para desdoblar la lisina y producción de ácido sulfhídrico, cuando es positiva.

MIO identifica la producción de indol y la capacidad de movilidad de las bacterias.

UREA evalúa la capacidad de las bacterias para hidrolizar la urea cambiando el medio de un color amarillo a rosa mexicano cuando es positiva, sino existe el cambio de coloración, se coloca como negativa.

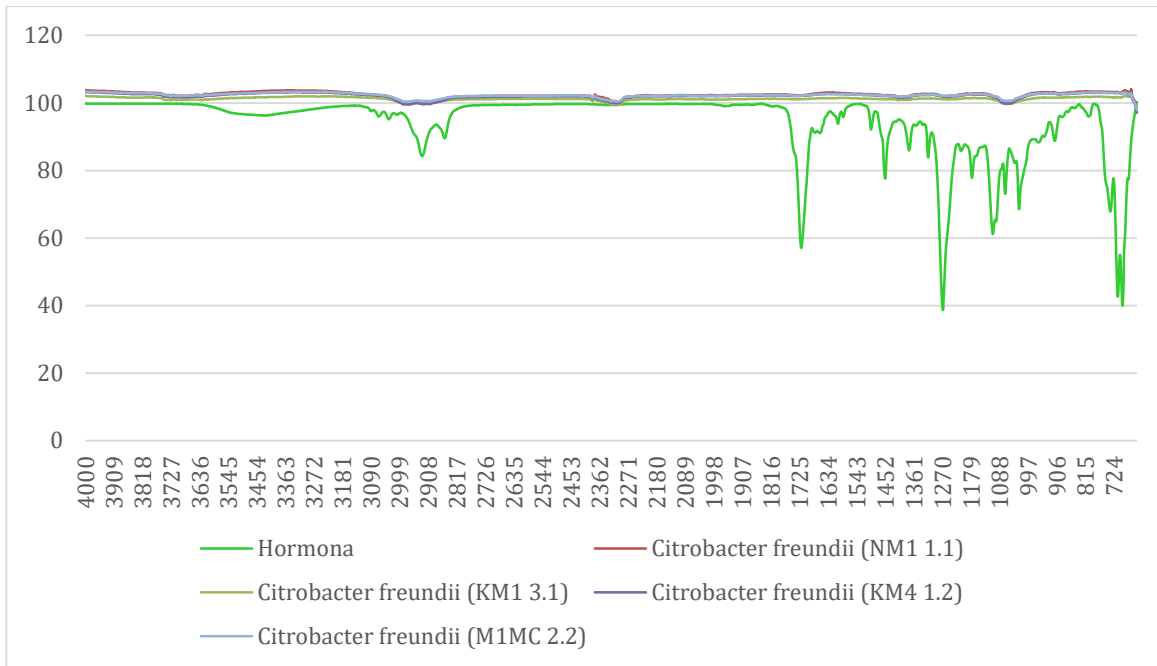
RM/VP diferencia las bacterias que producen grandes cantidades de ácido láctico (RM) y las que producen grandes cantidades de acetoina (VP), cambio de color indica acidificación al adicionar reactivos, dando la prueba como positiva.

Tabla 1. Resultados de las pruebas bioquímicas

CEPA	CIT	KIA			LIA		MIO			UREA	RM	VP	Género
	±	GAS	H ₂ S	A/B	H ₂ S	±	M	I	O	±	±		
NM 1 1.1	+	-	+	A/A	+	+	+	-	+	+	+	-	<i>Citrobacter freundii</i>
KM1 2.1	-	-	-	A/A	+	+	+	-	+	+	-	+	<i>Pantoea Agglomerans</i>
KM1 3.1	+	-	+	A/A	-	+	+	-	+	+	-	+	<i>Citrobacter freundii</i>
KM4 3.2	+	- *	-	A/A	-	+	+	-	-	-	+	-	<i>Escherichia Coli</i>
KM4 2.2	-	-	-	A/A	-	+	+	-	-	+	+	-	<i>Pantoea agglomerans</i>
KM1 1.1	-	- *	-	A/A	-	-	+	+	+	-	+	-	<i>Escherichia Coli</i>
KM4 1.2	+	-	+	A/A	-	+	+	-	+	±	-	+	<i>Citrobacter freundii</i>
M1MC 2.2	+	-	+	A/A	+	-	+	-	-	++	+	-	<i>Citrobacter freundii</i>
M1MC1.2	-	-	-	AI/A	-	+	+	-	+	±	-	+	<i>Proteus vulgari</i>
M1MC4.1	-*	-*	-	A/A	+	+	+	-	-	+	+	-	<i>Escherichia coli</i>
NM1 3.1	-	-	-	A/A	-	+	+	+	+	+	+	-	<i>Pantoea agglomerans</i>
NM3 4.2	-	-	-	A/A	-	+	+	-	+	-	-	+	<i>Pantoea agglomerans</i>

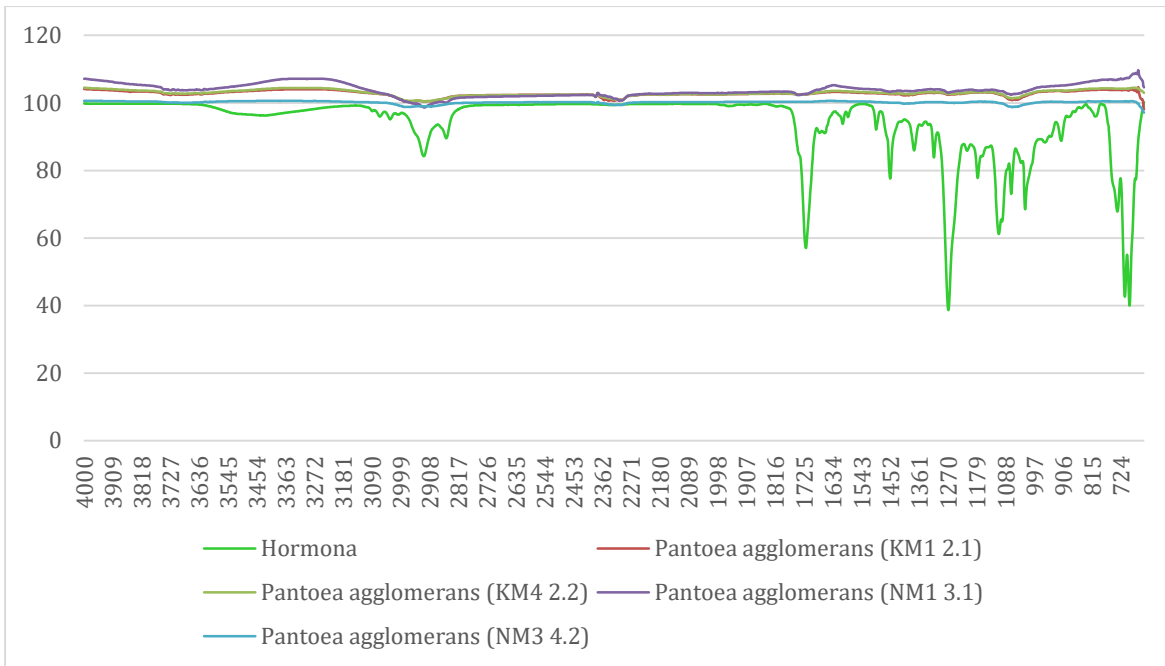
El análisis de la biodegradación de algestona con estradiol de cada una de las cepas en MMM y caldo LB establece que hay una biodegradación debido a que desaparecen las bandas de los grupos funcionales ion hidroxilo (OH) en las bandas 3500 - 3200 cm⁻¹, cetona (C=O) en una banda de 1715 cm⁻¹, metilos y metilenos (CH₃ y CH₂) en una banda de 1465 -1375 cm⁻¹ y el grupo arilo en las bandas 1675-1000 cm⁻¹.

Lo cual se puede observar en las en las siguientes gráficas.



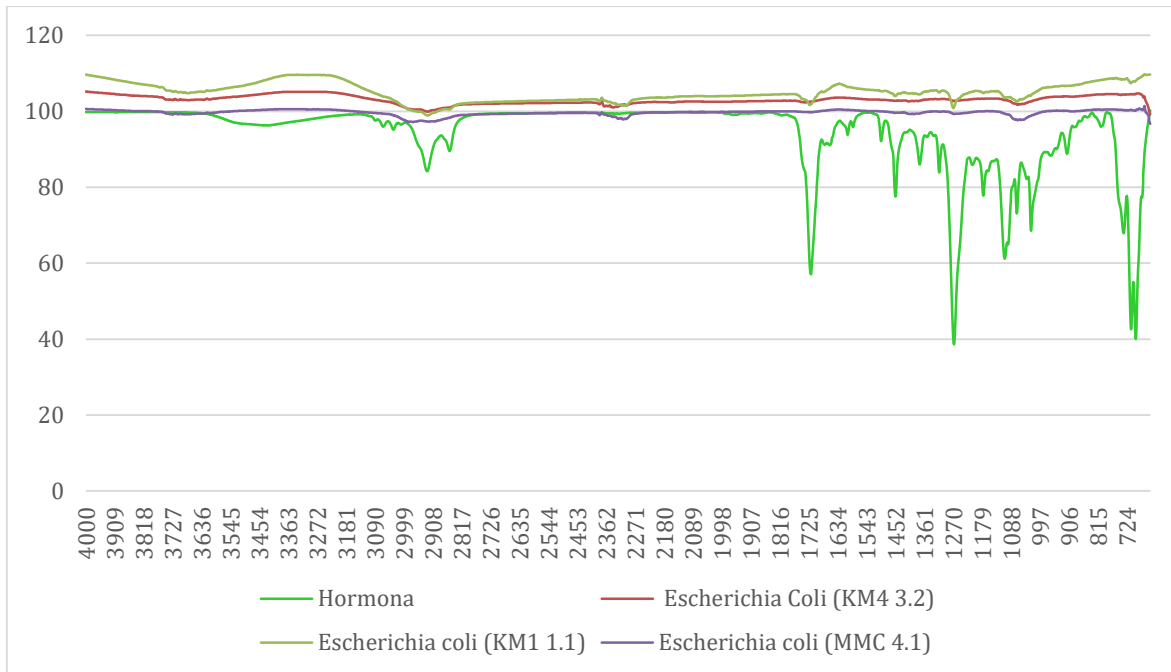
Gráfica 1. Espectro de infrarrojo de la biodegradación algestona con estradiol con diferentes cepas de *Citrobacter freundii* en caldo LB

La gráfica muestra una disminución constante y simultánea en la biodegradación de algestona con estradiol por parte de las cepas aisladas. Este patrón indica una eficiente capacidad de degradación de la hormona por parte de todas las cepas bajo las mismas condiciones.



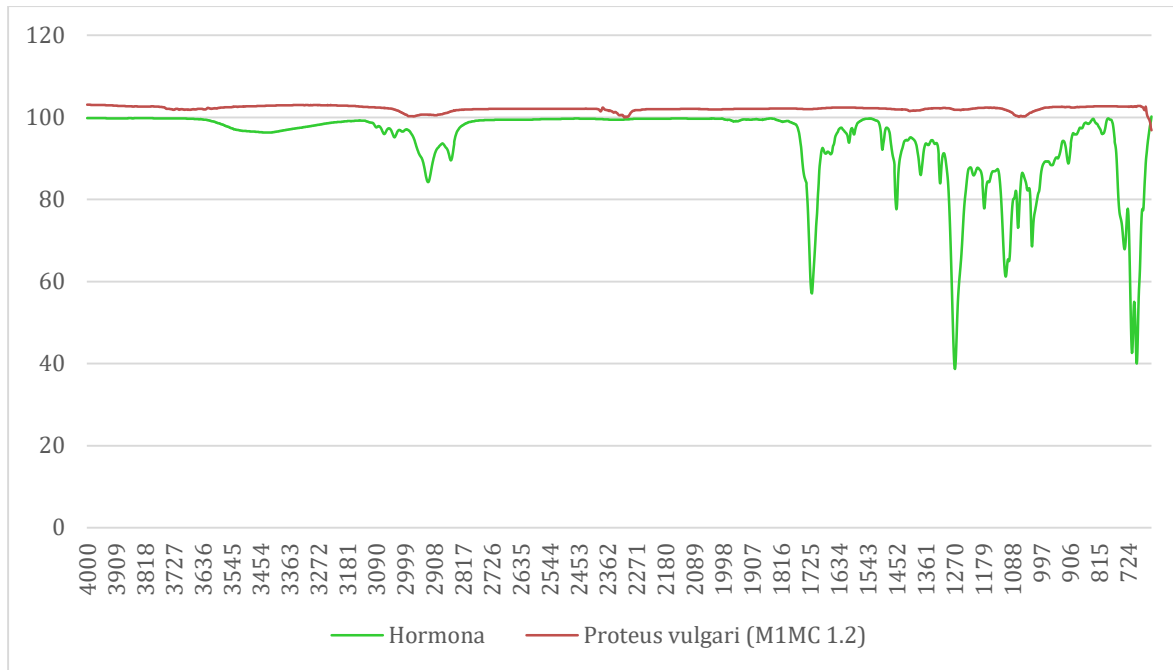
Gráfica 2. Espectro de infrarrojo de la biodegradación algestona con estradiol con diferentes cepas de *Pantoea agglomerans* en caldo LB

La gráfica presenta una disminución constante y uniforme en la biodegradación de alesgtona con estradiol por parte de las cuatro cepas aisladas. Este patrón indica una eficiente capacidad de degradación de hormona, evidenciando una tasa mínima de variación entre las cepas.



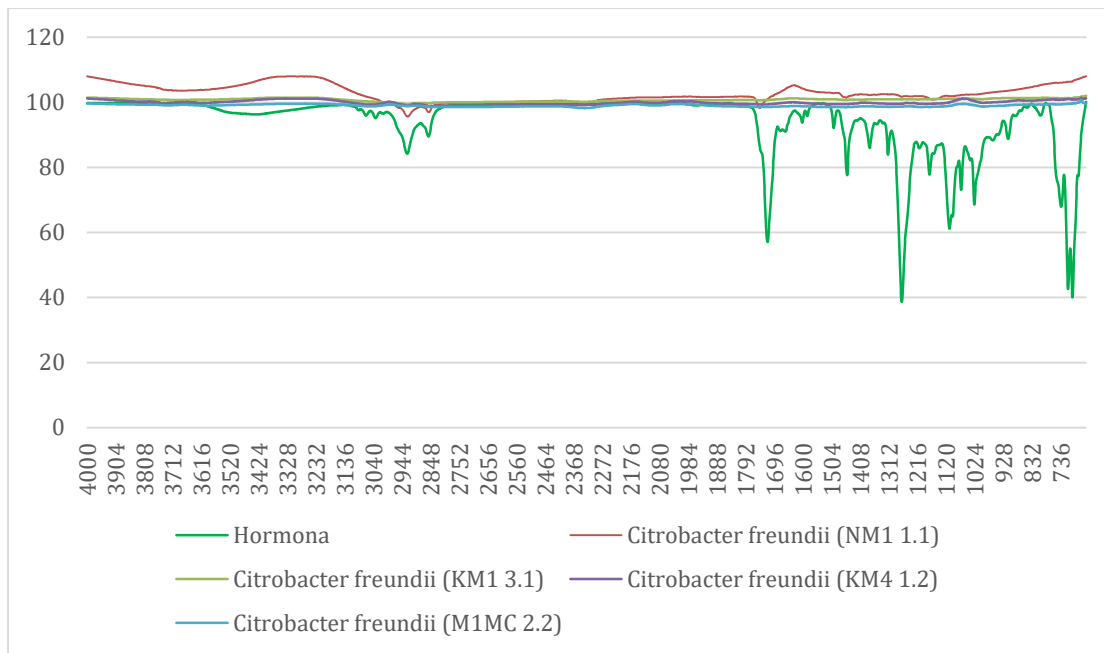
Gráfica 3. Espectro de infrarrojo de la biodegradación algestona con estradiol con diferentes cepas de *Escherichia coli* en caldo LB

Las cuatro cepas de *Escherichia coli* muestran una capacidad efectiva para degradar la algestona con estradiol, aunque se observa una pequeña variabilidad entre ellas. Esta variabilidad indica que las cepas presentan diferencias en su actividad enzimática.

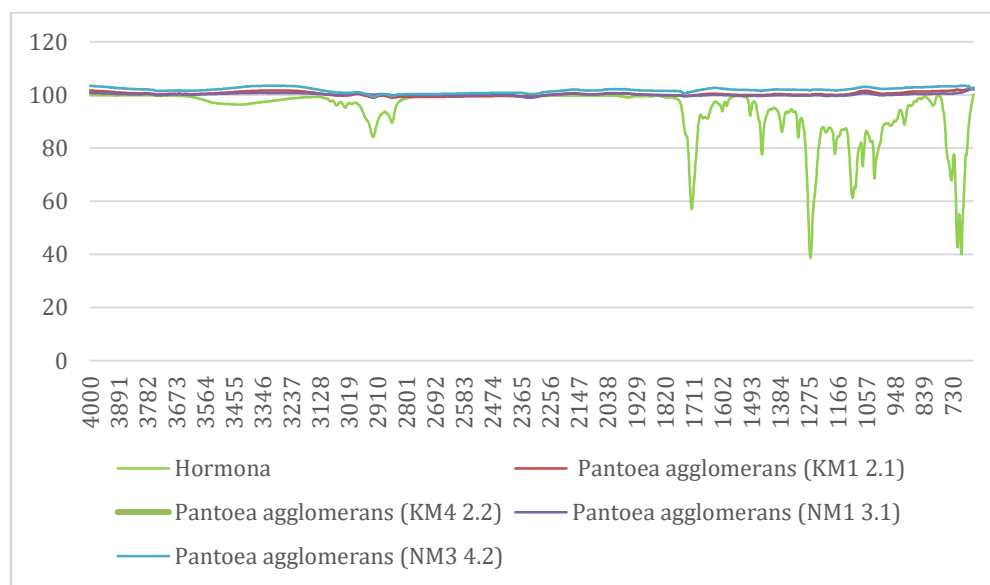


Gráfica 4. Espectro de infrarrojo de la biodegradación algestona con estradiol con *Proteus vulgaris* en caldo LB

Se observa una disminución significativa de biodegradación de algestona con estradiol, la bacteria *Proteus vulgaris* presenta una capacidad intrínseca para metabolizar la hormona.



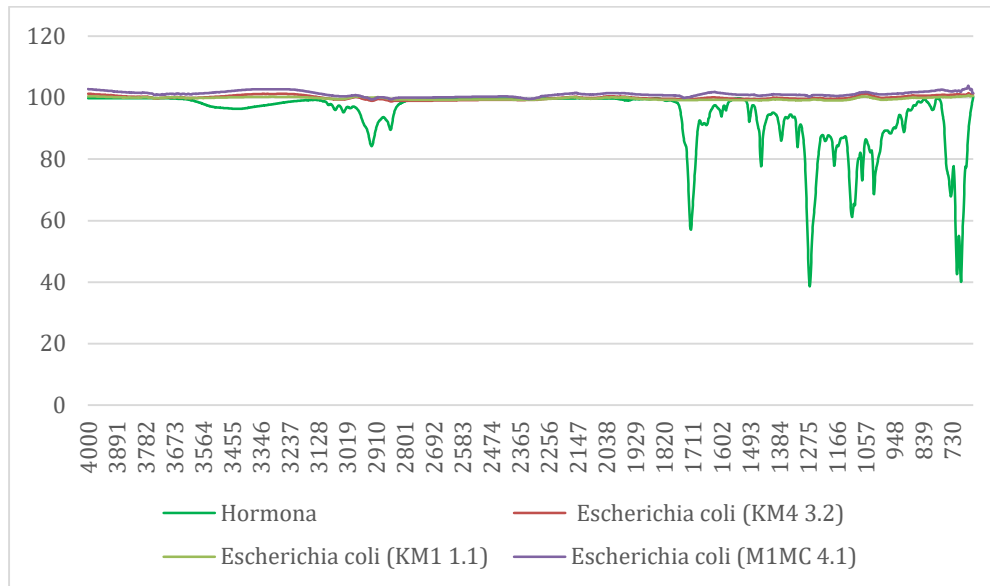
Gráfica 4. Espectro de infrarrojo de la biodegradación algestona con estradiol con diferentes cepas de *Citrobacter freundii* en MMM



Gráfica 5. Espectro de infrarrojo de la biodegradación algestona con estradiol con diferentes cepas de *Pantoea agglomerans* en MMM

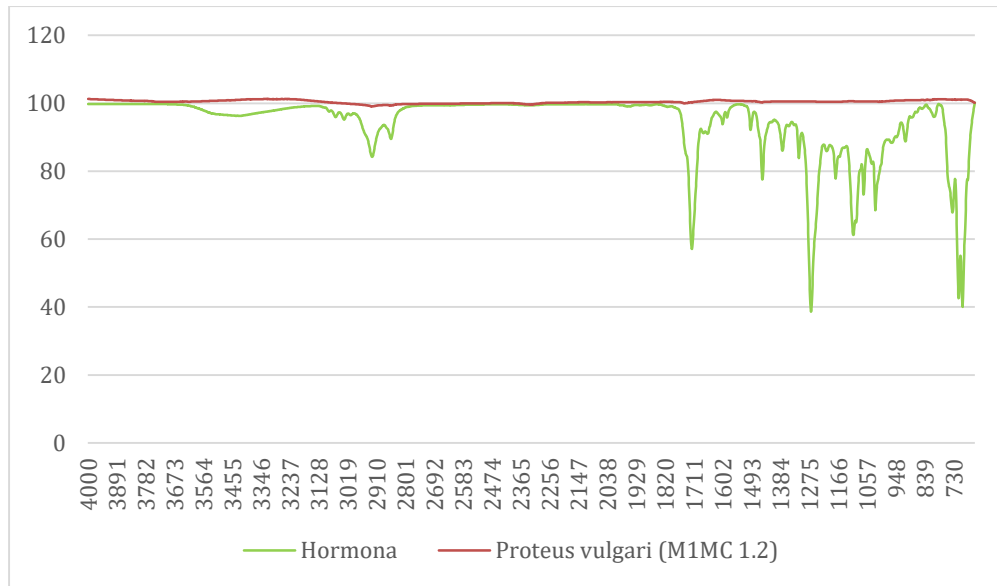
Se observó que las cuatro cepas de *Pantoea agglomerans* demostraron una capacidad efectiva para la degradación de algestona con estradiol . Sin embargo, existe una diferencia discernible en

la eficiencia de degradación entre 2 cepas (NM3 4.2 y KM1 2.1), aunque ambas muestran una actividad degradadora, la degradación por estas 2 cepas es ligeramente distinta.



Gráfica 6. Espectro de infrarrojo de la biodegradación algestona con estradiol con diferentes cepas de *Escherichia coli* en MMM

Se observó una degradación significativa de la algestona con estradiol por parte de las cepas de *Escherichia coli* en medio mínimo mineral. La disminución en las concentraciones sugiere una efectiva actividad degradadora por parte de las cepas.



Gráfica 6. Espectro de infrarrojo de la biodegradación algestona con estradiol con *Proteus vulgaris* en MMM

Se observa una degradación de algestona con estradiol efectiva por parte de la bacteria *Proteus vulgaris* en medio mínimo mineral al igual que en caldo LB.

6.3. Consorcios microbianos

El acomodo de consorcios microbianos se muestra en la siguiente tabla

Tabla 2. Composición de los consorcios microbianos

	Cepa	Género
Consortio 1	NM 1 1.1	<i>Citrobacter freundii</i>
	KM1 2.1	<i>Pantoea agglomerans</i>
	KM1 3.1	<i>Citrobacter freundii</i>
	KM4 3.2	<i>Escherichia Coli</i>
Consortio 2	KM4 2.2	<i>Pantoea agglomerans</i>
	KM1 1.1	<i>Escherichia Coli</i>
	KM4 1.2	<i>Citrobacter freundii</i>
	M1MC 2.2	<i>Citrobacter freundii</i>
Consortio 3	M1MC1.2	<i>Proteus vulgari</i>
	M1MC4.1	<i>Escherichia coli</i>
	NM1 3.1	<i>Pantoea agglomerans</i>
	NM3 4.2	<i>Pantoea agglomerans</i>

El análisis de la biodegradación de algestona con estradiol de cada uno de los consorcios en MMM y caldo LB establece que hay una biodegradación debido a que desaparecen las bandas de los grupos funcionales ión hidroxilo (OH), metilos y metilenos (CH₃ y CH₂) y el grupo arilo, la biodegradación se muestra en las siguientes gráficas.

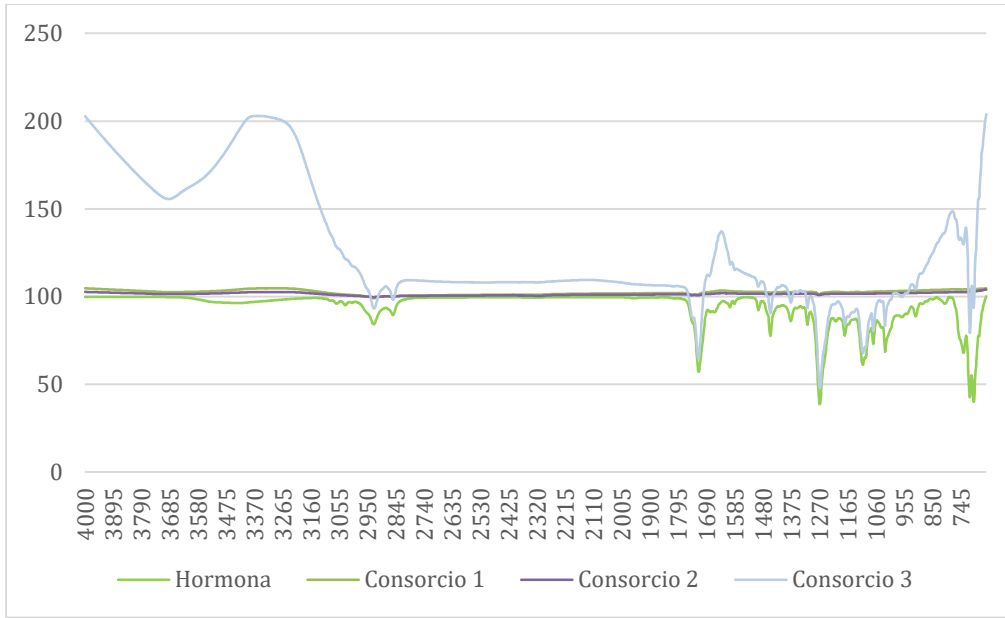


Gráfico 7. Biodegradación de algestona con estradiol por medio del consorcio 1, 2 y 3 en MMM.

Los consorcios 1 y 2 muestran una biodegradación efectiva de los grupos funcionales mientras que el consorcio 3 no muestra degradación.

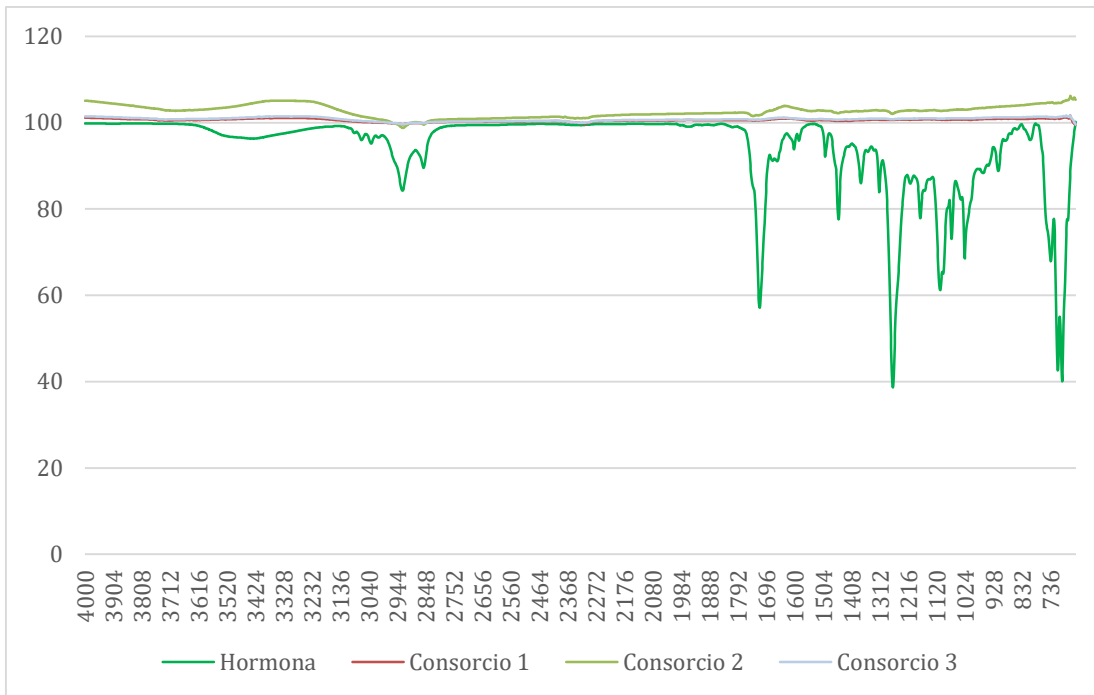


Gráfico 8. Biodegradación de algestona con estradiol por medio del consorcio 1, 2 y 3 de algestona con estradiol en caldo LB.

El conjunto de bacterias que integran el consorcio 1,2 y 3 muestran que tiene la capacidad de biodegradar los grupos funcionales por lo que ha demostrado ser eficiente.

7. Discusión de resultados

El estudio realizado por (Weber, Leuschner, Kämpfer, Dott, & Hollende, 2005) sobre la degradación de los compuestos estradiol y etinilestradiol mediante lodos activados y un cultivo mixto definido ha identificado varias cepas bacterianas con capacidad degradadora de disruptores endocrinos. Entre las cepas identificadas se encuentran *Acinetobacter calcoaceticus*, *Pseudomonas putida* y *Comamonas testosteroni*. Estas bacterias muestran un potencial significativo en la degradación de estradiol y etinilestradiol.

En la presente investigación se encontraron cuatro cepas con capacidad degradadora de disruptores: *Escherichia coli*, *Proteus vulgaris*, *Pantoea agglomerans* y *Citrobacter freundii*. Estos hallazgos amplían el espectro de posibles microorganismos que podrían ser aplicados en la bioremediación de aguas contaminadas con compuestos disruptores endocrinos.

Se observó que los tres consorcios fueron efectivos en caldo Luria Bartani, demostrando una notable capacidad de degradación. Sin embargo, en medio mínimo mineral, solo los primeros dos consorcios mostraron una degradación efectiva, mientras el tercero no, lo cual puede estar relacionado con las condiciones metabólicas, disponibilidad de nutrientes proporcionados por cada tipo de medio y que las bacterias utilizan la hormona como su única fuente de carbono.

Este estudio utilizó dos métodos diferentes de aplicación microbiana en un contexto de biorremediación: consorcios y cepas individuales. Estas dos estrategias representan diferentes enfoques para resolver problemas específicos en biotecnología y microbiología ambiental. Una sola cepa ofrece una mayor homogeneidad genética y funcionalidad dentro de una población. Esto facilita la manipulación de estos microorganismos y su estudio en el laboratorio, permitiendo un mejor control sobre sus propiedades y comportamiento.

Por otro lado, un consorcio representa una comunidad de microorganismos que incluye varias especies o cepas diferentes que trabajan juntas para realizar una función específica. Esta estrategia se basa en el supuesto de que una combinación de diferentes capacidades y funciones biológicas

puede proporcionar una mayor eficacia que una sola cepa. La interacción puede llegar a ser más resiliente y adaptable a los cambios ambientales porque tienen funciones y capacidades más diversas.

8. Conclusión

En los resultados obtenidos en este estudio, en la biodegradación de contaminantes emergentes, específicamente algestona con estradiol utilizando consorcios microbianos, se demuestra que los consorcios bacterianos presentan una mayor eficiencia para la eliminación de la algestona con estradiol en el tratamiento de aguas residuales, con esto se afirma que la utilización de técnicas de biorremediación son una solución innovadora y sostenible para la gestión de contaminantes emergentes en los ecosistemas, principalmente los acuáticos.

Es importante señalar que los consorcios pueden presentar desafíos operativos y de investigación adicionales en comparación con las cepas individuales, debido a que se debe considerar que tengan un efecto sinérgico y no antagónico.

Entre las principales ventajas de la aplicación de estos procesos biotecnológicos específicamente la biorremediación se encuentran, la mineralización de contaminantes sin producción de compuestos tóxicos además de la disminución de costos y ser procesos sostenibles.

Referencias

Anatomical Therapeutic Chemical Classification System. (s.f.). *Brigham and Women's Hospital*.

Obtenido de Brigham and Women's Hospital:

<https://healthlibrary.brighamandwomens.org/spanish/diseasesconditions/adult/Endocrinology/85,P03522>

Ayacop. (2006). *Wikipedia*. Obtenido de Wikipedia:

<https://es.wikipedia.org/wiki/Estriol#/media/Archivo:Estriol.svg>

Biblioteca nacional de medicina (EE.UU). (22 de Octubre de 2022). *MedlinePlus*. Obtenido de

MedlinePlus: <https://medlineplus.gov/spanish/pruebas-de-laboratorio/prueba-de-estrogeno/>

Bombí, I. (9 de Junio de 2021). *Salud Blog Mapre*. Obtenido de Salud Blog Mapre:

<https://www.salud.mapfre.es/salud-familiar/mujer/reportajes-mujer/que-sabemos-del-estradiol/>

Condorchem Enviro Solutions. (s.f.). *Condorchem Enviro Solutions*. Obtenido de Condorchem

Enviro Solutions: <https://condorchem.com/es/blog/tratamiento-biologico-de-aguas-residuales/>

Cruza, A., Hernández, M., Bonilla, A., Sandoval, O., Acevedo, A., & Velázquez, R. (2023).

Valorización de agroresiduos para la remoción de estriol en agua. *PADI*, 152-168.

Darwingbioprospecting. (17 de Abril de 2020). *Darwingbioprospecting*. Obtenido de

Darwingbioprospecting: <https://darwinbioprospecting.com/2020/04/17/que-es-la-biorremediacion/>

Denchat, M. (11 de Enero de 2023). *NRDC*. Obtenido de NRDC:

<https://www.nrdc.org/es/stories/contaminacion-agua-todo-lo-necesitas-saber#que-es>

EPA. (Septiembre de 2012). *EPA*. Obtenido de EPA:

https://19january2017snapshot.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/epa-542-f-12-003s_guia_del_ciudadano_sobre_la_biorremediacion.pdf

Fereira, A. (2017). Distribución de esteroides estrogénicos en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. *Acta toxicología Argentina*, 80-90.

- FONATOUR. (2018). *Gobierno de México*. Obtenido de Gobierno de México:
<https://www.gob.mx/fmt/acciones-y-programas/tratamiento-de-aguas-residuales-162692>
- Grupo Hospital Clinic. (s.f.). *Barna Clinic*. Obtenido de Barna Clinic:
<https://www.barnaclinic.com/blog/womens-health/estrogenos/>
- Hernández, A. N. (Enero de 2014). CUANTIFICACIÓN DE 17 β -ESTRADIOL PROVENIENTE DE EFLUENTES HOSPITALARIOS MEDIANTE CROMATOGRAFÍA DE LÍQUIDOS DE ALTA RESOLUCIÓN Y DETERMINACIÓN DE CINÉTICA DE BIODEGRADACIÓN. *CUANTIFICACIÓN DE 17 β -ESTRADIOL PROVENIENTE DE EFLUENTES HOSPITALARIOS MEDIANTE CROMATOGRAFÍA DE LÍQUIDOS DE ALTA RESOLUCIÓN Y DETERMINACIÓN DE CINÉTICA DE BIODEGRADACIÓN*. Toluca, Estado de México, México: UAEM.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (16 de Noviembre de 2018). *Gobierno de México*. Obtenido de Gobierno de México: <https://www.gob.mx/imta/articulos/el-desafio-de-los-contaminantes-emergentes>
- Instituto Bernabeu. (2021). *Instituto Bernabeu*. Obtenido de Instituto Bernabeu:
<https://www.institutobernabeu.com/es/foro/estradiol-cuales-las-funciones-esta-hormona-sexual/>
- Jianzhong, L., Jiang, L., Xiang, L., & Jiachen, L. (31 de Enero de 2013). *ReachGate*. Obtenido de ReachGate:
https://www.researchgate.net/publication/271892941_Adsorption_and_aerobic_biodegradation_of_four_selected_endocrine_disrupting_chemicals_in_soil-water_system
- Koch, H., Lucker, S., Albertsen, M., Kitzinger, K., Herbold, C., & Spieck, E. (2015). Expanded metabolic versatility of ubiquitous nitrite-oxidizing bacteria from the genus Nitrospira. *PNAS*, 11371-11376.
- López, J., & García, L. (2021). Aplicaciones biotecnológicas para la degradación de contaminantes. *Newsletter*, 13-16.
- Lukač Reberski, J., Terzić, J., Maurice, L., & Lapworth, D. (2022). Emerging organic contaminants in karst groundwater: A global level assessment. *ScienceDirect*.

- Mingtang, L., Xingmin, Z., Xiufang, Z., Di, W., & Su, L. (2018). Biodegradation of 17 β -estradiol by bacterial Co-culture Isolated from Manure. *scientific reports*.
- Nuñez, C. (25 de Mayo de 2023). *National Geographic*. Obtenido de National Geographic: <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/contaminacion-del-agua>
- Silva, C., Otero, M., & Esteves, V. (2012). Processes for the elimination of estrogenic steroid hormones from water. *ScienceDirect*, 38-58.
- The National Center for Biotechnology Information. (Octubre de 2023). *PubChem*. Obtenido de PubChem: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/11687>
- The National Center for Biotechnology Information. (Octubre de 2023). *PubChem*. Obtenido de PubChem: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Estradiol>.
- The National Center for Biotechnology Information. (29 de Noviembre de 2023). *PubChem*. Obtenido de PubChem: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Estrone>
- Weber, S., Leuschner, P., Kämpfer, P., Dott, W., & Hollende, J. (2005). Degradation of estradiol and ethinyl estradiol by activated sludge and by a defined mixed culture. *Apply Microbioly Biotechnoly*, 106-112.