

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN REGIONAL DE CIENCIA ANIMAL

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS



Evaluación de la actividad antioxidante y antimicrobiana de extractos foliares de
Eucalyptus spp. frente a *Escherichia coli*

Por:

Jenny Rubi Hernández Chavez

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

MÉDICO VETERINARIO ZOOTECNISTA

Torreón, Coahuila, México
Junio2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN REGIONAL DE CIENCIA ANIMAL

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS

Evaluación de la actividad antioxidante y antimicrobiana de extractos foliares de
Eucalyptus spp. frente a *Escherichia coli*

Por:

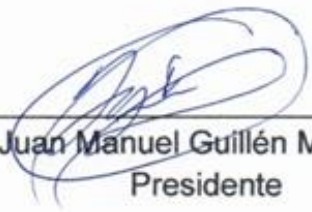
Jenny Rubi Hernández Chavez

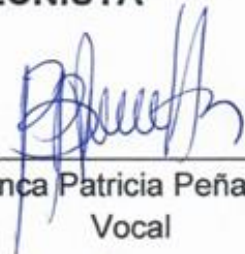
TESIS

Que se somete a la consideración del H. Jurado Examinador como requisito
parcial para obtener el título de:

MÉDICO VETERINARIO ZOOTECNISTA

Aprobada por:


Dr. Juan Manuel Guillén Muñoz
Presidente


M.C. Blanca Patricia Peña Revuelta
Vocal


Dra. Reyna Roxana Guillén Enríquez
Vocal


Dr. Ramiro González Avalos
Vocal Suplente


MVZ. Eric Alejandro Reyes Ramirez
Coordinador de la División Regional de Ciencia Animal



Torreón, Coahuila, México
Junio2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN REGIONAL DE CIENCIA ANIMAL

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS

Evaluación de la actividad antioxidante y antimicrobiana de extractos foliares de
Eucalyptus spp. frente a *Escherichia coli*

Por:

Jenny Rubi Hernández Chavez

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

MÉDICO VETERINARIO ZOOTECNISTA

Aprobada por el Comité de Asesoría:



MC. Blanca Patricia Peña Revuelta
Asesor Principal

Dr. Ramiro González Avalos
Coasesor



Dra. Reyna Roxana Guillén Enríquez
Coasesor



MVZ. Eric Alejandro Reyes Ramírez
Coordinador de la División Regional de Ciencia Animal

Torreón, Coahuila, México
Junio 2026

DEDICATORIAS

A mi hija Esmeralda, quien ha sido mi mayor inspiración y la razón más grande para salir adelante cada día, por darme las fuerzas para luchar cada batalla y por motivarme a convertirme en una mejor persona y profesionista. Todo lo que hago también es por ti y para ti.

A mi madre Beatriz Chavez, por ser el pilar más fuerte en mi vida, por su amor incondicional, sus sacrificios, consejos y por brindarme su apoyo en todo momento, sin ti nada sería posible eres mi inspiración de fuerza y valentía te amo.

A mi padre Ventura Hernandez, por su apoyo y amor incondicional, por cada consejo, por orientarme y motivarme a ser mejor persona y por enseñarme que con esfuerzo y constancia todo es posible. Por creer en mi aun en momentos en los que yo dudaba. Este logro también es tuyo.

A mis hermanas Luz y Alejandra Hernandez, por acompañarme en cada etapa de mi vida, por todo el apoyo y cariño, por estar presentes en las buenas y malas, por ser parte importante de mi camino y no dejarme sola, por ser mis amigas y compañeras.

A mi abuela Francisca Ramirez que se encuentra en el cielo, por inspirarme siempre, por cada llamada por las tardes, por motivarme, por creer en mí, por todo el cariño que me daba y por dejar huellas valiosas en mi vida que siempre llevare conmigo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a Dios por permitirme llegar hasta este momento, por darme salud, fortaleza y sabiduría para superar cada obstáculo presentado en este camino.

A mis padres, por su amor incondicional, esfuerzo y sacrificio constante para brindarme las herramientas necesarias para cumplir mis metas. Gracias por apoyarme en cada decisión y por nunca dejar de creer en mí.

A mis hermanas, por su compañía incondicional, sus palabras de aliento y su apoyo en los momentos más difíciles de este camino. Gracias por estar siempre presentes, por escucharme, animarme y acompañarme en cada etapa. Su cariño, confianza y apoyo han sido una fuente constante de fortaleza para seguir adelante y alcanzar esta meta.

A mis abuelos, tíos y primos, gracias por estar presentes a lo largo de estos años, por su apoyo y por cada muestra de cariño que me brindaron. Cada palabra de ánimo y cada gesto de amor significaron mucho para mí y me ayudaron a seguir adelante.

A mi amiga Alejandra Hernández Rosas, la hermana que la vida puso en mi camino. Gracias por tu amistad sincera, por tu compañía incondicional y por cada una de las veces que estuviste ahí cuando más te necesité. Tu apoyo, tus palabras y tu presencia fueron un refugio en los momentos difíciles y una alegría constante en los buenos tiempos.

A mi pareja Adrián Vázquez, gracias por acompañarme durante este camino, por tu apoyo incondicional, tu compañía y el amor que me brindaste en cada etapa de este proceso. Gracias por estar presente tanto en los momentos de felicidad como en los más difíciles y por motivarme a seguir adelante.

A la Dra. Reyna, por compartir sus conocimientos, brindarme su orientación y acompañarme con paciencia en la elaboración de este trabajo. Su dedicación, compromiso y entusiasmo por la investigación han sido mi fuente de inspiración. Admiro profundamente su incansable esfuerzo. Gracias por su apoyo, confianza y por contribuir de manera significativa mi formación profesional. De igual manera agradezco al Dr. Ramiro y al departamento de ciencias básicas.

Finalmente, agradezco a todas las personas que de una u otra manera formaron parte de este proceso y contribuyeron a la culminación de esta meta tan importante en mi vida.

Índice general

AGRADECIMIENTOS	ii
Índice general	iv
RESUMEN	vi
Índice de cuadros	vii
Índice de figuras	viii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo.....	3
1.1.1 Objetivo general.....	3
1.1.2 Objetivos específicos.....	3
1.2 Hipótesis	3
2. REVISIÓN DE LA LITERATURA	4
2.1 Resistencia antimicrobiana	4
2.1.1 Panorama global de la resistencia bacteriana	7
2.1.2 Resistencia antimicrobiana en medicina veterinaria.....	9
2.2 Escherichia coli	10
2.2.1 Características microbiológicas	12
2.2.2 Importancia en salud animal y humana.....	14
2.2.3 Uso como modelo en estudios antimicrobianos.....	15
2.3 Plantas medicinales con actividad antimicrobiana	17
2.4 Características botánicas y distribución del eucalipto	18
2.5 Composición fitoquímica del eucalipto.....	20
2.5.1 Fenoles	21
2.5.2 Flavonoides	22
2.5.3 Otros metabolitos secundarios	23
2.6 Actividad biológica del eucalipto	25
2.6.1 Actividad antioxidante	27
2.6.2 Actividad antimicrobiana	29
2.7 Métodos de extracción de compuestos bioactivos	30
2.7.1 Influencia del solvente.....	33
2.8 Métodos microbiológicos para evaluar actividad antibacteriana	35
2.8.1 Difusión en agar	37
2.8.2 Determinación de halo de inhibición.....	40

2.9 Uso potencial de extractos vegetales como alternativa a antibióticos	42
3. MATERIALES Y MÉTODOS	44
3.1 Localización del experimento	44
3.2 Material vegetal y preparación de la muestra.....	44
3.3 Obtención de los extractos	45
3.4 Cepa bacteriana.....	46
3.5 Determinación de fenoles totales	47
3.6 Determinación de flavonoides totales	47
3.7 Evaluación de la actividad antioxidante (DPPH)	48
3.8 Evaluación de la actividad antimicrobiana	49
3.9 Diseño experimental y análisis estadístico	49
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	51
4.1 Contenido de fenoles totales	51
4.2 Contenido de flavonoides totales	51
4.3 Actividad antioxidante (DPPH)	52
4.4 Actividad antimicrobiana frente a Escherichia coli	53
5. CONCLUSIONES	55
6. LITERATURA CITADA	56

RESUMEN

La resistencia antimicrobiana representa uno de los principales riesgos para la salud pública y la producción animal, lo cual ha incitado la búsqueda de alternativas naturales con actividad antibacteriana. El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la actividad antimicrobiana y antioxidante del extracto de Eucalipto frente a *Escherichia coli* mediante la técnica de difusión en agar. Se emplearon hojas de *Eucalyptus* spp, de las cuales una vez que se obtuvo el material seco se prepararon los extractos foliares utilizando diferentes solventes de distinta polaridad: agua destilada (extracto acuoso, AQ), etanol al 96 % (extracto etanólico, ET) y etanol al 70 % (extracto hidroalcohólico, HA70), cada uno por triplicado (R1, R2 y R3) y posteriormente se evaluó su efecto antioxidante e inhibitorio sobre el crecimiento bacteriano. No se observó diferencias significativas entre los tres solventes en la evaluación de fenoles y flavonoides totales. Los extractos HA70 y AQ mostraron una elevada actividad antioxidante y dependiente de la concentración superando el 70%-97% de inhibición. Los resultados muestran que el solvente hidroalcohólico es el más eficiente para obtener extractos foliares. Se concluye que el uso de extractos vegetales forma una línea de investigación prometedora para reducir el uso indiscriminado de antibióticos y al manejo de la resistencia antimicrobiana.

Palabras clave: Eucalipto, Extractos foliares, Resistencia bacteriana, Fenoles, Flavonoides

Índice de cuadros

Cuadro 1	Contenido de fenoles totales en extractos foliares de <i>Eucalyptus</i> spp. .	51
Cuadro 2	Contenido de flavonoides totales en extractos foliares de <i>Eucalyptus</i> spp.	52
Cuadro 3	Porcentaje de inhibición del radical DPPH por concentración.	53
Cuadro 4	Diámetro del halo de inhibición (mm) de los extractos frente a <i>E. coli</i> . .	54

Índice de figuras

Figura 1	Preparación de tres extractos en vaso precipitado por solvente.	46
Figura 2	Preparación de diluciones de extractos por triplicado.	47
Figura 3	Cuantificación de flavonoides totales en espectrofotómetro.	48

1. INTRODUCCIÓN

La resistencia a los antimicrobianos constituye uno de los principales problemas de salud pública a nivel mundial, al comprometer la eficacia de los tratamientos disponibles y limitar las opciones terapéuticas frente a infecciones bacterianas (Munita y Arias, 2016). El uso intensivo e inadecuado de antibióticos, tanto en medicina humana como en producción animal, ha acelerado la aparición y diseminación de bacterias resistentes (Rhouna *et al.*, 2023). En el ámbito veterinario, esta problemática adquiere especial relevancia, ya que los animales pueden actuar como reservorios de genes de resistencia que se transfieren al ser humano y al ambiente (Serna y González-Zorn, 2022).

Entre las bacterias de mayor importancia en este contexto se encuentra *Escherichia coli*, un microorganismo presente en el tracto gastrointestinal de animales y humanos que incluye cepas patógenas responsables de infecciones intestinales y extraintestinales (Croxen *et al.*, 2013; Giono-Cerezo *et al.*, 2020). Por su amplia distribución, su capacidad para adquirir mecanismos de resistencia y su facilidad de cultivo, *E. coli* es además ampliamente utilizada como microorganismo modelo en la evaluación de nuevos agentes antibacterianos (Guerra *et al.*, 2019).

Ante este panorama, la búsqueda de alternativas a los antibióticos convencionales ha cobrado un interés creciente, destacando el aprovechamiento de los metabolitos secundarios de las plantas como fuente de compuestos con actividad biológica (Cowan, 1999; Górniak *et al.*, 2023). Diversas especies vegetales han demostrado propiedades antimicrobianas y antioxidantes atribuibles a su composición

fitoquímica, lo que las posiciona como candidatas para el desarrollo de productos naturales con aplicación terapéutica (Nortjie *et al.*, 2024).

El género *Eucalyptus* destaca por su abundancia de compuestos bioactivos, particularmente fenoles y flavonoides, a los que se atribuye gran parte de sus propiedades biológicas (Batish *et al.*, 2023; Bouzabata *et al.*, 2023). Los compuestos fenólicos y flavonoides son metabolitos con reconocida capacidad antioxidante y antimicrobiana, mecanismos relacionados con la neutralización de radicales libres y la alteración de la integridad de la membrana bacteriana (Panche *et al.*, 2022; Hamada *et al.*, 2024). En este sentido, los extractos de eucalipto han mostrado actividad frente a diversos microorganismos, incluida *E. coli* (Mulu *et al.*, 2022; Khanem *et al.*, 2025; Nasir Shah *et al.*, 2023).

Sin embargo, la cantidad y el tipo de compuestos bioactivos recuperados dependen en gran medida del solvente de extracción empleado, ya que su polaridad determina la solubilización de los distintos metabolitos y, en consecuencia, la actividad biológica del extracto resultante (Sousa *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2023; Álvarez *et al.*, 2021). Por ello, resulta necesario evaluar de manera comparativa el efecto de diferentes solventes sobre el contenido de compuestos bioactivos y la actividad antioxidante y antimicrobiana de los extractos foliares de *Eucalyptus* spp., con el fin de identificar las condiciones de extracción más eficientes para su potencial aplicación frente a *Escherichia coli*.

1.1 Objetivo

1.1.1 Objetivo general

Evaluar el efecto del solvente de extracción sobre el contenido de compuestos bioactivos y la actividad antioxidante y antimicrobiana de extractos foliares de *Eucalyptus* spp. frente a *Escherichia coli*.

1.1.2 Objetivos específicos

- Obtener extractos foliares de *Eucalyptus* spp. mediante tres solventes de distinta polaridad (acuoso, etanólico al 96 % e hidroalcohólico al 70 %).
- Cuantificar el contenido de fenoles totales y flavonoides totales en los extractos obtenidos.
- Evaluar la actividad antioxidante de los extractos mediante el método de captación del radical DPPH.
- Determinar la actividad antimicrobiana de los extractos frente a *Escherichia coli* mediante el método de difusión en agar.

1.2 Hipótesis

El tipo de solvente de extracción influye en el contenido de compuestos bioactivos y en la actividad antioxidante y antimicrobiana de los extractos foliares de *Eucalyptus* spp., de manera que el extracto hidroalcohólico, por su polaridad intermedia, presenta el mayor contenido de fenoles y flavonoides y la mayor actividad frente a *Escherichia coli*.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1 Resistencia antimicrobiana

Desde el descubrimiento de los antibióticos, estos fármacos se convirtieron en una herramienta fundamental tanto en la medicina humana como en la veterinaria, gracias a su alta eficacia para el tratamiento de enfermedades infecciosas. Durante muchos años se consideró que la aparición de bacterias resistentes sería un fenómeno poco frecuente; sin embargo, con el paso del tiempo se ha evidenciado que el uso excesivo e inadecuado de estos medicamentos ha favorecido la selección y propagación de microorganismos resistentes (Serna y González-Zorn, 2022).

La resistencia antimicrobiana se entiende como la capacidad que poseen ciertos microorganismos para sobrevivir e incluso multiplicarse en presencia de antibióticos que, en condiciones normales, deberían inhibirlos o eliminarlos. Este fenómeno puede presentarse de forma natural en algunas bacterias o desarrollarse a lo largo del tiempo mediante mecanismos adquiridos durante el proceso infeccioso. En la actualidad, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) reconoce la resistencia bacteriana como una de las principales amenazas para la salud pública mundial, debido a sus impactos en el bienestar humano, la producción animal y el desarrollo global (Giono-Cerezo *et al.*, 2020).

En este contexto, la resistencia antimicrobiana se ha consolidado no solo como un problema sanitario, sino también como un desafío económico y social de gran magnitud. Su presencia dificulta cada vez más el control de múltiples enfermedades infecciosas, lo que se traduce en tratamientos más prolongados, incremento en las

hospitalizaciones, mayores costos médicos y un aumento en las tasas de mortalidad (OMS, 2023).

Aunque la resistencia bacteriana forma parte de un proceso evolutivo natural, su aceleración en las últimas décadas está estrechamente relacionada con actividades humanas, especialmente con el uso indiscriminado de antibióticos en la medicina humana, la medicina veterinaria y los sistemas de producción animal (OMS, 2023). Esta exposición constante ejerce una presión selectiva sobre las bacterias, favoreciendo la supervivencia de aquellas cepas capaces de resistir la acción de los antimicrobianos.

A nivel biológico, las bacterias han desarrollado diversos mecanismos para contrarrestar la acción de los antibióticos. Entre los más importantes se encuentran la producción de enzimas que inactivan el fármaco, la modificación de los sitios de acción del antibiótico, la disminución de la permeabilidad de la membrana celular y la presencia de bombas de eflujo que expulsan el antimicrobiano hacia el exterior, reduciendo así su efectividad terapéutica (Munita y Arias, 2016).

Por otro lado, la resistencia adquirida se presenta cuando las bacterias incorporan cambios genéticos que les permiten tolerar la acción de los antimicrobianos. Estas modificaciones pueden surgir a partir de mutaciones espontáneas o mediante la adquisición de genes de resistencia provenientes de otros microorganismos, a través de mecanismos como la conjugación, transformación y transducción. Gracias a estos procesos, las bacterias pueden sobrevivir incluso bajo tratamientos prolongados o repetidos (Giedraitienė *et al.*, 2011).

La propagación de la resistencia no depende únicamente de la multiplicación de bacterias resistentes, sino también del intercambio de material genético entre microorganismos. En este proceso, elementos genéticos móviles como plásmidos, integrones y transposones juegan un papel clave, ya que facilitan la transferencia de genes asociados a la resistencia, favoreciendo su rápida diseminación entre diferentes especies bacterianas y ambientes diversos (Sultan *et al.*, 2018).

Dentro de estos elementos, los plásmidos destacan por su importancia, ya que funcionan como verdaderos vehículos de transferencia genética horizontal. Estas estructuras extracromosómicas pueden transportar múltiples genes de resistencia y mantenerse estables dentro de las poblaciones bacterianas, incluso en ausencia de presión antibiótica. Esto contribuye significativamente a la persistencia y expansión de bacterias resistentes en distintos ecosistemas (Serna y González-Zorn, 2022).

En los últimos años, el aumento de bacterias multirresistentes ha generado una creciente preocupación a nivel mundial, debido a la reducción de opciones terapéuticas efectivas frente a diversas infecciones. Ante este escenario, ha surgido un interés creciente por explorar alternativas antimicrobianas, entre las que destacan los compuestos naturales derivados de plantas medicinales, los cuales presentan una amplia diversidad química y múltiples mecanismos de acción (Angelini, 2024).

Finalmente, los antibióticos pueden clasificarse según su efecto sobre las bacterias en bacteriostáticos y bactericidas. Los primeros inhiben el crecimiento y la multiplicación bacteriana, mientras que los segundos provocan la muerte celular. En este sentido, una bacteria se considera resistente cuando logra sobrevivir a la

acción de estos compuestos, ya sea por mecanismos naturales o adquiridos, lo que representa uno de los principales retos actuales en el manejo de enfermedades infecciosas (Quiñones-Pérez, 2017).

2.1.1 Panorama global de la resistencia bacteriana

La resistencia antimicrobiana constituye actualmente uno de los problemas de salud pública más importantes debido a su rápida expansión y a las consecuencias que genera tanto en medicina humana como veterinaria. La capacidad de los microorganismos resistentes para dispersarse entre países y ecosistemas ha convertido esta problemática en un desafío global que afecta la eficacia de los tratamientos antimicrobianos y compromete el control de numerosas enfermedades infecciosas (OMS, 2016).

La diseminación de bacterias resistentes y de genes asociados a resistencia puede ocurrir mediante diferentes vías, incluyendo alimentos contaminados, agua, animales, seres humanos y el medio ambiente. Del mismo modo, factores como el comercio internacional, la movilización de personas, el tráfico aéreo y las deficiencias en higiene y saneamiento favorecen la propagación de microorganismos resistentes entre distintas regiones del mundo (OMS, 2016).

El impacto de la resistencia bacteriana afecta tanto a países desarrollados como a naciones en desarrollo. Se estima que millones de muertes anuales están relacionadas con infecciones causadas por bacterias resistentes, lo que representa una importante carga económica y sanitaria para los sistemas de salud pública (OMS, 2023).

A pesar de los esfuerzos internacionales para regular el uso de antimicrobianos, el incremento de cepas resistentes continúa avanzando, mostrando un crecimiento acelerado, comparable incluso con otras grandes amenazas infecciosas globales. En 2019, la resistencia bacteriana estuvo asociada con aproximadamente 4.95 millones de muertes en el mundo, de las cuales alrededor de 1.27 millones fueron directamente atribuidas a infecciones ocasionadas por microorganismos resistentes (Lima-Pinos *et al.*, 2026).

Se ha reportado un incremento constante en la presencia de cepas multirresistentes tanto en hospitales como en la comunidad. Esta situación dificulta el tratamiento de infecciones comunes, incrementa el riesgo de complicaciones clínicas y favorece la aparición de brotes epidemiológicos de difícil control (Jia *et al.*, 2025).

Ante este panorama, diferentes organismos internacionales han destacado la necesidad de implementar estrategias enfocadas en el uso racional de los antibióticos, ya que el desarrollo de nuevos antimicrobianos no será suficiente si continúan los patrones inadecuados de prescripción y utilización de estos fármacos (Levy Hara, 2012).

La evidencia científica actual señala que el uso excesivo e inapropiado de antibióticos en medicina humana, veterinaria y producción animal constituye uno de los principales factores relacionados con la emergencia y expansión de bacterias resistentes. De igual manera, los mecanismos de transferencia horizontal de genes, como conjugación, transformación y transducción, facilitan la rápida diseminación de la resistencia entre distintas poblaciones bacterianas (Espino-Hernández, 2011).

2.1.2 Resistencia antimicrobiana en medicina veterinaria

La resistencia antimicrobiana es un aspecto relevante en la medicina veterinaria debido a sus efectos sobre la salud animal, la seguridad alimentaria y la salud pública. El uso de antibióticos en animales de producción, tanto con fines terapéuticos como preventivos, ha contribuido significativamente a la selección y propagación de bacterias resistentes (FAO, 2022).

Después de que los antibacterianos demostraran su eficacia en medicina humana, su utilización se extendió progresivamente al ámbito veterinario. Actualmente, estos medicamentos son empleados en diversas especies destinadas a la producción de alimentos, como bovinos, porcinos, ovinos, caprinos, aves y peces, con el objetivo de prevenir y tratar enfermedades infecciosas. Sin embargo, el uso frecuente e inadecuado de estos compuestos ha generado preocupación debido al posible desarrollo y transmisión de bacterias resistentes entre animales y seres humanos (Gundogan *et al.*, 2005).

En los sistemas de producción animal, algunos antibióticos también fueron utilizados durante años como promotores del crecimiento, ya que podrían mejorar la eficiencia alimenticia y favorecer el aumento de peso de los animales. Su administración en dosis bajas modifica la microbiota intestinal y reduce ciertos microorganismos considerados perjudiciales, lo que puede mejorar el aprovechamiento de nutrientes. No obstante, el uso continuo de estos compuestos se ha relacionado con la selección de cepas bacterianas resistentes, motivo por el cual varios países han restringido o prohibido su utilización con este propósito (Hernández-Barrera *et al.*, 2017).

Aunque todavía no se comprende completamente el mecanismo mediante el cual los antibióticos promotores del crecimiento generan estos efectos productivos, se ha observado que la exposición prolongada a dosis subterapéuticas puede alterar diversos procesos fisiológicos. Entre los cambios descritos se encuentran la disminución de la diversidad de la microbiota intestinal, menor competencia por nutrientes, reducción de bacterias potencialmente patógenas y modificaciones en el metabolismo y la respuesta inmunitaria de los animales (Palma *et al.*, 2020).

La importancia de esta problemática radica también en la capacidad de las bacterias resistentes para transmitirse desde los animales hacia los seres humanos mediante diferentes vías. La contaminación de alimentos de origen animal, el contacto directo con animales y la exposición ambiental representan mecanismos importantes de dispersión de microorganismos resistentes. Debido a esta estrecha relación entre salud animal, salud humana y medio ambiente, el enfoque “One Health” o “Una Salud” se ha consolidado como una estrategia integral para enfrentar la resistencia antimicrobiana a nivel global (OMS, 2023).

2.2 *Escherichia coli*

Las bacterias Gram negativas, entre ellas *Escherichia coli*, poseen una notable capacidad para adquirir y diseminar genes de resistencia antimicrobiana, lo que las convierte en microorganismos de gran importancia médica y veterinaria. De igual manera, estas bacterias pueden formar biopelículas y transferir material genético entre ellas, dificultando su control y tratamiento (De Fazio *et al.*, 2024).

Escherichia coli pertenece a la familia Enterobacteriaceae y forma parte de la microbiota intestinal normal de humanos y animales. Se trata de una bacteria ampliamente distribuida que destaca por su gran diversidad genética y capacidad de adaptación. Aunque muchas cepas son consideradas comensales e inofensivas, otras poseen factores de virulencia que les permiten causar diversas enfermedades tanto en animales como en seres humanos (Bessalah *et al.*, 2023; Braz *et al.*, 2020).

La elevada plasticidad genética de *E. coli* le permite adquirir, perder y reorganizar material genético mediante mecanismos de transferencia horizontal. Como resultado, han surgido numerosos linajes con diferentes características ecológicas, niveles de virulencia y perfiles de resistencia antimicrobiana. Esta diversidad explica por qué algunas cepas permanecen como parte normal de la microbiota intestinal, mientras que otras son capaces de producir infecciones intestinales y extraintestinales de gran relevancia clínica (Manges *et al.*, 2022).

Las cepas patógenas de *E. coli* poseen distintos factores de virulencia que favorecen la colonización del hospedador, la evasión de las defensas inmunológicas y el desarrollo de enfermedad. Con base en sus mecanismos de patogenicidad y manifestaciones clínicas, estas cepas se clasifican en diferentes patotipos, entre los que destacan *E. coli* enterotoxigénica (ETEC), enteropatógena (EPEC), enterohemorrágica (EHEC), enteroinvasiva (EIEC), enteroagregativa (EAEC) y de adherencia difusa (DAEC). Estos grupos son responsables de una gran variedad de enfermedades gastrointestinales en humanos y animales (Croxen *et al.*, 2013).

Las infecciones causadas por *E. coli* van desde cuadros leves de gastroenteritis hasta enfermedades graves como septicemia, choque séptico e insuficiencia renal.

Debido a la capacidad para adaptarse al hospedador y desarrollar resistencia a múltiples antimicrobianos se ha convertido en uno de los principales agentes causales de infecciones comunitarias y hospitalarias (Mueller *et al.*, 2025).

En medicina veterinaria, *E. coli* es considerada uno de los patógenos bacterianos más importantes ya que genera pérdidas económicas y problemas sanitarios que ocasiona en animales domésticos y de producción. Entre las enfermedades más frecuentes asociadas con esta bacteria se encuentran las diarreas neonatales en bovinos y porcinos, la colibacilosis aviar y la mastitis bovina. La capacidad patogénica de estas cepas se relaciona con factores de virulencia como adhesinas, toxinas, cápsulas y sistemas de captación de hierro, los cuales favorecen la colonización y supervivencia bacteriana dentro del hospedador (Guerra *et al.*, 2019).

En el ámbito de la salud humana, *E. coli* es causante de los principales agentes etiológicos de infecciones urinarias, gastroenteritis, meningitis neonatal y septicemias. En consecuencia, a su amplia distribución, capacidad de adaptación y creciente resistencia antimicrobiana, esta bacteria constituye un desafío importante para la salud pública y la medicina veterinaria, aunado a ello, genera repercusiones económicas considerables (Mueller *et al.*, 2025).

2.2.1 Características microbiológicas

Escherichia coli es un bacilo Gram negativo perteneciente a la familia Enterobacteriaceae, ampliamente distribuido en el tracto gastrointestinal de humanos y animales. Esta bacteria posee requerimientos nutricionales relativamente simples y un tiempo de generación corto, características que facilitan

su aislamiento, cultivo e identificación en medios microbiológicos convencionales. Debido a ello, *E. coli* se ha convertido en uno de los microorganismos modelo más utilizados en investigaciones microbiológicas, farmacológicas y biotecnológicas (Cowan, 1999).

Una de las principales características de *E. coli* es su capacidad para desarrollarse en presencia y en ausencia de oxígeno, por lo que se clasifica como una bacteria anaerobia facultativa. Dicha propiedad le permite adaptarse a distintos ambientes y sobrevivir en condiciones variables. Además, presenta una elevada capacidad metabólica que le permite utilizar diversas fuentes de nutrientes y mantenerse viable en diferentes ecosistemas (Kgatla *et al.*, 2024).

La mayoría de las cepas poseen movilidad gracias a la presencia de flagelos peritricos distribuidos alrededor de la célula, aunque algunas pueden ser inmóviles. Su estructura celular incluye una membrana externa rica en lipopolisacáridos (LPS), componente considerado una endotoxina importante en los procesos inflamatorios asociados a infecciones causadas por bacterias Gram negativas. Asimismo, la composición de su pared celular contribuye a su resistencia y capacidad de adaptación frente a distintos factores ambientales (Li *et al.*, 2024).

Otra característica relevante de *E. coli* es su notable plasticidad genética. Esta bacteria tiene la capacidad de adquirir material genético mediante mecanismos de transferencia horizontal, lo que favorece la aparición de cepas con diferentes niveles de virulencia, adaptación ecológica y resistencia antimicrobiana. Gracias a esta capacidad, algunas cepas permanecen como parte normal de la microbiota

intestinal, mientras que otras pueden comportarse como importantes agentes patógenos en humanos y animales (Nasrollahian *et al.*, 2024).

2.2.2 Importancia en salud animal y humana

Escherichia coli es una de las bacterias de mayor relevancia sanitaria debido a su amplia distribución en humanos y animales, así como a su capacidad para comportarse tanto como microorganismo comensal como agente patógeno. Aunque normalmente forma parte de la microbiota intestinal de mamíferos y aves, ciertas cepas han desarrollado factores de virulencia que les permiten producir enfermedades de importancia clínica y económica (Bessalah *et al.*, 2023).

En medicina humana, *E. coli* es reconocida como uno de los principales agentes causales de infecciones del tracto urinario, gastroenteritis, septicemia y meningitis neonatal. Algunas cepas patógenas, especialmente aquellas productoras de toxina Shiga, pueden ocasionar enfermedades graves como colitis hemorrágica y síndrome urémico hemolítico, afectando principalmente a niños y personas inmunocomprometidas. Además, la creciente aparición de cepas resistentes a múltiples antimicrobianos ha convertido a esta bacteria en un importante desafío para los sistemas de salud pública a nivel mundial (Mueller *et al.*, 2025).

En el ámbito veterinario, *E. coli* participa en diversas enfermedades que afectan tanto a animales de compañía como a especies de producción. En bovinos, porcinos, aves y pequeños rumiantes puede provocar enteritis, septicemia, mastitis, infecciones respiratorias y trastornos reproductivos. Estas enfermedades causan pérdidas económicas importantes debido a la mortalidad animal, disminución de la

productividad, costos de tratamiento y reducción en la calidad de los productos de origen animal (Bessalah *et al.*, 2023). Un ejemplo relevante es la colibacilosis aviar, considerada una de las enfermedades bacterianas más importantes dentro de la industria avícola por su impacto negativo sobre el crecimiento y la eficiencia productiva.

La importancia de *E. coli* también se relaciona con su participación en la cadena alimentaria. La contaminación de alimentos y agua con cepas patógenas representa un riesgo importante para la transmisión de enfermedades entre animales y seres humanos. Por esta razón, esta bacteria es utilizada frecuentemente como indicador microbiológico de contaminación fecal y como referencia para evaluar la calidad higiénico-sanitaria de alimentos, agua y ambientes pecuarios (De Fazio *et al.*, 2024).

Además de su relevancia clínica, *E. coli* desempeña un papel importante en el estudio de la resistencia antimicrobiana debido a su capacidad para adquirir y transferir genes de resistencia mediante plásmidos, integrones y otros elementos genéticos móviles. Esta característica favorece la propagación de bacterias multirresistentes entre animales, humanos y el medio ambiente, reforzando la necesidad de aplicar estrategias integrales bajo el enfoque “One Health”, el cual reconoce la estrecha relación entre la salud animal, humana y ambiental (Palma *et al.*, 2020).

2.2.3 Uso como modelo en estudios antimicrobianos

Debido a su importancia clínica, facilidad de cultivo y rápido crecimiento, *Escherichia coli* es uno de los microorganismos más utilizados como modelo en estudios

relacionados con la actividad antimicrobiana. Sus características microbiológicas permiten trabajar con ella de manera sencilla en condiciones de laboratorio, lo que facilita la evaluación de nuevos compuestos con potencial antibacteriano, incluyendo extractos obtenidos de plantas medicinales (Cunha *et al.*, 2025).

El interés por utilizar *E. coli* en este tipo de investigaciones también se debe a su capacidad para desarrollar resistencia frente a diferentes grupos de antimicrobianos. Por esta razón, numerosas investigaciones emplean cepas sensibles y multirresistentes de esta bacteria para determinar la eficacia de sustancias naturales y sintéticas destinadas al control bacteriano. A través de estos estudios es posible evaluar parámetros como la concentración mínima inhibitoria, la concentración mínima bactericida y los posibles mecanismos de acción de los compuestos analizados (Angelini, 2024).

En los últimos años, diferentes investigaciones han utilizado cepas de *E. coli* para analizar el potencial antimicrobiano de extractos vegetales, aceites esenciales y metabolitos secundarios provenientes de plantas medicinales. Los resultados han demostrado que muchos compuestos de origen vegetal presentan actividad inhibitoria frente a esta bacteria, lo cual incrementa el interés científico por su posible aplicación como alternativa o complemento a los antibióticos convencionales (Alrasheed *et al.*, 2023; Da Cunha *et al.*, 2025; Khanem *et al.*, 2025).

Asimismo, debido a su relevancia en medicina humana y veterinaria, *E. coli* es considerada una de las bacterias de referencia más importantes para evaluar nuevas estrategias dirigidas al control de la resistencia antimicrobiana. Su empleo en ensayos *in vitro* permite obtener información importante sobre la eficacia de

compuestos bioactivos y contribuye al desarrollo de posibles alternativas terapéuticas antibacterianas frente al creciente problema (De Fazio *et al.*, 2024).

2.3 Plantas medicinales con actividad antimicrobiana

Las plantas medicinales han sido utilizadas desde la antigüedad como fuente natural de compuestos terapéuticos para la prevención y tratamiento de diversas enfermedades. Su uso forma parte de la medicina tradicional de numerosas culturas y, en los últimos años, ha despertado interés científico en aumento debido a la necesidad de encontrar alternativas frente al aumento de la resistencia antimicrobiana. Muchas especies vegetales contienen metabolitos secundarios con actividad biológica capaces de inhibir el crecimiento de microorganismos patógenos, lo que las convierte en una fuente prometedora para el desarrollo de nuevos agentes antimicrobianos (Cowan, 1999; Angelini, 2024).

Entre los principales compuestos bioactivos presentes en las plantas medicinales se encuentran los compuestos fenólicos, flavonoides, alcaloides, taninos, saponinas y terpenos. Estas sustancias pueden ejercer actividad antimicrobiana mediante diferentes mecanismos, como la alteración de la membrana celular bacteriana, la inhibición de enzimas esenciales, la interferencia en la síntesis de proteínas y ácidos nucleicos, así como la afectación de procesos relacionados con la formación de biopelículas bacterianas (Cowan, 1999; Zouine *et al.*, 2024).

Numerosos productos naturales de origen vegetal han demostrado que muchos de sus metabolitos presentan múltiples mecanismos de acción, lo que dificulta el desarrollo de resistencia bacteriana en comparación con algunos antibióticos

convencionales, en consecuencia, el interés en ellos ha aumentado. Del mismo modo, varios extractos vegetales han mostrado actividad frente a microorganismos resistentes a múltiples fármacos, impulsando su estudio como posibles alternativas o complementos terapéuticos (Angelini, 2024).

Investigaciones han demostrado la eficacia de extractos obtenidos de distintas especies vegetales contra bacterias patógenas de importancia médica. En particular, se ha reportado actividad inhibitoria frente a *Escherichia coli*, incluyendo cepas resistentes a antibióticos, mediante el uso de extractos ricos en compuestos fenólicos, aceites esenciales y otros metabolitos secundarios bioactivos (Alrasheed et al., 2023; Jia et al., 2025; Singh et al., 2023).

Se ha reportado que las plantas medicinales son consideradas una de las fuentes más prometedoras en la búsqueda de nuevos antimicrobianos por su amplia diversidad química y potencial biológico. Estas características han favorecido el desarrollo de investigaciones orientadas a identificar compuestos con capacidad para combatir microorganismos resistentes y contribuir a la reducción del uso excesivo de antibióticos convencionales. Por ello, los extractos vegetales continúan siendo objeto de estudio como posibles alternativas terapéuticas seguras y eficaces (Zouine et al., 2024; Angelini, 2024).

2.4 Características botánicas y distribución del eucalipto

El género *Eucalyptus* pertenece a la familia *Myrtaceae* y comprende más de 700 especies de árboles y arbustos originarios principalmente de Australia y algunas regiones de Oceanía. Gracias a su rápido crecimiento, capacidad de adaptación y

aprovechamiento económico, numerosas especies de eucalipto han sido introducidas en distintos países de América, África, Asia y Europa, donde son utilizadas con fines forestales, industriales, ornamentales y medicinales (Khanem *et al.*, 2025).

Los árboles de eucalipto se caracterizan por alcanzar gran altura y tener un tronco recto con corteza de aspecto variable dependiendo de la especie, la cual puede ser lisa, fibrosa o escamosa. Sus hojas contienen abundantes glándulas secretoras de aceites esenciales responsables de su aroma característico. En etapas juveniles, las hojas suelen ser opuestas y de forma ovalada, mientras que en árboles adultos generalmente son alternas, lanceoladas y coriáceas. Las flores son hermafroditas, de color blanco o crema, y producen frutos leñosos en forma de cápsula que contienen una gran cantidad de semillas pequeñas (Nortjie *et al.*, 2024).

Una de las principales características del eucalipto es su capacidad de adaptación a diferentes condiciones climáticas y tipos de suelo, lo que ha favorecido su amplia distribución en diversas regiones del mundo. Muchas especies son cultivadas en plantaciones forestales debido a su rápido crecimiento y a la calidad de su madera, utilizada en la producción de papel, muebles, carbón vegetal y otros productos industriales. Además, algunas especies también son empleadas con fines ornamentales y en programas de reforestación (Khanem *et al.*, 2025).

Aunado a ello, el eucalipto ha despertado un creciente interés por la presencia de metabolitos secundarios con propiedades terapéuticas. Recientes investigaciones han demostrado que los extractos obtenidos de sus hojas y aceites esenciales poseen efectos antimicrobianos frente a bacterias Gram positivas y Gram negativas,

incluyendo cepas resistentes a antibióticos. Estas propiedades han impulsado el estudio del eucalipto como una posible alternativa natural para el desarrollo de nuevos agentes antimicrobianos (Khanem *et al.*, 2025; Nortjie *et al.*, 2024).

2.5 Composición fitoquímica del eucalipto

La actividad biológica del eucalipto está estrechamente relacionada con la diversidad de compuestos fitoquímicos presentes en sus hojas, corteza y aceites esenciales. Entre los principales metabolitos secundarios identificados se encuentran compuestos fenólicos, flavonoides, taninos, terpenos y ácidos fenólicos, sustancias que participan en los mecanismos naturales de defensa de la planta y que son responsables de gran parte de sus propiedades farmacológicas y antimicrobianas. La composición química de estos compuestos puede variar según la especie, las condiciones ambientales, la edad de la planta y el método de extracción empleado (Shala y Gururani, 2021).

Entre los constituyentes más abundantes destacan los monoterpenos presentes en los aceites esenciales, especialmente el 1,8-cineol o eucaliptol, reconocido como una de las principales sustancias fitoquímicas del género *Eucalyptus*. Asimismo, se han identificado otros metabolitos como α -pineno, β -pineno, limoneno, p-cimeno, terpinen-4-ol, citronelal, citral y eudesmol, los cuales contribuyen a las propiedades antimicrobianas, antioxidantes y antiinflamatorias atribuidas al eucalipto (Elaissi *et al.*, 2021).

De igual manera, las hojas de eucalipto contienen una importante cantidad de metabolitos fenólicos no volátiles. Entre ellos destacan ácidos fenólicos, catequinas,

flavonoides y taninos condensados, compuestos capaces de neutralizar radicales libres y ejercer efectos inhibitorios frente a distintos microorganismos patógenos. Debido a estas propiedades, el eucalipto es considerado una fuente importante de sustancias bioactivas con potencial aplicación en medicina e industria farmacéutica (Pérez-Martínez *et al.*, 2025).

Estudios cromatográficos realizados en extractos de *Eucalyptus globulus* han permitido identificar una amplia variedad de compuestos fenólicos y flavonoides relacionados con su capacidad antioxidante y antimicrobiana. Paralelamente, se ha observado que la concentración de estos metabolitos depende significativamente del solvente utilizado durante el proceso de extracción, obteniéndose generalmente mayores rendimientos de compuestos fenólicos mediante mezclas hidroalcohólicas (Moges *et al.*, 2024).

La complejidad química del eucalipto sugiere que sus propiedades biológicas no dependen exclusivamente de un solo compuesto, sino de la interacción de múltiples compuestos vegetales que pueden actuar de forma complementaria o sinérgica. Esta diversidad fitoquímica ha favorecido el interés por el estudio del eucalipto como fuente natural de compuestos con potencial terapéutico frente a microorganismos resistentes y otras problemáticas de importancia médica (Teke *et al.*, 2024).

2.5.1 Fenoles

Los compuestos fenólicos presentes en las hojas de *Eucalyptus* constituyen uno de los grupos fitoquímicos de mayor relevancia debido a su capacidad antioxidante y protectora frente al daño celular. Entre los principales metabolitos identificados se

encuentran los ácidos gálicos, elágico, cafeico y ferúlico, así como diversos derivados fenólicos capaces de neutralizar especies reactivas de oxígeno y reducir el estrés oxidativo. Esta actividad resulta importante porque el daño oxidativo participa en múltiples procesos inflamatorios y alteraciones fisiológicas tanto en humanos como en animales (Álvarez *et al.*, 2021).

Dentro de este grupo de compuestos, los taninos desempeñan un papel importante en la actividad biológica del eucalipto. Estos metabolitos poseen la capacidad de interactuar con proteínas y enzimas microbianas, afectando funciones esenciales para el crecimiento y supervivencia bacteriana. También, participan en los mecanismos naturales de defensa de la planta frente al ataque de microorganismos y diversos factores ambientales adversos (Teke *et al.*, 2024).

En los últimos años, los estudios sobre compuestos fenólicos derivados del eucalipto han incrementado debido a su potencial farmacológico. Se sugiere que estos metabolitos podrían contribuir al desarrollo de productos con aplicaciones antimicrobianas, antioxidantes y antiinflamatorias, especialmente ante el aumento de microorganismos resistentes a los antimicrobianos convencionales (Liu *et al.*, 2025).

2.5.2 Flavonoides

Los flavonoides representan uno de los grupos de metabolitos secundarios más abundantes e importantes en las especies del género *Eucalyptus*. Estos compuestos participan en mecanismos de protección vegetal relacionados con la respuesta al estrés ambiental, la exposición a radiación ultravioleta y la defensa

frente a microorganismos patógenos. De igual manera, poseen diversas actividades biológicas de interés farmacológico, entre las que destacan sus efectos antioxidantes, antimicrobianos y antiinflamatorios (Panche *et al.*, 2022).

Las hojas de *Eucalyptus globulus* contienen flavonoides como quercetina, catequina, rutina y kaempferol, compuestos que contribuyen a disminuir el daño oxidativo mediante la neutralización de radicales libres. La presencia de estos metabolitos ha sido asociada con varias de las propiedades terapéuticas atribuidas al eucalipto, favoreciendo su potencial uso en el desarrollo de productos farmacéuticos y nutraceuticos (Ferreira *et al.*, 2023).

Se ha demostrado que los flavonoides pueden ejercer efecto inhibitorio frente a bacterias Gram positivas y Gram negativas. Sus mecanismos de acción incluyen alteraciones en la membrana celular bacteriana, inhibición de enzimas y afectación de procesos relacionados con la síntesis de proteínas y ácidos nucleicos (Xie *et al.*, 2022).

2.5.3 Otros metabolitos secundarios

Además de los compuestos fenólicos y flavonoides, las especies del género *Eucalyptus* contienen diversos metabolitos secundarios que participan en sus mecanismos de defensa y contribuyen a sus propiedades biológicas. Entre estos compuestos destacan los terpenos, sesquiterpenos, taninos y componentes volátiles presentes principalmente en los aceites esenciales de las hojas. Estas sustancias desempeñan funciones importantes en la protección de la planta frente a microorganismos, insectos y factores ambientales adversos (Khan *et al.*, 2023).

Los terpenos constituyen uno de los grupos químicos más abundantes en los aceites esenciales de *Eucalyptus*. Entre los compuestos más representativos se encuentran el 1,8-cineol o eucaliptol, α -pineno, β -pineno, limoneno y terpinen-4-ol, metabolitos asociados con actividad antimicrobiana, antioxidante y antiinflamatoria. Investigaciones han demostrado que estos compuestos pueden alterar la permeabilidad de la membrana celular de bacterias y hongos, interfiriendo en procesos metabólicos esenciales y limitando el crecimiento microbiano (Batish *et al.*, 2023; Khanem *et al.*, 2025).

Asimismo, la composición química de los aceites esenciales puede variar considerablemente entre especies de *Eucalyptus* debido a factores como la región geográfica, las condiciones climáticas, la edad de la planta y el método de extracción empleado. Investigaciones recientes han señalado que especies con mayores concentraciones de 1,8-cineol suelen presentar una actividad antibacteriana más elevada frente a diferentes microorganismos patógenos (Elaissi *et al.*, 2021).

Los taninos también representan un grupo importante de metabolitos secundarios presentes en el eucalipto. Estos compuestos poseen la capacidad de formar complejos con proteínas y enzimas microbianas, afectando funciones esenciales para la supervivencia bacteriana. Además, participan en los mecanismos naturales de defensa vegetal y se les atribuyen propiedades antioxidantes y antimicrobianas (Sieniawska y Baj, 2022).

Por otra parte, diversos metabolitos secundarios de origen vegetal han despertado interés debido a su potencial aplicación frente a la resistencia antimicrobiana. Se ha observado que muchos de estos compuestos actúan mediante diferentes

mecanismos, como la alteración de membranas celulares, la inhibición de enzimas bacterianas y la interferencia en procesos de replicación microbiana (Górniak *et al.*, 2023).

La interacción entre los distintos metabolitos secundarios presentes en *Eucalyptus* puede favorecer efectos complementarios o sinérgicos que incrementan la actividad biológica de los extractos vegetales. Debido a esta complejidad química, actualmente existe un amplio interés en el estudio de extractos naturales de eucalipto (Khan *et al.*, 2023).

2.6 Actividad biológica del eucalipto

Las especies del género *Eucalyptus* han generado interés científico debido a la amplia variedad de actividades biológicas atribuidas a sus extractos y aceites esenciales. Dichas propiedades se relacionan principalmente con la presencia de metabolitos secundarios como terpenos, compuestos fenólicos, flavonoides y aceites esenciales, capaces de ejercer efectos antioxidantes, antimicrobianos y antiinflamatorios. La interacción entre estos compuestos puede potenciar sus efectos biológicos (Shala y Gururani, 2021).

Entre las propiedades más estudiadas destaca la capacidad antioxidante del eucalipto. Investigaciones realizadas con extractos y aceites esenciales de *Eucalyptus globulus* han demostrado una importante capacidad para neutralizar radicales libres y disminuir el daño oxidativo celular. Lo cual se asocia principalmente con la presencia de compuestos fenólicos y flavonoides, los cuales

participan en mecanismos de protección frente al estrés oxidativo relacionado con procesos inflamatorios y alteraciones celulares (Nasir Shah *et al.*, 2023).

Los extractos de eucalipto presentan efecto antimicrobiano frente a bacterias Gram positivas y Gram negativas. Esta actividad se relaciona principalmente con compuestos terpénicos presentes en los aceites esenciales, los cuales pueden alterar la membrana celular bacteriana e interferir en procesos metabólicos esenciales. Debido a estos mecanismos, el eucalipto ha sido considerado una alternativa natural de interés frente al incremento de bacterias resistentes a los antimicrobianos convencionales (Čmíková *et al.*, 2023).

Cabe destacar que también han evaluado la actividad antibacteriana del aceite esencial de *Eucalyptus globulus* frente a bacterias multirresistentes de importancia médica. Algunos estudios reportan efectos inhibitorios sobre cepas de *Staphylococcus aureus* resistente a meticilina (MRSA), lo que sugiere que ciertos componentes del aceite esencial podrían utilizarse como complemento en estrategias terapéuticas orientadas al control de infecciones bacterianas resistentes (Elangovan y Mudgil, 2023).

Por otra parte, los extractos foliares del eucalipto contienen polifenoles y otros compuestos bioactivos con propiedades antioxidantes y antibacterianas de interés farmacológico. Se ha observado que los extractos obtenidos mediante solventes hidroalcohólicos presentan una elevada capacidad antioxidante y una importante actividad inhibitoria frente a distintos microorganismos patógenos (Hamada *et al.*, 2024).

Además, se han documentado análisis cromatográficos y estudios de modelado molecular que han permitido identificar diferentes fracciones bioactivas en el aceite esencial de *Eucalyptus globulus*. La combinación de compuestos terpénicos y fenólicos puede generar efectos complementarios o sinérgicos que favorecen el incremento de la actividad antioxidante y antimicrobiana de los extractos. Estos hallazgos refuerzan el potencial terapéutico del eucalipto y respaldan su estudio como fuente de compuestos naturales aplicables en medicina (Ait Benlabchir *et al.*, 2024).

2.6.1 Actividad antioxidante

La actividad antioxidante del eucalipto ha sido ampliamente estudiada debido a la capacidad de sus extractos y aceites esenciales para neutralizar radicales libres y disminuir el daño oxidativo celular. Estas propiedades se relacionan principalmente con la presencia de compuestos fenólicos, flavonoides y terpenos bioactivos que participan en mecanismos de protección frente al estrés oxidativo. Los estudios recientes reportan que los metabolitos presentes en *Eucalyptus globulus* pueden actuar como captadores de especies reactivas de oxígeno, contribuyendo a reducir procesos de oxidación asociados con daño celular e inflamación (Nasir Shah *et al.*, 2023).

Las hojas de *Eucalyptus globulus* contienen una amplia variedad de compuestos fenólicos y flavonoides con elevada capacidad antioxidante. La evidencia científica señala que esta actividad puede variar dependiendo del método de extracción utilizado, observándose generalmente mayores concentraciones de compuestos bioactivos en extractos hidroalcohólicos en comparación con extractos acuosos.

Esta diferencia se atribuye a la mayor capacidad de ciertos solventes para extraer metabolitos fenólicos responsables de la actividad antioxidante de la planta (Kim *et al.*, 2023).

Se ha observado que compuestos como 1,8-cineol, α -pineno y otros monoterpenos presentes en *Eucalyptus globulus* participan en la neutralización de radicales libres y favorecen la estabilidad oxidativa de los extractos vegetales. Incluso, la interacción entre diversos metabolitos secundarios puede generar efectos complementarios o sinérgicos que potencian la actividad biológica del aceite esencial (Čmíková *et al.*, 2023).

Diferentes autores también han reportado que los extractos foliares ricos en polifenoles poseen elevada capacidad antioxidante y antiglicación. Estas propiedades resultan de interés debido a que el estrés oxidativo y la glicación celular están relacionados con procesos inflamatorios y alteraciones metabólicas. (Hamada *et al.*, 2024).

Por otra parte, se ha documentado que la fracción lipofílica de las hojas de *Eucalyptus globulus* contiene compuestos triterpénicos y otros metabolitos bioactivos con importante potencial antioxidante. Incluso después de la extracción del aceite esencial mediante hidrodestilación, las hojas conservan compuestos capaces de ejercer actividad biológica, lo que sugiere un posible aprovechamiento integral de este material vegetal en aplicaciones farmacológicas y biotecnológicas (Santos *et al.*, 2023).

Igualmente, estudios realizados con extractos obtenidos a partir de hojas y corteza de *Eucalyptus globulus* han mostrado una importante capacidad para neutralizar especies reactivas de oxígeno. Estos hallazgos respaldan el potencial antioxidante del eucalipto y sugieren que diferentes partes de la planta pueden representar una fuente relevante de compuestos bioactivos (Saeed *et al.*, 2023).

2.6.2 Actividad antimicrobiana

Las propiedades del eucalipto tienen efecto antimicrobiano lo cual se debe a la capacidad de sus extractos y aceites esenciales para inhibir el crecimiento de diversos microorganismos patógenos. Estas propiedades se relacionan principalmente con la presencia de terpenos, compuestos fenólicos y otros metabolitos secundarios capaces de afectar procesos esenciales para la supervivencia bacteriana. Se ha reportado que los aceites esenciales ricos en 1,8-cineol presentan actividad frente a bacterias Gram positivas y Gram negativas de importancia médica y veterinaria, lo que ha incrementado el interés por el uso del eucalipto como fuente natural de compuestos antimicrobianos (Bouyahya *et al.*, 2023).

Los extractos obtenidos de distintas especies de *Eucalyptus* han mostrado efectos inhibitorios frente a bacterias patógenas como *Escherichia coli* y *Staphylococcus aureus*. La actividad antibacteriana de estos extractos se atribuye principalmente a la acción conjunta de diferentes metabolitos secundarios que pueden alterar la integridad de la membrana celular bacteriana y afectar procesos metabólicos indispensables para el crecimiento microbiano (Mulu *et al.*, 2022).

Los metabolitos secundarios presentes en distintas especies vegetales pueden actuar mediante varios mecanismos antimicrobianos al mismo tiempo. Algunos compuestos tienen la capacidad de alterar la permeabilidad de la membrana bacteriana, mientras que otros interfieren en la síntesis de proteínas o en procesos relacionados con la replicación célula (Górniak *et al.*, 2023).

Los terpenos y aceites esenciales desempeñan un papel importante en la actividad antimicrobiana de la planta. Compuestos como α -pineno, limoneno y terpinen-4-ol poseen capacidad para modificar la permeabilidad celular y afectar funciones fisiológicas esenciales en bacterias patógenas. Incluso, la interacción entre diferentes terpenos puede generar efectos complementarios o sinérgicos que incrementan la eficacia antimicrobiana de los extractos vegetales (da Silva *et al.*, 2023).

2.7 Métodos de extracción de compuestos bioactivos

La obtención de compuestos bioactivos a partir de especies del género *Eucalyptus* depende en gran medida del método de extracción empleado, ya que este influye directamente en la cantidad y calidad de los metabolitos recuperados. Entre los compuestos más estudiados destacan fenoles, flavonoides, terpenos y aceites esenciales. Cabe destacar que se ha demostrado que factores como el tipo de solvente, la temperatura, el tiempo de extracción y la técnica utilizada pueden modificar significativamente el rendimiento y la actividad biológica de los extractos obtenidos (Álvarez *et al.*, 2021).

Uno de los métodos convencionales más utilizados para la obtención de metabolitos vegetales es la extracción con solventes mediante sistemas Soxhlet. Este procedimiento permite recuperar compuestos fenólicos y antioxidantes presentes en hojas de *Eucalyptus* utilizando solventes de distinta polaridad, como etanol, metanol y mezclas hidroalcohólicas. Se ha observado que los solventes polares favorecen la extracción de compuestos fenólicos y flavonoides, incrementando la capacidad antioxidante de los extractos vegetales (Sousa *et al.*, 2018).

En los últimos años se han desarrollado métodos de extracción considerados más eficientes y sustentables, conocidos como técnicas de extracción verde. Entre ellas destacan la extracción asistida por ultrasonido y la extracción asistida por microondas, tecnologías que permiten reducir el consumo de solventes y disminuir el tiempo de procesamiento. Además, estas técnicas han demostrado mejorar la recuperación de compuestos antioxidantes presentes en hojas de eucalipto, favoreciendo la obtención de extractos con elevada actividad biológica (Gullón *et al.*, 2019).

La extracción asistida por ultrasonido ha mostrado resultados prometedores en la recuperación de moléculas bioactivas a partir de *Eucalyptus globulus*. Esta técnica utiliza ondas ultrasónicas capaces de favorecer la ruptura de estructuras celulares vegetales y facilitar la liberación de metabolitos secundarios. Se ha señalado que variables como la temperatura, el tiempo de extracción y la concentración de etanol influyen significativamente en el contenido fenólico y la actividad antioxidante de los extractos obtenidos (Palma *et al.*, 2021).

La extracción acelerada con solventes representa una alternativa eficiente para recuperar polifenoles y otros compuestos bioactivos presentes en especies de *Eucalyptus*. Este método utiliza temperaturas elevadas y presión controlada para mejorar el rendimiento de extracción y reducir el tiempo del proceso. La optimización de variables como la temperatura y la concentración de etanol puede influir directamente en el contenido fenólico y en la actividad biológica de los extractos obtenidos (Bouzabata *et al.*, 2023).

Por otra parte, la extracción con fluidos supercríticos y solventes eutécticos profundos representa una forma innovadora y más amigable con el medio ambiente. Estas técnicas permiten recuperar metabolitos de interés biológico utilizando menores cantidades de solventes orgánicos convencionales. En particular, los solventes eutécticos hidrofóbicos han mostrado eficacia en la extracción de ácidos triterpénicos y otros compuestos lipofílicos presentes en hojas de *Eucalyptus globulus*, destacando su potencial para aplicaciones farmacológicas y biotecnológicas (Silva *et al.*, 2020).

Asimismo, las tecnologías emergentes de extracción han favorecido el aprovechamiento integral de residuos forestales y biomasa vegetal de especies de *Eucalyptus*. La evidencia científica señala que la combinación de métodos convencionales y tecnologías innovadoras permite maximizar la recuperación de compuestos con actividad antioxidante y antimicrobiana. Estas estrategias contribuyen al desarrollo de procesos más sustentables (Domingues *et al.*, 2020).

De igual manera se ha demostrado que la combinación de extracción térmica y ultrasonido puede incrementar la recuperación de compuestos fenólicos y mejorar

las propiedades antioxidantes y antimicrobianas de los extractos de *Eucalyptus globulus*. La optimización de estas técnicas ha permitido obtener extractos con elevada actividad biológica utilizando menores tiempos de procesamiento, lo que representa una alternativa prometedora para la obtención de metabolitos (Pereira *et al.*, 2025).

2.7.1 Influencia del solvente

El tipo de solvente utilizado durante la extracción de compuestos bioactivos desempeña un papel fundamental en la composición química y en la actividad biológica de los extractos obtenidos a partir de especies del género *Eucalyptus*. La polaridad del solvente influye directamente en la capacidad para solubilizar metabolitos secundarios como compuestos fenólicos, flavonoides, terpenos y otros antioxidantes naturales. La selección adecuada del solvente puede modificar significativamente el rendimiento de extracción y las propiedades antioxidantes y antimicrobianas de los extractos vegetales (Kim *et al.*, 2023).

Los extractos obtenidos mediante mezclas hidroalcohólicas suelen presentar mayores concentraciones de compuestos fenólicos y flavonoides en comparación con los extractos exclusivamente acuosos. Esto se debe a que el etanol posee una polaridad intermedia que facilita la extracción de metabolitos bioactivos con diferentes características químicas. Estudios realizados con hojas de *Eucalyptus globulus* han demostrado que las mezclas de agua y etanol favorecen una mayor recuperación de antioxidantes y mejoran la actividad biológica de los extractos obtenidos (Kim *et al.*, 2023).

Se ha reportado que han empleado solventes de distinta polaridad, como metanol, etanol y diclorometano, reportan diferencias importantes en la composición química de los extractos de *Eucalyptus*. Los solventes polares favorecen principalmente la extracción de compuestos fenólicos, mientras que los menos polares permiten recuperar metabolitos lipofílicos y terpenos presentes en los aceites esenciales. Estas variaciones influyen directamente en las propiedades biológicas y en el potencial farmacológico de los extractos vegetales (Sousa *et al.*, 2018).

En la actualidad, el desarrollo de técnicas de extracción sustentables ha impulsado el uso de solventes considerados más amigables con el medio ambiente. Las denominadas técnicas de extracción verde emplean mezclas hidroalcohólicas y solventes ecológicos capaces de disminuir el uso de compuestos orgánicos tóxicos sin afectar significativamente el rendimiento de extracción. Además, estos métodos han demostrado ser eficientes para recuperar compuestos antioxidantes con elevada actividad biológica a partir de hojas de eucalipto (Gullón *et al.*, 2019).

La concentración del solvente también representa un factor determinante durante el proceso de extracción. Las variaciones en la concentración de etanol y en la temperatura pueden modificar significativamente la cantidad de polifenoles recuperados y la capacidad antioxidante de los extractos. La optimización de estas variables permite obtener extractos con mayor contenido de metabolitos activos y mejores propiedades biológicas (Bouzabata *et al.*, 2023).

Por otra parte, el uso de solventes eutécticos profundos ha surgido como una alternativa innovadora para la extracción de compuestos lipofílicos. Estos solventes presentan menor toxicidad y mayor sostenibilidad en comparación con los solventes

orgánicos convencionales. Además, han demostrado una elevada capacidad para recuperar ácidos triterpénicos y otros metabolitos bioactivos (Silva *et al.*, 2020).

Autores señalan que la combinación de técnicas de extracción térmica y ultrasonido, junto con diferentes concentraciones de etanol, puede incrementar significativamente la recuperación de compuestos fenólicos y mejorar las propiedades antioxidantes y antimicrobianas de los extractos. Estos hallazgos evidencian la importancia de seleccionar adecuadamente tanto el solvente como las condiciones de extracción para maximizar el potencial biológico de los extractos vegetales (Pereira *et al.*, 2025).

2.8 Métodos microbiológicos para evaluar actividad antibacteriana

La evaluación de la actividad antibacteriana de compuestos naturales y extractos vegetales requiere el uso de métodos microbiológicos estandarizados que permitan determinar su capacidad inhibitoria frente a distintos microorganismos patógenos. Estas metodologías son fundamentales para identificar la sensibilidad bacteriana frente a diferentes tratamientos. Entre las técnicas más utilizadas destacan la difusión en disco, difusión en pozo, dilución en caldo y la determinación de la concentración mínima inhibitoria (CLSI, 2021).

Uno de los procedimientos más empleados es la técnica de difusión en disco, también conocida como método Kirby-Bauer. Este método consiste en colocar discos impregnados con el compuesto de interés sobre la superficie de un medio de agar previamente inoculado con la bacteria en estudio. Después del periodo de incubación, se mide el diámetro del halo de inhibición formado alrededor del disco,

el cual refleja el grado de sensibilidad bacteriana frente al agente evaluado. Debido a su sencillez, bajo costo y buena reproducibilidad, esta técnica es ampliamente utilizada en pruebas de susceptibilidad antimicrobiana e investigaciones microbiológicas (Hudzicki, 2009).

Otra metodología frecuentemente utilizada es la difusión en pozo, especialmente en estudios relacionados con extractos vegetales y aceites esenciales. En este procedimiento se realizan perforaciones en el agar inoculado con la bacteria y posteriormente se depositan distintas concentraciones del extracto o compuesto bioactivo. Tras la incubación, la actividad antibacteriana se evalúa mediante la medición de los halos de inhibición generados alrededor de cada pozo. Este método resulta particularmente útil para analizar sustancias líquidas y extractos con diferentes características químicas y viscosidades (Balouri *et al.*, 2016).

Por otra parte, los métodos de dilución en caldo permiten realizar una evaluación cuantitativa de la actividad antimicrobiana. Estas técnicas consisten en preparar diluciones seriadas del compuesto en medios líquidos inoculados con el microorganismo de interés. Posteriormente, se observa el crecimiento bacteriano para determinar la concentración mínima inhibitoria (CMI), definida como la menor concentración capaz de inhibir visiblemente el crecimiento del microorganismo. Este procedimiento proporciona información más precisa sobre la potencia antimicrobiana de los extractos evaluados (Wiegand *et al.*, 2008).

La determinación de la concentración mínima bactericida (CMB) complementa la evaluación microbiológica de la actividad antibacteriana. Mientras que la CMI permite conocer la capacidad inhibitoria del compuesto, la CMB identifica la menor

concentración capaz de eliminar completamente el microorganismo. Para ello, las muestras obtenidas tras la prueba de dilución son sembradas nuevamente en medios libres del agente antimicrobiano y posteriormente se verifica la presencia o ausencia de crecimiento bacteriano. Esta metodología es importante para diferenciar si el efecto del compuesto es bacteriostático o bactericida (Balouiri *et al.*, 2016).

La adecuada estandarización de las condiciones microbiológicas es esencial para garantizar resultados confiables y reproducibles. Factores como la concentración bacteriana, el tipo de medio de cultivo, la temperatura y el tiempo de incubación pueden influir significativamente en la actividad observada. Por esta razón, organismos internacionales como el Clinical and Laboratory Standards Institute (CLSI) han desarrollado protocolos estandarizados ampliamente utilizados en estudios de susceptibilidad antimicrobiana (CLSI, 2021).

En los últimos años se han incorporado metodologías complementarias para estudiar con mayor profundidad los mecanismos de acción antimicrobiana y la formación de biopelículas bacterianas. Estas técnicas permiten evaluar efectos sobre la integridad celular, la permeabilidad de membrana y la capacidad de adhesión bacteriana (Silva *et al.*, 2023).

2.8.1 Difusión en agar

La difusión en agar constituye una de las técnicas microbiológicas más utilizadas para evaluar la actividad antibacteriana de compuestos químicos, extractos vegetales y aceites esenciales. Este método permite determinar de manera

cualitativa la sensibilidad de distintos microorganismos frente a sustancias con posible efecto antimicrobiano mediante la observación de halos de inhibición alrededor del agente evaluado. Debido a su sencillez, bajo costo y facilidad de aplicación, las técnicas de difusión en agar son ampliamente empleadas en investigaciones microbiológicas, farmacológicas y relacionadas con productos naturales (Balouiri *et al.*, 2016).

Uno de los procedimientos más reconocidos dentro de este grupo es el método de difusión en disco, también conocido como técnica Kirby-Bauer. Esta metodología consiste en colocar discos de papel impregnados con el agente antimicrobiano sobre la superficie de un medio de agar previamente inoculado con el microorganismo de interés. Después del periodo de incubación, se mide el diámetro de los halos de inhibición formados alrededor de cada disco, los cuales reflejan el grado de sensibilidad bacteriana frente al compuesto evaluado. El tamaño del halo permite comparar la eficacia de diferentes sustancias antimicrobianas y establecer una evaluación preliminar de su actividad biológica (Hudzicki, 2009).

La difusión en agar también ha sido ampliamente utilizada en estudios relacionados con productos naturales y extractos vegetales. Autores mencionan que esta técnica representa una herramienta útil para evaluar de manera preliminar la actividad antibacteriana de metabolitos secundarios presentes en plantas medicinales. La aparición de halos de inhibición alrededor de los extractos permite identificar compuestos con potencial antimicrobiano y seleccionar aquellos con mayor actividad biológica para estudios posteriores más específicos (Valgas *et al.*, 2007).

Además de la difusión en disco, existen variantes como la difusión en pozo y el método agar plug, empleados principalmente para evaluar sustancias líquidas, extractos viscosos y metabolitos producidos por microorganismos. Estas técnicas se basan igualmente en la capacidad del compuesto para difundirse a través del medio de cultivo sólido y limitar el crecimiento bacteriano alrededor de la zona de aplicación. Gracias a su practicidad y rapidez, los métodos de difusión continúan siendo ampliamente utilizados en estudios microbiológicos (Tanim *et al.*, 2024).

La adecuada estandarización de las condiciones experimentales es fundamental para obtener resultados confiables y reproducibles en las pruebas de difusión en agar. Factores como el grosor del medio de cultivo, la concentración bacteriana, el tiempo de incubación y el tipo de agar utilizado pueden influir significativamente en el tamaño de los halos de inhibición. Por esta razón, diferentes protocolos microbiológicos y organismos internacionales recomiendan el uso de agar Mueller-Hinton bajo condiciones específicas que permitan garantizar la reproducibilidad de los resultados obtenidos (Cona, 2002).

Asimismo, se han comparado los métodos Kirby-Bauer y la difusión en pozo han reportado diferencias en el tamaño de los halos de inhibición dependiendo de la naturaleza del compuesto evaluado. La difusión en pozo suele favorecer la evaluación de extractos líquidos y aceites esenciales, ya que permite utilizar mayores volúmenes de muestra. No obstante, ambas metodologías son consideradas herramientas útiles para las evaluaciones (Zada, 2021).

2.8.2 Determinación de halo de inhibición

La determinación del halo de inhibición constituye uno de los procedimientos más importantes en las pruebas microbiológicas de difusión en agar, ya que permite evaluar la sensibilidad de distintos microorganismos frente a agentes antimicrobianos. El halo corresponde a la zona clara observada alrededor del disco, pozo o sustancia evaluada donde no existe crecimiento bacteriano visible. El diámetro de esta área refleja la capacidad del compuesto para difundirse a través del medio de cultivo e inhibir el desarrollo del microorganismo analizado (Jorgensen y Ferraro, 2021).

La medición de estas zonas de inhibición se realiza generalmente en milímetros mediante reglas calibradas o instrumentos digitales de precisión. Para obtener resultados confiables, las lecturas deben efectuarse una vez concluido el periodo de incubación y considerando el diámetro total del área libre de crecimiento bacteriano. Diversos protocolos microbiológicos recomiendan realizar las observaciones sobre la parte posterior de la caja Petri y bajo condiciones adecuadas de iluminación, con el fin de facilitar una medición más precisa y reproducible (Hudzicki, 2009).

La interpretación de los resultados permite establecer el grado de sensibilidad bacteriana frente al compuesto evaluado. En términos generales, diámetros mayores indican una mayor susceptibilidad del microorganismo, mientras que halos pequeños o ausentes sugieren resistencia o baja sensibilidad. Sin embargo, la interpretación debe realizarse considerando aspectos como la naturaleza del

compuesto, su capacidad de difusión y las condiciones experimentales empleadas durante el ensayo microbiológico (Balouiri *et al.*, 2016).

Existen diversos factores que pueden influir significativamente en el tamaño de las zonas de inhibición obtenidas durante las pruebas de difusión en agar. Entre los más importantes se encuentran el grosor del medio de cultivo, la densidad del inóculo bacteriano, el tiempo de incubación, la temperatura y la composición del agar utilizado. Variaciones en cualquiera de estas condiciones pueden modificar la difusión del agente antimicrobiano y afectar la reproducibilidad de los resultados microbiológicos (Cona, 2002).

La medición de los halos de inhibición representa una herramienta útil para comparar la actividad antibacteriana de diferentes extractos o concentraciones. Este método permite identificar sustancias con potencial antimicrobiano y realizar comparaciones preliminares sobre su eficacia frente a bacterias patógenas (Valgas *et al.*, 2007).

En los últimos años, el desarrollo de métodos digitales y automatizados ha permitido mejorar la precisión en la medición de las zonas de inhibición. Algunas tecnologías actuales utilizan análisis computarizados e imágenes digitales para disminuir errores de interpretación y aumentar la reproducibilidad de los resultados. Estas herramientas complementan los métodos convencionales y favorecen una mayor estandarización de las pruebas microbiológicas empleadas en investigaciones sobre actividad antimicrobiana (Tanim *et al.*, 2024).

2.9 Uso potencial de extractos vegetales como alternativa a antibióticos

El aumento de la resistencia antimicrobiana ha impulsado la búsqueda de nuevas estrategias terapéuticas que permitan disminuir el uso excesivo de antibióticos convencionales. En este contexto, los extractos vegetales y sus compuestos bioactivos han despertado un importante interés científico debido a sus propiedades. Muchos metabolitos presentes en plantas medicinales poseen la capacidad de actuar frente a bacterias patógenas mediante diferentes mecanismos de acción, lo que los convierte en una alternativa prometedora para el control de infecciones bacterianas (Nazzaro *et al.*, 2022).

Los extractos vegetales poseen diversos compuestos, los cuales han mostrado actividad frente a distintos microorganismos patógenos. Estos metabolitos pueden afectar la integridad de la membrana celular bacteriana e interferir en procesos esenciales para el crecimiento microbiano. Aunque los resultados obtenidos hasta ahora son prometedores, todavía existen limitaciones relacionadas con la estandarización de dosis y la variabilidad en la composición química de los extractos (Batiha *et al.*, 2022).

Cabe destacar que han reportado que extractos vegetales y aceites esenciales presentan actividad frente a bacterias multirresistentes de importancia en la medicina. Algunos metabolitos naturales han demostrado capacidad inhibitoria contra microorganismos resistentes, además de potenciar la acción de ciertos antibióticos cuando son utilizados de manera conjunta. Estas interacciones podrían contribuir a disminuir las dosis requeridas de antimicrobianos y, en consecuencia,

reducir la presión selectiva relacionada con la aparición de nuevas resistencias bacterianas (Bouyahya *et al.*, 2022).

En medicina veterinaria, los extractos vegetales han sido propuestos como una alternativa natural para el control de enfermedades infecciosas en animales de producción y de compañía. El uso indiscriminado de antibióticos en sistemas pecuarios ha favorecido la diseminación de bacterias resistentes, generando preocupación tanto en salud animal como en salud pública. Debido a ello, diferentes estudios han evaluado el potencial de compuestos vegetales para disminuir la carga bacteriana, mejorar la salud intestinal y complementar tratamientos antimicrobianos en distintas especies animales (Rhouma *et al.*, 2023).

Por otra parte, algunos extractos vegetales han mostrado efectos sinérgicos cuando se combinan con antibióticos convencionales. Esta interacción puede incrementar la eficacia antimicrobiana frente a bacterias resistentes y disminuir la concentración necesaria de determinados fármacos. Los efectos combinados entre metabolitos vegetales y antibióticos representan una estrategia prometedora para enfrentar el problema global de la resistencia bacteriana (Adeyemi *et al.*, 2023).

Además de inhibir el crecimiento bacteriano, ciertos compuestos bioactivos de origen vegetal poseen capacidad para interferir en la formación de biopelículas bacterianas. Las biopelículas constituyen estructuras complejas que protegen a las bacterias frente a antibióticos y mecanismos de defensa del hospedador, dificultando el tratamiento de infecciones persistentes. Algunos extractos vegetales pueden disminuir la adhesión bacteriana y alterar la formación de estas estructuras, ampliando así su potencial terapéutico (Silva *et al.*, 2023).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización del experimento

El experimento se realizó en el laboratorio de química del Departamento de Ciencias Básicas de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ubicada en Torreón, Coahuila de Zaragoza, México, durante el mes de mayo de 2026. Las coordenadas geográficas de las instalaciones corresponden a 103° 25' 57" de longitud oeste y 25° 31' 11" de latitud norte, con una altitud de 1,123 metros sobre el nivel del mar (INEGI, 2025).

3.2 Material vegetal y preparación de la muestra

Se recolectaron hojas de *Eucalyptus* spp., las cuales se lavaron rápidamente con agua destilada y se secaron con toallas. Posteriormente, las hojas se cortaron en tiras finas con el fin de facilitar el secado y la molienda. Se distribuyó un total de 200–300 g de peso fresco en charolas previamente etiquetadas (Y1, Y2, Y3), colocando entre 30 y 50 g de material por charola. De manera paralela, se tomó una submuestra de 10 g de peso fresco para la determinación del contenido de humedad.

El secado se realizó en estufa a 55 °C. Se aplicó un ciclo inicial de 90 minutos con las charolas destapadas; transcurrido este tiempo, el material se aireó con espátula y se regresó a la estufa por periodos adicionales de 30 minutos. Entre cada periodo, las muestras se enfriaron cubiertas con una charola invertida durante 10 minutos antes de registrar su peso (P1, P2, etc.), repitiendo el procedimiento hasta alcanzar peso constante. El mismo proceso se aplicó a la submuestra de humedad hasta

obtener masa constante, lo que permitió calcular el porcentaje de humedad del material. Una vez seco, el material vegetal se conservó cubierto con papel aluminio en cuarto frío hasta su procesamiento.

3.3 Obtención de los extractos

A partir del material seco se prepararon extractos foliares utilizando tres solventes de distinta polaridad: agua destilada (extracto acuoso, AQ), etanol al 96 % (extracto etanólico, ET) y etanol al 70 % (extracto hidroalcohólico, HA70), cada uno por triplicado (R1, R2 y R3).

El material seco se maceró en mortero hasta obtener un polvo fino. Se pesaron 2 g de polvo por muestra, por triplicado y cada uno por duplicado (4 g por repetición), los cuales se depositaron en tubos Falcon de 50 mL. A cada tubo se añadieron 20 mL del solvente correspondiente, conformando seis tubos por solvente, los cuales se cerraron, se cubrieron con aluminio y se agitaron durante 24 horas a 100–150 rpm y 25 °C.

Concluida la agitación, los duplicados de cada repetición se combinaron en un vaso de precipitados, obteniéndose tres extractos por solvente (por ejemplo, AQR1, AQR2 y AQR3) (Figura 1). Cada vaso se cubrió con aluminio perforado y se colocó en baño María a 70 °C durante 2 horas, agitando suavemente con varilla de vidrio cada 10–15 minutos. Posteriormente, los extractos se prefiltraron con gasa para retirar las fibras y se filtraron a través de papel Whatman No. 1; el residuo se enjuagó con 5–10 mL del mismo solvente, que se incorporó al filtrado, y se registró el volumen final obtenido (V_{filtrado}).

El filtrado se transfirió a cápsulas de porcelana previamente taradas y se evaporó en baño María a 50 °C, bajo cubierta de aluminio perforada, hasta alcanzar una consistencia espesa. El secado se mantuvo a 50 °C hasta masa constante (dos pesadas consecutivas con una diferencia menor al 1 %), registrando el peso del extracto seco (m_{ext}). Los extractos secos se conservaron a 4 °C. Para la realización de los ensayos, cada extracto se reconstituyó hasta alcanzar una concentración final de trabajo de 10 mg/mL.



Figura 1 Preparación de tres extractos en vaso precipitado por solvente.

3.4 Cepa bacteriana

La cepa bacteriana de *Escherichia coli* ATCC 25922 empleada en este estudio fue proporcionada por el Laboratorio de Investigación en Bioenergética Solar del Instituto Tecnológico de La Laguna (Coahuila, México). La cepa se cultivó de manera rutinaria en placas de agar Luria–Bertani (LB) en condiciones aerobias a 37 °C, temperatura correspondiente a su crecimiento óptimo. Para su conservación, se prepararon stocks bacterianos en glicerol al 20 % (v/v) y se almacenaron a –80 °C

hasta su utilización. Para los ensayos posteriores se seleccionaron colonias individuales a partir de las placas de agar LB.

3.5 Determinación de fenoles totales

El contenido de fenoles totales se cuantificó mediante el método de Folin–Ciocalteu (Singleton et al., 1999). Se utilizaron 50 μL de extracto (Figura 3) y la cuantificación se realizó a partir de una curva de calibración construida con ácido gálico como estándar de referencia, midiendo la absorbancia en un espectrofotómetro UV-Vis. Los resultados se expresaron como miligramos equivalentes de ácido gálico por gramo de extracto (mg GAE g^{-1}). Cada extracto se evaluó por triplicado.

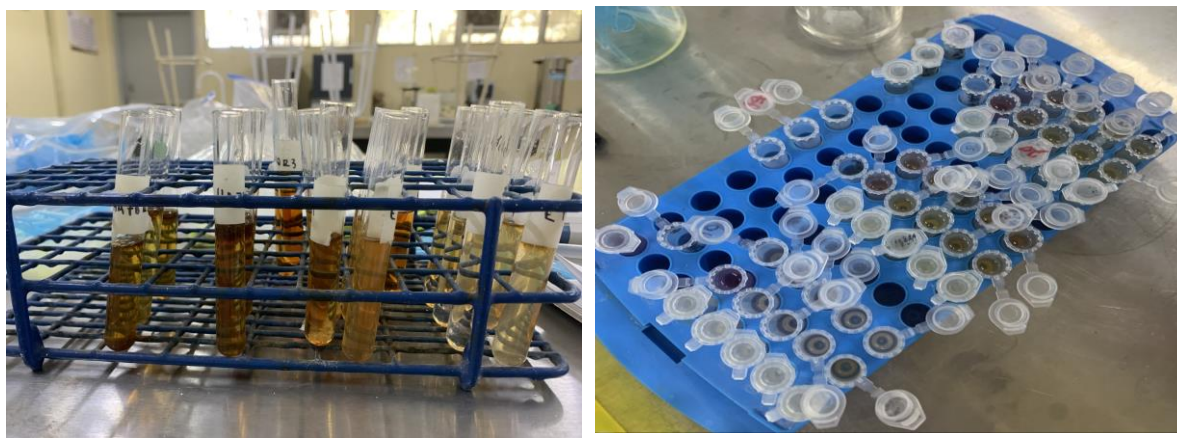


Figura 2 Preparación de diluciones de extractos por triplicado.

3.6 Determinación de flavonoides totales

Los flavonoides totales se cuantificaron en un espectrofotómetro UV-Vis (CGOLDEN-WALL) a 510 nm (Figura 2), conforme a la metodología descrita por Hernández-Hernández et al. (2019). Se empleó quercetina como compuesto de referencia y los resultados se expresaron como miligramos equivalentes de

quercetina por gramo de extracto (mg QE g⁻¹). Las determinaciones se realizaron por triplicado.



Figura 3 Cuantificación de flavonoides totales en espectrofotómetro.

3.7 Evaluación de la actividad antioxidante (DPPH)

La capacidad antioxidante se determinó mediante el método de captación del radical libre DPPH (Brand-Williams et al., 1995). Para cada extracto se evaluó una serie de concentraciones crecientes (25, 50, 100, 150 y 200 µg/mL), empleando 50 µL de extracto por reacción e incluyendo un blanco de muestra para corregir la absorbancia propia de cada extracto.

Los resultados se expresaron como porcentaje de inhibición del radical, calculado mediante la ecuación:

$$\% \text{ de inhibición} = [(A_{\text{control}} - (A_{\text{muestra}} - A_{\text{blanco}})) / A_{\text{control}}] \times 100$$

donde A_{control} corresponde a la absorbancia de la solución de DPPH sin extracto, A_{muestra} a la absorbancia de la mezcla extracto–DPPH y A_{blanco} a la absorbancia del extracto sin radical.

3.8 Evaluación de la actividad antimicrobiana

La actividad antibacteriana de los extractos se evaluó mediante el método de difusión en agar por pozos frente a *Escherichia coli* ATCC 25922 (Figura 4). Como medio de cultivo se empleó agar nutritivo (Merck), preparado y esterilizado conforme a las indicaciones del fabricante (esterilización en autoclave a 121 °C durante 15 minutos), de acuerdo con la metodología reportada por Buendia et al. (2022). A partir de colonias jóvenes se preparó una suspensión bacteriana que se inoculó de manera uniforme sobre la superficie de las placas de agar con ayuda de un hisopo estéril. Posteriormente se realizaron pozos en el medio, en los cuales se depositaron tres volúmenes distintos de cada extracto (20, 35 y 50 μL), incluyendo en cada placa los controles correspondientes de cada solvente. Las placas se incubaron a 35–37 °C durante un periodo de 18 a 24 horas.

Concluida la incubación, se midió el diámetro del halo de inhibición formado alrededor de cada pozo, expresando los resultados en milímetros (mm). Cada tratamiento se evaluó por triplicado.

3.9 Diseño experimental y análisis estadístico

El estudio se desarrolló bajo un diseño completamente al azar, evaluando el efecto del tipo de solvente de extracción y del volumen de extracto aplicado sobre la actividad antibacteriana, así como el efecto del solvente sobre el contenido de

compuestos bioactivos y la capacidad antioxidante. Cada tratamiento contó con tres repeticiones. Los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) para identificar diferencias significativas entre tratamientos. Cuando se detectaron diferencias estadísticas, se aplicó la prueba de comparación de medias de Tukey con un nivel de significancia de $p \leq 0.05$. Los análisis se realizaron mediante software estadístico especializado.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Contenido de fenoles totales

El extracto hidroalcohólico (HA70) presentó el mayor contenido fenólico, seguido del etanólico y del acuoso. Sin embargo, el análisis estadístico no detectó diferencias significativas entre los tres solventes (Tukey, $p > 0.05$), por lo que comparten la misma literal. Esta falta de significancia se atribuye a la elevada variabilidad entre repeticiones y al reducido número de réplicas ($n = 3$). Pese a ello, la tendencia numérica coincide con lo reportado en la literatura, donde las mezclas hidroalcohólicas favorecen la extracción de compuestos fenólicos por su polaridad intermedia (Kim et al., 2023; Sousa et al., 2018; Moges et al., 2024). Debe considerarse, además, que las lecturas del extracto HA70 y una repetición del ET superaron el último punto de la curva de ácido gálico, por lo que esos valores corresponden a una extrapolación; el extracto acuoso se mantuvo dentro del intervalo de calibración y mostró la menor variabilidad.

Cuadro 1 Contenido de fenoles totales en extractos foliares de *Eucalyptus* spp.

Extracto	Fenoles totales (mg GAE g ⁻¹)
HA70 (etanol 70 %)	102.5 ± 16.1 ^a
ET (etanol 96 %)	82.9 ± 24.5 ^a
AQ (acuoso)	70.2 ± 3.5 ^a

Medias ± desviación estándar ($n = 3$). Medias con la misma letra no difieren significativamente (Tukey, $p \leq 0.05$).

4.2 Contenido de flavonoides totales

Al igual que en los fenoles, el contenido de flavonoides fue numéricamente mayor en el extracto hidroalcohólico, pero sin diferencias estadísticamente significativas entre solventes (Tukey, $p > 0.05$). Estos valores deben interpretarse con especial

reserva, ya que la mayoría de las absorbancias excedieron de forma considerable el intervalo de la curva de quercetina (estándar máximo de 0.6 mg/mL), por lo que constituyen extrapolaciones que probablemente sobreestiman el contenido real; se recomienda repetir la lectura con las muestras diluidas para que las absorbancias queden dentro del intervalo lineal. La elevada desviación del extracto etanólico se explica por una repetición cuya reacción no desarrolló color (absorbancia cercana al blanco), lo que aumentó su variabilidad.

Cuadro 2 Contenido de flavonoides totales en extractos foliares de *Eucalyptus* spp.

Extracto	Flavonoides totales (mg QE g ⁻¹)
HA70 (etanol 70 %)	293.5 ± 105.0 ^a
AQ (acuoso)	236.1 ± 35.1 ^a
ET (etanol 96 %)	152.5 ± 121.5 ^a

Medias ± desviación estándar ($n = 3$). Medias con la misma letra no difieren significativamente (Tukey, $p \leq 0.05$).

4.3 Actividad antioxidante (DPPH)

Los extractos HA70 y AQ mostraron una actividad antioxidante elevada y dependiente de la concentración, superando el 70 % de inhibición desde los 25 µg/mL y alcanzando un plató cercano al 90–97 % a partir de los 100 µg/mL, lo que indica una IC₅₀ inferior a la menor concentración evaluada. El extracto etanólico presentó valores notablemente menores; no obstante, la diferencia respecto a HA70 y AQ solo resultó significativa a 50 µg/mL, ya que la marcada variabilidad entre las repeticiones del extracto etanólico impidió detectar diferencias en las demás concentraciones. La mayor capacidad antioxidante de los extractos HA70 y AQ es congruente con su mayor contenido fenólico, dado que los compuestos fenólicos

son los principales responsables de la captación de radicales libres en *Eucalyptus* (Nasir Shah et al., 2023; Hamada et al., 2024).

La actividad antioxidante se expresó únicamente como porcentaje de inhibición. No fue posible calcular los equivalentes Trolox a partir de la curva de calibración disponible, ya que esta se construyó bajo una absorbancia control distinta a la del ensayo realizado, lo que generaría valores no válidos para los extractos de menor actividad; para reportar la capacidad antioxidante como equivalentes Trolox (TEAC) se requeriría una curva de Trolox elaborada bajo las mismas condiciones del ensayo.

Cuadro 3 Porcentaje de inhibición del radical DPPH por concentración.

Extracto	25 µg/mL	50 µg/mL	100 µg/mL	150 µg/mL	200 µg/mL
HA70	77.4 ^a	94.4 ^a	95.8 ^a	97.1 ^a	95.0 ^a
AQ	71.7 ^a	84.0 ^a	90.6 ^a	91.7 ^a	90.0 ^a
ET	33.9 ^a	30.0 ^b	52.8 ^a	61.3 ^a	56.0 ^a

Las literales comparan los solventes dentro de cada concentración (Tukey, $p \leq 0.05$); medias con la misma letra no difieren.

4.4 Actividad antimicrobiana frente a *Escherichia coli*

A diferencia de las variables anteriores, la actividad antimicrobiana sí mostró diferencias estadísticamente significativas. El análisis de varianza fue altamente significativo para el solvente ($F = 5261.3$; $p < 0.001$), el volumen ($F = 710.8$; $p < 0.001$) y su interacción ($F = 646.8$; $p < 0.001$). La prueba de Tukey ubicó al extracto HA70 en el grupo de mayor actividad (literal "a") en los tres volúmenes, sin diferencias entre ellos; el extracto etanólico únicamente fue activo a 50 µL (literal

"b"), mientras que el extracto acuoso y el etanólico a volúmenes bajos no presentaron inhibición (literal "c").

La superioridad del extracto hidroalcohólico concuerda con su mayor contenido de compuestos fenólicos y flavonoides, a los que se atribuye la alteración de la membrana celular y la interferencia en el metabolismo bacteriano (Khanem et al., 2025; De Fazio et al., 2024). La ausencia de actividad del extracto acuoso indica que los compuestos responsables son de naturaleza preferentemente polar-orgánica, mejor recuperados con mezclas hidroalcohólicas que con agua (Mulu et al., 2022). Los halos fueron moderados y apenas superiores al diámetro del pozo, lo cual es esperable dado que *E. coli*, por ser una bacteria Gram negativa, posee una membrana externa que limita la difusión de muchos antimicrobianos vegetales; magnitudes similares se han reportado en extractos vegetales frente a esta bacteria (Buendía et al., 2022; De Fazio et al., 2024). Cabe señalar que en dos placas el control de etanol al 96 % produjo halos (≈ 9 mm), lo que sugiere un posible efecto residual del solvente o un artefacto puntual que debe considerarse al interpretar la actividad del extracto etanólico.

Cuadro 4 Diámetro del halo de inhibición (mm) de los extractos frente a *E. coli*.

Extracto	20 μ L	35 μ L	50 μ L
HA70 (etanol 70 %)	8.35 $\pm$ 0.26 ^a	8.02 $\pm$ 0.18 ^a	8.43 $\pm$ 0.15 ^a
ET (etanol 96 %)	0.00 ^c	0.00 ^c	7.82 $\pm$ 0.39 ^b
AQ (acuoso)	0.00 ^c	0.00 ^c	0.00 ^c

Medias $\pm$ desviación estándar ($n = 3$). Las literales comparan las combinaciones solventes $\times$ volumen (Tukey, $p \leq 0.05$); medias con la misma letra no difieren. Diámetro del pozo ≈ 7 mm.

5. CONCLUSIONES

Los extractos foliares de *Eucalyptus spp.* obtenidos con tres solventes de distinta polaridad presentaron compuestos bioactivos y actividad biológica frente a *Escherichia coli*. El extracto hidroalcohólico (etanol 70 %) reunió los mayores valores de fenoles totales, flavonoides totales y capacidad antioxidante; no obstante, estas diferencias no fueron estadísticamente significativas respecto a los demás solventes, debido a la alta variabilidad entre repeticiones.

En la actividad antimicrobiana sí se observaron diferencias significativas: el extracto hidroalcohólico fue el único que inhibió de manera consistente el crecimiento de *Escherichia coli* en los tres volúmenes evaluados, mientras que el extracto etanólico mostró actividad únicamente a 50 μ L y el extracto acuoso no presentó inhibición en ninguna condición.

Con base en estos resultados, se concluye que el solvente hidroalcohólico (etanol 70 %) es el más eficiente para la obtención de extractos foliares de *Eucalyptus spp.* con actividad antioxidante y antibacteriana, lo que respalda su potencial como fuente de compuestos naturales frente a *Escherichia coli*. Se sugiere ampliar el número de repeticiones en estudios posteriores para confirmar las tendencias observadas en el contenido de compuestos bioactivos.

6. LITERATURA CITADA

- Adeyemi, O. S., Sulaiman, F. A., y Akanji, M. A. 2023. Synergistic antibacterial effects of medicinal plant extracts and conventional antibiotics against resistant bacteria. *Heliyon*, 9(11).
- Ait Benlabchir, A., Fikri-Benbrahim, K., Moutawalli, A., Alanazi, M. M., Halmoune, A., y Benkhoulili, F. Z. 2024. GC–MS Characterization and Bioactivity Study of *Eucalyptus globulus* Labill. Essential Oils and Their Fractions: Antibacterial and Antioxidant Properties and Molecular Docking Modeling. *Pharmaceuticals*, 17(11), 1552.
- Alrasheed, A., Alrasheed, A., Mohamed, W., Mohammed-Saeed, S y Haidar-Ahmed, H. 2023. Antimicrobial and antioxidant activities of plant extracts against *E. coli*. *International Journal of Microbiology*.
- Álvarez, X., Cancela, Á., Merchán, Y., y Sánchez, Á. 2021. Anthocyanins, Phenolic Compounds, and Antioxidants from Extractions of Six *Eucalyptus* Species. *Applied Sciences*, 11(21), 9818.
- Angelini, P. 2024). Plant-derived antimicrobials and their crucial role in combating antimicrobial resistance. *Antibiotics*, 13(8), 746.
- Balouiri, M., Sadiki, M., y Ibnsouda, S. K. 2016. Methods for in vitro evaluating antimicrobial activity: A review. *Journal of Pharmaceutical Analysis*, 6(2), 71–79.
- Batiha, G. E., Alqahtani, A., Ojo, O. A., Shaheen, H. M., Wasef, L., Elzeiny, M., y Magdy Beshbishy, A. 2022. Bioactive Compounds, Pharmacological Actions, and Pharmacokinetics of Medicinal Plants Used as Antibacterial Agents. *Molecules*, 27(12), 3749.
- Batish, D. R., Singh, H. P., Kaur, S., Kohli, R. K., y Yadav, S. S. 2023. Chemical composition and biological activities of volatile compounds from *Eucalyptus* species. *Forests*, 14(5), 947.
- Bessalah, S., Khorshani, T., Hammadi, M., Faraz, A., y Balla, A. 2023. Inhibitory potential of natural plant extracts against *Escherichia coli*. *Open Veterinary Journal*, 13(9), 1082–1090.

Bhardwaj, S., y Kumar, A. 2023. Unlocking the antimicrobial strength of herbal plants. *International Journal of Advances in Microbiology Research*. 4(2):10-17.

Bouyahya, A., Chamkhi, I., Guaouguaou, F. E., Benali, T., Balahbib, A., y El Omari, N. 2023. Essential Oils as Antibacterial Agents against Pathogenic Bacteria. *Microorganisms*, 11(8), 2015.

Bouyahya, A., El Omari, N., El Meniy, N., Guaouguaou, F. E., Balahbib, A., El-Shazly, M., y Bakri, Y. 2022. Moroccan Medicinal Plants as Natural Antibacterial Agents. Bouzabata, A., Meddah, B., Tir-Touil, A., y Akkal, S. 2023. Optimization of accelerated solvent extraction of bioactive compounds from *Eucalyptus intertexta* using response surface methodology and evaluation of its phenolic composition and biological activities. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 35, 100464. *Antibiotics*, 11(9), 1238.

Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., y Berset, C. 1995. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT – Food Science and Technology*, 28(1), 25–30.

Braz VS, Melchior, K., y Moreira, C. G. 2020. *Escherichia coli* como una bacteria patogénica multifacética y versátil. Las células frontales infectan el microbiol.;10:548492. PMID: 33409157; PMCID: PMC7779793.

Buendia, N. J. L., Alcalde, A. L. D., y Condes, R. B. J. 2022. Antibacterial activity of cassava *Manihot esculenta* leaves extract against *Escherichia coli*. *American Journal of Environment and Climate*, 1(2), 23–30.

Clinical and Laboratory Standards Institute (CLSI). 2021. Performance Standards for Antimicrobial Susceptibility Testing (31st ed.). CLSI supplement M100.

Čmíková, N., Galovičová, L., Schwarzová, M., Vukic, M. D., Vukovic, N. L., y Kowalczewski. 2023. Chemical Composition and Biological Activities of *Eucalyptus globulus* Essential Oil. *Plants*, 12(5), 1076.

Cona, E. 2002. Condiciones para un buen estudio de susceptibilidad mediante test de difusión en agar. *Revista Chilena de Infectología*, 19(Supl. 2), 77–81.

Cowan, M. M. 1999. Plant products as antimicrobial agents. *Clinical Microbiology Reviews*, 12(4), 564–582.

- Croxen, M. A., Law, R. J., Scholz, R., Keeney, K. M., Wlodarska, M., y Finlay, B. B. 2013. Recent advances in understanding enteric pathogenic *Escherichia coli*. *Clinical Microbiology Reviews*, 26(4), 822–880.
- Da Cunha, I. B., Da Rosa, G. M., Gamboa, A. C., Volpi, G. B., Bones, U. A., Flach, K. A., Mahnke, M. R., y Neto, A. T. 2025. Antimicrobial susceptibility of *Escherichia coli* to extracts of plant species *Zingiber officinale* and *Hedychium coronarium*.
- da Silva, J. K. R., Andrade, E. H. A., Maia, J. G. S., y Setzer, W. N. 2023. Biological Activities of Terpenes and Essential Oils as Antibacterial Agents. *Molecules*, 28(3), 1047.
- De Fazio, R., Oppedisano, F., Caioni, G., Tilocca, B., Piras, C., y Britti, D. 2024. Plants with Antimicrobial Activity against *Escherichia coli*, a Meta-Analysis for Green Veterinary Pharmacology Applications. *Microorganisms*, 12(9), 1784.
- Domingues, R. M. A., Sousa, G. D. A., Silva, C. M., Freire, C. S. R., y Silvestre, A. J. D. 2020. Value-Added Compound Recovery from Invasive Forest for Biofunctional Applications: *Eucalyptus* Species as a Case Study. *Molecules*, 25(21), 5207.
- Elaissi, A., Moumni, S., Derbali, Y., Khouja, M., Abid, N., y Lynen, F. 2021. Chemical composition of essential oils of eight Tunisian *Eucalyptus* species and their antibacterial activity against strains responsible for otitis. *BMC Complementary Medicine and Therapies*, 21, 209.
- Elangovan, S., y Mudgil, P. 2023. Antibacterial Properties of *Eucalyptus globulus* Essential Oil against MRSA: A Systematic Review. *Antibiotics*, 12(3), 474.
- Espino-Hernández, M. E. 2011. La resistencia a los antimicrobianos: un problema mundial. *Panorama Cuba y Salus*, vol. 6 num 1. Pp. 1-2.
- Ferreira, A., Cardoso, T. y Rocha, S. 2023. Phenolic profile and antioxidant properties of *Eucalyptus globulus* leaves. *Plants*, 12(3), 523.
- Giedraitienė, A., Vitkauskienė, A., Naginienė, R., y Pavilonis, A. 2011. Mecanismos de resistencia a antibióticos de bacterias clínicamente importantes. *Medicina (Kaunas, Lituania)*, 47(3), 137–146.

- Giono-Cerezo, S, Santos-Preciado, J. I., Morfín-Otero, M., Torres-López, F. J., y Alcántar-Curiel, M. D. 2020. Resistencia antimicrobiana. Importancia y esfuerzos por contenerla. *Gaceta médica de México*, 156(2), 172-180.
- Górniak, I., Bartoszewski, R., y Króliczewski, J. 2023. Comprehensive review of antimicrobial activities of plant secondary metabolites. *Frontiers in Pharmacology*, 14.
- Guerra, S. T., De Paula, C. L., Bolaños, C. A. D., Hernandez, R. T., y Ribeiro, M. G. 2019. Virulence factors of *Escherichia coli*: An overview of animal and human infections with emphasis in bovine mastitis. *Semina: Ciências Agrárias*, 40(5), 2087–2114.
- Gullón, B., Muñiz-Mouro, A., Lú-Chau, T. A., Moreira, M. T., Lema, J. M., y Eibes, G. 2019. Green approaches for the extraction of antioxidants from eucalyptus leaves. *Industrial Crops and Products*, 138, 111473.
- Gundogan N., Citak S., Yucel N., y Devren A. 2005. A note on the incidence and antibiotic resistance of *Staphylococcus aureus* isolated from meat and chicken samples. *Meat Sci*; 69(4): 807-10.
- Hamada, M., Nassara, N., Hanania, M., y Al-Rimawi, F. 2024. Study of the Polyphenolic Constituents, In-Vitro Anti-Glycation, Antioxidant and Antibacterial Activities of *Eucalyptus globulus* Leaves Extracts. *Journal of Herbs, Spices & Medicinal Plants*, 30(3), 292–308.
- Hernández-Barrera, J. C., Angarita-Merchán, M., y Prada-Quiroga, C. F. 2017. Impacto del uso de antimicrobianos en medicina veterinaria. *Ciencia y Agricultura*, 14(2), 27-38.
- Hernández-Hernández, H. 2019. Impact of selenium and copper nanoparticles on yield, antioxidant system, and fruit quality of tomato plants. *Plants*, 8(10), 355.
- Hudzicki, J. 2009. Kirby-Bauer Disk Diffusion Susceptibility Test Protocol. American Society for Microbiology.
- Jia, D., Arbab, S., Ullah, H., Alzahrani, K. J., Alzahrani, F. M., Alsharif, K. F., Zhang, J., y Li, K. 2025. Antibacterial Activity of Traditional Medicinal Plants: Combating

Antibiotics Resistance in Animal Wound Infections. *Veterinary medicine and science*, 11(3).

Jorgensen, J. H., y Ferraro, M. J. 2021. Antimicrobial Susceptibility Testing: General Principles and Contemporary Practices. *Clinical Microbiology Reviews*, 34(1).

Kgatla, T. E., Maluleka, M. M., Malatji, D. P., y Mokoena, M. P. 2024. Presence, Pathogenicity, Antibiotic Resistance, and Virulence Factors of *Escherichia coli*: A Review. *Microbiology Research*, 4(1), 16.

Khan, T., Ali, M., Khan, A., Nisar, P., Jan, S. A., Afridi, S., y Shinwari, Z. K. 2023. Secondary metabolites and their multidimensional prospective in plant life. *Molecules*, 28(2), 611.

Khanem, A., Ullah, I. y Younas, F. 2025. Essential oils from *Eucalyptus camaldulensis* against antibiotic-resistant *E. coli*. *Brazilian Journal of Microbiology*. 56, 1155–1167.

Kim, J., Lee, Y., Park, S., y Choi, H. 2023. Characterization of Chemical Composition and Antioxidant Activity of *Eucalyptus globulus* Leaves under Different Extraction Conditions. *Applied Sciences*, 13(17), 9984.

Kumar, S., Pandey, A. K., y Singh, P. 2022. Biological activities of flavonoids and polyphenols: Current perspectives. *Antioxidants*, 11(7), 1355.

Levy Hara G. 2012. Estrategias para el uso racional de antibióticos y antimicrobianos. Taller: La Seguridad del Paciente, la Resistencia Antimicrobiana, y el Uso Racional de Antibióticos, Ejes de la Política Institucional.

Li, Z., Huang, Z., y Gu, P. 2024. Response of *Escherichia coli* to Acid Stress: Mechanisms and Applications—A Narrative Review. *Microorganisms*, 12(9), 1774.

Lima-Pinos, J., Estévez-Angulo, A. y Sánchez-Altamirano, M. 2026. Resistencia antimicrobiana en infecciones comunitarias y nosocomiales: panorama global y situación epidemiológica en Ecuador. *Polo del Conocimiento*, 11(2), 990-1004.

Liu, W., Zhang, Z., Chen, X., Mu, Y., Zheng, D., Huang, X., y Li, L. 2025. Chemical Profiles and Biological Effects of Polyphenols in *Eucalyptus* Genus: A Comprehensive Review on Their Applications in Human Health and the Food Industry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 73(17), 10036–10051.

- Manges, A. R., Geum, H. M., Guo, A., Edens, T. J., Fibke, C. D., y Pitout, D. D. 2022. Genomics and pathotypes of the many faces of *Escherichia coli*. *FEMS Microbiology Reviews*, 46(6).
- Moges, G. W., Manahelohe, G. M., y Asegie, M. A. 2024. Phenolic, Flavonoid Contents, Antioxidant, and Antibacterial Activity of Selected *Eucalyptus* Species: Review. *Biology, Medicine & Natural Product Chemistry*, 13(1), 147–157.
- Mueller M, Rausch-Phung E.A, y Tainter C.R. 2025. Infección por *Escherichia coli*.
- Mulu, A., Tesfaye, S., Alemu, A., y Mekonnen, Y. 2022. Antibacterial activity of medicinal plant extracts against human pathogenic bacteria. *BMC Complementary Medicine and Therapies*, 22, 312.
- Munita, J. M., y Arias, C. A. 2016. Mechanisms of antibiotic resistance. *Microbiology Spectrum*, 4(2).
- Nasir Shah, S., Khan, I., Tul Muntaha, S., Hayat, A., Ur Rehman, M., y Ali Shah, T. 2023. Bioactive, antioxidant and antimicrobial properties of chemically fingerprinted essential oils extracted from *Eucalyptus globulus*: in-vitro and in-silico investigations. *Frontiers in Chemistry*, 11, 1287317.
- Nasrollahian, S., Graham, J. P., y Halaji, M. 2024. A review of the mechanisms that confer antibiotic resistance in pathotypes of *E. coli*. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 14, 1387497.
- Nazzaro, F., Fratianni, F., Coppola, R., y De Feo, V. 2022. Plant extracts and bioactive compounds as alternatives to antibiotics in the era of antimicrobial resistance. *Frontiers in Microbiology*, 13, 1050493.
- Nazzaro, F., Fratianni, F., Coppola, R., y De Feo, V. 2023. Essential Oils and Antimicrobial Activity against Resistant Bacteria. *Antibiotics*, 12(10), 1518.
- Nortjie, E., Basitere, M., Moyo, D., y Nyamukamba, P. 2024. Assessing the Efficiency of Antimicrobial Plant Extracts from *Artemisia afra* and *Eucalyptus globulus* as Coatings for Textiles. *Plants*, 13(4), 514.

Organización Mundial de la Salud (OMS). 2016. Plan de acción mundial sobre la resistencia a los antimicrobianos. Ginebra: Organización Mundial de la Salud.

Organización Mundial de la Salud (OMS). 2023. Resistencia a los antimicrobianos.

Organización Mundial de la Salud (OMS). 2023. Global antimicrobial resistance and use surveillance system (GLASS) report.

Palma, A., Díaz, M. J., Ruiz-Montoya, M., Morales, E., y Giráldez, I. 2021. Ultrasound extraction optimization for bioactive molecules from *Eucalyptus globulus* leaves through antioxidant activity. *Ultrasonics Sonochemistry*, 76, 105654.

Palma, E., Tilocca, B., y Roncada, P. 2020. Resistencia a los antimicrobianos en medicina veterinaria: una visión general. *Revista Internacional de Ciencias Moleculares*, 21(6), 1914.

Panche, A. N., Diwan, A. D., y Chandra, S. R. 2022. Flavonoids: An overview. *Molecules*, 27(9), 2901.

Pereira, R., Oliveira, G., Ferreira, I., y Barros, L. 2025. Optimization of heat and ultrasound-assisted extraction of *Eucalyptus globulus* leaves reveals strong antioxidant and antimicrobial properties. *Food Chemistry*, 457, 143755.

Pérez-Martínez, J. P., Maldonado, C. M., y Mora-Poblete, F. 2025. Chemodiversity, biosynthetic regulation, and functional roles of *Eucalyptus* phenolics: applications and prospects. *Frontiers in Plant Science*, 16.

Quiñones Pérez, D. 2017. Resistencia antimicrobiana: evolución y perspectivas actuales ante el enfoque "Una salud". *Revista Cubana de Medicina Tropical*, 69(3), 1-17.

Rhouma, M., Fairbrother, J. M., Beaudry, F., y Letellier, A. 2023. Antimicrobial Alternatives in Veterinary Medicine: Essential Oils and Plant Extracts. *Animals*, 13(5), 857.

Saeed, K., Zahra, N., Sarwar, A. y Ullah, N. 2023. Oxygen Reactive Species Effectively Scavenged by Various Extracts of Leaves and Bark of *Eucalyptus globulus*. *Journal of the Chilean Chemical Society*, 68(3).

- Santos, S. A. O., Freire, C. S. R., Silvestre, A. J. D., y Neto, C. P. 2023. Exploiting the Integrated Valorization of Eucalyptus globulus Leaves: Chemical Composition and Biological Potential of the Lipophilic Fraction before and after Hydrodistillation. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(7), 6226.
- Serna, C., y Gonzalez-Zorn, B. 2022. Resistencia a antimicrobianos y One Health. *Rev Esp. Quimioter*; 35(3): 37-40.
- Shala, A. Y., y Gururani, M. A. 2021. Phytochemical Properties and Diverse Beneficial Roles of Eucalyptus globulus Labill.: A Review. *Horticulturae*, 7(11), 450.
- Sieniawska, E., y Baj, T. 2022. Tannins as biologically active compounds in medicinal plants. *Plants*, 11(18), 2332.
- Silva, N. C. C., Fernandes, A. 2023. Methods used for evaluation of antimicrobial activity of natural products: A review. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1183456.
- Silva, N. H., Morais, E. S., Freire, S. R., Freire, M. G., y Silvestre, J. D. 2020. Extraction of High Value Triterpenic Acids from Eucalyptus globulus Biomass Using Hydrophobic Deep Eutectic Solvents. *Molecules*, 25(1), 210.
- Silva, V., Igrejas, G., Falco, V., Santos, T. P., Torres, C., Oliveira, M. P., y Poeta, P. 2023. Natural flavonoids as antimicrobial agents against resistant bacteria. *Microorganisms*, 11(4), 987.
- Singh, A. A., Naaz, Z. T., Rakaseta, E., Perera, M., Singh, V., Cheung, W., Mani, F., y Nath, S. 2023. Antimicrobial activity of selected plant extracts against common food borne pathogenic bacteria. *Food And Humanity*, 1, 64-70.
- Singleton, V. L., Orthofer, R., y Lamuela-Raventós, R. M. 1999. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology*, 299, 152–178.
- Sousa, G. D. A., Rodrigues, C., Freire, C. S. R., Silvestre, A. J. D., y Silva, C. M. 2018. Extraction of Eucalyptus leaves using solvents of distinct polarity. Cluster analysis and extracts characterization. *The Journal of Supercritical Fluids*, 135, 263–274.

- Sultan, I., Rahman, S., Jan, A. T., Siddiqui, M. T., Mondal, A. H., y Haq, Q. M. R. 2018. Antibióticos, resistoma y mecanismos de resistencia: una perspectiva bacteriana. *Fronteras en microbiología*, 9, 2066.
- Tanim, T. H., y Rahman, M. S. 2024. Methods for screening and evaluation of antimicrobial activity: A review of protocols, advantages, and limitations. *Frontiers in Microbiology*, 15, 11097785.
- Teke, G. N., Ndzi, E. S., y Kuete, V. 2024. Chemical composition and bioactivities of Eucalyptus essential oils from selected pure and hybrid species: A review. *Industrial Crops and Products*, 222, 120118.
- Valgas, C., Souza, S. M., Smânia, . F. A. y Smânia ., A. 2007. Screening methods to determine antibacterial activity of natural products. *Brazilian Journal of Microbiology*, 38(2), 369–380.
- Wiegand, I., Hilpert, K., y Hancock, . E. W. 2008. Agar and broth dilution methods to determine the minimal inhibitory concentration (MIC) of antimicrobial substances. *Nature Protocols*, 3(2), 163–175.
- Xie, Y., Yang, W., Tang, F., Chen, X., y Ren, L. 2022. Antibacterial activities and mechanism of flavonoids from medicinal plants: A review. *Frontiers in Microbiology*, 13.
- Zada, A. A. S. 2021. Perbedaan Hasil Uji Aktivitas Antibakteri Metode Well Diffusion dan Kirby Bauer Terhadap Pertumbuhan Bakteri. *Jurnal Medika Utama*, 2(4), 1156–1161.
- Zouine, N., Ghachtouli, N. E., Abed, S. E. y Koraichi, S. I. 2024. A comprehensive review on medicinal plant extracts as antibacterial agents: Factors, mechanism insights and future prospects. *Scientific African*, 26.