

**UNIVERSIDAD INTERNACIONAL  
DE LAS AMÉRICAS**

**FACULTAD DE FARMACIA**

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
LICENCIATURA EN FARMACIA**

**Análisis comparativo del efecto antimicrobiano de *Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.*  
frente a microorganismos patógenos de interés veterinario y humano.**

**Estudiante: Alberto José Solano Escalante**

**Tutora: Msc. Sandra Liliana Hernández Salón**

**Sede San José**

**Abril, 2026**

## Índice de Contenido

CAPÍTULO I- INTRODUCCIÓN	9
1.1 Introducción	10
1.2 Planteamiento del problema	11
1.3 Objetivos	14
1.3.1 Objetivo General:	14
1.3.2 Objetivos Específicos:	14
1.4 Justificación	15
1.5 Antecedentes de investigación	18
1.5.1 Antecedentes históricos	18
1.5.2 Antecedentes internacionales	21
1.5.3 Antecedentes nacionales	31
CAPÍTULO II- MARCO TEÓRICO	34
2.1 Microalgas y cianobacterias	35
2.1.1 Composición Bioquímica	36
2.1.2 Metabolitos bioactivos presentes en microalgas y cianobacterias	38
2.1.3 Mecanismos de acción antimicrobiana de compuestos derivados de microalgas y cianobacterias	38
2.1.4 Perspectivas terapéuticas	40
2.2 <i>Arthrospira sp.</i> (Spirulina)	41
2.2.1 Composición bioquímica	42
2.2.2 Actividad antimicrobiana de <i>Arthrospira sp.</i>	49
2.2.3 Usos Tradicionales y Modernos de la <i>Arthrospira sp.</i>	49
2.2.4 Cianobacterias del género <i>Arthrospira</i>	50
2.3 <i>Chlorella sp.</i>	50
2.3.1 Composición bioquímica	51

2.3.2 Usos tradicionales y modernos de la <i>Chlorella</i>	56
2.3.3 Actividad antimicrobiana de <i>Chlorella sp.</i>	57
2.3.4 Microalgas del género <i>Chlorella</i>	58
2.4 Aplicaciones Combinadas de <i>Arthrospira sp.</i> y <i>Chlorella sp.</i>	59
2.5 Resistencia antimicrobiana: panorama mundial y nacional	60
2.5.1 Microalgas y cianobacterias: aspectos biológicos y biotecnológicos	62
2.5.2 Género <i>Arthrospira</i> (Spirulina): propiedades y actividad antimicrobiana	63
2.5.3 Género <i>Chlorella</i> : características y potencial antimicrobiano	65
2.5.4 Comparación del efecto antimicrobiano entre <i>Arthrospira sp.</i> y <i>Chlorella sp.</i>	66
2.6 Aplicaciones biotecnológicas y oportunidades en Costa Rica	68
2.7 Perspectivas estratégicas	69
2.8 Terapias alternativas de origen natural	71
2.8.1 Pilares Fundamentales de las terapias de origen natural	71
2.8.2 Clasificación de Recursos Naturales	71
2.8.3 Productos Naturales Derivados de Plantas como Fuente para el Descubrimiento y Desarrollo de Fármacos	72
2.8.4 Mecanismos de acción de los ácidos fenólicos frente a patógenos bacterianos	73
2.8.5 Mecanismo Antibacteriano de los Fitocannabinoides	74
2.9 Ejemplos de plantas naturales con funciones terapéuticas	77
2.9.1 <i>Nigella sativa</i> (comino negro)	77
2.9.2 <i>Curcuma longa</i> (cúrcuma)	78
2.9.3 <i>Allium sativum</i> (ajo)	80
2.9.4 <i>Moringa oleifera</i>	81
2.9.5 Aloe vera	81
2.9.6 <i>Zingiber officinale</i> (jengibre)	82
2.9.7 <i>Camellia sinensis</i> (té verde)	83
CAPÍTULO III- MARCO METODOLÓGICO	85

3.1 Enfoque y diseño de la investigación	86
3.2 Población y muestra	87
3.3 Técnica e instrumento de recolección de datos	87
3.4 Procedimiento de recolección de datos	88
3.5 Plan de análisis de datos	88
<b>CAPÍTULO IV-ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>90</b>
4.1 Evidencia científica y eficacia antimicrobiana de <i>Arthrospira sp.</i> y <i>Chlorella sp.</i>	91
4.1.1 Espectro de Acción frente a Patógenos de Interés Humano.	92
4.1.2 Eficacia en el Ámbito Veterinario	92
4.1.3 Comparativa de Eficacia entre Géneros	92
4.1.4 Respuesta de los metabolitos bioactivos de <i>Chlorella sp.</i> y <i>Arthrospira sp.</i> ante los diferentes solventes y métodos de extracción.	93
4.2 Caracterización de Metabolitos y Mecanismos de Acción	94
4.2.1 Ácidos Grasos como Agentes de Disrupción de Membrana	95
4.2.2 Compuestos Fenólicos y su Acción Antioxidante e Inhibitoria	95
4.2.3 Pigmentos y el Papel de la Ficocianina y la Clorelina	96
4.2.4 Péptidos Antimicrobianos y Polisacáridos Sulfatados	96
4.3 Análisis de Percepción Profesional	96
1. ¿Cuál es su identidad de género?	97
2. ¿Cuál es su profesión?	98
3. Años de experiencia profesional:	99
4. ¿Actualmente se encuentra trabajando?	100
5. ¿Ha considerado activamente el uso de terapias alternativas, en lugar de los antibióticos convencionales?	101
6. ¿Tenía conocimiento previo sobre el potencial antimicrobiano de las microalgas y cianobacterias, (ejemplo: <i>Arthrospira sp.</i> y <i>Chlorella sp.</i> )?	102
7. ¿Cuál de estos factores considera la principal barrera para adoptar un nuevo tratamiento antimicrobiano de origen natural?	103

8. ¿Qué tipo de información o evidencia científica le daría la confianza para prescribir un producto basado en microalgas y cianobacterias?	104
9. ¿Cree que sus pacientes (o clientes) aceptarían un tratamiento derivado de una fuente natural como las microalgas y cianobacterias?	104
10. En una escala de 1 (muy baja) a 5 (muy alta), ¿cuál es su confianza general en la eficacia de los productos antimicrobianos de origen natural validados científicamente?	105
11. ¿Qué preguntas o preocupaciones tendría usted como profesional, con respecto al uso de tratamientos alternativos basados en microalgas y cianobacterias para el control de bacterias?	106
CAPÍTULO V - CONCLUSIONES	108
CAPÍTULO VI - RECOMENDACIONES	112
CAPÍTULO VII- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115
CAPÍTULO VIII. ANEXOS	124

## Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Producción y aislamiento de metabolitos antimicrobianos de microalgas y cianobacterias y posibles aplicaciones	36
Ilustración 2. Composiciones morfológicas de los géneros <i>Arthrospira</i> y <i>Spirulina</i> .	42
Ilustración 3. Estructura química de Ficocianina.	43
Ilustración 4. Estructura química del ácido gamma-linolénico (GLA).	43
Ilustración 5. Estructura química de ácido linoleico.	44
Ilustración 6. Estructura química de ácido palmítico.	44
Ilustración 7. Estructura química de la ficocianina.	45
Ilustración 8. Estructura química de la clorofila a.	45
Ilustración 9. Estructura química de los $\beta$ -caroteno.	45
Ilustración 10. Estructura química de la vitamina A (Retinol).	46
Ilustración 11. Estructura química de la Vitamina B1 (Tiamina).	46
Ilustración 12. Estructura química de la Vitamina B2 (Piridoxina).	46
Ilustración 13. Estructura química de la Vitamina B12 (Cianocobalamina).	47
Ilustración 14. Estructura química de la Vitamina E (Tocoferol).	47
Ilustración 15. Estructura química de la Vitamina K (Filoquinona).	47
Ilustración 16. Estructura química de ácido cafeico.	48
Ilustración 17. Estructura química del ácido clorogénico.	48
Ilustración 18. Principales características estructurales de <i>Arthrospira</i> sp.	49
Ilustración 19. Estructura química de las Catequinas.	51
Ilustración 20. Estructura química del ácido ferúlico.	52
Ilustración 21. Estructura química de la luteolina.	52
Ilustración 22. Estructura química de la clorofila a.	53
Ilustración 23. Estructura química de la clorofila b.	53
Ilustración 24. Estructura química de la Luteína.	54
Ilustración 25. Estructura química de los $\beta$ -caroteno.	54
Ilustración 26. Estructura química de la celulosa.	55
Ilustración 27. Estructura química del almidón.	55
Ilustración 28. Principales características estructurales de <i>Chlorella</i> sp.	56
Ilustración 29. Estructura química del cannabidiol (CBD).	74
Ilustración 30. Estructura química del cannabigerol (CBG).	75
Ilustración 31. Estructura química del cannabidiol (CBD).	75

Ilustración 32. Estructura química del tetrahidrocannabinol (THC).	75
Ilustración 33. Estructura química de la <i>Nigella Sativa</i> (comino negro).	78
Ilustración 34. Estructura química de la cúrcuma.	79
Ilustración 35. Estimulación de la secreción de proteínas antibacterianas por las células epiteliales intestinales.	79
Ilustración 36. <i>Allium sativum</i> (ajo negro)	80
Ilustración 37. Estructura química de la <i>Moringa oleifera</i> .	81
Ilustración 38. Estructura química del Aloe Vera	81
Ilustración 39. Estructura química del <i>Zingiber officinale</i> (jengibre).	82
Ilustración 40. Estructura química del <i>Camellia sinensis</i> (té verde).	83
Ilustración 41. Distribución porcentual de los participantes según identidad de género.	97
Ilustración 42. Distribución porcentual de la profesión de los participantes del estudio.	98
Ilustración 43. Distribución de los encuestados por años de experiencia profesional.	99
Ilustración 444. Distribución porcentual de la consideración de terapias alternativas en el tratamiento de infecciones bacterianas.	101
Ilustración 45. Distribución porcentual del conocimiento previo sobre el potencial antimicrobiano de microalgas y cianobacterias.	102
Ilustración 46. Distribución de las categorías de evidencia científica consideradas necesarias para la adopción de tratamientos basados en microalgas.	104
Ilustración 47. Distribución de la escala de confianza en antimicrobianos naturales validados científicamente.	105

## Índice de Tablas

Tabla 1. Principales características que separan a los géneros <i>Arthrospira</i> y <i>Spirulina</i> .	41
Tabla 2. Análisis comparativo entre la clorofila a y b.	54
Tabla 3. Análisis comparativo entre el almidón y la celulosa.	55
Tabla 4. Comparación del efecto antimicrobiano entre <i>Arthrospira</i> sp. y <i>Chlorella</i> sp.	67
Tabla 5. Eficacia Antimicrobiana de <i>Arthrospira</i> sp. y <i>Chlorella</i> sp.	91
Tabla 6. Comparativa de Composición Bioquímica y Metabolitos Bioactivos.	94
Tabla 7. Comparativa de los Metabolitos y Efectos antibacterianos.	95
Tabla 8. Situación laboral actual de los participantes del estudio.	100
Tabla 9. Principales barreras percibidas por los profesionales de salud para la adopción de tratamientos antimicrobianos de origen natural.	103
Tabla 10. Percepción de los profesionales de salud sobre la aceptación de tratamientos derivados de microalgas por parte de los pacientes.	104
Tabla 11. Principales preocupaciones de los profesionales de salud respecto al uso de microalgas y cianobacterias como alternativa antimicrobiana. obacterias como alternativa antimicrobiana.	106

## **CAPÍTULO I- INTRODUCCIÓN**

## 1.1 Introducción

Las microalgas y cianobacterias son un amplio grupo de organismos procariotas y eucariotas, que poseen la habilidad  $\gamma$  de realizar fotosíntesis, capaces de convertir la energía lumínica y el dióxido de carbono en biomasa de alto valor, estos organismos representan un formidable recurso gracias a la enorme gama de sustancias bioquímicas valiosas y novedosas para generar investigaciones. El mercado de estas aplicaciones sigue emergiendo, y se han abierto nuevas áreas de investigación en biotecnología para satisfacer las nuevas demandas de productos de las diferentes industrias y los consumidores. <sup>1</sup>

Según el estudio de Villalta y sus colaboradores en el 2019, en los últimos 15 años, China se ha convertido en el principal productor de biomasa de microalgas en el mundo, aproximándose a más del 90% de la producción total de estos organismos. Donde la *Espirulina (Arthrospira sp.)* es el producto microalgal más importante por tonelaje y valor, seguido de *Chlorella sp.*, *Dunaliella sp.* y *Haematococcus sp.* Estos géneros se convierten en una alternativa viable en distintos campos de aplicación, por el hecho de que no se necesita tierra fértil para su cultivo y brinda la posibilidad de usar aguas de baja calidad. <sup>1</sup>

Sin embargo, la relación costo/eficiencia compromete la producción en masa de dichas especies, fomentando el cultivo como un método exclusivo para aplicaciones de alto valor en salud, cosmética, nutracéuticos, alimentos humanos y la agricultura. Lo que en Costa Rica sería una forma de potencializar la biotecnología microalgas se procedió a establecer una colección de cepas de microalgas y cianobacterias nacionales. <sup>2</sup>

Las colecciones de cepas son depósitos supervisados por diversos centros de investigación como El Laboratorio de Biotecnología de Microalgas (LABMAE) de la universidad Nacional (UNA), El Laboratorio de Biotecnología en Microalgas y Cianobacterias (LABIOMIC) de la Universidad de Costa Rica (UCR) y el laboratorio del El Centro de Investigación de Biotecnología (CIB) del Tecnológico de Costa Rica (TEC) que han impulsado múltiples estudios sobre especies locales, fortaleciendo su aprovechamiento en sectores estratégicos como la salud, la alimentación y el medio ambiente, en consonancia con los principios de sostenibilidad y economía circular. Estos esfuerzos permiten generar métodos investigativos que promuevan resguardar material biológico en forma viable, pura y estable.<sup>67</sup>

En esta investigación se realizará un análisis bibliográfico comparativo de las cianobacterias y microalgas con mayor producción de biomasa a nivel mundial, la *Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.* Actualmente las microalgas y las cianobacterias están

recibiendo gran atención por parte de algunos investigadores debido a su potencial de utilidad en distintas áreas de interés veterinario y humano.

En particular, se han estudiado sus propiedades antimicrobianas para su posible uso como compuestos antimicrobianos farmacéuticos de interés humano y veterinario. Lo que brinda la posibilidad de poder analizar el efecto antimicrobiano de estos dos géneros (*Arthrospira sp.*, *Chlorella sp.*) ante cepas bacterianas que generan multirresistencia en Costa Rica.

## 1.2 Planteamiento del problema

En los últimos años diferentes microorganismos marinos han llamado la atención de la población científica por la gran maleabilidad e importancia en distintas áreas de interés humano y veterinario. La amplia variedad de géneros existentes brinda la posibilidad de ser utilizadas en el ámbito comercial. Estas características tan particulares se deben principalmente por la capacidad de producir una variedad considerable de metabolitos bioactivos secundarios, los cuales mediante su aislamiento se han logrado utilizar en las diferentes industrias. <sup>3</sup>

Por otra parte, las biomásas de microalgas y cianobacterias pueden cumplir los requisitos nutricionales de aves, cerdos, ganado, peces y humanos. Visto que la composición bioquímica de las microalgas y cianobacterias contienen (vitaminas, minerales, ácidos grasos y antioxidantes) se puede considerar como un alimento funcional, ya que ayudan a la prevención de ciertas enfermedades y a reducir el desarrollo de algunas cepas bacterianas. <sup>3</sup>

La gravedad de la resistencia antimicrobiana en Costa Rica se refleja en las estimaciones del estudio global *GRAM (Global Burden of Bacterial Antimicrobial Resistance)*, las cuales indican que las infecciones por bacterias resistentes son responsables de aproximadamente 380 fallecimientos directos anuales en el país. Si se consideran las muertes asociadas indirectamente a este fenómeno, la cifra asciende a cerca de 1650 decesos por año. Estos datos, respaldados por análisis epidemiológicos de la Universidad de Costa Rica, evidencian un impacto sustancial tanto a nivel social como clínico que compromete la sostenibilidad del sistema sanitario nacional <sup>4</sup>

Esta proyección epidemiológica se vio reforzada por las advertencias sobre la alarmante presencia de bacterias causantes de septicemias y otros patógenos comunes que muestran una resistencia creciente a múltiples esquemas terapéuticos. En el contexto nacional, el Dr. Marco Vinicio Molina ha señalado que estas infecciones potencialmente

mortales han dejado de responder de manera óptima a los tratamientos convencionales, lo que evidencia un deterioro en la seguridad clínica y una urgencia por identificar metabolitos con potencial antimicrobiano que permitan enfrentar la vulnerabilidad de los protocolos hospitalarios actuales.<sup>5</sup>

Aunado a lo anterior, la gravedad de la crisis de resistencia en Costa Rica fue subrayada por el Dr. Molina (2024)<sup>5</sup>, quien indicó que las infecciones bacterianas comunes presentan una resistencia creciente a los tratamientos convencionales. Según los datos citados, más del 60% de las cepas aisladas de *Neisseria gonorrhoeae* presentan resistencia a la ciprofloxacina, un fármaco tradicionalmente esencial.

La problemática de la resistencia bacteriana en Costa Rica ha alcanzado niveles alarmantes, tal como lo han señalado estudios publicados desde 2015 en la revista *Infection and Chemotherapy*, donde se reportaron tasas de resistencia a los carbapenémicos superiores al 50%. Esta tendencia crítica ha sido confirmada y actualizada por la Universidad de Costa Rica (2024), situando al país entre las naciones con los niveles de resistencia más graves a nivel mundial. Según el Dr. Alberto Molina, este panorama es especialmente preocupante debido a que la circulación de cepas multirresistentes ya no se limita al ámbito hospitalario, sino que se ha extendido a la comunidad. Ante esta crisis de salud pública nacional, se evidencia la urgencia de investigar nuevos agentes con potencial antimicrobiano, como los metabolitos secundarios derivados de *Arthrospira* sp. y *Chlorella* sp., que representen alternativas viables frente a la pérdida de eficacia de los antibióticos de última línea.<sup>5</sup>

Adicionalmente, los estudios realizados en la Maestría en Bioinformática, del Sistema de Estudios de Posgrado de la Universidad de Costa Rica (UCR), en el 2010 encontraron que la *Pseudomonas aeruginosa* quedó en la categoría de máximo riesgo hospitalario (categoría ST111).<sup>5</sup>

La anterior categorización indica que son bacterias con una resistencia muy elevada, que en el caso de la *P. aeruginosa* es una bacteria muy poco reportada en el mundo siendo esta una bacteria sumamente peligrosa, con un perfil de éxito contra antibacterianos muy elevada y una multirresistencia muy alta para causar infecciones intrahospitalarias o nosocomiales.<sup>5</sup>

Los antibióticos en Costa Rica se usan en granjas para que los pollos o los cerdos no se enfermen, o bien, en algunos cultivos. Ya hay estudios que evidencian la presencia de antibióticos en estos alimentos que también ingresan a nuestro organismo cuando los comemos.<sup>5</sup>

Por otro lado, las condiciones socioeconómicas regionales son un factor determinante para el desarrollo de este escenario de resistencia tanto en Latinoamérica como en Costa Rica. Se ha evidenciado que cuando hay un antibiótico nuevo se abusa de ese medicamento, el cual provoca que este abuso se convierta en uno de los principales motores que generan los altos niveles de resistencia que hoy se está vivenciando. <sup>5</sup>

Además, es importante destacar las dinámicas de los pacientes de no terminar los tratamientos antibióticos, la automedicación y, en algunos casos, la mala práctica médica. Este descontrol y carencia de conocimiento provoca que se esté fortaleciendo a las bacterias más fuertes, generando esa resistencia bacteriana que se ha mencionado anteriormente aún mucho mayor. Provocando que la cepa bacteriana siga sobreviviendo a pesar del uso de antibióticos. <sup>5</sup>

En Costa Rica, la resistencia antimicrobiana ha adquirido una relevancia particular debido a la creciente evidencia de resistencia en bacterias de origen tanto clínico como alimentario. Un estudio reciente de Molina<sup>6</sup>, identificó la presencia de *Salmonella entérica* serovar infantis multirresistente en carne de pollo destinada al consumo humano, lo que representa un riesgo zoonótico significativo. Dentro del espectro de patógenos que presentan una creciente dificultad diagnóstica y terapéutica, destaca la *Salmonella enterica* no tifoidea. Este microorganismo representa un desafío crítico para la seguridad alimentaria y la salud pública global, al posicionarse como la tercera causa de mortalidad mundial vinculada a enfermedades diarreicas. Se estima que la carga epidemiológica de esta bacteria oscila entre los 200 millones y mil millones de infecciones anuales, derivando en aproximadamente 155,000 defunciones. La magnitud de estas cifras, sumada a la emergencia de cepas multirresistentes en la cadena de producción alimentaria, agrava la vulnerabilidad de las poblaciones y compromete la efectividad de las terapias convencionales, lo que justifica la búsqueda imperativa de alternativas antimicrobianas de origen natural. <sup>6</sup>

Basado en la información recopilada anteriormente se genera la siguiente pregunta de investigación:

¿Qué evidencia científica respalda la actividad antimicrobiana de *Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.*, y cuál es el nivel de conocimiento y percepción de los profesionales de la salud sobre su potencial uso frente a bacterias multirresistentes?

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo General:

Analizar la actividad antimicrobiana de *Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.* mediante evidencia científica, **analizando** además la percepción y el conocimiento de los profesionales de la salud en Costa Rica sobre su uso frente a bacterias multirresistentes.

### 1.3.2 Objetivos Específicos:

1. Analizar la evidencia científica sobre la actividad antimicrobiana de *Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.*, determinando su eficacia frente a patógenos de importancia clínica.
2. Caracterizar los metabolitos secundarios y los mecanismos de acción biológicos que fundamentan las propiedades antimicrobianas reportadas en la literatura para ambos géneros.
3. Determinar el nivel de conocimiento y la percepción de los profesionales de la salud en Costa Rica sobre el potencial terapéutico de estas microalgas y cianobacterias ante el desafío de la multirresistencia bacteriana.

## 1.4 Justificación

Según Little S.M.<sup>8</sup>, el aumento de la proliferación de la resistencia bacteriana a los antibióticos es un problema crítico que ha incrementado la demanda de nuevos compuestos antibacterianos. Se han evaluado las actividades antibacterianas en extractos de microalgas y cianobacterias, con diferentes niveles de potencial de desarrollo posterior según la cepa de algas, la cepa del patógeno bacteriano y el disolvente utilizado para extraer los metabolitos.

Las microalgas y cianobacterias de condiciones ambientales extremas han tenido que adaptarse a condiciones que excluyen a muchos otros organismos. La producción de compuestos antibacterianos contribuye directa o indirectamente a la supervivencia de las microalgas verdes en estos entornos extremos, en conjunto con otros procesos funcionales de importancia.<sup>8</sup>

Los procesos celulares de estas microalgas y cianobacterias, anteriormente descritas requieren que estos microorganismos mantengan un ambiente intracelular constante, adaptándose a cambios externos, lo que puede causar un aumento en el consumo de energía. Estas adaptaciones conllevan a una disminución del metabolismo fotosintético, esto lleva a un desencadenamiento de resultados positivos en la acumulación de compuestos intermedios dentro de las células, sobre los cuales actúan vías de importancia para formar metabolitos secundarios.<sup>8</sup>

Los diferentes procesos por los cuales se logran detectar, purificar, aislar e identificar compuestos presentes en extractos complejos ha permitido a los investigadores emprender el desafiante camino del cribado de productos naturales. Los diferentes procedimientos para recopilar los extractos de microalgas suelen incluir la selección de disolventes orgánicos y el método de extracción, lo que genera una metodología de prueba para la actividad antibacteriana.<sup>8</sup>

En las microalgas de ambientes extremos se realiza la extracción tradicional por solventes o extracción sólido-líquido, en la cual los metabolitos activos extraídas mediante extractor Soxhlet o extracción en caliente, maceración o sonicación con una serie de solventes con polaridad creciente para asegurar la recuperación de diferentes productos microalgales. En la teoría se menciona que “Cuando se obtiene el extracto, generalmente se elige un bioensayo *in vitro* estandarizado, siguiendo las pautas del Clinical and Laboratory Standards Institute o del European Committee on Antimicrobial Susceptibility Testing (EUCAST), que incluye técnicas de difusión en agar y/o dilución en caldo”.<sup>8</sup>

Según la investigación bibliográfica no se ha identificado la mayoría de los

compuestos de microalgas y cianobacterias con actividad antibacteriana. Los compuestos antibacterianos conocidos y aislados son varios. Si bien la investigación de los metabolitos secundarios de las microalgas verdes ha aumentado en los últimos años, estos han sido menos explorados y solo recientemente se han convertido en el foco de atención de una gran cantidad de investigadores. Como consecuencia, se han realizado varios estudios centrados en investigar la actividad antibacteriana de las microalgas y cianobacterias aisladas de ambientes extremos, con la esperanza de encontrar compuestos únicos y efectivos.<sup>8</sup>

Los compuestos generados por las microalgas y cianobacterias que cuentan con actividad antibacteriana incluyen ácidos grasos, glicolípidos, fenólicos, terpenos,  $\beta$ -dicetona y alcaloides indólicos. Sin embargo, la mayor parte de la actividad antibacteriana suele atribuirse a ácidos grasos insaturados de cadena larga.<sup>8</sup>

El estudio de las propiedades de microalgas y cianobacterias tiene su referente en la investigación sobre *Chlorella sp.*, organismo capaz de sintetizar clorelina. Este compuesto posee una robusta actividad antibacteriana que inhibe el crecimiento de patógenos Gram-positivos y Gram-negativos. Posteriormente, diversos estudios han confirmado que múltiples géneros de microalgas verdes y cianobacterias producen metabolitos secundarios con capacidad bactericida o bacteriostática frente a patógenos humanos.<sup>8</sup>

Un ejemplo de multirresistencia es el de la *Salmonella entérica* no tifoidea que es un importante patógeno transmitido por los alimentos, siendo esta la tercera causa más común de mortalidad a nivel mundial relacionada con enfermedades diarreicas. Se estima que anualmente se producen entre 200 millones y mil millones de infecciones por *Salmonella entérica*, lo que resulta en 93 millones de casos de gastroenteritis y 155.000 muertes.<sup>6</sup>

“En los Estados Unidos de América, la *Salmonella entérica* no tifoidea causa aproximadamente 1,35 millones de infecciones, lo que resulta en 26.500 hospitalizaciones y 420 muertes”.<sup>6</sup> Las principales fuentes de infección por *Salmonella entérica* no tifoidea en humanos son el consumo de alimentos contaminados, el contacto con animales infectados y la transmisión de persona a persona.<sup>6</sup>

Entre estas vías de transmisión, la principal fuente de infección humana por *Salmonella entérica* no tifoidea es el consumo de carne de ave y productos avícolas contaminados, lo que indica una alta prevalencia de serotipos de *S. enteritidis* y *S.*

*typhimurium*, seguido de la carne de res, cerdo, pescado y alimentos no derivados de animales contaminados, como frutas y verduras. <sup>6</sup>

Ante la creciente prevalencia de cepas multirresistentes en el sector avícola y ecosistemas naturales, la biotecnología de cianobacterias ofrece alternativas prometedoras. Investigaciones desarrolladas por Kaushik y Chauhan (2006) demuestran que extractos de *Spirulina platensis* (*Arthrospira platensis*) poseen una actividad antibacteriana significativa, logrando inhibir el crecimiento de patógenos Gram-positivos y Gram-negativos mediante el uso de solventes orgánicos. En particular, se ha observado que los extractos metanólicos y de acetona presentan una eficacia notable, lo que sugiere que los metabolitos secundarios de esta especie podrían ser utilizados para desarrollar nuevos agentes antimicrobianos capaces de enfrentar la resistencia a antibióticos convencionales detectada en especies como *Salmonella* y otros aislados clínicos. <sup>9</sup>

Las investigaciones actuales se interesan en las microalgas verdes y cianobacterias debido a su biocompatibilidad, biodegradabilidad y capacidad para producir metabolitos bioactivos como ácido linoleico, ácido oleico, vitaminas, minerales, pigmentos, entre otras sustancias. Estos compuestos son los candidatos potenciales que inhiben el crecimiento de bacterias gram positivas. <sup>9</sup>

Estas particularidades las posicionan como candidatas para sistemas avanzados de liberación de fármacos, terapias anticancerígenas, funciones antimicrobianas, entre otras funciones de interés humano. Estudios han demostrado su eficacia en modelos experimentales para reducir efectos secundarios de quimioterapia, mejorar la biodisponibilidad de fármacos y tratar infecciones resistentes a terapias convencionales. <sup>9</sup>

Ante este panorama, la investigación aporta conocimiento en distintos niveles:

En primera instancia, se presenta una revisión técnica sistematizada de la evidencia sobre el uso de alternativas antimicrobianas de origen natural frente a cepas multirresistentes de relevancia epidemiológica. Se analiza el rol de los géneros *Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.* como fuentes de compuestos bioactivos, tales como ficocianinas, polisacáridos sulfatados, fenoles y lípidos insaturados. El análisis de la literatura reciente permite validar los mecanismos biológicos mediante los cuales estos metabolitos inhiben el crecimiento de bacterias patógenas, ofreciendo una base teórica para el desarrollo de nuevas estrategias terapéuticas.

Desde una perspectiva clínica, la investigación evalúa la viabilidad de los productos

naturales como alternativas o coadyuvantes en el tratamiento de infecciones bacterianas, promoviendo un enfoque de uso sostenible. Esta evaluación es de vital importancia en el contexto de Costa Rica, donde la literatura reporta que el uso empírico e indiscriminado de antibióticos, tanto en medicina humana como veterinaria lo que ha exacerbado la presión selectiva, favoreciendo la emergencia de bacterias multirresistentes y comprometiendo la eficacia de los tratamientos convencionales.<sup>9</sup>

En síntesis, esta investigación no sólo consolida la evidencia científica sobre el potencial antimicrobiano de los extractos de microalgas y cianobacterias frente a patógenos de importancia clínica, sino que también propone un enfoque transversal e innovador alineado con las demandas sanitarias contemporáneas. Al integrar las perspectivas de la medicina humana y veterinaria, el estudio ofrece una base teórica aplicable a la realidad de un país como Costa Rica, donde la mitigación de la resistencia bacteriana requiere de alternativas terapéuticas fundamentadas en el aprovechamiento de recursos biotecnológicos sostenibles.

La presente investigación sobre el efecto antimicrobiano de *Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.* frente a microorganismos patógenos de interés veterinario y humano representa una contribución significativa al conocimiento científico, en un contexto donde la resistencia antimicrobiana constituye una amenaza creciente para la salud pública y la medicina veterinaria.

## **1.5 Antecedentes de investigación**

### **1.5.1 Antecedentes históricos**

Kaushik P y Chauhan A.<sup>9</sup>, en la investigación “In vitro antibacterial activity of laboratory grown culture of *Spirulina platensis*” Donde su principal objetivo fue investigar la actividad antibacteriana de diferentes extractos de un cultivo de *Spirulina platensis* cultivado en laboratorio.

En esta investigación se evidencia el creciente interés por parte de diferentes áreas para buscar alternativas como las cianobacterias con actividad antimicrobiana para combatir la creciente preocupación mundial por el alarmante aumento en la tasa de infección por microorganismos resistentes a los antibióticos. Extractos de hexano, acetato de etilo, diclorometano, metanólicos y medios agotados se probaron *in vitro* para determinar su actividad antibacteriana, para lo cual se utilizó *Staphylococcus aureus* y *Escherichia coli*,

*Pseudomonas aeruginosa*, *Salmonella typhi* y *Klebsiella pneumoniae* como organismos de prueba. Los resultados mostraron que la actividad antibacteriana de diferentes extractos de *Spirulina platensis* exhibieron un grado diferente de actividad antibacteriana contra los microorganismos evaluados.<sup>9</sup>

Este antecedente muestra cómo por medio de pruebas in vitro se evidencia la actividad antibacteriana de la *Spirulina platensis* ante distintas cepas de bacterias gram positivas y gram negativas, reforzando la importancia de la investigación en curso.

Lee JY, et al.<sup>10</sup>, Corea. En la investigación “Epidemiology and Characteristics of Metallo- $\beta$ -Lactamase-Producing *Pseudomonas aeruginosa*: a 2015 update”. Donde su principal objetivo fue destacar y comprender las características de la *Pseudomonas aeruginosa* productora de metalo - $\beta$ - lactamasa.

En esta investigación se hace un análisis de los diferentes mecanismos de acción del funcionamiento de las resistencias que produce metalo - $\beta$ - lactamasa, haciendo hincapié en la aparición, propagación mundial y la prevalencia creciente de bacterias resistentes a múltiples agentes antimicrobianos que se han convertido en una amenaza importante para la salud pública. También hace referencia a las múltiples infecciones bacterianas resistentes a fármacos y terapias convencionales que están estrechamente asociadas con una alta mortalidad, hospitalización prolongada, múltiples morbilidades y un mayor costo debido a las limitadas opciones terapéuticas antimicrobianas para los pacientes infectados.<sup>10</sup>

El antecedente muestra cómo distintos agentes antimicrobianos han generado resistencias a distintos fármacos y cómo esta situación se ha vuelto una amenaza importante para la salud pública. Evidenciando la importancia de la presente investigación, generando conocimiento para posibles colaboraciones futuras de terapias antimicrobianas alternativas.

El-Sayed<sup>12</sup>, investigó la actividad antimicrobiana del extracto de ácido fenólico de *Spirulina platensis* contra bacterias patógenas que causan sepsis en neonatos. El estudio fue de tipo transversal y se llevó a cabo en 50 neonatos con sospecha clínica de sepsis que fueron ingresados en la unidad de prematuros de cuatro hospitales en la ciudad de Sohag, Egipto. La investigación se realizó durante un período de 18 meses, entre marzo de 2015 y agosto de 2016. Dentro de los resultados podemos observar que los extractos de *Spirulina platensis* probados contra ocho bacterias patógenas producen una significativa inhibición del crecimiento de las bacterias expuestas. Evidenciando un efecto antibacteriano en una amplia gama de bacterias.<sup>12</sup>

El antecedente evidencia el efecto antimicrobiano de los extractos de *Spirulina platensis* y como estos ejercen un efecto inhibitorio ante distintas cepas bacterianas, otorgando fiabilidad a la investigación del efecto antimicrobiano de la *Spirulina sp* (*Arthrospira sp*) y *Chlorella sp*.

El-Sayed HMA, et al. <sup>12</sup>, Egipto. En la investigación que lleva el nombre “Antibacterial activity of phenolic extract of *Spirulina platensis* and its structural elucidation of bioactive compound”. Donde se investigó la actividad antimicrobiana del extracto de ácido fenólico de *Spirulina platensis* contra bacterias patógenas que causan sepsis en neonatos.

Se logró evidenciar que los componentes bioactivos de la *Spirulina platensis* tienen propiedades antibacterianas, también se identificaron once compuestos en el extracto de ácido fenólico del alga; donde el ácido palmítico con un 14,263% fue uno de los más predominantes. El extracto de algas se probó *in vitro* para determinar su efecto antibacteriano contra (*Bacillus cereus*, *Enterococcus casseliflavus*, *Kocuria kristinae*, *Staphylococcus aureus*, *Alloiococcus otitis*, *Roseomonas gilardii* y *Aeromonas hydrophila*) utilizando el método de difusión en disco de papel y se observó que todas estas bacterias mostraron inhibición en el crecimiento por este extracto. <sup>12</sup>

Este antecedente logra mostrar la actividad de la *Spirulina platensis* contra diferentes microorganismos bacterianos y como sus extractos de ácido fenólico, principalmente el palmítico es el encargado de producir estos efectos antibacterianos, dando la posibilidad de ser una opción prometedora en distintos campos de interés médico y farmacéutico.

Acurio LP, et al.<sup>7</sup>, Ecuador. En la investigación “Antimicrobial potential of *Chlorella* algae isolated from stacked waters of the Andean region of Ecuador” cuyo objetivo fue evaluar el potencial antimicrobiano del alga *Chlorella* extraída de las aguas estancadas de tres acequias de riego diferentes en Ambato, Ecuador.

El estudio describe el aislamiento de la microalga como primera etapa del desarrollo investigativo. En segundo lugar, muestra la extracción de la clorelina como metabolito antimicrobiano. Para replicar las condiciones ambientales útiles para el crecimiento de las colonias de *Chlorella*, “se mantuvieron a temperatura ambiente, oscilando entre 10°C y 18°C en medio Bold Basal enriquecido con NH<sub>4</sub>Cl”. Los resultados demuestran el potencial antibacteriano de la microalga *Chlorella* extraída de las aguas estancadas de los canales de varios sectores de la ciudad de Ambato, Ecuador. <sup>7</sup>

Santhosh S et al. <sup>13</sup>, India. En la investigación “Growth optimization, free radical scavenging and antibacterial potential of *Chlorella sp.* SRD3 extracts against clinical isolates”. El objetivo fue explorar el potencial de los extractos de la microalga *Chlorella sp.* para la actividad antioxidante y antibacteriana contra aislados clínicos, donde también se evalúa la Concentración Mínima Inhibitoria (MIC) y la actividad hemolítica.

En el estudio recopilado se realizaron aislamientos en medio Bold Basal bajo condiciones optimizadas, para luego realizar una extracción y un análisis cuantitativo para medir el contenido de fenoles, flavonoides y proantocianidinas en los extractos. Se concluye que los extractos polares de la microalga verde *Chlorella sp.* tienen un potencial biológico significativo tanto como agente antioxidante, antimicrobiano y antifúngico. <sup>13</sup>

Este estudio valida y cuantifica el potencial de *Chlorella sp.*, proporcionándole una base sólida para la comparación con *Arthrospira sp.* También indica cómo aprovechar el máximo rendimiento de las biomásas con función antibacteriana, generando aportes metodológicos para obtener mayor provecho de los extractos provenientes de la *Chlorella sp.*

<sup>13</sup>

### **1.5.2 Antecedentes internacionales**

En la investigación titulada “Antioxidant and antimicrobial activities of *Spirulina platensis* extracts and biogenic selenium nanoparticles against selected pathogenic bacteria and fungi”, de Abdel-Moneim<sup>14</sup>, cuyo objetivo fue estudiar la actividad antimicrobiana y antioxidante de tres extractos de espirulina (metanol, acetona y hexano) y las nanopartículas biológicas de selenio (Se) fabricadas por una cepa de *Bacillus subtilis*.

En este trabajo experimental se realizaron cultivos, técnicas de aislamientos y preparaciones de *Spirulina platensis*, para luego realizar la identificación de las distintas bacterias que tuvieran tolerancia al selenio, que es un componente clave de las selenoproteínas que es bien conocido por estar involucrado en el sistema de defensa antioxidante de las células animales. Además, se ha demostrado la actividad antimicrobiana de este micronutriente metaloide. Los resultados mostraron que los extractos de *Spirulina platensis* exhibieron actividad antimicrobiana contra los patógenos probados. Además, los extractos de *Spirulina platensis* eliminaron significativamente los radicales ABTS y DPPH de manera dependiente de la dosis. <sup>14</sup>

Esta investigación al realizar metodologías de cultivo, identificación, almacenaje, y

pruebas del efecto antibacteriano de la *Spirulina platensis* ante distintas cepas bacterianas, genera una guía tangible de la importancia de este género de microalga como alternativa para los tratamientos convencionales, dando una posibilidad para combatir la multirresistencia bacteriana.

Pianta E, et al. <sup>15</sup>, Corea. en la investigación “In vitro antibacterial and antifungal activity of an *Arthrospira platensis* extract”. Cuyo objetivo de investigación fue evaluar la actividad antibacteriana y antifúngica *in vitro* de un extracto patentado de *Arthrospira platensis* en bacterias, levaduras y hongos filamentosos sensibles y resistentes a múltiples fármacos que comúnmente causan infecciones de la piel.

La evaluación biotecnológica de *Arthrospira platensis* confirma su potencial como alternativa terapéutica natural gracias a su actividad frente a patógenos bacterianos y fúngicos de alta relevancia clínica. La capacidad de sus extractos para inhibir microorganismos multirresistentes y dermatofitos comunes sugiere una versatilidad que permite su aplicación en el desarrollo de nuevos tratamientos para infecciones de diversa etiología. <sup>15</sup>

El antecedente realiza aportes didácticos acerca de algunas cepas bacterianas con sensibilidad a los extractos de la *Arthrospira platensis*, generando como resultado una posible utilidad de estos componentes como agentes antibacterianos para tratamientos alternativos.

Elsalhin HE et al. <sup>16</sup>, Egipto. En la investigación “Antibacterial study of *Chlorella vulgaris* isolated from fresh water”. Con el objetivo de determinar la eficacia de los extractos de la *Chlorella vulgaris* ante cuatro cepas bacterianas: *Achromobacter sp* (S1), *Staphylococcus sp* (S2), *Escherichia coli* (S3) y *Shigella dysenteriae* (S4).

En la investigación los organismos de prueba sujetos a la determinación de la actividad antimicrobiana se siembran con hisopos de algodón estériles en las placas de agar nutritivo secadas al aire, donde se administran varias concentraciones de *Chlorella vulgaris* en los discos con 150µl de extractos de muestra se colocan sobre la superficie de las placas de agar nutritivo y los cultivos bacterianos sembrados. Se concluye que la *Chlorella vulgaris* ha tenido un efecto antibacteriano en algunas bacterias patógenas de humanos, y que este inhibidor ha sido más efectivo en las bacterias en comparación con algunos antibióticos de uso tradicional. <sup>16</sup>

El antecedente en cuestión brinda información vital del proceso por el cual se puede realizar un análisis del efecto antimicrobiano de la *Chlorella vulgaris* y cómo este género es efectivo en el control del crecimiento de distintas cepas bacterianas.

AL-Abdulameer SH. et al. <sup>17</sup>, Bagdad, Iraq. “The Wide Spectrum Activity of Chlorella and Spirulina Extracts on the Viability of Pathogenic and Environmental bacteria in Baghdad, Iraq”. Con el objetivo de evaluar el amplio espectro de actividad antimicrobiana de los extractos de la *Chlorella* y *Spirulina* contra diversas bacterias, tanto patógenas como ambientales, aisladas en Bagdad, Irak.

En el estudio se realizaron análisis comparativos entre la *Spirulina* y la *Chlorella*, utilizando diferentes concentraciones con un método de difusión de disco para medir la zona de inhibición bacteriana como indicador de la efectividad, para posteriormente realizar la comparación entre los dos géneros en investigación. En conclusión, se determina que los extractos de ambas algas cuentan con potencial antimicrobiano. <sup>17</sup>

En esta investigación se analiza una comparación entre la *Chlorella* y *Spirulina*, siendo estas las dos cepas que se consideran centrales de la investigación en proceso. Brindando una comparación cuantitativa que puede funcionar como base para los resultados propios de este trabajo.

Lio et al. <sup>18</sup>, Grecia. En la investigación “Identifying Antimicrobial Agents from *Chlorella sorokiniana*.” El objetivo de la investigación fue desarrollar y optimizar un método de extracción ecológico para evaluar la potencia antimicrobiana de los extractos obtenidos con estos solventes novedosos.

Este estudio se centró en la identificación de moléculas bioactivas dentro de *Chlorella sorokiniana*. Se aislaron péptidos y lípidos con potente capacidad para inhibir bacterias Gram positivas y Gram negativas. Los resultados muestran un potencial considerable para utilizar estas fracciones en el desarrollo de nuevos antimicrobianos. Además, los autores destacan la importancia de realizar pruebas en modelos animales, lo que podría abrir el camino a aplicaciones clínicas tanto en medicina humana como veterinaria. <sup>18</sup>

En este estudio se optimiza la extracción con diferentes solventes verdes obteniendo el máximo de componentes bioactivos de la *Chlorella sorokiniana*. Fisher CL et al.<sup>14</sup>, Sudáfrica, realizaron un estudio llamado “Discovery of antimicrobial activity in chemical

extracts from high-biomass algal–bacterial systems”. donde su principal objetivo fue explorar alternativas biotecnológicas sostenibles para combatir bacterias resistentes a antibióticos convencionales.

Se establecieron cultivos mixtos de algas (*Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.*) y bacterias (*Bacillus subtilis* y *Escherichia coli*) en condiciones controladas. Los distintos metabolitos extraídos se probaron frente a bacterias Gram positivas y Gram negativas de importancia clínica. Los resultados confirmaron inhibición significativa, demostrando que los cultivos mixtos producen mayor diversidad de compuestos antimicrobianos que los aislados.<sup>19</sup>

El estudio aporta evidencia sobre la importancia de la investigación en el área botánica para poder obtener fuentes de antimicrobianos. Para la investigación actual, refuerza la necesidad de considerar tanto a *Chlorella sp.* así como la *Arthrospira sp.* en un contexto de sinergismo positivo para potenciar el efecto antimicrobiano. Generando posibilidades de experimentación en biomedicina y agroindustria al proponer que el efecto en conjunto de estos dos géneros sea beneficioso en el área de nuestra investigación.

En este trabajo se revisaron múltiples estudios previos que evaluaron la composición bioquímica de *Chlorella vulgaris*. La recopilación de información reporta proteínas, péptidos, antioxidantes y polisacáridos con propiedades antimicrobianas. Se concluyó que *Chlorella vulgaris* es segura para el consumo humano y que tiene aplicaciones amplias en diferentes campos de estudio de interés humano y veterinario.<sup>20</sup>

Este trabajo proporciona un fundamento sólido que respalda el uso de *Chlorella vulgaris* en la investigación antimicrobiana. Contribuye con información vital para la utilización de las microalgas en contextos alimenticios y farmacéuticos. Para investigaciones actuales, constituye una guía clave en la integración de la *Chlorella vulgaris* como una potencial fuente de compuestos bioactivos utilizables en diversas áreas de interés.

El-Shafiey et al.<sup>21</sup>, Egipto. Donde realizaron un estudio centrado en identificar compuestos antimicrobianos llamado “Mining potential antimicrobial compounds of *Arthrospira platensis*: *in vitro* screening of ethanolic extract”. El objetivo del trabajo fue validar experimentalmente su capacidad para inhibir bacterias de importancia clínica.

Esta investigación propone a la *Arthrospira platensis* como una fuente sostenible de nuevos antimicrobianos, en el proceso de elaboración se obtuvieron extractos etanólicos de la

*Arthrospira platensis* y se realizaron ensayos antimicrobianos in vitro. Los resultados obtenidos demostraron inhibición frente a bacterias Gram positivas y Gram negativas. <sup>21</sup>

El estudio aporta evidencia de que *Arthrospira platensis* puede reemplazar o complementar antibióticos sintéticos. Fortaleciendo el concepto de que las cianobacterias son una fuente importante para investigar para la obtención de nuevos principios bioactivos con actividad antimicrobiana. Los resultados confirman la versatilidad de los metabolitos bioactivos de *Arthrospira platensis* como agentes antimicrobianos naturales.

Mendes AR et al.<sup>22</sup>, Portugal. En colaboración con su equipo de trabajo realizaron una revisión integral de la literatura sobre *Chlorella sp.* Donde su objetivo principal fue consolidar el conocimiento básico sobre los compuestos químicos, bioactividades y aplicaciones biotecnológicas de esta microalga y sus posibles funciones antibacterianas.

El estudio buscó ofrecer un marco conceptual para investigaciones futuras. Donde se analizaron y recopilaron estudios previos que evaluaron la importancia de los metabolitos bioactivos, propiedades antioxidantes y antimicrobianas de *Chlorella sp.* La revisión bibliográfica confirmó que las especies de este género poseen amplio potencial en diversos campos como el médico, farmacéutico, alimenticio e industrial. Esto debido a la gran diversidad de metabolitos útiles para aplicaciones terapéuticas y nutricionales. <sup>22</sup>

Este antecedente aporta un marco de referencia para el aprovechamiento integral de *Chlorella sp.* otorgando una visión de esta microalga como recurso estratégico en diferentes áreas de interés veterinario y humano. Para la investigación actual, constituye un respaldo teórico sólido que facilita nuevas aplicaciones.

Jamshidi-Kia et al. <sup>23</sup>, Irán. Se realizó un estudio experimental para evaluar el efecto de extractos de *Chlorella vulgaris* aplicado como foliar. el Estudio de nombre “Efficacy of foliar application of *Chlorella vulgaris* extract on spearmint yield and essential oil composition.”. El cual tenía como objetivo determinar cómo estos extractos influyen en la producción y composición de aceites esenciales con propiedades antimicrobianas.

Se investigó el efecto de la aplicación foliar de *Chlorella vulgaris* en el cultivo de menta y su impacto en la salud. Los ensayos de campo revelaron que este tratamiento no solo aumentó el rendimiento de la cosecha, sino que también mejoró la composición de

metabolitos secundarios y la calidad de los aceites esenciales, vinculando así la productividad agrícola con el valor terapéutico del cultivo..<sup>23</sup>

Si bien el potencial de las microalgas se ha centrado tradicionalmente en el ámbito biomédico, su estudio actual revela un impacto multidimensional que incluye el sector agroindustrial. Evidencia reciente señala que la aplicación de *Chlorella vulgaris* en cultivos permite una optimización de la producción agrícola a la vez que promueve la generación de metabolitos secundarios de interés farmacológico. Por tanto, integrar este enfoque en la investigación permite abordar las microalgas no solo como fuente de nuevos antibióticos, sino como pilares de una estrategia de sostenibilidad que vincula la salud de los ecosistemas con la innovación terapéutica

Fisher CL et al.<sup>19</sup>, Sudáfrica. Realizaron un estudio complementario enfocado en validar los cultivos de algas como fuentes de compuestos antimicrobianos. El nombre del trabajo es “Algal–bacterial co-culture extracts as novel antimicrobial sources: a high-biomass screening approach.”. El objetivo fue comprobar la viabilidad de aprovechar interacciones algales y bacterianas como modelo experimental.

El trabajo de investigación busca consolidar la visión de fábricas bioactivas en función del comportamiento y los beneficios de las microalgas en distintas áreas de interés. Se realizaron ensayos de laboratorio con extractos obtenidos de cultivos de microalgas de alta densidad. Los extractos fueron probados frente a bacterias patógenas y mostraron inhibición significativa. Los hallazgos confirmaron la capacidad de los sistemas mixtos para producir metabolitos con propiedades antimicrobianas.<sup>19</sup>

Este antecedente refuerza el papel de los cultivos en la biotecnología antimicrobiana. Valida el potencial de las interacciones microbianas en la generación de compuestos bioactivos. Para investigación en curso, ofrece un respaldo sólido a la exploración de sistemas simbióticos.

Selim MI et al.<sup>24</sup>, Egipto. En la investigación “Unveiling the potential of spirulina algal extract as promising antibacterial and antibiofilm agent against carbapenem-resistant *Klebsiella pneumoniae*: in vitro and in vivo study.” Donde su principal objetivo fue investigar la eficacia del extracto de *Arthrospira sp.* como un agente antibacteriano contra la *Klebsiella pneumoniae* resistente a carbapenémicos.

En el estudio se realizaron diferentes perfilados del extracto con determinación de la concentración mínima inhibitoria (CMI), evaluación de la alteración de la membrana, expresiones genéticas. Se implementó un modelo en ratones para evaluar el efecto antimicrobiano en neumonía, realizando una comparación con un fármaco estándar (colistina). Se concluye que el extracto de *Arthrospira sp.* mostró una acción antibacteriana tanto *in vitro* e *in vivo*, con efectos comparables con el fármaco estándar de Colistina.<sup>24</sup>

El antecedente descrito realiza aportes en la investigación en desarrollo ya que presenta una prueba de concepto sólido sobre la eficacia de la *Arthrospira* contra bacterias multirresistentes como la *Klebsiella pneumoniae* resistente a carbapenémicos. Lo que genera un interés añadido y relevancia clínica al trabajo de investigación propuesto.

Pianta et al.<sup>15</sup>, Alemania/Suiza. Se realizó un estudio con el fin de evaluar la actividad antibacteriana y antifúngica de extractos de *Arthrospira platensis*. El estudio nombrado “*In vitro* antibacterial and antifungal activity of an *Arthrospira platensis* extract”. Donde el objetivo de la investigación fue determinar la amplitud del espectro antimicrobiano de la microalga.

El estudio buscó afianzar el valor terapéutico de la *Arthrospira platensis* como un agente de importancia en diferentes áreas, se obtuvieron extractos de *Arthrospira platensis* y se realizaron pruebas *in vitro* frente a bacterias y hongos de relevancia clínica. Los resultados validaron la amplia eficacia de los metabolitos bioactivos presentes en la microalga demostrando la inhibición significativa en diversos microorganismos.<sup>15</sup>

Este antecedente respalda el uso de la *Arthrospira platensis* como un recurso a la mano de los investigadores frente a diferentes tipos de infecciones. Refuerza la posibilidad de aprovechar sus metabolitos bioactivos en terapias tanto antibacterianas como antifúngicas. Para la investigación actual, ofrece evidencia de la multifuncionalidad de las microalgas en contextos clínicos.

Hosseinabadi et al.<sup>25</sup>, Irán. En la investigación “Antimicrobial activity of partially purified polysaccharide extracts from *Arthrospira platensis* PCST5”. El objetivo del trabajo fue evaluar el efecto antimicrobiano de extractos de polisacáridos de *Arthrospira platensis* PCST5.

Se realizaron ensayos *in vitro* con extractos parcialmente purificados, probados contra *E. coli*, *S. aureus* y *Candida albicans*. Los resultados mostraron inhibición significativa con CMI bajas, indicando una elevada potencia antimicrobiana.<sup>25</sup>

Este antecedente fortalece la investigación actual al ofrecer evidencia experimental de que los compuestos derivados de *Arthrospira sp.* tienen eficacia directa contra bacterias y hongos patógenos, generando evidencia documentada de la acción antimicrobiana de estos organismos y sus posibles beneficios contra cepas bacterianas multirresistentes de interés humano y veterinario.

Fihri et al.<sup>26</sup>, Marruecos. En la investigación “Antibacterial and antioxidant activities of *Chlorella vulgaris* using deep eutectic solvents”. El objetivo fue explorar técnicas verdes de extracción para obtener compuestos antimicrobianos.

Este trabajo exploró un método innovador para extraer compuestos bioactivos de *Chlorella vulgaris* utilizando solventes eutéricos profundos. Esta técnica verde permitió obtener extractos con mayor concentración de metabolitos, los cuales presentaron una actividad antimicrobiana significativa contra bacterias como *E. coli* y *S. aureus*. Además, se comprobó que los extractos tenían una alta capacidad antioxidante, lo cual aumenta su valor biológico y su potencial como insumo terapéutico. Lo que demuestra cómo innovaciones metodológicas fortalecen la aplicabilidad de *Chlorella sp.* como antimicrobiano.<sup>26</sup>

Esta investigación aporta una alternativa innovadora en la extracción de compuestos bioactivos, como la introducción de Disolventes Eutéricos Profundos (DES, por sus siglas en inglés), las cuales son mezclas económicas, biodegradables y de baja toxicidad.

Azmy L. et al.<sup>27</sup>, Egipto. Realizaron un estudio de nombre “*Arthrospira platensis*-mediated gold nanoparticles with antimicrobial activity against *S. pneumoniae*”. Donde el objetivo principal fue comprobar su efectividad antimicrobiana contra *Streptococcus pneumoniae*, causante de infecciones respiratorias graves.

En este estudio se evidenció que los metabolitos de *Arthrospira sp.* por síntesis verde funcionan como estabilizadores y reductores en la formación de nanopartículas de oro. Las nanopartículas fueron probadas en ensayos *in vitro* frente a cepas de *S. pneumoniae*. Los resultados demostraron una potente inhibición aun cuando se administraban a concentraciones considerablemente bajas, lo que valida su potencial terapéutico.<sup>27</sup>

Se evidencia que la *Arthrospira sp.* puede ser empleada como una terapia efectiva segura y sostenible frente a patógenos resistentes, generando un refuerzo en la investigación ya que demuestra la efectividad al combinar biotecnología verde con nanomedicina. Esto aporta una alternativa a utilizar para posibles terapias antimicrobianas.

Shaima et al. <sup>28</sup>, Malasia. En la investigación “Unveiling antimicrobial activity of microalgae *Chlorella sp.* against pathogenic bacteria.” El objetivo de la investigación de este artículo fue evaluar el efecto antimicrobiano de un extracto metanólico de *Chlorella sp.* contra bacterias de importancia clínica como *Staphylococcus aureus* y *Escherichia coli*.

Los ensayos mostraron valores de CMI bastante amplios, confirmando una actividad relevante. Los autores sugieren que esta acción se debe principalmente a la presencia de ácidos grasos insaturados y compuestos fenólicos en el extracto. El estudio concluye que *Chlorella sp.* representa una fuente prometedora de compuestos antimicrobianos aplicables en medicina humana y veterinaria. <sup>28</sup>

Los ensayos aportan conocimiento cuantitativo a la proporcionar rangos de CMI contribuyendo también con información confirmatoria del efecto antimicrobiano de la *Chlorella sp.* dando validez a la investigación en curso.

Ilieva Y, et al. <sup>29</sup>, Bulgaria. En su investigación titulada “Antimicrobial and Ecological Potential of *Chlorellaceae* and *Scenedesmaceae* with a Focus on Wastewater Treatment and Industry”. El objetivo principal de la investigación fue realizar una evaluación de las actividades antimicrobianas de las microalgas, incluyendo aquellas relevantes para el tratamiento de aguas residuales a nivel industrial.

Se logró evidenciar que las microalgas no solo podían metabolizar los contaminantes, como el nitrógeno y el fósforo presentes en las aguas residuales, sino que también generaba un efecto antibacteriano contra los patógenos presentes. La actividad antimicrobiana *in vitro* de la *Chlorellaceae* y *Scenedesmaceae* es variada. Las especies pueden ser inactivadas, tener un efecto bajo, medio o fuerte. Se logró mostrar que varias cepas como la *C. vulgaris* y otras especies de *Chlorellaceae* presentan una actividad antimicrobiana excepcionalmente alta. Con frecuencia, ambos géneros presentan resultados superiores o casi tan buenos como los de los antibióticos contra algunos patógenos. <sup>29</sup>

En esta investigación se mostró que la *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmaceae* tienen un efecto antimicrobiano contra distintos patógenos. La actividad antimicrobiana de ambos taxones podría aprovecharse en la depuración de aguas residuales, disminuyendo la carga de microorganismos patógenos.

Rojas V. <sup>30</sup>, Chile. En la investigación “Cyanobacteria and eukaryotic microalgae as emerging sources of antibacterial peptides”. Con el objetivo de evaluar el potencial antimicrobiano de la *Chlorella sp.* extraída de aguas estancadas y determinar si sus extractos tienen la capacidad de inhibir distintas cepas bacterianas.

El estudio fue de corte transversal y se centró en la microalga *Chlorella sp.* aislada de aguas estancadas en Ambato, Ecuador. Mostrando los métodos de cultivo y los solventes más adecuados para poder extraer los componentes bioactivos con función antimicrobiana. Estos extractos se utilizaron contra bacterias patógenas para humanos y los resultados obtenidos mostraron que los extractos de *Chlorella sp.* extraídos con alcohol isopropílico tienen una mejor actividad contra bacterias. <sup>30</sup>

Este estudio aporta información fundamental acerca del efecto antibacteriano que presenta la *Chlorella sp.* y hace aportes metodológicos importantes al indicar que el alcohol isopropílico es una excelente opción para extraer los componentes bioactivos de la microalga.

Abdel-Raouf N, et al. <sup>31</sup>, Bulgaria. Con su investigación llamada “Antimicrobial and antioxidant activities of green microalgae: *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus obliquus*, and *Spirulina platensis*”, donde el objetivo principal fue evaluar y comparar la actividad antimicrobiana e identificar el potencial antioxidante de los extractos crudos obtenidos de tres especies de microalgas ampliamente disponibles: *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus obliquus* y *Spirulina platensis*.

El estudio buscó determinar la viabilidad de estas fuentes naturales como alternativas seguras y económicas a los aditivos sintéticos en la industria alimentaria y farmacéutica. El trabajo se basó en el procesamiento de la biomasa de las tres microalgas, la cual fue sometida a una serie de extracciones utilizando diferentes solventes (metanol, etanol y agua). Este enfoque permitió aislar y obtener extractos de distinta polaridad, asegurando la extracción de los compuestos bioactivos presentes en las microalgas. Para cuantificar el potencial antioxidante, se emplearon ensayos espectrofotométricos estandarizados. Los resultados de la investigación muestran actividad biológica significativa entre las especies, los extractos de

*Spirulina platensis* mostraron actividad antioxidante y la mayor concentración de componentes bioactivos antimicrobianos. Sin embargo, las tres especies demostraron poseer un potencial antimicrobiano apreciable contra los patógenos probados, observándose a menudo una mayor eficacia contra las bacterias Grampositivas.<sup>31</sup>

El estudio demuestra que los extractos de *C. vulgaris* y *S. platensis* exhiben actividad antimicrobiana, brindando una correlación directa entre el alto contenido de compuestos fenólicos (antioxidantes) y la actividad biológica. Esto permite evidenciar que la actividad antimicrobiana podría estar relacionada con la naturaleza de estos metabolitos secundarios.

### **1.5.3 Antecedentes nacionales**

Silva-Benavides et al.<sup>32</sup>, Costa Rica. en su investigación llamada “Cyanoprocaryota y microalgas (Chlorophyceae y Bacillariophyceae) bentónicas dominantes en ríos de Costa Rica”. Cuyo objetivo principal fue identificar y caracterizar los géneros y especies de cianobacterias y de microalgas bentónicas pertenecientes a las clases Chlorophyceae (algas verdes) y Bacillariophyceae (diatomeas) dominantes en los ríos de Costa Rica.

En el estudio la metodología empleada consistió en recolectar y analizar muestras en 17 ríos de Costa Rica. Para asegurar una identificación completa, el equipo no solo realizó observaciones directas de las muestras frescas, sino que también procedió al aislamiento y cultivo de los microorganismos en medios nutritivos. En la investigación se concluyó que el grupo microalgal más diverso y abundante en los ecosistemas bentónicos de los ríos costarricenses es el de las diatomeas (Bacillariophyceae), con una identificación de 52 especies. Las cianobacterias también mostraron una presencia significativa, con géneros como *Leptolyngbya* y *Phormidium* siendo los más comunes en los sitios de muestreo.<sup>32</sup>

A pesar de que el estudio no contiene los datos de actividad antimicrobiana, es fundamental para establecer qué cepas nativas han sido identificadas y están disponibles. lo que genera información vital con respecto a la base de datos fundamental sobre las especies nativas que contribuyen a la ecología y al potencial biotecnológico de los cuerpos de agua dulce en Costa Rica.

Murillo-Vega et al.<sup>33</sup>, Costa Rica. En la investigación de nombre “Advances in microalgal biotechnology in Costa Rica: contributions from the Costa Rica Institute of Technology”. Cuyo objetivo principal fue hacer una revisión, analizar y destacar la creciente investigación en biotecnología microalgal en Costa Rica, concentrándose en las

contribuciones y los logros del Grupo de Investigación en Microalgas del Centro de Investigación en Biotecnología (CIB) del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR/TEC).

En este trabajo se realiza una revisión documental, que sintetiza y discute los avances y aplicaciones desarrolladas por el grupo del CIB-TEC. El enfoque no es la presentación de nuevos datos experimentales, sino la integración y el análisis del estado del arte de la investigación de microalgas a nivel nacional. Donde se concluye que la biotecnología microalgal en Costa Rica es un campo en constante crecimiento que ofrece soluciones autóctonas y sostenibles para el desarrollo ambiental, social y económico del país. <sup>33</sup>

Este antecedente es de importancia para la investigación en curso ya que proporciona un panorama actualizado de las cepas costarricenses y los proyectos que están generando compuestos bioactivos para la agricultura, ganadería y acuicultura, un campo que incluye la actividad antimicrobiana que es el enfoque de este trabajo de investigación.

Villalta-Romero F, et al. <sup>1</sup>, Costa Rica. En la investigación “Biotecnología microalgal en Costa Rica: Oportunidades de negocio para el sector productivo nacional. Tecnología en Marcha.” Donde su objetivo principal fue evaluar el potencial y las limitaciones de la biotecnología de microalgas como una vía para el desarrollo de negocios y la innovación en el sector productivo costarricense.

Este trabajo se enfoca en una revisión y síntesis que resalta el valor de la selección, conservación y escalamiento de cepas de microalgas que son nativas de Costa Rica, analizando su adaptabilidad y las técnicas de cultivo más eficientes. donde se resalta la utilidad de las microalgas en diferentes campos de interés veterinario y humano. En la investigación se concluye que en el país ya se cuenta con cepas nativas identificadas y el conocimiento técnico necesario para la producción a escala, lo que posiciona la investigación en microalgas como una herramienta poderosa para el desarrollo productivo sostenible, especialmente en la generación de compuestos bioactivos que pueden ser de interés en distintos campos de investigación. <sup>1</sup>

El antecedente brinda información para establecer un enfoque en el potencial de negocio de las cepas microalgas costarricenses para el sector productivo nacional, incluyendo la generación de metabolitos de alto valor y biofertilizantes, generando un marco de aplicación comercial y la viabilidad nacional de los compuestos bioactivos existentes en las

microalgas, lo cual justifica el valor práctico de la investigación sobre la actividad antimicrobiana y antioxidante.

Dr. Molina<sup>30</sup>, Costa Rica. En dicho artículo de prensa con el nombre “Costa Rica está entre los países con los niveles más graves de bacterias resistentes”. Cuyo objetivo fue emitir una alerta pública y urgente sobre la crisis de resistencia a los antibióticos en Costa Rica.

El análisis se fundamenta en los hallazgos y perspectivas del Dr. Marco Vinicio Molina, investigador de la Universidad de Costa Rica, quien a través de la divulgación de datos epidemiológicos posiciona al país entre las naciones con los niveles más críticos de bacterias resistentes. Según Molina, esta situación constituye una amenaza directa a la salud pública nacional, evidenciada por el preocupante incremento de la resistencia en patógenos comunes y de alta peligrosidad. Sus declaraciones subrayan una inminente inseguridad en la eficacia de los tratamientos médicos y los procedimientos hospitalarios en el entorno costarricense, lo que refuerza la necesidad de buscar nuevas rutas terapéuticas. <sup>5</sup>

Este antecedente brinda un aporte estrictamente estratégico y de justificación social. No proporciona datos de microalgas ni de cianobacterias, pero le da la razón de ser al proyecto que se encuentra en desarrollo. Otorgando información importante, como la situación de gravedad en la que se encuentra Costa Rica debido a los altos niveles de resistencia multibacteriana, la ineficacia de los antibióticos convencionales hace imprescindible explorar fuentes no tradicionales, como las microalgas y cianobacterias, para encontrar nuevas soluciones terapéuticas.

## **CAPÍTULO II- MARCO TEÓRICO**

El presente marco teórico reúne y organiza los conceptos fundamentales que sostienen la investigación “**Análisis comparativo del efecto antimicrobiano de *Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.* frente a microorganismos patógenos de interés veterinario y humano**”.

Al ser un análisis comparativo, se mencionan temas como: la problemática de la resistencia antimicrobiana, la taxonomía, fisiología de microalgas y cianobacterias, los principales biocompuestos (lípidos, compuestos fenólicos, polisacáridos y pigmentos) y sus mecanismos de acción (alteración de membranas, modulación redox, interferencia del *quorum sensing* y antibiofilm), así como los criterios metodológicos para CMI/CMB y evaluación de sinergias.

Este marco unifica el lenguaje, guía las decisiones experimentales y proporciona un contexto claro para la interpretación de los resultados.

## **2.1 Microalgas y cianobacterias**

Son organismos fotosintéticos unicelulares, mayoritariamente acuáticos, que pueden ser procariotas como las cianobacterias, por ejemplo, *Arthrospira sp.* o eucariotas como la microalga *Chlorella sp.* Estas dos son unas de las más estudiadas, la *Arthrospira sp.* comúnmente conocida como Spirulina y *Chlorella sp.*, debido a su alto contenido nutricional, capacidad de adaptación y producción de compuestos bioactivos. <sup>1,3</sup>

Una de las principales características de las microalgas, es su capacidad de realizar fotosíntesis oxigénica, utilizando la energía solar para convertir el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el agua en compuestos orgánicos, liberando oxígeno como subproducto. Esta capacidad las posiciona como actores clave en la regulación del ciclo del carbono y en la producción primaria de los ecosistemas acuáticos. <sup>1,3</sup>

Desde el punto de vista morfológico, las microalgas presentan una gran diversidad de formas y estructuras celulares, adaptadas a distintos ambientes, desde aguas dulces hasta ambientes hipersalinos o extremos. Su tamaño varía entre 1 y 100 micrómetros, lo que les permite una alta relación superficie-volumen, facilitando una eficiente captación de nutrientes y luz solar. <sup>28,31</sup>

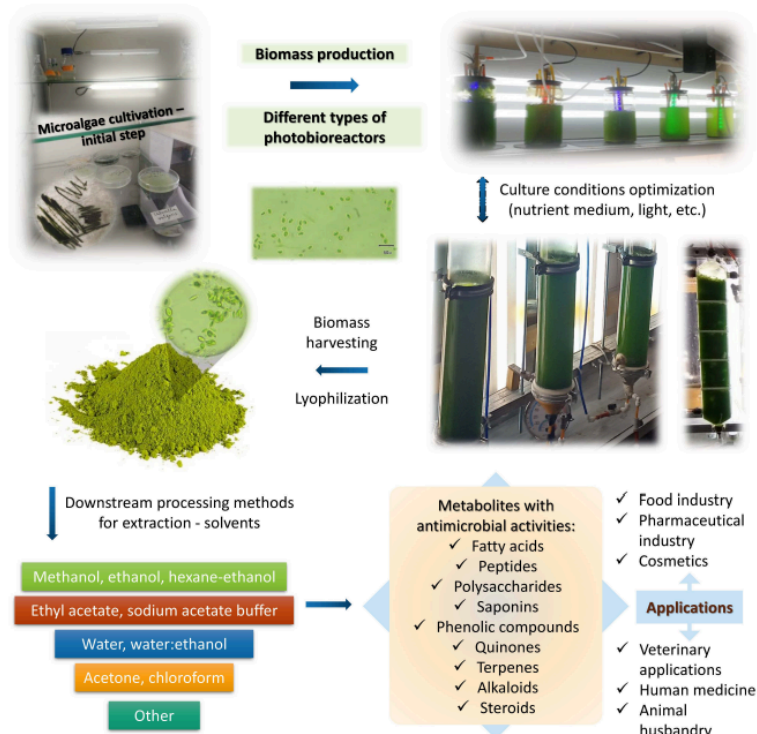
Asimismo, las microalgas y cianobacterias exhiben adaptaciones fisiológicas notables, como la tolerancia a variaciones extremas de temperatura, salinidad, radiación ultravioleta y pH. Estas características permiten su cultivo en ambientes controlados y no competitivos con

la agricultura tradicional, mediante sistemas abiertos (estanques) o cerrados (fotobiorreactores), favoreciendo su escalabilidad y sostenibilidad productiva.<sup>10</sup>

El interés biotecnológico en estos microorganismos ha crecido exponencialmente en los últimos años, impulsado por su rápido crecimiento, bajo requerimiento de nutrientes y su capacidad para capturar dióxido de carbono, contribuyendo a la mitigación del cambio climático y al desarrollo de procesos industriales más limpios.<sup>1,4,8</sup>

En la siguiente Ilustración se muestra la producción y aislamiento de metabolitos antimicrobianos de microalgas y cianobacterias y posibles aplicaciones, así como sus diferentes áreas de aplicación.

**Ilustración 1. Producción y aislamiento de metabolitos antimicrobianos de microalgas y cianobacterias y posibles aplicaciones**



**Fuente:** Ilustración recopilada de la referencia 38.

### 2.1.1 Composición Bioquímica

Las microalgas, como *Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.*, presentan una composición bioquímica excepcionalmente rica y diversa, lo que las convierte en una fuente prometedora de compuestos bioactivos con aplicaciones en nutrición, salud, agricultura y biotecnología.

Su perfil químico varía según la especie, las condiciones de cultivo, la fase de crecimiento y el tipo de medio utilizado, pero en general comparten los siguientes componentes clave:

#### **a) Proteínas**

Las microalgas pueden contener entre un 40% y 70% de proteínas en peso seco, siendo la *Arthrospira platensis* una de las más destacadas en este aspecto. Estas proteínas son de alto valor biológico, ya que incluyen todos los aminoácidos esenciales, lo que las convierte en una alternativa viable a las fuentes proteicas animales. Además, se ha demostrado que sus péptidos bioactivos poseen propiedades antioxidantes, antihipertensivas e inmunomoduladores.<sup>23</sup>

#### **b) Lípidos**

Los lípidos representan entre el 7% y 20% del peso seco, dependiendo de la especie y las condiciones de cultivo. *Chlorella sp.* y *Arthrospira sp.* contienen ácidos grasos poliinsaturados (PUFAs), como el ácido linoleico (omega-6) y el ácido alfa-linolénico (omega-3), esenciales para la salud cardiovascular y el desarrollo neurológico. Estos lípidos también son materia prima para la producción de biocombustibles de tercera generación.<sup>34,35</sup>

#### **c) Carbohidratos**

Los carbohidratos constituyen entre el 10% y 25% del peso seco. Incluyen polisacáridos estructurales y de reserva, algunos de los cuales presentan actividad immunoestimulante y antiviral. En particular, los polisacáridos sulfatados de *Arthrospira sp.* han mostrado efectos beneficiosos en la modulación del sistema inmune y en la inhibición de la replicación viral.<sup>29</sup>

#### **d) Pigmentos**

Las microalgas son una fuente importante de pigmentos naturales con propiedades antioxidantes. La *Chlorella sp.* es rica en clorofilas a y b, mientras que *Arthrospira sp.* contiene ficobiliproteínas como la ficocianina, un pigmento azul con potente actividad antioxidante y antiinflamatoria. Además, ambas especies contienen carotenoides como  $\beta$ -caroteno, luteína y zeaxantina, que protegen contra el daño oxidativo y tienen aplicaciones en la salud ocular y la cosmética.<sup>29</sup>

## e) Vitaminas y Minerales

Las microalgas aportan una amplia gama de micronutrientes esenciales. Contienen vitaminas del complejo B (incluyendo B12 en formas biodisponibles), vitamina C, E y K. También son ricas en minerales como hierro, calcio, magnesio, fósforo, potasio y zinc. Esta densidad nutricional las hace ideales para combatir deficiencias alimentarias y fortalecer el sistema inmunológico.<sup>34,35</sup>

### 2.1.2 Metabolitos bioactivos presentes en microalgas y cianobacterias

Estudios recientes han identificado en *Arthrospira* sp. y *Chlorella* sp. una amplia variedad de metabolitos bioactivos con elevada capacidad antioxidante y antimicrobiana. Entre los compuestos más relevantes se encuentran los ácidos grasos poliinsaturados, como el ácido linoleico y el ácido palmítico, los cuales han demostrado efectos bactericidas y beneficios para la salud humana.<sup>3</sup>

De igual manera, se han descrito polisacáridos sulfatados con capacidad para modular la respuesta inmune y ejercer efectos antivirales, junto con péptidos cíclicos eficaces contra bacterias patógenas de perfil multirresistente.<sup>3,7,14</sup>

Estas propiedades posicionan a las microalgas y cianobacterias como candidatas prometedoras para el desarrollo de nuevos agentes terapéuticos, así como para su incorporación en productos farmacéuticos, cosméticos, alimentos funcionales y soluciones ambientales, constituyendo una base sólida para su estudio como alternativas naturales frente a la resistencia antimicrobiana.<sup>7,14</sup>

### 2.1.3 Mecanismos de acción antimicrobiana de compuestos derivados de microalgas y cianobacterias

Los compuestos bioactivos producidos por microalgas y cianobacterias ejercen su actividad antimicrobiana mediante diversos mecanismos de acción que afectan estructuras y procesos esenciales de los microorganismos patógenos. Estos mecanismos dependen del tipo de metabolito, su concentración, el método de extracción y la naturaleza del microorganismo diana, y explican la eficacia observada frente a bacterias sensibles y multirresistentes.<sup>7,13,18</sup>

Uno de los mecanismos más estudiados es la alteración de la membrana celular bacteriana. Diversos metabolitos, como ácidos grasos insaturados, compuestos fenólicos y pigmentos lipofílicos, interactúan con la bicapa lipídica de la membrana, provocando un

aumento de su permeabilidad, pérdida de integridad estructural y desequilibrios osmóticos que conducen a la inhibición del crecimiento o a la muerte celular. Este mecanismo ha sido descrito principalmente para compuestos derivados de *Chlorella* sp., los cuales muestran una acción bactericida directa, especialmente frente a bacterias Gramnegativas. <sup>18, 26</sup>

Otro mecanismo relevante es la interferencia con la síntesis de la pared celular y de proteínas bacterianas. En el caso de *Arthrospira* sp., se ha reportado que metabolitos como las ficocianinas y los polisacáridos sulfatados interfieren en procesos biosintéticos esenciales, debilitando la estructura celular bacteriana y limitando su capacidad de multiplicación. Este tipo de acción se asocia principalmente a un efecto bacteriostático, observado con mayor frecuencia frente a bacterias Gram-positivas. <sup>11, 14, 15</sup>

Asimismo, algunos compuestos bioactivos de microalgas inducen estrés oxidativo en las células bacterianas mediante la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS). Este proceso provoca daño a macromoléculas celulares como lípidos, proteínas y ácidos nucleicos, comprometiendo la viabilidad del microorganismo. La acción antioxidante de estos compuestos en células eucariotas contrasta con su efecto pro-oxidante selectivo en microorganismos patógenos, lo que incrementa su interés terapéutico. <sup>14, 18</sup>

Adicionalmente, se ha descrito la interferencia con sistemas de comunicación bacteriana, particularmente el *quorum sensing*. Algunos metabolitos derivados de microalgas y cianobacterias son capaces de inhibir estas señales químicas, reduciendo la expresión de factores de virulencia y la formación de biopelículas. La inhibición de biopelículas resulta especialmente relevante en el tratamiento de infecciones persistentes, ya que estas estructuras confieren una elevada resistencia a los antibióticos convencionales. <sup>11, 14, 18</sup>

Estudios recientes también han señalado la capacidad de ciertos extractos microalgales para ejercer una actividad antibiofilm, impidiendo la adhesión inicial de las bacterias a superficies biológicas o inertes y favoreciendo la desestabilización de biopelículas ya formadas. Este mecanismo ha sido documentado para extractos de *Arthrospira platensis* frente a cepas multirresistentes como *Klebsiella pneumoniae*, reforzando su potencial como agente terapéutico complementario. <sup>14, 19</sup>

En conjunto, estos mecanismos de acción explican la diversidad de respuestas antimicrobianas observadas en *Arthrospira* sp. y *Chlorella* sp., así como su carácter complementario. Basándose en lo antes descrito mientras *Arthrospira* sp. actúa predominantemente mediante mecanismos bacteriostáticos asociados a la interferencia

metabólica y estructural, *Chlorella sp.* presenta una acción bactericida más directa basada en la disrupción de la membrana celular.<sup>14,18,20</sup>

La comprensión de estos mecanismos resulta fundamental para sustentar el uso de microalgas y cianobacterias como fuentes naturales de nuevos agentes antimicrobianos, y para el desarrollo de estrategias terapéuticas alternativas frente a la creciente resistencia antimicrobiana que afectan en gran manera las terapias y protocolos convencionales.

#### **2.1.4 Perspectivas terapéuticas**

Las terapias alternativas basadas en productos naturales han adquirido una importancia creciente en la investigación biomédica moderna. Numerosos estudios han señalado que los metabolitos bioactivos producidos por estos organismos pueden presentar propiedades farmacológicas relevantes que contribuyen a la prevención y tratamiento de diversas enfermedades. En este contexto, los organismos marinos han emergido como una fuente particularmente rica en metabolitos bioactivos, debido a la diversidad química que caracteriza a los ecosistemas oceánicos.<sup>37</sup>

Las microalgas y cianobacterias constituyen uno de los grupos de organismos más estudiados dentro de la biotecnología marina. Estos organismos fotosintéticos poseen una elevada capacidad metabólica que les permite sintetizar compuestos como carotenoides, polisacáridos sulfatados, ácidos grasos poliinsaturados y compuestos fenólicos. La presencia de estos metabolitos bioactivos ha despertado un gran interés científico debido a sus propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y antimicrobianas.<sup>39</sup>

Asimismo, se estima que existen miles de especies de microalgas, muchas de las cuales aún no han sido completamente estudiadas desde el punto de vista bioquímico. Esta diversidad biológica representa una oportunidad importante para el descubrimiento de nuevos compuestos con potencial terapéutico, uno de los aspectos más relevantes en el estudio de las microalgas y cianobacterias es su capacidad para producir metabolitos secundarios con actividad biológica significativa. Estos compuestos cumplen funciones ecológicas en los organismos que los producen, pero también pueden ejercer efectos beneficiosos en humanos cuando son utilizados en aplicaciones biomédicas o nutraceuticas.<sup>40</sup>

Diversos estudios recientes han demostrado que los extractos derivados de microalgas y cianobacterias pueden inhibir el crecimiento de bacterias patógenas y otros microorganismos. Esta actividad antimicrobiana como se ha mencionado anteriormente se ha atribuido a la presencia de compuestos bioactivos capaces de alterar la integridad de las

membranas celulares microbianas o interferir con procesos metabólicos esenciales para su supervivencia.<sup>41</sup>

En este contexto, los compuestos derivados de microalgas y cianobacterias representan una fuente prometedora de nuevos agentes antimicrobianos que podrían contribuir al desarrollo de tratamientos alternativos frente a infecciones bacterianas. En relación con las perspectivas terapéuticas, la literatura científica reciente continúa explorando nuevas aplicaciones biomédicas derivadas de estos organismos.<sup>42</sup>

## 2.2 *Arthrospira* sp. (Spirulina)

El término “Spirulina o Espirulina” ha sido utilizado de forma generalizada para referirse indistintamente a dos géneros de cianobacterias: *Arthrospira* sp. y *Spirulina* sp., así como a dos especies de interés económico: *S. platensis* y *S. máxima*. Estas especies son ampliamente cultivadas y comercializadas debido a sus reconocidas propiedades nutricionales y beneficios potenciales para la salud.

No obstante, desde 1989 se ha establecido con mayor claridad que *Arthrospira* sp. y *Spirulina* sp. son géneros taxonómicamente distintos. En la siguiente tabla se muestran las principales características que separan a los géneros *Arthrospira* y *Spirulina*.

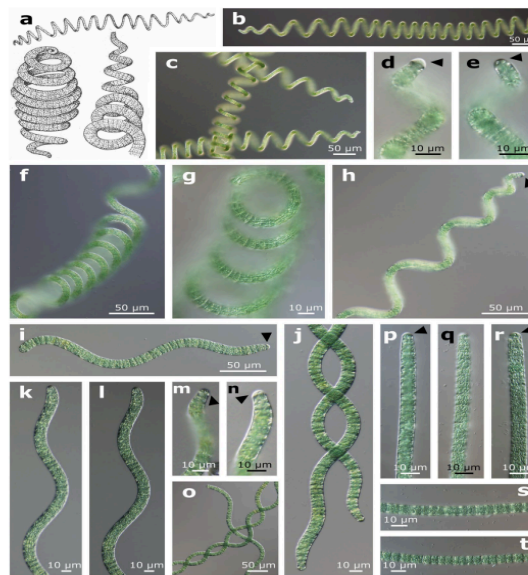
**Tabla 1. Principales características que separan a los géneros *Arthrospira* y *Spirulina*.**

Característica	<i>Arthrospira</i> sp. (Spirulina comercial)	<i>Spirulina</i> sp. (Sentido estricto)
<b>Uso principal</b>	Consumo humano (Suplementos)	Investigación científica, Ecosistemas
<b>Septos (paredes)</b>	Visibles al microscopio óptico	Invisibles y muy difíciles de ver
<b>Forma de hélices</b>	Espirales grandes y abiertas	Espirales muy apretadas y cerradas
<b>Grosor de filamentos</b>	Más gruesas (6 a 12 µm)	Muy finas (1 a 3 µm)
<b>Hábitat</b>	Aguas muy alcalinas (pH 8.5-11)	Diversos (aguas marinas, salobres y dulces)
<b>Seguridad</b>	Alta seguridad para el consumo humano	No se cultiva para consumo masivo

**Fuente:** Información recopilada de las referencias 1, 41 y 65.

En la investigación realizada por Nowicka-Krawczyk <sup>43</sup>, al analizar la especie de *Arthrospira sp.* en Polonia, diferenciándose claramente del género *Spirulina* mediante análisis morfológicos y filogenéticos. La investigación concluye que la cianobacteria comercializada como "Spirulina", realmente pertenece evolutivamente al género *Arthrospira*, validando su distinción genética (familias diferentes) y estructural (presencia de septos visibles). En la siguiente Ilustración se pueden observar las diferentes composiciones morfológicas que separan a los géneros *Arthrospira* y *Spirulina*.

**Ilustración 2. Composiciones morfológicas de los géneros *Arthrospira* y *Spirulina*.**



**Fuente:** Ilustración recopilada de la referencia 43.

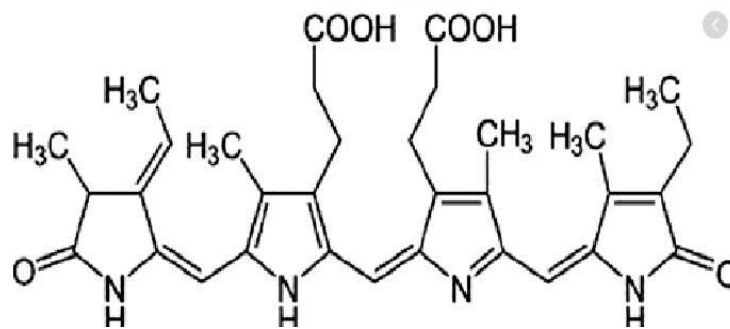
Así mismo, se puede reafirmar que la *Arthrospira sp.*, es una cianobacteria filamentosa que habita principalmente en ambientes alcalinos, como lagos y estanques con alta salinidad. Esta cianobacteria ha sido ampliamente cultivada y utilizada para el consumo humano debido a su elevado contenido de proteínas, vitaminas, minerales y ácidos grasos esenciales, entre los que destaca el ácido gamma-linolénico, como se ha mencionado en el transcurso del desarrollo de esta investigación. Estas características nutricionales y bioactivas la posicionan como un recurso de alto valor en aplicaciones alimentarias, farmacológicas y biotecnológicas. <sup>43</sup>

### 2.2.1 Composición bioquímica

Las especies de *Arthrospira sp.* posee una de las composiciones bioquímicas más completas entre las cianobacterias, lo que la convierte en un alimento funcional de alto valor:

1. **Proteínas:** Representan entre el 60% y 70% del peso seco. Son proteínas completas, con todos los aminoácidos esenciales, como la Ficobiliproteínas (Ficocianina) con acción antibacteriana directa.<sup>39</sup> En la Ilustración 3 se visualiza la estructura química de esta ficobiliproteína.

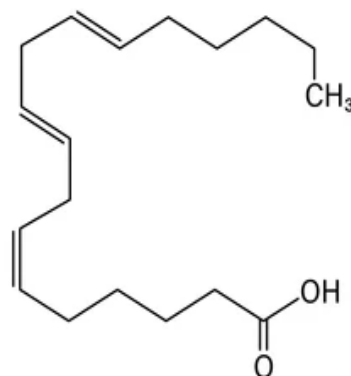
*Ilustración 3. Estructura química de Ficocianina.*



*Fuente: Ilustración recopilada de la referencia 38.*

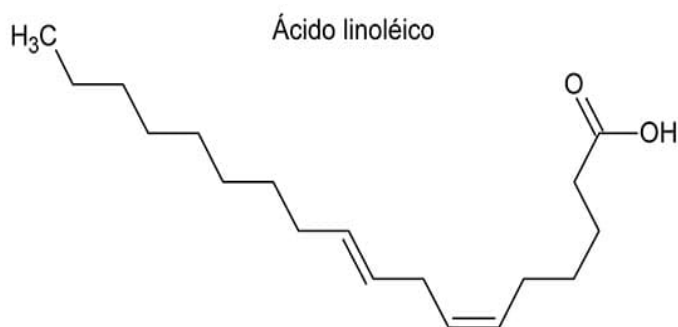
2. **Ácidos grasos esenciales:** Contiene ácido gamma-linolénico (GLA), un omega-6 con propiedades antiinflamatorias, así como ácido linoleico y ácido palmítico. Estos lípidos tienen aplicaciones en la prevención de enfermedades cardiovasculares y en la regulación del sistema inmune.<sup>33</sup> En la Ilustración 4, 5 y 6 se visualizan las estructuras químicas de los ácidos grasos antes mencionados.

*Ilustración 4. Estructura química del ácido gamma-linolénico (GLA).*



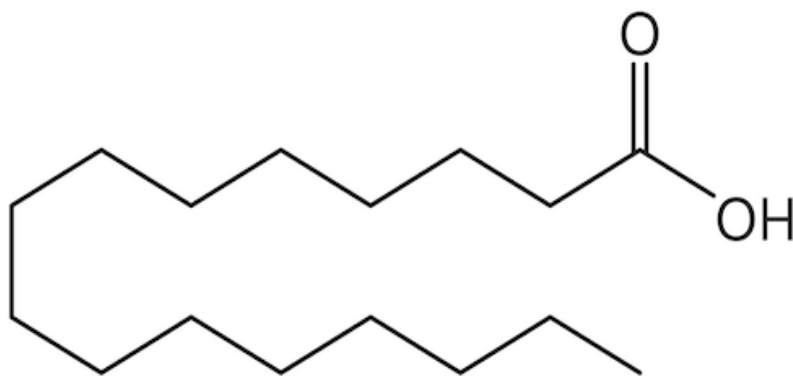
*Fuente: Ilustración recopilada de la referencia 44.*

**Ilustración 5. Estructura química de ácido linoléico.**



**Fuente:** Ilustración recopilada de la referencia 45.

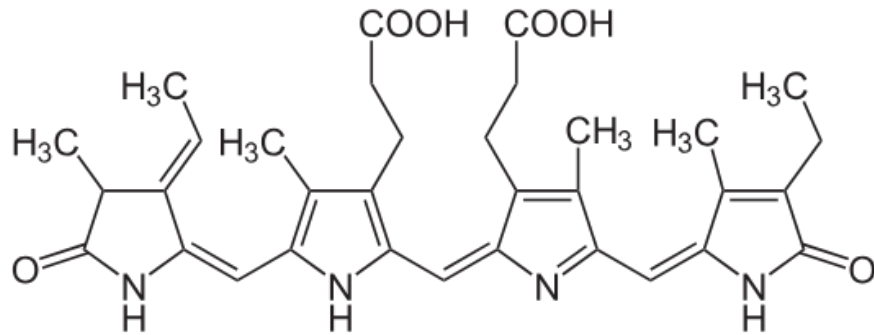
**Ilustración 6. Estructura química de ácido palmítico.**



**Fuente:** Ilustración recopilada de la referencia 45.

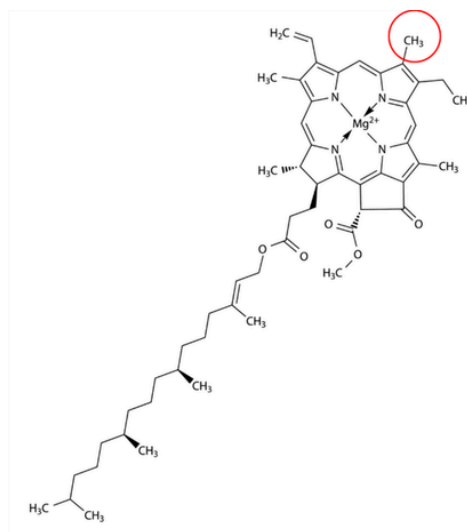
- 3. Pigmentos bioactivos:** La ficocianina, pigmento azul característico de *Arthrospira*, posee propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, hepatoprotectoras y neuroprotectoras. También contiene clorofila a,  $\beta$ -caroteno y otros carotenoides con efectos fotoprotectores y anticancerígenos.<sup>33</sup> En la Ilustración 7, 8 y 9 se visualizan las estructuras químicas de los pigmentos bioactivos antes mencionados.

*Ilustración 7. Estructura química de la ficocianina.*



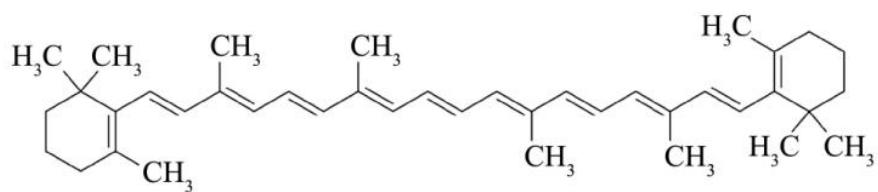
*Fuente: Ilustración recopilada de la referencia 45.*

*Ilustración 8. Estructura química de la clorofila a.*



*Fuente: Ilustración recopilada de la referencia 46.*

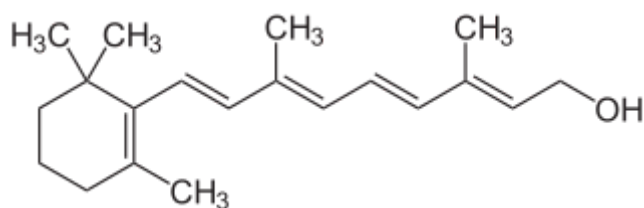
*Ilustración 9. Estructura química de los  $\beta$ -caroteno.*



*Fuente:* Ilustración recopilada de la referencia 47.

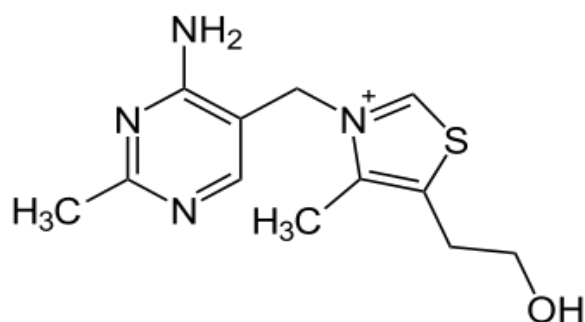
4. **Vitaminas y minerales:** Es fuente de vitaminas A (provitamina A), B1, B2, B12, E y K, así como minerales como hierro, calcio, magnesio, fósforo y potasio. Su contenido de vitamina B12 biodisponible es especialmente relevante para dietas vegetarianas y veganas.<sup>33</sup> En la Ilustración 10, 11, 12, 13, 14 y 15 se visualizan las estructuras químicas de las vitaminas antes mencionadas.

*Ilustración 10. Estructura química de la vitamina A (Retinol).*



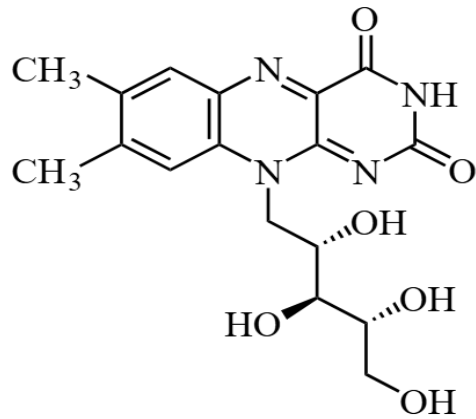
*Fuente:* Ilustración recopilada de la referencia 36.

*Ilustración 11. Estructura química de la Vitamina B1 (Tiamina).*



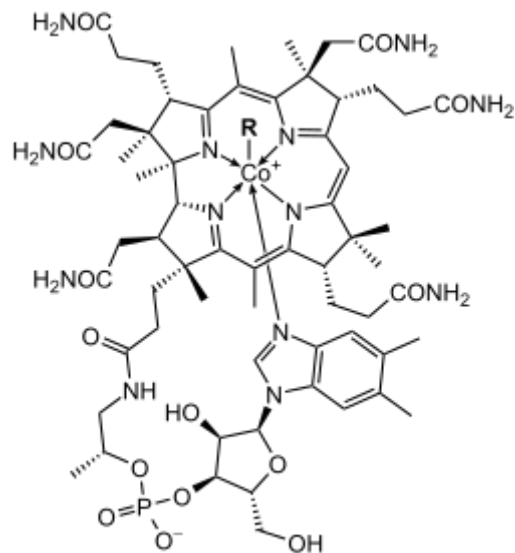
*Fuente:* Ilustración recopilada de la referencia 36.

*Ilustración 12. Estructura química de la Vitamina B2 (Piridoxina).*



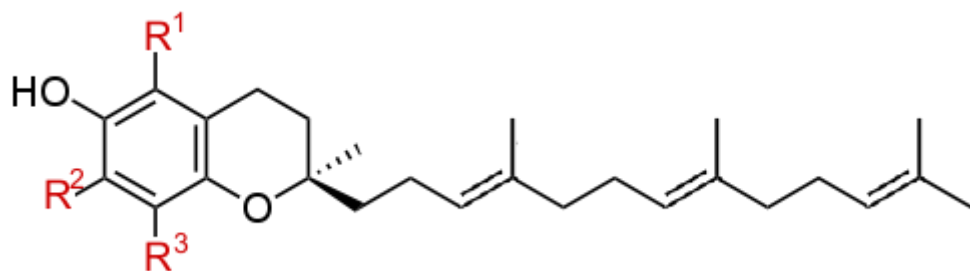
*Fuente:* Ilustración recopilada de la referencia 36.

**Ilustración 13. Estructura química de la Vitamina B12 (Cianocobalamina).**



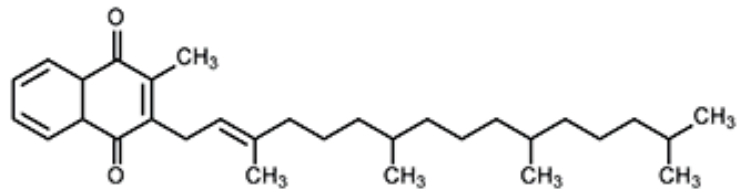
*Fuente:* Ilustración recopilada de la referencia 36.

**Ilustración 14. Estructura química de la Vitamina E (Tocoferol).**



*Fuente:* Ilustración recopilada de la referencia 36.

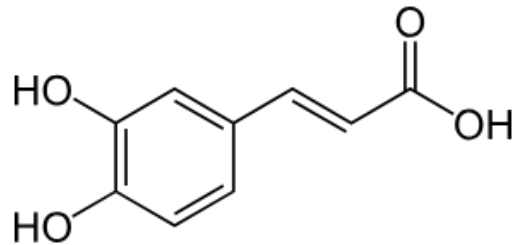
*Ilustración 15. Estructura química de la Vitamina K (Filoquinona).*



*Fuente: Ilustración recopilada de la referencia 36.*

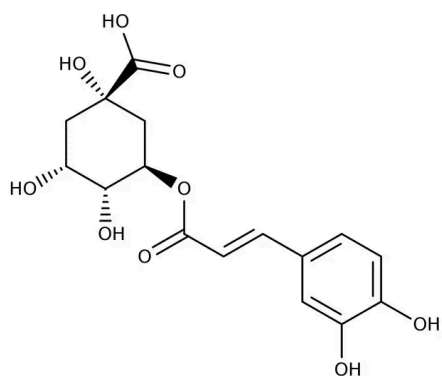
**5. Polisacáridos y metabolitos secundarios:** Incluye exopolisacáridos y mucopolisacáridos con efectos inmunomoduladores, antivirales y anticoagulantes. También se han identificado compuestos fenólicos como el ácido cafeico y el ácido clorogénico, con actividad antioxidante y antitumoral.<sup>52</sup> En la Ilustración 16 y 17 se visualizan las estructuras químicas de los metabolitos secundarios con acción antibacteriana antes mencionados.

*Ilustración 16. Estructura química de ácido cafeico.*



*Fuente: Ilustración recopilada de la referencia 43.*

*Ilustración 17. Estructura química del ácido clorogénico.*



**Fuente:** Ilustración recopilada de la referencia 47.

En la Ilustración 18 se pueden evidenciar las principales características estructurales de *Arthrospira sp.*

**Ilustración 18.** Principales características estructurales de *Arthrospira sp.*



**Fuente:** Ilustración recopilada de la referencia 49.

### 2.2.2 Actividad antimicrobiana de *Arthrospira sp.*

Investigaciones recientes han explorado el uso de extractos de *Arthrospira* en la formulación de cremas tópicas para tratar infecciones cutáneas (como las causadas por *Candida albicans*) y su integración en nanotecnología. Por ejemplo, el uso de extractos de

esta cianobacteria para mediar la síntesis de nanopartículas de oro ha demostrado una potencia superior contra bacterias resistentes, como *Streptococcus pneumoniae*, gracias a una mejor afinidad de unión con enzimas críticas para la replicación del ADN bacteriano.<sup>49</sup>

En conclusión, *Arthrospira sp.* representa una fuente sostenible de agentes antimicrobianos naturales. Su perfil multifuncional permite no solo el control de patógenos mediante mecanismos de lisis directa y daño estructural, sino también un soporte metabólico que mejora la defensa inmunológica, convirtiéndola en un candidato clave para el desarrollo de nuevos fármacos en la industria farmacéutica.<sup>49</sup>

### **2.2.3 Usos Tradicionales y Modernos de la *Arthrospira sp.***

El uso de *Arthrospira sp.* como alimento se remonta a tiempos prehistóricos. En México, era conocida como tecuitlatl por los aztecas, quienes la recolectaban del lago Texcoco. De forma paralela, en África, las tribus del lago Chad la consumían bajo el nombre de dihé. Su uso tradicional como fuente alimenticia se ha mantenido hasta la actualidad, y ha sido reconocida como un “superalimento” por su alto valor nutricional y sus múltiples beneficios para la salud humana. En la actualidad, se le atribuyen propiedades nutraceuticas, incluyendo efectos positivos en el tratamiento de alergias, anemia, enfermedades virales y cardiovasculares.<sup>35</sup>

Además, *Arthrospira sp.* ha demostrado efectos positivos en la reducción de marcadores de obesidad, mejora del perfil lipídico y fortalecimiento del sistema inmune. En acuicultura, su uso ha mejorado la salud intestinal de peces, mientras que en la industria alimentaria se valora por su perfil nutricional y sensorial.<sup>35</sup>

### **2.2.4 Cianobacterias del género *Arthrospira***

Numerosos estudios han señalado que los metabolitos bioactivos producidos por *Arthrospira sp.* presentan propiedades farmacológicas relevantes que contribuyen a la prevención y tratamiento de diversas enfermedades. En este contexto, los organismos marinos como las cianobacterias han emergido como una fuente particularmente importante para terapias alternativas, debido a la diversidad química que caracteriza a estos organismos.

<sup>37</sup>

Estos organismos poseen una elevada capacidad metabólica que les permite sintetizar compuestos como carotenoides, pigmentos, ácidos grasos poliinsaturados y compuestos

fenólicos. La presencia de estos metabolitos ha despertado un gran interés científico debido a sus propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y antimicrobianas.<sup>39</sup>

Diversos estudios recientes han demostrado que los extractos derivados de *Arthrospira sp.* pueden inhibir el crecimiento de bacterias patógenas y otros microorganismos. Esta actividad antimicrobiana se ha atribuido a la presencia de compuestos bioactivos capaces de interferir con procesos metabólicos esenciales para su supervivencia.<sup>41</sup>

El creciente problema de la resistencia antimicrobiana ha impulsado la búsqueda de nuevas alternativas terapéuticas. En este contexto, los compuestos derivados de cianobacterias representan una fuente prometedora de nuevos agentes antimicrobianos que podrían contribuir al desarrollo de tratamientos alternativos frente a infecciones bacterianas. En relación con el género *Arthrospira*, se continúan explorando nuevas aplicaciones y alternativas derivadas de estos organismos.<sup>42</sup>

### **2.3 *Chlorella sp.***

El género *Chlorella* agrupa microalgas unicelulares pertenecientes a la clase *Trebouxiophyceae*, ampliamente reconocidas por su alta productividad biológica, su elevado contenido proteico y su capacidad de adaptación a diversos entornos acuáticos y terrestres. Estas microalgas presentan una organización celular eucariota más compleja en comparación con las cianobacterias, lo que les confiere una mayor versatilidad metabólica y un amplio potencial biotecnológico.<sup>7</sup>

Una de las características distintivas de *Chlorella sp.* es la presencia de una pared celular rígida, compuesta principalmente por celulosa y otros polímeros resistentes. Esta estructura contribuye tanto a la estabilidad de sus compuestos bioactivos como a su resistencia frente a condiciones ambientales adversas, permitiendo su cultivo en sistemas abiertos y cerrados bajo diversas condiciones fisicoquímicas.<sup>7</sup>

Desde el punto de vista metabólico, *Chlorella sp.* es capaz de sintetizar una amplia gama de metabolitos secundarios con aplicaciones en múltiples sectores industriales, lo que ha impulsado su estudio en áreas como la nutrición, la farmacología, la biotecnología ambiental y la medicina.<sup>7</sup>

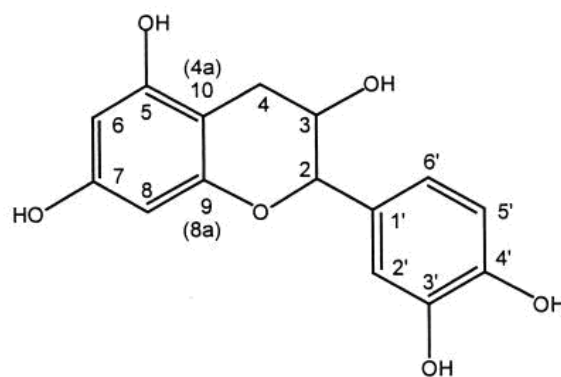
### 2.3.1 Composición bioquímica

La biomasa de *Chlorella sp.* se caracteriza por una composición bioquímica diversa y balanceada, que incluye proteínas de alto valor biológico, lípidos, carbohidratos, vitaminas, minerales y pigmentos fotosintéticos. <sup>18,22</sup>

Entre los principales compuestos bioactivos presentes en *Chlorella sp.* se encuentran:

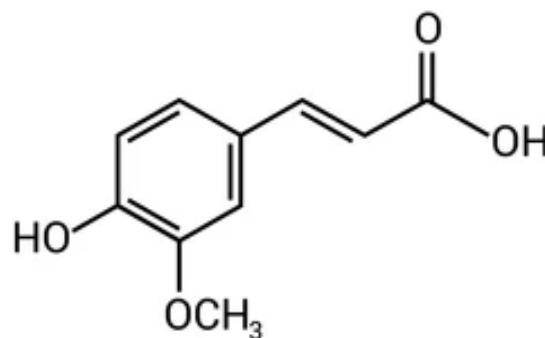
1. **Compuestos fenólicos:** Poseen reconocidas propiedades antioxidantes y antimicrobianas, como son las catequinas (antioxidante), ácido ferúlico (antiinflamatorio), luteolina. <sup>18,22</sup> En la Ilustración 19, 20 y 21, se pueden visualizar las siguientes estructuras químicas de los compuestos fenólicos antes mencionados.

**Ilustración 19. Estructura química de las Catequinas.**



**Fuente:** Ilustración recopilada de la referencia 47

**Ilustración 20. Estructura química del ácido ferúlico.**

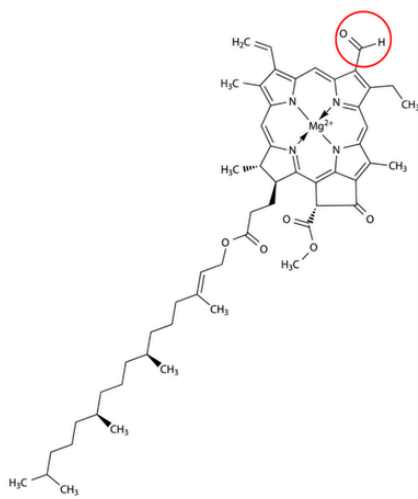


**Fuente:** Ilustración recopilada de la referencia 47.



*Fuente: Ilustración recopilada de la referencia 46.*

*Ilustración 23. Estructura química de la clorofila b.*



*Fuente: Ilustración recopilada de la referencia 46.*

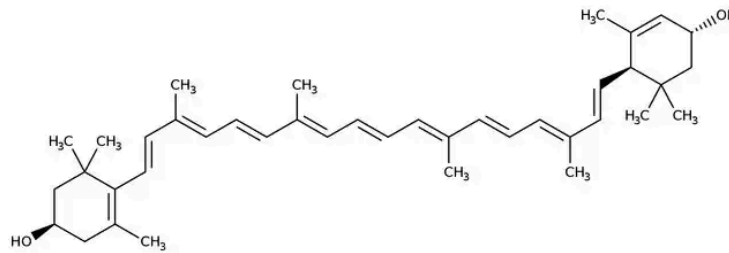
*Tabla 2. Análisis comparativo entre la clorofila a y b.*

Característica	Clorofila a	Clorofila b
Grupo en C	Metilo (--CH <sub>3</sub> )	Formilo (--CHO)
Fórmula molecular	C <sub>55</sub> H <sub>72</sub> MgN <sub>4</sub> O <sub>5</sub>	C <sub>55</sub> H <sub>70</sub> MgN <sub>4</sub> O <sub>6</sub>
Color	Verde azulado	Verde amarillento

*Fuente: Información recopilada de la referencia 46.*

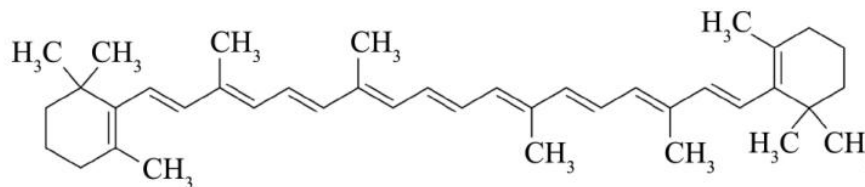
3. **Carotenoides:** entre ellos la luteína y el  $\beta$ -caroteno, con efectos antioxidantes y protectores celulares. <sup>12,37</sup> En la Ilustración 24 y 25, se visualizan las estructuras químicas de los carotenos antes mencionados.

*Ilustración 24. Estructura química de la Luteína.*



*Fuente: Ilustración recopilada de la referencia 50.*

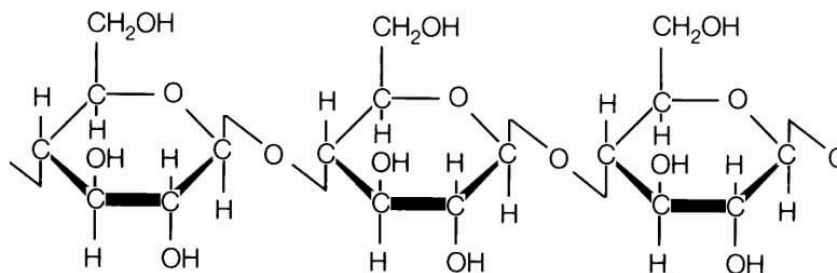
*Ilustración 25. Estructura química de los  $\beta$ -caroteno.*



*Fuente: Ilustración recopilada de la referencia 50.*

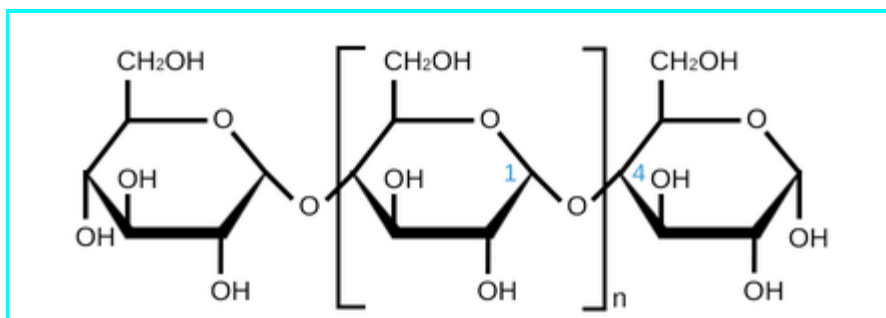
4. **Polisacáridos:** los más importantes son la celulosa (función estructural) y almidón (almacenamiento de energía) con actividad inmunoestimulante, capaces de modular la respuesta inmune del organismo. <sup>12,37</sup> En la Ilustración 26 y 27, se muestran las estructuras químicas de los polisacáridos antes mencionados. Además, en la tabla 3 se esclarecen las diferencias estructurales y funcionales del almidón y la celulosa.

*Ilustración 26. Estructura química de la celulosa.*



*Fuente: Ilustración recopilada de la referencia 33.*

**Ilustración 27. Estructura química del almidón.**



**Fuente:** Ilustración recopilada de la referencia 46.

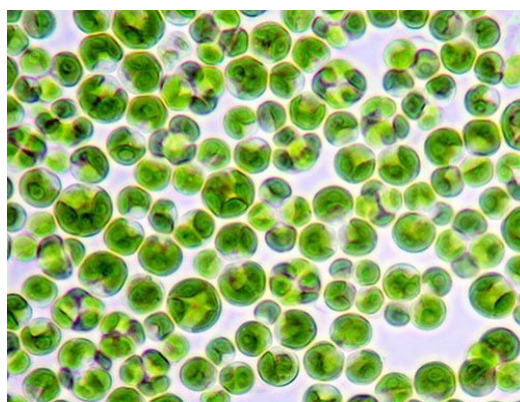
**Tabla 3. Análisis comparativo entre el almidón y la celulosa.**

Característica	Almidón	Celulosa
Unidad monomérica	alfa-D-glucosa	beta-D-glucosa
Tipo de enlace	alfa-(1,4) y alpha-(1,6)	beta-(1,4)
Estructura espacial	Helicoidal (espiral)	Lineal y rígida
Función en Chlorella	Reserva energética	Estructural (pared celular)
Digestibilidad humana	Alta (por amilasas)	Baja (por fibra)
Solubilidad en agua	Parcialmente soluble	Insoluble

**Fuente:** Información recopilada de las referencias 22, 41 y 48.

Esta composición bioquímica se confiere a *Chlorella sp.* un elevado valor funcional, posicionándose como una microalga de interés tanto nutricional como terapéutico. En la siguiente Ilustración se muestran las principales características estructurales de *Chlorella sp.*

**Ilustración 28. Principales características estructurales de Chlorella sp.**



*Fuente: Ilustración recopilada de la referencia 51.*

### 2.3.2 Usos tradicionales y modernos de la *Chlorella*

A diferencia de *Arthrospira sp.*, cuyo uso tradicional se remonta a épocas prehispánicas, la utilización de *Chlorella sp.* se ha desarrollado principalmente en el contexto de la investigación científica moderna. Su rápido crecimiento, alta eficiencia fotosintética y capacidad para sintetizar compuestos bioactivos han favorecido su aplicación en diversos campos.<sup>18,22</sup>

En el ámbito ambiental, *Chlorella sp.* ha sido ampliamente estudiada por su capacidad de biorremediación, destacándose su uso en el tratamiento de aguas residuales. Esta microalga puede absorber y metabolizar contaminantes como nitrógeno, fósforo, metales pesados y compuestos orgánicos tóxicos, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental y a la economía circular.<sup>12,37</sup>

Asimismo, *Chlorella sp.* ha sido investigada como materia prima para la producción de biocombustibles de tercera generación, debido a su capacidad para acumular lípidos. Su cultivo puede integrarse en sistemas de captura de dióxido de carbono, lo que la convierte en una alternativa prometedora para la mitigación del cambio climático.<sup>12,37</sup>

En el ámbito farmacológico y biomédico, los extractos de *Chlorella sp.* han mostrado propiedades antimicrobianas, antivirales, antiinflamatorias y hepatoprotectoras, lo que ha impulsado su uso potencial en el desarrollo de suplementos nutricionales, fármacos naturales y terapias complementarias.<sup>12,37</sup>

#### **a) Tratamiento de aguas residuales:**

La *Chlorella sp.* tiene una notable capacidad para absorber y metabolizar contaminantes presentes en aguas residuales, como nitrógeno, fósforo, metales pesados (cadmio, plomo, mercurio) y compuestos orgánicos tóxicos. Se ha utilizado con éxito en la depuración de efluentes industriales, aguas residuales urbanas y lixiviados, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental y a la economía circular.<sup>8,29,36</sup>

#### **b) Producción de biocombustibles:**

Debido a su capacidad para acumular lípidos, la *Chlorella sp.* se investiga como materia prima para la producción de biocombustibles de tercera generación, como biodiésel,

bioetanol y biogás. Su cultivo puede integrarse en sistemas de captura de CO<sub>2</sub>, lo que la convierte en una herramienta prometedora para la mitigación del cambio climático y la transición hacia fuentes de energía renovable. <sup>1,40, 64</sup>

### **c) Farmacología e investigación biomédica:**

Los extractos de *Chlorella sp.* han mostrado propiedades antimicrobianas, antivirales, antiinflamatorias y hepatoprotectoras. Se estudia su uso en el desarrollo de fármacos naturales, terapias antioxidantes, tratamientos para enfermedades crónicas y como coadyuvante en procesos de desintoxicación hepática y regeneración celular. <sup>6, 16, 30</sup>

#### **2.3.3 Actividad antimicrobiana de *Chlorella sp.***

Diversos estudios han demostrado el potencial antimicrobiano de los extractos de *Chlorella sp.* frente a cepas patógenas de interés clínico y veterinario. <sup>12, 37</sup>

Acurio et al.<sup>7</sup> evaluaron cepas de *Chlorella sp.* aisladas de aguas andinas del Ecuador, observando una inhibición significativa del crecimiento de bacterias Gram positivas y Gram negativas, lo que evidencia su amplio espectro de acción.

Por su parte, Santhosh et al.<sup>9</sup> reportaron que los extractos etanólicos de *Chlorella sp.* SRD3 presentaron una elevada capacidad de eliminación de radicales libres y una actividad bacteriostática frente a aislados clínicos, lo que sugiere su utilidad como agente terapéutico complementario.

Estudios más recientes, como el realizado por Heo <sup>20</sup>, identificaron en *Chlorella vulgaris* diversos compuestos con potencial antibiótico natural, proponiendo su incorporación en alimentos funcionales con propiedades antimicrobianas.

Entre los metabolitos implicados en esta actividad se destacan los ácidos grasos como el linoleico y el palmítico, así como pigmentos y compuestos fenólicos que actúan sobre la membrana celular bacteriana, provocando su disrupción estructural y, en consecuencia, la inhibición del crecimiento microbiano. <sup>22, 32</sup>

Además, Lio et al. (2025) <sup>18</sup> lograron aislar moléculas con efecto antimicrobiano en *Chlorella sorokiniana*, subrayando la posibilidad de utilizar estos extractos como alternativas naturales a los antibióticos sintéticos, especialmente en el contexto de la creciente resistencia bacteriana.

### **2.3.4 Microalgas del género *Chlorella***

Numerosos estudios han señalado que los metabolitos bioactivos producidos por organismos del género *Chlorella* presentan propiedades farmacológicas relevantes que contribuyen a la prevención y tratamiento de diversas enfermedades. Estos organismos han sobresalido como una fuente particularmente importante debido a la diversidad de metabolitos bioactivos característicos de la *Chlorella sp.* <sup>22</sup>

Las microalgas del género *Chlorella* constituyen uno de los grupos de organismos más estudiados por la población científica. Estos organismos fotosintéticos poseen una elevada capacidad metabólica que les permite sintetizar compuestos como carotenoides, polisacáridos sulfatados, ácidos grasos poliinsaturados y compuestos fenólicos. La presencia de estos metabolitos ha despertado un gran interés científico debido a sus propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y antimicrobianas. <sup>31</sup>

El género de *Chlorella sp.* son organismos microscópicos ampliamente distribuidos en ambientes acuáticos tanto marinos como de agua dulce. Se estima que existen miles de especies de microalgas dentro de las cuales se encuentra la *Chlorella sp.*, muchas de las cuales aún no han sido completamente estudiadas desde el punto de vista bioquímico. Esta diversidad biológica representa una oportunidad importante para el descubrimiento de nuevos compuestos con potencial terapéutico que permitan generar alternativas de tratamientos para combatir el gran problema de la resistencia antimicrobiana. <sup>38</sup>

Esta actividad antimicrobiana se ha atribuido a la presencia de compuestos bioactivos capaces de alterar la integridad de las membranas celulares microbianas. El creciente problema de la resistencia antimicrobiana ha impulsado la búsqueda de nuevas alternativas terapéuticas. En este contexto, los compuestos derivados de microalgas como la *Chlorella sp.* representa una fuente prometedora de nuevos agentes antimicrobianos que podrían contribuir al desarrollo de tratamientos alternativos frente a infecciones bacterianas. <sup>65</sup>

### **2.4 Aplicaciones Combinadas de *Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.***

La combinación de *Arthrospira sp.* (Spirulina) y *Chlorella sp.* ha demostrado un potencial sinérgico en diversas aplicaciones biotecnológicas, especialmente en los campos de la salud, la nutrición, la agricultura y la farmacología. Estas microalgas y cianobacterias, al ser complementarias en su composición bioquímica, permiten potenciar sus efectos

funcionales cuando se utilizan en conjunto, generando formulaciones más efectivas y sostenibles.<sup>34, 37, 40</sup>

#### **a) Nutrición animal y salud intestinal**

Un estudio experimental realizado en conejos de raza New Zealand demostró que la suplementación combinada con *Arthrospira platensis* y *Chlorella vulgaris* mejora significativamente el crecimiento, la eficiencia intestinal, la actividad antioxidante y la conversión alimenticia. Los animales que recibieron dietas con ambas microalgas mostraron mejores niveles de proteínas séricas, menor colesterol total y una mayor actividad de enzimas antioxidantes como el glutatión peroxidasa (GPx), superóxido dismutasa (SOD) y catalasa (CAT). Estos resultados sugieren que la combinación de ambas especies puede ser una alternativa eficaz a los antibióticos como promotores de crecimiento en la producción animal.

<sup>31, 50, 64</sup>

#### **b) Aplicaciones antimicrobianas y farmacológicas**

Diversos estudios han demostrado que tanto *Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.* poseen propiedades antimicrobianas, lo que evidencia su potencial en la inhibición de microorganismos patógenos y su posible aplicación en el desarrollo de agentes terapéuticos. Además, de su efecto antimicrobiano, estas microalgas presentan compuestos bioactivos con actividad antioxidante, los cuales contribuyen en la protección celular frente al daño oxidativo, los cuales contribuyen a la protección celular frente al daño oxidativo y potencian su valor farmacológico. Por ejemplo, extractos lípidos de ambas microalgas han mostrado efectos antioxidantes y antiinflamatorios en cultivos fibroblastos humanos, protegiendo las células del estrés oxidativo inducido por radiación UVA. Esta sinergia entre la actividad antimicrobiana y antioxidante es especialmente prometedora en el desarrollo de productos dermatológicos, apósitos para heridas y terapias antioxidantes.<sup>6,8, 37</sup>

#### **c) Biorremediación y tratamiento de aguas residuales**

La combinación de los géneros *Chlorella* y *Arthrospira* también ha sido explorada en sistemas de biorremediación. Estudios con cultivos mixtos han demostrado una mayor eficiencia en la eliminación de contaminantes como nitratos, fosfatos y metales pesados en aguas residuales industriales. Esta sinergia se debe a la complementariedad metabólica entre

ambas especies, lo que permite una mayor captación de nutrientes y una producción más rica de metabolitos bioactivos con propiedades antimicrobianas.<sup>8,29,48</sup>

#### **d) Nanotecnología y medicina avanzada**

En el campo de la nanomedicina, se ha utilizado el género *Arthrospira* como agente reductor en la síntesis verde de nanopartículas de oro con actividad antimicrobiana, mientras que el género *Chlorella* ha sido evaluada como fuente de metabolitos bioactivos para recubrimientos funcionales. La combinación de ambas microalgas en plataformas híbridas podría abrir nuevas vías para el desarrollo de sistemas de liberación controlada de fármacos, terapias fotodinámicas y materiales biomédicos con propiedades terapéuticas avanzadas.  
13,41,43

### **2.5 Resistencia antimicrobiana: panorama mundial y nacional**

La resistencia antimicrobiana (RAM) constituye una de las principales amenazas para la salud pública global y la sanidad animal en el siglo XXI. Este fenómeno es consecuencia de un proceso evolutivo acelerado mediante el cual los microorganismos desarrollan estrategias para evadir la acción de los antimicrobianos incluidos antibióticos, antivirales y antifúngicos utilizados para su control.

Entre los mecanismos de resistencia más frecuentes se encuentran:

- La producción de enzimas inactivadoras, como las  $\beta$ -lactamasas, que degradan los antibióticos antes de que puedan ejercer su efecto.
- La modificación del sitio blanco, que impide la unión del antimicrobiano a su diana molecular.
- La disminución de la permeabilidad de la membrana celular, lo que dificulta la entrada del fármaco.
- La activación de bombas de expulsión, que eliminan activamente el antimicrobiano del interior celular.<sup>4,13</sup>

Estos mecanismos comprometen la eficacia terapéutica de los tratamientos, generando infecciones persistentes, mayor morbilidad y mortalidad, y una carga económica significativa

para los sistemas de salud. A nivel mundial, se estima que las infecciones causadas por microorganismos resistentes provocan aproximadamente 1.27 millones de muertes anuales, y se proyecta que esta cifra podría superar los 10 millones para el año 2050 si no se implementan medidas eficaces de contención y prevención.<sup>5</sup>

La Organización Mundial de Sanidad Animal (OMSA) ha advertido que el uso indiscriminado de antimicrobianos en la producción pecuaria, junto con la ausencia de programas de control en entornos clínicos, favorece la selección y diseminación de cepas multirresistentes. Este fenómeno representa una amenaza directa para la salud humana, animal y ambiental, especialmente en países con sistemas de vigilancia limitados. Entre los patógenos más preocupantes por su capacidad de desarrollar resistencia se encuentran *Pseudomonas aeruginosa*, *Klebsiella pneumoniae*, *Salmonella entérica* y *Staphylococcus aureus*, los cuales han sido clasificados como prioritarios por organismos internacionales para el desarrollo de nuevos agentes antimicrobianos.<sup>10,45, 58</sup>

La problemática de la resistencia bacteriana en Costa Rica presenta una relevancia particular debido a la convergencia de aislados clínicos y alimentarios con perfiles de sensibilidad disminuida. Esta dualidad en el origen de la resistencia evidencia una diseminación persistente a través de la cadena productiva y los servicios de salud, lo que demanda la investigación urgente de nuevas alternativas terapéuticas de origen natural. Un estudio reciente de Molina<sup>6</sup>, identificó la presencia de *Salmonella entérica* serovar infantis multirresistente en carne de pollo destinada al consumo humano, lo que representa un riesgo zoonótico significativo. Este hallazgo subraya la necesidad de implementar estrategias de vigilancia integradas bajo el enfoque “Una Salud” (One Health), que reconoce la interconexión entre la salud humana, animal y ambiental.<sup>6</sup>

Asimismo, un informe de la Universidad de Costa Rica posiciona al país entre los territorios con mayores niveles de bacterias resistentes en Centroamérica, con impactos evidentes en hospitales públicos y laboratorios veterinarios.<sup>4</sup> Esta situación ha sido visibilizada por medios de comunicación y prensa científica. Por ejemplo, un artículo publicado en La Nación Rodríguez<sup>55</sup>, reportó que más de 380 muertes anuales están relacionadas con infecciones por bacterias resistentes, destacando especialmente las enterobacterias productoras de carbapenemasas y las cepas multirresistentes de *Pseudomonas aeruginosa*.<sup>55</sup>

Estas cifras, sumadas al incremento en la importación de antibióticos de uso veterinario, evidencian la urgencia de adoptar estrategias sostenibles y naturales que contribuyan a mitigar la crisis de resistencia en el país.<sup>45,57, 65</sup> En este contexto, la investigación científica sobre organismos fotosintéticos no tradicionales, como las microalgas y las cianobacterias, emerge como una alternativa prometedora. Estos microorganismos poseen la capacidad de producir metabolitos con acción bactericida o bacteriostática, lo que ofrece un enfoque ecológico, rentable y de bajo impacto ambiental, adecuado para su integración tanto en la industria farmacéutica como en la producción animal sostenible.<sup>1,3,8</sup>

### **2.5.1 Microalgas y cianobacterias: aspectos biológicos y biotecnológicos**

Las microalgas y cianobacterias conforman un grupo diverso de microorganismos fotosintéticos que desempeñan un papel fundamental en los ecosistemas acuáticos y terrestres. Su capacidad para transformar la energía solar en compuestos orgánicos mediante la fotosíntesis las convierte en una fuente biológica de alto valor para aplicaciones biotecnológicas. A través de sus metabolismos secundarios, estas especies son capaces de sintetizar una amplia gama de biomoléculas funcionales, tales como pigmentos naturales, proteínas bioactivas, lípidos esenciales y compuestos fenólicos, los cuales han demostrado propiedades antioxidantes, inmunomoduladoras y antimicrobianas.<sup>1,3</sup>

Desde una perspectiva filogenética, las cianobacterias como *Arthrospira sp.* pertenecen al dominio Bacteria, siendo organismos procariotas con una estructura celular simple pero altamente eficiente. Por otro lado, las microalgas verdes como *Chlorella sp.*, se clasifican dentro del dominio Eukarya y reino Protista, y presentan una organización celular eucariota más compleja, lo que les confiere una mayor versatilidad metabólica.<sup>3,8</sup>

Ambos grupos exhiben adaptaciones fisiológicas notables, como la tolerancia a condiciones extremas de temperatura, salinidad, radiación ultravioleta y pH, lo que permite su cultivo en ambientes controlados y no competitivos con la agricultura tradicional. Estas características hacen posible su producción en sistemas cerrados (fotobiorreactores) o abiertos (estanques), favoreciendo su escalabilidad y sostenibilidad.<sup>8</sup>

El interés biotecnológico en estas especies ha crecido exponencialmente en los últimos años, impulsado por su rápido crecimiento, bajo requerimiento de nutrientes, y su

capacidad para capturar dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), contribuyendo así a la mitigación del cambio climático y al desarrollo de procesos industriales más limpios.<sup>1,8,4</sup>

Estudios recientes han identificado en *Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.* una variedad de metabolitos con alta capacidad antioxidante y antimicrobiana, entre los que destacan:

- **Ácidos grasos poliinsaturados** (como el ácido linoleico y el ácido palmítico), con efectos bactericidas y beneficios para la salud humana.
- **Polisacáridos sulfatados**, que han demostrado actividad antiviral y capacidad para modular la respuesta inmunitaria.
- **Péptidos cíclicos**, con acción antimicrobiana frente a bacterias patógenas, incluyendo cepas multirresistentes.<sup>3,7,14</sup>

Estas propiedades posicionan a las microalgas y cianobacterias como candidatas prometedoras para el desarrollo de nuevos agentes terapéuticos, así como para su incorporación en productos farmacéuticos, cosméticos, alimentos funcionales y soluciones ambientales.

### **2.5.2 Género *Arthrospira* (Spirulina): propiedades y actividad antimicrobiana**

*Arthrospira sp.*, conocida comúnmente como Spirulina, es una cianobacteria filamentosa de gran interés biotecnológico debido a su perfil nutricional y farmacológico. Esta especie se distingue por su elevado contenido proteico, que puede alcanzar entre el 60 y el 70 % de su biomasa seca, así como por su riqueza en ficocianinas, carotenoides y ácidos grasos esenciales, compuestos que le confieren propiedades funcionales de gran valor.<sup>9</sup>

La estructura celular de *Arthrospira sp.*, junto con su composición pigmentaria, favorece la producción de metabolitos secundarios con actividad antioxidante y antimicrobiana. Estos compuestos han sido objeto de múltiples investigaciones que han demostrado su eficacia frente a diversos patógenos de interés clínico y veterinario.<sup>11,14</sup>

Por ejemplo, Kaushik y Chauhan<sup>3</sup> evidenciaron una actividad antibacteriana significativa de cultivos de *Arthrospira platensis* frente a bacterias Gram positivas y Gram negativas, incluyendo *Staphylococcus aureus* y *Escherichia coli*. De manera complementaria, Eissa et al.<sup>11</sup> y Abdel-Moneim et al.<sup>14</sup> identificaron extractos fenólicos con capacidad inhibitoria frente a patógenos humanos y animales, atribuyendo esta acción a la sinergia entre

compuestos fenólicos, pigmentos y polisacáridos sulfatados presentes en la biomasa de *Arthrospira*.

Investigaciones más recientes han confirmaron que los extractos etanólicos de *Arthrospira platensis* poseen una potente actividad antibacteriana y antifúngica, especialmente frente a cepas multirresistentes como *Klebsiella pneumoniae* y *Pseudomonas aeruginosa*. Asimismo, Selim et al.<sup>19</sup> destacaron la capacidad antibiofilm de estos extractos frente a *Klebsiella pneumoniae* resistente a carbapenémicos, lo que evidencia su potencial terapéutico en infecciones persistentes y difíciles de tratar.<sup>8, 29, 36</sup>

Los mecanismos de acción descritos para los compuestos bioactivos de *Arthrospira sp.* incluyen:

- Ruptura de la pared celular bacteriana, debilitando la estructura externa del microorganismo.
- Desestabilización de la membrana plasmática, lo que altera la homeostasis celular.
- Interferencia con la síntesis de proteínas, bloqueando procesos esenciales para la supervivencia bacteriana.

Gracias a su composición nutricional, su capacidad de adaptación a condiciones extremas y su versatilidad biotecnológica, la *Spirulina* se considera una de las cianobacterias más prometedoras para aplicaciones médicas y veterinarias. Su uso potencial abarca desde la prevención hasta el tratamiento de infecciones, especialmente en el contexto de la creciente resistencia antimicrobiana. Además, su cultivo sostenible y bajo costo de producción la convierten en una opción viable para países que buscan soluciones naturales y accesibles para enfrentar esta problemática.

### **2.5.3 Género *Chlorella*: características y potencial antimicrobiano**

El género *Chlorella*, agrupa microalgas unicelulares ampliamente reconocidas por su alta productividad biológica, su contenido proteico elevado y su capacidad de adaptación a diversos entornos.<sup>7</sup> Estas microalgas poseen una pared celular rígida, compuesta principalmente por celulosa y otros polímeros resistentes, lo que contribuye a la estabilidad estructural de sus compuestos bioactivos y a su resistencia frente a condiciones ambientales adversas.

La *Chlorella sp.* es capaz de sintetizar una amplia gama de metabolitos secundarios con aplicaciones en múltiples sectores industriales. Como se ha mencionado ampliamente durante el desarrollo de esta investigación existen una gran cantidad de metabolitos bioactivos y compuestos que destacan por su función nutricional, antioxidante, antiviral, entre otras funciones de importancia para la utilidad humana, algunos de estos componentes que resaltan son: Compuestos fenólicos (antioxidantes y antimicrobianas), pigmentos fotosintéticos (poseen aplicaciones en la industria cosmética y nutracéutica), carotenoides (fectos antioxidantes y protectores celulares), polisacáridos con actividad inmunoestimulante (capaces de modular la respuesta inmune).<sup>18,22</sup>

Diversos estudios han demostrado el potencial antimicrobiano de los extractos de *Chlorella sp.* frente a cepas patógenas de interés clínico y veterinario. Por ejemplo:

Acurio et al.<sup>7</sup> evaluaron cepas de *Chlorella sp.* aisladas de aguas andinas del Ecuador, observando una inhibición significativa del crecimiento de bacterias Gram positivas y Gram negativas, lo que evidencia su amplio espectro de acción.

Santhosh et al.<sup>13</sup> reportaron que los extractos etanólicos de *Chlorella sp.* SRD3 presentaron una fuerte capacidad de eliminación de radicales libres y una actividad bacteriostática frente a aislados clínicos, lo que sugiere su utilidad como agente terapéutico complementario.

Heo et al.<sup>20</sup> identificaron en *Chlorella vulgaris* diversos compuestos con potencial antibiótico natural, proponiendo su incorporación en alimentos funcionales con propiedades antimicrobianas.

Entre los metabolitos implicados en esta actividad destacan los ácidos grasos como el linoleico y el palmítico, así como pigmentos y compuestos fenólicos que actúan sobre la membrana celular bacteriana, provocando su disrupción estructural y, en consecuencia, la inhibición del crecimiento microbiano.<sup>19,37</sup>

Además, Lio et al.<sup>18</sup> lograron aislar moléculas con efecto antimicrobiano en *Chlorella sorokiniana*, subrayando la posibilidad de utilizar estos extractos como alternativas naturales a los antibióticos sintéticos, especialmente en el contexto de la creciente resistencia bacteriana.

Gracias a su amplio espectro de acción, su versatilidad metabólica y su sostenibilidad en cultivo, la *Chlorella sp.* se posiciona como una fuente prometedora para el desarrollo de bioproductos destinados al control de infecciones bacterianas en humanos y animales. Su integración en estrategias de salud pública, producción animal y biotecnología representa una oportunidad para avanzar hacia modelos más sostenibles y resilientes frente a la crisis de resistencia antimicrobiana.

#### **2.5.4 Comparación del efecto antimicrobiano entre *Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.***

Los estudios comparativos han demostrado que tanto *Arthrospira sp.*, como *Chlorella sp.* poseen una notable capacidad de inhibición bacteriana, aunque presentan diferencias significativas que se atribuyen a su estructura celular, composición bioquímica y tipología de metabolitos secundarios.<sup>15, 18</sup>

En términos generales, *Chlorella sp.* muestra una mayor eficacia frente a bacterias Gram-negativas, mientras que *Arthrospira sp.* exhibe una actividad más pronunciada contra bacterias Gram-positivas.<sup>9, 7, 13, 15, 18</sup>

Esta diferenciación se explica por la naturaleza de los compuestos bioactivos que cada género produce:

- Las especies de *Chlorella* sintetizan compuestos fenólicos, ácidos grasos insaturados y pigmentos lipofílicos, los cuales interactúan con la membrana externa de las bacterias Gram-negativas, provocando permeabilización celular y desestabilización estructural.
- Las especies de *Arthrospira*, por su parte, producen polisacáridos sulfatados y ficocianinas, que interfieren en la síntesis de la pared celular bacteriana, afectando especialmente a las bacterias Gram-positivas.<sup>7, 9, 13, 15, 18</sup>

En un estudio realizado por Pianta et al.<sup>15</sup>, los extractos etanólicos de *Arthrospira platensis* lograron una inhibición del crecimiento superior al 70 % frente a *Staphylococcus aureus* y *Bacillus subtilis*. Por otro lado, Acurio et al.<sup>7</sup> reportaron resultados comparables en *Chlorella sp.* frente a *Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa*, evidenciando su eficacia contra patógenos Gramnegativos.

Además, investigaciones recientes han señalado que factores como las condiciones de cultivo, el tipo de solvente utilizado en la extracción y la concentración de biomasa influyen directamente en la potencia antimicrobiana de ambas especies. <sup>13,18,21</sup>

Estos parámetros pueden modificar la concentración y diversidad de metabolitos bioactivos presentes en los extractos, afectando su eficacia terapéutica.

Desde el punto de vista funcional:

- Las ficocianinas y proteínas sulfatadas de *Arthrospira sp.* actúan principalmente como agentes bacteriostáticos, inhibiendo el crecimiento sin causar lisis celular inmediata.
- Por otro lado, los extractos lipídicos y fenólicos de *Chlorella sp.* poseen una acción bactericida directa, alterando la integridad de la membrana celular y provocando la muerte del microorganismo. <sup>14, 18, 20</sup>

En conjunto, ambos organismos ofrecen perfiles antimicrobianos complementarios, lo que sugiere una sinergia potencial al combinar sus extractos. Esta combinación podría optimizar la actividad antimicrobiana, ampliar el espectro de acción frente a distintos tipos de bacterias y contribuir a la reducción del uso de antibióticos sintéticos en aplicaciones médicas y veterinarias. <sup>19, 21</sup>

**Tabla 4. Comparación del efecto antimicrobiano entre *Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.***

Característica	<i>Arthrospira sp.</i>	<i>Chlorella sp.</i>
<b>Tipo celular</b>	Procariota	Eucariota
<b>Acción predominante</b>	Bacteriostática	Bactericida
<b>Eficacia</b>	Gram-positivas	Gram-negativas
<b>Metabolitos clave</b>	Ficocianinas, polisacáridos sulfatados	Ácidos grasos, fenoles, pigmentos
<b>Mecanismo</b>	Inhibición de síntesis celular	Disrupción de membrana

**Fuente:** Información recopilada de las referencias 20, 37 y 43.

## 2.6 Aplicaciones biotecnológicas y oportunidades en Costa Rica

El aprovechamiento de microalgas con fines antimicrobianos se ha consolidado como una línea estratégica dentro de la bioeconomía costarricense, en respuesta a los desafíos sanitarios y ambientales que plantea la resistencia antimicrobiana. Según Villalta-Romero et al. (2019) <sup>1</sup>, existen amplias oportunidades de negocio basadas en la biotecnología microalga,

especialmente en los sectores farmacéutico, alimentario y agrícola, donde la demanda de soluciones naturales y sostenibles continúa en expansión.<sup>1,3,26</sup>

Instituciones académicas como el Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) y la Universidad de Costa Rica (UCR) han liderado investigaciones orientadas al desarrollo de tecnologías para la producción de biomasa microalgal, la extracción de metabolitos bioactivos y la formulación de bioproductos con aplicaciones antimicrobianas y funcionales.<sup>1,33</sup>

Estos esfuerzos han permitido avanzar en el diseño de procesos industriales adaptados a las condiciones locales y en la validación de compuestos con potencial terapéutico y preventivo.

Costa Rica cuenta con condiciones ambientales óptimas para el cultivo de microalgas, incluyendo:

1. Alta radiación solar, que favorece la fotosíntesis y el crecimiento acelerado.
2. Disponibilidad de recursos hídricos, esenciales para sistemas de cultivo abiertos y cerrados.
3. Diversidad biológica, que permite el aislamiento de cepas nativas con propiedades únicas.

El potencial de especies como *Chlorella sp.* y *Arthrospira sp.* puede aprovecharse para la elaboración de aditivos antimicrobianos naturales, biopelículas protectoras para superficies médicas y veterinarias, y piensos funcionales destinados a animales de producción, contribuyendo a la reducción del uso de antibióticos sintéticos en la cadena agroalimentaria.<sup>1,33</sup>

Asimismo, su integración en sistemas de economía circular representa una oportunidad para reutilizar efluentes agroindustriales como medio de cultivo, lo que permite reducir costos operativos, minimizar emisiones contaminantes y cerrar ciclos productivos de manera eficiente.<sup>1,33</sup>

Estas iniciativas se alinean directamente con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular:

- **ODS 3:** Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos.

- **ODS 9:** Fomentar la innovación y el desarrollo de infraestructuras sostenibles.
- **ODS 12:** Promover patrones de producción y consumo responsables.

El fortalecimiento de alianzas estratégicas entre el sector académico, industrial y gubernamental resulta esencial para escalar la producción, impulsar la transferencia tecnológica y consolidar cadenas de valor basadas en biotecnología microalgal. Costa Rica, gracias a su capacidad científica y sus condiciones naturales, tiene el potencial de posicionarse como referente regional en el desarrollo de soluciones biotecnológicas que contribuyan a la sustitución progresiva de antibióticos en veterinaria por extractos naturales de eficacia comprobada. <sup>14,53,54</sup>

## 2.7 Perspectivas estratégicas

Esta revisión demuestra que las especies de *Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.*, poseen un amplio potencial antimicrobiano frente a bacterias patógenas de interés humano y veterinario. Esta capacidad se atribuye a su habilidad para sintetizar metabolitos bioactivos como fenoles, péptidos, polisacáridos sulfatados y pigmentos fotosintéticos, que les confieren propiedades bactericidas, bacteriostáticas, antioxidantes e inmunomoduladores. Estos compuestos no solo inhiben el crecimiento de microorganismos patógenos, sino que también contribuyen a la protección celular y al fortalecimiento de la respuesta inmune, lo que los convierte en candidatos ideales para su aplicación en la industria farmacéutica, alimentaria y pecuaria. <sup>37, 39, 52</sup>

Los estudios comparativos entre ambas especies revelan mecanismos de acción complementarios. *Arthrospira sp.* destaca por su eficacia frente a bacterias Gram-positivas, gracias a la acción de sus ficocianinas y polisacáridos que interfieren en la síntesis de la pared celular. <sup>20, 26, 31</sup> Por su parte, la *Chlorella sp.* muestra mayor actividad frente a bacterias Gram-negativas, debido a la acción de sus compuestos lipofílicos y ácidos grasos insaturados que alteran la integridad de la membrana externa. Esta diferenciación funcional sugiere que la combinación de extractos de ambas especies podría constituir una estrategia sinérgica para el control natural de patógenos resistentes, ampliando el espectro de acción y reduciendo la dependencia de antibióticos sintéticos. <sup>3,24,42</sup>

En el contexto costarricense, el desarrollo de la biotecnología en microalgas representa una oportunidad estratégica de innovación sostenible, con impactos positivos en los ámbitos económico, ambiental y sanitario. El país cuenta con condiciones privilegiadas

para el cultivo de microalgas, como alta radiación solar, disponibilidad de agua y biodiversidad que pueden ser aprovechadas para la producción de biomasa y metabolitos de interés.<sup>1, 33</sup>

Para avanzar en esta dirección, es fundamental:

- Fomentar la investigación aplicada, orientada al aislamiento de cepas nativas, optimización de procesos de cultivo y caracterización de compuestos bioactivos.
- Invertir en cultivos piloto y escalamiento industrial, que permitan validar la viabilidad, técnica y económica de los bioproductos derivados de las especies de *Chlorella sp.* y *Arthrospira sp.*
- Diseñar marcos regulatorios específicos, que respalden la producción, comercialización y uso de bioproductos naturales con actividad antimicrobiana, garantizando su calidad, seguridad y eficacia.
- Promover la articulación interinstitucional, entre universidades, centros de investigación, empresas biotecnológicas y entidades gubernamentales, para consolidar un ecosistema de innovación colaborativa.

Estas acciones permitirían avanzar hacia modelos de producción más seguros, ecológicos y resilientes, alineados con los principios de la bioeconomía circular y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En particular, se contribuiría al ODS 3 (salud y bienestar), ODS 9 (industria, innovación e infraestructura) y ODS 12 (producción y consumo responsables).<sup>5,33,42</sup>

En este sentido, la biotecnología microalgal se perfila como una herramienta clave para enfrentar la resistencia antimicrobiana, desde una perspectiva integral que articula calidad, sostenibilidad y salud pública. Su implementación en Costa Rica no sólo fortalecería la capacidad nacional para responder a amenazas sanitarias emergentes, sino que también abriría nuevas oportunidades de desarrollo económico basado en el conocimiento, la biodiversidad y la innovación verde.<sup>1,33</sup>

## **2.8 Terapias alternativas de origen natural**

Las terapias alternativas de origen natural comprenden un conjunto de prácticas y productos derivados de fuentes biológicas (plantas, microalgas, hongos y minerales) que se utilizan para prevenir, aliviar o tratar diversas patologías. A diferencia de los fármacos

sintéticos aislados, estos recursos se caracterizan por poseer fitocomplejos: mezclas naturales de múltiples metabolitos secundarios que actúan de forma sinérgica en el organismo.

### 2.8.1 Pilares Fundamentales de las terapias de origen natural

El auge actual de estas terapias se sostiene sobre tres pilares científicos:

1. **Biodisponibilidad y Biocompatibilidad:** Muchos compuestos naturales, como los polifenoles o los ácidos grasos omega-3, presentan una alta afinidad con los receptores celulares humanos, facilitando su absorción y reduciendo, en muchos casos, los efectos secundarios sistémicos.
2. **Mecanismos de Acción Pleiotrópicos:** Mientras que un fármaco convencional suele atacar una única vía metabólica, los compuestos naturales suelen ser pleiotrópicos; es decir, pueden influir en la inflamación, el estrés oxidativo y la respuesta inmune simultáneamente.
3. **Sostenibilidad y Etnofarmacología:** La recuperación del conocimiento ancestral sobre plantas como la *Curcuma longa* o cianobacterias como la *Arthrospira sp.* (Espirulina) ha permitido a la ciencia moderna estandarizar extractos con dosis terapéuticas precisas.<sup>54</sup>

### 2.8.2 Clasificación de Recursos Naturales

- **Fitoterapia:** Uso de plantas medicinales o sus derivados (raíces, hojas, aceites esenciales).
- **Suplementación Nutracéutica:** Alimentos o partes de estos que proporcionan beneficios médicos, incluyendo la prevención de enfermedades crónicas.
- **Terapias con Microorganismos:** Uso de probióticos y microalgas (como *Chlorella sp.*) para la desintoxicación de metales pesados y la regulación del microbioma intestinal.<sup>54</sup>

### 2.8.3 Productos Naturales Derivados de Plantas como Fuente para el Descubrimiento y Desarrollo de Fármacos

Estos compuestos derivados de plantas, clasificados mayoritariamente como metabolitos secundarios, no son fundamentales para el desarrollo fisiológico básico de la planta, sino que han evolucionado como mecanismos de defensa frente a depredadores,

patógenos y factores ambientales. La relevancia clínica de estas sustancias reside en su diversidad estructural, que abarca desde alcaloides con propiedades analgésicas como la morfina, hasta flavonoides, terpenoides y polifenoles reconocidos por sus capacidades antioxidantes, antiinflamatorias y antienvjecimiento.<sup>54</sup>

Es importante subrayar que la medicina moderna no solo utiliza estos compuestos directamente, sino que los emplea como modelos moleculares para la semisíntesis y el diseño de fármacos más seguros y eficaces. A pesar de los avances tecnológicos que facilitan hoy la identificación, aislamiento y caracterización de estas biomoléculas, el desarrollo de medicamentos basados en productos naturales enfrenta desafíos significativos, tales como las complejas normativas regulatorias internacionales, las preocupaciones éticas respecto a la propiedad intelectual del conocimiento tradicional y la necesidad crítica de conservar la biodiversidad vegetal.<sup>54</sup>

Ante la creciente demanda de productos naturales, los estudios advierten que muchas de las especies medicinales se encuentran en riesgo de sobreexplotación. Por ello, la investigación actual debe transitar hacia un enfoque interdisciplinario que combine el rigor de la química medicinal con iniciativas de conservación sostenible y métodos de cosecha controlada. En conclusión, el desarrollo de remedios innovadores a partir de fuentes vegetales sigue siendo una vía esencial para combatir patologías humanas y animales, siempre y cuando se optimicen las técnicas de cribado y se garantice la preservación de los recursos genéticos para las generaciones futuras, permitiendo así que la naturaleza continúe siendo un reservorio de soluciones terapéuticas inéditas.<sup>54</sup>

Ante la crisis de salud pública derivada del aumento de la resistencia bacteriana a los antibióticos convencionales, la investigación en metabolitos secundarios de origen natural ha emergido como una estrategia fundamental para el desarrollo de nuevas terapias antimicrobianas. En el estudio realizado por Borgio<sup>55</sup>, se examina el potencial terapéutico de diversas especies vegetales de la región del Cáucaso, caracterizadas por su vasta biodiversidad y tradición etnobotánica. A través de un análisis fitoquímico, los autores identificaron una amplia gama de compuestos bioactivos tales como flavonoides, taninos, alcaloides y compuestos azufrados, que exhiben una eficacia significativa contra patógenos de relevancia clínica, tanto Gram-positivos como Gram-negativos y fúngicos.

Lo que distingue a estos metabolitos es su naturaleza pleiotrópica; a diferencia de los fármacos sintéticos que suelen actuar sobre un objetivo molecular único, estos compuestos

naturales intervienen simultáneamente en múltiples procesos biológicos. El estudio detalla cómo agentes como la floretina y diversos flavonoides logran desestabilizar la pared celular microbiana, inhibir la formación de biopelículas (biofilms), el cual es un factor clave en la cronicidad de las infecciones y bloquear enzimas críticas involucradas en la replicación del ADN bacteriano.<sup>55</sup>

Sin embargo, se advierte que, si bien estos resultados validan científicamente el uso de plantas medicinales, la transición hacia una aplicación farmacéutica requiere profundizar en la optimización de los procesos de extracción y en la evaluación de la biodisponibilidad *in vivo*. La investigación establece que el aprovechamiento biotecnológico de metabolitos secundarios no solo ofrece una alternativa sostenible a los tratamientos antibióticos actuales, sino que también proporciona un marco robusto para combatir cepas multirresistentes mediante la acción sinérgica de compuestos naturales.<sup>55</sup>

#### **2.8.4 Mecanismos de acción de los ácidos fenólicos frente a patógenos bacterianos**

La eficacia de los compuestos fenólicos como alternativas terapéuticas reside en su capacidad para interferir con la homeostasis celular bacteriana mediante mecanismos que no atacan la bacteria por un solo punto. Al respecto, Borges<sup>11</sup>, analizaron la actividad antibacteriana del ácido ferúlico y el ácido gálico frente a diversos patógenos clínicos, incluyendo cepas Gram-positivas (*Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes*) y Gram-negativas (*Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*).

Los resultados evidenciaron que dichos compuestos actúan mediante una alteración directa de la integridad de la membrana celular. Este proceso no se limita a la inhibición del crecimiento metabólico, sino que induce modificaciones irreversibles en las propiedades fisicoquímicas de la superficie bacteriana, incluyendo la alteración de su carga eléctrica y permeabilidad. Como consecuencia, ocurre una fuga masiva de componentes intracelulares esenciales, tales como iones potasio, que culmina en la muerte celular.<sup>56</sup>

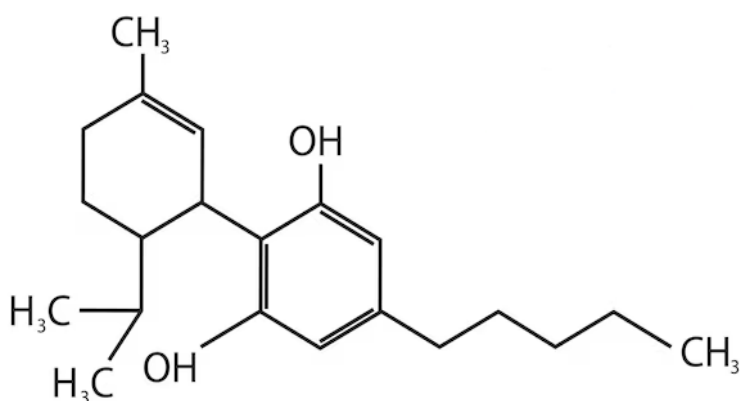
Adicionalmente, esta investigación subraya una propiedad de relevancia clínica: la capacidad de estos ácidos para inhibir la movilidad bacteriana y la formación de *biofilms*. Dado que el *biofilm* constituye una barrera estructural que confiere resistencia a los antibióticos convencionales, la capacidad de los ácidos fenólicos para disgregar o prevenir estas estructuras refuerza su potencial como agentes antimicrobianos de amplio espectro. Estos hallazgos validan el uso de derivados fenólicos, presentes en diversas fuentes naturales,

como componentes estratégicos en el desarrollo de nuevas terapias antimicrobianas orientadas a combatir la persistencia bacteriana.<sup>56</sup>

### 2.8.5 Mecanismo Antibacteriano de los Fitocannabinoides

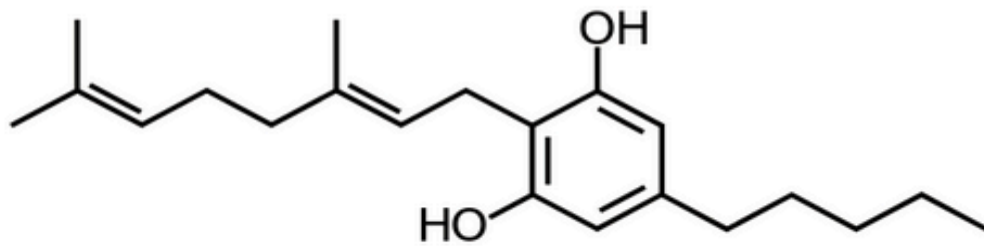
El potencial terapéutico del *Cannabis sativa* se extiende más allá de la neuromodulación, posicionándose como una fuente prometedora de agentes antimicrobianos. Los fitocannabinoides son terpenofenoles derivados de la biosíntesis del olivetol y el geranil-pirofosfato. Aunque su fama reside en la interacción con el sistema endocannabinoide (SEC), sus propiedades antimicrobianas son independientes de la activación de los receptores CB1 o CB2. Los principales compuestos analizados<sup>57</sup> (cannabidiol (CBD), cannabigerol (CBG), cannabicromeno (CBC) y tetrahidrocannabinol (THC)) presentan una capacidad bactericida directa que varía en función de su estructura química. En las Ilustración es 29, 30, 31 y 32, se visualizan las estructuras químicas de estos fitocannabinoides.

*Ilustración 29. Estructura química del cannabidiol (CBD).*



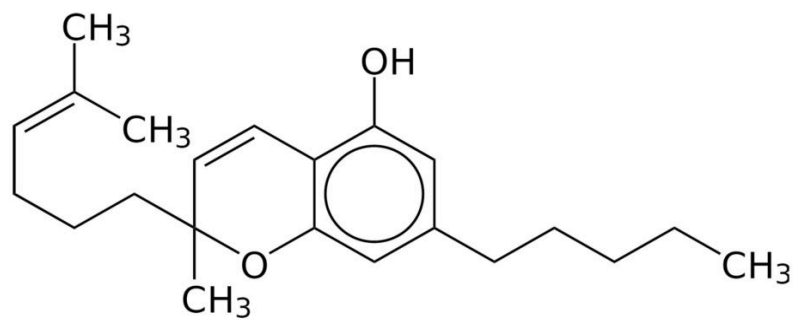
*Fuente: Ilustración recopilada de la referencia 57.*

*Ilustración 30. Estructura química del cannabigerol (CBG).*



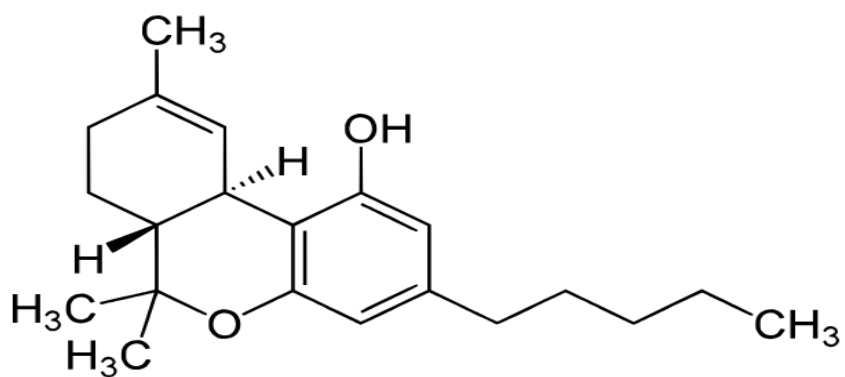
*Fuente:* Ilustración recopilada de la referencia 57.

*Ilustración 31. Estructura química del cannabidiol (CBD).*



*Fuente:* Ilustración recopilada de la referencia 57.

*Ilustración 32. Estructura química del tetrahidrocannabinol (THC).*



*Fuente:* Ilustración recopilada de la referencia 57.

La eficacia bactericida de estos compuestos frente a bacterias Gram-positivas, como *Staphylococcus aureus* (incluyendo cepas MRSA), *Streptococcus pneumoniae* y *Clostridioides difficile*, es particularmente notable. A diferencia de los antibióticos de espectro estrecho que inhiben una sola ruta metabólica (como la síntesis de la pared celular o la replicación del ADN).<sup>57</sup>

El mecanismo de acción predominante de los fitocannabinoides es la alteración de la permeabilidad de la membrana lipídica. Dada su naturaleza altamente lipofílica, estas moléculas se insertan en la bicapa fosfolipídica de la bacteria. Esta inserción física induce una

- **Despolarización del potencial de membrana:** Al alterar la distribución de cargas eléctricas, la célula pierde su capacidad de generar energía mediante el gradiente de protones.<sup>57</sup>
- **Fuga de componentes intracelulares:** El daño estructural permite la salida de iones (potasio, magnesio) y moléculas pequeñas (ácidos nucleicos y nucleótidos), lo que provoca el colapso de la homeostasis osmótica.<sup>57</sup>
- **Modificación de la fluidez lipídica:** La inserción de moléculas de CBD aumenta la desorganización de la membrana, impidiendo que la bacteria mantenga su integridad frente a factores de estrés ambiental.<sup>57</sup>

Un aspecto crítico que diferencia a los cannabinoides de los fármacos convencionales es su capacidad para interferir con el biofilm. Las bacterias organizadas en biofilms se vuelven hasta 1,000 veces más resistentes a los antibióticos debido a la matriz extracelular que actúa como barrera física. Estudios recientes han demostrado que el CBD no solo inhibe la adhesión bacteriana inicial sobre superficies inertes, sino que puede dispersar biofilms preformados. Además, se sospecha que los cannabinoides interfieren con el *Quórum Sensing* (comunicación química entre bacterias), impidiendo que la colonia alcance el "umbral crítico" necesario para expresar genes de virulencia o formar estructuras protectoras.<sup>57</sup>

La ventaja competitiva de los cannabinoides radica en la alta barrera genética para la resistencia. Mientras que los antibióticos que actúan sobre dianas enzimáticas específicas permiten que la bacteria desarrolle mutaciones puntuales para evadir el fármaco, la alteración física de la membrana es mucho más difícil de contrarrestar. Una bacteria tendría que reconfigurar la composición química total de su membrana lipídica para volverse resistente a

un ataque hidrofóbico generalizado, una mutación que suele ser metabólicamente inviable para la supervivencia bacteriana.<sup>57</sup>

No obstante, la integración clínica de estos compuestos presenta desafíos significativos:

- **Bioequivalencia y dosificación:** La variabilidad en la composición de los extractos naturales requiere procesos estrictos de estandarización.<sup>57</sup>
- **Farmacocinética:** La baja solubilidad en agua de los cannabinoides limita su biodisponibilidad, lo que incentiva la investigación en nanotecnología (como liposomas o nanoemulsiones) para su administración efectiva.<sup>53</sup>
- **Toxicidad selectiva:** Se requiere mayor investigación para garantizar que los efectos de desestabilización de membrana sean específicos para los patógenos bacterianos y no dañan las membranas de las células eucariotas del hospedador.<sup>57</sup>

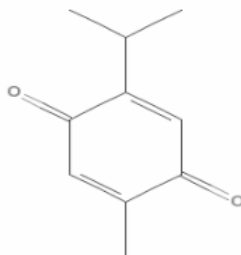
## 2.9 Ejemplos de plantas naturales con funciones terapéuticas

### 2.9.1 *Nigella sativa* (comino negro)

*Nigella sativa* es una planta medicinal perteneciente a la familia Ranunculaceae ampliamente utilizada en diversos sistemas de medicina tradicional como el Ayurveda, la medicina árabe y el sistema Unani. Las semillas de esta planta han sido empleadas durante siglos debido a sus propiedades terapéuticas, particularmente en el tratamiento de enfermedades inflamatorias, infecciones y trastornos metabólicos.<sup>53</sup>

Desde el punto de vista fitoquímico, las semillas de *Nigella sativa* contienen una amplia variedad de metabolitos secundarios con actividad farmacológica. Entre los compuestos bioactivos más importantes destacan la timoquinona, timohidroquinona, nigelona, alcaloides, flavonoides, saponinas y aceites esenciales. La timoquinona es considerada el principal componente activo de esta planta y ha sido asociada con múltiples efectos biológicos, incluyendo actividad antimicrobiana, antioxidante, antiinflamatoria e inmunomoduladora.<sup>50</sup>

**Ilustración 33. Estructura química de la *Nigella Sativa* (comino negro).**



**Fuente:** Ilustración recopilada de la referencia 53.

Diversos estudios experimentales han demostrado que los extractos de *Nigella sativa* presentan actividad antimicrobiana frente a bacterias Gram positivas y Gram negativas. El mecanismo de acción antimicrobiano se relaciona principalmente con la alteración de la membrana celular bacteriana, lo cual provoca cambios en la permeabilidad de la célula microbiana y conduce a la pérdida de componentes intracelulares esenciales para la supervivencia bacteriana.<sup>50</sup>

Asimismo, se ha descrito que los compuestos bioactivos presentes en *Nigella sativa* pueden inhibir enzimas metabólicas bacterianas, interfiriendo con procesos fundamentales como la síntesis de proteínas y la replicación celular. Estos efectos contribuyen a la reducción del crecimiento microbiano y a la inhibición de la proliferación bacteriana.<sup>3</sup>

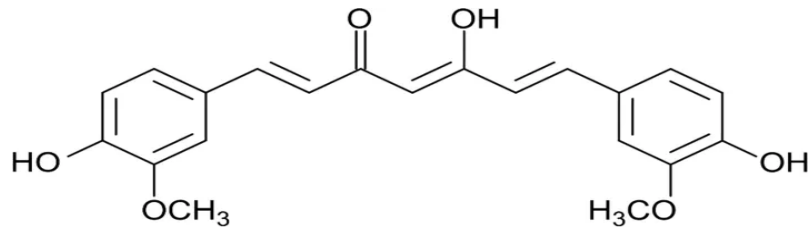
Además de su actividad antimicrobiana, *Nigella sativa* presenta propiedades antioxidantes significativas, debido a la capacidad de sus compuestos fenólicos para neutralizar radicales libres y reducir el estrés oxidativo celular. Este efecto antioxidante ha sido asociado con la prevención de enfermedades inflamatorias y degenerativas. Por otra parte, investigaciones recientes sugieren que los compuestos presentes en *Nigella sativa* pueden modular la respuesta inmunológica, regulando la producción de citocinas inflamatorias y mejorando la respuesta del sistema inmunológico frente a infecciones.<sup>50</sup>

### **2.9.2 *Curcuma longa* (cúrcuma)**

*Curcuma longa* es una planta medicinal perteneciente a la familia Zingiberaceae, ampliamente utilizada en la medicina tradicional asiática. El rizoma de esta planta constituye la principal fuente de compuestos bioactivos conocidos como curcuminoides, los cuales han sido ampliamente estudiados por sus propiedades farmacológicas.<sup>58</sup>

Los principales curcuminoides presentes en *Curcuma longa* incluyen curcumina, demetoxicurcumina y bisdemetoxicurcumina. Entre estos compuestos, la curcumina es considerada el metabolito activo más importante y ha sido asociada con múltiples efectos terapéuticos, incluyendo actividad antioxidante, antiinflamatoria, antimicrobiana y anticancerígena.<sup>59</sup>

**Ilustración 34. Estructura química de la cúrcuma.**

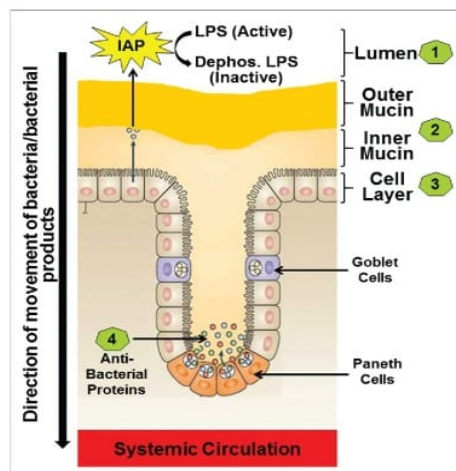


**Fuente:** Ilustración recopilada de la referencia 59.

Desde el punto de vista microbiológico, diversos estudios han demostrado que la curcumina puede ejercer actividad antimicrobiana frente a bacterias patógenas, incluyendo especies como *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa*.<sup>59</sup>

Como se muestra en la ilustración 35 el mecanismo de acción antimicrobiano de la curcumina se relaciona con varios procesos celulares. En primer lugar, este compuesto puede alterar la estructura de la membrana celular bacteriana, afectando la integridad de la célula microbiana y provocando la pérdida de componentes intracelulares esenciales para la supervivencia bacteriana. Además, estimula la secreción de proteínas antibacterianas por las células epiteliales intestinales.<sup>59</sup>

**Ilustración 35. Estimulación de la secreción de proteínas antibacterianas por las células epiteliales intestinales.**



**Fuente:** Ilustración recopilada de la referencia 58.

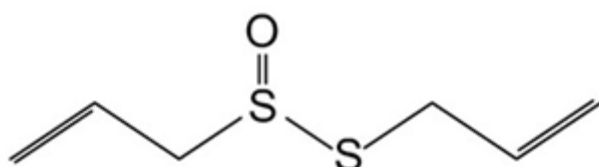
Además, la curcumina puede inhibir la síntesis de proteínas bacterianas, interfiriendo con procesos metabólicos fundamentales para la replicación celular. Este efecto contribuye a la reducción del crecimiento microbiano y a la inhibición de la proliferación bacteriana. Otro mecanismo importante consiste en la inhibición de la formación de biofilms bacterianos, estructuras que permiten a los microorganismos adherirse a superficies y aumentar su resistencia frente a antibióticos.<sup>59</sup>

### 2.9.3 *Allium sativum* (ajo)

*Allium sativum*, conocido como ajo, es una planta medicinal ampliamente utilizada en diversas culturas debido a sus propiedades terapéuticas. El ajo contiene una variedad de compuestos organosulfurados responsables de su actividad biológica.<sup>44</sup>

Entre los compuestos bioactivos más importantes del ajo destacan alicina, ajoeno, dialil sulfuro y dialil disulfuro. La alicina se forma cuando el ajo es triturado o cortado debido a la acción de la enzima alinasa sobre el aminoácido aliina.<sup>60</sup>

**Ilustración 36.** *Allium sativum* (ajo negro)



**Fuente:** Ilustración recopilada de la referencia 60.

La alicina presenta una potente actividad antimicrobiana frente a bacterias Gram positivas y Gram negativas. Su mecanismo de acción incluye la inhibición de enzimas bacterianas, lo cual interfiere con procesos metabólicos esenciales para la supervivencia microbiana. Además, la alicina puede alterar la permeabilidad de la membrana celular bacteriana, provocando la pérdida de componentes intracelulares y la muerte celular bacteriana.

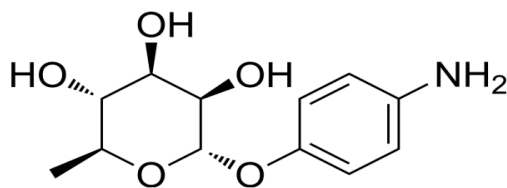
<sup>60</sup>

#### 2.9.4 *Moringa oleifera*

*Moringa oleifera* es una planta tropical conocida por su alto valor nutricional y medicinal. Sus hojas, semillas y raíces contienen numerosos compuestos bioactivos que han sido estudiados por sus propiedades farmacológicas.<sup>61</sup>

Entre los compuestos bioactivos presentes en *Moringa oleifera* destacan flavonoides, polifenoles, carotenoides, ácido clorogénico y quercetina, los cuales presentan actividad antioxidante y antimicrobiana.<sup>61</sup>

*Ilustración 37. Estructura química de la Moringa oleifera.*



*Fuente: Ilustración recopilada de la referencia 61.*

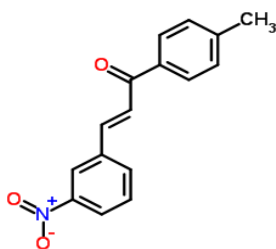
Los extractos de *Moringa oleifera* han demostrado actividad antimicrobiana frente a bacterias patógenas como *Escherichia coli* y *Staphylococcus aureus* mediante la alteración de la membrana celular bacteriana y la inhibición de procesos metabólicos esenciales.<sup>61</sup>

#### 2.9.5 Aloe vera

Aloe vera es una planta medicinal perteneciente a la familia *Asphodelaceae* ampliamente utilizada en la medicina tradicional debido a sus propiedades terapéuticas. El gel contenido en las hojas de esta planta ha sido empleado durante siglos para el tratamiento de afecciones cutáneas, heridas, quemaduras e infecciones.<sup>62</sup>

Desde el punto de vista fitoquímico, el gel de Aloe vera contiene una variedad de compuestos bioactivos entre los que destacan polisacáridos, antraquinonas, aloína, emodina, flavonoides, vitaminas y compuestos fenólicos.<sup>62</sup>

*Ilustración 38. Estructura química del Aloe Vera*



**Fuente:** Ilustración recopilada de la referencia 62.

Estos metabolitos secundarios han sido asociados con diversas actividades biológicas que incluyen efectos antimicrobianos, antiinflamatorios, antioxidantes e inmunomoduladores. Diversos estudios han demostrado que los extractos de Aloe vera presentan actividad antimicrobiana frente a bacterias patógenas, incluyendo especies como *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa*.<sup>62</sup>

El mecanismo de acción antimicrobiano se relaciona con la capacidad de algunos de sus compuestos para alterar la integridad de la membrana celular bacteriana, provocando la pérdida de componentes intracelulares esenciales. Asimismo, las antraquinonas presentes en Aloe vera, particularmente la emodina, pueden interferir con procesos metabólicos bacterianos y con la síntesis de proteínas microbianas, lo cual contribuye a la inhibición del crecimiento bacteriano.<sup>62</sup>

Además de su actividad antimicrobiana, Aloe vera presenta propiedades antioxidantes significativas debido a la presencia de compuestos fenólicos capaces de neutralizar radicales libres y reducir el estrés oxidativo celular. Estas propiedades antioxidantes contribuyen a la protección celular y a la regeneración de tejidos dañados.<sup>62</sup>

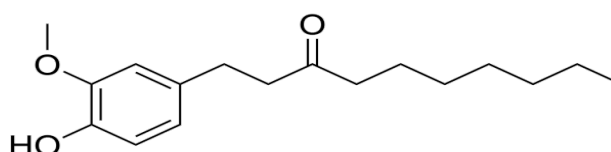
Por otra parte, se ha descrito que los polisacáridos presentes en el gel de Aloe vera pueden estimular la respuesta inmunológica, favoreciendo la activación de células inmunes y la producción de mediadores asociados con la defensa del organismo frente a agentes patógenos.<sup>62</sup>

### 2.9.6 *Zingiber officinale* (jengibre)

*Zingiber officinale*, conocido comúnmente como jengibre, es una planta medicinal perteneciente a la familia Zingiberaceae ampliamente utilizada en la medicina tradicional asiática. El rizoma de esta planta contiene numerosos compuestos bioactivos que han sido estudiados por sus propiedades farmacológicas.<sup>63</sup>

Entre los principales metabolitos secundarios presentes en el jengibre destacan gingeroles, shogaoles, paradoles y zingerona, compuestos fenólicos que han demostrado poseer propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y antimicrobianas.<sup>63</sup>

**Ilustración 39. Estructura química del *Zingiber officinale* (jengibre).**



**Fuente:** Ilustración recopilada de la referencia 63.

Diversas investigaciones han demostrado que los extractos de *Zingiber officinale* presentan actividad antimicrobiana frente a diversos microorganismos patógenos, incluyendo bacterias Gram positivas y Gram negativas. Este efecto se atribuye principalmente a los gingeroles, que pueden alterar la membrana celular bacteriana y afectar la estabilidad estructural de la célula microbiana.<sup>63</sup>

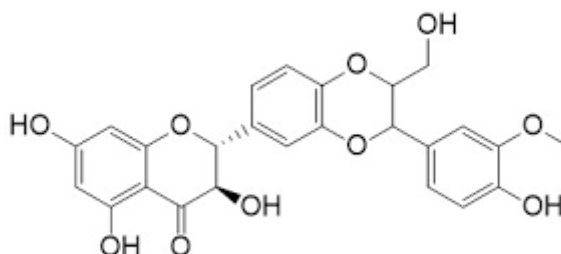
El mecanismo de acción antimicrobiano del jengibre también se relaciona con la inhibición de enzimas bacterianas involucradas en procesos metabólicos esenciales, lo que limita la replicación celular y reduce la proliferación bacteriana. Además, el jengibre presenta propiedades antioxidantes significativas, ya que sus compuestos fenólicos pueden neutralizar radicales libres y reducir el daño celular causado por el estrés oxidativo. Por otra parte, se ha observado que los compuestos bioactivos del jengibre pueden modular procesos inflamatorios, inhibiendo mediadores proinflamatorios y reduciendo la producción de citocinas asociadas con procesos inflamatorios crónicos.<sup>63</sup>

### 2.9.7 *Camellia sinensis* (té verde)

*Camellia sinensis* es una planta perteneciente a la familia Theaceae, cuyas hojas se utilizan para la producción de té verde. Esta planta ha sido ampliamente estudiada debido a su alto contenido de compuestos bioactivos con propiedades farmacológicas.<sup>64</sup>

Entre los principales compuestos presentes en el té verde destacan catequinas, particularmente epigalocatequina galato (EGCG), epicatequina, epigalocatequina y galato de epicatequina. Estos compuestos fenólicos presentan una elevada actividad antioxidante y han sido asociados con diversos efectos terapéuticos.<sup>64</sup>

**Ilustración 40.** Estructura química del *Camellia sinensis* (té verde).



**Fuente:** Ilustración recopilada de la referencia 64.

Diversos estudios han demostrado que las catequinas del té verde presentan actividad antimicrobiana frente a bacterias patógenas, incluyendo especies como *Staphylococcus aureus*, *Helicobacter pylori* y *Escherichia coli*. El mecanismo de acción antimicrobiano de las catequinas se relaciona con la alteración de la membrana celular bacteriana, así como con la inhibición de enzimas esenciales para el metabolismo microbiano.<sup>64</sup>

Asimismo, se ha descrito que las catequinas pueden interferir con la formación de biofilms bacterianos, lo que reduce la capacidad de los microorganismos para colonizar superficies y aumentar su resistencia frente a agentes antimicrobianos. Además de sus efectos antimicrobianos, el té verde presenta propiedades antioxidantes muy potentes, ya que las catequinas pueden neutralizar radicales libres y reducir el estrés oxidativo celular.<sup>64</sup>

Estas propiedades antioxidantes han sido asociadas con la prevención de enfermedades cardiovasculares, metabólicas y neurodegenerativas, lo que ha despertado un gran interés en el uso del té verde como terapia natural complementaria.<sup>64</sup>

En síntesis, los ejemplos analizados evidencian que diversas plantas poseen compuestos bioactivos con propiedades terapéuticas relevantes, entre las cuales destacan actividades antimicrobianas, antioxidantes, antiinflamatorias e inmunomoduladoras. Estas características han despertado un creciente interés científico en el estudio de metabolitos secundarios presentes en plantas medicinales, tales como alcaloides, flavonoides, terpenoides y compuestos fenólicos, los cuales han demostrado efectos biológicos significativos frente a distintos microorganismos patógenos.<sup>64</sup>

La evidencia científica reciente resalta que el uso de recursos naturales como alternativa o complemento a los tratamientos convencionales representa una línea de investigación prometedora, especialmente en un contexto global marcado por el aumento de la resistencia antimicrobiana. En este sentido, el estudio sistemático de especies vegetales con potencial terapéutico contribuye no solo al desarrollo de nuevas estrategias farmacológicas, sino también a la valorización del conocimiento tradicional asociado al uso de plantas medicinales.<sup>64</sup>

De esta manera, los ejemplos presentados permiten comprender el amplio potencial de las terapias naturales basadas en plantas y sientan las bases para continuar explorando otros organismos de origen biológico, como las microalgas, que también han mostrado compuestos bioactivos con actividad antimicrobiana. En consecuencia, el análisis de estos antecedentes resulta fundamental para contextualizar la presente investigación, la cual se enfoca en evaluar

el efecto antimicrobiano de *Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.*, organismos que han despertado un interés creciente dentro del campo de la biotecnología y la salud. <sup>64</sup>

## **CAPÍTULO III- MARCO METODOLÓGICO**

El presente capítulo desarrolla el marco metodológico que sustenta la investigación orientada al “Análisis comparativo del efecto antimicrobiano de *Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.* frente a microorganismos patógenos de interés veterinario y humano”, así como la evaluación del nivel de conocimiento que poseen profesionales y estudiantes del área de la salud sobre este tema. En este apartado se detallan el enfoque de la investigación, el diseño metodológico, la población y muestra, las técnicas e instrumentos de recolección de datos, el procedimiento seguido y el plan de análisis de la información.

La creciente problemática de la resistencia bacteriana a los antimicrobianos ha generado un interés científico creciente en el estudio de compuestos bioactivos provenientes de organismos naturales. En este contexto, las microalgas han sido ampliamente estudiadas debido a la diversidad de metabolitos secundarios descritos en la literatura científica reciente, los cuales han sido asociados con diversas actividades biológicas. Particularmente, los géneros *Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.* han sido reportados como fuentes potenciales de compuestos bioactivos con interés en el ámbito de la salud.

### **3.1 Enfoque y diseño de la investigación**

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, debido a que la información se obtiene por medio de la recopilación y análisis de datos numéricos con el objetivo de describir y analizar el fenómeno de estudio mediante el uso de herramientas estadísticas. Este enfoque permite evaluar el nivel de conocimiento y percepción que poseen los participantes respecto al potencial bioactivo reportado para las cianobacterias y microalgas (*Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.*).

El diseño del estudio es de carácter no experimental, fundamentado en un enfoque descriptivo y transversal que permitió alcanzar los objetivos propuestos mediante dos vías metodológicas complementarias. En primer lugar, se realizó una revisión sistemática de la literatura científica para caracterizar el potencial antimicrobiano de *Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.* frente a patógenos de interés clínico y veterinario. En segundo lugar, el cumplimiento del objetivo diagnóstico se basó en la aplicación de una encuesta estructurada, diseñada para recolectar y analizar la percepción de profesionales del sector salud sobre el uso de estos recursos biotecnológicos en Costa Rica. Este abordaje permitió observar el fenómeno en su contexto natural, sin manipulación de variables, asegurando una recolección de datos alineada con la realidad profesional y bibliográfica actual.

Asimismo, el alcance de la investigación es descriptivo, ya que tiene como finalidad identificar y caracterizar el nivel de conocimiento que poseen los participantes sobre el tema de estudio. El diseño también es transversal, debido a que la recolección de datos se realiza en un único momento temporal.

### **3.2 Población y muestra**

La población de estudio está constituida por personas adultas residentes en Costa Rica que se encuentran vinculadas profesional o académicamente con áreas relacionadas con las ciencias de la salud. Dentro de esta población se incluyen profesionales en farmacia, medicina, medicina veterinaria, microbiología, odontología y otras áreas afines.

Con el propósito de delimitar adecuadamente la población, se establecieron criterios específicos que orientaron la selección de los participantes. Se incluyeron personas que cumplieran con la condición de residencia en Costa Rica, que pertenecieran a las áreas profesionales definidas y que aceptaran participar de forma voluntaria en la investigación. Por el contrario, se excluyeron aquellas personas que no cumplieran con dichas condiciones, así como los registros incompletos o inconsistentes.

La muestra estuvo conformada por los participantes que respondieron voluntariamente la encuesta durante el periodo de recolección de datos. El proceso de selección se realizó mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia, atendiendo a la accesibilidad y disposición de los participantes para colaborar con el estudio. Este tipo de muestreo resulta adecuado para investigaciones descriptivas, en las que el interés principal es explorar y caracterizar el fenómeno dentro de un grupo específico, más que realizar inferencias estadísticas a toda la población.

### **3.3 Técnica e instrumento de recolección de datos**

Para la obtención de la información se utilizó la encuesta como técnica de recolección de datos, debido a su capacidad para recopilar información de manera uniforme y sistemática, facilitando la recopilación de datos cuantificables sobre el nivel de conocimiento y percepción de los participantes respecto al tema de estudio.

El instrumento utilizado fue una encuesta o cuestionario estructurado, diseñado específicamente para cumplir con los objetivos de la investigación. El cuestionario incluyó

preguntas cerradas de selección múltiple, preguntas dicotómicas y escalas de valoración, lo que permitió facilitar el proceso de codificación y análisis estadístico de la información.

Además, la estructura del instrumento se organizó en secciones que permitieron recopilar información general de los participantes, así como datos vinculados directamente con las variables de interés, asegurando la coherencia entre los objetivos del estudio y los ítems planteados.

### **3.4 Procedimiento de recolección de datos**

El proceso de recolección de datos se llevó a cabo de forma planificada y ordenada. Inicialmente, se definieron los criterios de inclusión y exclusión de los participantes, así como la modalidad de aplicación del instrumento. Posteriormente, se difundió la invitación a participar entre personas residentes en Costa Rica pertenecientes a las áreas profesionales definidas.

Antes de completar la encuesta, los participantes fueron informados sobre el propósito de la investigación y se garantiza la confidencialidad de la información proporcionada. Asimismo, se solicitó el consentimiento informado de los participantes, asegurando que su participación fuera completamente voluntaria.

Una vez finalizada la etapa de aplicación, las respuestas fueron consolidadas en una base de datos, la cual fue sometida a un proceso de revisión y depuración, con el fin de eliminar registros incompletos o inconsistentes y preparar la información para su análisis.

### **3.5 Plan de análisis de datos**

El análisis de los datos se realizará mediante procedimientos de estadística descriptiva, utilizando frecuencias y porcentajes para las variables de tipo categórico, así como medidas de tendencia central para aquellas variables medidas en escala.

Cuando sea pertinente, se realizarán comparaciones entre grupos definidos según el área profesional de los participantes (farmacia, medicina, veterinaria u otras), con el fin de identificar similitudes o diferencias en las respuestas. En los casos en que una variable está compuesta por varios ítems, se construirá un puntaje global mediante la suma o el promedio de las respuestas.

Los resultados se presentarán de manera clara y ordenada mediante tablas y gráficos descriptivos, facilitando su interpretación y contribuyendo a la comprensión de los hallazgos obtenidos.

## **CAPÍTULO IV-ANÁLISIS DE RESULTADOS**

El capítulo en curso tiene como propósito presentar y analizar los resultados obtenidos a partir de la aplicación del instrumento de recolección de datos diseñado para esta investigación, la recopilación de la información bibliográfica suministrada al analizar la evidencia científica sobre la actividad antimicrobiana de *Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.*, determinando su eficacia frente a patógenos de importancia clínica. Además, de caracterizar los metabolitos secundarios y los mecanismos de acción biológicos que fundamentan las propiedades antimicrobianas reportadas en la literatura para ambos géneros.

#### 4.1 Evidencia científica y eficacia antimicrobiana de *Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.*

El primer objetivo de esta investigación se centra en la sistematización de la evidencia científica que valida el uso de microalgas y cianobacterias como agentes antimicrobianos.

Este análisis no solo confirma que estos organismos poseen actividad biológica, sino que permite categorizar su eficacia según el tipo de patógeno y el entorno clínico. A continuación, en la tabla 5 se detalla la eficacia antimicrobiana de la *Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.*

**Tabla 5. Eficacia Antimicrobiana de *Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.***

<b>Variable de análisis</b>	<b><i>Arthrospira sp.</i></b>	<b><i>Chlorella sp.</i></b>
<b>Espectro de Acción Principal</b>	Alta eficacia contra <b>bacterias Gram-positivas.</b>	Alta eficacia contra <b>bacterias Gram-negativas.</b>
<b>Principales Patógenos Inhibidos</b>	<i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Enterococcus faecalis</i> , <i>Bacillus subtilis</i> .	<i>Escherichia coli</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Salmonella typhi</i> .
<b>Potencia Antimicrobiana</b>	Moderada a alta. Mayor sensibilidad en cepas cutáneas y respiratorias.	Alta capacidad de inhibir cepas con resistencia múltiple a fármacos (MDR).
<b>Eficacia en Patógenos Veterinarios</b>	Efectiva contra <i>Vibrio sp.</i> bacterias asociadas a la acuicultura.	Muy efectiva contra <i>Campylobacter</i> y enterobacterias en ganado.
<b>Respuesta según el Solvente</b>	Mayor actividad observada en extractos metanólicos y acuosos	Mayor actividad observada en extractos etanólicos y de solventes orgánicos.
<b>Sensibilidad de la Cepa</b>	Las cepas Gram-positivas muestran halos de inhibición más extensos.	Las cepas Gram-negativas, aunque más resistentes, son vulnerables a sus lípidos.
<b>Evidencia en Salud Pública</b>	Reportada como coadyuvante en el control de infecciones oportunistas.	Reportada como alternativa potencial para desinfección y control de brotes entéricos.

**Fuente:** Información recopilada de las referencias 1,3, 5, 6, 9, 15, 19, 21, 31 y 37.

#### 4.1.1 Espectro de Acción frente a Patógenos de Interés Humano.

En este apartado se logró evidenciar que la revisión de literatura científica permite determinar la eficacia de *Arthrospira sp.* este efecto no es uniforme, sino que presenta una selectividad marcada. Los estudios *in vitro* reportados demuestran que ambos géneros son capaces de generar zonas de inhibición significativas frente a bacterias Gram-positivas, como *Staphylococcus aureus* y *Enterococcus faecalis*.<sup>21</sup>

Sin embargo, el hallazgo más relevante para la práctica farmacéutica actual es su capacidad para inhibir bacterias Gram-negativas multirresistentes. Según los datos analizados, extractos de *Chlorella vulgaris* han mostrado resultados prometedores frente a *Pseudomonas aeruginosa* y *Escherichia coli*. Este hecho es de gran importancia, considerando que estas bacterias son responsables de una gran parte de las infecciones nosocomiales en los hospitales de la Caja Costarricense de Seguro Social (CCSS), donde la resistencia a los carbapenémicos y a otras terapias antibacterianas están en aumento.<sup>21</sup>

#### 4.1.2 Eficacia en el Ámbito Veterinario

Un aspecto diferenciador de este estudio es la inclusión de patógenos de interés veterinario. La evidencia científica analizada señala que compuestos derivados de estas cianobacterias y microalgas pueden ser utilizados para controlar brotes de *Salmonella sp.* y *Campylobacter* en la industria avícola y porcina. Esto sugiere que el uso de biomasa de *Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.* no solo actúa como un suplemento nutricional, antioxidante, inmunoestimulante y antibacteriano sino como un agente profiláctico que podría reducir la dependencia de antibióticos convencionales en la producción animal, mitigando así la transferencia de genes de resistencia a los humanos a través de la cadena alimentaria.<sup>29</sup>

#### 4.1.3 Comparativa de Eficacia entre Géneros

Como se observa en la tabla 5 al analizar comparativamente ambos organismos, se observa una tendencia interesante:

- ***Arthrospira sp.***: Muestra una mayor consistencia en la inhibición de bacterias Gram-positivas. Su eficacia parece estar vinculada a la concentración de ficocianina y péptidos específicos que logran penetrar la gruesa capa de peptidoglicano de estas bacterias.

- ***Chlorella sp.***: Exhibe una versatilidad superior. Debido a su composición lipídica única, logra interactuar de manera más efectiva con la membrana externa de las bacterias Gram-negativas, un reto que muchos antibióticos actuales no logran superar con éxito. <sup>13</sup>

#### 4.1.4 Respuesta de los metabolitos bioactivos de *Chlorella sp.* y *Arthrospira sp.* ante los diferentes solventes y métodos de extracción.

Como se evidencia en la tabla 5 la respuesta de los metabolitos bioactivos a los diferentes solventes y métodos de extracción se debe a la naturaleza química y la polaridad de los compuestos presentes en su biomasa, así como a las barreras estructurales de cada organismo. La eficacia de la extracción depende directamente de la capacidad del solvente para solubilizar los metabolitos. <sup>29</sup>

- **Extractos Polares (Metanol, Etanol, Agua)**: Estos solventes son más efectivos para extraer compuestos como fenoles, flavonoides y ciertos péptidos. Los extractos metanólicos y etanólicos suelen presentar una mayor actividad antimicrobiana debido a que concentran una mayor diversidad de moléculas bioactivas que pueden interactuar con las estructuras bacterianas. <sup>29</sup>
- **Extractos No Polares (Hexano, Cloroformo)**: Son ideales para obtener ácidos grasos y pigmentos lipofílicos (como carotenoides). Aunque estos compuestos tienen una potente acción sobre la membrana celular bacteriana, su rendimiento depende de que el solvente logre penetrar la matriz celular. <sup>29</sup>

El método de extracción debe adaptarse a la morfología del organismo para ser efectivo:

- ***Arthrospira sp.***: Al ser una cianobacteria procariota, carece de una pared celular de celulosa ya que es multiestructurada compuesta principalmente por peptidoglicanos, polisacáridos complejos y proteínas. Esto facilita que los solventes penetren con mayor rapidez y que los métodos de extracción convencionales (como la maceración) sean suficientes para liberar metabolitos como la ficocianina. <sup>29</sup>
- ***Chlorella sp.***: Posee una pared celular de celulosa y hemicelulosa sumamente rígida. La respuesta a los solventes es menor si no se aplican métodos de ruptura celular (ultrasonido, molienda o lisis enzimática), ya que la pared actúa como una barrera física que impide el contacto entre el solvente y los metabolitos internos. <sup>29</sup>

Ciertos métodos que implican altas temperaturas pueden degradar metabolitos sensibles, reduciendo la actividad antimicrobiana. Por ello, la elección del método (por ejemplo, extracción asistida por ultrasonido vs. Soxhlet) altera drásticamente el perfil de los resultados obtenidos.<sup>29</sup>

#### 4.2 Caracterización de Metabolitos y Mecanismos de Acción

Este apartado constituye el núcleo científico de la investigación, pues explica el "cómo" y el "por qué" de la actividad antimicrobiana observada. No se trata de un solo compuesto, sino de un fenómeno de sinergia bioquímica. A continuación, en la tabla 6 se detalla el análisis comparativo de la composición comparativa y metabolitos bioactivos. Asimismo, en la tabla 7 se evidencia el efecto comparativo de los metabolitos bioactivos y su respectivo efecto antimicrobiano.

*Tabla 6. Comparativa de Composición Bioquímica y Metabolitos Bioactivos.*

<b>Características</b>	<b><i>Arthrospira sp.</i></b>	<b><i>Chlorella sp.</i></b>
<b>Pigmentos</b>	<b>Ficocianina</b> (biliproteína azul) y Clorofila a.	<b>Clorofila a y b</b> , Carotenos (Luteína).
<b>Lípidos</b>	Alto contenido de Ácido Palmítico, Ácido Gamma-Linolénico y Ácido linoléico.	Ricos en Ácidos Grasos Poliinsaturados (Clorofila y Ácido Palmítico).
<b>Proteínas</b>	60-70% de peso seco Biliproteínas	45-55% de peso seco Complejos clorofila-proteína
<b>Compuestos Fenólicos</b>	Ácido gálico, cafeico y ferúlico predominantes.	Ácido clorogénico y derivados del ácido cinámico

*Fuente:* Información recopilada de las referencias 1, 5, 15, 17, 21, 36, 37, 39, 53 y 64.

**Tabla 7. Comparativa de los Metabolitos y Efectos antibacterianos.**

Familia de metabolitos	Género principal	Objetivo biológico	Mecanismo fisiopatológico
Lípidos (Ácidos Grasos)	<i>Chlorella sp.</i>	Membrana Plasmática	Aumento de permeabilidad y lisis osmótica.
Proteínas (Ficocianina)	<i>Arthrospira sp.</i>	Metabolismo Redox	Generación de estrés oxidativo y daño al ADN.
Fenoles (Ácidos Fenólicos)	<i>Arthrospira sp.</i> <i>Chlorella sp.</i>	Enzimas y Biofilms	Quelación de metales e inhibición de la adhesión.
Carbohidratos (Polisacáridos)	<i>Arthrospira sp.</i>	Comunicación celular	Bloqueo de receptores y del <i>Quorum Sensing</i> .

**Fuente:** Información recopilada de las referencias 1, 5, 9, 21, 31, 37, 39 y 55.

#### 4.2.1 Ácidos Grasos como Agentes de Disrupción de Membrana

Uno de los metabolitos más potentes identificados en el documento son los ácidos grasos de cadena larga, tanto saturados como insaturados (ácido palmítico, linoleico y oleico). Estos lípidos actúan directamente sobre la bicapa lipídica de los microorganismos patógenos. Al ser compuestos anfifílicos, se insertan en la membrana celular bacteriana, alterando su fluidez y permeabilidad. Esto provoca la formación de poros o canales por los cuales se filtra el contenido intracelular (potasio, proteínas, ATP), conduciendo inevitablemente a la lisis o muerte celular. En bacterias Gram-negativas, estos ácidos grasos logran desestabilizar la membrana externa de lipopolisacáridos, facilitando que otros metabolitos de la microalga penetren en el citoplasma.<sup>37</sup>

#### 4.2.2 Compuestos Fenólicos y su Acción Antioxidante e Inhibitoria

Durante el desarrollo de esta investigación se destaca la presencia de ácidos fenólicos (cafeico, ferúlico, gálico) en ambas especies. Los fenoles no solo actúan como antioxidantes que protegen a la microalga, sino que en las bacterias actúan inhibiendo enzimas vitales. Estos compuestos pueden quelar metales esenciales para el metabolismo bacteriano o unirse a proteínas de la superficie celular, inactivándolas. Además, existe evidencia de que los

polifenoles pueden inhibir la formación de biofilms (biopelículas), que son las estructuras que permiten a las bacterias adherirse a superficies y resistir a los antibióticos y desinfectantes. <sup>13</sup>

#### **4.2.3 Pigmentos y el Papel de la Ficocianina y la Clorelina**

- **Ficocianina (*Arthrospira sp.*):** Más allá de ser un pigmento azul, es una proteína con capacidad de generar especies reactivas de oxígeno (ROS) bajo ciertas condiciones de luz, lo que provoca estrés oxidativo en el patógeno, dañando su ADN y sus proteínas estructurales. <sup>22</sup>
- **Clorelina (*Chlorella sp.*):** Este metabolito específico es un antibiótico natural que ha sido descrito como una mezcla de ácidos grasos oxidados. Su capacidad para inhibir el crecimiento bacteriano de forma selectiva lo convierte en un candidato ideal para el desarrollo de nuevas formulaciones farmacéuticas. <sup>15</sup>

#### **4.2.4 Péptidos Antimicrobianos y Polisacáridos Sulfatados**

Se hace hincapié en que las microalgas y cianobacterias sintetizan péptidos de cadena corta que actúan de forma similar a los antibióticos polipeptídicos. Estos péptidos tienen una carga positiva que atrae a la membrana bacteriana (con carga negativa), permitiendo una unión electrostática que rompe la integridad del microorganismo. <sup>22</sup>

### **4.3 Análisis de Percepción Profesional**

Este apartado, se exponen los hallazgos derivados de la encuesta aplicada a profesionales del área de la salud, con el fin de evaluar su nivel de conocimiento, percepción y criterios respecto al potencial antimicrobiano de las cianobacterias y microalgas, así como su posible aplicación en el ámbito terapéutico.

La información recopilada mediante la encuesta fue organizada y analizada utilizando técnicas de estadística descriptiva, lo que permitió sintetizar las respuestas de los participantes mediante frecuencias, porcentajes y representaciones gráficas. Este enfoque facilita la interpretación de los datos y permite identificar tendencias generales relacionadas con el conocimiento previo de los profesionales sobre las propiedades bioactivas de las cianobacterias y microalgas, así como sus percepciones sobre la adopción de terapias antimicrobianas alternativas.

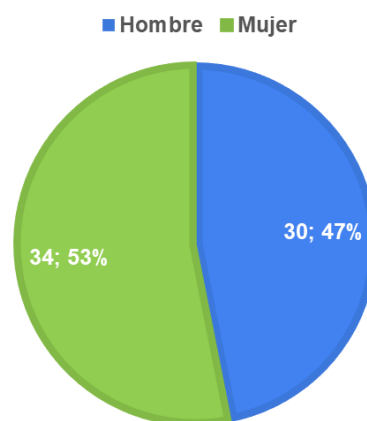
En este capítulo se presentan de manera sistemática las tablas y figuras que resumen los resultados obtenidos, acompañadas de su respectivo análisis e interpretación. Inicialmente se describen las características sociodemográficas de la población participante, incluyendo variables como identidad de género, profesión, experiencia profesional y situación laboral. Posteriormente, se analizan los resultados relacionados con el nivel de conocimiento sobre el potencial antimicrobiano de las las cianobacterias y microalgas, la disposición hacia el uso de terapias alternativas, las barreras percibidas para su adopción, así como el nivel de confianza en productos antimicrobianos de origen natural.

Asimismo, se examinan las percepciones de los profesionales de salud respecto a la aceptación de este tipo de tratamientos por parte de los pacientes, así como las principales preocupaciones y requerimientos de evidencia científica necesarios para considerar la incorporación de estas alternativas terapéuticas en la práctica profesional.

El análisis de estos resultados permite comprender el grado de familiaridad que poseen los profesionales de salud con el potencial antimicrobiano de las las cianobacterias y microalgas, así como identificar posibles brechas de conocimiento y factores que podrían influir en la adopción futura de tratamientos basados en compuestos bioactivos derivados de estos organismos.

### 1. ¿Cuál es su identidad de género?

*Ilustración 41. Distribución porcentual de los participantes según identidad de género.*



*Fuente: Elaboración propia.*

La distribución de los participantes según identidad de género muestra una ligera predominancia femenina dentro de la muestra analizada. Del total de 64 participantes que

respondieron la encuesta, el 53,1% corresponde a mujeres, mientras que el 46,9% corresponde a hombres.

Esta distribución relativamente equilibrada permite considerar que el estudio incorpora perspectivas provenientes de ambos géneros dentro del sector de las ciencias de la salud. Si bien el género no constituye una variable central en los objetivos de la investigación, su análisis permite caracterizar la población participante y aportar contexto al perfil demográfico de los profesionales encuestados.

En el marco de esta investigación, esta variable permite describir la composición de la muestra que aportó información sobre el conocimiento y percepción del potencial antimicrobiano de las microalgas *Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.*, contribuyendo a contextualizar los resultados obtenidos dentro de un grupo profesional diverso.

## 2. ¿Cuál es su profesión?

*Ilustración 42. Distribución porcentual de la profesión de los participantes del estudio.*



*Fuente: Elaboración propia.*

El análisis de la profesión de los participantes evidencia que la mayor proporción de encuestados corresponde al área de medicina, representando el 48,4% de la muestra. En segundo lugar, se encuentra el área de farmacia, con un 35,9% de los participantes. Las demás profesiones presentan una menor representación, incluyendo odontología (6,3%),

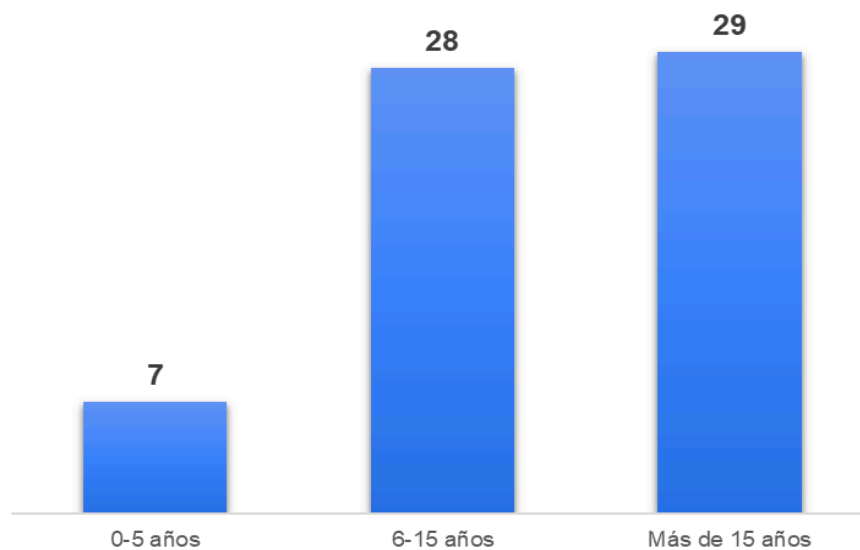
medicina veterinaria (4,7%) y otras disciplinas del área de la salud (4,7%).

Este resultado es particularmente relevante para el objetivo de la investigación, ya que los profesionales del área médica y farmacéutica desempeñan un papel fundamental en la prescripción, selección y evaluación de tratamientos antimicrobianos. Por lo tanto, sus percepciones y nivel de conocimiento respecto al potencial antimicrobiano de las microalgas y cianobacterias resultan especialmente relevantes en el contexto de la búsqueda de nuevas estrategias terapéuticas.

La participación de profesionales de diversas áreas del sector salud permite obtener una aproximación a la percepción sobre las microalgas como posible fuente de compuestos bioactivos. Si bien la representatividad varía entre disciplinas, el análisis de los sectores participantes enriquece la comprensión del fenómeno estudiado y sienta las bases para futuras investigaciones sobre el potencial antimicrobiano de estos recursos.

### 3. Años de experiencia profesional:

*Ilustración 43. Distribución de los encuestados por años de experiencia profesional.*



*Fuente: Elaboración propia.*

La distribución de los años de experiencia profesional muestra que la mayoría de los participantes posee una trayectoria significativa dentro del ámbito de la salud. En particular, el 45,3% de los encuestados reporta más de 15 años de experiencia profesional, mientras que el 43,8% indica tener entre 6 y 15 años de experiencia. Por su parte, únicamente el 10,9% corresponde a profesionales con entre 0 y 5 años de experiencia.

Estos resultados indican que la mayor parte de las respuestas provienen de profesionales con experiencia consolidada dentro de su área de práctica, lo cual puede influir en su criterio respecto a la incorporación de nuevas alternativas terapéuticas. Los profesionales con mayor experiencia suelen basar sus decisiones en evidencia científica sólida y en la práctica clínica acumulada.

En el contexto de esta investigación, la presencia predominante de profesionales con amplia experiencia resulta relevante, ya que sus percepciones pueden reflejar tendencias actuales dentro del ámbito profesional respecto al uso potencial de compuestos antimicrobianos derivados de microalgas.

#### 4. ¿Actualmente se encuentra trabajando?

*Tabla 8. Situación laboral actual de los participantes del estudio.*

Laborando	Cantidad
Sí	62
No	2
<b>Total</b>	<b>64</b>

*Fuente: Elaboración propia.*

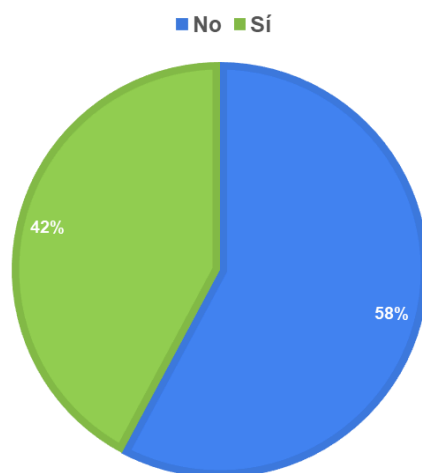
En relación con la situación laboral actual, se observa que la gran mayoría de los participantes se encuentra ejerciendo activamente su profesión. El 96,9% de los encuestados indicó estar actualmente trabajando, mientras que únicamente el 3,1% manifestó no encontrarse trabajando al momento de responder la encuesta.

Este resultado sugiere que las respuestas recopiladas provienen principalmente de profesionales activos dentro del ámbito laboral, lo cual aporta relevancia y actualidad a las opiniones expresadas en el estudio. La experiencia directa en el ejercicio profesional puede influir en la percepción de los participantes respecto a la adopción de nuevas alternativas terapéuticas.

En el contexto de la investigación, la participación de profesionales activos permite considerar que las respuestas reflejan en gran medida las percepciones presentes dentro del entorno sanitario actual sobre el potencial antimicrobiano de las microalgas.

**5. ¿Ha considerado activamente el uso de terapias alternativas, en lugar de los antibióticos convencionales?**

*Ilustración 444. Distribución porcentual de la consideración de terapias alternativas en el tratamiento de infecciones bacterianas.*



*Fuente: Elaboración propia.*

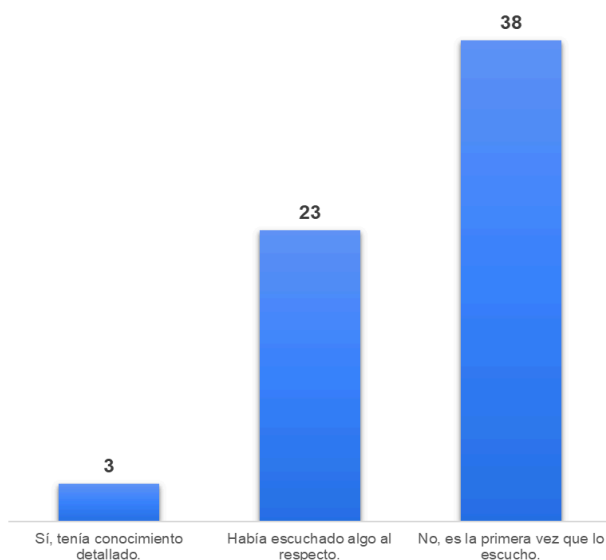
En relación con la consideración de terapias alternativas en lugar de antibióticos convencionales, los resultados muestran que el 57,8% de los participantes indicó no haber considerado este tipo de alternativas, mientras que el 42,2% manifestó haberlas considerado.

Estos resultados reflejan que, aunque los antibióticos convencionales continúan siendo la base del tratamiento de infecciones bacterianas, existe un grupo importante de profesionales que muestra apertura hacia la exploración de alternativas terapéuticas. Esta tendencia puede estar relacionada con la creciente preocupación por el fenómeno de la resistencia antimicrobiana que afecta a la sociedad actual.

En este sentido, las microalgas y cianobacterias han sido objeto de interés científico debido a la presencia de metabolitos bioactivos con potencial antimicrobiano reportado en la literatura científica previamente recopilada. Por lo tanto, el interés mostrado por algunos profesionales en terapias alternativas podría representar un contexto favorable para futuras investigaciones y aplicaciones clínicas en este campo. Sin embargo, la regulación de las terapias alternativas influye directamente en su legitimidad, pudiendo generar sesgos en su adopción."

6. ¿Tenía conocimiento previo sobre el potencial antimicrobiano de las microalgas y cianobacterias, (ejemplo: *Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.*)?

*Ilustración 45. Distribución porcentual del conocimiento previo sobre el potencial antimicrobiano de microalgas y cianobacterias.*



*Fuente: Elaboración propia.*

Los resultados relacionados con el conocimiento previo sobre el potencial antimicrobiano de microalgas y cianobacterias como *Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.* evidencian que este tema aún es poco conocido entre los profesionales, participantes en el estudio.

En particular, el 59,4% de los encuestados indicó que era la primera vez que escuchaba sobre este tema, mientras que el 35,9% señaló haber escuchado información limitada al respecto. Únicamente el 4,7% manifestó poseer un conocimiento más detallado sobre el potencial antimicrobiano de estas microalgas y cianobacterias.

Este hallazgo resulta relevante para el objetivo de la investigación, ya que evidencia una brecha entre el conocimiento científico reportado en la literatura sobre las propiedades bioactivas de las microalgas y cianobacterias con respecto al nivel de conocimiento existente entre los profesionales del área de la salud. Generando un indicador del porqué los profesionales en salud no toman en cuenta a las microalgas y cianobacterias como una posible terapia alternativa contra cepas bacterianas multirresistentes.

7. ¿Cuál de estos factores considera la principal barrera para adoptar un nuevo tratamiento antimicrobiano de origen natural?

*Tabla 9. Principales barreras percibidas por los profesionales de salud para la adopción de tratamientos antimicrobianos de origen natural.*

Factores barrera	Cantidad
Falta de evidencia clínica robusta (ensayos clínicos).	31
Desconocimiento sobre su mecanismo de acción y dosificación.	20
Falta de aprobación por entes regulatorios.	10
Adicional a estudios clínicos, datos de vida real (estudios Real world evidence)	1
Todos los anteriores	1
Desconocimiento del tema y formas farmacéuticas preparadas	1
<b>Total</b>	<b>64</b>

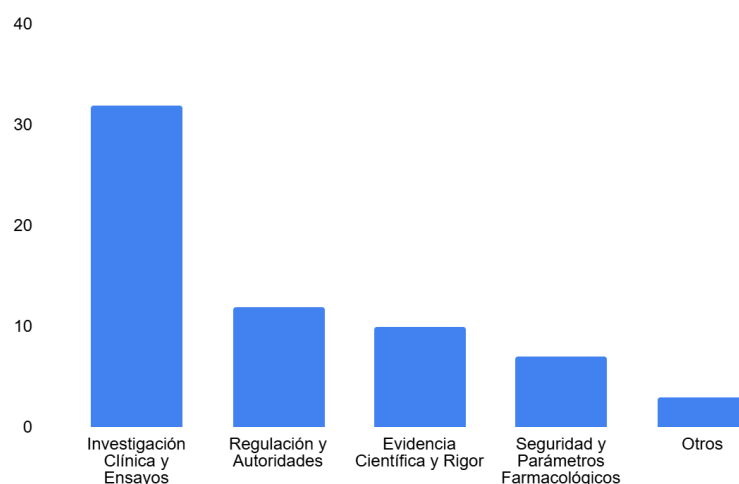
*Fuente: Elaboración propia.*

En relación con las barreras para la adopción de tratamientos antimicrobianos de origen natural, la principal preocupación identificada corresponde a la falta de evidencia clínica robusta, lo cual va acorde con la educación que se les da a los profesionales en salud. Esta misma formación lleva a estos profesionales a la toma de decisiones basadas en evidencia científica.

En segundo lugar, se encuentra la falta de claridad sobre el mecanismo de acción y la dosificación. Estos resultados sugieren que la principal limitación para la incorporación de tratamientos antimicrobianos derivados de microalgas y cianobacterias en la práctica clínica no radica en un rechazo conceptual hacia los productos naturales, sino en la necesidad de contar con evidencia científica sólida que respalde su eficacia, seguridad y aplicabilidad clínica.

**8. ¿Qué tipo de información o evidencia científica le daría la confianza para prescribir un producto basado en microalgas y cianobacterias?**

*Ilustración 46. Distribución de las categorías de evidencia científica consideradas necesarias para la adopción de tratamientos basados en microalgas.*



*Fuente: Elaboración propia.*

El análisis de las respuestas abiertas relacionadas con el tipo de evidencia científica necesaria para confiar en tratamientos basados en microalgas y cianobacterias revela que la mayoría de los participantes considera fundamental la existencia de ensayos clínicos y estudios científicos robustos que respalden su eficacia y seguridad.

Asimismo, varios participantes mencionaron la importancia de contar con publicaciones científicas en revistas especializadas que permitan validar el potencial terapéutico de estos organismos. Este resultado resalta el papel fundamental de la investigación científica en la aceptación de nuevas alternativas terapéuticas dentro del ámbito sanitario.

**9. ¿Cree que sus pacientes (o clientes) aceptarían un tratamiento derivado de una fuente natural como las microalgas y cianobacterias?**

*Tabla 10. Percepción de los profesionales de salud sobre la aceptación de tratamientos derivados de microalgas por parte de los pacientes.*

Aceptación de tratamientos naturales	Cantidad
Sí, pero con algunas dudas.	47
Sí, con gran aceptación.	14
No, mostrarían escepticismo.	3
<b>Total</b>	<b>64</b>

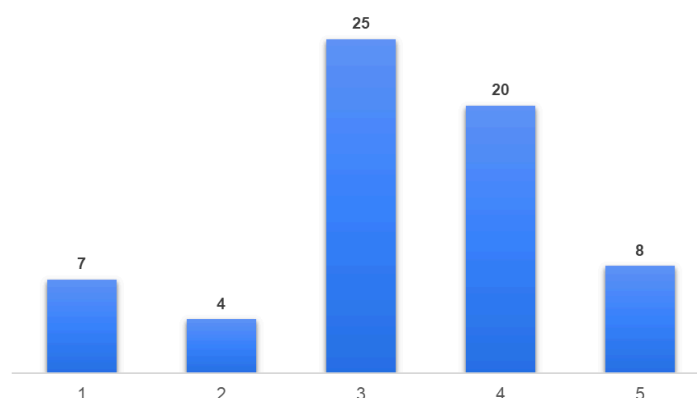
*Fuente: Elaboración propia.*

En cuanto a la percepción sobre la aceptación de tratamientos derivados de fuentes naturales por parte de los pacientes, el 73,4% de los participantes considera que estos tratamientos podrían ser aceptados, aunque con ciertas dudas.

Por otra parte, el 21,9% estima que existiría una aceptación amplia, mientras que únicamente el 4,7% considera que habría escepticismo por parte de los pacientes. Estos resultados sugieren que existe un potencial nivel de apertura hacia terapias derivadas de fuentes naturales, siempre que estas estén respaldadas por evidencia científica suficiente.

**10. En una escala de 1 (muy baja) a 5 (muy alta), ¿cuál es su confianza general en la eficacia de los productos antimicrobianos de origen natural validados científicamente?**

*Ilustración 47. Distribución de la escala de confianza en antimicrobianos naturales validados científicamente.*



*Fuente: Elaboración propia.*

La evaluación del nivel de confianza general en productos antimicrobianos de origen natural mostró una media de 3,28 en una escala de 1 a 5, lo que indica un nivel de confianza moderado entre los participantes.

La mayor concentración de respuestas se ubicó en el valor intermedio de la escala, lo cual sugiere que los profesionales mantienen una postura cautelosa respecto al uso de este tipo de productos. Este resultado puede interpretarse como una apertura hacia nuevas alternativas terapéuticas, aunque condicionada a la disponibilidad de evidencia científica sólida que respalde su uso clínico.

**11. ¿Qué preguntas o preocupaciones tendría usted como profesional, con respecto al uso de tratamientos alternativos basados en microalgas y cianobacterias para el control de bacterias?**

*Tabla 11. Principales preocupaciones de los profesionales de salud respecto al uso de microalgas y cianobacterias como alternativa antimicrobiana.*

<b>Comentarios</b>	<b>Cantidad</b>
Evidencia científica	12
Seguridad	12
Eficacia	11
Dosis	4
Resistencia antimicrobiana	4
Tiempo de acción	4
Sin comentarios	3
Aceptación y Desconocimiento	2
Regulación	2
Calidad y Certificación	1
Conocimiento	1
Costo	1
Dosis y Seguridad	1
Eficacia y Seguridad	1
Evidencia científica y	1
Fabricación	1
Formulación	1
Regulación y Aceptación	1
Tiempo de acción y Seguridad	1
<b>Total</b>	<b>64</b>

*Fuente: Elaboración propia.*

El análisis de las respuestas abiertas permitió identificar varias preocupaciones relacionadas con el posible uso de microalgas como fuente de compuestos antimicrobianos.

Entre las principales preocupaciones destacan la eficacia del tratamiento, la dosificación adecuada, las posibles interacciones con otros medicamentos y la necesidad de contar con evidencia científica suficiente que respalde su uso. En conjunto, estos resultados reflejan que los profesionales de la salud muestran interés en explorar nuevas alternativas terapéuticas, pero consideran indispensable contar con respaldo científico claro antes de incorporarlas en su práctica profesional.

En síntesis, los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la encuesta permiten identificar tendencias relevantes respecto al nivel de conocimiento y percepción que poseen los profesionales encuestados, sobre el potencial antimicrobiano de las microalgas y cianobacterias como *Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.* Se evidenció que, a pesar de que la mayoría de los participantes cuenta con una amplia experiencia profesional y se encuentra activo en el ejercicio de su profesión, el conocimiento específico sobre las propiedades antimicrobianas de estas microalgas es aún limitado.

Asimismo, los resultados reflejan que, aunque existe una apertura moderada hacia la exploración de terapias alternativas frente al uso exclusivo de antibióticos convencionales, la adopción de tratamientos antimicrobianos derivados de fuentes naturales continúa condicionada principalmente por la disponibilidad de evidencia científica sólida que respalde su eficacia y seguridad. Entre los principales factores identificados se destacan la necesidad de estudios clínicos robustos, mayor claridad sobre los mecanismos de acción y dosificación, así como la existencia de marcos regulatorios que avalen su uso terapéutico.

Por otra parte, los profesionales encuestados consideran que los pacientes podrían mostrar una disposición favorable hacia tratamientos de origen natural, siempre que estos cuenten con respaldo científico suficiente. No obstante, también se identificaron preocupaciones relacionadas con la eficacia, seguridad, posibles interacciones farmacológicas y regulación sanitaria de este tipo de productos.

En conjunto, los resultados obtenidos permiten evidenciar la existencia de una brecha entre el conocimiento científico reportado en la literatura sobre el potencial bioactivo de las microalgas y cianobacterias, así como el nivel de conocimiento presente entre los profesionales de la salud.

## **CAPÍTULO V - CONCLUSIONES**

El presente capítulo tiene como finalidad exponer las principales conclusiones derivadas del análisis e interpretación de los resultados obtenidos en la investigación, relacionados directamente con los objetivos planteados y con los fundamentos desarrollados en el marco teórico. Dichas conclusiones, se construyen a partir de la información recopilada mediante la aplicación de la encuesta diferentes profesionales, así como del sustento teórico previamente analizado sobre el potencial antimicrobiano de cianobacterias y microalgas como *Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.*, sus compuestos bioactivos y su posible aplicación terapéutica frente a la resistencia antimicrobiana.

- Tras el análisis exhaustivo de la literatura científica, se concluye que tanto *Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.* representan fuentes biológicas de alto valor con una eficacia comprobada frente a una amplia gama de patógenos de importancia clínica y veterinaria. La evidencia recopilada demuestra que estos organismos no solo poseen propiedades bacteriostáticas, sino también bactericidas frente a microorganismos críticos como *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Salmonella typhi*. Particularmente, se destaca que en ciertos contextos experimentales según las investigaciones recopiladas, los extractos de *Chlorella vulgaris* han mostrado una capacidad inhibitoria superior a la de algunos antibióticos de uso tradicional, lo que refuerza su potencial como alternativa terapéutica ante el aumento de la multirresistencia. Asimismo, la investigación ratifica que la eficacia de estos extractos es dependiente tanto del método de obtención como del disolvente utilizado, siendo los extractos polares y etanólicos los que suelen presentar una actividad biológica más significativa contra cepas resistentes como *Klebsiella pneumoniae*.
- En cuanto a la caracterización de los fundamentos biológicos, se concluye que la actividad antimicrobiana de estos géneros se debe a una compleja sinergia de metabolitos secundarios, entre los que destacan ácidos grasos insaturados de cadena larga (como el ácido palmítico), compuestos fenólicos, péptidos y pigmentos fotosintéticos como la ficocianina y la clorofila. Estos compuestos actúan mediante mecanismos de acción diferenciados y, en ocasiones, complementarios: mientras que *Arthrospira sp.* muestra una eficacia notable contra bacterias Gram-positivas al interferir en la síntesis de la pared celular y desestabilizar la membrana plasmática, *Chlorella sp.* exhibe una mayor potencia frente a bacterias Gram-negativas gracias a la acción de sus lípidos y la producción de clorelina, un metabolito específico capaz de alterar la integridad de la membrana externa bacteriana. Además, se ha determinado que estos organismos pueden interferir con la formación de biofilms

bacterianos y bloquear procesos esenciales como la síntesis de proteínas, lo que valida científicamente su capacidad para neutralizar patógenos que han desarrollado mecanismos de defensa contra las terapias convencionales.

- Los resultados de la investigación evidencian que el nivel de conocimiento de los profesionales del área de la salud sobre el potencial antimicrobiano de cianobacterias y microalgas como *Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.* es limitado, a pesar de que la mayoría de los participantes cuenta con una amplia experiencia profesional y se encuentra activamente ejerciendo su labor. Más de la mitad de los encuestados indicó no haber tenido conocimiento previo sobre este tema, lo que confirma la existencia de una brecha entre la evidencia científica disponible y su difusión en el ámbito clínico.
- Se determinó que, si bien los antibióticos convencionales continúan siendo la principal opción terapéutica, existe una apertura moderada hacia la consideración de terapias alternativas, lo cual puede estar asociado a la creciente preocupación por la resistencia antimicrobiana. Sin embargo, esta apertura no se traduce aún en una adopción práctica, debido a la falta de información científica y evidencia clínica suficiente que respalde el uso adecuado y seguro de las terapias alternativas anteriormente mencionadas.
- La principal barrera identificada para la adopción de tratamientos antimicrobianos de origen natural corresponde a la ausencia de evidencia clínica robusta, seguida por la falta de claridad en aspectos como mecanismos de acción, dosificación y seguridad. Este hallazgo sugiere que el escepticismo de los profesionales no se basa en el origen natural de los productos, sino en la necesidad de respaldo científico sólido.
- Los profesionales de la salud manifestaron que la confianza en productos antimicrobianos derivados de cianobacterias y microalgas depende fundamentalmente de la existencia de ensayos clínicos, estudios científicos validados y publicaciones en revistas especializadas, lo que refuerza el papel central de la investigación científica en la incorporación de nuevas alternativas terapéuticas.
- En relación con la percepción de los pacientes, los resultados indican que existe un potencial de aceptación de tratamientos de origen natural, aunque condicionado a la validación científica de su eficacia y seguridad. Esto sugiere que, de contar con evidencia adecuada, la incorporación de productos basados en microalgas y cianobacterias podría ser socialmente viable en el ámbito sanitario.
- El nivel de confianza general en productos antimicrobianos, de origen natural validados científicamente se ubicó en un parámetro moderado, lo cual refleja una

postura cautelosa por parte de los profesionales de la salud. Esta actitud evidencia una disposición al cambio, pero también una clara exigencia de rigor científico antes de modificar las prácticas clínicas establecidas.

- En conjunto, los resultados permiten concluir que existe una brecha significativa entre el potencial antimicrobiano reportado en la literatura científica para cianobacterias y microalga como *Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.*, y el conocimiento, confianza y aplicación de este potencial por parte de los profesionales de la salud, lo que resalta la necesidad de fortalecer los procesos de investigación, divulgación y transferencia de conocimiento.

## **CAPÍTULO VI - RECOMENDACIONES**

El presente capítulo tiene como propósito formular una serie de recomendaciones derivadas de los principales hallazgos obtenidos en la investigación, en concordancia con los objetivos planteados, las conclusiones alcanzadas y los fundamentos desarrollados en el marco teórico. Estas recomendaciones se sustentan en el análisis de los resultados de la encuesta aplicada a profesionales del área de la salud, así como en la evidencia científica existente sobre el potencial antimicrobiano de cianobacterias y microalgas como *Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.*

- Fortalecer la investigación científica orientada al estudio del potencial antimicrobiano de cianobacterias y microalgas. como *Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.*, priorizando el desarrollo de estudios experimentales, preclínicos y ensayos clínicos que permitan evaluar de manera rigurosa su eficacia, seguridad y dosificación.
- Impulsar estrategias de divulgación y transferencia de conocimiento científico dirigidas a profesionales del área de la salud, tales como programas de educación continua, talleres, seminarios, congresos y publicaciones en revistas especializadas, con el fin de mejorar el nivel de conocimiento sobre las propiedades de los metabolitos bioactivos y aplicaciones terapéuticas de las microalgas y cianobacterias presentadas en esta investigación.
- Promover un enfoque interdisciplinario que integre áreas como microbiología, biotecnología, farmacología, ciencias de la salud y regulación sanitaria, con el objetivo de facilitar el desarrollo, validación y eventual aplicación clínica de tratamientos antimicrobianos derivados de microalgas y cianobacterias.
- Abordar futuras investigaciones de manera específica la elucidación de los mecanismos de acción, las posibles interacciones farmacológicas y los perfiles de seguridad de los compuestos antimicrobianos obtenidos de cianobacterias y microalgas, resulta fundamental para avanzar hacia su validación y eventual aplicación terapéutica. Profundizar en estos aspectos permitiría comprender cómo dichos compuestos ejercen su actividad antimicrobiana a nivel celular y molecular, así como evaluar de forma rigurosa su compatibilidad con tratamientos farmacológicos convencionales.
- Analizar y fortalecer los marcos regulatorios y normativas sanitarias relacionadas con productos antimicrobianos de origen natural, de manera que se establezcan criterios

claros para su evaluación, aprobación y uso terapéutico, garantizando estándares de calidad, seguridad y eficacia comparables a los tratamientos convencionales.

- Desarrollar estudios complementarios centrados en la percepción y aceptación de los pacientes, lo cual permitiría obtener una visión integral de los factores que influyen en la adopción de terapias alternativas basadas en microalgas y cianobacterias.
- Finalmente, se sugiere que futuras investigaciones amplíen el tamaño y la diversidad de la muestra, incorporando profesionales de distintas especialidades y contextos geográficos, con el fin de fortalecer la validez y generalización de los resultados, así como profundizar en el análisis del potencial de las microalgas y cianobacterias como una estrategia terapéutica frente al desafío de la resistencia antimicrobiana.

## **CAPÍTULO VII- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. Villalta-Romero F, Murillo-Vega F, Martínez-Gutiérrez B, Valverde-Cerdas J, Sánchez-Kopper A, Guerrero-Barrantes M. Biotecnología microalgal en Costa Rica: oportunidades de negocio para el sector productivo nacional. *Tecnología en Marcha*. 2019;32(9):85-93. Disponible en: [https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec\\_marcha/article/view/4634/4237](https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/4634/4237)
2. Hernández-Salón S, Madrigal-Mesén J, Blanco-Barrantes J. Cianobacterias y microalgas: Potencial para la salud, la agricultura y el medio ambiente con un vistazo a la investigación en Costa Rica. *Innovación Universitaria* [Internet]. 2019 [citado 21 mar 2026];3(1):42-50. Disponible en: <https://revistas.uia.ac.cr/index.php/innovacionu/article/view/101/271>
3. Patrício J, Gonçalves A, Melo A, et al. Evaluation of microalgae and cyanobacteria as potential sources of antimicrobial compounds. *Front Microbiol*. 2020;11:589429. Disponible en: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7783216/>
4. GRAM Cardiovascular. Global burden of bacterial antimicrobial resistance in 2019: a systematic analysis. *The Lancet*. 2022;399(10325):629-655. doi: 10.1016/S0140-6736(21)02724-0. Disponible en: [https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736\(21\)02724-0/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(21)02724-0/fulltext)
5. Universidad de Costa Rica. Dr. Molina: Costa Rica está entre los países con los niveles más graves de bacterias resistentes [Internet]. San José: Universidad de Costa Rica; 2024 Jan 15 [citado 2024 Nov 13]. Disponible en: <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2024/1/15/dr-molina-costa-rica-esta-entre-los-paises-con-los-niveles-mas-graves-de-bacterias-resistentes.html>
6. Molina A, Thye T, Muñoz-Vargas L, Zamora-Sanabria R, Chercos DH, Hernández-Rojas R, et al. Molecular characterization of antibiotic resistant *Salmonella enterica* across the poultry production chain in Costa Rica: a cross-sectional study. *Int J Food Microbiol*. 2024;110663. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2024.110663>
7. Acurio LP, Salazar DM, Valencia AF, et al. Antimicrobial potential of *Chlorella* algae isolated from stacked waters of the Andean region of Ecuador. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*. 2018;151:012040. Disponible en: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/151/1/012040>

8. Little SM, Senhorinho GNA, Saleh M, Basiliko N, Scott JA. Antibacterial compounds from green microalgae in extreme environments: a review. *Algae*. 2021;36(3):61-72. Disponible en: <https://e-algae.org/upload/pdf/algae-2021-36-3-6.pdf>
9. Kaushik P, Chauhan A. In vitro antibacterial activity of laboratory grown culture of *Spirulina platensis*. *J Appl Phycol*. 2006;18(1):33-39. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3476771/>
10. Lee JY, Lee H, Song JU, Kim MH, Kim YS, Kim TH, et al. Epidemiology and characteristics of metallo- $\beta$ -lactamase-producing *Pseudomonas aeruginosa*: a 2015 update. *Infect Chemother*. 2015;47(2):81-91. Disponible en: <https://www.icjournal.org/search.php?where=aview&id=10.3947/ic.2015.47.2.81&code=0086IC&vmode=FULL>
11. Eissa M, Abd El-Gawad AM, et al. Antibacterial activity of phenolic extract of *Spirulina platensis* and structural elucidation of bioactive compounds. *Egypt J Microbiol*. 2017. Disponible en: [https://egyjs.journals.ekb.eg/article\\_115987.html](https://egyjs.journals.ekb.eg/article_115987.html)
12. El-Sayed HMA, Rawway M, Abed NN, Salah El Din RA. Antibacterial activity of phenolic extract of *Spirulina platensis* and its structural elucidation of bioactive compound. *Egypt J Phycol*. 2017;18(1):45-57. Disponible en: [https://egyjs.journals.ekb.eg/article\\_115987.html](https://egyjs.journals.ekb.eg/article_115987.html)
13. Abdel-Moneim AE, El-Saadony MT, Shehata AM, Saad AM, Aldhumri SA, Ouda SM, Mesalam NM. Antioxidant and antimicrobial activities of *Spirulina platensis* extracts and biogenic selenium nanoparticles against selected pathogenic bacteria and fungi. *Saudi J Biol Sci*. 2022;29(2):1197-1209. Disponible en: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8848030/>
14. Santhosh S, Manivannan N, Ragavendran C, Mathivanan N, Natarajan D, Hemalatha N, Dhandapani R. Growth optimization, free radical scavenging and antibacterial potential of *Chlorella* sp. SRD3 extracts against clinical isolates. *J Appl Microbiol*. 2019;127(2):481-494. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31141277/>
15. Pianta E, Günnewich N, Zimmermann C, Günther P, Petrini O, Diaz-Miyar J, et al. In vitro antibacterial and antifungal activity of an *Arthrospira platensis* extract. *J Altern Complement Med*. 2025;31(2):e251314702. Disponible en: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1934578X251314702>
16. Elsalhin HE, Abobaker HM. Antibacterial study of *Chlorella vulgaris* isolated from fresh water. *Int J Appl Sci*. 2023;5(3):115. Disponible en: <https://doi.org/10.53555/eijas.v5i3.115>

17. Al-Abdulameer SH. The wide spectrum activity of Chlorella and Spirulina extracts on the viability of pathogenic and environmental bacteria in Baghdad, Iraq. Egypt J Aquat Biol Fish. 2022;26(6):1-11. Disponible en: [https://ejabf.journals.ekb.eg/article\\_269099\\_43748a54a8a70e67d12ca7e9ad3735ec.pdf](https://ejabf.journals.ekb.eg/article_269099_43748a54a8a70e67d12ca7e9ad3735ec.pdf)
18. Lio E, Dramis M, Ottolina G, Secundo F. Identifying antimicrobial agents from Chlorella sorokiniana. BioTech. 2025;14(1):22. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2673-4125/14/1/22>
19. Fisher CL, Moodley K, Pillay B. Algal–bacterial co-culture extracts as novel antimicrobial sources: a high-biomass screening approach. Sci Rep. 2024;14:82056. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-82056-9>
20. Heo Y, Park S, Kim Y, Lee J, Han H. Chlorella vulgaris: a representative edible algae with antimicrobial potential. Foods. 2025;14(3):505. Disponible en: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12450572/>
21. El-Shafiey SN, El-Desouky MA, Soliman HM, et al. Mining potential antimicrobial compounds of Arthrospira platensis: in vitro screening of ethanolic extract. Clean Technol Environ Policy. 2025;27:142015. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10098-025-03200-1>
22. Mendes AR, Soares R, Vieira F, Gonçalves A. Chemical compounds, bioactivities, and applications of Chlorella spp.: a comprehensive review. Appl Sci. 2024;14(23):10810. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/23/10810>
23. Jamshidi-Kia F, Bahmani M, Rafieian-Kopaei M. Efficacy of foliar application of Chlorella vulgaris extract on spearmint yield and essential oil composition. Sci Hortic. 2024;326:112345. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024165620>
24. Selim MI, El-Banna T, Sonbol F, Negm WA, Elekhawy E. Unveiling the potential of spirulina algal extract as a promising antibacterial and antibiofilm agent against carbapenem-resistant Klebsiella pneumoniae: in vitro and in vivo study. Microb Cell Fact. 2025;24(1):7. Disponible en: <https://microbialcellfactories.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12934-024-02619>
25. Hosseinabadi T, et al. Antimicrobial activity of partially purified polysaccharide extracts from Arthrospira platensis PCST5. FEMS Microbiol Lett. 2025;372(9):fnaf082. Disponible en: <https://academic.oup.com/femsle/article/372/9/fnaf082/7709850>

26. Fihri RF, et al. Antibacterial and antioxidant activities of *Chlorella vulgaris* using deep eutectic solvents. *Heliyon*. 2024;10:e29432. Disponible en: [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(24\)09](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(24)09)
27. Azmy L, Ahmed A, Saad A, Abdelrahman A, Hassan H, et al. *Arthrospira platensis*-mediated gold nanoparticles with antimicrobial activity against *Streptococcus pneumoniae*. *Int J Mol Sci*. 2024;25(18):10090. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1422-0067/25/18/10090>
28. Shaima AF, et al. Unveiling antimicrobial activity of microalgae *Chlorella* sp. against pathogenic bacteria. *Saudi J Biol Sci*. 2021;28(2):1010-1017. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319562X21001863>
29. Ilieva Y, Zaharieva MM, Kroumov AD, Najdenski H. Antimicrobial and ecological potential of *Chlorellaceae* and *Scenedesmaceae* with a focus on wastewater treatment and industry. *Fermentation* [Internet]. 2024;10(7):341. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2311-5637/10/7/341>
30. Rojas V, Rivas L, Cárdenas C, Guzmán F. Cyanobacteria and eukaryotic microalgae as emerging sources of antibacterial peptides. *Molecules*. 2020;25(24):5804. Disponible en: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7763478/>
31. Abdel-Raouf N, Al-Enazi NM, Ibraheem IB. Antimicrobial and antioxidant activities of green microalgae: *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus obliquus*, and *Spirulina platensis*. *Molecules*. 2022;27(2):519. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1420-3049/27/2/519>
32. Silva-Benavides AM, Sili C, Torzillo G. Cyanoprocaryota y microalgas (*Chlorophyceae* y *Bacillariophyceae*) bentónicas dominantes en ríos de Costa Rica. *Rev Biol Trop*. 2008;56(4):221-223. Disponible en: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/rbt/article/download/27229/27336/73094>
33. Murillo-Vega F, Faith-Vargas M, Chicas-Romero M, Meneses-Montero K, Villalta-Romero F. Advances in microalgal biotechnology in Costa Rica: contributions from the Costa Rica Institute of Technology. *Tecnol Marcha*. 2024;37(Supl 4):48-62. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9904686>
34. Abreu AP, Martins R, Nunes J. Emerging applications of *Chlorella* sp. and *Spirulina* (*Arthrospira*) sp. *Bioengineering*. 2023;10(8):955. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2306-5354/10/8/955>

35. Ramírez-Moreno L, Olvera-Ramírez R. Uso tradicional y actual de *Spirulina* sp. (*Arthrospira* sp.). *Interciencia*. 2006;31(9):657-663. Disponible en: [https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0378-18442006000900008](https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442006000900008)
36. Ortega-Díaz Y, García LG. Cultivo y aplicaciones de *Chlorella vulgaris*: principales tendencias y potencialidades en la agricultura. *Rev Tecnol Quim*. 2022;42(1):70-83. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v42n1/2224-6185-rtq-42-01-70.pdf>
37. Chanda W, Joseph TP, Guo X. Microalgae as a potential source of antimicrobial compounds. *Mar Drugs*. 2021;19(7):379. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/md19070379>
38. Borgio JF, Al-Haj L, Al-Harhi S, Al-Hadhrami A, Al-Badi K, Al-Burtamani S, et al. Antimicrobial activity of *Arthrospira* (former *Spirulina*) and *Dunaliella* related to recognized antimicrobial bioactive compounds. *Int J Mol Sci*. 2024;25(10):5548. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ijms25105548>
39. Finamore A, Palmery M, Bensehaila S, Peluso I. Antioxidant, immunomodulating, and microbial-modulating activities of microalgae. *Nutrients*. 2021;13(4):1014. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/nu13041014>
40. Kapoor RV, Vaidyanathan S. Microalgae: a promising source of bioactive molecules. *Biotechnol Adv*. 2023;63:108089. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2023.108089>
41. Torres-Tiji Y, Fields FJ, Mayfield SP. Microalgae as a future food source rich in bioactive compounds. *Curr Opin Biotechnol*. 2022;73:44-52. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2021.07.010>
42. World Health Organization. Antimicrobial resistance global report [Internet]. Geneva: World Health Organization; 2023. Disponible en: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240062702>
43. Nowicka-Krawczyk P, Mühlsteinová R, Hauer T. Detailed characterization of the *Arthrospira* type species separating *Arthrospira* from *Spirulina*. *Sci Rep* [Internet]. 2019;9(1):694 [citado 2026 Mar 8]. Disponible en: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6345927/>
44. Shutterstock. Estructura molecular del ácido gamma-linolénico [imagen digital]. Nueva York: Shutterstock; 2026 [citado 15 mar 2026]. Disponible en: <https://www.shutterstock.com/es/image-vector/gammalinolenic-acid-gla-gamolenic-molecul-omega6-213975162>

45. Cailà & Parés. Ácido linoléico: obtención y beneficios [Internet]. Barcelona: Cailà & Parés; [citado 15 mar 2026]. Disponible en: <https://cailapares.com/acido-linoleico/>
46. Cieśła L, Kaczorowska A, Kaczorowska B. The chemical structure of chlorophyll a and b [figure]. In: Cieśła L, et al. Microalgae as a source of valuable phenolic compounds and carotenoids. ResearchGate; 2023 [citado 15 mar 2026]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/figure/The-chemical-structure-of-chlorophyll-a-and-b-The-difference-is-highlighted-with-a-red\\_fig1\\_369763380](https://www.researchgate.net/figure/The-chemical-structure-of-chlorophyll-a-and-b-The-difference-is-highlighted-with-a-red_fig1_369763380)
47. Ferraro G, Martino V. Compuestos fenólicos. La Plata: Universidad Nacional de La Plata; 2023. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/155459>
48. Portal Académico CCH. Vitaminas [Internet]. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México; 2017 [citado 15 mar 2026]. Disponible en: <https://e1.portalacademico.cch.unam.mx/alumno/quimica2/u2/vitaminasyminerales/vitaminas>
49. Elsevier. *Arthrospira platensis* [Internet]. Amsterdam (NL): ScienceDirect; 2026 [citado 2026 Mar 14]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/arthrospira-platensis>
50. Hannan MA, Rahman MA, Sohag AAM, Uddin MJ, Dash R, Sikder MH, et al. Black cumin (*Nigella sativa*): a comprehensive review on phytochemistry, health benefits and molecular pharmacology. *Nutrients*. 2021;13(6):1784. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/nu13061784>
51. Fuelgae Project. Five surprising facts about microalgae [Internet]. Brussels (BE): Fuelgae; 2024 [citado 2026 Mar 14]. Disponible en: <https://fuelgae.eu/five-surprising-facts-about-microalgae>
52. Gómez-Espinoza O, Núñez-Montero K, Barrientos Dóaz L. Antimicrobial activity of cyanobacteria-derived compounds. En: *The pharmacological potential of cyanobacteria*. Amsterdam: Elsevier; 2022. p. 145-172. Disponible en: <https://orion.tec.ac.cr/en/publications/antimicrobial-activity-of-cyanobacteria-derived-compounds>
53. Ahmad A, Husain A, Mujeeb M, Khan SA, Najmi AK, Siddique NA, et al. A review on therapeutic potential of *Nigella sativa*. *Asian Pac J Trop Biomed*. 2013;3(5):337–352. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S2221-1691\(13\)60075-1](https://doi.org/10.1016/S2221-1691(13)60075-1)

54. Borgio JF, Al-Haj L, Al-Harhi S, Al-Hadhrami A, Al-Badi K, Al-Burtamani S, et al. Antimicrobial metabolites of Caucasian medicinal plants as alternatives to antibiotics. *Antibiotics*. 2024;13(6):487. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/antibiotics13060487>
55. Borgio JF, Al-Haj L, Al-Harhi S, Al-Hadhrami A, Al-Badi K, Al-Burtamani S, et al. Plant-derived natural products: a source for drug discovery and development. *Drugs Drug Candidates*. 2024;3(1):159–178. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ddc301001155>. Borges A, Ferreira C, Saavedra MJ, Simões M. Antibacterial activity and mode of action of ferulic and gallic acids against pathogenic bacteria. *Microb Drug Resist*. 2013;19(4):256–265. Disponible en: <https://doi.org/10.1089/mdr.2012.0244>
56. Appendino G, Gibbons S, Giana A, Pagani A, Grassi G, Stavri M, et al. Antibacterial cannabinoids from *Cannabis sativa*: a structure-activity study. *J Nat Prod*. 2008;71(8):1427–1430. Disponible en: [https://www.biohanf.ch/info/en/IMG/pdf/np8002673\\_Studie\\_antibakterielle\\_Wirkung\\_von\\_Hanf\\_Novara\\_Sept\\_08.pdf](https://www.biohanf.ch/info/en/IMG/pdf/np8002673_Studie_antibakterielle_Wirkung_von_Hanf_Novara_Sept_08.pdf)
57. Hewlings SJ, Kalman DS. Curcumin: a review of its effects on human health. *Foods*. 2017;6(10):92. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/foods6100092>
58. Sharifi-Rad J, Rayess YE, Rizk AA, Sadaka C, Zgheib R, Zam W, et al. Turmeric and its major compound curcumin on health: bioactive effects and safety profiles. *Front Pharmacol*. 2020; 11:1021. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fphar.2020.01021>
59. Batiha GE, Beshbishy AM, Wasef LG, Elewa YHA, Al-Sagan AA, Abd El-Hack ME, et al. Chemical constituents and pharmacological activities of garlic (*Allium sativum*): a review. *Nutrients*. 2020;12(3):872. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/nu12030872>
60. Anwar F, Latif S, Ashraf M, Gilani AH. *Moringa oleifera*: a food plant with multiple medicinal uses. *Phytother Res*. 2007;21(1):17–25. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ptr.2023>
61. Surjushe A, Vasani R, Saple DG. Aloe vera: a short review. *Indian J Dermatol*. 2008;53(4):163–166. Disponible en: <https://doi.org/10.4103/0019-5154.44785>
62. Mao QQ, Xu XY, Cao SY, Gan RY, Corke H, Beta T, et al. Bioactive compounds and bioactivities of ginger (*Zingiber officinale*). *J Agric Food Chem*. 2019;67(12):3396–3407. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b07015>

63. Cabrera C, Artacho R, Giménez R. Beneficial effects of green tea: a review. *J Am Coll Nutr.* 2006;25(2):79–99. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/07315724.2006.10719518>
64. Gutiérrez-Salmeán G, Fabila-Castillo L, Chamorro-Cevallos G. Aspectos nutricionales y toxicológicos de Spirulina (Arthrospira). *Nutr Hosp.* 2015;32(1):34-40. Disponible en: [https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0212-16112015000700006](https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0212-16112015000700006)
65. Pehlivanov I, Gentscheva G, Nikolova K, Andonova V. Some applications of Arthrospira platensis and algae in pharmaceutical and food technologies [Internet]. Varna (BG): Medical University of Varna; 2024. Disponible en: <https://www.pharmaexcipients.com/wp-content/uploads/2024/02/Some-Applications-of-Arthrospira-platensis-and-Algae-in.pdf>

## **CAPÍTULO VIII. ANEXOS**

# Encuesta sobre conocimiento y percepción de microalgas con efecto antimicrobiano

## Objetivo del cuestionario:

Este cuestionario forma parte de la investigación titulada **"Análisis comparativo del efecto antimicrobiano de *Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.* frente a microorganismos patógenos de interés veterinario y humano "**. El objetivo es evaluar el conocimiento y percepciones sobre *Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.*, enfocándose en sus propiedades antimicrobianas y su potencial frente a bacterias multirresistentes de importancia clínica. Sus respuestas nos ayudarán a comprender barreras, oportunidades y necesidades de información para la adopción de terapias alternativas de origen natural.

## Duración:

La duración del llenado del cuestionario es aproximadamente 5 minutos. No hay respuestas correctas o incorrectas; solo nos interesa conocer su percepción y experiencia personal.

## Declaración de confidencialidad:

La Universidad Internacional de las Américas (UIA), en cumplimiento con lo dispuesto por la **Ley N°.8968 "Ley de Protección frente al Tratamiento de sus Datos Personales"**, garantiza que toda la información suministrada en esta encuesta será tratada de forma estrictamente confidencial y anónima, y utilizada únicamente para los fines específicos del proyecto académico. Los datos recopilados no serán compartidos con terceros ni utilizados con propósitos distintos a los expresamente señalados. El acceso de esta información está restringido al equipo técnico del Departamento de Investigación de la UIA, responsable del resguardo de dicha información, el cuál actúa bajo el compromiso de confidencialidad. **Usted tiene libertad de abandonar el cuestionario en cualquier momento si así lo desea.**

[Siguiente](#)

[Borrar formulario](#)

# Encuesta sobre conocimiento y percepción de microalgas con efecto antimicrobiano

\* Indica que la pregunta es obligatoria

## Sección sin título

1. ¿Cuál es su identidad de género? \*

- Hombre
- Mujer
- Prefiero no decirlo

2. ¿Cuál es su profesión? \*

- Medicina
- Farmacia
- Veterinaria
- Otro: \_\_\_\_\_

3. Años de experiencia profesional: \*

- 0-5 años
- 6-15 años
- Más de 15 años

4. ¿Actualmente se encuentra trabajando? \*

- Sí
- No

5. ¿Ha considerado activamente el uso de terapias alternativas, en lugar de los antibióticos convencionales? \*

- Sí
- No

6. ¿Tenía conocimiento previo sobre el potencial antimicrobiano de las microalgas y cianobacterias (ejemplo: Arthrospira sp. y Chlorella sp.)? \*

- Sí, tenía conocimiento detallado.
- Había escuchado algo al respecto.
- No, es la primera vez que lo escucho.

7. ¿Cuál de estos factores considera la principal barrera para adoptar un nuevo tratamiento antimicrobiano de origen natural? \*

- Falta de evidencia clínica robusta (ensayos clínicos).
- Desconocimiento sobre su mecanismo de acción y dosificación.
- Falta de aprobación por entes regulatorios.
- Posible costo elevado.
- Otro: .....

8. ¿Qué tipo de información o evidencia científica le daría la confianza para prescribir un producto basado en microalgas y cianobacterias? \*

Texto de respuesta larga  
.....

9. ¿Cree que sus pacientes (o clientes) aceptarían un tratamiento derivado de una fuente natural como las microalgas y cianobacterias? \*

- Sí, con gran aceptación.
- Sí, pero con algunas dudas.
- No, mostrarían escepticismo.

10. En una escala de 1 (muy baja) a 5 (muy alta), ¿cuál es su confianza general en la eficacia \*  
de los productos antimicrobianos de origen natural validados científicamente?

1

2

3

4

5

11. ¿Qué preguntas o preocupaciones tendría usted como profesional, con respecto al uso de \*  
tratamientos alternativos basados en microalgas y cianobacterias para el control de  
bacterias?

Texto de respuesta larga

---