

Consorcio bacteriano para degradar compuestos azufrados y mitigar gases y olores en aguas residuales

Bacterial consortium to degrade sulfur compounds
and mitigate gases and odors in wastewater

Laura Natalia Gutierrez J.* <https://orcid.org/0009-0007-0220-1630>
Fabiana Maria Lora-Suarez. <https://orcid.org/0000-0003-0094-3044>
Nelsy Loango Chamorro. <https://orcid.org/0000-0002-4777-3647>

Grupo de Investigación en Ciencias Básicas y Educación (GICBE). Programa de Biología, Facultad de Ciencias Básicas y Tecnologías, Universidad del Quindío, Armenia, Colombia.

Recibido: Julio 15 de 2025

Aceptado: Octubre 20 de 2025

*Correspondencia del autor: Laura Natalia Gutierrez J.

E-mail: lauran.gutierrezj@uqvirtual.edu.co

<https://doi.org/10.47499/revistaaccb.v1i37.332>

Resumen

Introducción. La presencia de compuestos azufrados en aguas residuales constituye un problema ambiental debido a su toxicidad y a la generación de malos olores. Los consorcios bacterianos metabolizadores de azufre representan una alternativa eficiente para su degradación. Este estudio evaluó un consorcio bacteriano compuesto por *Aeromonas* spp. y *Pantoea agglomerans*, aislado de la PTAR La Marina (Armenia, Quindío), para la biorremediación de compuestos azufrados en aguas residuales domésticas. **Objetivo.** Aislar y caracterizar un consorcio bacteriano (*Aeromonas* spp. + *P. agglomerans*) y evaluar su capacidad para degradar compuestos azufrados en aguas residuales. **Materiales y métodos.** Se aisló y conformó un consorcio bacteriano a partir de muestras de la PTAR La Marina. Se realizaron ensayos de tolerancia a Na₂SO₄ y pruebas de incubación en aguas residuales bajo condiciones reales. La disminución de compuestos azufrados se evaluó mediante espectroscopía FTIR y Raman, y adicionalmente se registraron el pH y el oxígeno disuelto antes y después del tratamiento como medidas indirectas de la reducción de H₂S. **Resultados.** Las cepas toleraron concentraciones de hasta 20 mg/L de Na₂SO₄ sin inhibición significativa. *P. agglomerans* mostró mayor capacidad de eliminación de compuestos azufrados que *Aeromonas* spp., además no se observó inhibición en co-cultivo y presentó sinergia. Los análisis FTIR y Raman, junto con el aumento del pH de ~6,9 a ~8,3 y del oxígeno disuelto de ~0,15 a ~0,83 mg/L (equivalente a un aumento de 4,86 veces) evidenciaron la disminución de compuestos azufrados tras el tratamiento. **Conclusiones.** El consorcio bacteriano demostró eficacia en la biorremediación de compuestos azufrados y mejoró la calidad del efluente, evidenciando su potencial aplicación biotecnológica.

Palabras clave: Biorremediación, sulfato de sodio, oxígeno disuelto, FTIR, *Pantoea agglomerans*, *Aeromonas* spp.

Abstract

Introduction. The presence of sulfur compounds in wastewater is an environmental problem due to their toxicity and the generation of unpleasant odors. Sulfur-metabolizing bacterial consortia represent an efficient alternative for their degradation. This study evaluated a bacterial consortium composed of *Aeromonas* spp. and *Pantoea agglomerans*, isolated from the La Marina WWTP (Armenia, Quindío), for the bioremediation of sulfur compounds in domestic wastewater. **Objective.** To isolate and characterize a bacterial consortium (*Aeromonas* spp. + *P. agglomerans*) and evaluate its ability to degrade sulfur compounds in wastewater. **Materials and methods.** A bacterial consortium was isolated and formed from samples from the La Marina WWTP. Na₂SO₄ tolerance tests and incubation tests in wastewater under real conditions were performed. The decrease in sulfur compounds was evaluated using FTIR and Raman spectroscopy, and pH and dissolved oxygen were also recorded before and after treatment as indirect measures of H₂S reduction. **Results.** The strains tolerated concentrations of up to 20 mg/L of Na₂SO₄ without significant inhibition. *P. agglomerans* showed a greater capacity to remove sulfur compounds than *Aeromonas* spp. In addition, no inhibition was observed in co-culture and synergy was present. FTIR and Raman analyses, together with an increase in pH from ~6.9 to ~8.3 and in dissolved oxygen from ~0.15 to ~0.83 mg/L (equivalent to a 4.86-fold increase), showed a decrease in sulfur compounds after treatment. **Conclusions.** The bacterial consortium demonstrated efficacy in the bioremediation of sulfur compounds and improved effluent quality, demonstrating its potential biotechnological application.

Keywords: Bioremediation, sodium sulfate, dissolved oxygen, FTIR, *Pantoea agglomerans*, *Aeromonas* spp.

Introducción

Las aguas residuales generadas por actividades domésticas e industriales contienen una variedad de contaminantes que pueden ser tóxicos para los ecosistemas acuáticos y representar riesgos para la salud humana. Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) desempeñan un papel crucial en la eliminación de estos contaminantes antes de la descarga del agua tratada al medio ambiente (1).

Los olores ofensivos emitidos por las PTAR son sin duda alguna, una molestia para las comunidades aledañas y para el personal que la operan (2). Para reducir los problemas asociados con los vertimientos de aguas residuales, en la actualidad, se emplean métodos de tratamiento basados en sistemas biológicos de fangos activos. En estos sistemas se emplean microorganismos (bacterias aerobias) que necesitan oxígeno para degradar la materia orgánica contenida en el agua residual (3).

Los microorganismos desempeñan un papel fundamental en el ciclo del azufre, y dos grupos importantes de bacterias que participan en este ciclo son las bacterias oxidantes de azufre (SOB) y las bacterias reductoras de

azufre (SRB) (4). Ambos grupos bacterianos tienen una amplia distribución ecológica, en entornos con alta o baja reducción de sulfato, y donde las concentraciones de metales oxidados, nitratos y oxígeno son mínimas (5).

Las bacterias asociadas a los ambientes con presencia de sulfuros son principalmente acidófilas y quimiolitoautótrofas, es decir, tienen la capacidad de obtener energía a partir de materiales inorgánicos y usar CO₂ como única fuente de carbono. Estas bacterias son muy eficaces tanto en la degradación de sulfuros minerales como en la oxidación de hierro y azufre (6). Algunos estudios han explorado la eliminación de iones sulfato (SO₄²⁻) utilizando adsorbentes para apoyar el crecimiento de bacterias anaeróbicas en condiciones ambientales propicias. Este enfoque conduce a un aumento de la población microbiana y prepara el medio para la introducción de alimentos que contienen iones SO₄²⁻. El uso de métodos biológicos representa una de las opciones más efectivas para gestionar efluentes que contienen SO₄²⁻ (7).

La tecnología del producto con microorganismos eficientes (ME), basada en la actividad sinérgica de con-

sorcios de microorganismos eficaces, ha sido reportada como una alternativa para el tratamiento de aguas contaminadas, ya que incrementa las densidades de microorganismos que pueden utilizar los compuestos presentes en el agua como fuente de carbono y energía para su metabolismo y crecimiento, reduciendo sus concentraciones. Además, al emplear una mezcla de varios microorganismos, con características metabólicas diferentes y complementarias entre sí, la cantidad y variedad de los compuestos que pueden ser degradados será mayor y los procesos a su vez, serán más eficaces (4).

Por lo que desde el punto de vista tecnológico, para la eliminación biológica de sulfuros, las bacterias más apropiadas son las quimiolitotrofas oxidantes de azufre, entre las que se encuentran *Thiobacillus* spp., *Sulfobolbus* spp., *Thermothrix* spp., *Beggiatoa* spp. y *Thiothrix* sp. (9). La aplicación de estos consorcios microbianos para la inoculación de biofiltros, resulta más conveniente a escala real, que el empleo de especies aisladas de microorganismos con potencialidades para degradar el compuesto de interés. Aunque la selección de microorganismos efectivos para la remoción de sulfuro de hidrógeno se aplica de forma más frecuente (3).

Bacterias, como *Aeromonas* spp. y *Pantoea agglomerans*, juegan un papel cooperativo en la oxidación y reducción de sulfuros, crucial para la biorremediación en entornos industriales (10). Estas bacterias son aerobias estrictas, con un rango óptimo de crecimiento entre 30°C y 37°C, mostrando una notable capacidad para metabolizar diversos sustratos (11). Por su parte, *Pantoea agglomerans* ha demostrado capacidades de biorremediación, especialmente en la biosorción de metales pesados como Pb, Cu y Fe en diversas condiciones fisicoquímicas, con mayor eficiencia a 35°C (12). Por lo que, la presente investigación tiene como objetivo integrar un consorcio bacteriano autóctono degradador de compuestos azufrados (*Aeromonas* spp. y *Pantoea agglomerans*) para mitigar olores y gases ofensivos en la PTAR La Marina (Armenia, Quindío), dando cumplimiento a la normativa 0635 del 2015, que regula vertimientos líquidos en Colombia, fijando límites a contaminantes que pueden generar impactos ambientales.

Materiales y métodos

Área de estudio y muestreo. El estudio se realizó en la PTAR La Marina (Armenia, Quindío), que trata aguas residuales domésticas de ~128,000 habitantes (EPA, 2018). Se identificaron puntos de muestreo claves: 1)

entrada de la planta (criba); 2) percolador módulo 1; 3) clarificador módulo 1; 4) percolador módulo 2; 5) clarificador módulo 2 y 6) descarga a la quebrada Santa Rita. En cada punto se colectaron 2 L de muestra de aguas, registrando *in situ* pH (pH-metro Hanna), temperatura y porcentaje de saturación de oxígeno disuelto (OD) con oxímetro. Las muestras se transportaron refrigeradas al laboratorio para análisis posteriores.

Aislamiento y caracterización bacteriana. En laboratorio se realizaron diluciones sucesivas (10 mL de muestra original en 90 mL de agua peptonada estéril). Se sembraron alícuotas en placas de agar nutritivo (triplicados) e incubaron a 37°C por 48-72 h para obtener cultivos mixtos. De estos se aislaron colonias puras por estriado repetido. Cada cepa se caracterizó macroscópica (morfología, color) y microscópicamente (tinción Gram). Se realizaron pruebas bioquímicas (catalasa, oxidasa, indol) para caracterizar el metabolismo de cada aislado. Para identificar géneros y especies se utilizó el sistema API 20E (bioquímicos para bacilos Gram-negativos). En total se obtuvieron 18 cepas iniciales; tras clasificar por Gram y enzimología, se seleccionaron para estudios posteriores aquellas consideradas autóctonas, no patógenas y con metabolismo sulfuroso (*Aeromonas* spp. y *Pantoea agglomerans*).

Pruebas de antagonismo y sinergismo. Para evaluar la compatibilidad, se realizaron pruebas de co-cultivo. En placas de agar Mueller-Hinton (MH) se dispusieron inoculaciones duales: *Aeromonas* spp. y *Pantoea agglomerans* separadas sobre la misma placa (método de corte dual) y en placas con inhibición simultánea. Se incubó a 37°C por 24 h y se observó la presencia de halos de inhibición. Paralelamente, para establecer el consorcio, se prepararon cultivos independientes y mixtos en caldo MH suplementado con Na₂SO₄ a 20 mg/L (medio selectivo). Después de 24 h a 37°C (100 rpm), se midió la densidad óptica (DO₆₀₀) de cada cultivo. Una vez alcanzado DO₆₀₀ ≈ 0.8, se iniciaron las curvas de crecimiento: 20 mL de caldo MH+20 mg/L Na₂SO₄ por réplica (triplicado), inoculados con cada cepa o con el consorcio, midiendo la DO₆₀₀ cada 1.5 h durante 5 intervalos (técnica adaptada de González, 2015). Como blancos se incluyeron medios sin inoculo y sin sulfato.

Espectroscopía RAMAN. Para identificar transformaciones de sulfato/sulfuro en el consorcio, se empleó espectroscopía Raman. En triplicado, se incubaron cultivos de cada aislado y del consorcio en MH+20 ppm Na₂SO₄ a 37°C (100 rpm). Cada 12 h se extrajeron 2

mL de cada cultivo y se centrifugaron (13,000 rpm, 20 min). Los pellets fueron analizados en un espectrómetro Raman (espectrofotómetro acoplado a láser), buscando picos de banda ancha característicos del sulfato ($\simeq 450$ – 520 y $\simeq 1000$ cm $^{-1}$).

Ensayos en aguas residuales y cuantificación de manera indirecta de reducción de sulfuro de hidrógeno (H₂S). Se evaluó la capacidad del consorcio en condiciones reales. Se prepararon frascos por triplicado con 200 mL de muestra de agua residual doméstica de la PTAR, sin esterilizar (ARN) y esterilizada 15 min (ARE), la cual fue esterilizada para eliminar todos los microorganismos que contenía el agua naturalmente, además se tuvo como control medio BHI. A cada ensayo se le agregó el consorcio bacteriano (*Aeromonas* spp. o *Pantoea agglomerans*), cabe recalcar que se mantuvo un control sin inoculo. Se incubó todo a 37°C con agitación (100 rpm) por 24 horas. Antes y después del tratamiento se midieron pH y oxígeno disuelto (OD) con una sonda multiparamétrica (HANNA).

Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) para determinación de degradación de compuesto azufrados. Se analizaron cambios químicos en los compuestos sulfurados mediante FTIR, se seleccionaron tiempos de muestra donde el consorcio mostró metabolismo máximo. Los sobrenadantes se secaron en incubadora a 40°C, para reducir interferencia del agua, evitando modificar estructuras orgánicas sensibles a la temperatura, se registraron espectros de infrarrojo en equipo Prestige-21 (Shimadzu) en rango 200–4000 cm $^{-1}$, comparando con controles (medio MH), finalmente, se interpretaron bandas características del ión sulfato (por ejemplo, estiramiento S=O \sim 1130 cm $^{-1}$).

Aspectos éticos

La presente investigación no involucró la participación de seres humanos ni de animales de experimentación, por lo que no representó riesgos directos para su salud o integridad. Todos los procedimientos se realizaron con microorganismos ambientales bajo condiciones controladas de bioseguridad y siguiendo las buenas prácticas de laboratorio, asegurando el manejo adecuado de residuos y la protección del personal investigador. El proyecto únicamente se desarrolló tras contar con la autorización de la institución académica y de la planta de

tratamiento de aguas residuales implicada, cumpliendo con las directrices institucionales establecidas. Asimismo, se enmarca en la normativa ambiental colombiana, particularmente la Ley 99 de 1993 y el Decreto 1076 de 2015, que regulan la protección del medio ambiente y el uso sostenible de los recursos naturales, así como en la Resolución 1541 de 2013 y la Resolución 631 de 2015 que fijan los criterios para el control de olores ofensivos y vertimientos. A nivel internacional, el trabajo se acoge a los principios del Convenio de Diversidad Biológica (1992) y a la Declaración Universal sobre Bioética y Derechos Humanos de la UNESCO (2005), reconociendo la importancia de realizar investigación científica en armonía con la conservación ambiental y el respeto a la dignidad humana.

Resultados

Caracterización bacteriana y aislamiento. De las muestras de agua residual se obtuvieron cultivos mixtos con hasta tres morfotipos por placa (18 cepas aisladas en total). La mayoría fueron bacilos Gram-negativos, con algunas cepas Gram-positivas en un menor número de placas. Las pruebas bioquímicas mostraron la diversidad metabólica inicial; tras el análisis API-20E se identificaron entre otras *Aeromonas* spp. y *Pantoea agglomerans* como cepas de interés por su potencial reductor de sulfato. No se observaron fenotipos patogénicos durante la identificación. Estas dos cepas seleccionadas sirvieron para formar el consorcio experimental.

Pruebas de tolerancia al sulfato. En los ensayos con concentraciones crecientes de Na₂SO₄ (3, 8, 13, 18, 23 mg/L) en medio MH, todas las cepas desarrollaron crecimiento. Los diagramas de caja (Figura 1) evidenciaron que las medias de DO₆₀₀ fueron mayores a altas concentraciones (13–23 mg/L) que a bajas (3–8 mg/L), indicando mayor tolerancia en ambientes salinos. El análisis estadístico (ANOVA) mostró diferencias significativas entre las concentraciones ($p < 0.005$). La prueba de Dunn a posteriori reveló que la concentración 3 mg/L fue significativamente inferior ($p \leq 0.05$) respecto a las demás, mientras que 8–23 mg/L no presentaron diferencias entre sí. En el control sin sulfato (0 mg/L) se observó crecimiento comparable a los tratamientos con sulfato ($p \geq 0.744$). En base a estos resultados se continuó con 20 mg/L para ensayos de degradación.

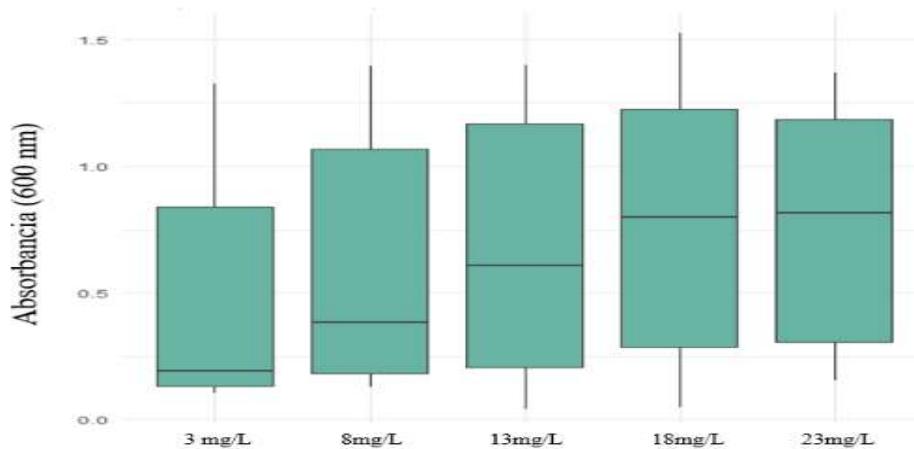


Figura 1. Tolerancia del consorcio bacteriano conformado por *Aeromonas* spp. y *Pantoea agglomerans* frente a diferentes concentraciones de sulfato de sodio (Na_2SO_4), evaluada mediante la densidad óptica como indicador de crecimiento bacteriano.

Pruebas de antagonismo y sinergismo. Una vez realizadas las observaciones a las placas duales, pasadas las 24 horas; se evidenció la ausencia de halos de inhibición en todas las placas petri inoculadas, tanto en las placas duales como en las placas de inhibición simultánea (Tabla 1). Indicando que ambos aislados permiten el crecimiento del otro sin un antagonismo. Para el caso de las pruebas de sinergismo, para cada aislado por independiente, así como para el consorcio una vez analizadas y graficadas las absorbancias en el transcurso de las horas, se evidenció un crecimiento exponencial para cada experimento, donde el consorcio tuvo un comportamiento similar al de los aislados, pero en los últimos tres puntos (T3, T4, T5) un incremento leve en su crecimiento; indicando un sinergismo.

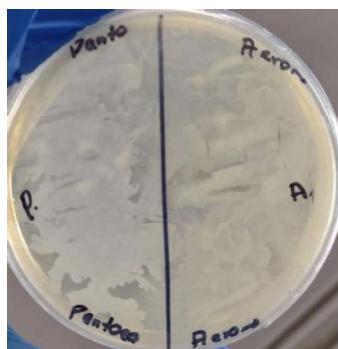
Tabla 1. Pruebas de antagonismo entre *Aeromonas* spp. y *Pantoea agglomerans* en medio Mueller-Hinton.



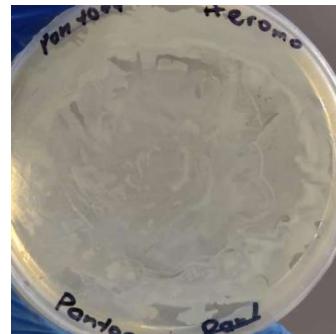
Control de crecimiento *P. Agglomerans*.



Control de crecimiento *Aeromonas* spp.



Cultivo en placa dual.
Pantoea agglomerans (P)
Aeromonas spp. (A)



Cultivo inhibición simultánea
Pantoea agglomerans (P)
Aeromonas spp. (A)

Espectroscopía RAMAN. Los análisis Raman en el consorcio establecido se observó que la intensidad del pico cerca de 1000 cm^{-1} disminuía ligeramente con el tiempo (Figura 2), sugiriendo la transformación de compuestos sulfatados por la acción conjunta de ambas cepas. También aparecieron bandas variables en el espectro del consorcio (500 – 1500 cm^{-1}) vinculadas a metabolitos microbianos (C–C, C–N, O–H) según Xiaonan Lu et al. (2011), lo que indica producción de biomasa y compuestos oxigenados al eliminar los derivados del sulfato.

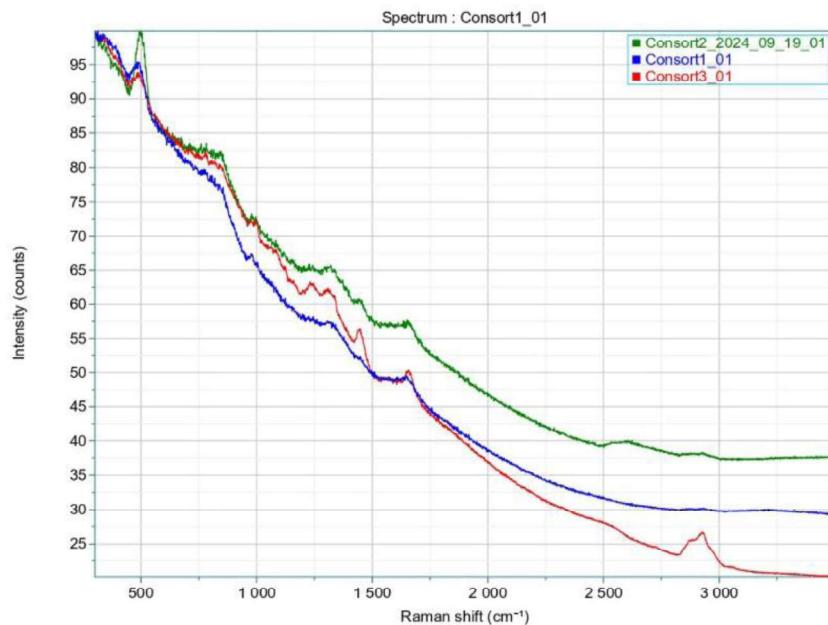


Figura 2. Espectro Raman del consorcio bacteriano *Aeromonas* spp.–*Pantoea agglomerans* incubado en medio suplementado con sulfato de sodio, donde se observan variaciones en las bandas características asociadas a compuestos sulfatados y metabolitos microbianos.

Ensayos en aguas residuales naturales. El consorcio también se probó en condiciones de aguas residuales recolectadas en la PTAR. En el medio no esterilizado (ARN) el consorcio creció hasta OD final ≈ 0.9 , superior al observado en agua esterilizada (ARE, OD ≈ 0.6) (Figura 3). La nutrición adicional del agua natural posiblemente favoreció su crecimiento. El análisis FTIR de estas muestras finales (Figura 4, 5 y 6) mostró atenuación de la banda de estiramiento S=O ($\sim 1135\text{ cm}^{-1}$) y un incremento relativo de señales de O–H y C=O (≈ 3200 – 3700 y 1700 cm^{-1}), indicando una posible oxidación de compuestos sulfurosos a productos más oxigenados.

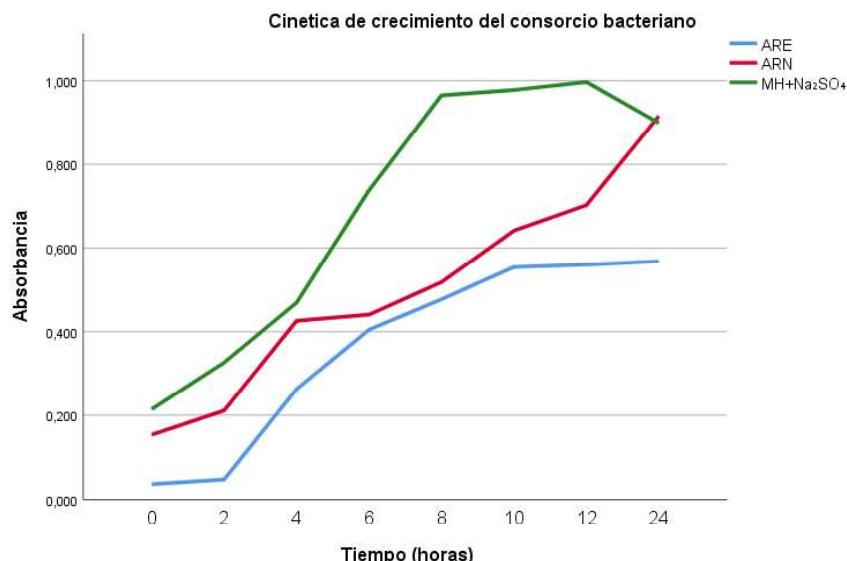


Figura 3. Curva de crecimiento del consorcio bacteriano *Aeromonas* spp. y *Pantoea agglomerans* durante 24 horas de incubación en aguas residuales, evidenciando la dinámica poblacional del consorcio en condiciones experimentales.

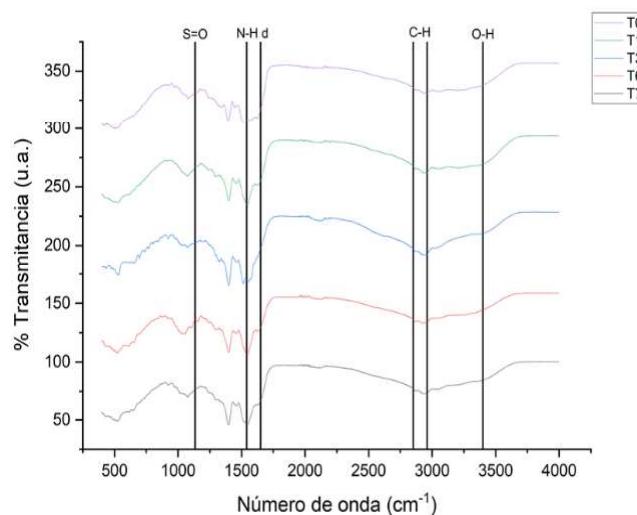


Figura 4. Espectro FTIR en medio artificial MH + Na₂SO₄ a 20 ppm tras el tratamiento con el consorcio bacteriano, mostrando cambios en las bandas.

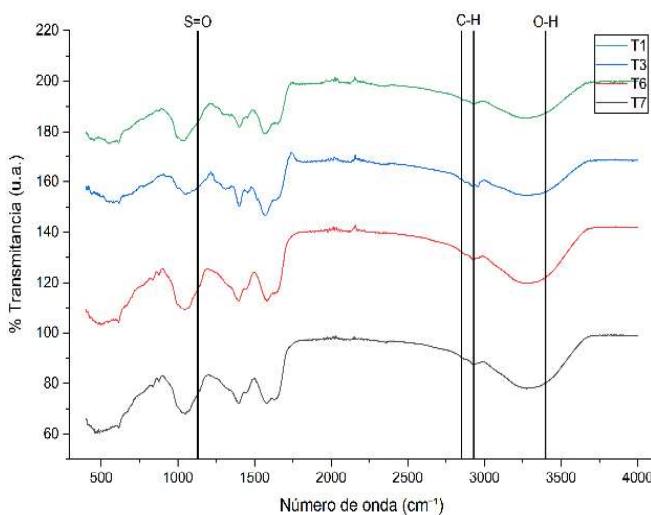


Figura 5. Espectro FTIR en agua residual esterilizada por 15 minutos tras el tratamiento con el consorcio bacteriano, mostrando cambios en las bandas.

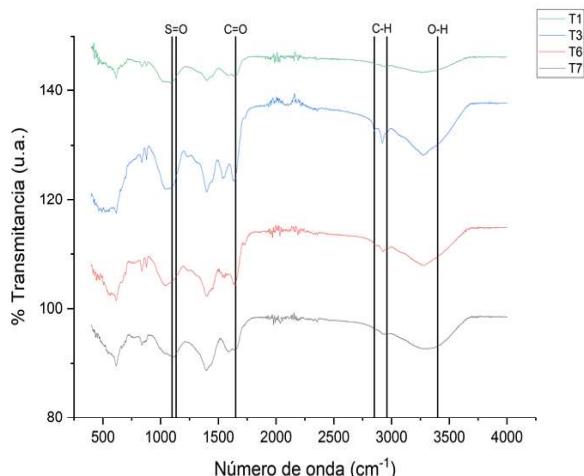


Figura 6. Espectro FTIR en agua residual natural (no esterilizada) tras el tratamiento con el consorcio bacteriano, mostrando cambios en las bandas.

Tabla 2. Variación del pH y del oxígeno disuelto en aguas residuales antes y después del tratamiento con el consorcio bacteriano *Aeromonas* spp. – *Pantoea agglomerans*.

Condiciones

Antes del ensayo			Después del ensayo		
pH	OD (mg/L)	%OD	pH	OD (mg/L)	%OD
6.946	0.15	1.9	8.27	0.88	13
			8.44	0.83	12.1
			ARE		
			ARN		

Discusión

Los resultados obtenidos concuerdan con reportes previos sobre la adaptación de bacterias a ambientes con sales y la degradación de sulfatos. Estudios describen que las bacterias halotolerantes emplean mecanismos osmoadaptativos (ajustes osmóticos, bombas iónicas, compuestos compatibles) para tolerar elevadas concentraciones de sal sin comprometer su viabilidad (13). Esto explica la observada resistencia de las cepas a altas dosis de Na₂SO₄. De hecho, se han documentado BRS capaces de crecer con Na₂SO₄ al 20-25%, lo que respalda las altas tolerancias registradas (14).

En cuanto a la degradación de sulfatos, se ha documentado que *Aeromonas* spp. pueden metabolizar compuestos difíciles: por ejemplo, Mathews (15) mostró degradación de xenobióticos recalcitrantes, y Paulo et al. (16) reportaron degradación de surfactantes industriales por *Aeromonas* spp. Además, *Aeromonas* spp. es capaz de procesar hidrocarburos y diferentes formas de sulfato (17) (18) (19). Por su parte, *Pantoea agglomerans* es destacada por su metabolismo sulfato-reductor: Chalco et al. (20) y Daza et al. (21) han descrito su capacidad de reducir sulfatos y metales pesados (selenio, plomo, cobre, hierro) en entornos contaminados. En conjunto, estas evidencias respaldan que los géneros estudiados poseen rutas metabólicas eficientes para transformar compuestos sulfurados, coherentes con las reducciones parciales de compuestos azufrados observadas en los experimentos. Por otro lado, el FTIR apoya este hallazgo: la banda S=O desaparecida al final confirma que esta cepa asimiló el sulfato totalmente (algo previamente insinuado por Gram y bioquímica).

Al establecer consorcios combinando *Aeromonas* spp. y *Pantoea agglomerans*, se observó que ambos aislados crecieron sin inhibirse mutuamente, y el consorcio presentó un leve incremento de crecimiento respecto a los aislados individuales. Layedra et al. (22) documentan consorcios similares en los que la cooperación microbiana acelera la degradación de sustratos complejos, confirmando sinergia en la asimilación de carbono. Además, estudios sobre el ciclo microbiano del azufre indican que géneros como *Aeromonas* y *Pantoea*, aunque no son los SOB clásicos, pueden integrarse en redes metabólicas sulfuradas, aportando rutas complementarias para degradar materia orgánica y transformar compuestos sulfurosos (23) (4). Estos hallazgos sugieren que la combinación de ambos géneros favorece la eficiencia del sistema en la descontaminación de aguas residuales con contenidos de azufre.

Los espectros FTIR muestran la atenuación de la banda asociada al estiramiento S=O ($\sim 1135 \text{ cm}^{-1}$) a lo largo del tiempo, indicando la reducción progresiva de sulfatos en el medio tratado. Singh et al. (24) reportaron resultados análogos, con hasta un 82% de remoción de sulfatos (analizada por FTIR y parámetros BOD/COD) en sistemas bacterianos, vinculando específicamente las variaciones en las bandas S=O y O-H con la eliminación de sulfuros. Paralelamente, Parikh et al. (25) destacan que las bandas O-H, C=O y S=O son indicadores clave de la reactividad de la materia orgánica en biorremediación, dado que su modificación refleja

la transformación microbiana de compuestos oxigenados. Estudios recientes también coinciden en este patrón: Liu et al. (26) observaron que consorcios bacterianos en condiciones anóxicas reducen notablemente SO_4^{2-} generando sulfuros metálicos, y Gong et al. (27) encontraron que la intensificación de bandas O-H/C=O en FTIR corresponde a la acumulación de metabolitos oxigenados tras la degradación microbiana de sulfurados. En conjunto, la disminución de la señal S=O y el aumento de bandas O-H/C=O en los análisis FTIR realizados respaldan un proceso activo de biorremediación por el consorcio microbiano.

En un estudio realizado por Chen et al. (28) indica que, con un suministro insuficiente de sulfuro, la actividad de los desnitrificadores autótrofos disminuyó. Esto significa que, al reducirse la concentración de sulfato/sulfuro, se limita la actividad microbiana responsable de generar especies que consumen protones (OH^-). En consecuencia, el sistema pierde capacidad tampón y se favorece un aumento del pH, ya que se reduce la neutralización de la acidez presente en el medio. También, en el estudio de Krishnakumar et al. (29) sobre el uso de un reactor de lecho fluidizado inverso (RFLR), se reporta que, durante la etapa inicial de oxidación bacteriana del sulfuro, el sulfato fue el producto predominante de la oxidación de sulfuro en esta etapa y se observó un descenso subsiguiente en el pH en el RFLR. Esto se debe a que la conversión completa de HS^- a SO_4^{2-} libera protones (H^+), disminuyendo el pH; en contraste, la formación de azufre elemental genera OH^- y aumenta la alcalinidad, lo que tiende a estabilizar o incrementar el pH del medio.

Por otro lado, el aumento de oxígeno disuelto puede deberse a la eliminación de sulfuros u otros compuestos oxidables que consumen oxígeno. En el estudio de Ramírez et al. (30) se observó que la inyección de un consorcio de microalgas logró reducir los niveles de sulfuros disueltos, lo que se acompañó de un notable incremento en el oxígeno disuelto (OD). Este comportamiento puede estar relacionado con un mecanismo similar al descrito en sistemas microbianos: la actividad biológica favorece la oxidación del sulfuro, utilizando el OD disponible y promoviendo su regeneración. Las adiciones consecutivas de pulsos de sulfuro disuelto evidenciaron que la tasa de acumulación de OD se redujo por la oxidación química espontánea del sulfuro con oxígeno disuelto en medios de cultivo alcalinos, principalmente a altos niveles de sulfuro. Por lo que, la disminución de sulfuros podría estar directamente

vinculada a una dinámica de consumo y renovación del oxígeno disuelto mediada por la actividad microbiana. En concordancia, Nielsen y Vollertsen (31) señalan que la oxidación de sulfuros es típicamente el proceso más importante para la eliminación de sulfuros en aguas residuales de alcantarillado aeróbico por gravedad. Este antecedente respalda que, la actividad microbiana favoreció la oxidación de sulfuros, contribuyendo tanto a su remoción como al incremento del OD.

En comparación con tratamientos fisicoquímicos convencionales, la utilización de consorcios bacterianos locales resulta más sustentable y económica. Los datos obtenidos muestran una mejora notable en la calidad del efluente tratado, similar a la reportada por otras aplicaciones de consorcios autóctonos en biorreactores (32) (33). Además de una alternativa para cuantificar H₂S de manera indirecta a través del análisis de factores como el pH y el OD. Sin embargo, el progreso ha de validarse en escalas mayores: por ejemplo, se recomienda realizar pilotos en la PTAR para monitorizar la reducción real de H₂S con sensores dedicados, tal como sugieren las guías del PRIO.

Finalmente, se recomienda evaluar el desempeño del consorcio microbiano en sistemas pilotos de tratamiento de aguas residuales. La inoculación controlada de *Ae-*

romonas spp. –*Pantoea agglomerans* en etapas estratégicas del proceso podría mejorar la oxidación biológica de H₂S y la reducción de sulfatos en el agua tratada. Es aconsejable incorporar monitoreo en tiempo real de H₂S mediante sensores específicos, para cuantificar directamente la disminución de olores ofensivos en función del tiempo de operación.

Agradecimientos

Las autoras agradecen a la Universidad del Quindío (100016837), al igual que el laboratorio del grupo de investigaciones GECAVYME; además se agradece a la investigadora Yenifer Palacios, por la tutoría y el acompañamiento brindado, además se agradece a las Empresas Públicas de Armenia (EPA ESP)

Conflictos de interés y financiación

Los autores declaran que no tiene ninguna situación de conflicto de interés real, potencial o evidente, en relación con la ejecución de ningún proyecto.

La financiación de este proyecto fue a través del grupo de investigación en Ciencias Básicas y Educación (GICBE), así como por la gestión y espacios físicos de empresas públicas de Armenia EPA ESP.

Referencias

1. United States Environmental Protection Agency. *Primer for Municipal Wastewater Treatment Systems (EPA 832-R-04-001)*. Office of Water, Office of Wastewater Management; 2004.
2. Sánchez I., Revelo D., Burbano A., García R., Guerrero C. Eficiencia de consorcios microbianos para tratamiento de aguas residuales en un sistema de recirculación acuícola. *Bioteclol. Sector Agropec. Agroind.* 2013; 11: 245-254.
3. Barreiro Vescovo S.N. Caracterización de los consorcios microalgas y bacterias en el tratamiento de aguas residuales urbanas. 2019.
4. Wu B., Liu F., Wenwen F., Yang T., Chen G.H., He Z., Wang S. Microbial sulfur metabolism and environmental implications. *Sci. Total Environ.* 2021; 778: 146085. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.146085.
5. Jørgensen B.B. Unravelling the sulphur cycle of marine sediments. *Environ. Microbiol.* 2019; 21: 3533-3538. doi:10.1111/1462-2920.14721.
6. Pronk J.T., Lien K., Bos P., Kuenen J.G. Energy transduction by anaerobic ferric iron respiration in *Thiobacillus ferrooxidans*. *Appl. Environ. Microbiol.* 1991; 57: 2063-2068. doi:10.1128/AEM.57.7.2063-2068.1991.
7. Novair S.B., Quchan Z.B., Lajayer B.A., Shu W., Price G.W. The role of sulphate-reducing bacteria (SRB) in bioremediation of sulphate-rich wastewater: focus on the source of electron donors. *Process Saf. Environ. Prot.* 2024; 184: 190-207. doi:10.1016/j.psep.2024.01.103.
8. Ngurah G. Experimento preliminar de EM. *Tecnología en tratamiento de aguas residuales*. Indonesia Kyusei Naturaleza Sociedad Agropecuaria, Saraburi, Tailandia; 2005: 1-6.
9. Haosagul S., Prommeenate P., Hobbs G., Pisutpaisal N. Sulfide-oxidizing bacteria community in full-scale bioscrubber treating H₂S in biogas from swine anaerobic digester. *Renew. Energy* 2020; 150: 973-980. doi:10.1016/j.renene.2019.11.139.

10. Rana K., Rana N., Singh B. Aplicaciones de las bacterias oxidantes de azufre. En: Aspectos fisiológicos y biotecnológicos de los extremófilos. Prensa Académica; 2020: p.131-136. doi:10.13140/RG.2.2.13477.79840.
11. Medina Mori M. Energía alternativa a partir de la bacteria *Pseudomonas aeruginosa* y *Aeromonas hydrophila* por la técnica de la bioelectrogénesis. 2018. doi:10.26789/ANZSJA.2004.13.
12. Audu K.E., Adeniji S.E., Obidah J.S. Bioremediation of toxic metals in mining site of Zamfara metropolis using resident bacteria (*Pantoea agglomerans*): an optimization approach. *Helijon* 2020; 6: e04799. doi:10.1016/j.heliyon.2020.e04799.
13. Nguyen K., Kumar P. Morphological phenotypes, cell division, and gene expression of *Escherichia coli* under high concentration of sodium sulfate. *Microorganisms* 2022; 10: 274. doi:10.3390/microorganisms10020274.
14. Yang Z., Wu Q., Liu Z., Qi X., Zhang Z., He M., Yin H. Harnessing sulfate-reducing bacteria with plants to revitalize metal-tainted coal mine soils in Midwest China: metal sequestration performance, ecological networking interaction, and functional enzymatic prediction. *Front. Microbiol.* 2023; 14: 1306573. doi:10.3389/fmicb.2023.1306573.
15. Mathews L., Abu-Reesh I.M., Nakhla G. *Aeromonas hydrophila* in wastewater treatment: biofilm formation and pollutant removal. *Bioresour. Technol.* 2018; 265: 256-263.
16. Paulo P.L., Jiang B., Stams A.J.M. *Aeromonas* species and their role in biodegradation of industrial surfactants in wastewater. *Water Sci. Technol.* 2017; 75: 1195-1205.
17. Beltrán J., Álvarez M., Restrepo C. Hydrocarbon and sulfate biodegradation potential of *Aeromonas* spp. isolated from contaminated aquatic environments. *Int. Biodeterior. Biodegradation* 2016; 115: 192-200.
18. Montenegro S., Villamil C., Pérez J. Sulfate metabolism pathways in *Aeromonas* spp.: implications for wastewater bioremediation. *Environ. Technol. Innov.* 2021; 24: 101939.
19. Castro R., Méndez E., Rodríguez P. Sulfur compound transformation by *Aeromonas* strains in polluted waters. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2016; 134: 201-208.
20. Chalco A., Vargas M., Herrera D. *Pantoea agglomerans* in sulfur removal bioprocesses. *Environ. Biotechnol.* 2022; 18: 59-72.
21. Daza E., Gutiérrez L., Rojas H. Bioreduction of sulfates and heavy metals by *Pantoea agglomerans* in contaminated environments. *J. Environ. Manage.* 2016; 184: 505-512.
22. Layedra A., Bravo R., Torres L. Evaluación de un consorcio microbiano y selección de un soporte en un sistema de biofiltración. *Ing. Invest.* 2019; 39: 45-54.
23. Díaz-Borrego J., López J., Ramos M. Microbial networks in the sulfur cycle: new insights into wastewater ecosystems. *J. Appl. Microbiol.* 2017; 122: 231-243.
24. Singh S., Kumar A., Ghosh P. Sulfate removal from wastewater using bacterial systems: an FTIR-based study. *J. Hazard. Mater.* 2011; 192: 295-302.
25. Parikh S.J., Goyne K.W., Margenot A.J., Mukome F.N., Wagner S. Soil chemical insights provided through vibrational spectroscopy. *Adv. Agron.* 2014; 126: 1-148.
26. Liu Y., Chen J., Zhou X. Anoxic bacterial consortia reduce sulfate to metal sulfides in wastewater treatment. *Water Res.* 2024; 236: 120201. doi:10.1016/j.watres.2023.120201.
27. Gong H., Li Q., Zhang Y. FTIR evidence of oxygenated metabolite accumulation during microbial degradation of sulfur compounds. *Chemosphere* 2024; 350: 140433.
28. Chen Y., Cheng J., Creamer K. Inhibition of autotrophic denitrifiers under sulfide-limited conditions. *Bioresour. Technol.* 2017; 245: 298-305.
29. Krishnakumar B., Majumdar S., Manilal B.V., Haridas A. Treatment of sulphide-containing wastewater with sulphur recovery in a novel reverse fluidized loop reactor (RFLR). *Water Res.* 2005; 39: 639-647.
30. Ramírez A., López D., Sánchez J. Microalgal consortia reduce dissolved sulfides and increase oxygen in wastewater. *Algal Res.* 2020; 47: 101852.
31. Nielsen P.H., Vollertsen J. The sulfur cycle in sewer systems: a review. *Water Res.* 2021; 199: 117228.
32. Giraldo L., Lozada J. Aplicación de consorcios bacterianos autóctonos en biorreactores para aguas residuales. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia* 2019; 28: 11-22.
33. Ruiz H., Cifuentes L., Morales C. Uso de consorcios microbianos en biorreactores para el tratamiento de efluentes contaminados. *Ing. Compet.* 2018; 20: 65-74.