

BÚSQUEDA DE BACTERIAS OXIDADORAS DE AZUFRE PARA SU POTENCIAL USO EN LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS DE ALTA PUREZA

SEARCH OF SULFUR OXIDIZING BACTERIA FOR THEIR POTENTIAL USE IN THE PRODUCTION OF HIGH PURITY BIOGAS

Carolina Rubiano-Labrador¹

Aura Hurtado Hurtado²

José Ignacio Salamanca³

¹ Doctora en Ciencias Biológicas. Universidad Nacional Abierta y a Distancia.
Universidad Tecnológica de Bolívar. Bogotá D.C, Colombia.

² Estudiante Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Bogotá D.C, Colombia.

³ Estudiante Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Bogotá D.C, Colombia.

¹ carolinarubiano1983@gmail.com

² aura.hurtado2754@gmail.com

³ jose17salamanca@gmail.com

Resumen

La generación de residuos es continua y creciente. En Colombia se producen al día aproximadamente 31000 toneladas de residuos sólidos, de las cuales 85% terminan en los rellenos sanitarios, que son responsables del 9%-15% de las emisiones de CH₄. Estos residuos, constituyen una oportunidad para la producción de biogás, el cual contiene CH₄, y trazas de CO₂, H₂S y agua. Sin embargo, para la producción de biogás de alta pureza es de vital importancia eliminar el H₂S, ya que es tóxico y corrosivo. Bajo este contexto, el objetivo de este estudio fue aislar y seleccionar microorganismos oxidadores de azufre para su

potencial uso en la producción de biogás de alta pureza. La metodología desarrollada fue: (i) evaluación de diferentes estrategias para el aislamiento de estos microorganismos, (ii) evaluación de la capacidad de oxidación de azufre de las cepas aisladas, y (iii) evaluación de diferentes matrices para la inmovilización de cepas seleccionadas. En este estudio se aislaron 17 cepas bacterianas, las cuales tienen la capacidad de oxidación de azufre, destacándose las cepas M14-C2 y M15-C1 (15,3 y 14,9 mg SO₄/L, respectivamente). De otra parte, se determinó que el bagazo de caña de azúcar permite una mayor capacidad de oxidación de

azufre de las cepas M14-C2 y M15-C1 (23,92 y 24,15 mg SO₄/L, respectivamente). Los resultados obtenidos en este estudio permitieron aislar y seleccionar bacterias con potencial capacidad de oxidación de azufre, para posteriormente ser utilizadas en la producción de biogás de alta pureza.

Palabras clave: bacterias quimiolitotróficas, digestión aerobia, energía renovable, oxidación de azufre, residuos orgánicos.

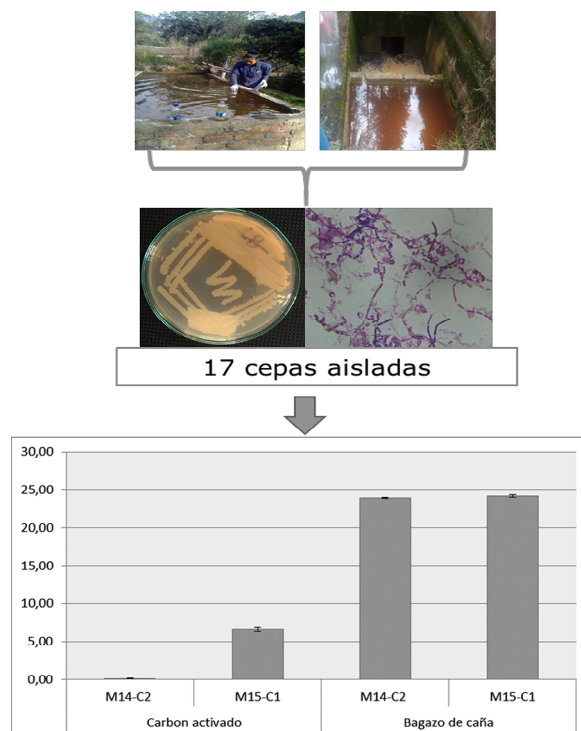
Abstract

Waste generation is continuous and growing. In Colombia approximately 31,000 tons of solid waste are produced per day, of which 85% end up in landfills, and are responsible of 9%-15% of CH₄ emissions. This waste constitutes an opportunity for the production of biogas, which contains CH₄, and traces of CO₂, H₂S and water. However, for the production of high purity biogas it is vital to eliminate the H₂S, since it is toxic and corrosive. In this context, the objective of this study was to isolate and select

sulfur oxidizing microorganisms for their potential use in the production of high purity biogas. The methodology developed was: (i) evaluation of different strategies for the isolation of these microorganisms, (ii) evaluation of the sulfur oxidation capacity of the isolated strains, and (iii) evaluation of different matrices for the immobilization of selected strains. In this study, 17 bacterial strains were isolated, which have the capacity of sulfur oxidation, standing out the strains M14-C2 and M15-C1 (15,3 and 14,9 mg SO₄/L, respectively). On the other hand, it was determined that the sugarcane bagasse allows a greater sulfur oxidation capacity of the strains M14-C2 and M15-C1 (23,92 and 24,15 mg SO₄/L, respectively). The results obtained in this study allowed to isolate and select bacteria with potential sulfur oxidation capacity, to be later used in the production of high purity biogas.

Keywords: aerobic digestion, microorganism, organic waste, oxidation of sulfur, chemiolitotrophic bacteria, renewable energy.

Resumen gráfico



Introducción

El crecimiento poblacional en los últimos tres siglos ha aumentado de manera significativa, trayendo consigo el incremento de consumo de recursos naturales y la generación de residuos sólidos, líquidos y gaseosos que son arrojados al medio ambiente, viéndose afectadas principalmente las grandes ciudades por el asentamiento de un grupo significativo de habitantes (Guerrero *et al.*, 2013). El reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico ambiental (RAS) informa que en el 2009 las áreas urbanas de Colombia generaron 25.079 millones de gramos (Mg) de residuos sólidos diariamente, de los cuales el 92,8% (23.285,5 Mg/día) tuvieron una disposición final adecuada en rellenos sanitarios o plantas integrales de tratamiento de residuos sólidos; el 7,16% restante, correspondiente a 1.796 Mg/día, fue dispuesto en botaderos a cielo abierto, en cuerpos de agua, mediante quemas o enterradas en condiciones inadecuadas (Avenidaño, 2015).

De la combinación de los anteriores procesos aeróbicos y anaeróbicos se obtiene una serie de gases los cuales pueden aprovecharse en la obtención de fertilizante agrícola (compost) y gas biológico (compuesto principalmente por 40% CO₂ y 60% CH₄). Dentro de los residuos del proceso de descomposición, el gas metano puede usarse debido a su clasificación como un gas combustible de bajo costo con uso térmico (~5500 Kcal/m³) o eléctrico (Escalante *et al.*, 2009).

Sin embargo, para el uso del gas metano es necesario oxidar o eliminar las trazas de H₂S, ya que es un compuesto tóxico para la salud y corrosivo, lo cual se puede lograr mediante procesos químicos y/o biológicos (Zapata, 2004). Los métodos químicos pueden resultar altamente contaminantes para el medio ambiente, mientras los biológicos generan una baja contaminación, como es el uso de bacterias oxidadoras de azufre, siendo una alternativa apropiada

para aprovechar este recurso de fácil obtención y al mismo tiempo contribuir al cuidado del medio ambiente (Li *et al.*, 2015).

Las bacterias oxidantes de azufre obtienen energía para su metabolismo a partir de energía lumínica o directamente de las reacciones oxidantes, donde utilizan oxígeno, nitratos o nitritos como aceptor de electrones liberados durante la oxidación de sulfuros. Desde el punto de vista tecnológico, para la eliminación biológica de sulfuros, las más apropiadas son las bacterias quimiolitotróficas oxidantes de azufre. Este grupo de bacterias son filogenéticamente muy diversas (por ejemplo, *Thiobacillus*, *Sulfolobus*, *Thermothrix*, *Beggiatoa* y *Thiothrix*) y están ampliamente distribuidos en diferentes hábitats (Friedrich *et al.*, 2001).

Colombia contiene ecosistemas que pueden ser considerados fuente potencial de microorganismos con capacidad de oxidación de azufre. Por lo tanto, el objeto de este estudio fue explorar ambientes ricos en este tipo de microorganismos y mediante aislamiento, seleccionar microorganismos oxidadores de azufre para ser empleados en futuros estudios de producción de biogás de alta pureza.

Materiales y métodos

Sitios de muestreo

Se tomaron muestras de agua provenientes de un manantial termal ubicado en Tabio, de aguas residuales de una industria metalmeccánica, y de aguas de explotaciones mineras localizadas en el municipio de Mongui y Paz del Río, para el aislamiento de microorganismos oxidadores de azufre (Tabla 1). Las muestras se recolectaron en recipientes plásticos estériles de 10 ml y 600 ml y se transportaron a temperatura ambiente para su posterior análisis en el laboratorio.

Tabla 1. Descripción de los sitios de muestreo.

Tipo de muestra	Ubicación	Nomenclatura
Aguas de manantiales termales	Tabio, Cundinamarca	AMT
Aguas producto minero	Mina Paz de Rio, Boyacá	AMR
Aguas productos mineros	Mina Sanoha, Boyacá	AMS
Aguas producto minero	Mina Peña, Boyacá	AMP
Aguas residuales industria metalmeccánica	Bogotá, Cundinamarca	ARMC

Fuente: Autores

Estrategias de aislamiento de microorganismos oxidadores de azufre

Para el aislamiento de los microorganismos oxidadores de azufre a partir de los sitios de muestreo analizados, se evaluaron diferentes

tipos de medios de cultivo. En las tablas 2 y 3 se muestra la composición de los medios de cultivo empleados.

Tabla 2. Composición Medio Básico 1

Medio de cultivo	Cantidad por litro
K_2HPO_4	2,0 g
NH_4Cl	0,4 g
$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	0,2 g
$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	0,01 g
$^{\circ}S$	20 g
Peptona	2,0 g

Fuente: Cho *et al.*, (1992)**Tabla 3.** Composición Medio Básico 2

Medio de cultivo	Cantidad por litro
$(NH_4)_2SO_4$	3,0 g
KH_2PO_4	6.0 g
K_2HPO_4	2,4 g
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	0.15 g
$CaSO_4$	0.15 g
$FeSO_4$	0,03 g
$^{\circ}S$	20 g
Peptona	2,0 g

Fuente: Ramírez-Sáenz *et al.* (2009)

Los medios de cultivo evaluados se inocularon con 1 ml de cada uno de los sitios de muestreo analizados y se incubaron a 37°C hasta que se evidenció crecimiento (entre 2 a 4 semanas). Para los medios de cultivo que presentaron crecimiento positivo se realizó siembra masiva en medio sólido y se incubaron a 37°C durante 24h. Las colonias que crecieron individualmente se transfirieron a medio de cultivo fresco y el procedimiento se repitió al menos dos veces antes de que los cultivos se consideraran puros.

Caracterización fenotípica de las cepas aisladas

Las cepas aisladas se caracterizaron fenotípicamente evaluando características macroscópicas, morfología, coloración de Gram, presencia de esporas y motilidad siguiendo los protocolos descritos por Rubiano *et al.* (2013).

Evaluación de la capacidad de oxidación de azufre de los microorganismos aislados

La capacidad de oxidación de azufre de las cepas aisladas se determinó mediante la cuantificación de sulfatos a través del método nefelométrico (Bojaca, 2007). Las cepas se cultivaron medio básico 1, suplementadas con S^{0} 10 g/L y se incubaron a 30°C durante 7 días. Transcurrido el tiempo de incubación, los cultivos se centrifugaron a 6000 rpm durante 30 min y se recuperó el sobrenadante. Posteriormente, se adicionaron 50 ml de cada muestra y 10 ml de solución Buffer A, y se realizó una lectura inicial en el turbidímetro (HI 88713-ISO, HANNA Instruments). Finalmente, se adicionó $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, y se realizó la lectura. Los ensayos se realizaron por triplicado. Los resultados obtenidos se reemplazaron en la siguiente fórmula:

$$\text{mg SO}_4 \cdot \text{L}^{-1} = \{((\text{NTUf} - \text{NTUi}) / \text{pendiente}) * \text{FD}$$

(Ecuación 1)

Donde:

NTUf = Turbiedad final

NTUi = Turbiedad inicial

b: Intercepto con el eje de las ordenadas

m: Pendiente con el eje de las ordenadas

FD = Factor de Dilución

La curva estándar se realizó usando disoluciones de SO_4 de 3,0 – 40,0 mg SO_4 disueltas en agua destilada.

Evaluación de diferentes matrices para la inmovilización de las cepas seleccionadas

La evaluación de diferentes matrices de inmovilización se realizó con las dos cepas que presentaron mayor oxidación de azufre. Las matrices evaluadas en este estudio fueron el bagazo de caña de azúcar y el carbón activado. La inmovilización de las cepas seleccionadas se realizó siguiendo el protocolo descrito por Ma *et al.* (2006), el cual se describe a continuación. Las cepas seleccionadas se cultivaron en 50 ml de Medio Básico 1 durante 3 días y luego la biomasa microbiana se recolectó por centrifugación a 6000 rpm por 10 min. Posteriormente, la biomasa se colocó en 100 ml de Medio Básico 1 y 40 g de bagazo de caña de azúcar o carbón activado. Transcurridos 15 días de incubación, se evaluó la eficiencia de oxidación de azufre mediante la técnica de cuantificación de sulfatos descrita anteriormente (Ma *et al.*, 2006).

Resultados

Estrategias de aislamiento de microorganismos oxidadores de azufre

Para el aislamiento de los microorganismos oxidadores de azufre presentes en las muestras de aguas de manantiales termales, aguas residuales de minería y aguas de la industria metalmeccánica, se evaluaron diferentes medios de cultivo para determinar cuál permitía

una mayor recuperación de microorganismos oxidadores de azufre. Después de 2 semanas de incubación se evidenció crecimiento en 17 cepas, donde 9 cepas se aislaron del Medio Básico 1 mientras que 8 cepas se aislaron del Medio Básico 2 (Tabla 4).

Tabla 4. Distribución de las cepas aisladas de acuerdo al medio de cultivo empleado

Muestra	Medio de cultivo	No. Cepas aisladas
AMP	Medio básico 2	4
	Medio básico 1	2
AMS	Medio básico 2	0
	Medio básico 1	0
AMR	Medio básico 2	2
	Medio básico 1	4
AMT	Medio básico 1	2
ARMC	Medio básico 2	2
	Medio básico 1	1

Fuente: Autores

Aislamiento y caracterización de microorganismos oxidadores de azufre

Mediante el uso de las estrategias de cultivo

empleadas se logró el aislamiento de un total de 17 cepas, 6 cepas de las minas Monguít, 6 cepas de las minas Paz del Rio, 2 cepas del manantial termal de Tabio y 3 cepas de aguas residuales de la industria metalmeccánica. La caracterización fenotípica de cada una de las cepas aisladas incluyó la descripción macroscópica de las colonias, la descripción microscópica de la forma de las células, la coloración de Gram, la presencia o ausencia de esporas y la motilidad (Tabla 5) (Anexo).

Evaluación de la capacidad de oxidación de azufre de los microorganismos aislados

A partir de los resultados obtenidos se determinó que todas las cepas aisladas en este estudio tienen la capacidad de oxidación de especies reducidas del azufre ($^{\circ}\text{S}$), ya que presentaron valores positivos de sulfato, esto indica que las cepas aisladas tienen la habilidad de utilizar especies reducidas del azufre y oxidarlas hasta sulfato. La cuantificación de sulfatos promedio obtenido para las cepas aisladas fue de 12,82 mg SO_4/L . Las cepas que presentaron mayor capacidad de oxidación de azufre fueron M14-C2 y M15-C1, las cuales registraron valores de 15,3 mg SO_4/L y 14,9 mg SO_4/L , respectivamente (Figura 1).

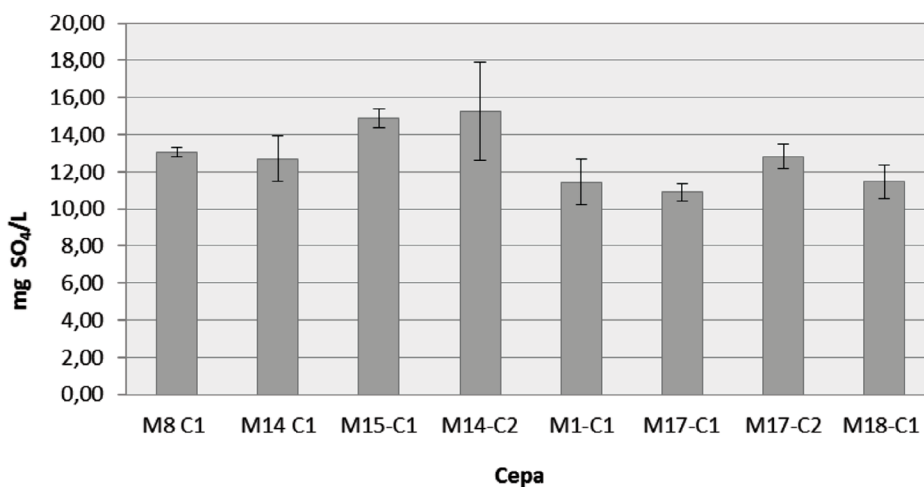


Figura 1. Cuantificación de sulfatos (mg/L) de las cepas aisladas después de 7 días de incubación a 37°C en Medio Básico 1.

Fuente: Autores

Evaluación de diferentes matrices para la inmovilización de las cepas seleccionadas

La evaluación de diferentes matrices de inmovilización (carbón activado y bagazo de caña de azúcar) se realizó con las dos cepas que presentaron los valores más altos de cuantificación de sulfato: M14-C2 y M15-C1.

En la figura 2 se evidencia la cuantificación de sulfatos de las cepas M14-C2 y M15-C1 en presencia de las matrices de inmovilización evaluadas. De acuerdo con los resultados obtenidos se evidenció que el bagazo de caña de azúcar permitió una mayor oxidación de

azufre de las cepas seleccionadas, observándose una cuantificación de sulfato de 23,92 g SO_4/L (promedio) para la cepa M14-C2 y 24,15 g SO_4/L (promedio) para la cepa M15-C1. En el caso del carbón activado se evidenció que esta matriz afecta la capacidad de oxidación del azufre de las cepas evaluadas, ya que en presencia de esta matriz se registró una cuantificación de sulfatos de 0,16 g SO_4/L para la cepa M14-C2 y 6,65 g SO_4/L para la cepa M15-C1, mientras que las cepas sin inmovilización registraron una cuantificación de sulfatos de 23,92 g SO_4/L para la cepa M14-C2 y 24,15 g SO_4/L para la cepa M15-C1.

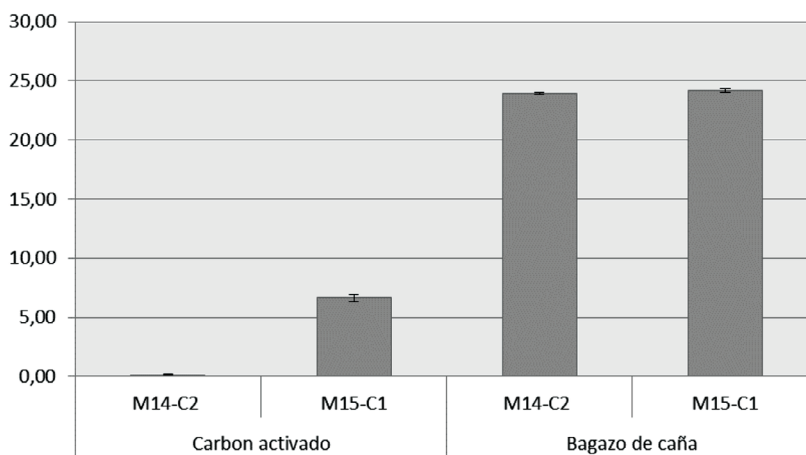


Figura 2. Comparación de la cuantificación de sulfato (g sulfato/L) de las cepas M14-C2 y M15-C1 en ausencia y presencia de matriz de inmovilización (bagazo de caña de azúcar y carbón activado).

Fuente: Autores

Discusión

El sulfuro de hidrógeno es el principal contaminante producido por la digestión anaeróbica de materiales orgánicos, ya que causa problemas sensoriales y tóxicos, y es el responsable de la corrosión del hormigón y las estructuras de acero. Por lo tanto, para aumentar el uso de biogás como una fuente alternativa de energía, el H_2S debe ser eliminado (Cherosky & Li, 2013). Para la eliminación de este contaminante existen varios métodos, incluidos los biológicos, físicos y químicos. Actualmente, existe una preferencia por el uso de métodos

de desulfuración biológica, ya que son menos costosos y no producen materiales indeseables que deban eliminarse. La implementación de este método se basa en el conocimiento y la comprensión del ciclo biogeoquímico del azufre en la naturaleza, donde bacterias que oxidan el azufre juegan un papel clave. Estas bacterias utilizan el oxígeno (condiciones aerobias) o el nitrato (condiciones anaerobias) como aceptor final de electrones para oxidar formas reducidas del azufre (H_2S o $^{\circ}\text{S}$) (Friedrich *et al.*, 2001; Pokorna & Zabranska, 2015).

En este estudio se aislaron y seleccionaron bacterias con potencial capacidad de oxidación de azufre para su posible uso en la producción de biogás de alta pureza.

La estrategia empleada en este estudio para el aislamiento de microorganismos oxidadores de azufre se basó en el uso de medios oligotróficos suplementados con azufre elemental ($^{\circ}\text{S}$), con el fin de asegurar el aislamiento de microorganismos con capacidad de oxidación de formas reducidas del azufre. El azufre está frecuentemente presente en todos los organismos y se produce en compuestos orgánicos tales como aminoácidos, proteínas, enzimas, antibióticos y grasas (Pokorna & Zabranska, 2015). Los estados de oxidación de este elemento incluyen -2 (sulfuro, HS^-), 0 (azufre elemental, $^{\circ}\text{S}$), +4 (SO_3^{-2}) y +6 (sulfato, SO_4^{2-}), por lo tanto, la presencia de $^{\circ}\text{S}$ en el medio de cultivo probablemente estimula el crecimiento de microorganismos que tengan la capacidad de oxidar especies reducidas del azufre. Previos estudios han reportado el uso de $^{\circ}\text{S}$ para el aislamiento de bacterias oxidadoras de azufre como *Sulfurihydrogenibium kristjanssonii* (Flores *et al.*, 2008), *Sulfurirhabdus autotrophica* (Watanabe *et al.*, 2016), *Thermocrinis minervae* (Caldwell *et al.*, 2010), *Thiovirga sulfuroxydans* (Ito *et al.*, 2005), y *Thiobacillus* spp. (Yang *et al.*, 2010).

Las comunidades de bacterias oxidadoras de azufre están comúnmente presentes en manantiales minerales sulfurosos, que se caracterizan por tener un alto contenido de sulfuro de hidrógeno y sus formas iónicas (HS^- y S^{2-}). Por otra parte, su presencia en aguas superficiales es causada principalmente por la ausencia de oxígeno disuelto y una descomposición biológica anaeróbica asociada de sustancias orgánicas que contienen azufre o por la reducción de tiosulfatos, politionatos, azufre elemental, sulfitos y sulfatos por bacterias reductoras de sulfato (BRS) (Pokorna & Zabranska, 2015). Los

resultados obtenidos en este estudio permitieron demostrar que las aguas de manantiales termales, las aguas residuales provenientes de la industria metalmeccánica y las aguas residuales provenientes de explotaciones mineras, son fuentes potenciales para el aislamiento de microorganismos oxidadores de azufre. Diferentes estudios también han reportado el aislamiento de bacterias oxidadoras de azufre a partir de manantiales termales, tales como *Thermocrinis minervae* (Caldwell *et al.*, 2010), *Thermus islandicus* (Bjornsdottir *et al.*, 2009), *Thiofaba tepidiphila* (Mori & Suzuki, 2008), *Thiomonas islándica* (Vésteinsdóttir *et al.*, 2011) y *Thiobacter subterraneus* (Hirayama *et al.*, 2005). Igualmente, se ha reportado el aislamiento de bacterias oxidadoras de azufre provenientes de aguas residuales provenientes de la industria metalmeccánica y de explotación minera como es el caso de *Thermithiobacillus plumbiphilus* (Watanabe *et al.*, 2016) y *Alicyclobacillus aeris* (Guo *et al.*, 2009), respectivamente.

En este estudio, la evaluación de la capacidad de oxidación de azufre se realizó a través de la cuantificación de sulfatos, donde se demostró que todas las cepas aisladas pueden utilizar especies reducidas de azufre ($^{\circ}\text{S}$) como donador de electrones y oxidarlo hasta SO_4 . La cuantificación de sulfatos promedio obtenida fue de 12,82 mg SO_4/L . Rojas-Avelizapa *et al.* (2013) reportaron el aislamiento de 54 cepas oxidadoras de azufre, las cuales registraron valores de sulfato promedio de 10,5 mg SO_4/L ; estos resultados indican que las cepas aisladas en este estudio tienen probablemente, una mayor capacidad de oxidación de azufre que las reportadas en estudios previos.

En cuanto a la evaluación del bagazo de caña de azúcar y el carbón activado como matriz de inmovilización para aumentar la capacidad de oxidación de azufre de las cepas M14-C2 y M15-C1, se determinó que el bagazo de caña

de azúcar es una matriz ideal para mejorar la eficiencia de oxidación de especies reducidas del azufre, ya que se obtuvo un incremento en los valores de sulfato de las cepas inmovilizadas (23,92 g SO₄/L para la cepa M14-C2 y 24,15 g SO₄/L para la cepa M15-C1) en comparación con las cepas sin inmovilizar (15,3 g SO₄/L para la cepa M14-C2 y 14,9 g SO₄/L para la cepa M15-C1). Este resultado coincide con lo reportado por Chaves *et al.* (2004) y Pantoja Filho *et al.* (2010) donde se empleó el bagazo de caña para la biofiltración de H₂S.

Conclusiones

Este estudio permitió el aislamiento de bacterias con potencial capacidad de oxidación de azufre a partir de manantiales termales y aguas residuales provenientes de la industria metalmeccánica y de explotaciones mineras. Los datos obtenidos en este estudio sugieren que las cepas M14-C2 y M15-C1 inmovilizadas en bagazo de caña de azúcar son candidatas para ser utilizadas en el proceso de desulfuración biológica para la producción de biogás de alta pureza. Sin embargo, futuros estudios son requeridos para optimizar la eficiencia de remoción de H₂S de las cepas seleccionadas.

Agradecimientos

Los autores agradecen especialmente a Diana Marcela Fuquene Yate del Programa de Ingeniería Ambiental de la ECAPMA por sus valiosas orientaciones en el aprendizaje de la técnica de nefelometría para la cuantificación de sulfatos. Esta investigación se realizó con el apoyo financiero de la Vicerrectoría Académica y de Investigaciones de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD.

Literatura citada

Avendaño, E. (2015). *Panorama actual de la situación mundial, nacional y distrital de los residuos sólidos : Análisis del caso Bogotá D.C. Programa Basura Cero*. Ingeniería Ambiental Pregrado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia,

Bogotá, Colombia. Retrieved from <http://repository.unad.edu.co/handle/10596/3417>

Bjornsdottir, S. H., Petursdottir, S. K., Hreggvidsson, G. O., Skirnisdottir, S., Hjorleifsdottir, S., Arnfinnsson, J., & Kristjansson, J. K. (2009). *Thermus islandicus* sp. nov., a mixotrophic sulfur-oxidizing bacterium isolated from the Torfajokull geothermal area. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 59(12), 2962-2966. doi: doi:10.1099/ij.s.0.007013-0

Bojaca, R. (2007). *Sulfato en aguas por el método nefelométrico*. Bogotá.

Caldwell, S. L., Liu, Y., Ferrera, I., Beveridge, T., & Reysenbach, A.-L. (2010). *Thermocrinis mineruae* sp. nov., a hydrogen- and sulfur-oxidizing, thermophilic member of the Aquificales from a Costa Rican terrestrial hot spring. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 60(2), 338-343. doi: doi:10.1099/ij.s.0.010496-0

Chávez, C. H., Mora, Z. A., Cabra, J. A., Carmona, Y., Revah, S., & Gnecco, G. (2011). Biofiltración de ácido sulfhídrico (H₂S), utilizando bagazo de caña de azúcar y piedra pómez como material de soporte. *Ingeniería y Competitividad*, 5(2), 7-15.

Cherosky, P., & Li, Y. (2013). Hydrogen sulfide removal from biogas by bio-based iron sponge. *Biosystems Engineering*, 114(1), 55-59. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.10.010>

Cho, K. S., Hirai, M., & Shoda, M. (1992). Degradation of hydrogen sulfide by *Xanthomonas* sp. strain DY44 isolated from peat. *Applied and Environmental Microbiology*, 58(4), 1183-1189.

Escalante, H., Orduz, J., Zapata, H., Cardona, M. C., & Duarte, M. (2009). *Atlas de potencial energético de la biomasa residual en Colombia*. Bogota.

Flores, G. E., Liu, Y., Ferrera, I., Beveridge, T. J., & Reysenbach, A.-L. (2008). *Sulfurihydrogenibium kristjanssonii* sp. nov., a hydrogen- and sulfur-oxidizing thermophile isolated from a terrestrial Icelandic hot spring. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 58(5), 1153-1158. doi: doi:10.1099/ij.s.0.65570-0

Friedrich, C. G., Rother, D., Bardischewsky, F., Quentmeier, A., & Fischer, J. (2001). Oxidation of reduced inorganic sulfur compounds by bacteria: emergence of a common mechanism? *Applied and environmental microbiology*, 67(7), 2873-2882.

- Guerrero, L. A., Maas, G., & Hogland, W. (2013). Solid waste management challenges for cities in developing countries. *Waste Management*, 33(1), 220-232. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2012.09.008>
- Guo, X., You, X.-Y., Liu, L.-J., Zhang, J.-Y., Liu, S.-J., & Jiang, C.-Y. (2009). *Alicyclobacillus aeris* sp. nov., a novel ferrous- and sulfur-oxidizing bacterium isolated from a copper mine. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 59(10), 2415-2420. doi: [doi:10.1099/ijs.0.008870-0](https://doi.org/10.1099/ijs.0.008870-0)
- Hirayama, H., Takai, K., Inagaki, F., Neelson, K. H., & Horikoshi, K. (2005). *Thiobacter subterraneus* gen. nov., sp. nov., an obligately chemolithoautotrophic, thermophilic, sulfur-oxidizing bacterium from a subsurface hot aquifer. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 55(1), 467-472. doi: [doi:10.1099/ijs.0.63389-0](https://doi.org/10.1099/ijs.0.63389-0)
- Ito, T., Sugita, K., Yumoto, I., Nodasaka, Y., & Okabe, S. (2005). *Thiovirga sulfuroxydans* gen. nov., sp. nov., a chemolithoautotrophic sulfur-oxidizing bacterium isolated from a microaerobic waste-water biofilm. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 55(3), 1059-1064. doi: [doi:10.1099/ijs.0.63467-0](https://doi.org/10.1099/ijs.0.63467-0)
- Li, L., Zhang, J., Lin, J., & Liu, J. (2015). Biological technologies for the removal of sulfur containing compounds from waste streams: bioreactors and microbial characteristics. [journal article]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 31(10), 1501-1515. doi: [10.1007/s11274-015-1915-1](https://doi.org/10.1007/s11274-015-1915-1)
- Ma, Y.-L., Yang, B.-L., & Zhao, J.-L. (2006). Removal of H₂S by *Thiobacillus denitrificans* immobilized on different matrices. *Bioresource Technology*, 97(16), 2041-2046. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.09.023>
- Mori, K., & Suzuki, K.-i. (2008). *Thiofaba tepidiphila* gen. nov., sp. nov., a novel obligately chemolithoautotrophic, sulfur-oxidizing bacterium of the Gammaproteobacteria isolated from a hot spring. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 58(8), 1885-1891. doi: [doi:10.1099/ijs.0.65754-0](https://doi.org/10.1099/ijs.0.65754-0)
- Pantoja Filho, J. (2010). Biofiltration for Removal of Air Toxic Compounds-Hydrogen Sulfide: Evaluating the influence of different packing materials. Studying the "heart" of biofiltration processes. VDM Publishing.
- Pokorna, D., & Zabranska, J. (2015). Sulfur-oxidizing bacteria in environmental technology. *Biotechnology Advances*, 33(6, Part 2), 1246-1259. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.02.007>
- Ramírez-Sáenz, D., Zarate-Segura, P. B., Guerrero-Barajas, C., & García-Peña, E. I. (2009). H₂S and volatile fatty acids elimination by biofiltration: Clean-up process for biogas potential use. *Journal of Hazardous Materials*, 163(2), 1272-1281. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.07.129>
- Rojas-Avelizapa, N. G., Gómez-Ramírez, M., Hernández-Gama, R., Aburto, J., & García de León, R. (2013). Isolation and selection of sulfur-oxidizing bacteria for the treatment of sulfur-containing hazardous wastes. *Chemical and biochemical engineering quarterly*, 27(1), 109-117.
- Rubiano-Labrador, C., Baena, S., Díaz-Cárdenas, C., & Patel, B. K. (2013). *Caloramator quimbayensis* sp. nov., an anaerobic, moderately thermophilic bacterium isolated from a terrestrial hot spring. *International journal of systematic and evolutionary microbiology*, 63(4), 1396-1402.
- Vésteinsdóttir, H., Reynisdóttir, D. B., & Örlýgsson, J. (2011). *Thiomonas islandica* sp. nov., a moderately thermophilic, hydrogen- and sulfur-oxidizing betaproteobacterium isolated from a hot spring. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 61(1), 132-137. doi: [doi:10.1099/ijs.0.015511-0](https://doi.org/10.1099/ijs.0.015511-0)
- Watanabe, T., Kojima, H., Shinohara, A., & Fukui, M. (2016). *Sulfurirhabdus autotrophica* gen. nov., sp. nov., isolated from a freshwater lake. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 66(1), 113-117. doi: [doi:10.1099/ijsem.0.000679](https://doi.org/10.1099/ijsem.0.000679)
- Watanabe, T., Miura, A., Shinohara, A., Kojima, H., & Fukui, M. (2016). *Thermithiobacillus plumbiphilus* sp. nov., a sulfur-oxidizing bacterium isolated from lead sulfide. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 66(5), 1986-1989. doi: [doi:10.1099/ijsem.0.000972](https://doi.org/10.1099/ijsem.0.000972)
- Yang, Z.-H., StÖven, K., Haneklaus, S., Singh, B. R., & Schnug, E. (2010). Elemental sulfur oxidation by *Thiobacillus* spp. and aerobic heterotrophic sulfur-oxidizing acteria. *Pedosphere*, 20(1), 71-79. doi: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(09\)60284-8](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(09)60284-8)
- Zapata, F. G. B. (2004). *Fundamentos y casos exitosos de la biotecnología moderna*. Mexico: El Colegio Nacional.

Conflicto de Intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses