

Remoción de sulfuro de hidrogeno (H_2S) contenido en el biogás, generado por un reactor anaerobio tipo uasb– diseño factorial 3^2 .

Removal of hydrogen sulphide (H_2S) contained in the biogas, generated by an anaerobic reactor type uasb- factorial design 3^2

Cerrón Serpa Víctor; Matos Chamorro Alfredo

EP Ingeniería de Alimentos, Universidad Peruana Unión

Resumen

El objetivo de esta investigación fue la de determinar la eficiencia de un biofiltro para remover ácido sulfhídrico (H_2S) contenidos en el biogás, generado por un reactor anaerobio tipo UASB para lo cual se evaluó el efecto de dos factores: Concentración de ácido sulfhídrico (41 – 90 ppm, 91 – 140 ppm y 141 – 190 ppm) y el tiempo de residencia (10.80 s, 27 s, 43.20 s) en relación a la eficiencia de remoción (%). El diseño experimental utilizado fue el diseño factorial 3^2 más cuatro puntos centrales. El factor más significativo fue el tiempo de residencia ($p=0.021943$) y la mayor eficiencia de remoción de ácido sulfhídrico obtenida fue de 100% al operar el biofiltro a un mayor tiempo de residencia (43.20 s), además, se determinó que la concentración de sulfuro de hidrogeno no tuvo efecto significativo sobre la eficiencia de remoción.

Palabras Clave: Eficiencia de remoción, tiempo de residencia, ácido sulfhídrico, concentración de H_2S , biogás.

Abstract

The objective of this research was to determine the efficiency of a biofilter to remove hydrogen sulfide (H_2S) content in the biogas, generated by an anaerobic reactor UASB for which the effect of two factors were evaluated: concentration of hydrogen sulfide (41 - 90 ppm, 91-140 ppm and 141-190 ppm) and residence time (10.80 s, 27 s, 43.20 s) in relation to the removal efficiency (%). The experimental design was a factorial design 3^2 and four central points. The most significant factor was the residence time ($p = 0.021943$) and the highest removal efficiency of hydrogen sulfide obtained was 100% when the biofilter was operating in a longer residence time (43.20 s) also was determined that the concentration hydrogen sulfide had no significant effect on the removal efficiency.

Keywords: Removal efficiency, residence time, hydrogen sulfide, H_2S concentration, biogas.

Introducción

El Centro de Investigación en Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Peligrosos (CITRAR – FIA - UNI) cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales, la cual provee un pre tratamiento (rejas gruesas, rejas finas y desarenador), tratamiento secundario (Reactor Anaerobio de Manto de Lodos de Flujo Ascendente RAFA o UASB) y tratamiento secundario constituido por lagunas de estabilización (CITRAR – FIA – UNI, 2011).

Madigan et al., (2009) destacan que los procesos de tratamiento anaerobios como los reactores anaerobios (RAFA o UASB) son altamente eficientes para tratar altas concentraciones de materia orgánica (DBO muy alta; > 1000 mg/L), además, esta degradación anaerobia produce gases favorables para su aprovechamiento como el metano y gases perjudiciales como el ácido sulfhídrico el cual reduce el poder calorífico del biogás y genera olores desagradables (Rittmann y McCarty, 2001; Varnero et al., 2012).

Los malos olores generan un malestar, ya que, afecta la tranquilidad de las personas, por factores psicológicos o sensitivos. Los malos olores en sistemas de depuración están relacionados con el tratamiento de residuos sólidos y el tratamiento de aguas residuales, el control de olores ha adquirido importancia debido al crecimiento de la población y su asentamiento próximo a dichas instalaciones. (Jiménez y Camargo, 2009).

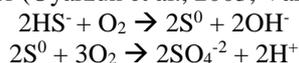
Iglesias (2012) expone que el ácido sulfhídrico (H_2S) es producto del rompimiento de aminoácidos y de otros compuestos orgánicos sulfurados, así como de la reducción de sulfatos y sulfitos. El sulfuro de hidrogeno (H_2S) es el principal responsable del olor ofensivo, debido a la baja concentración a la que es percibida (0.0001 a 0.03 mg/ m³ aire) y su olor característico a huevo podrido (Chernicharo, 2013; Metcalf y Eddy, 1995).

Las técnicas de tratamiento biológicas están siendo consideradas como técnicas atractivas para la remoción de gases y vapores malolientes, debido, a su alta eficiencia, costos bajos de operación y mantenimiento, además, por no requerir tratamiento secundario. El tratamiento biológico es una técnica ambientalmente amigable (Álvarez y Poblete, 2001; Chan Anderson, 2006; Kennes y Veiga, 2001).

De las cuales la biofiltración es la más empleada y el compost es el medio filtrante recomendado (medio de soporte para los microorganismos), altamente eficientes sin requerir de inoculación de microorganismos y control de temperatura, además, su periodo de aclimatación es muy corto, tiempo comprendido entre 14 y 18 días (Chung et al., 2005; Hort et al., 2012).

Es un proceso que emplea microorganismos que crecen inmovilizados en un medio de soporte orgánico, el cual viene a ser el soporte para los microorganismos y provee de nutrientes para su crecimiento. La contaminante gaseosa atraviesa el medio filtrante, el medio

filtrante absorbe los compuestos volátiles biodegradables y los microorganismos lo degradan en compuestos menos nocivos. En el caso del sulfuro de hidrogeno (H₂S) el proceso se desarrolla de acuerdo a la siguiente reacción, la oxidación provee de energía a los microorganismos y se producen compuestos sin olor (Oyarzun et al., 2003; Van Groenestijn y Hesselin, 1993)



Los medios filtrantes más comúnmente empleados son la turba, suelo y el compost seguido por las astillas de madera, caña de azúcar medios filtrantes que tienen una vida útil entre 3 a 5 años su bajo costo de adquisición, su alto contenido de nutrientes y la amplia densidad población de microorganismos (Chung et al., 2001; Maestre et al., 2007; Hwang et al., 2007; Gallastegui et al., 2011).

El presente trabajo tuvo como objetivo de determinar la eficiencia de un biofiltro en la remoción del ácido sulfhídrico (H₂S) remoción contenido en el biogás generado por un reactor anaerobio tipo UASB.

Materiales y Métodos

El biogás empleado captado para la experimentación (tratamiento) fue obtenido del reactor anaerobio tipo UASB del Centro de Investigación en Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Peligrosos (CITRAR – FIA - UNI), el biogás está constituido típicamente de la siguiente manera (Tabla 1).

Tabla 1
Composición del biogás

GAS	CONCENTRACIÓN (%)
Metano (CH ₄)	55 – 70 %
Dióxido de Carbono (CO ₂)	30 – 45 %
Oxígeno	200 ppm – 1 %
Nitrógeno	< 5 %
Vapor de Agua y Sulfuro de Hidrógeno (H ₂ S)	50 ppm - 3 %

Fuente: Varnero et al. (2011)

De acuerdo a la composición típica del biogás la concentración de sulfuro de hidrogeno es baja (<3%), sin embargo, debido a su bajo umbral de detección (0.0001 mg/m³) dichas concentraciones pueden generar intensos olores desagradables.

Para la presente investigación se determinó la eficiencia de remoción de un biofiltro compuesto por compost, para determinar las dimensiones de diseño del biofiltro se realizó la determinación del caudal de biogás generado y para ello se realizaron las siguientes actividades.

Determinación de volumen de biogás generado.

Se emplearon bolsas de aluminio adaptadas para el almacenamiento de biogás, y un tanque Mariotte (adaptado de un balde), un cronometro, probeta de 1000 mL y válvulas (Figura 1).



Figura 1– Bolsa de aluminio y tanque Mariotte.

Después de 2 semanas de mediciones se determinó la cantidad de biogás que era emitida al ambiente (Tabla 2).

Tabla 2
Caudal determinado para el diseño del biofiltro.

CAUDAL PROMEDIO	UNIDAD
0.02	L/s
0.92	L/m
1.68	m ³ /d

Determinación de la concentración de ácido sulfhídrico (H₂S).

Mediante análisis instrumental (detector monogas Tango TX1 de doble sensor) (Figura 2), se determinaron concentraciones por encima del rango óptimo de detección (superior a 200 ppm).



Figura 2 – Doble sensor monogas Tango TX1 Rango de detección (0 – 200 ppm)

A fin de reducir la concentración del contaminante a tratar (H₂S) se requirió una dilución, lo cual se logró incorporando una válvula para permitir el ingreso de aire atmosférico, gracias a la bomba de succión e impulsión (Resun, Modelo ACO – 003, China) se propició la mezcla entre el gas a tratar y el aire atmosférico logrando la reducción de la concentración (menor a los 200 ppm).



Figura 3 – Válvula que permitió la dilución del biogás.

Diseño del biofiltro

Hort et al. (2012) declara que el tiempo de residencia de diseño oscila entre 30 segundos y 60 segundos, por ende para el diseño del biofiltro de la presente investigación se considera 60 segundos como el tiempo de residencia de diseño, por otro lado, Villen (2012) menciona la necesidad de considerar un volumen de seguridad comprendido entre el 10% y 30%.

El caudal de diseño fue obtenido a partir de los monitoreos realizados (Tabla 2). Los parámetros de diseño que permitirán determinar las dimensiones del biofiltro se muestran a continuación (Tabla 3).

Tabla 3

Parámetros de diseño del biofiltro.

Parámetro	Valor	Unidad
Tiempo de Residencia de diseño	60	s
Caudal de biogás (monitoreo)	0.92	L/m
Volumen de seguridad	0.30	Adimensional
Diámetro	0.08	m

Dimensionamiento del biofiltro

Empleando las ecuaciones de diseño mostradas en la tabla 4 se determinó el volumen del biofiltro (paso 1) y altura del biofiltro (paso 2)

Tabla 4 – Cálculos para el diseño del biofiltro.

Paso	Datos	Unidad	Criterios
1	V	Litros	$V = T_R \times Q \times (1 + PS\%)$
	T_R	Segundos	
	Q	Litros/minuto	
	PS	Adimensional	
2	H	Metros	$H = \frac{V}{A} = \frac{V}{D^2 \times \frac{\pi}{4}}$
	D	Metros	
	A	Metros cuadrados	

Fuente: Etcharren (2005).

Las dimensiones finales del biofiltro fueron las siguientes: Volumen del biofiltro (1.20 litros), altura de compost (0.24 m), borde libre (0.11 m), altura total del biofiltro (0.35 m), espesor del biofiltro (3 mm), diámetro interno del biofiltro (8 cm), diámetro externo del biofiltro (8.6 cm), orificios para distribución de biogás (3/4 pulgada), orificio para la purga de lodo o evacuación de líquidos (1 pulgada).

En la siguiente figura 4 se observa el material de acrílico (soporte del medio filtrante es decir el compost) preparado para la implementación del biofiltro.



Figura 4 – Material de acrílico preparado para la instalación del biofiltro.

Una vez preparado el material de acrílico se adquirió el material de soporte (compost) de un centro de abastos para jardinería, se realizaron análisis adicionales para determinar su composición nutricional (Tabla 5) y algunas de las características físicas fueron: un tamaño de partícula variado (desde partículas entre 1 mm a 15 mm), color negro claro, porosidad (60%).

Tabla 5 – Resultados del análisis de compost

Composición	Valor	Unidad
Carbono Orgánico Oxidable	13.68	(g/100g)
Materia Orgánica	23.59	(g/100g)
Nitrógeno Total	1.60	(g/100g)
Azufre Total	2.40	(g/100g)
Humedad Natural	40	%
pH	7.33	
Porosidad	0.60	Adimensional

Fuente: CERPER - Certificaciones del Perú S.A

El compost tenía un pH neutro (7.33) propicio para la puesta en marcha de la experimentación. La relación carbono nitrógeno es relativamente baja 8.55 (C/N). Chefetz et al., (1996) a medida que el proceso de compostaje avanza el carbono es liberado en forma de dióxido de carbono (CO₂), mientras que la mayoría de nitrógeno es reciclado. El carbono será empleado como fuente de energía para la generación de material celular, el nitrógeno sería empleado para el crecimiento y desarrollo celular de los microorganismos y el azufre es un componente estructural de los aminoácidos cisteína y metionina (Madigan et al., 2009).

Metodos de Analisis

El carbono organico oxidable se determino mediante el metodo NOM – 021 – RECNAT – 2000; Materia Organica. Se determino NOM – 021 – RECNAT – 2000; El azufre total fue determinado mediante el metodo ISO 1185:2007; El pH se determino por el metodo gravimetrico; la porosidad se determino por el metodo de imbibicion.

Tamaño de partícula

Se realizó el tamizado de las partículas con apoyo de un cernidor (Figura 5). Aquellas partículas que quedaron retenidas en la malla, pero de tamaño menor a 15 mm fueron separadas para formar parte del material filtrante.



Figura 5 –Reja empleadas para el tamizado

El tamaño promedio de las partículas del compost fue determinado de un total de 50 partículas de compost: largo (10 mm), radio (7.5mm). Una vez separado el medio filtrante se procedió a instalar el medio filtrante (Figura 6).



Figura 6 – Biofiltro Instalado y listo para operar.

Se empleó un rotámetro (DWYER, Modelo VFB-65-DDV, Estados Unidos) con un rango de registro entre 0.2 L/m a 4 L/m lo cual se lograría regulando la válvula de acero inoxidable, dicho dispositivo fue fundamental para el establecimiento del tiempo de residencia de experimentación (inversamente proporcional al caudal), se instalaron válvulas (1/2 pulgada) y mangueras (1/2 pulgada) para propiciar la conducción efectiva del gas a tratar. De acuerdo a lo recomendado por Morgan y Noyola (2005) el biofiltro operaría bajo un régimen de mezclado, es decir, cada cierto tiempo (2 días) sería retirado todo el medio filtrante para ser humectado y homogenizado de manera manual, además, aprovechando esta acción se realizaba el lavado de las paredes internas del material de acrílico (arrastrar las acumulaciones de sulfatos).

La puesta en marcha se realizó en 16 días a condiciones de caudal elevado (4 L/minuto), un tiempo de residencia de 10.80 segundos y una concentración de H₂S inferior a los 40 ppm de H₂S. Durante la puesta en marcha se registraron eficiencia de remoción de 100%. Una vez los microorganismos favorables para la oxidación del sulfuro de hidrogeno se desarrollaron, proliferaron y adaptaron a las condiciones experimentales se inició con los ensayos experimentales, tal como, se mostrará más adelante en el diseño experimental.

Diseño Experimental

Para determinar la eficiencia de remoción de ácido sulfhídrico (H₂S) se empleó un diseño factorial 3² más 4 puntos centrales haciendo un total de 13 ensayos experimentales: Las variables independientes fueron: tiempo de residencia real (X₁) y concentración de H₂S (afluente al biofiltro) (X₂) y los rangos bajo los cuales se estableció cada nivel se visualiza a continuación (Tabla 8) y la distribución aleatoria de los ensayos fue dada de la siguiente manera (Tabla 9). Los análisis estadísticos fueron realizados con el software STATISTICA 7.0. (Stat – soft Inc. USA).

Tabla 8 –
Niveles codificados para cada factor

FACTORES DE ESTUDIOS	NIVEL		
	-1	0	+1
X ₁ - Concentración de H ₂ S afluente (ppm)	(41 – 90)	(91 – 140)	(141 – 190)
X ₂ - Tiempo de residencia (s)	10.80	27	43.20

Tabla 9 – Distribución aleatoria de los ensayos

Ensayo	X ₁	X ₂
5	-1	-1
6	-1	0
9	-1	1
10	0	-1
12	0	0
11	0	1
13	1	-1
8	1	0
4	1	1
1	0	0
3	0	0
2	0	0
7	0	0

Nota: X₁: Concentración de H₂S en el afluente (ppm); X₂: Tiempo de residencia real (s).

Resultados y Discusiones

Eficiencia de Remoción de H₂S

Durante la puesta en marcha se registraron altos porcentajes de eficiencia de remoción, demostrando la idoneidad del biofiltro para el tratamiento y remoción de compuestos sulfurados, esto debido a la elevada densidad poblacional de microorganismos con capacidad de adecuarse rápidamente a variadas condiciones (Korboulewsky et al., 2002).

Se visualiza el desarrollo de los ensayos experimentales (Figura 7), durante los primeros 4 ensayos experimentales la eficiencia de remoción fue continuamente superior al 99%, no obstante, a medida que el tiempo de residencia era alterado la eficiencia de remoción descendía. Se alcanzó una eficiencia de remoción promedio máxima de 100%, por el contrario, la eficiencia de remoción promedio mínima fue de 10.69%.

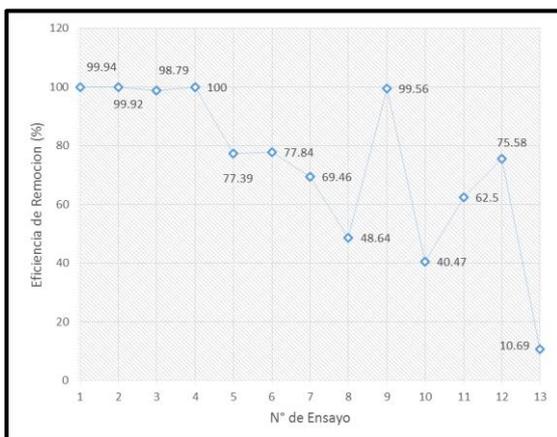


Figura 7 – Eficiencia de remoción alcanzada

El diagrama de Pareto nos permite visualizar (Figura 8) que los resultados de la eficiencia de remoción dependen del tiempo de residencia (X_1), ahora bien, una variable que no se considero fue el pH. Etcharren (2005) estipula que el pH debe mantenerse en un rango de 6 a 8 para el óptimo desarrollo de un proceso de biofiltración, no obstante, los resultados obtenidos a partir de esta investigación son concluyentes en que el pH puede ser como mínimo 3.91, ya que, a estas condiciones de pH aún se obtuvieron eficiencias de remoción superiores a 50% (Figura 9).

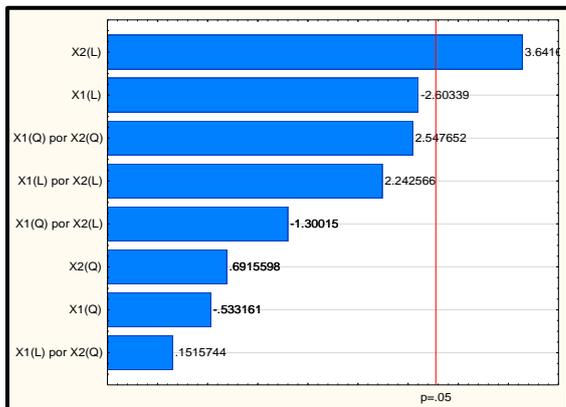


Figura 8 – Gráfica de Pareto

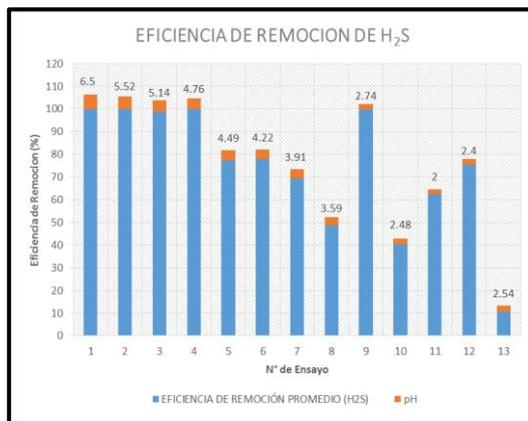


Figura 9 – Resultados de la eficiencia de remoción, valorando la influencia del pH sobre los resultados

El biofiltro durante la remoción de ácido sulfhídrico (H_2S) se desarrolló convenientemente alcanzando resultados de eficiencia de remoción superiores al 50% al ser operado a un mayor tiempo de residencia y las condiciones más desfavorables para la biofiltración se dieron a un menor tiempo de residencia, observaciones que se pueden deducir de la gráfica de medias de la eficiencia de remoción (Figura 10).

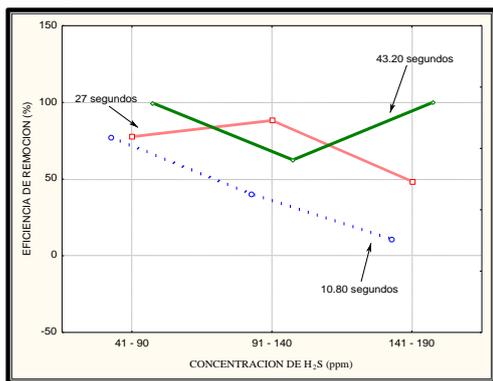


Figura 10 – Medias de la eficiencia de remoción de ácido sulfhídrico (H_2S) a distintos niveles.

A fin de mejorar el proceso de biofiltración se determinó que modelo sería el más apropiado, es decir aquel que presentara menor diferencia entre la R^2 y la R ajustada, además, aquel modelo que brindara un mayor coeficiente de determinación.

Tabla 10 – Verificación del modelo

Modelo	Variables significativas	R^2	R ajustada	Diferencia entre R
Sin Interacción	Tiempo de Residencia (Lineal)	0.58233	0.37349	0.20884
2 Interacciones (Lineal x Lineal)	Tiempo de Residencia (Lineal)	0.70422	0.49294	0.21128
2 Interacciones (Lineal, Cuadrática)	Tiempo de Residencia (Lineal)	0.90305	0.70916	0.19389

De la tabla 10 se verifica que el modelo de interacciones lineal y cuadrática, presenta una diferencia mínima entre la R^2 y la R ajustada (0.19389), además, genera un coeficiente de determinación elevado con el cual se puede explicar en un 90% el comportamiento de la eficiencia de remoción del ácido sulfhídrico (H_2S) a través de un proceso de biofiltración.

Basados en el presente modelo se realiza la gráfica de contorno.

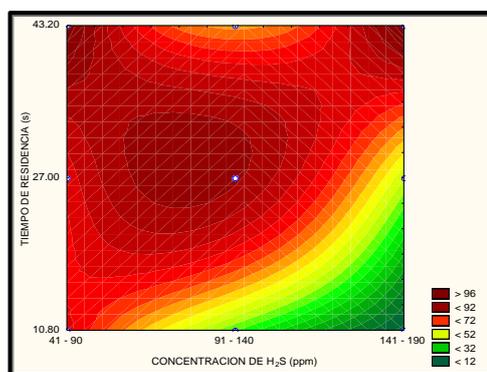


Figura 11 – Diagrama de contorno de la eficiencia de remoción

De la figura anterior (Figura 11) se distingue que para alcanzar una eficiencia de remoción superior al 96% al tratar una mayor concentración de H₂S (141 – 190 ppm) se requerirá operar el biofiltro a un mayor tiempo de residencia (43.20 segundos). En caso de requerir obtener los mejores resultados al tratar una concentración media de H₂S (91 – 140 ppm), el tiempo de residencia recomendado será el de 27 segundos, a su vez, operando un biofiltro a un mayor tiempo de residencia (43.20 segundos) se logrará obtener la mayor eficiencia de remoción al tratar una concentración baja de H₂S (41 – 90 ppm).

Conclusiones

El biofiltro implementado para remover sulfuro de hidrogeno del biogás generados por el reactor anaerobio tipo UASB (CITRAR – FIA - UNI), brindo altos porcentajes de eficiencia de remoción, una eficiencia de remoción máxima en promedio de remoción de 100% (mayor concentración de H₂S y mayor tiempo de residencia) y una eficiencia de remoción promedio mínima de 10.69% (mayor concentración de H₂S y menor tiempo de residencia). El tiempo de residencia es la variable más significativa sobre el proceso de biofiltración para remover H₂S, por otro lado, el pH a pesar de no haber sido una variable de estudio género efectos adversos sobre la eficiencia de remoción, por ende, se recomienda considerar como variable de experimentación.

Agradecimientos

Al Centro de Investigación en Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Peligrosos, Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería (CITRAR – FIA - UNI) por brindar espacio en sus instalaciones para el desarrollo de la presente investigación. A la Facultad de Ingeniería Arquitectura de la Universidad Peruana Unión (UPeU) por el préstamo y financiamiento en la adquisición de los equipos requeridos para los ensayos experimentales.

Referencias

- Álvarez A. Poblete D. 2001. Biofiltración: una solución económica para el control de olores. Santiago – Chile.
- Chan Anderson A., 2006, Attempted biofiltration of reduced sulphur compounds from a pulp and paper mill in northern Sweden. *Environmental Progress* 25.
- Chefetz B, Hatcher P, Hadar Y, Chen Y, 1996, Chemical and biological characterization of organic matter during composting of municipal solid waste. 776 - 785 p.
- Chernicharo A. 2013. Principios del Tratamiento Biológico de Aguas Residuales – Reactores Anaerobios. Volumen 5. San Juan de Pasto: Universidad de Nariño. 395 p. ISBN: 978-958-8609-56-0.
- Chung Y. Lin Y. Tseng P. 2005. Removal of high concentration of NH₃ and coexistent H₂S by biological activated carbon (BAC) biotrickling filter. *Bioresource Techno*, 96(16): 1812–1820.
- Chung Y. Huang C. Tseng P. 2005. Biological elimination of H₂S and NH₃ from waste gases by biofilter packed with immobilized heterotrophic bacteria. *Chemosphere* 43, 1043 - 1050.
- Etcharren, P. 2005. Diseño de un sistema de biofiltración para la eliminación de la fábrica “Lubascher y Krausse” Temuco. Tesis Licenciado en Ciencias de la Ingeniería. Universidad Católica de Temuco, Facultad de Ingeniería. Temuco, Chile. 162p.
- Gallastegui, G. Munoz, R. Barona A. Ibarra-Berastegi G. Rojo N. Elías A. 2011. Evaluating the impact of water supply strategies on p-xylene biodegradation performance in an organic media-based biofilter. *Journal of Hazardous Materials* 185, 1019–1026.
- Hort C. Gracy S. Platel V. Moynault. 2012. A comparative study of two composts as filter media for the removal of gaseous reduced sulfur compounds (RSCs) by biofiltration: Application at industrial scale. *Waste management* 33 (2013): 18 – 25 pp.
- Hwang, J.W., Jang, S.J., Lee, E.Y., Choi, C.Y., Park, S., 2007. Evaluation of composts as biofilter packing material for treatment of gaseous p-xylene. *Biochemical Engineering Journal* 35, 142–149.
- Iglesias A. 2007. Contaminación atmosférica por olores: unas técnicas de medida avanzadas y una legislación específica inexistente. *Colegio de Químicos*. 18 p.
- Jiménez J, Camargo Y. 2009. Biofiltración como tecnología para la reducción de olores en aguas residuales. *Inge – CUC*. Volumen 5. (5): 11 – 21. ISBN: 0122-6517.
- Kennes C, Veiga M. 2001. Bioreactors for Waste Gas Treatment.
- Korboulewsky N, Dupouyet S, Bonin G. 2002. Environmental risk of applying sewage sludge compost to vineyards: carbon, heavy metals, nitrogen, and phosphorus accumulation. 1522 – 1527 pp.

- Madigan M, Martinko J, Parker J. 2009. Brock Biología de los microorganismos. 10ª Edición. 1011 pp. Disponibilidad libre en: <http://www.librossite.net/brock.com>. ISBN: 84-205-3679-2.
- Maestre, J.P., Gamisans, X., Gabriel, D., Lafuente, J., 2007. Fungal biofilters for toluene biofiltration: evaluation of the performance with four packing materials under different operating conditions. *Chemosphere* 67, 684–692.
- Metcalf y Eddy. 1995. Ingeniería de Aguas residuales 3ª ed. España. McGraw Hill. 550 p.
- Morgan J, Noyola A., 2005. Hydrogen sulfide removal by compost biofiltration: Effect of mixing the filter media on operational factor. *Bioresource Technology*. 97< 1546 – 1553.
- Oyarzun P. Arancibia F. Canales C. Aroca G. 2003. Biofiltration of high concentration of hydrogen sulphide using *Thiobacillus thioparus*. *Process Biochemistry* 39 (2003) 165 – 170.
- Ramírez M. 2006. Estudio y puesta en marcha de un sistema de eliminación de ácido sulfhídrico en una corriente de aire, mediante un biofiltro de escurrimiento con *Thiobacillus thioparus* inmovilizado en espuma de poliuretano. Programa de ciencias y tecnologías químicas BIENIO 2003/2005. Departamento de Ingeniería Química, Tecnología de alimentos y Tecnologías del Medio Ambiente - Facultad de Ciencias – Universidad de Cádiz. 49 p.
- Rittmann B, McCarty P. 2001. Biotecnología del medio ambiente. España. McGraw – Hill/Interamericana de España S.A.U. 745 p. ISBN: 0-07-234553-5
- Van Groenestijn JW. Hesselink PG. 1993. Biotechniques for air pollution control. *Biodegradation* 4. 283 – 301.
- Varnero M, Carú M, Galleguillos K, Achondo P. 2012. Tecnologías disponibles para la purificación de biogás usado en la generación eléctrica. *Información Tecnológica*. Vol. 23 (2), 31 – 40 pp.