

**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**

**ESCUELA DE PREGRADO**

**Memoria de Título**

**PURIFICACION BIOLOGICA DE BIOGAS**

**Mirella Lucia Marin Marin**

**Santiago - Chile  
2011**

**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**

**ESCUELA DE PREGRADO**

**Memoria de Título**

**PURIFICACION BIOLOGICA DE BIOGAS**

**BIOLOGICAL PURIFICATION OF BIOGAS**

**Mirella Lucia Marin Marin**

**Santiago - Chile  
2011**

**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**

**ESCUELA DE PREGRADO**

**Memoria de Título**

**PURIFICACION BIOLOGICA DE BIOGAS**

**Memoria para optar al Título Profesional de  
Ingeniero en Recursos Naturales Renovables**

**Mirella Lucia Marin Marin**

	<b>Calificaciones</b>
<b>PROFESOR GUÍA</b>	
Sra. María Tereza Varnero M. Químico Farmacéutica	6,0
<b>PROFESORES EVALUADORES</b>	
Sr. Juan Manuel Uribe M. Ingeniero Agrónomo	6,0
Sr. Marcos Mora G. Ingeniero Agrónomo, Dr.	6,3

**Santiago - Chile  
2011**

## AGRADECIMIENTOS

Ante todo agradezco a todos mis profesores por haber puesto su confianza en mí.

A Juan Manuel Uribe, quien me ayudo en todo momento con su comprensión a salir adelante en los momentos difíciles de mi carrera.

A la profesora María Teresa Varnero, por su apoyo a lo largo de todo este trabajo, por su voluntad y disposición al momento recibir mis inquietudes.

- *...Especialmente a mi hija.*

**INDICE**

<b>INTRODUCCION</b> .....	6
<b>OBJETIVOS</b> .....	9
<b>METODOLOGIA</b> .....	9
<b>RESUMEN</b> .....	10
<b>ABSTRACT</b> .....	11
<b>CAPITULO I: TECNICAS DE PURIFICACION DE BIOGÁS</b> .....	12
<b>CAPITULO II: DESCRIPCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO BIOLÓGICOS DE PURIFICACIÓN DE BIOGÁS</b> .....	25
<b>CAPÍTULO III: ANÁLISIS CRÍTICO Y ANALÍTICO SOBRE LAS DISTINTAS METODOLOGÍAS BIOLÓGICAS PARA LA PURIFICACIÓN DE BIOGÁS.</b> ...	41
<b>CAPÍTULO IV: COMPARACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE PURIFICACIÓN DE BIOGÁS, EN BASE A EFICIENCIA, COSTOS Y CUIDADO CON EL MEDIO AMBIENTE</b> .....	45
<b>CONCLUSIÓN</b> .....	49
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	50
<b>ANEXO</b> .....	54

## INTRODUCCION

En la actualidad nos vemos enfrentados a uno de los grandes problemas que afectan a la humanidad, la degradación de los recursos naturales y la sobre producción de desechos, todo a un volumen superior al que poseen los sistemas naturales para generar y procesarlos, esto pone en riesgo la sustentabilidad del desarrollo. Junto con ello, el problema climático que genera la emisión de gases con efecto invernadero (GEI), enciende la alerta en la importancia de la búsqueda de tecnologías limpias (Anuario, 2008).

En el ámbito científico existe un consenso en la transformación del clima global. Las grandes concentraciones de gases, capaces de almacenar calor, “gases de efecto invernadero”, principalmente dióxido de carbono y metano, están creciente aumento. Estos compuestos emitidos a la atmósfera atrapan una porción de radiación infrarroja terrestre, lo que conlleva al aumento de la temperatura planetaria media entre 1,5 y 4,5 °C (Fuentealba *et al.*, 2005).

Desde la revolución industrial la atmósfera ha experimentados un incremento de la temperatura en 0.5°C, fecha que coincide con el inicio de la utilización de combustibles fósiles, a raíz de ello debiera existir un cambio de matriz energética, puesto que, si el crecimiento de la emisión de gases invernadero se mantiene en el ritmo actual, los niveles en la atmósfera se duplicarán, en comparación con la época preindustrial, durante el siglo XXI. Si no se establecen medidas, es posible triplicar la cantidad antes del año 2100 (Fuentealba *et al.*, 2005).

Los componentes presentes en la atmósfera forman el sistema ambiental integrado. Entre sus funciones esta la mantención de condiciones aptas para la vida, si es alterada, se pronostica que los patrones de precipitación global y de ecosistemas globales se modifiquen (Fuentealba *et al.*, 2005).

La biotecnología anaeróbica se presenta como uno de los procesos que pueden mitigar esta problemática. Esta se basa en el empleo de digestores donde se acumula materia orgánica. Es aquí, donde se produce la degradación de la misma, generando una energía no convencional llamada biogás (Crozza y Pagano, 2007).

La digestión anaeróbica es un proceso biológico basado en la transformación de la materia contaminante principalmente a biogás, debido a la acción combinada de distintas especies de microorganismos quienes instauran relaciones sintróficas, que potencian su actividad (Gaete, 2007).

Se llama biogás a la mezcla de gases productos de la digestión anaeróbica, compuesto fundamentalmente de metano (CH<sub>4</sub>) entre 60 y 65% y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) entre 35 a 40% del total, estos son los principales gases de efecto invernadero (Noyola *et al.*, 2006;

Pérez *et al.*, 2008).

Conjuntamente, debido a las reacciones bioquímicas, llevadas a cabo en condiciones de anaerobiosis, pueden estar presentes otros gases como nitrógeno (N<sub>2</sub>), hidrógeno (H<sub>2</sub>), vapor de agua (H<sub>2</sub>O), amoníaco (NH<sub>3</sub>), ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) y gases traza que, regularmente, constituyen menos del 1% del volumen total (Noyola *et al.*, 2006).

Las principales fuentes de generación de biogás corresponden a plantas de tratamiento de aguas servidas, rellenos sanitarios y digestores de pequeña, mediana y gran escala, debido a las condiciones en que es degradada la materia orgánica (González, 2006).

Una vez, generado el biogás no puede utilizarse directamente, sin la apropiada remoción del H<sub>2</sub>S, ya que el su directo uso como combustible, no es posible (Gaete, 2007).

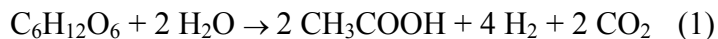
Son considerados contaminantes el sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) ya que produce daños a la salud, efectos ambientales adversos y corrosión en la maquinaria industrial y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que disminuye el poder calorífico de la mezcla gaseosa ((Etcharren, 2005; González, 2006).

La eliminación de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S aumentaría la combustibilidad del biogás y podría quemarse en forma productiva en diferentes aplicaciones relacionadas con la generación de energía.

El proceso llevado a cabo por un conjunto de organismos que de forma sintrópica dan origen a las cuatro etapas principales de la digestión anaeróbica: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Álvarez *et al.*, 2004).

La hidrólisis etapa anaeróbica, donde por acción de bacterias hidrolíticas, la materia orgánica es decompuesta. Los carbohidratos son transformados en azúcares simples; las grasas en ácidos grasos y glicerol; y las proteínas en polipéptidos y aminoácidos (Pérez *et al.*, 2008). Este proceso es realizado a través de enzimas extracelulares (celulasa, amilasa, lipasa o proteasa) (Álvarez *et al.*, 2004).

La fermentación o acidogénesis es la etapa donde los productos solubles derivados de la hidrólisis son convertidos por acción de las bacterias acidogénicas (microorganismos fermentativos u oxidantes anaeróbicos), en ácidos orgánicos de cadena corta, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>. Los azúcares, aminoácidos y ácidos grasos se convierten en ácidos orgánicos (ácido acético, propiónico, valérico, butírico, etanol, etc.) de acuerdo con las reacciones siguientes, (Pérez *et al.*, 2008).



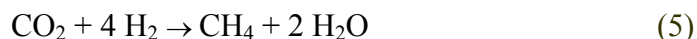
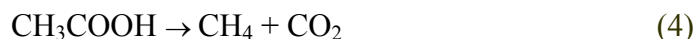
Los productos generados deben ser degradados por las bacterias productoras de hidrógeno en el proceso denominado acetogénesis (Álvarez *et al.*, 2004).

La etapa de acetogénesis es realizada por una sintrópica asociación con microorganismos metanogénicos consumidores de hidrógeno (Álvarez *et al.*, 2004).

Los productos resultantes de las reacciones enunciadas anteriormente, como los alcoholes, ácidos grasos y compuestos aromáticos se degradan produciendo ácido acético, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>, por bacterias acetogénicas, este proceso aporta aproximadamente, el 54 % del hidrógeno que se utilizará en la producción de metano (Pérez *et al.*, 2008).

La transformación de estos compuestos intermedios es determinante para la óptima producción de metano, debido a que los microorganismos metanogénicos no los pueden utilizar directamente (Álvarez *et al.*, 2004).

La metanogénesis es la etapa donde los microorganismos metanogénicos anaeróbicos estrictos originan metano a partir de moléculas orgánicas producto en las etapas anteriores. El metano puede ser generado por dos vías: la primera por el rompimiento de las moléculas de ácido acético, lo que forma CO<sub>2</sub> y metano, o la reducción del CO<sub>2</sub> con H<sub>2</sub>, de acuerdo a las reacciones siguientes (4 y 5) respectivamente.



Los factores que determinan la composición del gas resultante, producto de la digestión anaeróbica son: naturaleza de las materias primas, carga orgánica y biodegradabilidad, además de la tecnología implementada (Pérez *et al.*, 2008).

El principal problema del biogás, es la presencia de H<sub>2</sub>S (g), aunque se encuentra en muy baja concentración, es de vital importancia su eliminación, ya que además de ser tóxico para la salud humana, es corrosivo, esto impide la utilización como combustible y por consecuencia su valor de uso (Coto *et al.*, 2007).

El H<sub>2</sub>S es un gas incoloro, altamente volátil y posee olor a huevos podridos, es perceptible al olfato humano en concentraciones entre 0.5 a 0.1 ppm puede ser perceptible al olfato, superando ese nivel puede causar pérdida del sentido del olfato y su inhalación durante unos segundos a una concentración de 1000 ppm puede causar coma (Ramírez, 2007a).

Comúnmente para reducir las emisiones de metano a la atmósfera, los rellenos sanitarios han optado por quemar el biogás, reacción que tiene como producto final SO<sub>2</sub> y CO. Esta energía es desperdiciada y potencialmente podría ser utilizada como energía alternativa, considerando la cantidad de metano que posee esta corriente gaseosa (Ramírez, 2007a).



## **OBJETIVOS**

Sintetizar la información actual sobre alternativas de purificación biológica biológicas de biogas, dando a conocer los antecedentes necesarios sobre las variables que inciden en la implementación de las tecnologías, para su correcto funcionamiento.

## **METODOLOGIA**

El siguiente estudio consiste en la una revisión bibliográfica integral de literatura nacional e internacional, sobre las distintas técnicas biológicas de purificación de biogas; además de entregar una breve descripción sobre los procesos que hasta hoy se han utilizado (procesos fisico-químico). Esta monografía se realizara utilizando la mayor cantidad de información disponible, en el periodo comprendido entre los años 2000 y 2009.

## RESUMEN

El gas proveniente de la descomposición de la materia orgánica, bajo condiciones anaeróbicas, es llamado biogas, compuesto fundamentalmente de metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), principales gases de efecto invernadero. Producto de las reacciones bioquímicas se origina ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), el principal contaminante presente en el biogas, aunque se presenta en muy baja concentración, es de vital importancia su eliminación ya que posee un alto poder corrosivo, lo que restringe su utilización como combustible.

Las tecnologías tradicionales para la purificación de biogas, están basadas fundamentalmente en el empleo de métodos físico-químicos, los cuales además de generar contaminantes secundarios, son costosos.

Por otra parte, la purificación biológica es un proceso en el cual los gases contaminados se hacen entrar en contacto con un medio biológicamente activo. Este sistema se basa en la interacción del gas contaminado con microorganismos inmovilizados en una biopelícula sobre un material de soporte o empaque, también llamado medio biológico filtrante. A medida que el gas pasa a través del soporte, el contaminante es transferido desde la fase gaseosa a la biopelícula, donde es metabolizado por los microorganismos, habitualmente mediante procesos oxidativos, transformándolo en compuestos no tóxicos y de fácil eliminación.

Entre las tecnologías de tratamiento biológico se puede encontrar los biofiltros de lecho fijo, biolavadores y biofiltros de lecho escurrido, técnicas que operan bajo el mismo mecanismo, pero difieren en sus diseños y en algunas características funcionales.

En el presente trabajo se exponen las variables de diseño, dimensionamiento, parámetros operacionales, eficiencia, entre otras. necesarias para un correcto funcionamiento. Entre las que se encuentran la carga del contaminante, la naturaleza del medio filtrante utilizado, la humedad en el biofiltro y la temperatura, entre otras.

Las tecnologías biológicas no generan contaminantes secundarios, los costos de inversión y de operación son bajos, fáciles de operar y energéticamente eficientes. Además, poseen una alta eficiencia de eliminación, permiten trabajar a temperaturas relativamente bajas (15 a 30 °C) y a presión atmosférica. Estos antecedentes implican un menor gasto de energía y un buen comportamiento ambiental.

Palabras claves: biofiltros – biopurificación – biogás – biopurificado – biolavadores

## ABSTRACT

The gas from the decomposition of organic matter under anaerobic conditions, is called biogas, consisting primarily of methane (CH<sub>4</sub>) and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), which are the main greenhouse effect gases. Product of the biochemical reactions, hydrogen sulfide (H<sub>2</sub>S) is originated, which is the main contaminant in the biogas, although it occurs at very low concentrations, its elimination is vital because it has a high corrosive power, which prevents its use as fuel.

Traditional technologies for the purification of biogas, are based primarily on the use of physicochemical methods, which apart from generating secondary pollutants, are expensive.

Moreover, the biological purification is a process in which contaminated gases are put in contact with a biologically active environment. This system is based on the interaction of the contaminated gas with immobilized microorganisms in a biofilm on a supporting material or packaging, also called biological filtering media. As the gas passes through the supporting material, the contaminant is transferred from the gas phase to the biofilm, where it is metabolized by the microorganisms, usually by oxidative processes, making it into non-toxic and easy to remove compounds.

Among the biological treatment technologies we can find the fixed-bed biofilters, biowashers and drained bed biofilters, techniques that operate on the same mechanism, but differ in their designs and some performance characteristics.

This work describes the design variables, sizing, operating parameters, efficiency, etc. needed for proper operation. Among those are the pollutant loading, the nature of the filter media used, the biofilter's moisture and temperature, among others.

Biological technologies don't generate secondary pollutants, the costs of investment and operation are low, easy to operate and energy efficient. Also, they possess a high removal efficiency, allow working at relatively low temperatures (15 to 30 °C) and at atmospheric pressure. These facts involve a lower energy use and a good environmental performance.

Keywords: biofilters - biopurification - biogas - biopurified - biowashers

## **CAPITULO I: TECNICAS DE PURIFICACION DE BIOGÁS**

Los impactos que las emisiones gaseosas provocan a las personas y al medio ambiente, han incitado al desarrollo de diferentes tecnologías para la purificación de estos efluentes, basados en principios fisicoquímicos y biológicos (Etcharren, 2005).

### **Técnicas fisicoquímicas**

Esta tecnología de tipo convencional, es una de las más utilizadas para la disminución de compuestos contaminantes, para corrientes gaseosas de desechos provenientes de procesos industriales. Las características fisicoquímicas y térmicas de sus componentes establecen la tecnología a utilizar (Etcharren, 2005).

Los sistemas tradicionales utilizan el principio de separación fisicoquímica, Dentro de estas, se encuentran los de adsorción, absorción, los sistemas de membranas y la oxidación térmica y catalítica (Etcharren, 2005).

Estos procesos son utilizados ampliamente para flujos gaseosos con altas concentraciones de  $H_2S$ . Habitualmente se lleva a cabo mediante el uso de tecnologías basadas en sistemas de absorción-agotamiento, las que utilizan un solvente selectivo al compuesto indeseable y un sistema reactivo para su transformación a especies menos dañinas o inocuas (González, 2006)

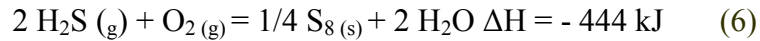
### **Métodos de adsorción**

Los procesos de absorción, también llamados de lecho seco, son llevados a cabo sobre un material sólido fijo, sobre el cual el ácido sulfhídrico es adsorbido. Si la superficie utilizada es de óxido de hierro y zinc, la adsorción es química e irreversible, para casos de superficies de zeolitas o carbón activado, la reacción es física, por lo tanto los lechos pueden ser regenerados (González, 2006).

Los métodos de purificación por adsorción utilizan también carbón activado, sílicagel o tamices moleculares (Fernández, 2004).

El proceso de adsorción ocurre sobre la superficie del adsorbente donde las moléculas son retenidas por fuerzas electrostáticas débiles. La reacción se puede ver afectada por humedad, selectividad, temperatura, presión, y presencia de partículas (Revah y Ortiz, 2004).

Para el caso del carbón activado la reacción ocurre en los poros, dando como resultado azufre y agua, cuando el sulfuro de hidrógeno reacciona con el oxígeno. Esto ocurre a temperaturas bajas, expresada en la ecuación (6).



Este proceso posee una alta eficiencia de remoción, donde el azufre es adsorbido químicamente en la superficie interna del carbón activado; también puede darse que el  $\text{H}_2\text{S (g)}$  quede obstruido en los poros del carbón, ahí se habla de adsorción física. Otro lecho evaluado, ha sido la adsorción utilizando sílicagel, del que se han obtenidos buenos resultados en la remoción de  $\text{H}_2\text{S (g)}$ , además de  $\text{CO}_2 \text{(g)}$ . En este caso se utiliza sílicagel con indicador, este indica la saturación al cambiar de tonalidad y puede ser recuperado mediante su calentamiento a  $117^\circ \text{C}$ . La disminución de  $\text{H}_2\text{S (g)}$  se puede desarrollar a temperatura y presión normales, mientras que la del  $\text{CO}_2 \text{(g)}$  se realiza a presiones de 5 000 hPa. (Fernández, 2004).

Otros sólidos como los tamices moleculares (compuestos de zeolita con afinidad por moléculas polares), también se han utilizado como adsorbentes, los que además de eliminar  $\text{H}_2\text{S (g)}$ , sirve para otras impurezas. Estos poseen un área específica de hasta  $590 \text{ cm}^2/\text{g}$  y con poros bien definidos, lo que permite una eliminación selectiva de diferentes compuestos. En este caso, el adsorbente es regenerado en una columna de purificación pasando gas caliente a temperaturas entre  $204$  y  $315^\circ \text{C}$  (Fernández, 2004).

Para el caso de escalas mayores (industrial) el carbón activado es impregnado de de KOH o KI, estos procesos ocurren a temperatura ambiente y presión atmosférica. El ácido sulfhídrico es transformado en azufre elemental y agua, de acuerdo con la reacción de Claus. En este caso es preciso conservar los niveles de oxígeno entre un 0.3 y un 0.5 %. El carbón activo es el encargado de adsorber el azufre elemental, producto de la reacción. El diseño habitual es constituido por dos o más lechos adsorbentes dispuestos en paralelo, de esta forma hay uno siempre funcionando, mientras los saturados se regeneran, generalmente con una corriente de aire o vapor de agua. Estas tecnologías permiten un nivel de remoción del 100% de  $\text{H}_2\text{S}$  (Pérez *et al.*, 2008).

### **Métodos de absorción**

Los métodos de absorción son de alta eficacia, bajos costos de materiales (en algunos casos) y utilizados en la purificación de biogás.

### Compuestos de hierro

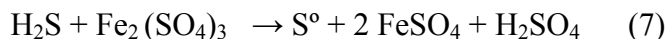
Esta tecnología logra una alta eficiencia en la remoción de  $\text{H}_2\text{S}_{(g)}$ . La absorción a través de limallas de hierro, es llevada a cabo en columnas de purificación, esta tecnología demanda habitualmente humedecer con agua las limallas, ya que se debe un nivel de entre 30 y 60 % de humedad en el sistema. Además requiere que las columnas estén rellenas con otro material para beneficiar la hidrodinámica del sistema (ej. Aserrín). Aquí se puede trabajar en un amplio rango de presiones, que van desde la atmosférica hasta varios cientos de kPa, y temperatura, lográndose buenas eficiencias de eliminación. También se ha utilizado óxido de hierro (III) y hierro quelatado en fase líquida (Fernández, 2004).

### Procesos de conversión directa

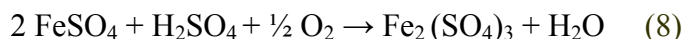
La oxidación directa (o procesos de oxidación líquida) es un proceso químico basado en el proceso oxidación – reducción. En este proceso el  $\text{H}_2\text{S}$  es oxidado directamente hasta azufre elemental, con la reducción de sales de hierro o zinc. Son utilizados para corrientes gaseosa con concentraciones de  $\text{H}_2\text{S}$  (1-2 vol%). Ejemplos de estas tecnologías son: Stretford, LO-Cat, SulFerox e Hiperion (González, 2006).

### Proceso de absorción con solución de sulfato férrico

Una tecnología que utiliza los microorganismos junto a un método físico-químico, para eliminar  $\text{H}_2\text{S}$  es la absorción en una solución de sulfato férrico, expresada en la ecuación (7).



Esta reacción tiene como producto sulfato ferroso ( $\text{FeSO}_4$ ) y  $\text{S}^0$ , donde el sulfato férrico es recuperado gracias a *Acidithiobacillus ferrooxidans* que oxida de  $\text{Fe}^{2+}$  a  $\text{Fe}^{3+}$  y el azufre elemental es separado. Durante la reacción se genera  $\text{H}_2\text{SO}_4$  que tiene características corrosivas, expresada en la ecuación (8), (Mesa *et al.*, 2002).



### Proceso de absorción con agua

Metodología poco eficiente en la remoción de  $\text{H}_2\text{S}$  de corrientes gaseosas, esta tecnología utiliza el agua como absorbente, también llamado limpieza húmeda o fregado. Para que este proceso se lleve a cabo las temperaturas de operación deben ser entre 5 y 10 °C. Sin embargo, si se desea trabajar a temperatura ambiente, la presión de funcionamiento debe ser mayor a 1726 kPa. El agua contaminada es regenerada en una torre instantáneamente, puesto que el  $\text{CO}_2_{(g)}$  y  $\text{H}_2\text{S}_{(g)}$  pasan directamente a la atmósfera, debido al cambio de presión. Durante el proceso existe una pérdida de agua que va desde un 10 a un 20 %, la cual debe ser repuesta. Para un mejor nivel de remoción de contaminantes presentes en la corriente de gas, es recomendable un tratamiento adicional anterior al proceso descrito (Fernández, 2004).

**Lavadores químicos**

Este proceso es llevado a cabo por un agente oxidante químico (Ej. hipoclorito), el que absorbe el contaminante, por lo tanto debe ser constantemente añadido. Cuando la reacción es incompleta, es probable que se generen sustancias indeseables. Esta tecnología es utilizada para el control de olores en torres de aspersion o empacadas (Revah y Ortiz, 2004).

**Absorción de  $H_2S_{(g)}$  y  $CO_{2(g)}$  en disoluciones alcalinas y compuestos orgánicos**

Estos métodos de absorción están basados en la transferencia del  $H_2S$  presente en el biogás, a una fase líquida que posee propiedades selectivas de absorción y sus características dependerán del contaminante a eliminar. Este proceso ocurre gracias a la gradiente de concentración (Revah y Ortiz, 2004).

La fase líquida es llamada absorbedor, este puede estar formado por una solución de sal alcalina o una sal de hierro. También se emplean carbones activos, los que además eliminan  $CO_2$  (Llaneza *et al.*, 2010; Pérez *et al.*, 2008).

Entre los absorbedores se encuentran agua, soda cáustica, aminas y algunos hidrocarburos, y la eficiencia del sistema dependerá de la solubilidad del contaminante a eliminar. Otros factores que influyen son la temperatura, presión y el pH. (Revah y Ortiz, 2004).

Este proceso, por lo general es llevado a cabo en torres o columnas donde el líquido absorbedor es pasado a contracorriente del flujo gaseoso, es ahí donde se produce la transferencia de masa del  $H_2S_{(g)}$ , dentro de estos procesos también se utilizan sales de sodio o potasio y ácidos débiles. En la siguiente tabla se muestran las características generales de un grupo de procesos y soluciones químicas alcalinas (Fernández, 2004).

Cuadro 1: Procesos que utilizan soluciones alcalinas para absorber y o eliminar CO<sub>2</sub> (g) y H<sub>2</sub>S (g).

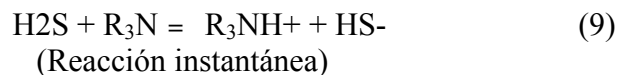
Nombre del proceso	Absorbente	Temperatura de operación (°C)	Presión manométrica de operación (kPa)	Método de regeneración
Catacarb	Carbonato de potasio + borato de amina	15 - 232	0-9493	Vapor
Giammarco- vetrocoke	Potasio + trióxido de arsénico o glicerina	48 - 120	0-9500	Vapor o agua en ebullición
Benefield*	Carbonato de potasio	96	863 - 17260	Vapor

\*También se eliminan mercaptanos.

Fuente. Fernández, 2004.

Dentro del grupo de compuestos orgánicos encontramos las aminas, estas moléculas poseen un grupo amino (NH<sub>2</sub>), que reacciona con H<sub>2</sub>S y el CO<sub>2</sub>, dando como resultado compuestos de hidrógeno carbonato, amoníaco (RNH<sub>3</sub>) HCO<sub>3</sub> y azufre con amoníaco (RNH<sub>3</sub>) S (Llaneza *et al.*, 2010). Esta metodología esta compuesta de una solución de alcano-aminas, la que absorbe H<sub>2</sub>S (ecuación 1-1). El producto de esta reacción puede ser desorbido al elevar su temperatura a 90 °C y hasta 150 °C, y así recuperar el solvente (González, 2006). A través del proceso de Claus o Stretford el H<sub>2</sub>S es quemado o convertido a azufre elemental (Alcántara, 2000).

Estos procesos se usan a altas presiones y altas concentraciones de gas ácido, expresada en la ecuación (9), (González, 2006).



Los procesos que utilizan aminas, operan habitualmente a temperaturas de 48° C, pero el exceso de calor puede provocar la vaporización o inutilizar la solución química. Además su funcionamiento requiere agentes anticorrosivos (Fernández, 2004).

Otro absorbente es el formado por compuestos orgánicos, los que son utilizados en la remoción de CO<sub>2</sub> (g) y/o H<sub>2</sub>S (g) que contiene el biogas. Estos procesos se verifican a bajas



temperaturas y altas presiones. Aquí el solvente es regenerado aumentando la temperatura, desprendiendo un gas de concentrado de azufre elemental y dióxido de azufre. Se utiliza óxido de aluminio para el sulfuro remanente, el cual es recuperado catalíticamente (Fernández, 2004).

Cuadro 2: Listado solventes alcalinos químicos para absorber y/o eliminar contaminantes presentes en el biogas.

Nombre del proceso	Absorbente	Temperatura de operación (°C)	Presión manométrica de operación (kPa)	Método de operación
Amina-Guard	Mono-etanolamina	Hasta 48	Alta	Rehervir a baja presión
SNPA-DEA	Dietanol-amina (DEA)	Hasta 48	>4 315	Calentamiento a baja presión
Econamine*	Hidroxi-amino etilester (DGA)	Hasta 48	>4 315	Calentamiento a baja presión
Sulfinol	Dióxido de tetra hidrotiofeno + amina diisopropanol	Ambiente	0-9500	Rehervir o contacto instantáneo a baja temperatura
Selexol	Dimetil eter de polietilenglicol	-23a ambiente	> 2 589	Baja presión
Fluor	Carbonato de propileno anhidro	- 45	> 2 589	Baja presión
Puriosol**	N-metil pirolidona	Baja	Alta	Alta temperatura
Rectisol	Metanol	Baja	Alta	Alta temperatura

\*Absorben también mercaptanos

\*\* No absorbe CO<sub>2(g)</sub>

Fuente. Fernández, 2004.

### Métodos de separación por membrana

Este proceso tiene como objetivo "filtrar" el biogás (Fernández, 2004). Así, la corriente gaseosa a purificar se hace fluir a través de una membrana selectiva, gracias a la fuerza motriz generada por diferencias de presión. El factor determinante es la permeabilidad que poseen las moléculas que componen la corriente gaseosa a purificar (González, 2006), por lo tanto el material a escoger será función de la solubilidad y difusividad (temperatura, presión y naturaleza) de los componentes gaseosos que presente el gas a filtrar. En

ocasiones se utiliza un transportador, para ayudar a la transmisión (Llaneza *et al.*, 2010)

Últimos avances en materiales de fabricación de membranas han permitido la aplicación de membranas poliméricas no rugosa en la separación selectiva del H<sub>2</sub>S de corrientes gaseosas. Este proceso esta basado en la permeación de un gas, el cual consiste en hacer pasar un elemento químico a través de una película protectora, y no por los poros u otras aberturas. Las moléculas individuales penetran la película, y atraviesan entre las moléculas del material. Es un proceso complicado que puede implicar los siguientes pasos: (Fernández, 2004)

- Adsorción del gas en una interfase de la membrana.
- Solución del gas en la membrana en esa interfase.
- Difusión activada del gas en, y a través de la membrana.
- Desprendimiento del gas de la solución por la interfase opuesta.
- Desorción del gas de la última interfase

### **Oxidación térmica y Oxidación catalítica**

En los Sistemas de Oxidación Térmica se produce la depuración en base al calentamiento, normalmente a temperaturas entre 700 y 1000° C, de manera que los compuestos orgánicos se oxidan drásticamente. Los productos resultantes de esta reacción son CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, en ciertas ocasiones se emiten gases contaminantes adicionales como el NO<sub>x</sub>, CO y otros COVs potencialmente peligrosos. Esta tecnología necesita una corriente de combustible adicional y es empleada cuando la concentración de gases orgánicos es 50% menor al límite inferior de explosividad (Revah y Ortiz, 2004).

En este caso la oxidación catalítica es favorecida por un catalizador, que tienen la propiedad de acelerar la reacción de oxidación de los compuestos orgánicos volátiles a temperaturas menores que la anterior, 300-450° C, por lo tanto se reduce el gasto energético adicional y la formación de óxidos de nitrógeno. Los catalizadores generalmente empleados son óxidos metálicos. Este proceso es utilizado para concentraciones menores del 25% de su límite inferior de explosividad. En el caso de la purificación de biogas, el H<sub>2</sub>S puede desactivar el catalizador (Revah y Ortiz, 2004).

### **Técnicas biológicas**

El tratamiento biológico o purificación biológica en términos generales es un proceso en el cual los gases contaminados son tratados al hacerlos entrar en contacto con un medio biológicamente activo Environmental Protection Agency (EPA, 2004). Los procesos biológicos enfocados a la purificación de gases son generalmente de oxidación, dando como resultado dióxido de carbono, agua, sulfato y nitrato (González, 2006).

En la naturaleza existen microorganismos capaces de transformar compuestos orgánicos e inorgánicos, contaminantes, en sustancias menos nocivas por lo tanto casi todas las sustancias pueden ser potencialmente degradadas, si se entregan las condiciones medio ambientales requeridas, estos suelen ser bacterias, arqueas, levaduras y hongos ((Etcharren, 2005; Noyola *et al.*, 2006).

Se tiene conocimiento que en lugares con alto porcentaje de humedad (aguas residuales) existen especies de microorganismos, que como fuente nutricional utilizan el  $\text{H}_2\text{S}$  (g), ya que se ha observado azufre elemental en su entorno. Si el medio ambiente lo permiten ellos crecen y se multiplican, además, se ven favorecidos por ciertas condiciones que ayudan a su crecimiento y desarrollo: presencia de oxígeno, presencia de  $\text{H}_2\text{S}$  (g) y líquido, el que actúa como transportador de bacterias. Pero también pueden vivir en ausencia de oxígeno (Llaneza *et al.*, 2010).

Los procesos biológicos están basados en el ciclo biológico del azufre, este involucra una gran variedad de organismos y microorganismos (González, 2006).

El azufre esta presente en la naturaleza como sulfuros, sulfatos y azufre elemental, este puede asumir nueve estados de oxidación y el equilibrio entre los compuestos azufrados depende del potencial redox, pH, temperatura y la concentración, los más estables son: el ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), el azufre elemental ( $\text{S}_0$ ) y sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) (González, 2006; Ramírez, 2007a).

Dependiendo del pH, el azufre se encuentra como  $\text{S}^{2-}$ , si el medio es básico, a pH neutro prevalece el  $\text{HS}^-$  y a pH ácido predomina el  $\text{H}_2\text{S}$  (Ramírez, 2007a).

Figura 1: Ciclo biológico del azufre.



Fuente. Alcántara, 2000.

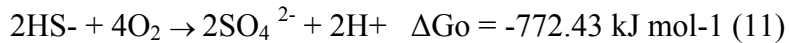
En el ciclo se pueden distinguir dos etapas de acuerdo al tipo de reacciones de oxidoreducción. En la etapa reductiva se presentan dos formas bioquímicas de reducción. La asimilativa que esta a cargo de organismos eucariontes y procariontes, donde el sulfato es reducido a  $\text{H}_2\text{S}$ , necesario para la formación de compuestos para su crecimiento y

funcionamiento. La desasimilativa donde los organismos que la realizan son procariontes (microorganismos sulfato-reductores), aquí el sulfato es reducido a sulfuro en condiciones anaeróbicas. Aquí la reducción está conectada con la oxidación de varios ácidos grasos volátiles (lactato y piruvato) los que forman ATP y la energía necesaria para el crecimiento celular (González, 2006).

La reducción del sulfato puede ser de manera asimilativa, convirtiendo el HS- formado azufre orgánico (R-HS), o desasimilativa, formando H<sub>2</sub>S. Las bacterias que producen H<sub>2</sub>S son las llamadas bacterias sulfato-reductoras y son anaerobias estrictas (Ramírez, 2007a).

En la etapa oxidativa las reacciones de oxidación pueden ser llevadas a cabo en condiciones anaerobias (microorganismos fotótrofos y facultativos) y aerobia (microorganismos autótrofos del género *Thiobacillus*). Esta fase oxidativa habitualmente es desasimilativa (Alcántara, 2000).

Se tiene conocimiento que dependiendo de la concentración de O<sub>2</sub> disuelto, los microorganismos sulfoxidantes oxidan el H<sub>2</sub>S de acuerdo a las reacciones:



En la reacción (10) se obtiene como producto azufre elemental, pero los microorganismos tienden a escoger la (11) ya que esta entrega mayor energía necesaria para los procesos metabólicos (González, 2006).

En la etapa oxidativa del ciclo del azufre actúan microorganismos llamados “bacterias incoloras del azufre”, llamadas así por no poseer foto pigmentos, sin embargo se tiene registro cuando se encuentran en colonias y cultivos con gran número de ellos, se percibe un color rosado o carmelita, debido al citocromo que poseen (Pérez y Villa, 2005).

El ácido sulfhídrico es oxidado por bacterias sulfoxidantes como *Thiobacillus*, *Thiomicrospira*, *Thiomonas*, *Paracoccus*, *Xanthobacter*, *Alcaligenes*, *Pseudomonas*, etc., esto puede ocurrir en dos etapas: una que va desde el H<sub>2</sub>S (-2) hasta azufre elemental y la otra hasta generar SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (+6). Algunas de estos microorganismos depositan azufre elemental dentro de la célula, como reserva energética. Los compuestos derivados de la oxidación del H<sub>2</sub>S, son de fácil eliminación (Ramírez, 2007a). Son llamadas así, ya que adquieren la energía necesaria para su actividad de la oxidación de sulfuros. Bajo restricción en la provisión de oxígeno disuelto, estos microorganismos pueden producir azufre elemental (González, 2006).

Figura 2: Géneros que han sido tradicionalmente reconocidos como bacterias incoloras del azufre.

Tabla 1. Géneros de las bacterias incoloras tradicionalmente reconocidas como capaces de crecer en compuestos reducidos de azufre y sus parámetros medio ambientales. <sup>8</sup>							
Géneros	Requerimiento de pH		Requerimiento térmico		Crecimiento anaerobico		
	Neutrofilico	Acidofilico	Mesofilico	Termofilico	Denitrificador	S <sup>0</sup> /Fe <sup>2+</sup> (electrón aceptor)	Simbiótico
<b>I. Tradicionalmente bacterias incoloras del azufre</b>							
<i>Thiobacillus</i>	+ <sup>a</sup>	+	+	+	+	V	+
<i>Thiomicrospira</i>	+	-	+	-	+	-	? <sup>b</sup>
<i>Thiosphaera</i>	+	-	+	-	+	-	-
<i>Sulfolobus</i>	-	+	-	+ <sup>c</sup>	-	-	-
<i>Acidianus</i>	-	+	-	+ <sup>c</sup>	-	+	-
<i>Thermothrix</i>	+	-	-	+	+	-	-
<i>Thiovulum</i> <sup>d</sup>	+	-	+	-	-	-	-
<i>Beggiatoa</i>	+	-	+	-	-	+	-
<i>Thiothrix</i>	+	-	+	-	-	-	-
<i>Thioploca</i> <sup>d</sup>	+	-	+	-	-	-	-
<i>Thiodendron</i> <sup>d</sup>	+	-	+	-	-	-	-
<i>Thiobacterium</i>	+	-	+	-	-	+	-
<i>Macromonas</i>	+	-	+	-	-	+	-
<i>Achromatium</i> <sup>d</sup>	+	-	+	-	-	+	-
<i>Thiospira</i> <sup>d</sup>	+	-	+	-	-	-	-
<b>II. Otras bacterias capaces de crecer sobre compuestos reducidos de azufre</b>							
<i>Paracoccus</i>	+	-	+	-	+	-	-
<i>Hyphomicrobium</i>	+	-	+	-	-	-	-
<i>Alcaligenes</i>	+	-	+	-	+	-	-
<i>Pseudomonas</i>	+	-	+	-	+	-	-
<i>Hydrogenobacter</i>	+	-	-	+	-	-	-

<sup>a</sup> + ejemplo conocido; - ejemplo no conocido; V variable  
<sup>b</sup> 16S, rRNA análisis que indica una posible relación  
<sup>c</sup> Hyperthermophilic archaeobacterium  
<sup>d</sup> Cultivos axénicos no utilizables

Fuente. Pérez y Villa, 2005.

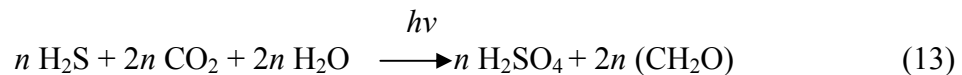
Los microorganismos autótrofos utilizan carbono inorgánico (CO<sub>2</sub>) como fuente de carbono. Dependiendo del metabolismo energético, estos pueden clasificarse en fotoautótrofos o quimioautótrofos. Existen además microorganismos facultativos, llamados mixotrofos estos obtienen la energía necesaria para el metabolismo a través de la oxidación de compuestos inorgánicos reducidos, y pueden utilizar el carbono inorgánico u orgánico, como fuente de carbono (Syed *et al.*, 2006).

Las bacterias fototróficas (púrpuras o verdes) usan a la luz como fuente de energía para reducir el CO<sub>2</sub> a carbohidratos, mientras que las quimiotróficas (incoloras) obtienen su energía de la oxidación aerobia o microaerobia de compuestos inorgánicos como el H<sub>2</sub>S. Las bacterias sulfoxidantes crecen en un amplio rango de pH (González, 2006).

El procedimiento biológico que emplea bacterias fotosintéticas para oxidar sulfuro de hidrógeno esta descrito por la reacción de fotosíntesis de Van Niel ecuación (12), (Madigan *et al.*, 2006).



Otra posibilidad es que exista acumulación de sulfato, ecuación (13) (Larsen, 1952).



El proceso de oxidación fototrófica es realizado en condiciones anaeróbicas (Madigan *et al.*, 2006).

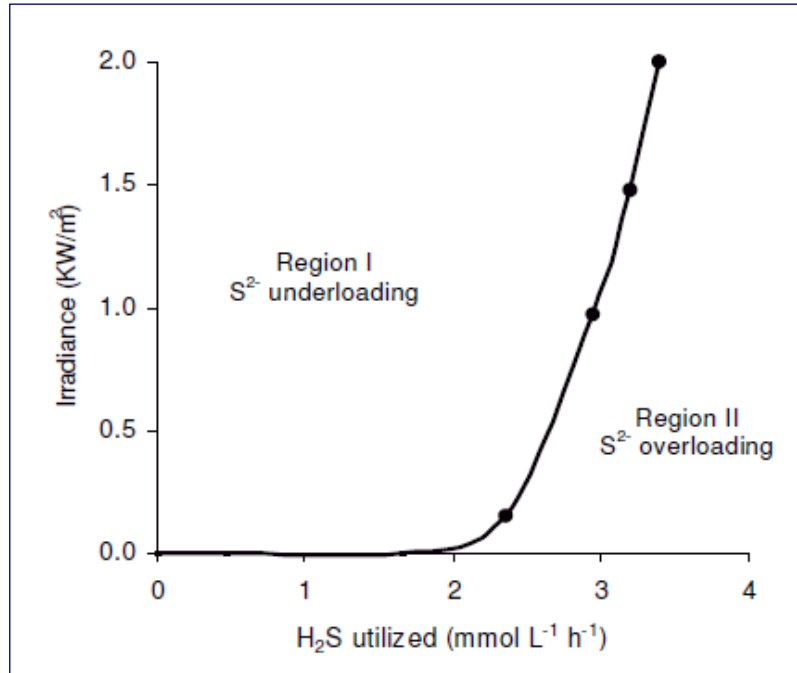
Existe un gran número de especies de bacterias sulfoxidantes, las que se conocen desde hace años, pero solo durante los últimos diez años han sido investigadas con el propósito de eliminar los contaminantes presentes en el biogas (CO<sub>2</sub> (g) y H<sub>2</sub>S (g)). Entre ellas podemos encontrar a *Thiothrix*, *Thiobacillus* y *Beggiatoa*, obteniéndose buenos resultados a bajas concentraciones de H<sub>2</sub>S (g) para *Thiobacillus denitrificans* y *Thiobacillus thiooxidans*, a escalas pequeñas de experimentación (Fernández, 2004).

En la naturaleza, se encuentra *Thiobacillus ferrooxidans*, microorganismo lixiviador identificado, uno de los más estudiados hasta hoy. El proceso que es llevado a cabo por estas bacterias se conoce como biodesulfuración, el cual consiste en remover sulfuros del medio a través de una oxidación del mismo. La mayoría de estos microorganismos es autotróficos, esto significa que pueden usar el dióxido de carbono presente en el biogás como fuente de carbono (Pérez y Villa, 2005; Llana *et al.*, 2010).

Las bacterias anaerobias azufre oxidantes son comúnmente neutrófilas y mesófilas, de géneros como *Allochromatium*, *Chlorobium*, *Rhodobacter*, *Rhodopseudomonas*, *Rhodovulum* y *Thiocapsa*. *Choloribium limicola* (bacteria foto autótrofa anaerobia) es capaz de oxidar H<sub>2</sub>S a azufre elemental con presencia de CO<sub>2</sub>, luz y un medio con nutrientes inorgánicos (Friedrich *et al.*, 2001; Ramírez, 2007b).

Corck *et al.*, (1985) estudio el comportamiento de *Choloribium limicola* en un reactor batch, donde relacionó la intensidad de la luz con el flujo proporcionado de H<sub>2</sub>S (Fig. 3).

Figura 3: Curva de oxidación de sulfuro de hidrógeno a azufre elemental o curva de van Niel.



Fuente. (Adaptado de Corck *et al.*, 1985).

En el gráfico se distinguen dos regiones. La región I muestra que cuando la concentración de H<sub>2</sub>S es baja y la intensidad luminosa es alta, se forma SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> dentro del reactor. La región II evidencia que cuando la concentración de H<sub>2</sub>S es alta, la energía luminosa no es bastante, por lo tanto el H<sub>2</sub>S se acumula en el reactor. Pero cuando las variables (intensidad de la luz y el flujo de H<sub>2</sub>S) se ajustan a la curva, el H<sub>2</sub>S es oxidado completamente a azufre elemental, sin formación de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>.

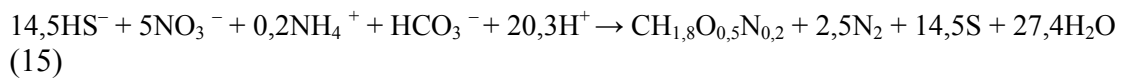
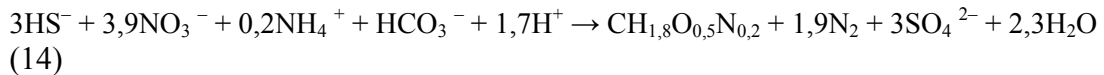
Aquí se expone claramente que este procedimiento requiere de un control estricto de parámetros de intensidad de luz y del flujo de H<sub>2</sub>S suministrado, ya que la oxidación puede ser completa o incompleta.

La oxidación quimiolitótrofa es llevada a cabo por las bacterias incoloras del azufre, que oxidan compuestos de azufre: *Acidithiobacillus*, *Beggiatoa*, *Pseudomonas*, *Thiobacillus*, *Thiothrix*, *Thiomicrospira*, *Thioploca*, *Xanthobacter* (Friedrich *et al.*, 2001). Existen además organismos procariontes órgano heterótrofos como Archaeas (*Sulfolobus* y *Acidianus*) (Madigan *et al.*, 2006).

Se ha experimentado a diferentes escalas la purificación de biogás, tomando en cuenta la capacidad metabólica que presentan estos microorganismos quimiolitotrofos, los que utilizan el bicarbonato y sulfato, producto del  $\text{CO}_2$  (g) y de la oxidación de  $\text{H}_2\text{S}$  (g), respectivamente y así removerlos del biogás (Fernández, 2004).

Al igual que el proceso metabólico anterior, el ácido sulfhídrico puede ser oxidado a azufre elemental o hasta sulfato, pero en presencia de pequeñas cantidades de oxígeno, por organismos microaerófilos (Madigan et al., 2006). Sin embargo estas bacterias pueden oxidar directamente  $\text{H}_2\text{S}$  a sulfato lo cual genera mayor cantidad de energía, reacción (11) (González, 2006).

*Thiobacillus denitrificans*, microorganismo facultativo utiliza nitrato, en vez de oxígeno, como aceptor de electrones, mediante las siguientes reacciones (Madigan et al., 2006).



En un estudio realizado por Kleerebezem y Méndez (2002) se vio una casi completa recuperación del nitrógeno presente en el biogás. Además se observó, debido a la degradación de sulfuro,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{S}^0$ , esta última estaría establecida por la carga de sulfuro. Por lo tanto bajas cargas de sulfuro generarían  $\text{SO}_4^{2-}$  y altas cargas provocarían acumulación de  $\text{S}^0$ , lo que reduciría el poder de remoción de la biomasa microbiana.

Estos metabolismos quimiolitotrofos no serían los más apropiados para el biofiltro porque requieren oxígeno, y el otro son desnitrificadores y producirían  $\text{N}_2$ , que contaminaría el biogás.

Los consorcios microbianos están presentes en la naturaleza y son comunidades de microorganismos interconectadas mediante señales moleculares. Cada comunidad realiza funciones específicas, las que aportan a la funcionalidad de la población (Brenner et al., 2008). La interacción de los distintos grupos de microorganismos, los cuales actúan secuencialmente y de mutua cooperación, conlleva a la degradación de polímeros y monómeros, que otros microorganismos utilizan como sustratos, la relación que existe lleva el nombre de sintrofia (O' Flaherty et al., 2006).

La sintrofia es la relación que se da entre dos o más organismos que cooperan, con el fin de degradar un sustrato, que por sí solo, no sería posible (Madigan et al., 2006)

Otra característica de los consorcios es su aguante frente a variaciones en las condiciones medio ambientales, prolongando la vida y entregando estabilidad (Brenner et al., 2008), lo que potencia su funcionalidad.



## CAPITULO II: DESCRIPCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO BIOLÓGICOS DE PURIFICACIÓN DE BIOGÁS

Los diseños de biorreactores más utilizadas, son los biofiltros de lecho escurrido, los biolavadores y los biofiltros de lecho fijo (cuadro 3), (Etcharren, 2005).

Aunque todas estas técnicas operan bajo el mismo mecanismo, difieren en sus diseños, control de parámetros, flexibilidad de operación y en algunas características funcionales (Vergara *et al.*, 2003).

Una de las principales diferencias entre ellas es la presencia o ausencia de soporte, pudiendo ser orgánico, inorgánico o sintético y por lo tanto presencia o ausencia de una fase líquida móvil, además de la eficacia en el tratamiento de los distintos contaminantes a remover (Etcharren, 2005).

El funcionamiento entre ellos es muy similar. El gas a tratar es inyectado al birreactor donde los contaminantes gaseosos son transferidos a una fase líquida (biolavador o biofiltros de lecho escurrido) o sobre un soporte (biofiltros de lecho fijo). Dentro de este birreactor los microorganismos convierten los contaminantes en compuestos menos tóxicos, los que se sitúan en el material de soporte, donde se forma una biopelícula. Estos microorganismos pueden encontrarse inmovilizados o dispersos y el estado de la fase acuosa puede ser móvil o estacionaria (González, 2006)

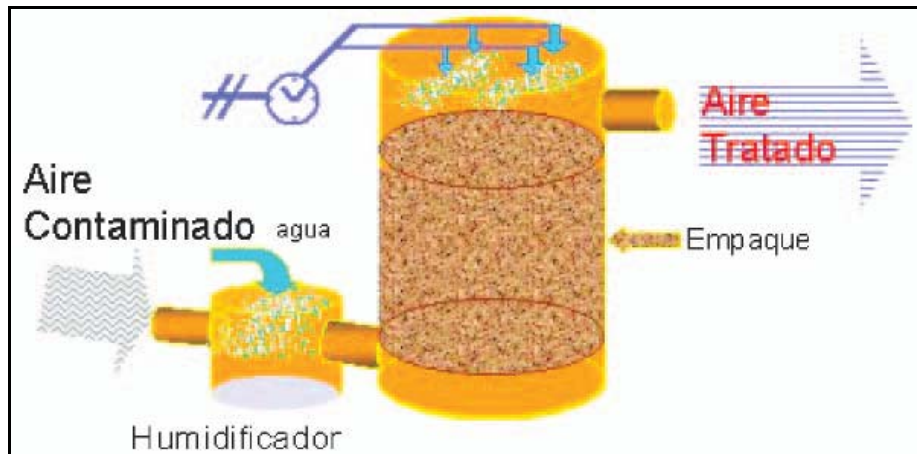
Cuadro 3: configuraciones de reactor en purificación de gas contaminado.

<b>Diseño de reactor</b>	<b>Fase móvil</b>	<b>Soporte</b>	<b>Biomasa activa</b>
Biolavador	Líquida y gas	Ninguno	Dispersa
Biofiltro lecho escurrido	Líquida y gas	Sintético	Fija
Biofiltro lecho fijo	Gas	Orgánico/ sintético	Fija

Fuente. Etcharren, 2005.

### Biofiltros de lecho fijo (BLF)

Figura 4: Biofiltros de lecho fijo (BLF)



Fuente: Revah y Ortiz, 2004.

Como se observa en la Figura 4, los biofiltros de lecho fijo tienen como principal característica la ausencia de fase líquida o móvil, por lo tanto es una tecnología en la cual se usan microorganismos fijados a un medio poroso (lecho) con el fin de degradar contaminantes presentes en las corrientes de aire de salida de procesos Environmental Protection Agency (EPA, 2004).

Los microorganismos crecen, formando parte de una capa llamada biopelícula, adherida a la superficie del medio. Cuando la corriente de aire contaminado pasa a través del lecho, los contaminantes solubles, debido al gradiente de concentración que presentan la fase gaseosa y la biopelícula. De esta forma, la biomasa activa utiliza como fuente de nutrientes y/o energía los contaminantes, degradándolos (Etcharren, 2005).

En los biofiltros, el tipo de biorreactor más común, por lo general se emplean lechos o material de empaque, fabricados de materiales orgánicos (materiales cortados de parques y jardines, turba, corteza, astillas de madera o abono) Environmental Protection Agency (EPA, 2004). El material orgánico cumple la función es entregar soporte (medios sobre los cuales viven los microbios) y en algunos casos proporcionar nutrientes necesarios para los microorganismos (Ramírez, 2007b).

Comúnmente, en estos sistemas, la corriente de gas se pasa previamente por un humidificador con el fin de mantener la humedad del sistema (Ramírez, 2007b).

### Biolavadores (Bioscrubbers)

Esta tecnología está diseñada en base a dos etapas (Figura 5). En la primera (absorción) el contaminante a extraer es absorbido con agua en una torre de aspersión o columna. En la segunda (oxidación), la corriente líquida es tratada (Ramírez, 2007b), en un reactor biológico, de regeneración (Revah y Ortiz, 2004).

En la etapa de absorción, los contaminantes son transferidos a un medio acuoso hasta llegar a condiciones próximas a la saturación, el líquido proveniente de este proceso es recirculado al reactor biológico donde se lleva a cabo la oxidación por microorganismos, estos pueden encontrarse libres o inmovilizados. Luego de haber disminuido la concentración del contaminante en el líquido éste es reciclado al absorbedor. El líquido contiene nutrientes inorgánicos que sostienen una población microbiana estable. Cuando la concentración del contaminante es muy alta, es posible inyectar aire para completar la oxidación (Revah y Ortiz, 2004).

Figura 5: Biolavador

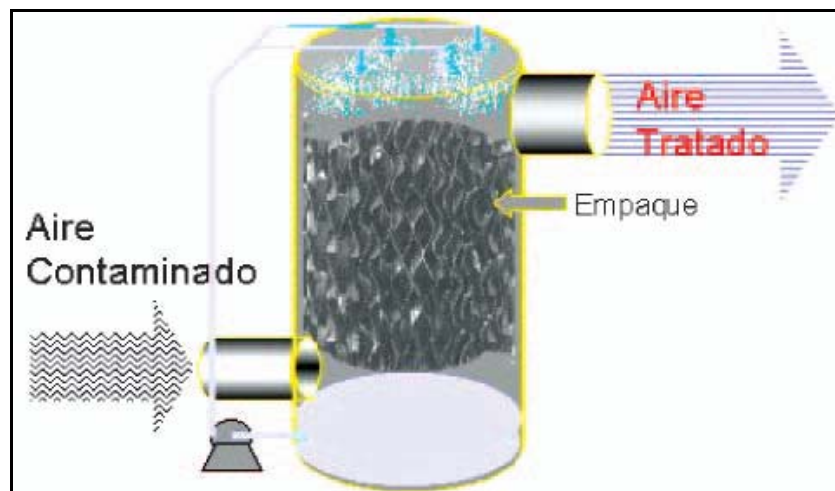


Fuente: Revah y Ortiz, 2004

### Biofiltros de lecho escurrido

Esta tecnología consiste en un biofiltro empaquetado con un soporte sintético, y es en éste donde se forma una película microbiana (Figura 6). La corriente de gas contaminado es inyectada en la parte inferior del biorreactor y atraviesa el lecho, al mismo tiempo por la parte superior se añade una solución recirculada encargada de aportar nutrientes, humedad, pH y eliminar los productos de degradación. Aquí la absorción de gases y degradación de contaminantes suceden dentro del mismo reactor (Ramírez, 2007b).

Figura 6: Biofiltros de lecho escurrido



Fuente: Revah y Ortiz, 2004.

En los filtros de escurrimiento los procesos de absorción de gases y regeneración de la fase líquida ocurren simultáneamente. Generalmente sus columnas se encuentran empaquetadas con un material generalmente de plásticos estructurados o aleatorios, el cual permite el desarrollo de una biopelícula, ayudando al aumento de la densidad celular volumétrica (Revah y Ortiz, 2004).

Por lo general el área específica del empaque (área de contacto por unidad de volumen de columna) es relativamente baja ( $100$  a  $300 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ) y se recomienda volúmenes vacíos altos (90 a 95%) para minimizar la caída de presión en la columna y el riesgo de que el espacio vacío sea obstruido por el crecimiento microbiano (Revah y Ortiz, 2004).

En los filtros de escurrimiento se alcanzan valores de densidad de microorganismos de hasta  $60 \text{ kg. SST m}^{-3}$  (sólidos suspendidos totales) lo que incrementa la eficiencia de remoción volumétrica (Revah y Ortiz, 2004).

Esta configuración de biorreactor es recomendada cuando se trabaja con compuestos de oxidación no son volátiles y existe acumulación en la fase líquida, como por ejemplo cuando se origina sulfato por la oxidación del sulfuro. Al existir acumulación disminuye el pH durante la degradación y en concentraciones altas son inhibitorios para los microorganismos (Revah y Ortiz, 2004).

Generalmente como soporte se utilizan materiales como polímeros, cerámicas, zeolita, carbón activo o mezcla de varios materiales (Ramírez, 2007b).

Cuadro 4: Ventajas y desventajas de los sistemas de biofiltración.

Tipo de biofiltro	Ventajas	Desventajas
Biofiltro de Lecho Fijo	Altas superficies de contacto gas-líquido. Fácil arranque y operación. Bajos costos de inversión. Soporta periodos sin alimentación. Conveniente para operación intermitente. No produce agua de desecho.	Poco control sobre fenómenos de reacción. Baja adaptación a altas fluctuaciones de flujo de gas.
Biolavador	Mejor control de la reacción. Posibilidad de evitar acumulación de subproductos. Equipos compactos. Baja caída e presión.	Baja superficie de contacto gas-líquido. No soporta periodos sin alimentación. Genera lodo residual. Arranque completo. Necesidad de aireación extra. Altos costos de inversión, operación y mantenimiento. Necesidad de suministrar nutrientes.
Biofiltro de Lecho Ecurrido	Control de concentración de sustratos. Posibilidad de evitar acumulación de subproductos. Equipos compactos. Baja caída de presión. Alta transferencia de oxígeno y del contaminante.	Baja superficie de contacto gas-líquido. Generación de lodos. No resiste periodos sin alimentación. Necesidad de suministrar nutrientes. Arranque complejo. Altos costos de inversión, operación y mantenimiento. Taponamiento por biomasa. Producción de agua de desecho. No conveniente para tratamiento de contaminantes cuyos subproductos son compuestos ácidos.

Fuente: Ramírez, 2007a.

### Diseño de la columna de aspersión

Dependiendo el caudal a tratar y la velocidad recomendada de ascenso de la corriente gaseosa que atraviesa el líquido se aspersión, se realiza el cálculo de las dimensiones de la columna (Etcharren, 2005).

Área de la sección transversal al flujo:

$$A = Q / V$$

Donde,

$A$ : Área de la sección transversal perpendicular al flujo de gas ( $m^2$ ).

$Q$ : Caudal de gas ( $m^3/h$ ).

$V$ : Velocidad de diseño del gas ( $m/s$ ).

Las velocidades de diseño recomendadas están entre de 3 – 1  $m/s$ , para aumentar el tiempo de contacto entre la fase líquida y gaseosa se sugiere la menor velocidad

Calculando el área de la sección transversal, podemos obtener el diámetro de la columna: (Etcharren, 2005).

$$D = \sqrt{\frac{4 \times A}{\pi}}$$

Donde,

$A$ : Área de la sección transversal perpendicular al flujo de gas ( $m^2$ ).

$D$ : diámetro de la columna

Respecto de estos antecedentes, la altura promedio de la columna de aspersión se calcula mediante la siguiente relación: (Etcharren, 2005).

$$\frac{L}{D_r} = 4$$

Donde,

$L$ : altura

$D_r$ : diámetro

Se tiene como antecedente que la proporción entre la longitud y el diámetro varía entre 3 y 6, para un equipo de contacto gas – líquido puede variar enormemente, al respecto,

proporciones altura/diámetro ( $L/D_r$ ) entre 3 y 6 son comunes para un equipo de contacto gas líquido (Etcharren, 2005).

### **Dimensionamiento y parámetros operacionales del biofiltros**

Se debe tener en cuenta las siguientes variables:

#### **Tiempo de residencia del gas en el biofiltro (EBRT)**

El tiempo de residencia del gas en el biofiltro (EBRT), del inglés: empty bed residence time), se define como el volumen de biofiltro dividido por el flujo de aire que ingresa (Ec.5). Los valores de EBRT pueden encontrarse tabulados en literatura, y dependen de las características y concentraciones del contaminante a tratar. Cuando estos valores son obtenidos a través de experimentación, se pueden utilizar para el cálculo de dimensiones (Etcharren, 2005; Ramírez, 2007a).

Donde,

$EBRT$ : Tiempo residencia (s).

$$EBRT = \frac{V_f}{Q}$$

$V_f$ : Volumen del lecho filtrante ( $m^3$ ).

$Q$ : Caudal de aire a tratar ( $m^3/s$ ).

#### **Tiempo de residencia real**

Este valor es menor que EBTR ya que considera dentro del calculo la porosidad del medio filtrante, por lo tanto el tiempo de contacto entre la fase gas y la fase sólida.

El tiempo de residencia real, es definido como el volumen total del lecho filtrante multiplicado por la porosidad del lecho del medio filtrante y dividido por el caudal de aire a tratar (Etcharren, 2005; Ramírez, 2007a).

Donde.

$\tau_r$ : Tiempo de residencia real (s)

$$\tau_r = \frac{V_f \times \theta}{Q}$$

$V_f$ : Volumen del lecho filtrante ( $m^3$ )

$\theta$ : Porosidad o volumen de espacios vacíos/volumen del lecho (adimensional).

$Q$ : Caudal tratado ( $m^3/s$ )

### Cálculo de cargas (superficial y volumétrica)

Los términos de carga volumétrica y superficial se utilizan para determinar la cantidad de gas que será purificado, los términos son normalizados, esto permite su comparación entre reactores de diferentes tamaños. Estos valores corresponden al volumen de gas a tratar por unidad de volumen o área de medio filtrante en una unidad de tiempo (Etcharren, 2005).

Donde.

$C.V.$  : Carga volumétrica ( $m^3/m^3$  hr).

$$C.V. = \frac{Q}{V_f}$$

$C.S.$  : Carga superficial ( $m^3/m^2$  hr).

$Q$  : Caudal de gas ( $m^3/hr$ ).

$A$  : Área del biofiltros ( $m^2$ ).

$$C.S. = \frac{Q}{A}$$

$V_f$  : Volumen del biofiltros ( $m^3$ ).

### Carga másica de contaminante

Los valores calculados anteriormente ( $C.S.$  y  $C.V.$ ) representan la masa de contaminante que ingresa al biofiltro por unidad de área o volumen de material filtrante por unidad de tiempo (Etcharren, 2005; Ramírez, 2007a).

$$CM_s = \frac{Q \times C_{Gi}}{A}$$

Donde.

$CM_s$  : Carga másica superficial ( $gr/m^2$  hr)

$$CM_v = \frac{Q \times C_{Gi}}{V}$$

$CM_v$  : Carga másica volumétrica ( $gr/m^3$  hr).

$C_{Gi}$  : Concentración de entrada del contaminante ( $gr/m^3$ )

$A$  : Área del biofiltros ( $m^2$ ).

$V$  : Volumen del biofiltros ( $m^3$ ).



### Eficacia de eliminación

La eficiencia de eliminación (ER): parámetro operacional que evidencia cual eficaz es el biorreactor en términos de eliminación de contaminantes y es la fracción de contaminante removido por el biofiltro, expresado en porcentaje

$$ER = \left( \frac{C_{Gi} - C_{Go}}{C_{Gi}} \right) \times 100$$

Donde,

$ER$ : Eficacia de eliminación (%)

$C_{Go}$ : Concentración de salida del contaminante ( $\text{g/m}^3$ )

$C_{Gi}$ : Concentración de entrada del contaminante ( $\text{g/m}^3$ )

### Capacidad de eliminación del contaminante

La capacidad de eliminación ( $EC$ ), es la masa de contaminante degradada por unidad de volumen de material filtrante por unidad de tiempo. Las unidades típicas para este parámetro son gramos de contaminante por  $\text{m}^3$  de material filtrante por hora.

$$C.E. = \frac{(C_{Gi} - C_{Go}) \times Q}{V_f}$$

Donde,

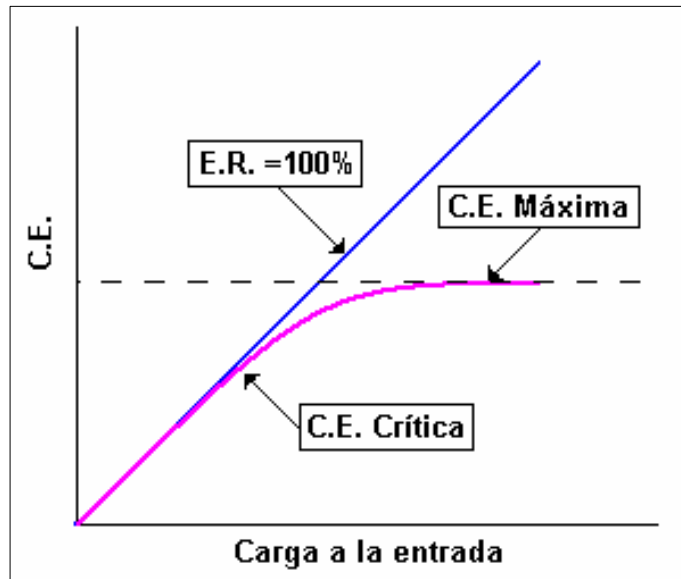
$C.E.$ : Capacidad de eliminación el contaminante ( $\text{g/m}^3 \text{ hr}$ ).

$C_{Gi}, C_{Go}$ : Concentraciones de entrada y salida del contaminante respectivamente ( $\text{g/m}^3$ )

$Q$ : Caudal tratado ( $\text{m}^3/\text{hr}$ )

$V_f$ : Volumen de medio filtrante ( $\text{m}^3$ )

Figura 7: Relación que existe entre la capacidad de eliminación (EC) y carga a la entrada (CE)



Fuente: Ramírez, 2007a.

En el gráfico anterior se muestra la relación que existe entre la carga de entrada y la capacidad de eliminación. Desde aquí podemos inferir que:

- La capacidad de eliminación es igual o menor que la carga del contaminante a la entrada.
- Si la carga de contaminante a la entrada es baja, la EC es igual a la carga, aquí el sistema tiene una eficiencia de remoción del 100 %.
- A medida que aumenta la carga, se llega a un punto donde se supera la EC, por lo tanto la ER es menor al 100 %, este punto se llama capacidad de eliminación crítica. Hasta este punto la ER depende del aumento en la concentración del contaminante y del EBRT y está limitado por la difusión.

Existe un punto llamado capacidad de eliminación máxima (CE máx.), y se obtiene al aumentar la (CE), la limitante aquí es capacidad de los microorganismos para degradar los contaminantes (Ramírez, 2007a).

### Características de la transferencia de masa del sistema

El tratamiento biológico de gases, generalmente se define como la absorción física del gas contaminante a una fase acuosa, seguido por el consumo de los compuestos biodegradables (González, 2006).

El flujo másico de un contaminante gaseoso por unidad de volumen de lecho hacia una fase acuosa es descrito por la ecuación 1 (González, 2006):

$$(J a) = K_L a \left( \frac{C_g}{H} - C_l \right)$$

Ecuación 1

Donde.

$(J a)$ : flujo másico de un contaminante gaseoso por unidad de volumen de lecho hacia una fase acuosa (mol m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup>).

$K_L a$ : coeficiente volumétrico global de transferencia de masa basado en las concentraciones en la fase líquida (h<sup>-1</sup>).

$C_g$  y  $C_l$  son las concentraciones en los senos de la fase gas y líquida respectivamente (mol m<sup>-3</sup>).

$H$ : valor de la constante de Henry para ese contaminante ([mol m<sup>-3</sup>] gas/ [mol m<sup>-3</sup>] líquido)

El transporte de gas desde la corriente a la fase acuosa, es gracias a la fuerza motriz que se origina gracias a la diferencia de concentraciones entre las fases gas y líquida, esta fuerza dependerá de la  $H$  del contaminante a remover, por lo tanto a mayor solubilidad del contaminante, mayor será la fuerza motriz y mayor la transferencia de masa (González, 2006).

$C_l$  depende de la velocidad de biodegradación del contaminante a remover, este valor depende directamente de la población microbiana dentro del biorreactor. Si  $C_l$  tendiera a cero, se puede pensar que el proceso de eliminación estar limitado por transporte, si no, la limitante puede ser la reacción biológica (González, 2006).

La velocidad de reacción biológica es expresada en la ecuación 2 (González, 2006).

Donde:

$(r_i)$ : velocidad de la reacción biológica

$X$ : concentración de la biomasa

$\mu$ : velocidad específica de crecimiento microbiano

$Y_{X/S}$ : coeficientes de rendimiento biomasa/sustrato

$m$ : mantenimiento

$$r_i = \mu \frac{X}{Y_{X/S}} + mX$$

Ecuación 2

Si se asume que la velocidad de crecimiento microbiano es acorde con la expresión de Monod,  $\mu$  queda definida para la oxidación biológica de sulfuro por la ecuación 3, para una doble limitación por sustrato (S y O) e inhibición por S. (González, 2006).

$$\mu = \mu_{\max} \left( \frac{O_2}{K_O + O_2} \right) \left( \frac{S}{K_S + S + (S^2 / K_{S_i})} \right)$$

Ecuación 3

Donde:

$\mu_{\max}$ : velocidad máxima específica de crecimiento de los microorganismos (h<sup>-1</sup>).

$O_2$  y  $S$  son los sustratos disueltos (limitantes para el crecimiento microbiano) (mmol L<sup>-1</sup>).

$S$ : concentración de HS<sup>-</sup>.

$O_2$ : concentración de O<sub>2</sub>.

$K_O$  y  $K_S$ : constantes de saturación (mmol L<sup>-1</sup>).

$K_{S_i}$ : constante de inhibición del sustrato S (mmol L<sup>-1</sup>).

De la ecuación 1-6 se concluye que los procesos biológicos de degradación están limitados por la tasa máxima de crecimiento  $\mu_{\max}$ . Se debe cumplir que  $O_2 \gg K_O$  y  $K_S < S < K_{S_i}$ , ya que si no la velocidad específica de crecimiento ( $\mu$ ) disminuye. Esto se debe a la falta en el control de la transferencia de oxígeno al medio líquido en relación a las cantidades de S alimentadas, que ayuda al agotamiento o la acumulación de S. El transporte del gas contaminante y del oxígeno a la fase líquida son los factores limitantes en estos procesos. El transporte interfacial obedece a la solubilidad del gas en el líquido, al área específica interfacial, grado de mezclado y actividad microbiana. Por lo tanto, según estos parámetros

se selecciona la proporción más favorable, dada las necesidades y características de la corriente gaseosa a purificar (González, 2006).

### **VARIABLES QUE AFECTAN LA OPERACIÓN Y EFICIENCIA DE UN BIORREACTOR**

VARIABLES QUE INFLUYEN EN LA CAPACIDAD DE ELIMINACIÓN DEL CONTAMINANTE.

- Selección adecuada del medio filtrante (soporte)
- Temperatura
- Humedad del lecho
- Caída de presión
- Selección de los microorganismos adecuados
- pH o acidez
- Presencia de compuestos tóxicos o inhibitorios que pudieran ingresar en la corriente contaminada.

#### **SELECCIÓN DEL MEDIO FILTRANTE O MATERIAL DE RELLENO**

El medio filtrante es el encargado de entregar soporte apropiado para el desarrollo de los microorganismos, debe permitir que el aire circule fácilmente, además debe cumplir con propiedades ineludibles (Etcharren, 2005). Los materiales pueden ser orgánicos, sólidos inorgánicos naturales o sintéticos. Ciertos lechos, especialmente sintéticos, amortiguan cambios de pH (Ramírez, 2007a).

Las variables operacionales más importantes son el pH, gradiente de presión y contenido de humedad, esta última determina el importe de contaminante y la vida de los microorganismos, por lo tanto si el soporte no posee buena retención de humedad el sistema no funcionara exitosamente. Diana. La capacidad de retención de agua, debe encontrarse entre el 40 y un 80 % de masa (Etcharren, 2005).

La porosidad del lecho debe ser homogénea, entre el 40 y el 80% (Etcharren, 2005). Esto garantiza una gran superficie específica para la proliferación de la biopelícula y transferencia de masa del contaminante (Ramírez, 2007a).

El pH se sugiere que sea Neutro (Etcharren, 2005), pero se debe tener en cuenta el pH del cual dependen los microorganismos que se utilizaran. Para bacterias sulfoxidantes se utiliza frecuentemente valores entre 6 y 8 (Ramírez, 2007a).

Otros factores a tener en cuenta son la alta resistencia a la compactación, presencia de nutrientes inorgánicos como N, P, K y S, alto contenido de materia orgánica, entre el 35 y 55 %. y alta concentración de microorganismos (Etcharren, 2005).

Los lechos o soportes más utilizados son los orgánicos (turba, compost, estiércol, chips de madera, lodos digeridos de plantas de tratamiento, aserrín de corteza). Los soportes inorgánicos (carbón activo y perlita) y sintéticos (anillos de polipropileno y espumas de poliuretano), también han sido efectivos (Etcharren, 2005).

Se ha utilizado vermiculita como material de soporte, y ha demostrado que sus propiedades (área interfacial, tamaño de partícula y capacidad de retención de agua) favorecen el uso en biofiltros. Otro material evaluado es el tezontle, este posee pH alto, por lo tanto funciona como amortiguador para contaminantes ácidos. Otros materiales para purificar gases con azufre son: piedra volcánica, turba, viruta, carbón activado y compost (Ramírez, 2007a).

Cuadro 5: Resumen de las propiedades importantes de medios de soportes.

Parámetro	Compost	Turba	Suelo	Carbón activo, perlita	Material sintético
Densidad poblacional de microorganismos	Alta	Media-baja	Alta	Ninguna	Ninguna
Área superficial	Media	Alta	Baja - Media	Alta	Alta
Permeabilidad al aire	Media	Alta	Baja	Media-alta	Muy alta
Contenido de nutrientes asimilables	Alta	Media-alta	Alta	Ninguna	Ninguna
Absorción de contaminantes	Media	Media	Media	Alta	Alta
Tiempo de vida útil	2-4 años	2-4 años	>30 años	>5 años	>15 años
Costo	Bajo	Bajo	Muy bajo	Medio-alto	Muy alto

Fuente. (Etcharren, 2005).

### Efecto de la presión

La caída de presión dentro de un biofiltro debe ser disminuida al máximo, ya que si aumenta, la potencia del soplador también debe aumentar, además de influir en el movimiento del gas dentro del biofiltros. Si existe alto porcentaje de humedad en el soporte y el tamaño de los poros es pequeño, también aumentara la caída de presión. Estos son variables críticas que determinaran el exitoso funcionamiento y la demanda energética requerida para el proceso. Se sugiere que la altura del biorreactor y la corriente no sean altas (Etcharren, 2005).

### **Contenido de humedad**

El rango de humedad óptimo para el funcionamiento del biofiltro está entre el 40– 60 %. Un exceso de esta provocara que los poros se llenen de agua, por lo tanto habrá dificultades en la transferencia de oxígeno, ya que se reducirá la interfase aire/agua por unidad de volumen de la biopelícula. Además existirán zonas anaeróbicas que provocaran una baja en las velocidades de degradación. Los nutrientes serán arrastrados, esto formará residuo. Por otra parte si existe un déficit de humedad, dependiendo el nivel, esto puede ocasionar desde la desactivación de los microorganismos, hasta su muerte (Etcharren, 2005).

### **Microorganismos**

Los microorganismos que actuarán dentro de un biofiltro determinaran las condiciones que se deben entregar para degradar los contaminantes de la corriente gaseosa. Por ejemplo si se utiliza organismos fototrofos, el material de construcción deberá permitir el ingreso de luz solar, al interior del biofiltros, caso contrario para los organismos quimiotrofos.

### **Efecto de la temperatura**

Se debe ajustar a las necesidades de los microorganismos a utilizar, los que por lo general son mesófilos (entre 15 - 41 °C) (Alcántara, 2000).

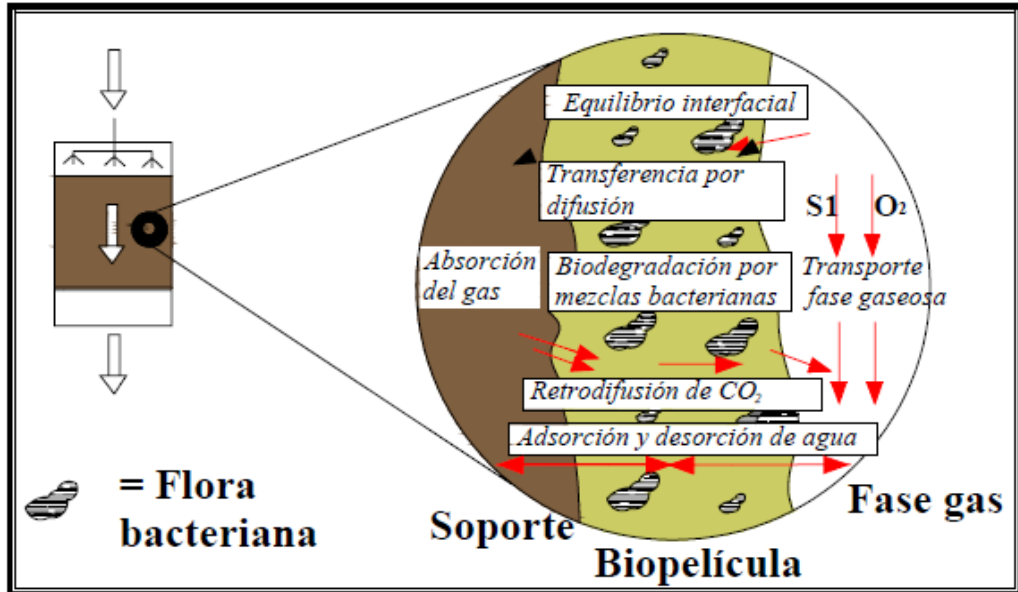
### **Biopelícula**

La biopelícula establece una vía de canalización para las distintas relaciones que deben existir entre el gas y el soporte. Por lo general es masa de gel polisacárido (figura 4) y es aquí donde los microorganismos realizan sus actividades metabólicas.

Es aquí donde un químico en su fase gaseosa ( $S_1$ ,  $O_2$ ), cruza la interfase y se difunde en la biopelícula hacia un conjunto de microorganismos arraigados. Aquí es donde ocurren los procesos de oxido-reducción o los metabolizaran a través de encimas, con el fin de obtener energía. Además ocurre la transmisión de nutrientes.

Conviene tener en cuenta otros factores que decidirán cual es la tecnología óptima, dependiendo directamente de la composición química de la corriente a purificar, entre las que se encuentran: biodegradabilidad del contaminante, concentración del contaminante, temperatura de descarga y compuestos tóxicos presentes en el gas a tratar.

Figura 8: corte longitudinal de un biorreactor



Fuente: Etcharren, 2005.



### **CAPÍTULO III: ANÁLISIS CRÍTICO Y ANALÍTICO SOBRE LAS DISTINTAS METODOLOGÍAS BIOLÓGICAS PARA LA PURIFICACIÓN DE BIOGÁS.**

El tratamiento biológico de corrientes gaseosas ha adquirido mayor relevancia frente a tecnologías convencionales durante los últimos veinte años, pero se tiene como antecedente que se conocen desde el año 1920 (Etcharren, 2005).

Hoy en día, las tecnologías biológicas, se muestran como una nueva opción debido a su amplia gama de aplicaciones, además de constituir un componente clave en diferentes industrias: instalaciones de compostaje, plantas de tratamiento de aguas residuales, industria alimenticia, producción animal y otras fuentes de COV's y olores. que emiten corrientes gaseosas contaminantes, las que requieren un pre-tratamiento, antes de ser lanzadas a la atmosfera (Alcántara, 2000).

Estas tecnologías se han utilizado además para el control de compuestos inorgánicos volátiles (CIVs), como el sulfuro de hidrógeno y otros compuestos reducidos de azufre (Etcharren, 2005).

La eficacia de estas tecnologías radica principalmente en la elección apropiada de las distintas variables, ya que en ellas esta basado su éxito. Siendo las más relevantes: los parámetros de operación y la elección del material de soporte (Barona *et al.*, 2004), ya que estos son los responsables de entregar las condiciones necesarias para los microorganismos, encargados de purificar el biogas.

El soporte puede ser un material relativamente inactivo, debe tener una alta superficie específica y en algunos casos proveer de nutrientes adicionales. (Ramírez, 2007a). En el caso de los biofiltros de lecho fijo, este es un factor ineludible, ya que carecen de fase líquida, por lo tanto el soporte es el encargado de suministrar los macronutrientes necesarios para los microorganismos Environmental Protection Agency (EPA, 2004).

Asimismo mantiene las condiciones para intervalos sin alimentación de contaminantes, Ramírez (2007a). También cumple la función de fijación de biomasa (Ramírez, 2007b). Por estas razones se escoge lechos orgánicos, debido a sus características, estos deben ser reemplazados cada 2 a 5 años, dependiendo del soporte escogido Environmental Protection Agency (EPA, 2004). Sin embargo la operación y características de los materiales de empaque pueden reducir o aumentar este rango (Revah y Ortiz, 2004).

La profundidad del lecho es de 50 a 120 cm también depende de esta variable (Revah y Ortiz, 2004).

En los filtros biológicos el material de empaque o relleno (soporte orgánico) puede ser turba, compost, tierra, etc., (Ramírez, 2007b). También se utilizan desechos de madera, turba, residuos de caña, cáscaras de maní, etc. (Revah y Ortiz, 2004). En ocasiones se

añaden materiales sintéticos para disminuir la pérdida de carga y como soporte de material orgánico (Ramírez, 2007b). Los que favorecen las propiedades mecánicas del lecho (Revah y Ortiz, 2004).

En los sistemas (biológicos), al igual que las oxidaciones (incineración y catalítica) los gases contaminantes son transformados, por lo tanto no se requiere tecnologías adicionales (Revah y Ortiz, 2004).

Es relevante destacar que la remoción de gases contaminantes en biorreactores, es exitosa para compuestos solubles, de bajo peso molecular y estructuras de enlace simples, ya que los compuestos con estructuras de enlace complejas habitualmente necesitan una mayor energía para ser degradados, la que no siempre esta disponible por los microorganismos (González, 2006).

En la remoción de  $H_2S$  la biomasa generada por el proceso no contiene patógenos, además el sulfato generado es un químico sin mayor riesgos, este puede ser separado a través del proceso biológico (sulfato-reducción anaeróbico) o químicamente a través de precipitación con cal (González, 2006).

Los procesos biológicos tienen la particularidad de ser lentos y actúan eficientemente con corrientes gaseosas con bajas concentraciones de contaminantes, para el caso del  $H_2S$  hasta 3% vol. (González, 2006).

En estos equipos se logran conseguir tasas de degradación mayores a 200 g  $m^{-3}$  reactor h<sup>-1</sup> (Revah y Ortiz, 2004).

### **Ventajas y desventajas de las tecnologías de purificación de biogas, de acuerdo al diseño y funcionamiento**

#### **Biofiltros de lecho fijo (BLF)**

Esta configuración al no poseer fase móvil, es apropiada para tratar contaminantes de baja solubilidad en agua. Se utiliza en compuestos con constantes de Henry menores de 10 y concentraciones menores de 1 g  $m^{-3}$  (Ramírez, 2007b).

Esta tecnología al no poseer fase móvil, la biopelícula se forma sobre el soporte, esto entorpece el control del ambiente interno del biofiltros. Además, se debe mantener la humedad del sistema a través de irrigación directa (Ramírez, 2007a). Sin embargo, la adición interrumpida de agua, medio nutritivo o neutralizante, mantiene controlada la humedad, conservándola menor a su capacidad de campo, así proporcionando a los microorganismos las condiciones ambientales necesarias (Revah y Ortiz, 2004).

Los soportes orgánicos normalmente poseen minerales necesarios para alimentar a los

microorganismos, pero la adición controlada de nutrientes y agua tiene un efecto estimulante. Se tienen antecedentes de sistemas donde la biopelícula estacionaria puede ser controlada (Revah y Ortiz, 2004).

Debido a su diseño existe poco control sobre fenómenos de reacción, baja adaptación a altas fluctuaciones de flujo de gas y altas superficies de contacto gas-líquido (Ramírez, 2007).

La dificultad de control de pH al tratar contaminantes que generan productos ácidos, taponamiento generado por el exceso de biomasa y grandes requerimientos de espacio (Etcharren, 2005).

Otras características que distinguen a los biofiltros de lecho fijo de los otros dos sistemas, son la facilidad en su puesta en marcha y la resistencia a los períodos sin alimentación de contaminante, gracias a la naturaleza del soporte (Etcharren, 2005).

### **Biolavadores**

Esta tecnología posee fase móvil o líquida, son equipos compactos, por lo tanto baja caída de presión. Existe un mejor control de la reacción, a su vez evita la acumulación de subproductos y consecuentemente la eliminación de posibles efectos inhibitorios (Ramírez, 2007a; Ramírez, 2007b).

Una ventaja de los biolavadores, con respecto a otros sistemas, es que la fase acuosa permite el control de temperatura, pH y adición de nutrientes en el proceso (Ramírez, 2007b).

En los Biolavadores los microorganismos son parte de la fase móvil, lo que deriva en densidades celulares menores que en los filtros de escurrimiento (Revah y Ortiz, 2004). Además de restringirse a compuestos con constantes de Henry menores a 0,01 y a concentraciones menores a 5 g m<sup>-3</sup>. Por lo tanto estos sistemas son apropiados cuando el contaminante es altamente soluble en agua, dada la necesidad de la transferencia del contaminante de la fase gas a la líquida (Ramírez, 2007b).

Como desventaja, su diseño entrega una baja superficie de contacto entre el gas y el líquido (área específica), no soporta periodos sin alimentación, necesita de aireación y nutrientes extras (Ramírez, 2007a).

Adelantos en tecnologías asociadas al tratamiento biológico basados en el mecanismo de membranas (separación selectiva), ha puesto a disposición nuevos sistemas que captarían los contaminantes, para luego ser separados y destruidos por la biopelícula, formada el otro lado de la pared. Estos sistemas podrían disminuir algunos de los principales problemas de la biofiltración como taponamiento, el control de las condiciones microbianas, la formación de canales, etc. (Revah y Ortiz, 2004).

**Biofiltros de lecho escurrido (BLE)**

Al igual que los biolavadores posee fase móvil, por lo tanto sus propiedades son similares a los biolavadores (equipos son compactos, control sobre concentración de sustratos, se evita la acumulación de subproductos, baja caída de presión y una alta transferencia de oxígeno y de contaminante. A su vez también coinciden en las desventajas, con respecto a la eliminación de contaminantes (baja), ya que existe baja superficie específica entre la corriente gaseosa y el líquido, la alimentación no se debe interrumpir, necesita nutrientes extras, su arranque es complejo, podría existir taponamiento por biomasa. Se sugiere no utilizar para remover contaminantes, donde los productos de las reacciones, son ácidos (Ramírez, 2007a).

## **CAPÍTULO IV: COMPARACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE PURIFICACIÓN DE BIOGÁS, EN BASE A EFICIENCIA, COSTOS Y CUIDADO CON EL MEDIO AMBIENTE**

### **Fisicoquímicos**

Los métodos fisicoquímicos se caracterizan en general por tener altas eficiencias de eliminación, pero a expensas de un alto costo de inversión inicial y mantenimiento, pero con la desventaja que los contaminantes solo son transferidos de una fase a otra, lo que genera contaminantes secundarios, que es necesario disponer utilizando otro tratamiento. Además los métodos convencionales demandan altos consumos de químicos y tienen altos requerimientos de energía y mantención que finalmente encarecerán su costo global (Etcharren, 2005). Debido a esto, en los últimos años se está realizando especial hincapié en el desarrollo de métodos basados en la biotecnología, como biofiltros, *bioscrubbers* y *biotricklingfilters*, tratándose de alternativas de menor costo y elevada eficiencia en los que el H<sub>2</sub>S se degrada hasta azufre elemental o sulfato mediante la acción de microorganismos (Pérez et al., 2008)

Los procesos de tratamiento fisicoquímicos son poco eficientes cuando son aplicados a corrientes gaseosas de altos flujos con bajas concentraciones de H<sub>2</sub>S (González, 2006).

### **Absorción**

Como se ha observado la mayoría de los métodos basados en procesos de absorción se apoyan en la utilización de reactivos químicos; lo que dificulta su aplicación en países que no los produzcan; pues los costos de adquisición de los absorbentes y antiespumante serían altos, por lo que resultan tecnologías muy costosas. Por otra parte, cuando el clima es muy húmedo provoca, la rápida oxidación y deterioro de los compuestos de hierro, haciendo ineficiente la metodología de purificación que los usa. Debido a los altos costos de la mayoría de estas soluciones, este método de purificación se utiliza, fundamentalmente, en grandes instalaciones de producción de biogás,  $\geq 15\ 000\ \text{m}^3/\text{d}$ , en países productores de dichas sustancias (Fernández, 2004).

### **Adsorción**

Como se ha explicado, los métodos de purificación por adsorción son muy efectivos y reducen las cantidades de contaminantes hasta los niveles requeridos pero, el empleo de cualquiera de los tres adsorbentes mencionados, es decir, carbón activado, sílicagel y tamices moleculares, tiene como limitante fundamental para los países en vías de desarrollo su elevado costo en los mercados especializados (Fernández, 2004).

Además de ser procesos con altos costos de operación (energía, materiales), se producen contaminantes secundarios como el  $\text{SO}_2$  en la combustión del  $\text{H}_2\text{S}$ . Como ventaja podemos considerar que el de azufre, en el caso del uso del proceso Claus, puede ser recuperado. (González, 2006 y Llaneza *et al.*, 2010).

En el caso de soluciones alcalinas, la principal ventaja, es su disponibilidad y relativo bajo costo las disoluciones de carbonato o de hidróxido de sodio, potasio y calcio son muy utilizadas. Además los problemas de corrosión y formación de espuma lo hacen menos costoso. Sin embargo, el agente antiespumante hace que el equipamiento y la operación sean más complicados. Este método presenta un elevado consumo de energía para el bombeo de la solución y de los gases (Llaneza *et al.*, 2010).

### **Membranas**

Estos sistemas son caros y generalmente se consideran no adecuados para aplicaciones a pequeña escala, aunque se han obtenido buenos resultados en estudios a nivel piloto usando membranas de poliamida y acetato de celulosa las que demostraron ser efectivas en la remoción de  $\text{CO}_2$  (g) y  $\text{H}_2\text{S}$  (g) del biogás (Fernández, 2004). Los equipos y la operación de este método son simples, sin embargo, la eficiencia es baja y el costo de la misma elevado, además hay que aplicar elevadas presiones. Sin embargo, es una tecnología en constante crecimiento e innovación por lo que no se puede descartar su uso a medio plazo (Llaneza *et al.*, 2010).

### **Oxidaciones**

Las unidades de control térmico y catalítico consumen grandes volúmenes de combustible Environmental Protection Agency (EPA, 2004).

Al ser incinerado o liberado a la atmósfera, lleva a formación de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), materia particulada, dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), y  $\text{CO}$  que es otro contaminante tóxico y un importante promotor de la lluvia ácida en la atmósfera (Gaete, 2007; Llaneza *et al.*, 2010).

### **Biológicos**

Los biorreactores utilizan únicamente cantidades pequeñas de energía eléctrica para conducir dos o tres motores pequeños. Normalmente, los biorreactores no requieren mano de obra a tiempo completo, y los únicos suministros operativos necesarios son pequeñas cantidades de macronutrientes Environmental Protection Agency (EPA, 2004).

El éxito de la biofiltración se debe entre otras razones, al bajo costo de capital y de operación frente a los sistemas de tratamiento convencionales, a los requerimientos bajos de energía y alta eficacia de eliminación del contaminante. Una de las ventajas más importantes de este tipo de tratamientos sobre los procesos físico químicos es que pueden llevarse a cabo a temperatura ambiente (organismos mesófilos) (10 – 40 °C) y a presiones atmosféricas, así, el consumo de energía es mínimo y por lo tanto presentan bajos costos operacionales. Junto a esto, los procesos biotecnológicos transforman los contaminantes a sustancias menos peligrosas como agua,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$ , sin la acumulación de subproductos de difícil manejo que deban ser tratados con tecnologías adicionales (Etcharren, 2005; Llaneza *et al.*, 2010).

La biofiltración representa una alternativa económicamente factible y que no genera contaminantes secundarios para el tratamiento de biogás (Ramírez, 2007a).

La naturaleza del soporte influye tanto en la eficiencia como en los costos de operación del biofiltro, por lo que es de suma importancia considerar las propiedades de este. Ciertos lechos, especialmente sintéticos, amortiguan cambios de pH, esto disminuye costos de operación y ayuda a hacer más eficiente los biofiltros (Ramírez, 2007a).

Biofiltros de lecho fijo (BLF) son de bajos costos de inversión y no produce agua de desecho, al contrario de los BLE. Los biolavadores y biofiltros de lecho escurrido Genera lodo y agua residual, poseen altos costos de inversión, operación y mantenimiento (Ramírez, 2007a).

La biorreacción es un proceso "verde o tecnologías limpias," mientras que los enfoques tradicionales no, ya que no generan contaminantes ni ningún residuo peligroso menor uso en energía, no adicionan sustancias peligrosas, y no requieren condiciones extremas de trabajo Environmental Protection Agency (EPA, 2004).

Por el uso de condiciones ambientales suaves características de los procesos biológicos, estos tienen un atractivo nicho de aplicación en la eliminación de contaminantes, por lo tanto además de ser tecnologías de bajos costos, existe un menor impacto al medio ambiente (González, 2006).

El costo de los tratamientos biológicos es muy variable llegando a ser entre 3 a 10 veces inferior a las tecnologías de tipo convencional. Por otro lado, los tratamientos biológicos ofrecen altas eficiencias de eliminación del contaminante (> 90%) (Etcharren, 2005).

En general los procesos fisicoquímicos requieren de altos flujos de energía. Sin embargo, no es este el único factor que se considera para su aplicación o sustitución por un proceso biológico. Entre los factores que se pueden considerar pueden citarse: el costo, la concentración de contaminante y la factibilidad biológica. Si se cuenta con los organismos

vivos que puedan oxidar los compuestos de azufre de interés, entonces queda a consideración el costo de su aplicación. En este sentido, se ha observado que en bajas concentraciones de contaminantes los procesos biológicos presentan ventaja económica y de eficiencia de eliminación (Alcántara, 2000).



## CONCLUSIÓN

Existen en la naturaleza microorganismos que debido al metabolismo presente en ellos, adquieren su fuente de energía al oxidar  $H_2S$  y fijar  $CO_2$ , por lo tanto es viable encontrar y perfeccionar una tecnología capaz de sostener un consorcio microbiano que los contenga, y diseñar un biorreactor capaz de remover estos contaminantes del biogas mejorando su calidad y poder calorífico.

Los microorganismos presentes en la naturaleza, brindan la posibilidad de realizar procesos que hasta hoy, eran llevados a cabo a través de metodologías obsoletas, con gran impacto ambiental y costos asociados a su implementación y funcionamiento. Si tomamos en cuenta que se requiere solamente, entregar las condiciones ambientales necesarias para que ellos vivan, y éstas son similares a las presentes en el ambiente, además que se requiere un muy bajo nivel de energía adicional para que estos sistemas funcionen, estamos frente a una gran ventaja frente a lo que hasta hoy se ha utilizado.

Los métodos biológicos de purificación mediante biofiltros, empleando diferentes especies de microorganismos son capaces de remover sustancias contaminantes desde corrientes gaseosas. Mediante el metabolismo presente en ellos, las sustancias dañinas son transformadas en compuestos de fácil eliminación y no dañinos para el medio ambiente.

Los factores que influyen en el diseño de una planta purificadora son diversos, ya que esto depende directamente de la naturaleza de la materia orgánica que da origen a este gas, la que influye directamente en los porcentajes que se presentan los distintos gases (concentraciones), hasta los costos de implementación, por lo tanto es necesario que cada caso se tome por separado, dada la diversidad de microorganismos presentes y condiciones ambientales de la zona a implementar, ya que mientras menos sean las condiciones forzadas, menores serán los costos.

Por lo tanto es necesario evaluar detenidamente la ingeniería de cada planta de purificación, antes de la elección de la tecnología a implementar, ya que en función de su aplicación, serán los valores aceptables para ácido sulfhídrico, presente en el biogás.

Consecuentemente un método de purificación que utilice microorganismos implica una baja inversión y resultaría ambientalmente inocuo.

## BIBLIOGRAFIA

Alcántara, S. 2000. Estudio de la oxidación biológica de los compuestos reducidos de azufre utilizando un consorcio de microorganismos sulfoxidantes. Evaluación de los parámetros que determinan la oxidación parcial del tiosulfato en azufre elemental. Tesis Doctor en Ciencias Biológicas. Universidad Autónoma Metropolitana, México, DF. 138 p.

Álvarez, R., V. Riera y S. Villca. 2004. Producción anaeróbica de biogas aprovechamiento de los residuos del proceso anaeróbico. Universidad Mayor de San Andrés. Instituto de Investigaciones de Procesos Químicos – Proyecto 09 CNI-IIDEPROG. La Paz, Bolivia. 100 p.

Anuario, 2008. Un panorama de nuestro cambiante medio ambiente PNUMA. Nairobi, PNUMA, 2008. 1vol; 51pp.

Barona, A., A. Elías, R. Arias, I. Cano and R. González. 2004. Biofilter response to gradual and sudden variations in operating conditions. Review biochemical engineering journal (22): 25–31.

Brenner, K., L. You and F.H. Arnold. 2008. Engineering microbial consortia: a new frontier in synthetic biology. Review Trends in Biotechnology 26 (9): 483 – 489.

Corck, D., J. Mathers, A. Maka and A. Srnak. 1985. Control of oxidative sulfur metabolism of *Chlorobium Limicola* forma *Thiosulfatophilum*. Applied and Environmental Microbiology 49: 269-272.

Coto, J. E., J. J. Maldonado, R. Botero y J. V. Murillo. 2007. Implementación de un sistema para generar electricidad a partir de biogás en la finca pecuaria integrada de EARTH. Universidad EARTH. Las Mercedes de Guácimo, Limón, Costa Rica. Revista Tierra Tropical 3 (2): 129 – 138.

Crozza, D. y A. Pagano. 2007. Conversión energética de los desechos biomásicos mediante la biotecnología anaeróbica. Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. 12p.

EPA. 2004. Uso de biorreactores para controlar la contaminación del Aire. Agencia de Protección Ambiental. EEUU. 38p.

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.

Fernández, E. 2004. Procedimiento para la purificación de biogás. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, publicación cu 23003 a1, Oficina de Propiedad Intelectual Cubana. Habana, Cuba. 18 p.

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

Fuentealba, V., S. Daroch y M. Ladger. 2005. Manual para Docentes, Ciudadanía Ambiental Global. Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). 58p.

Gaete, C. 2007. Tratamiento de agua con elevado contenido de sulfato en un reactor EGSB, utilizando el biogás producción para la remoción de H<sub>2</sub>O. Tesis Ingeniero Ambiental. Universidad de La Frontera, Facultad de Ingeniería, Ciencias y Administración. Temuco, Chile. 94 p.

González, A. 2006. Estudio de la oxidación biológica de compuestos reducidos de azufre por un consorcio alcalófilo en un biorreactor. Tesis Doctor en Ciencias Ingeniería Química. Universidad Autónoma Metropolitana, División de Ciencias Básicas e Ingeniería. México DF. 90 p

Kleerebezem, R. Y Méndez, R. 2002. Autotrophic denitrification for combined hydrogen sulfide removal from biogas and post-denitrification. *Water Science and Technology* 45 (10): 349-356.

Larsen, H. 1952. On the culture and general physiology of the green sulfur bacteria. *J. Bacteriol* 64: 187-196.

Llaneza, H., M. Morís, A. González y E. González. 2010. Estudio de viabilidad de sistemas de purificación y aprovechamiento de biogás. Pse probiogás desarrollo de sistemas sostenibles de producción y uso de biogás agroindustrial en España. España, PS -120000-2007-6. Disponible en: [http://213.229.136.11/bases/ainia\\_probiogas.nsf/0/7559B244B63EB155C125753F0058E255/\\$FILE/Cap1.pdf](http://213.229.136.11/bases/ainia_probiogas.nsf/0/7559B244B63EB155C125753F0058E255/$FILE/Cap1.pdf). Leído el 12 agosto 2010.

Madigan, M. T., J. M. Martinko y J. Parker. 2006. Brock. Biología de los microorganismos. Pearson Educación, S.A. 10ª Ed., Madrid, España. 1089p.

Mesa, M. M., M. Macías and D. Cantero. 2002. Biological iron oxidation by *Acidithiobacillus Ferrooxidans* in a packed-bed bioreactor. Chemical Biochemical Engineering Quarterly 16 (2): 69–73.

Noyola, A., J. M. Morgan-Sagastume and J. E. López-Hernández. 2006. Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odor control and energy/resource recovery. Reviews in Environmental Science and Bio/Technoly. 5: 93-114.

O' Flaherty, V., G. Collins and T. Mahony. 2006. The microbiology and biochemistry of anaerobic bioreactors with relevance to domestic sewage treatment. Reviews in Environmental Science and Bio/Technoly. 5: 39-55.

Pérez, H. y P. Villa. 2005. Desulfuración biológica: una alternativa para el tratamiento de emisiones de gases a la atmósfera. Agua Latinoamérica 5(3): 7-22.

Pérez, M., M. J. Cuesta, S. Núñez y J. A. Cabrera. 2008. Utilización de biogás en pilas de combustible. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. España. 68 p.

Ramírez, D. 2007a. Control y eliminación de compuestos volátiles provenientes de un digester anaerobio mediante biofiltración. Tesis de Maestría en Ciencias de Bioprocesos. Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología. México DF. 891p.

Ramírez, M. 2007b. Viabilidad de un proceso para la eliminación conjunta de H<sub>2</sub>S y NH<sub>3</sub> contenido en efluentes gaseosos. Memoria Doctor. Universidad de Cádiz, Facultad de Ciencias, Departamento de Ingeniería Química, Tecnología de Alimentos y Tecnologías del Medio Ambiente. Cádiz, España. 281 p.

Revah, S. y I. Ortiz. 2004. El desarrollo de bioprocesos para el tratamiento de aire contaminado emitido por fuentes fijas. Pp 625- 658. In: Francisco Bolívar. Fundamentos y Casos Exitosos de la Biotecnología Moderna. 2nd ed. El Colegio Nacional México. 733 p.

Syed, M., G. Soreanu, P. Falletta and M. Béland. 2006. Removal of hydrogen sulfide from gas streams using biological processes - a review. Canadian biosystems engineering / le genie des biosystems au Canada. 48.

Vergara, A., L. Lara, N. Alarcón y G. Aroca. 2003. Biofiltración de aire contaminado con hidrocarburos volátiles. Pp12. In: AIDIS. Aire, tierra y agua tarea de todos Congreso de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Concepción, Chile Octubre 1-3, 2003. Universidad de Concepción. Concepción, Chile.

## ANEXO

### GLOSARIO

- **Absorción** es la operación unitaria que consiste en la separación de uno o más componentes de una mezcla gaseosa con la ayuda de un solvente líquido con el cual forma solución (un soluto A, o varios solutos, se absorben de la fase gaseosa y pasan a la líquida).
- **Aceptor de electrones** una sustancia que puede aceptar electrones de otra sustancia y que se reduce en el proceso
- **Acetogénesis (homoacetogénesis)** metabolismo energético con producción de acetato, bien a partir de  $H_2$  más  $CO_2$ , bien a partir de compuestos orgánicos.
- **Anaerobio** microorganismo que crece en ausencia de  $O_2$ , la presencia de este puede inhibir el crecimiento
- **Área específica** es una propiedad del material de los sólidos que mide el total de superficie por unidad de masa Tiene una especial importancia en el caso de la adsorción, catálisis heterogénea, y reacciones en superficies.
- **Arqueas** procariotas relacionados filogenéticamente, pertenecientes al dominio *Archaea* y distintos del dominio *Bacteria*.
- **Autotrofo** organismo capaz de biosintetizar todo el material celular a partir del  $CO_2$  como única fuente de carbono.
- **Bacterias nitrificantes** quimiolitotrofos capaces de llevar a cabo la transformación  $NH_3 \rightarrow NO_2$  o  $NO_2 \rightarrow NH_3$ .
- **Bacterias** procariotas relacionados filogenéticamente, pertenecientes al dominio *Bacteria* y distintos del dominio *Archaea*.
- **Bacterias reductoras de sulfato** grupo de bacterias anaerobias que respiran anaeróticamente utilizando  $SO_4^{-2}$  como aceptor de electrones, produciendo  $H_2S$ .
- **Bacterias verdes** procariotas fototróficos anoxigénicos que contienen clorosomas y bacterioclorofilas *c*, *d* o *e*.
- **Biofiltros** Los biofiltros, también denominados filtros biológicos, son dispositivos que eliminan una amplia gama de compuestos contaminantes desde una corriente de fluido (aire o agua) mediante un proceso biológico.
- **Biogás** gas generado a través de en medios naturales o en dispositivos específicos, por las reacciones de biodegradación de la materia orgánica, mediante la acción de microorganismos (bacterias metanogénicas, etc.), y otros factores, en ausencia de oxígeno (esto es, en un ambiente anaeróbico). El producto resultante está formado por metano ( $CH_4$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), monóxido de carbono ( $CO$ ) y otros gases en menor proporción
- **Biopelícula** solución acuosa de varios nutrientes que permite el crecimiento de los microorganismos.

- **Biotecnología** uso de organismos vivos para llevar a cabo procesos químicos concretos destinados a la aplicación industrial.
- **Calentamiento global** La noción de calentamiento global permite referirse a dos cuestiones relacionadas: por un lado, se trata de un fenómeno observado en el periodo de la temperatura de las últimas décadas, que sube de manera sostenida ; por otra parte, es una teoría que, a partir de distintas proyecciones, sostiene que la temperatura seguirá creciendo en el futuro a causa de la acción del hombre
- **Catalizador** sustancia que acelera una reacción química pero no se consume en la reacción.
- **Ciclo de Calvin** vía bioquímica de fijación de  $\text{CO}_2$  en muchos organismos autótrofos.
- **Consortios** asociación de dos o más procariotas viviendo en simbiosis íntima.
- **Desasimilación** Conjunto de procesos metabólicos de degradación de sustancias para obtener otras más simples.
- **Desnitrificación** respiración anaeróbica en la que el  $\text{NO}_3^-$  se reduce a compuestos nitrogenados gaseosos, fundamentalmente  $\text{N}_2$
- **Donador de electrones** sustancia que puede ceder electrones a un aceptor y que se oxida en el proceso
- **Especie** en microbiología, una colección de cepas que comparten un gran número de propiedades importantes pero difieren en una o más propiedades significativas de otras colecciones de cepas.
- **Eucariontes** célula con núcleo delimitado por una membrana nuclear.
- **Facultativo** con respecto al  $\text{O}_2$ , organismo que puede crecer en ausencia o en su presencia.
- **Fermentación** catabolismo anaeróbico en el que un compuesto orgánico sirve al mismo tiempo como donador y como aceptor de electrones y en el que el ATP se produce por fosforilación a nivel de sustrato. En un contexto industrial, cualquier proceso microbiano a gran escala, tanto si se realiza aeróbica como anaeróbicamente.
- **Fotolitotrofos** son microorganismos los cuales su fuente de energía es la luz y su única fuente de carbono es  $\text{CO}_2$
- **Fotótrofo** organismo que utiliza la luz como fuente de energía.
- **Gases efecto invernadero (GEI)** Componentes gaseosos que absorben la radiación infrarroja que emana, contribuyendo de esta manera al efecto invernadero. Estos gases son: el vapor de agua, el dióxido de carbono, el metano, el ozono, el óxido nítrico y los clorofluorocarbonos.
- **Hongos** microorganismos eucarióticos no fototróficos que carecen de pared celular y se agregan para formar cuerpos fructíferos o masas de protoplasma.
- **Inhibición** la reducción del crecimiento microbiano debido a un descenso en el número de microorganismos presentes o alteraciones en el ambiente microbiano.
- **Lecho seco** Una configuración de los materiales sólidos de adsorción, para tamices moleculares ejemplo o el carbón, que se utiliza para recuperar líquido o purificar una corriente de gas

- **Levaduras** hongos unicelulares.
- **Mesófilo** organismo que crece mejor entre 20°C y 45°C.
- **Metabolismo** conjunto de reacciones bioquímicas de una célula.
- **Metanogénesis** producción biológica de metano (CH<sub>4</sub>).
- **Microaerófilo** organismo aeróbico que puede crecer solo cuando la presencia parcial de oxígeno es menor a la del aire.
- **Microorganismo** organismo microscópico constituido por una sola célula o varias, incluyendo los virus.
- **Oxidación** Pérdida de electrones
- **Potencial de reducción** la tendencia intrínseca de una sustancia para donar electrones.
- **Procariotas** célula que carece de núcleo y otros organelos.
- **Productor primario** organismo que usa la luz para sintetizar materia orgánica a partir de CO<sub>2</sub>.
- **Quimiolitotrofo** organismo que obtiene su energía de la oxidación de compuestos inorgánicos.
- **Quimio organotrofos** organismos que obtienen la energía de la oxidación de compuestos orgánicos.
- **Reducción** Se refiere a la disminución del grado o intensidad de las emisiones de gases de efecto invernadero
- **Respiración** proceso en el que un compuesto es oxidado en O<sub>2</sub> (o sustituto del O<sub>2</sub>), que funciona como aceptor terminal de electrones, y que normalmente se acompaña de la producción de ATP por fosforilación oxidativa.
- **Sintrofia** proceso en el cual dos o más microorganismos cooperan en la degradación de una sustancia que no la pueden degradar por si solos
- **Sintropismo** Proceso por el cual dos o más microorganismos cooperan a degradar una sustancia que solos no podrían
- **Termófilos** organismo que crece mejor entre 45°C y 80°C.
- **Tiempo de residencia** La duración media del tiempo de una partícula de reactivo pasa dentro de un recipiente de proceso o en contacto con un catalizador