

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
SECCIÓN DE POSGRADO Y SEGUNDA ESPECIALIZACIÓN



***“REMOCIÓN DE SULFURO DE HIDRÓGENO UTILIZANDO
UN BIOFILTRO PERCOLADOR CON MEDIA DE ARCILLA
EXPANDIDA”***

TESIS

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN
CIENCIAS CON MENCIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS Y
REÚSO DE DESECHOS**

**ELABORADO POR
JAVIER AHMET ESTEBAN GRIMALDO CASTILLO**

**ASESOR
GUY CARVAJAL CARRANZA**

LIMA – PERÚ

2014

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Guy Carvajal, Docente de la Escuela de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería, por su colaboración en la asesoría de la presente tesis.

Al Dr. Ruddy Noriega Pissani y MSc. Ing. Rosa Yaya, docentes de la Escuela de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería, por sus valiosos comentarios en la revisión de la presente tesis.

Al Ing. Khaled Roueibeh, Gerente de ventas de Integrity Municipal Systems LLC, por su amistad sincera y por compartir sus conocimientos sobre tecnologías de control de olores.

Al Dr. Richard Parker, Director de Evoqua Water Technologies LLC, por sus valiosos comentarios y por compartir sus experiencias sobre tecnologías de control de olores.

Al Ing. Luis Baca, Gerente de Infraestructura & Ciudades de Siemens SAC, por su amistad y por la confianza brindada durante mi permanencia en la división de tratamiento de aguas.

Al Sr. Guillermo Román, Gerente General de Global Energy & Water SAC, por su amistad y apoyo logístico durante el desarrollo de esta tesis.

Al Sr. Gary Sutch, Técnico especialista de Evoqua Water Technologies LLC, por su apoyo durante los trabajos realizados en el sitio del proyecto.

Al Sr. Ángel Rosales y al personal operario de la Estación de bombeo de Desagüe CBD 326-2, por su colaboración en el registro de datos.

A mis colegas y amigos de Siemens SAC por compartir sus conocimientos sobre electricidad, instrumentación, automatización y mecánica.

ÍNDICE

LISTA DE TABLAS.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS.....	xvii
RESUMEN.....	xviii
ABSTRACT.....	xix
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. INFORMACION PRELIMINAR.....	3
2.1 Antecedentes bibliográficos.....	3
2.2 Descripción de la realidad problemática.....	5
2.3 Formulación del problema.....	6
2.4 Justificación de la investigación.....	6
2.5 Objetivos.....	7
2.5.1 Objetivo general.....	7
2.5.2 Objetivos específicos.....	7
2.6 Hipótesis.....	7
2.6.1 Hipótesis general.....	7
2.6.2 Hipótesis específicas.....	8
2.7 Variables e indicadores.....	8
2.8 Unidad de análisis.....	8
2.9 Tipo y nivel de investigación.....	9
2.10 Período de análisis.....	9
2.11 Técnicas e instrumentos utilizados.....	9
2.12 Procesamiento de datos.....	9
3. MARCO TEÓRICO.....	10
3.1 Generación de olores en sistemas de alcantarillado.....	10
3.2 Compuestos olorosos en los gases de alcantarillado.....	11
3.2.1 Sulfuro de hidrógeno.....	12
3.2.2 Compuestos de azufre orgánicos.....	16
3.2.3 Amonio y compuestos de nitrógeno.....	17
3.2.4 Compuestos Orgánicos Volátiles.....	18
3.2.5 Otros compuestos en aguas residuales.....	19

3.3	Fuentes de emisiones de olores en sistema de alcantarillado.....	20
	3.3.1 Colectores por gravedad.....	20
	3.3.2 Tuberías de impulsión.....	20
	3.3.3 Estaciones de bombeo	21
	3.3.4 Descargas industriales y comerciales.....	22
3.4	Mecanismo de generación de H ₂ S.....	22
3.5	Liberación de olores.....	24
3.6	Aspectos de salud y normatividad sobre olores y gases contaminantes.....	25
	3.6.1 Aspectos toxicológicos del H ₂ S.....	25
	3.6.2 Legislación Internacional.....	29
	3.6.3 Legislación Nacional.....	32
3.7	Métodos de control de olores.....	33
	3.7.1 Tecnologías de control de olores y COV.....	33
	3.7.2 Métodos fisicoquímicos.....	36
	a) Depurador químico.....	36
	b) Carbón activado	38
	c) Oxidación con cloro	40
	d) Oxidación con peróxido de hidrógeno.....	40
	e) Oxidación con ozono	41
	f) Precipitación química.....	41
	3.7.3 Métodos biológicos.....	41
	a) Biofiltro.....	44
	b) Biofiltro percolador.....	46
	c) Contactor biológico rotativo.....	47
	d) Biodepurador.....	48
	e) Biorreactor de membrana.....	49
	f) Biorreactor de crecimiento suspendido.....	50
	3.7.4 Ventajas y desventajas de los métodos biológicos.....	51
3.8	Aspectos generales para la implementación de tecnologías de control de olores en fase vapor	53
	3.8.1 Contención de olores.....	53
	3.8.2 Flujo de ventilación.....	56

a) Espacio accesible para trabajadores.....	57
b) Espacio no accesible para trabajadores.....	59
3.9 Mecanismo de biofiltración.....	60
3.9.1 Equilibrio.....	61
3.9.2 Tasa de transferencia.....	61
3.9.3 Biodegradación de contaminantes.....	63
a) Biopelícula.....	63
b) Biocinética.....	63
3.9.4 Generación de subproductos.....	64
3.10 Microbiología en biorreactores.....	66
3.10.1 Especies microbiológicas en el tratamiento de gases.....	66
3.10.2 Inoculación de especies.....	67
3.10.3 La naturaleza de la biopelícula microbiana.....	68
3.10.4 Bioquímica del tratamiento biológico.....	70
a) Proceso biológico heterotrófico.....	70
b) Proceso biológico autotrófico.....	71
3.11 Biofiltro percolador.....	75
3.11.1 Antecedentes.....	75
3.11.2 Descripción del proceso.....	78
3.11.3 Terminología de la biofiltración.....	79
a) Tiempo de contacto de lecho vacío.....	79
b) Carga volumétrica y velocidad superficial.....	80
c) Carga másica de ingreso.....	81
3.11.4 Diseño y operación de biofiltros percoladores.....	81
3.11.5 Desempeño de los biofiltros percoladores.....	84
a) Eficiencia de remoción.....	84
b) Capacidad de eliminación.....	84
c) Capacidad de eliminación máxima.....	85
3.11.6 Componentes de los biofiltros percoladores.....	87
a) Ductos.....	87
b) Reguladores de flujo.....	89
c) Extractores.....	89
d) Media de filtración.....	90

e) Sistema de humidificación e irrigación.....	93
f) Sistema de drenaje.....	95
g) Control e instrumentación.....	96
3.11.7 Parámetros que afectan la biofiltración.....	97
a) pH.....	97
b) Humedad.....	98
c) Temperatura.....	99
d) Nivel de oxígeno.....	100
e) Nutrientes.....	100
f) Caída de presión.....	101
g) Profundidad de la media.....	102
h) Pretratamiento del gas contaminante.....	102
i) Mantenimiento.....	103
3.11.8 Costos de biofiltros percoladores.....	104
a) Costos de inversión.....	104
b) Costos de operación y mantenimiento.....	105
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	107
4.1 Descripción de experimentos.....	107
4.2 Estación de bombeo CBD 326-2.....	108
4.2.1 Descripción.....	108
4.2.2 Componentes	109
a) Planta compacta de pretratamiento.....	111
b) Sistema de bombeo y clasificador de arena.....	113
c) Cámara húmeda y cámara seca.....	115
d) Cámara de válvulas.....	116
e) Sistema hidroneumático.....	117
f) Sala de grupo electrógeno	118
g) Sala de tableros eléctricos.....	119
h) Oficinas y servicios higiénicos.....	119
4.3 Biofiltro percolador	119
4.3.1 Descripción.....	119
4.3.2 Características del gas oloroso	121
a) Flujo de ingreso.....	121

b) Concentración de ingreso de H ₂ S.....	122
c) Humedad relativa y temperatura.....	123
4.3.3 Parámetros de diseño.....	124
4.3.4 Componentes del biofiltro percolador	125
a) Ducto de ingreso	125
b) Extractor de aire.....	125
c) Recipiente.....	126
d) Media de filtración.....	127
e) Sistema de irrigación y dosificación de nutrientes	128
f) Sistema de drenaje.....	130
g) Tablero eléctrico.....	131
4.4 Instalación del biofiltro percolador.....	134
4.5 Pruebas de funcionamiento del biofiltro.....	135
4.6 Arranque del biofiltro percolador	137
4.7 Programa de monitoreo.....	138
4.7.1 Parámetros.....	139
4.7.2 Puntos de medición y muestreo.....	140
a) Ducto de aire.....	140
b) Biofiltro percolador.....	141
4.7.3 Frecuencia de muestreo.....	142
4.7.4 Métodos de medición y análisis.....	144
a) Velocidad y flujo de aire en el ducto.....	144
b) Sulfuro de hidrógeno.....	145
c) Compuestos de azufre y compuestos orgánicos volátiles.....	147
d) Parámetros físico-químicos.....	149
5. RESULTADOS y DISCUSIONES.....	152
5.1 Flujo de ingreso al biofiltro.....	152
5.2. Puesta en marcha y aclimatación	153
5.2.1 Concentración de H ₂ S en el flujo de ingreso.....	153
5.2.2 Concentración de H ₂ S en el aire purificado y eficiencia de remoción.....	156
5.2.3 PH en la media de filtración y lixiviado.....	160
5.2.4 Sulfatos en la media de filtración y lixiviado.....	162

5.2.5	Humedad en la media de filtración.....	163
5.2.6	Resumen de parámetros de operación en la puesta en marcha	164
5.3	Evaluación del biofiltro percolador.....	165
5.3.1	Concentración de H ₂ S en el flujo de ingreso y aire purificado....	165
5.3.2	Efecto del tiempo de contacto de gas en la remoción de H ₂ S...	169
5.3.3	Efecto de la carga másica en la remoción de H ₂ S.....	171
5.3.4	Efecto de la velocidad superficial en la remoción de H ₂ S.....	174
5.3.5	Efecto del pH y temperatura en la remoción de H ₂ S	175
5.3.6	Efecto de sulfatos en la remoción de H ₂ S.....	177
5.3.7	Efecto de la humedad en la remoción de H ₂ S.....	179
5.3.8	Remoción de otros compuestos olorosos.....	182
5.3.9	Resumen de parámetros de operación en la fase de evaluación	184
5.4	Costos de inversión, operación y mantenimiento.....	185
5.4.1	Costo de inversión.....	185
5.4.2	Costos de operación y mantenimiento.....	186
6.	CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES	189
6.1	Conclusiones.....	189
6.2	Recomendaciones.....	191
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	192
8.	ANEXOS.....	198
8.1	Normas nacionales de calidad del aire.....	199
8.2	Características físico-química del afluente a la estación de bombeo CBD 326-2	202
8.3	Predicción de la concentración de H ₂ S en las emisiones de la estación de bombeo CBD 326-2	204
8.4	Lista de verificación de la instalación y montaje del biofiltro percolador.....	209
8.5	Certificados de calibración de los analizadores portátiles de H ₂ S.....	210
8.6	Reporte de compuestos olorosos en el flujo de ingreso y aire purificado en el biofiltro percolador	212
8.7	Registro de parámetros de control en el lixiviado.....	215
8.8	Registro de parámetros de control en la media de filtración.....	217
8.9	Ejemplo de reporte de sulfatos y humedad en la media de filtración	221

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1	Variables e indicadores de la investigación	8
Tabla 3.1:	Parámetros en las aguas residuales que afectan la ocurrencia de olores	10
Tabla 3.2:	Características del Sulfuro de hidrógeno	14
Tabla 3.3:	Compuestos olorosos de azufre en las emisiones de aguas residuales	17
Tabla 3.4:	Compuestos olorosos de nitrógeno en las emisiones de aguas residuales	18
Tabla 3.5:	Otros compuestos olorosos en las emisiones de aguas residuales	19
Tabla 3.6:	Umbral e intensidad del sulfuro de hidrógeno detectado por el ser humano	26
Tabla 3.7:	Efectos en la salud del ser humano a diversas concentraciones de Sulfuro de hidrógeno	27
Tabla 3.8:	Estándares de calidad ambiental de compuestos olorosos establecidos por diversas Agencias regulatorias	30
Tabla 3.9:	Clasificación de los reactores biológicos	43
Tabla 3.10:	Costos de operación y mantenimiento de tecnologías para el control de COV y H ₂ S	52
Tabla 3.11:	Característica de algunas bacterias implicadas en la degradación de H ₂ S y otros compuestos de azufre	72
Tabla 3.12:	Investigaciones realizadas para la remoción de Sulfuro de hidrógeno usando biofiltros percoladores.	77
Tabla 3.13:	Parámetros típicos de diseño y operación de biofiltros percoladores	82
Tabla 3.14:	Características de las medias de filtración inorgánica y sintética	91

Tabla 4.1:	Parámetros de diseño de la estación de Bombeo CBD 326-2	109
Tabla 4.2:	Dimensiones de la estación de bombeo CBD 326-2	115
Tabla 4.3:	Calculo del flujo de ingreso al biofiltro percolador en la Estación de bombeo CBD 326-2	121
Tabla 4.4:	Parámetros de diseño del biofiltro percolador de la estación de bombeo CBD 326-2	124
Tabla 4.5:	Características de la arcilla expandida en el biofiltro percolador	128
Tabla 4.6:	Composición química del fertilizante líquido	137
Tabla 4.7:	Parámetros de control en el proceso de biofiltración	139
Tabla 4.8:	Frecuencia de evaluación de los parámetros en las muestras de gases	143
Tabla 4.9:	Frecuencia de evaluación de los parámetros físico-químicos en el biofiltro percolador	143
Tabla 4.10:	Características del ducto de PVC en el punto de medición D1	144
Tabla 5.1:	Flujo de ingreso en el ducto de aire para diferentes frecuencias de operación del extractor	152
Tabla 5.2:	Concentraciones de H ₂ S y temperatura en el biofiltro percolador durante la fase de puesta en marcha y aclimatación	159
Tabla 5.3:	Análisis de sulfatos y pH en el agua potable y agua destilada	160
Tabla 5.4:	Parámetros de control en el biofiltro percolador durante la fase de puesta en marcha	164
Tabla 5.5:	Resumen de los parámetros de operación durante la fase de puesta en marcha	165
Tabla 5.6:	Concentraciones de H ₂ S y temperatura en el biofiltro percolador durante la fase de evaluación	167
Tabla 5.7:	Carga másica de ingreso y capacidad de eliminación promedio durante la fase de evaluación	171

Tabla 5.8:	Parámetros de control en el biofiltro percolador durante la fase de evaluación	180
Tabla 5.9:	Eficiencia de remoción de compuestos olorosos en el biofiltro percolador	182
Tabla 5.10:	Resumen de los parámetros de operación del biofiltro percolador durante la fase de evaluación	185
Tabla 5.11:	Costos de operación y mantenimiento del biofiltro percolador en la estación de bombeo CBD 326-2	187
Tabla 5.12:	Distribución de los costos de operación y mantenimiento en el biofiltro percolador	188

LISTA DE FIGURAS

Fig. 3.1:	Representación esquemática de los procesos físicos, químicos y biológicos responsables de la generación de sulfuro de hidrógeno en colectores	13
Fig. 3.2:	Efecto del pH en el equilibrio del sulfuro de hidrógeno	15
Fig. 3.3:	Clasificación de las tecnologías comunes de control de olores y COV	34
Fig. 3.4:	Tecnologías de control de olores en función del flujo de aire y concentración de contaminantes a tratar	35
Fig. 3.5:	Diagrama típico de un depurador de torre empaque	37
Fig. 3.6:	Diagrama típico de un sistema de carbón activado	39
Fig. 3.7:	Sistema de biofiltración construido en el suelo	43
Fig. 3.8:	Diagrama típico de un biofiltro prefabricado	45
Fig. 3.9	Esquema de funcionamiento de un contactor biológico rotativo	47
Fig. 3.10:	Diagrama esquemático de un sistema biodepurador	49
Fig. 3.11:	Esquema de un biorreactor de membrana	50
Fig. 3.12:	Diagrama esquemático de un biorreactor de crecimiento suspendido	51
Fig. 3.13:	Sistema de pretratamiento instalado dentro de una caseta de fibra de vidrio.	54
Fig. 3.14:	Cobertura de canales con tapas de fibra de vidrio	56
Fig. 3.15:	Resumen de los métodos de evaluación de la tasa de ventilación	60
Fig. 3.16:	Modelo de transferencia de gas en un biofiltro	62
Fig. 3.17:	Biotransformación y proceso de transporte en biofiltros	65
Fig. 3.18:	Diversas configuraciones de biopelículas en sistemas de biofiltración.	69

Fig. 3.19:	Esquema típico de un biofiltro percolador	78
Fig. 3.20:	Curva típica de la capacidad de eliminación vs. carga contaminante para un biofiltro percolador	86
Fig. 3.21:	Sistema de humidificación del flujo de aire en un biofiltro orgánico	94
Fig. 4.1:	Vista panorámica de la estación de bombeo CBD 326-2	108
Fig. 4.2:	Componentes de la estación de bombeo CBD 326-2.	110
Fig. 4.3:	Tamiz fino y compactador de residuos sólidos	112
Fig. 4.4:	Tanque desarenador aireado	113
Fig. 4.5:	Equipo clasificador y lavador de arena	114
Fig. 4.6:	Equipos del sistema hidroneumático	118
Fig. 4.7:	Esquema de funcionamiento del biofiltro percolador de la Estación de bombeo CBD 326-2	120
Fig. 4.8:	Extractor centrífugo fabricado en fibra de vidrio	125
Fig. 4.9:	Biofiltro fabricado en fibra de vidrio reforzada	126
Fig. 4.10:	Arcilla expandida utilizada como media de filtración	127
Fig. 4.11:	Gabinete con los componentes del sistema de irrigación y dosificación de nutrientes	128
Fig. 4.12:	Válvula de bola para el drenaje del lixiviado	131
Fig. 4.13:	Vista externa del tablero de control del biofiltro percolador	132
Fig. 4.14:	Componentes del biofiltro percolador de la Estación de bombeo CBD 326-2	133
Fig. 4.15:	Instalación de acople flexible delante del extractor centrífugo	135
Fig. 4.16:	Programación del variador de frecuencia y regulación del flujo del extractor	136
Fig. 4.17:	Ajuste de la dosis en la bomba dosificadora de nutrientes	138

Fig. 4.18:	Perforación de orificios en el ducto para la medición de la velocidad del aire.	140
Fig. 4.19:	Ubicación de los puntos de muestreo G1 y G2 para la medición de gases en el biofiltro percolador	141
Fig. 4.20:	Ubicación de los puntos de control B1 y B2 en el sistema de biofiltración	142
Fig. 4.21:	Medición de la velocidad en el ducto utilizando un anemómetro digital.	145
Fig. 4.22:	Instalación del analizador Jerome modelo X860-001 en el punto de muestreo G1	146
Fig. 4.23	Instalación del analizador Interscan en el punto de muestreo G2	146
Fig. 4.24:	Llenado de la bolsa de polipropileno con la muestra de aire purificado	147
Fig. 4.25:	Medición de pH y temperatura en las muestras de lixiviado	149
Fig. 5.1:	Variación diaria de la concentración de H ₂ S en el flujo de ingreso al biofiltro percolador (Días 13 y 14 de Noviembre de 2012)	155
Fig. 5.2:	Eficiencia de remoción promedio de H ₂ S durante la puesta en marcha	157
Fig. 5.3:	Variación diaria de la concentración de H ₂ S en el flujo de ingreso y aire purificado en el biofiltro percolador (Días 13 y 14 de noviembre de 2012)	158
Fig. 5.4:	Valores de pH y remoción promedio de H ₂ S en el biofiltro percolador durante la puesta en marcha	161
Fig. 5.5:	Concentración de sulfatos y remoción promedio de H ₂ S en el biofiltro percolador durante la puesta en marcha	162
Fig. 5.6:	Eficiencia de remoción promedio de H ₂ S en función del tiempo de contacto de gas durante la fase de evaluación	170

Fig. 5.7:	Capacidad de eliminación de H ₂ S en el biofiltro percolador en función del tiempo de contacto de gas (EBCT)	173
Fig. 5.8:	Velocidad superficial (VS) y remoción promedio de H ₂ S en el biofiltro percolador durante la fase de evaluación	174
Fig. 5.9:	Valores de pH y remoción promedio de H ₂ S en el biofiltro percolador en la fase de evaluación	176
Fig. 5.10:	Concentración de sulfatos y remoción promedio de H ₂ S en el biofiltro percolador durante la fase de evaluación	178
Fig. 5.11:	Eficiencia de remoción de Compuestos Orgánicos Volátiles en el biofiltro percolador	183
Fig. 8.1:	Componentes del sistema de alcantarillado del proyecto CODIMUVES	205
Fig. 8.2:	Balance de masas de sulfuro total y H ₂ S en el sistema de alcantarillado del proyecto CODIMUVES	208

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

ASCE	American Society of Civil Engineers (Sociedad Americana de Ingenieros Civiles)
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers (Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado)
APHA	American Public Health Association (Asociación Americana de Salud Pública)
CFM	Cubic feet per minutes (Pie cúbico por minuto)
COV	Compuestos Orgánicos Volátiles
EBCT	Empty Bed Contact time (Tiempo de Contacto en Lecho Vacío)
EPS	Empresas Prestadoras de Servicios de Saneamiento
GPH	Gallon per hour (Galones por hora)
GPM	Gallon per minute (Galones por minuto)
JEA	Jacksonville Electric Authority (Autoridad Eléctrica de Jacksonville)
NEMA	National Electrical Manufacturers Association (Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos)
NFPA	National Fire Protection Agency (Agencia Nacional de Protección del Fuego)
NIOSH	National Institute of Occupational safety and Health (Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional)
OSHA	Occupational Safety and Health Administration (Administración de Seguridad y Salud Ocupacional)
SEDAPAL	Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima
SMACNA	Sheet Metal and Air Conditioning Contractors National Association (Asociación Nacional de Constructores de Aire Acondicionado y Láminas Metálicas)
USD	United State Dollar (Dólar norteamericano)
U.S. EPA	United State Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos)
VFD	Variable Frequency Drive (Accionamiento de Frecuencia Variable)
WEF	Water Environment Federation (Federación Ambiental del Agua)

RESUMEN

La presente tesis describe los experimentos realizados en un biofiltro percolador con media de arcilla expandida con el propósito de determinar la eficiencia de remoción de H₂S en los gases generados en la Estación de bombeo CBD 326-2 en el distrito de Villa El Salvador.

Durante el estudio se verificó que la concentración diarias de H₂S en el flujo de aire al biofiltro percolador varió entre 1.2 y 181 ppm debido al rebombeo frecuente de aguas residuales que ingresaba a la estación. A pesar de lo indicado, las concentraciones promedio de H₂S variaron entre 6.88 y 34.5 ppm.

La fase experimental se inició con la puesta en marcha del biofiltro percolador, operando con un flujo de 381 m³.h⁻¹, carga másica entre 2.13 y 5.42 g.m⁻³.h⁻¹ y un tiempo de contacto de gas de 19.2 segundos. La estabilización del proceso se alcanzó después de 26 días, obteniendo una concentración promedio de H₂S en el aire purificado de 0.027 ppm. En la segunda fase, el biofiltro percolador operó con flujos de ingreso que variaron entre 448 y 862 m³.h⁻¹ para modificar el tiempo de contacto de gas y la carga másica y determinar la eficiencia de remoción de H₂S y la capacidad de eliminación.

Los resultados obtenidos demostraron que la operación del biofiltro percolador con flujos de ingreso entre 572 a 662 m³.h⁻¹, tiempo de contacto de gas de 11 a 12.8 segundos y cargas másicas entre 2.28 y 10.41 g.m⁻³.h⁻¹ permitieron una remoción constante de H₂S de 99.66% ± 0.18, independiente de las variaciones en la concentración de ingreso. En el aire purificado, las concentraciones promedio de H₂S variaron entre 0.031 y 0.065 ppm y se verificó que la operación del biofiltro percolador con un pH de 2.5 a 3.0 resultó ser más estable.

Finalmente, en la última fase del estudio se determinó que el costo de inversión unitario del biofiltro percolador correspondió a USD 117 por cada m³.h⁻¹ de gas oloroso a ser tratado, mientras que el costo de operación y mantenimiento fue de USD 0.658 por cada 1,000 m³ de aire purificado.

ABSTRACT

This thesis describes the experiments in a biotrickling filter with expanded clay media with the purpose to determinate the removal efficiency of H₂S in the odorous gas from pump station CBD 326-2 in the Villa El Salvador district.

During the study, it was verified that daily concentration of H₂S in airflow to the biotrickling filter varied between 1.2 and 181 ppm due to frequent pumping of wastewater to the station. Despite this, the average concentration of H₂S varied between 6.88 and 34.35 ppm.

The experimental phase began with the start-up of the biotrickling filter, which operated with airflow of 381 m³.h⁻¹, mass loading between 2.13 and 5.42 g.m⁻³.h⁻¹ and empty bed contact time of 19.2 seconds. The stabilization of the process was achieved after 26 days when the average H₂S concentration in the purified air was 0.027 ppm. In the second phase, biotrickling filter operated with airflows range of 448 and 862 m³.h⁻¹ to modify the empty bed contact time and mass loading and determine the removal efficiency of H₂S and Elimination capacity.

The results indicated that in the operation of biotrickling filter with airflow between 572 and 662 m³.h⁻¹, empty bed contact time of 11 and 12.8 seconds, mass loading between 2.28 and 10.41 g.m⁻³.h⁻¹ was achieved a constant removal of H₂S of 99.66% ± 0.18, independent of variation in the inlet concentration. In purified air, average concentration of H₂S varied between 0.031 and 0.065 ppm and it was verified that operation of biotrickling filter resulted more stable with pH of 2.5 to 3.0.

Finally, in the last phase of study, it was determined that the capital cost of biotrickling filter was USD 117 per m³.h⁻¹ of waste gas to be treated, while the operation and maintenance cost was USD 0.658 per 1,000 m³ of purified air.

1. INTRODUCCION

En los problemas de contaminación atmosférica, existe un amplio y ambiguo campo sobre los malos olores proveniente de los sistemas de recolección y tratamiento de aguas residuales. El Sulfuro de Hidrógeno (H_2S) es uno de los gases más comunes en estos sistemas y resulta ser problemático por su olor a huevos podridos y su alta toxicidad ⁷⁴.

A nivel mundial, existen numerosos episodios registrados sobre problemas por emisiones olorosas. Boswell⁸ menciona que durante el verano del 2003, la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Wilsonville experimentó problemas de olores que afectaron a la población aledaña. Las mediciones determinaron que los principales gases causantes de olores fueron el H_2S (10 ppmv), Compuestos Orgánicos Volátiles (5 ppm) y el NH_3 (180 ppm). En nuestro país se han presentado algunos episodios sobre contaminación por malos olores pero existen pocos registros oficiales y escasa información sobre los tipos de compuestos y las concentraciones en los gases provenientes de aguas residuales municipales y/o industriales.

Por estas razones, en muchos países industrializados existen regulaciones específicas y estrictas sobre el control de las emisiones olorosas que tienen como objetivo principal la conservación del recurso aire y la protección de la salud de la población. En el Perú, la legislación sobre la calidad del aire está conformada principalmente por el D.S. N° 003-2008-MINAM del Ministerio del Ambiente que establece los Estándares de Calidad Ambiental para el Aire. Sin embargo, aún no existe una norma específica que regule los Límites Máximos Permisibles de las emisiones olorosas procedentes de sistemas de recolección y tratamiento de aguas residuales.

Los métodos de tratamiento convencionales en fase vapor utilizados para remover el H_2S en los gases de alcantarillado son el carbón activado y los lavadores químicos. Sin embargo, estas tecnologías presentan algunas desventajas como son mayores costos de operación y el uso de productos químicos⁵⁸. Por estos motivos, en los últimos años, la biofiltración ha surgido

como una de las principales tecnologías para la remoción de olores por ser efectivo, económico y amigable con el medio ambiente.

Los biofiltros percoladores tratan concentraciones de H_2S entre 50 y 100 ppm debido a la alta porosidad y resistencia de las medias de filtración, lo que origina una menor pérdida de carga y permite operar con mayores cargas contaminantes¹⁸. Los biofiltros percoladores requieren la aplicación de una solución acuosa que es rociada sobre el material filtrante que usualmente son materiales sintéticos o inorgánicos tales como plástico, poliuretano o arcilla. En la actualidad, aun se vienen desarrollando numerosos estudios en biofiltros para establecer los modelos matemáticos y predecir la remoción de H_2S y COV¹⁸.

En esta tesis, el objetivo principal fue investigar, a escala real, la eficiencia de remoción de olores en un biofiltro percolador con media de arcilla expandida instalado en la estación de bombeo de aguas residuales CBD 326-2 en el distrito de Villa El Salvador. La investigación se enfocó en determinar la eficiencia de remoción de H_2S modificando la carga másica de ingreso y el tiempo de contacto de gas.

Por otro lado, en esta tesis se contempla aspectos específicos asociados al control de olores en las emisiones de los sistemas de recolección de aguas residuales. El capítulo 3 corresponde al marco teórico y marco conceptual donde se ha desarrollado temas como la generación del H_2S , las tecnologías de control de olores así como los criterios de diseño de los sistemas de biofiltración y los factores que afectan esta tecnología. Asimismo, en el capítulo 4 se describe la metodología de la investigación y las actividades realizadas para la instalación, puesta en marcha, operación y evaluación del biofiltro percolador.

Finalmente, en los capítulos 5 y 6 se presenta y discute los resultados obtenidos de la investigación así como las conclusiones y recomendaciones sobre esta tecnología de control de olores.

2. INFORMACION PRELIMINAR

2.1 Antecedentes bibliográficos

- **Cox, H., Deshusses, M. et al. (2002)** con el estudio “*Odor and VOC treatment by biotrickling filters: pilot scale studies at the Hyperion Treatment plant*”. Un biofiltro percolador a escala piloto fue instalado en la planta de tratamiento de aguas residuales Hyperion en Los Ángeles para estudiar la remoción de H₂S y COV en las emisiones provenientes de la cámara de rejillas. La capacidad del biofiltro fue de 600 m³.h⁻¹ y los gases olorosos contenían concentraciones de H₂S que variaron entre 10 y 50 ppm mientras que las concentraciones de COV fueron de hasta 150 ppb.

Los resultados obtenidos indicaron que la operación del biofiltro percolador con un tiempo de contacto de gas de 24 segundos permitió alcanzar una eficiencia de remoción de H₂S y tolueno de 98% y 36% respectivamente. Asimismo, en este estudio se determinó que la capacidad de eliminación promedio de H₂S fue de 5.2 g.m⁻³.h⁻¹.

- **Deshusses, M.; Cox, H. (2002)** con la investigación “*Co-treatment of H₂S and toluene in a biotrickling filter*”. En este estudio se diseñaron 2 biofiltros percoladores, a escala de laboratorio, con media de filtración de anillos de polipropileno para tratar un flujo de aire de 1 m³.h⁻¹ cada uno. Los biofiltros fueron operados con concentraciones de H₂S de hasta 170 ppm y tolueno de 2.2 g.m⁻³, pH de 4.5 y 7.0 y un tiempo de contacto de gas de 36 segundos para determinar la influencia del pH en la capacidad de eliminación.

Los resultados obtenidos demostraron que el H₂S y tolueno pueden ser tratados efectivamente en forma simultánea, independiente del pH. A concentraciones de ingreso de H₂S de hasta 50 ppm, la eficiencia de remoción fue de 99% para ambos valores de pH. Sin embargo, cuando la concentración de ingreso se incrementó a 70 ppm, el biofiltro con pH de 4.5 resultó más estable debido a que la eficiencia de remoción de H₂S solo

disminuyó hasta 95%. Asimismo, en esta investigación se determinó que la capacidad de eliminación máxima de H₂S y tolueno fue de 20 y 70 g.m⁻³.h⁻¹ respectivamente.

- **Shareefdeen, Z., Herner, B. et al (2003)** con el estudio "*Hydrogen sulfide removal in synthetic media biofilter*". En esta investigación se evaluó un biofiltro percolador con media inorgánica sintética, con capacidad de 2,720 m³.h⁻¹ que fue instalado para tratar los gases generados en una estación de bombeo de aguas residuales en Ontario (Canadá).

Los resultados obtenidos indicaron que biofiltro percolador necesitó de un tiempo de contacto de gas de 30 segundos para tratar concentraciones promedio de H₂S de hasta 40 ppm y alcanzar una eficiencia de remoción consistente mayor a 99%.

- **Gabriel, D. Deshusses, M. (2003)** con la investigación "*Performance of a full biotrickling filter treating H₂S at gas contact time of 1.6 to 2.2 seconds*". En este estudio se operó un biofiltro percolador con espuma de poliuretano que trataba un flujo de aire de 16,000 m³.h⁻¹ procedentes de las bombas tipo tornillo, ubicado al ingreso de la planta de tratamiento de aguas residuales Fountain Valley (California).

Los resultados indicaron que en la operación del biofiltro percolador con un tiempo de contacto de 1.6 segundos y concentraciones de ingreso de H₂S de 30 ppm se alcanzó una remoción de 98%. Al incrementar el tiempo de contacto a 2.2 segundos y tratando concentraciones de ingreso de H₂S de 60 ppm, la eficiencia de remoción de H₂S disminuyó a 90%. Por otro lado, el pH en el biofiltro percolador se mantuvo entre 1.5 y 2.2 y se controló con la aplicación de una solución acuosa con nutrientes.

2.2 Descripción de la realidad problemática

Actualmente, en muchos lugares de nuestro país, el medio ambiente ha sido afectado por el desarrollo de actividades extractivas, productivas y de servicios que no han aplicado medidas adecuadas de manejo ambiental y que se reflejan en la contaminación del agua, del aire y del suelo.

Las políticas ambientales de calidad de aire y la normativa vigente están enfocadas mayormente a la regulación de las emisiones de gases asociados al transporte vehicular como el plomo, monóxido de carbono, dióxido de azufre y arsénico. La contaminación del aire por malos olores ha sido un tema tratado sólo tangencialmente dentro de las políticas ambientales. Por esta razón, al igual que muchos países de Latinoamérica, hasta la fecha, en nuestro país no existe una norma específica que establezca los Límites Máximos Permisibles (LMP) para las emisiones olorosas, especialmente de fuentes potenciales como son los sistemas de recolección y de tratamiento de aguas residuales domésticas.

Las Empresas Prestadoras de Servicios de saneamiento (EPS) tienen a su cargo la gestión de los servicios de producción y distribución de agua potable, sistemas de recolección, tratamiento y disposición de aguas servidas y de lluvias. El sector saneamiento peruano presenta dos problemas centrales: una prolongada falta de inversiones que impide ampliar la cobertura de los servicios de agua potable y alcantarillado; y una deficiente gestión de las empresas prestadoras, cuyas causas se relacionan con la interferencia política en la toma de decisiones. Estos problemas han determinado que el sector saneamiento se encuentre en niveles muy bajos de eficiencia en Latinoamérica.

Ante este panorama, la gran mayoría de Empresas Prestadoras de Servicios de Saneamiento no destinada inversiones o realiza proyectos para controlar los gases olorosos que se generan en los sistemas de recolección y tratamiento de aguas residuales, ocasionando molestias a la población aledaña y riesgo al personal de operación. Las pocas instalaciones que tienen equipos de carbón activado y biofiltros orgánicos

vienen presentando algunos problemas debido al diseño empírico, la falta de conocimiento o selección inadecuada de estas tecnologías.

Los gases generados en las instalaciones de aguas residuales domésticas usualmente están compuestos por el H_2S y su exposición puede tener efectos adversos sobre la salud del ser humano. La exposición continúa a bajas concentraciones (< 15 ppm) generalmente causa irritación en la membrana mucosa, dolores de cabeza y náuseas mientras que la exposición a altas concentraciones (200-300 ppm) puede resultar en paro respiratorio, coma o inconsciencia e inclusive la muerte.

Por lo expresado, este problema se presenta en distintos lugares como por ejemplo en el distrito Villa El Salvador donde las principales fuentes de contaminación identificadas corresponden a las actividades desarrolladas por la población como son el parque automotor y vehículos de transporte (Fuentes móviles), industrias, comercio y sistemas de recolección y tratamiento de aguas residuales (Fuentes fijas).

2.3 Formulación del problema

¿En qué medida la aplicación de un biofiltro percolador con arcilla expandida influye en la remoción del sulfuro de hidrógeno?

2.4 Justificación de la investigación

La presente investigación ha considerado un tema poco estudiado en nuestro país que corresponde a la contaminación atmosférica por los malos olores generados en los sistemas de recolección de aguas residuales. Además, existe escasa información sobre la aplicación de las tecnologías para el control de olores en este tipo de instalaciones.

Por las razones expuestas, la presente investigación se enfocó en determinar el grado de influencia de la aplicación de un biofiltro percolador con arcilla expandida en la remoción de H_2S en los gases generados en una estación de bombeo de aguas residuales en el distrito de Villa El Salvador.

Los resultados de este estudio han generado información local sobre el diseño de esta tecnología para el control de olores así como se verificó los parámetros operación óptima, su eficiencia y los costos requeridos para su implementación en otros proyectos similares. Del mismo modo, el estudio permitió el entrenamiento del personal de las Empresas Prestadoras de Servicios sobre la operación y mantenimiento del biofiltro percolador.

2.5 Objetivos

2.5.1 Objetivo general

- Determinar la eficiencia de remoción de H_2S en un biofiltro percolador con arcilla expandida en la estación de bombeo desagües CBD 326-2 en el distrito de Villa El Salvador.

2.5.2 Objetivos específicos

- Realizar la instalación, arranque y puesta en marcha de un biofiltro percolador a escala real.
- Establecer la influencia del tiempo de contacto de gas en la remoción de H_2S en el biofiltro percolador con arcilla expandida.
- Determinar la capacidad de eliminación máxima de H_2S en el biofiltro percolador.
- Monitorear los parámetros que influyen en el proceso de biofiltración y en la remoción de H_2S .
- Determinar los costos de inversión, operación y mantenimiento del biofiltro percolador.

2.6 Hipótesis

2.6.1 Hipótesis general

- La aplicación de un biofiltro percolador con arcilla expandida en una estación de bombeo de desagües influye en la remoción de H_2S .

2.6.2 Hipótesis específicas

- La correcta instalación, arranque y puesta en marcha de un biofiltro percolador a escala real influye en la remoción de H₂S.
- El tiempo de contacto de gas influye directamente en la remoción de H₂S en el biofiltro percolador con arcilla expandida.
- La capacidad de eliminación máxima se relaciona en la eficiencia de remoción de H₂S en el biofiltro percolador.
- El monitoreo de los parámetros influyen significativamente en el proceso de biofiltración y en la remoción de H₂S.
- Los costos de inversión, operación y mantenimiento del biofiltro percolador influyen en la remoción de H₂S.

2.7 Variables e indicadores

Las variables e indicadores de la presente investigación se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Variables e indicadores de la investigación

Variables	Indicadores
V1: Aplicación de un biofiltro percolador	<ul style="list-style-type: none"> • Arcilla expandida (media de filtración) • Tiempo de contacto de gas • Capacidad de eliminación • Costos de operación y mantenimiento
V2: Remoción de H ₂ S	<ul style="list-style-type: none"> • Concentración de H₂S en el aire purificado • Flujo de aire purificado • Cumplimiento de normas

Fuente: Elaboración propia

2.8 Unidad de análisis

La unidad de análisis fue el biofiltro percolador con arcilla expandida, instalado en la estación de bombeo de aguas residuales CBD 326-2 en el distrito de Villa El Salvador.

La frecuencia de evaluación de los parámetros de control en el biofiltro percolador se realizó según el programa de monitoreo indicado en el capítulo 4 "*Materiales y métodos*".

2.9 Tipo y nivel de investigación

La presente tesis es una investigación tipo aplicada con nivel experimental.

2.10 Período de análisis

El período total de la investigación correspondió a 161 días e incluyó la instalación y montaje, puesta en marcha y evaluación del biofiltro percolador para diversas condiciones de operación.

2.11 Técnicas e instrumentos utilizados

En la presente tesis se utilizó como técnica los métodos analíticos y el uso de equipos portátiles para obtener los datos necesarios según los objetivos de la investigación. Los procedimientos y las técnicas para la medición de la concentración de H₂S y la determinación de los parámetros físico-químicos en las muestras de agua y gases se describen en capítulo 4 "*Materiales y métodos*". Por otro lado, los instrumentos utilizados fueron las hojas de análisis y registros donde se anotaron todos los datos generados durante la investigación.

2.12 Procesamiento de datos

El procesamiento de datos se realizó utilizando los métodos estadísticos para determinar los valores promedio, mínimo, máximo y desviación estándar de los parámetros de control del proceso de biofiltración tales como concentración de H₂S, sulfatos, temperatura, pH y humedad.

Los resultados obtenidos permitieron contrastar con la hipótesis planteada y establecer las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Generación de olores en sistemas de alcantarillado

La generación de olores en la mayoría de los sistemas de alcantarillado se encuentran estrechamente correlacionados con el gas Sulfuro de Hidrógeno que se genera, principalmente, por la actividad de degradación microbiológica y la reducción del azufre o sulfatos que contienen las aguas residuales domésticas⁷⁴.

El monitoreo de ciertos parámetros en las aguas residuales pueden proporcionar información útil acerca de la potencial liberación de olores, además esta información es utilizada para desarrollar estrategias destinadas a minimizar la generación de compuestos olorosos en la fase líquida.

En la tabla 3.1 se indican los parámetros que podrían ser monitoreados en las aguas residuales¹⁹. Los cambios en estos parámetros pueden afectar la ocurrencia de compuestos olorosos y su transferencia a la fase gaseosa.

Tabla 3.1: Parámetros en las aguas residuales que afectan la ocurrencia de olores

Parámetro	Interpretación
Sulfuro total y disuelto	El sulfuro disuelto de 1.0 a 1.5 mg.L ⁻¹ resultaría típicamente en un incremento de olor. Los sulfuros disueltos son usualmente de 70 a 90% del sulfuro total.
pH	A valores de pH bajo, los ácidos débiles tales como el H ₂ S pueden ser más fácilmente liberados a la atmosfera. El pH de 1 a 6 es propicio para la generación y liberación de H ₂ S.
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	Las aguas residuales con alta demanda de oxígeno consumen rápidamente el oxígeno disuelto disponible y crean condiciones anóxicas o anaerobias que permiten la formación de sulfuros.
Oxígeno disuelto	Las aguas residuales con concentraciones de oxígeno disuelto de por lo menos 1.0 mg.L ⁻¹ son deseables para prevenir la generación de sulfuros.

Tabla 3.1: Parámetros en las aguas residuales que afectan la ocurrencia de olores (Continuación)

Parámetro	Interpretación
Sulfatos	Las concentraciones promedio de sulfato en aguas residuales municipales varían de 30 a 250 mg.L ⁻¹ . Las bacterias reducen el sulfato a sulfuro durante sus reacciones de descomposición anaerobias.
Temperatura	El incremento de temperatura favorece la generación bioquímica de sulfuros y disminuye su solubilidad.

Fuente: WEF (2008)

3.2 Compuestos causantes de olores

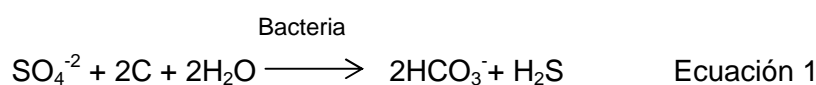
Las sustancias olorosas emitidas de los colectores de aguas residuales domésticas y procesos de tratamiento incluyen gases orgánicos e inorgánicos. Aunque ambas clases de compuestos, típicamente son producidos como resultado de la actividad biológica, los vapores orgánicos también se originan por la descarga directa de residuos químicos.

Muchos de los compuestos olorosos orgánicos resultan de la descomposición anaerobia de la materia orgánica que contiene azufre y nitrógeno; sin embargo, los olores también son generados por la descomposición aerobia y métodos de procesamiento de lodos que incluyen el tratamiento térmico.

Los gases comúnmente referidos como “gases de alcantarillado” usualmente contienen dióxido de carbono, metano, sulfuro de hidrógeno y amonio, siendo estos dos últimos, los compuestos más olorosos. A menudo, los gases de alcantarillado contienen otros compuestos olorosos en concentraciones menores como los mercaptanos, sulfuros orgánicos y aminas.

3.2.1 Sulfuro de hidrógeno

El sulfuro de hidrógeno (H₂S) es el gas oloroso más común en los colectores y sistema de tratamiento de aguas residuales y es generado de la reducción biológica del sulfato (SO₄⁻²) o tiosulfato bajo condiciones anaerobias. La bacteria desulfovibrio, que son estrictamente anaerobias, son responsables de la mayor reducción de sulfato a sulfuro de acuerdo con la siguiente ecuación:



En la figura 3.1 se muestra los procesos que ocurren en la generación del sulfuro de hidrógeno en los sistemas de alcantarillado. Como se observa en esta figura, existe una capa pegajosa biológicamente activa que generalmente contiene 3 zonas distintas.

Si las aguas residuales contienen concentraciones de oxígeno disuelto alrededor de 1 mg.L⁻¹, una zona aerobia existirá cerca de la masa líquida y la tasa de ingreso de oxígeno molecular por difusión estará balanceada con la demanda de oxígeno. Debajo de esta zona, existirá una región anaerobia en que la concentración del ión sulfato soluble soporta las actividades de las bacterias sulfato-reductoras. En condiciones estáticas, la zona de producción de sulfato estará regulada por los procesos de difusión del sulfato de la región aerobia y la demanda de las bacterias sulfato-reductoras. Adicionalmente, existirá una capa inerte donde habitan las bacterias fermentativas y donde se acumulan otros subproductos del proceso anaerobio.

La condición encontrada en la capa viscosa indica que los sulfuros que se difunden de la zona anaerobia pueden ser oxidados en la zona aerobia antes que se genere el sulfuro de hidrógeno y escape hacia la superficie libre del colector.

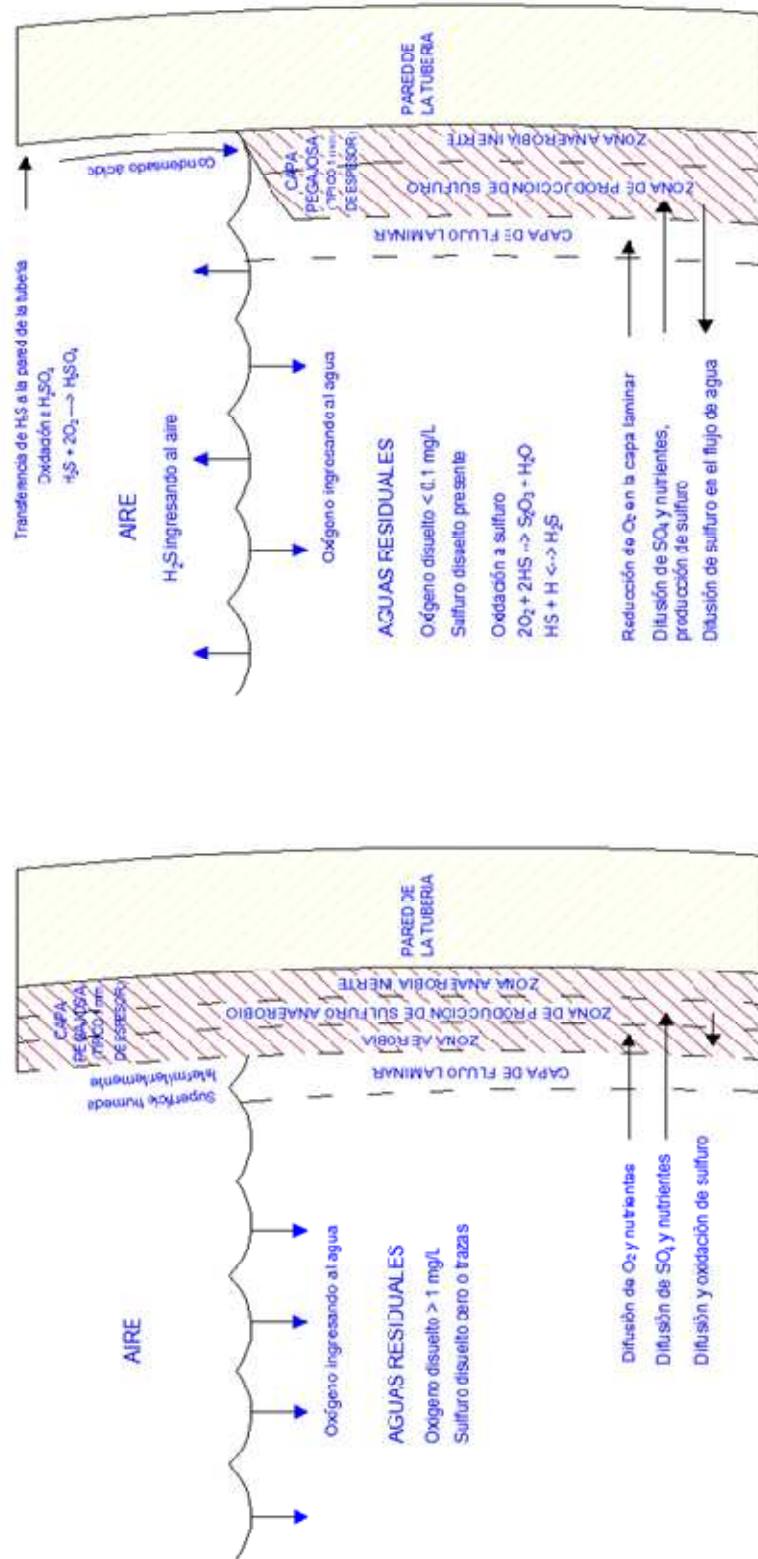


Figura 3.1: Representación esquemática de los procesos físicos, químicos y biológicos responsables de la generación de Sulfuro de hidrógeno en colectores (ASCE, 1989)

Cuando las aguas residuales contienen concentraciones de oxígeno disuelto cercano a cero, el ingreso de oxígeno molecular en la capa pegajosa no puede soportar el mantenimiento de la zona aerobia y el sulfuro producido en la zona anaerobia se difunde hacia la solución y se acumula en la fase líquida. Esta condición ocasiona la generación del sulfuro de hidrógeno que posteriormente escapa hacia la fase gaseosa y causa los problemas de olores. Asimismo, el sulfuro de hidrógeno al combinarse con el oxígeno del aire produce el ácido sulfúrico que ataca las paredes de las tuberías y origina problemas de corrosión.

El sulfuro de hidrógeno es un gas incoloro, potencialmente tóxico con un olor característico a huevos podridos que es percibido a muy bajas concentraciones. En la tabla 3.2 se resume las principales características de este gas.

Tabla 3.2: Características del Sulfuro de Hidrógeno

Parámetro	Valor	Unidad
- Peso molecular	34.08	
- Presión de vapor, -0.4 °C	10	atm
25.5 °C	20	atm
- Gravedad específica (vs. Aire)	1.19	
- Umbral de detección de olor	Aprox. 1	ppbv
- Umbral de reconocimiento de olor	Aprox. 5	ppbv
- Característica de olor	Huevos podridos	
- Límite de exposición promedio - 8 horas (TWA)	10	ppbv
- Amenaza inminente a la vida (IDLH)	300	ppbv

Fuente: WEF (2004)

El gas sulfuro de hidrógeno es moderadamente soluble en el agua como una molécula no disociada y en forma de sulfuro (S^{2-}) o iones de hidrosulfuro (HS^-). La distribución relativa de estas especies depende en gran parte del pH, predominando la forma molecular a pH más bajo y la forma de sulfuro a valores de pH altos.



El pH de las aguas residuales tiene un rol importante en la determinación de la cantidad molecular del gas H_2S disponible para ser liberado en la atmósfera del colector tal como se muestra en la figura 3.2. A pH 6.0, más del 90% del sulfuro disuelto está presente como gas disuelto mientras que a pH 8.0, menos del 10% está disponible como gas para liberación de las aguas residuales. Por lo tanto, el decrecimiento de una unidad de pH en las aguas residuales puede incrementar significativamente la liberación del gas H_2S , causando problemas potenciales de olores y corrosión. Otro factor importante que afecta la liberación del H_2S es la turbulencia que incrementa dramáticamente las emisiones de H_2S , especialmente en la descarga de buzones, cámaras de reunión y canales.

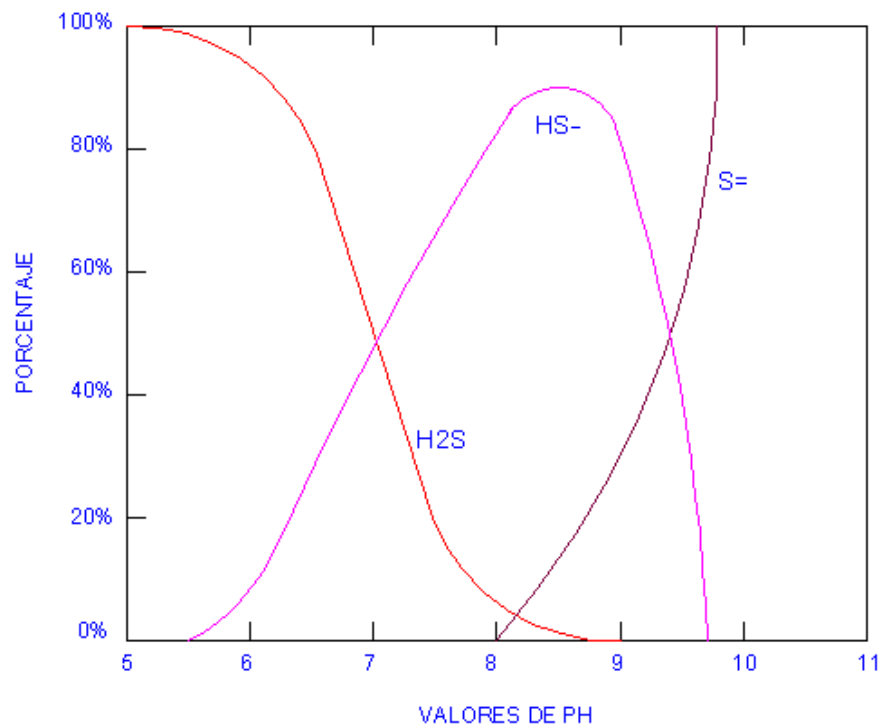


Figura 3.2: Efecto del pH en el equilibrio del Sulfuro de hidrógeno (Sawyer, 1967)

La corrosión es un problema significativo como resultado de la presencia del H_2S que ataca directamente a los metales tales como fierro, acero y cobre. Más aún, el H_2S es biológicamente oxidado a ácido sulfúrico por la bacteria *Thiobacillus* en presencia de humedad. Esto ocurre en la clave de las tuberías de concreto y en las paredes de las cámaras húmedas, buzones y cámaras de reunión que tienen humedad pero no están continuamente sumergidos. Los problemas de olores y corrosión están a menudo vinculados y cualquier estudio en un sistema de alcantarillado debería investigar ambos aspectos.

3.2.2 Compuestos de azufre orgánicos

Las aguas residuales expuestas a condiciones anaerobias generan otros compuestos de azufre reducidos que pueden contribuir a las características de los olores.

En el transporte de las aguas residuales y en los procesos de tratamiento, los compuestos de azufre orgánicos tales como el Metil mercaptano y Sulfuro de Dimetilo, son probablemente de menor importancia que el H_2S pero están presentes en bajas concentraciones. Sin embargo, en los procesos de homogenización y deshidratación de lodos, los compuestos de azufre – no el H_2S - llegan a ser más importantes, resultando en el olor dominante. Algunos de estos compuestos son menos solubles que el H_2S y resulta más difícil de controlar por lo cual se requieren usualmente múltiples etapas de tratamiento para alcanzar una reducción aceptable.

En la tabla 3.3 se detalla algunos de estos compuestos que contribuyen a los olores de las aguas residuales. Al igual que el H_2S , la turbulencia promueve la liberación de estos compuestos olorosos del líquido hacia el aire. En una planta de tratamiento de aguas residuales, las áreas potenciales de emisiones de olores son los vertederos, tanques de agitación y cámaras de reunión.

Tabla 3.3: Compuestos olorosos de azufre en las emisiones de aguas residuales

Compuestos de azufre volátiles	Fórmula	Peso molecular	Olor característico	Umbral de olor (ppbv)
Sulfuro de hidrógeno	H ₂ S	34	Huevos podridos	0.45-500,000
MetilMercaptano	CH ₃ SH	48	Col descompuesta, ajos	0.0014-21
EtilMercaptano	C ₂ H ₅ SH	62	Col descompuesta	0.01-0.2
Sulfuro de Dimetilo	CH ₃ SCH ₃	62	Vegetalesdescompuesto	0.12-2.5
Disulfuro de Dimetilo	CH ₃ S ₂ CH ₃	94	Vegetales descompuesto	0.1-15.5
Disulfuro de carbono	CS ₂	76	Rábanos podridos	0.3-210
Dióxido de azufre	SO ₂	64	Acre, irritante,acido	9-870
Tiofenol	C ₆ H ₅ SH	110	Ajos podridos	0.062

Fuente: WEF (1979)

3.2.3 Amonio y compuestos de nitrógeno

Las aguas residuales domésticas contienen varias formas de nitrógeno como el amonio o nitrógeno orgánico. El amonio usualmente se encuentra en concentraciones de 12 a 50 mg.L⁻¹. La insuficiente cantidad de amonio en los gases liberados de las aguas residuales a pH neutro, contribuyen poco en las emisiones olorosas debido a que los olores son típicamente dominados por los compuestos de azufre³⁹. Por consiguiente, una etapa de remoción de amonio es raramente necesaria para tratar las emisiones de los procesos de tratamiento de aguas residuales, a menos que cal u otro material alcalino sea utilizado para incrementar el pH.

En el tratamiento de lodos mediante estabilización con cal o en los procesos a alta temperatura como el compostaje, se origina la liberación de amonio y otros compuestos nitrogenados que resulta ser en un factor significativo. La digestión anaerobia y la digestión aerobia termofílica autotermal también causan la generación y liberación de amonio y aminas que son característicos por su olor a pescado. Las aminas identificadas en los procesos de estabilización de lodos que operan con pH entre 10 y 12 son la Dimetilamina y Trimetilamina.

En la tabla 3.4 se indica algunas de las características de los compuestos olorosos nitrogenados. El rango de concentraciones reportado entre los investigadores es amplio y variable debido a que en la determinación del umbral de olores se utilizan panelistas humanos y métodos experimentales.

Tabla 3.4: Compuestos olorosos de nitrógeno en las emisiones de aguas residuales

Compuestos nitrogenados	Fórmula	Peso molecular	Olor característico	Umbral de olor (ppbv)
Amonio	NH ₃	17	Acido, acre	130 - 15,300
Metilamina	CH ₃ NH ₂	31	Putrefacto, pescado	0.9 - 53
Etilamina	C ₂ H ₅ NH ₂	45	Amoniaco	46 - 2,400
Dimetilamina	(CH ₃) ₂ NH	45	Pescado	20 - 80
Trimetilamina	(CH ₃) ₃ N	59	Pescado	
Piridina	C ₆ H ₆ N	79	Desagradable, irritante	4 - 2,000
Indol	C ₂ H ₆ NH	117	Fecal, nauseabundo	0.1 - 1.5
Escatol	C ₉ H ₉ N	131	Fecal, nauseabundo	0.002 - 0.06

Fuente: IWA (2011), WEF (1979)

3.2.4 Compuestos Orgánicos Volátiles (COV)

Los flujos o carga industrial descargados en los sistemas de recolección y tratamiento de aguas residuales municipales pueden contribuir al incremento de las emisiones de olores e inclusive cambiar el olor característico de los gases de alcantarillado.

Las descargas industriales significativas pueden causar una característica única de olor en las emisiones de los procesos de tratamiento líquido. Los compuestos olorosos generados en industrias de procesos como saborizantes sintéticos y fábricas de pinturas, papeleras, industria farmacéutica y refinerías son conocidos como Compuestos Orgánicos Volátiles (COV). Según la U.S. EPA, los COV son aquellos compuestos orgánicos que tienen una presión de vapor que excede de 0.1 mm de mercurio en condiciones estándar (20 °C y 760 mm Hg).

Los COV incluyen una variedad de compuestos químicos que pueden ocasionar, en el corto o largo plazo, efectos adversos en la salud. Por tal razón, varios investigadores identifican a los COV, junto con el H₂S, como el mayor problema de olores asociado a los sistemas de alcantarillado y plantas de tratamiento de aguas residuales ⁶².

3.2.5 Otros compuestos olorosos

Aunque muchas de las caracterizaciones y control de olores están enfocados en compuestos de azufre y, en menor grado, a compuestos de nitrógeno, existen otros compuestos presentes en las aguas residuales y lodos que pueden contribuir a este problema.

En la tabla 3.5 se indica otras clases de compuestos olorosos que incluyen Ácidos Grasos Volátiles (AGV), Aldehídos y Cetonas. Aunque estos compuestos contribuyen a este problema, rara vez son el olor dominante.

Tabla 3.5: Otros compuestos olorosos en las emisiones de aguas residuales

Compuesto	Fórmula	Peso molecular	Olor característico	Umbral de olor (ppbv)
Ácidos				
Acido Acético	CH ₃ COOH	60	Vinagre	0.16
Acido Butírico	CH ₃ (CH ₂) ₂ COOH	74	Rancio	0.09 - 20
Aldehídos y cetonas				
Formaldehido	HCHO	30	Acre	50-370
Acetaldehído	CH ₃ CHO	44	Fruta, manzana	0.005-120
Butiraldehído	C ₂ H ₅ CHO	72	Rancio, sudoroso	4.6-5
Isobutiraldehido	(CH ₃) ₂ CHCHO	86	Fruta	4.7 - 7.0
Valeraldehído	C ₄ H ₉ CHO	72	Fruta, manzana	0.7-9
Hexanal	C ₆ H ₁₂ O	86	Vegetales, grasa	0.01-5
Butanona	C ₂ H ₅ COCH ₃	58	Manzana verde	270
Fenol	C ₆ H ₅ OH	86	Alquitrán	4.5-5900

Fuente: WEF (2004), Verschueren (1983)

3.3 Fuentes de emisiones de olores en sistemas de recolección

El diseño de los sistemas de recolección de desagües, generalmente consisten de una combinación de tuberías de impulsión, colectores por gravedad, sifones invertidos y tuberías de descargas industriales. Cada uno de estos componentes comúnmente resultan ser fuentes potenciales de liberación de emisiones olorosas.

3.3.1 Colectores por gravedad

Muchos colectores por gravedad transportan aguas residuales sépticas que contienen H_2S sin tener problemas de olores hasta que el afluente llega a la planta de tratamiento. Sin embargo, en otros casos, los colectores pueden transportar aguas residuales relativamente frescas que están sujetas a problemas de olores debido a la presurización de la atmósfera en la tubería lo que origina que el aire oloroso escape por los buzones, respiraderos y otras estructuras.

Las condiciones de presurización pueden resultar en sifones invertidos, estructuras de caídas, descarga de tuberías de impulsión y en la reducción del diámetro de tuberías.

3.3.2 Tuberías de impulsión

Las tuberías de impulsión están asociadas a la generación de sulfuro de hidrógeno y otros compuestos olorosos. Debido a que la tubería está bajo presión y completamente lleno con las aguas residuales, no existe ingreso de oxígeno en la superficie libre y las condiciones anaerobias se pueden desarrollar rápidamente.

Las instalaciones de tratamiento de aguas residuales que reciben una significativa fracción del caudal por bombeo casi siempre tienen problemas de olores. Aún las tuberías de impulsión con tiempos de retención menores a 1 hora originan problemas de olores y corrosión.

La descarga de las tuberías de impulsión en buzones, cámaras húmedas o cámaras de reunión genera turbulencia y la caída de presión promueve la rápida liberación del H_2S y otros gases en la atmósfera del colector.

Aunque la mayor generación de sulfuro resulta en la capa pegajosa adherida en la pared de la tubería, también ocurre en los depósitos orgánicos en el fondo de la tubería. En las tuberías de impulsión puede ocurrir una significativa acumulación de sedimentos y compactación de sólidos orgánicos, especialmente en instalaciones donde el funcionamiento de las bombas no es frecuente. La velocidad de las aguas residuales alrededor de $0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ es usualmente considerada como la velocidad mínima para mantener los sólidos en suspensión. Sin embargo, velocidades de $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pueden ser necesarias en tuberías de gran diámetro para prevenir la sedimentación de sólidos⁷⁵.

3.3.3 Estaciones de bombeo

Las estaciones de bombeo usualmente son considerados una fuente potencial de liberación de olores. En estaciones pequeñas, el punto de liberación del olor puede ser a través de una tubería de ventilación simple que descarga el aire oloroso cuando la cámara húmeda está llena. En estaciones grandes, la cámara húmeda puede estar continuamente ventilada hacia la atmósfera. Si las aguas residuales contienen sulfuros disueltos se producirán altas concentraciones de H_2S en la atmósfera de la cámara húmeda e incrementarán la intensidad de olores.

Aunque las cámaras húmedas son a veces consideradas como fuente de generación de sulfuros, no es del todo cierto a menos que el período de detención sea prolongado (> 30 minutos). Generalmente, la mayor generación de sulfuro ocurre en el ingreso de la tubería de impulsión aguas abajo.

3.3.4 Descargas industriales y comerciales

Las descargas comerciales o industriales pueden intensificar los problemas de olores en los sistemas de alcantarillado y plantas de tratamiento. En muchos casos, las emisiones de olores se incrementan indirectamente como resultado de una alta descarga de DBO o residuos con alta temperatura que causan el agotamiento del oxígeno disuelto y una rápida generación de sulfuros.

Las descargas de aguas industriales con DBO₅ mayor a 1,000 mg/L procedentes de camales, cervecerías, plantas de tostado de café, industrias textiles o fábricas de alcohol, incrementan dramáticamente la tasa de generación de sulfuro y usualmente tienen un efecto en la generación de olores en el sistema de recolección receptor. Las descargas de lodos provenientes de las plantas de tratamiento también contribuyen e incrementan las emisiones de olores en los sistemas de alcantarillado.

Por otro lado, algunas descargas industriales contienen compuestos olorosos inherentes que pueden impartir un olor característico a las aguas residuales. Las industrias que usan o producen químicos orgánicos o compuestos orgánicos volátiles como solventes, usualmente agravan este problema.

3.4 Mecanismo de generación del H₂S

La generación de sulfuro en las aguas residuales municipales resulta principalmente de la reducción bioquímica de los compuestos de azufre inorgánicos. En un sistema de recolección, las reacciones bioquímicas que se producen involucran la reducción del sulfato a sulfuro, la liberación del H₂S a la atmósfera y la oxidación del H₂S a ácido sulfúrico.

Existen diversos modelos matemáticos han sido desarrollados para predecir la generación de sulfuro total en los sistemas de recolección que han sido propuestos por Boon and Lister (1975), Thistlethwayte (1972), Pomeroy - Parkhurst (1985) o Hvitved - Jacobsen (1999). Sin embargo, el modelo de

Pomeroy - Parkhurst es mayormente utilizado en los colectores y líneas de impulsión debido a que presenta una mejor correlación de datos que otros modelos.

En colectores a presión o completamente lleno (Tuberías de impulsión), la predicción de sulfuro total puede ser determinado mediante la siguiente ecuación:

$$S_2 = S_1 + (M) (t) [EBOD (4/D+1.57)] \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

S_2 = Concentración de sulfuro total al tiempo t_2 (mg.L^{-1})

S_1 = Concentración de sulfuro total al tiempo t_1 (mg.L^{-1})

$t = (t_2 - t_1)$ = tiempo de tránsito en un colector con diámetro y flujo constante (h)

M = Coeficiente de flujo de sulfuro para tubos llenos (m.h^{-1})

$EBOD = DBO \text{ efectiva} = DBO \times 1.07^{(T-20)}$ (mg.L^{-1})

D = Diámetro de la tubería (m)

Los valores típicos del coeficiente de flujo de sulfuro (M) han sido determinados experimentalmente y usualmente varían entre 0.5×10^{-3} y $1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$.

En el caso de los colectores por gravedad (tubos parcialmente llenos), el modelo es más complejo debido a que se considera la generación de sulfuro como resultado de la reducción microbiológica de sulfato a sulfuro dentro de la biopelícula adherida en la superficie sumergida de la tubería. Además, el modelo considera las pérdidas de sulfuro a la atmósfera debido a la oxidación en la masa líquida. La predicción de sulfuro total en colectores por gravedad se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$S_2 = S_{lim} - \frac{(S_{lim} - S_1)}{\text{Log}^{-1} [m (sv)^{3/8} t / (2.31 \times d_m)]} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

S_2 = Concentración de sulfuro total al tiempo t_2 (mg.L^{-1})

S_1 = Concentración de sulfuro total al tiempo t_1 (mg.L^{-1})

S_{lim} = concentración de sulfuro límite = $(M'/m) \text{EBOD} (sv)^{-3/8} (P/b)$ (mg.L^{-1})

EBOD = DBO efectiva = $\text{DBO} \times 1.07^{(T-20)}$ (mg.L^{-1})

$t = (t_2 - t_1)$ = Tiempo de tránsito en un colector con flujo, pendiente y diámetro constante (h)

M' = Coeficiente flujo efectivo para la generación de sulfuro por la capa pegajosa en un colector por gravedad (m.h^{-1})

s = Pendiente (m.m^{-1})

T = Temperatura del agua residual ($^{\circ}\text{C}$)

m = Coeficiente empírico para pérdidas de sulfuro por oxidación y liberación a la atmósfera (adimensional)

v = Velocidad del agua residual (m.s^{-1})

d_m = Área de flujo dividido por ancho de superficie (m)

b = Ancho de superficie (m)

P = Perímetro mojado (m)

Los coeficientes moderadamente conservativos que pueden ser usados en aguas residuales con baja concentración de oxígeno disuelto y formación de sulfuros en proceso son los siguientes:

$$M' = 0.32 \times 10^{-3}$$

$$m = 0.96$$

3.5 Liberación de olores

La liberación de los compuestos olorosos de las aguas residuales es controlada por varios factores, incluyendo la solubilidad del gas, la temperatura, el pH y la turbulencia.

La transferencia de un compuesto oloroso del líquido a la fase gaseosa es descrita por la siguiente ecuación de transferencia de masa:

$$r_v = K_L a (C - C^*)$$

Ecuación 6

Donde:

r_v = Tasa de volatilización ($\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$)

K_L = Coeficiente de transferencia de masa ($\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$)

a = Área específica para la transferencia de masa (m^2)

C = Concentración del compuesto volátil en el aire ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)

C^* = Concentración del compuesto volátil en el agua en equilibrio con la fase gaseosa ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)

La Ley de Henry predice la concentración máxima del compuesto oloroso en la fase gaseosa:

$$P = Hp$$

Ecuación 7

Donde:

P = Fracción molar en la fase gaseosa

p = Fracción molar del gas disuelto en la fase líquida

H = Constante de la ley de Henry (adimensional)

3.6 Aspectos de salud y regulaciones sobre olores y gases contaminantes

El objetivo principal de las regulaciones de calidad de aire es eliminar o prevenir la ocurrencia de olores indeseables en una comunidad y así minimizar los problemas de salud en la población. Estas regulaciones ambientales tienen especial atención en el H_2S debido a sus propiedades tóxicas y corrosivas que pueden ocasionar efectos negativos, a corto y largo plazo, en la salud del ser humano.

3.6.1 Aspectos Toxicológicos del H_2S

El H_2S es un gas incoloro e inflamable, con un olor característico a huevos podridos y que es producido naturalmente o como resultado de las actividades industriales. Las fuentes naturales contribuyen con cerca del 90% del H_2S en la atmósfera y es resultado de la reducción bacteriana anaeróbica y no específica de sulfatos y sulfuros contenidos en compuestos orgánicos²⁴. Las fuentes naturales de generación de H_2S corresponden a pozos de petróleo crudo, gas volcánico, gas natural y agua subterránea.

En las actividades industriales, una de las mayores fuentes potenciales de emisiones de olores corresponde a los gases generados en los sistemas de recolección y plantas de tratamiento de aguas residuales. Estas emisiones usualmente contienen una mezcla de compuestos de azufre reducidos, siendo el H₂S el compuesto de mayor prevalencia y en mayor concentración.

El ser humano puede detectar el gas H₂S a concentraciones muy bajas – alrededor de 0.1 ppm (Tabla 3.6). Sin embargo, el aspecto más peligroso resulta de la parálisis olfativa, que significa que las personas no son capaces de detectar la presencia de este gas después de un corto período de tiempo ⁷⁸.

Tabla 3.6: Umbral e intensidad del Sulfuro de hidrógeno detectado por el ser humano

Concentración de H ₂ S	Intensidad y percepción
0.02 ppm	No olor
0.13 ppm	Mínima percepción de olor
0.77 ppm	Débil, olor detectable fácilmente
4.6 ppm	Olor detectable fácilmente, olor moderado
27.0 ppm	Fuerte, olor desagradable pero no intolerable

Fuente: Thrasher (1995)

La exposición al H₂S ocurre como consecuencia de la ubicación de las comunidades cerca a industrias o fuentes naturales que producen este gas. La inhalación es la ruta más común de exposición exógena al H₂S pero también puede ocurrir por ingestión (alimentos contaminados) y piel (agua y aire). Una vez que el H₂S ingresa al cuerpo, es rápidamente distribuido y difundido a varios órganos, incluyendo el sistema nervioso central, pulmones, hígado y músculos.

La tabla 3.7 muestra los efectos en la salud del ser humano como resultado de la exposición al H₂S. La mayoría de valores indicados corresponden a casos reportados por envenenamiento agudo, exposición ocupacional y estudios en comunidades.

Los efectos en la salud por la exposición al H₂S incluyen daños reproductivos, metabólicos, cardiovasculares, siendo los efectos oculares, neurológicos y respiratorios los más sensibles en el ser humano. La inconsciencia y muerte han sido reportadas cuando el ser humano estuvo expuesto a concentraciones prolongadas de 100 ppm.

Tabla 3.7: Efectos en la salud del ser humano a diversas concentraciones de Sulfuro de hidrógeno

Concentración de H₂S	Síntomas y efecto de salud
10 ppm	Principio de irritación de ojos
50-100ppm	Conjuntivitis ligera e irritación del tracto respiratorio después de 1 hora
100 ppm	Tos, irritación de los ojos, pérdida de sentido del olfato después de 15 minutos. Respiración alterada y somnolencia después de 30 minutos seguido de irritación de la garganta después de 1 hora. La exposición por varias horas resulta en un incremento gradual en la severidad de los síntomas y la muerte puede ocurrir en las siguientes 48 horas.
200-300ppm	Conjuntivitis notable e irritación del tracto respiratorio después de 1 hora de exposición
500-700ppm	Pérdida de conciencia y posible muerte en 30 minutos a una hora de exposición
700-1,000ppm	Inconsciencia rápida, cese de respiración y muerte
1,000-2,000ppm	Inconsciencia inmediata, con prematuro cese de respiración y muerte en pocos minutos.

Fuente: Thrasher (1995)

Muchos de los casos fatales asociados con la exposición del H₂S han ocurrido en espacios relativamente confinados; las víctimas pierden la conciencia rápidamente después de inhalar este gas a una concentración de 700 ppm. La mayoría de los casos reportados involucran el envenenamiento accidental por lo que la concentración y tiempo de exposición no se conocen con exactitud. La muerte ocurre después de la exposición a concentraciones de H₂S de 1,000 ppm y aparece como resultado de un paro respiratorio o cardíaco.

Por esta razón, la Occupational Safety and Health Administration (OSHA) y otras Agencias han establecidos concentraciones permisibles y tiempo de exposición al H₂S, especialmente en espacios confinados. Las concentraciones de gases tóxicos que un trabajador puede estar expuesto se expresan en varias formas:

- **Promedio ponderado de tiempo a 8 horas (TWA):** Es la concentración máxima promedio que un trabajador puede estar expuesto por 8 horas al día o 40 horas a la semana.
- **Límite de exposición permisible (PEL):** Es la concentración que no debe ser excedida.
- **Límite máximo:** Es la concentración límite que no es aceptable para una duración máxima específica.

La OSHA ha establecido una concentración de 20 ppm como el límite de exposición permisible (PEL) y 50 ppm como la concentración máxima por un tiempo de 10 minutos si no existe otra exposición medible. The National Institute of Occupational Safety and Health (NIOSH) establece una concentración máxima para el H₂S de 10 ppm por un tiempo de 10 minutos (Una vez por turno de 8 horas).

Es importante mencionar que las concentraciones permisibles establecidas por la OSHA y otras agencias regulatorias solo aplican para lugares de trabajo y en adultos masculinos sanos. Por lo tanto, estas regulaciones no cubren la población más sensible que incluye a ancianos, niños y personas con enfermedades preexistentes.

3.6.2 Legislación Internacional

Desde los años 70, la comunidad médica y científica comenzó a comprender los efectos crónicos nocivos de la contaminación del aire. Inicialmente, las investigaciones estuvieron enfocadas en los compuestos químicos causantes de olores, siendo los sistemas de recolección y tratamiento de aguas residuales domésticas una fuente potencial de formación y liberación de diversos compuestos, especialmente el H₂S. Las emisiones procedentes de estos sistemas ocasionan molestias y efectos negativos en la salud de la población expuesta.

Por estas razones, muchas Agencias Regulatorias de países desarrollados establecieron límites de calidad ambiental del aire para regular estos compuestos olorosos. Inicialmente, las regulaciones se enfocaron principalmente en el control del H₂S como el compuesto más importante por sus efectos tóxicos y corrosivos. Actualmente, algunas Agencias regulatorias han incluido estándares ambientales cada vez más estrictos para el H₂S y otros compuestos olorosos (Tabla 3.8).

En los años 90, la U.S. EPA elaboró las regulaciones de las emisiones de 189 sustancias químicas conocidos como "*contaminantes peligrosos del aire*". Inicialmente, estas regulaciones establecieron los límites para proteger la salud del ser humano, sin embargo, en esta misma década, los límites de COV fueron modificados con el objetivo de proteger la capa de ozono, reducir la formación de esmog y reducir el efecto del calentamiento global. Estas regulaciones son aplicadas a las fuentes principales, es decir, cualquier instalación que genere emisiones mayores a 10 toneladas anuales de un compuesto único o 25 toneladas de compuestos combinados.

Tabla 3.8: Estándares de calidad ambiental de compuestos olorosos establecidos por diversas Agencias regulatorias

Localización	Compuesto	Estándar o valor límite
Victoria (Australia)	Sulfuro de hidrógeno Metil mercaptano Amonio Cloro	0.1 ppbv ($0.14 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 0.42 ppbv ($0.84 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 830 ppbv ($600 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 33 ppbv ($100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)
Alberta (Canadá)	Sulfuro de hidrógeno Amonio	10 ppbv (1 hora) límite de calidad ambiental en el aire 200 ppbv (1 hora) límite de calidad ambiental en el aire
Quebec (Canadá)	Sulfuro de hidrógeno	10 ppbv (promedio en 1 hora)
Organización Mundial de la Salud	Sulfuro de hidrógeno	0.13 – 1.3 ppbv ($0.2 - 2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) en promedio de 30 minutos (Valor guía)
California (USA)	Sulfuro de hidrógeno	30 ppbv (promedio de 1 hora) estándar ambiental
Connecticut (USA)	Sulfuro de hidrógeno Metil Mercaptano	$6.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ $2.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
Minnesota (USA)	Sulfuro de hidrógeno	30 ppbv (promedio en 30 minutos) 50 ppbv (promedio en 30 minutos)
Nebraska (USA)	Azufre reducido total	100 ppbv (promedio en 30 minutos)
New York State (USA)	Sulfuro de hidrógeno	10 ppbv ($14 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) en promedio de 1 hora
New York City (USA)	Sulfuro de hidrógeno	1 ppbv
North Dakota (USA)	Sulfuro de hidrógeno	50 ppbv (instantáneo, dos lecturas no consecutivas de 15 minutos)
Pennsylvania (USA)	Sulfuro de hidrógeno	100 ppbv (promedio en 1 hora), 5 ppbv (promedio en 24 horas)
Texas (USA)	Sulfuro de hidrógeno	80 ppbv (promedio en 30 minutos) – residencial/comercial 120 ppbv – industrial

Fuente: Mahin (2001)

Respecto a Latinoamérica, aún no existe una norma específica que establezca límites permisibles para emisiones de compuestos olorosos como el H_2S , COV y NH_3 , provenientes de los sistemas de tratamientos de aguas municipales o industriales. Tan solo en Chile y Panamá, existen algunas experiencias y mayores avances para la regulación de la contaminación por olores.

En Chile, en el año 1999 se publicó la Norma de Emisiones de Olores Molestos para Compuestos de Sulfuro de Hidrógeno y Mercaptanos (Gases TRS) con el propósito de controlar el problema generado por las industrias de la celulosa y papel asociados a la fabricación de Pulpas Sulfatadas ¹². El objetivo de la norma es prevenir y regular la producción de olores molestos mediante el control de la emisión de gases TRS (Compuestos reducidos de azufre) provenientes de la fabricación de celulosa mediante el proceso Kraft. Los límites máximos permisibles de gases TRS establecidos son de 5, 20 y 16.8 ppmv al 8% de oxígeno en base seca si los gases se miden en la Caldera recuperadora, el horno de cal o el estanque de disolución de licor verde respectivamente.

En Panamá, en el año 2006, la Autoridad Nacional del Ambiente elaboró el Anteproyecto "Normas para el Control de Olores Molestos" con el objetivo de la protección ambiental y la salud pública, mediante el establecimiento de regulaciones y la promoción de medidas para controlar los olores molestos. En este anteproyecto se incluyeron los valores máximos permitidos de los compuestos causantes de olores en los límites de propiedad o chimeneas de salida de instalaciones, comercios, industrias o actividades que produzcan olores molestos como las plantas de tratamiento de aguas residuales ⁵. A pesar que esta norma aún no ha sido aprobada, en algunos proyectos de plantas de tratamiento y estaciones de bombeo ya se vienen instalando equipos para el control de olores.

En otros países como México y Colombia, en los últimos años, se vienen implementando tecnologías para el tratamiento de gases olorosos. En algunos estados de México, las estaciones de bombeo y plantas de tratamiento de aguas residuales como El Ahogado (Jalisco), Jocotepec, Atotonilco (México D.F.) cuentan con biofiltros o equipos de carbón activado. Por otro lado, en Colombia, las futuras plantas de tratamiento de aguas residuales Bello (Medellín) y El Salitre (Bogotá) contarán con lavadores químicos para la remoción de H₂S y otros compuestos generados en los procesos de pretratamiento y tratamiento de lodos.

3.6.3 Legislación Nacional

En nuestro país, la legislación destinada a la protección del recurso aire está conformada principalmente por los Estándares de Calidad Ambiental del Aire, un instrumento de gestión ambiental orientada a prevenir y planificar el control de la contaminación con base en una estrategia destinada a proteger la salud.

El Decreto Supremo N° 074-2001-PCM *“Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire”* del 22 de junio de 2001 estableció los niveles de concentración máxima de los contaminantes en el aire. Sin embargo, el Ministerio del Ambiente mediante el Decreto Supremo N° 003-2008-MINAM del 21 de Agosto de 2008, aprobó los nuevos *“Estándares de Calidad Ambiental para el Aire”*, tomando en consideración las nuevas evidencias halladas por la Organización Mundial de la Salud. En este Decreto se incluyó los Estándares de Calidad Ambiental de 150 µg.m⁻³ para el H₂S y 2 µg.m⁻³ para el Benceno (Anexo 8.1).

En Junio del 2003, mediante el Decreto Supremo D.S. N° 009-2003-SA se aprobó el Reglamento de los Niveles de Estados de Alerta Nacionales para Contaminantes del aire. En este decreto se establece un conjunto de medidas predeterminadas de corta duración, destinadas a prevenir el riesgo a la salud y evitar la exposición

excesiva de la población a los contaminantes del aire durante episodios de contaminación aguda. Sin embargo, mediante el D.S. N° 012-2005-SA, publicado el 10 Mayo 2005 se aprobaron los nuevos niveles de estado de alerta nacionales de contaminantes del aire que se mantienen vigentes (Anexo 8.1)

A la fecha, en nuestra legislación no se cuenta con una norma específica que regule los Límites Máximos Permisibles (LMP) en las emisiones olorosas procedentes de instalaciones de aguas residuales municipales y procesos industriales. Tan solo la industria de harina y aceite de pescado y harina de residuos hidrobiológicos así como el sector de hidrocarburos cuenta con Límites Máximos Permisibles para el H₂S, material particulado y otros compuestos que fueron aprobados mediante los Decretos Supremo 011-2009-MINAM y 014-2010-MINAM respectivamente (Anexo 8.1)

Por otro lado, la Norma OS.090 (1997) "*Reglamento para el diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales*" no considera ningún capítulo sobre los criterios de diseño para la selección de las tecnologías de control de olores. A pesar de esto, algunas empresas como SEDAPAL han definido su Política Ambiental y vienen realizando acciones como la instalación de equipos de purificación de gases en estaciones de bombeo y sistemas de pretratamiento (Cámaras de rejillas y desarenadores), con el objetivo de proteger el recurso aire y conservar la salud pública.

3.7 Métodos de control de olores

3.7.1 Tecnologías de control de olores y COV

Un aspecto importante en la selección del método más apropiado para el control de olores y COV es considerar las propiedades físicas y termodinámicas de los compuestos olorosos a tratar así como las condiciones del flujo de ingreso.

Una clasificación de las técnicas más comunes aplicadas para el control de olores, H_2S y COV se muestra en la figura 3.3. Esta clasificación considera la naturaleza de cada tecnología de control: físico, químico o biológico. Por otro lado, estas tecnologías pueden dividirse en dos grandes grupos: tecnologías de fase líquida, usadas para el control de los compuestos olorosos en las mismas aguas residuales y tecnologías de fase vapor, usadas para el control de los compuestos olorosos en el aire.

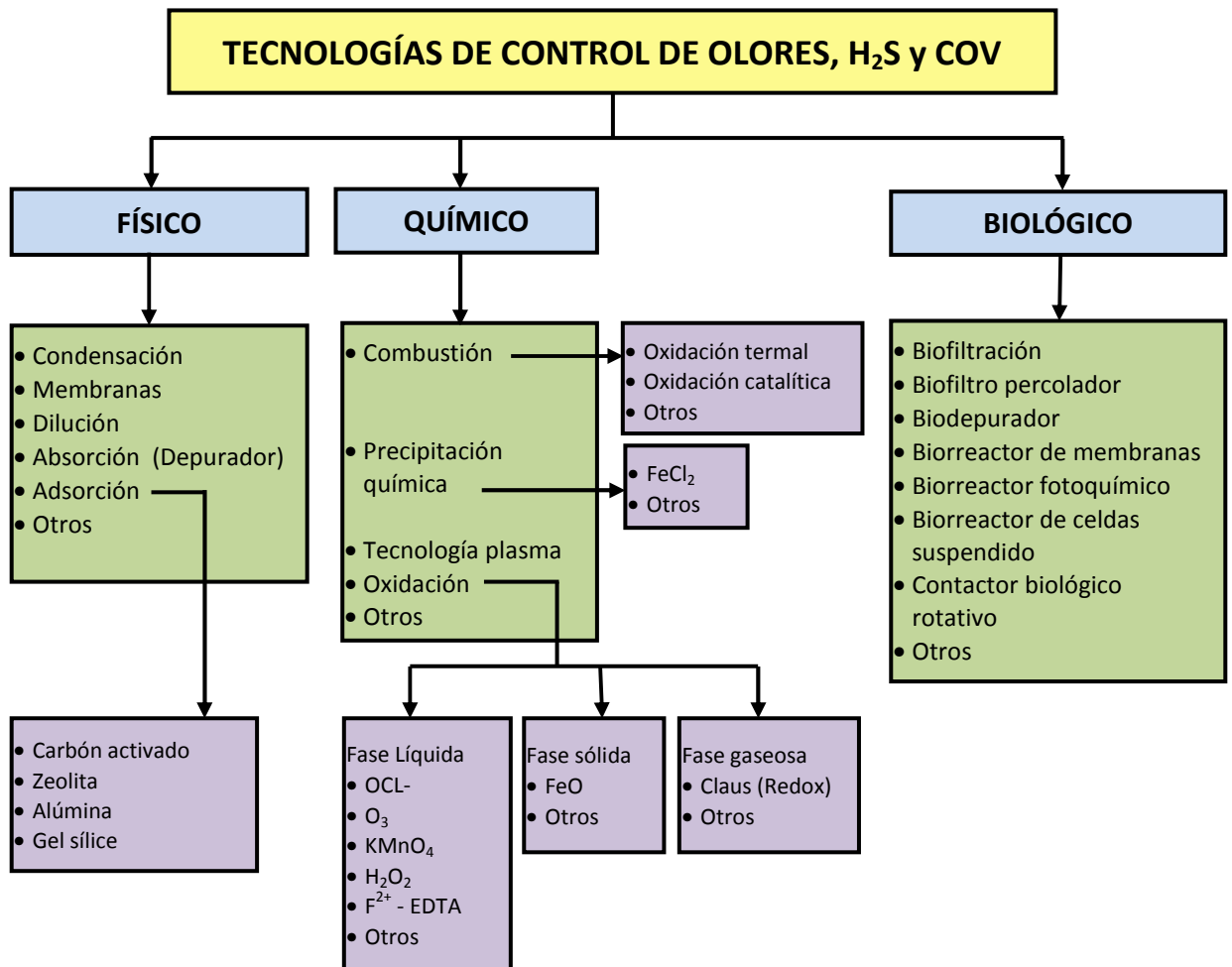


Figura 3.3: Clasificación de las tecnologías comunes de control de olores y COV (Shareefdeen, 2005)

La mayoría de los procesos físicos y químicos aplicados en fase vapor se utilizan para tratar flujos de gases con alta concentración de contaminantes. Por otro lado, los procesos biológicos pueden ser utilizados para tratar mayores flujos de gases pero con una menor concentración del contaminante. (Figura 3.4).

Los métodos biológicos son económicos, simples de operar y ecológicamente limpias en comparación con los tratamientos fisicoquímicos. Una de las ventajas más importante de esta tecnología es que pueden operar a temperaturas entre 10 °C y 40 °C y a la presión atmosférica.

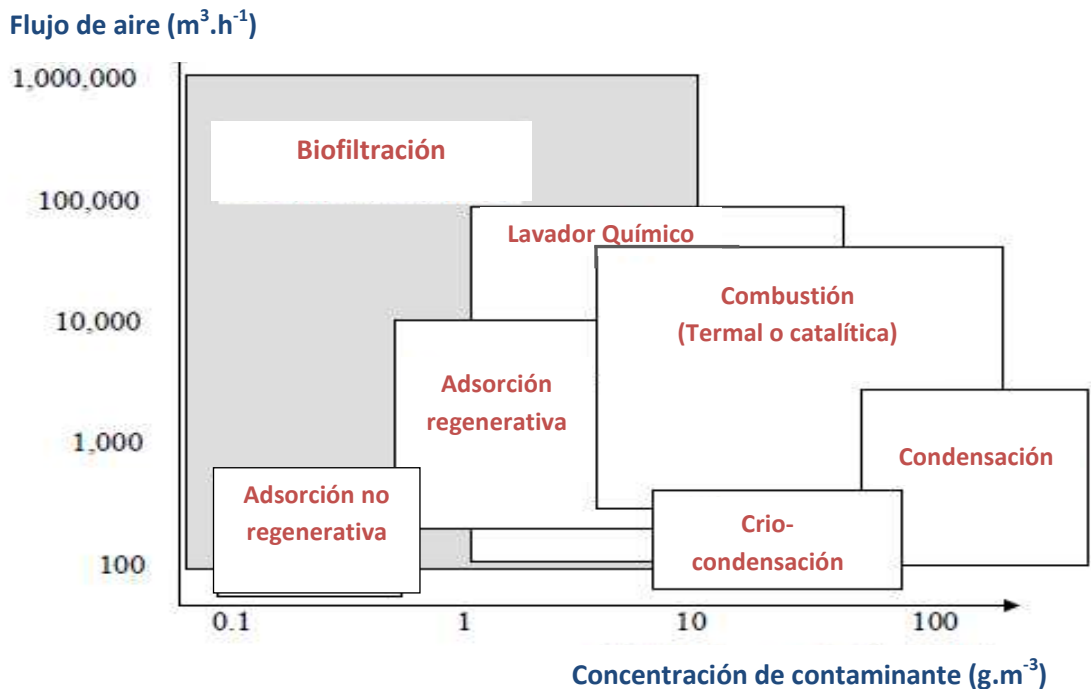


Figura 3.4: Tecnologías de control de olores en función del flujo de aire y concentración de contaminante a tratar (Kosteltz, 1996)

Existen otros factores importantes a considerar en la selección de una tecnología de tratamiento específica como son la temperatura, el contenido de oxígeno en el gas contaminado, la solubilidad y biodegradabilidad de los compuestos. Los costos de inversión, operación y mantenimiento así como el posible impacto ambiental de cada tecnología también deben ser evaluados.

3.7.2 Métodos físico-químicos

Los métodos físico-químicos involucran la adición de oxígeno o productos químicos para controlar la formación de compuestos olorosos o reaccionar con estos compuestos una vez que están formados.

El tratamiento químico en fase líquida consiste en aplicar productos químicos como el cloruro férrico, peróxido de hidrógeno y ozono en los sistemas de recolección de aguas residuales para reducir significativamente la formación y liberación de sulfuro. Sin embargo, en lugares de alta turbulencia, las trazas de sulfuro pueden ser suficientes para producir el H_2S y causar problemas de olor y corrosión. En esta tesis no se describirán las tecnologías de tratamiento químico en fase líquida, sin embargo se puede encontrar amplia información en el Manual N° 25 de la WEF (2004).

En cuanto a la tecnología en fase vapor, los métodos físico-químicos más utilizados para la remoción de olores y COV son los siguientes:

a) Lavadores químicos

Los lavadores químicos vienen siendo usados exitosamente en numerosas aplicaciones en sistemas de alcantarillado y han demostrado su alta eficiencia de remoción de H_2S en un área compacta.

El principio básico en un lavador químico consiste en la absorción de los contaminantes olorosos del flujo de aire hacia el líquido lavado recirculado, con reacciones subsecuentes para formar un compuesto estable. La absorción ocurre en la superficie del agua y el empaque de la torre es usado para disolver y crear una gran superficie líquida. El material de empaque es seleccionado para proporcionar un área superficial adecuada con una mínima caída de presión (Figura 3.5).

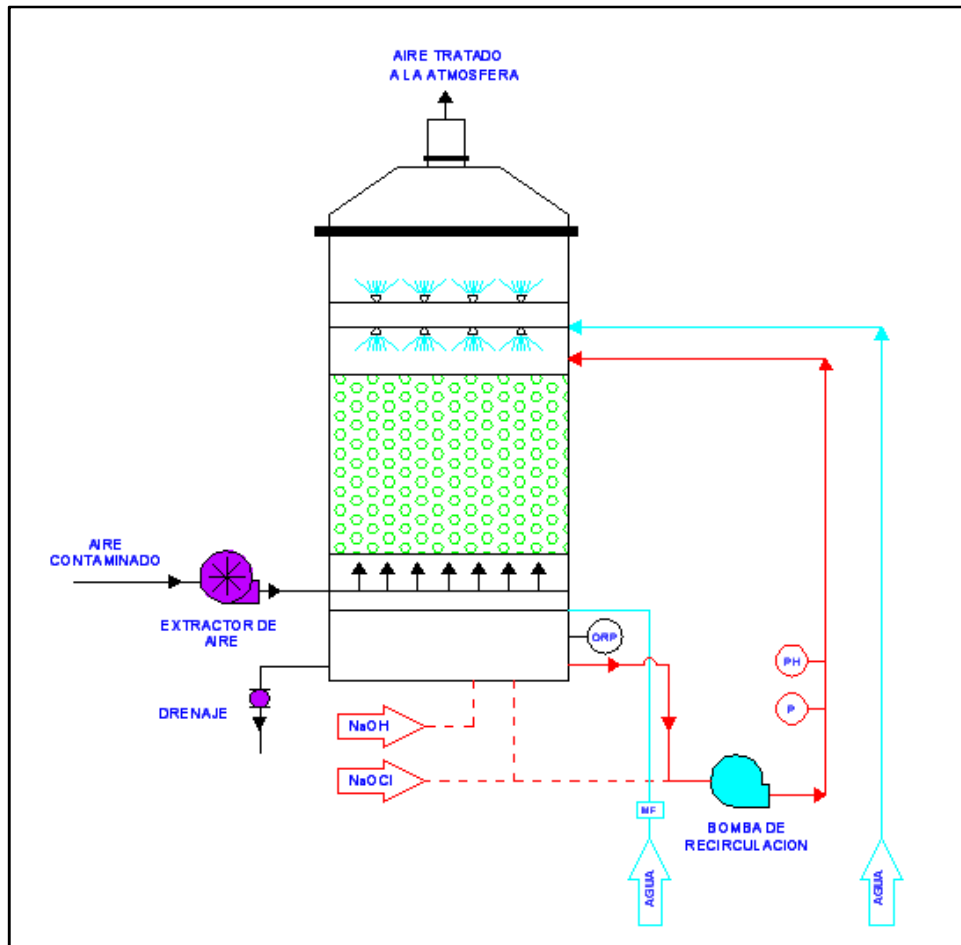


Figura 3.5: Diagrama típico de un lavador de torre de empaque (WEF, 2004)

Las reacciones químicas producidas en los lavadores usualmente son ácido-base u oxidación-reducción para convertir los compuestos contaminantes a subproductos no olorosos. La soda caustica o hipoclorito son usadas en los lavadores químicos que tratan H_2S donde el pH debe ser controlado en el rango de 9 a 10.5 y el potencial de reducción - oxidación (ORP) debe ser mayor que 700 mV. Sin embargo, el uso de productos químicos resulta una de las principales desventajas debido a que se requiere de tanques de almacenamiento en las instalaciones y vías de acceso para el tránsito de los camiones.

Por otro lado, los lavadores químicos requieren mantenimiento y calibración frecuente de las bombas dosificadoras e instrumentación (sensores de pH, ORP), lo que resulta dificultoso para los operadores. Adicionalmente, los lavadores químicos requieren el suministro de agua potable para el reemplazo de la solución depuradora y en muchos casos, este servicio no está disponible en algunas instalaciones.

b) Carbón activado

Los equipos de carbón activado son ligeramente más grandes que los lavadores húmedos pero no requieren de productos químicos. El carbón activado remueve los olores usando un fenómeno que ocurre naturalmente llamado adsorción, en la cual las moléculas en el flujo de aire son atrapadas por cualquier superficie interna o externa sólida.

El carbón activado comúnmente es utilizado para tratar flujos de aire que contienen COV y concentraciones de H₂S menores a 10 ppm. En un sistema típico de adsorción de carbón, un extractor conduce el aire contaminado a través de una capa de carbón a una velocidad entre 15.2 y 22.9 m.min⁻¹, resultando en un tiempo de residencia de aproximadamente 2.4 a 3.6 segundos. El aire purificado es luego descargado directamente a la atmósfera. Además, en el proceso de adsorción se produce un lixiviado ácido que requiere ser evacuado (Figura 3.6).

Existen diversos tipos de carbón activado y la selección de cada tipo dependerá de la aplicación específica. La media de carbón activado virgen es más adecuada para tratar bajas concentraciones de H₂S combinado con COV. El carbón activado con caustica impregnada ha sido adaptada para incrementar la capacidad de remoción de H₂S pero esto limita la capacidad de remoción de COV. Este tipo de carbón activado puede ser regenerado químicamente en el sitio pero muchos operadores evitan esta actividad debido a los cuidados requeridos en el manejo de bases químicas fuertes.

La media de carbón activado lavable con agua tiene un 50% más de capacidad de remoción de H_2S que el carbón con caustica impregnada y puede ser regeneradas en forma segura. A una concentración de 10 ppm de H_2S , este tipo de carbón es proyectado para durar 2 años pero la regeneración es requerida cada 6 meses.

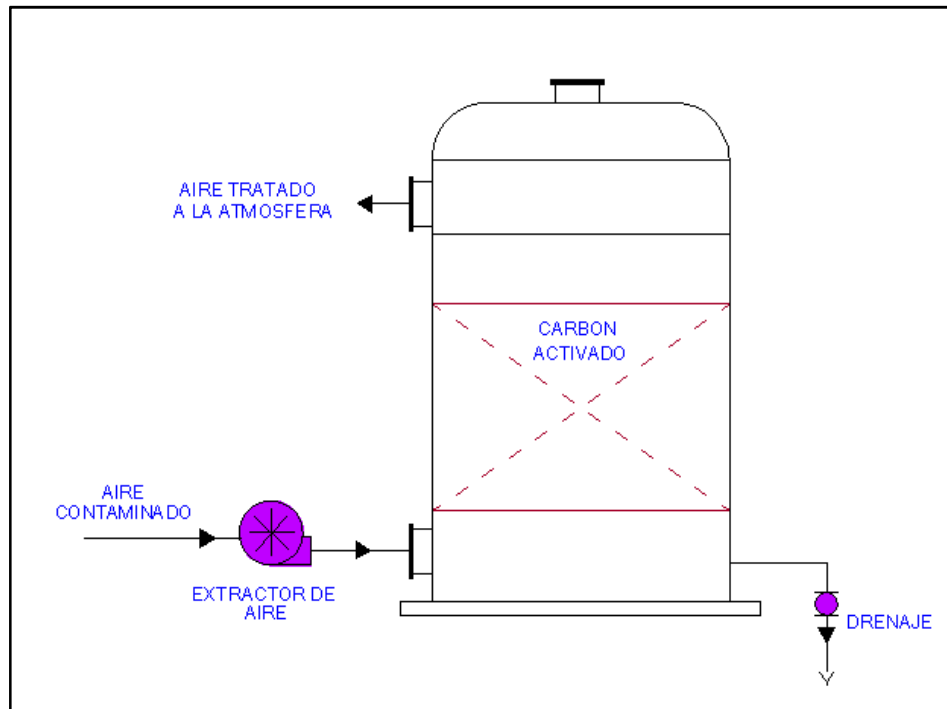


Figura 3.6: Diagrama típico de un sistema de carbón activado (WEF, 2004)

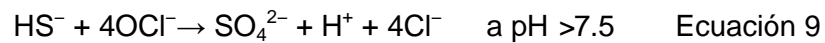
Una desventaja en el uso de los 3 tipos de carbón activado indicados es la producción de un lixiviado altamente ácido. En plantas de tratamiento existe un caudal suficiente para diluir esta descarga; sin embargo, en algunos sistemas de alcantarillado, la neutralización podría ser requerida para evitar daños en la tubería especialmente en períodos de caudal mínimo.

Actualmente, compañías como Evoqua Water Technologies han desarrollado una media de carbón catalítico con aproximadamente el doble de la capacidad de remoción de H_2S que el carbón con caustica

impregnada y que produce un lixiviado con un pH casi neutro. El carbón activado catalítico tratando gases con una concentración de H₂S de 10 ppm es proyectado para durar 2 años sin requerir ningún lavado ⁶⁶.

c) Oxidación con cloro

Este proceso consiste en que los subproductos de la absorción del H₂S en una torre depuradora son oxidados con hipoclorito de sodio para producir, dependiendo del pH, azufre elemental o sulfato⁹.



El hipoclorito de sodio no es regenerado en el proceso, lo que significa un costo adicional por el consumo del reagente. Sin embargo, en los gases que contienen compuestos orgánicos, la cloración no es atractiva debido a la formación de subproductos de cloruro orgánico indeseables.

d) Oxidación con peróxido de hidrógeno

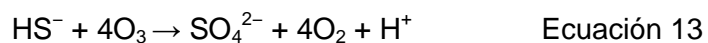
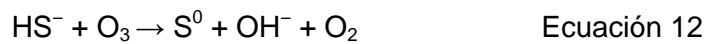
La oxidación de los compuestos de azufre reducidos por el peróxido de hidrogeno es una reacción compleja controlada por algunas variables como el pH, la temperatura, la concentración de peróxido y el tiempo de reacción.

La oxidación del H₂S con peróxido de hidrógeno es relativamente lenta y requiere generalmente un tiempo de contacto de 20 a 30 minutos. Dependiendo del pH, el H₂S es convertido a agua, azufre elemental o sulfatos.



e) Oxidación con ozono

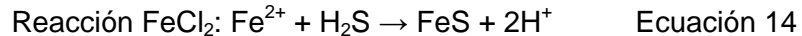
En este proceso, el H₂S es disuelto en agua en una torre depuradora y luego oxidado por el ozono. Este sistema generalmente es aplicado para remover COV⁵⁶.



La inestabilidad del ozono hace necesario la generación in situ, lo cual incrementa los costos de inversión, operación y mantenimiento.

f) Precipitación química

En este proceso, el flujo de gas es tratado en una torre de absorción donde el H₂S disuelto precipita como FeS cuando el Fe²⁺ es agregado⁵⁶.



El Fe²⁺ no es regenerado durante el proceso lo que significa un consumo considerable del reagente.

3.7.3 Métodos biológicos

Los sistemas de tratamiento biológicos utilizan la capacidad de los microorganismos para transformar ciertos contaminantes orgánicos e inorgánicos a compuestos simples y no tóxicos. En los sistemas biológicos de tratamiento de aire, los compuestos volátiles requieren ser transferidos del flujo de aire a una fase acuosa activa biológicamente. En esta fase, los microorganismos utilizan esas moléculas como una fuente de nutrientes y energía para su crecimiento, producción de biomasa y generación de subproductos como el dióxido de carbono, agua, sulfato y nitratos.

Los métodos biológicos vienen siendo usados desde los años 50 para el tratamiento de gases contaminados. Los primeros biofiltros se construyeron en Europa como pozos abiertos y contenían suelo poroso. El sistema de distribución de aire contaminado consistía de tubos perforados donde el flujo atravesaba la media de filtración en sentido ascendente.

En el año 1957, en los Estados Unidos se expidió una patente para un biofiltro de lecho de tierra que fue diseñado con tasas de flujos de aire por debajo de $0.1 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$. Estos sistemas fueron utilizados para tratar olores de diversas fuentes como plantas de tratamiento de desagües, instalaciones de compostaje, procesamiento de alimentos y granjas ³⁷.

Entre los años 60 y 70, el interés en los biofiltros se incrementó como consecuencia de la promulgación de regulaciones más estrictas de calidad de aire en los países desarrollados. Por esta razón, las primeras aplicaciones comerciales se desarrollaron en Holanda, Alemania y los Estados Unidos con el objetivo de reducir los Compuestos Orgánicos Volátiles y H_2S (Figura 3.7) ⁵¹.

Durante los años 80 y 90, existieron numerosas investigaciones en Europa acerca de los fundamentos del tratamiento biológico del aire y nuevos sistemas fueron implementados exitosamente⁷. Estas investigaciones incluyeron el uso de diversas medias de filtración orgánica o inorgánica, que permitieron mejorar el desempeño, control y estabilidad del proceso. Además, el desarrollo de nuevas configuraciones del biofiltro incluyó sistemas cerrados y mejores controles que permitieron incrementar las tasas de biodegradación y la eficiencia, reduciendo las fallas y los costos de inversión.

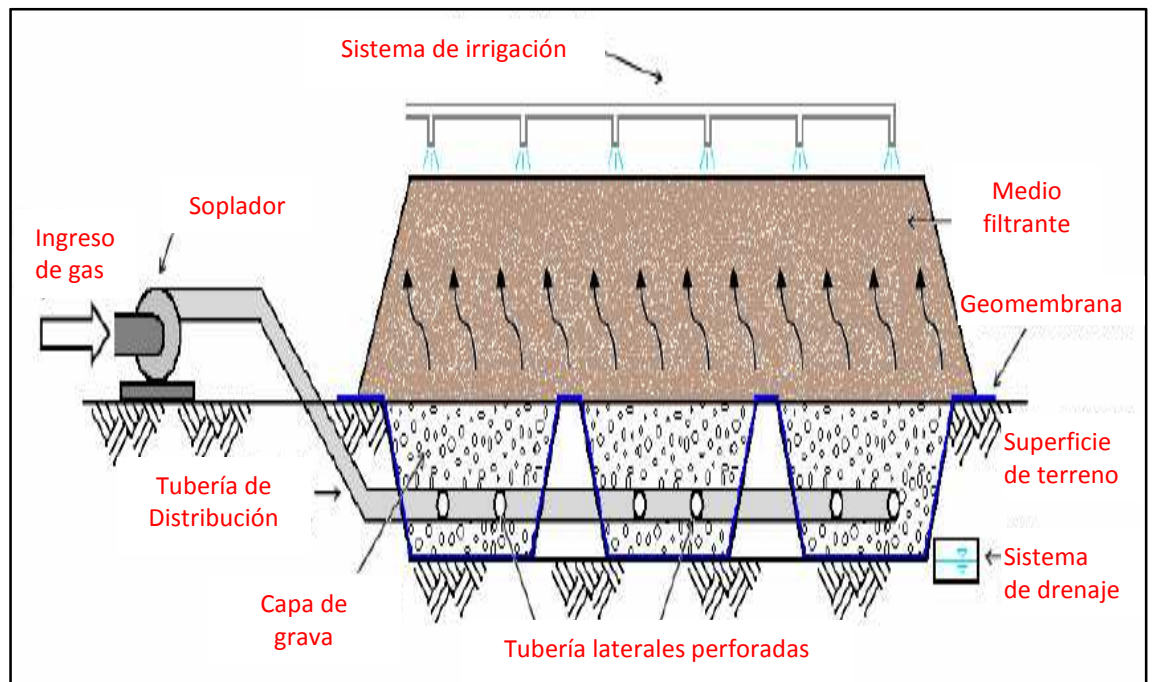


Figura 3.7: Sistema de biofiltración construido en el suelo (Williams y Miller, 1992)

En la actualidad, existen diversos tipos de biofiltros y aunque los mecanismos básicos son los mismos, las diferentes configuraciones contribuyen a mejorar la transferencia de contaminantes e incrementar las tasas de biodegradación. Los tipos de biorreactores más utilizados se indican en la tabla 3.9 y serán descritos en detalle.

Tabla 3.9: Clasificación de los reactores biológicos

Biomasa	Fase líquida	Reactor
Fijo en un medio de soporte	Estacionario	Biofiltro
Fijo en un medio de soporte	Continuo	Biofiltro percolador y Contactores rotativos
Suspendido	Fluido	Biodepurador
Suspendido o fijo	Estacionario	Crecimiento suspendido
Fijo en membrana	Continuo	Membrana

Fuente: Shareefdeen (2005)

a) Biofiltros

En este sistema, el aire contaminado atraviesa un lecho de media húmeda que contiene los microorganismos que crecen en la superficie y porosidad de la media, formando una biopelícula. La actividad de la biopelícula está determinada por su densidad microbiana y las condiciones ambientales tales como temperatura, humedad, disponibilidad de nutrientes y pH. El calor generado por la reacción biológica y la humedad del aire que ingresa determina la tasa de pérdida de agua y los requerimientos de reposición de agua. Para evitar el incremento de las tasas de secado, el aire es generalmente pre-humidificado y la media de filtración es irrigada con agua en forma intermitente. El líquido percolado del fondo del biofiltro puede ser eliminado o reciclado⁴⁶.

En la figura 3.8 se muestra un diagrama de funcionamiento en un biofiltro prefabricado. Las medias de filtración utilizados son materiales orgánicos bioactivos naturales como el compost, astillas de madera o cortezas de árboles, que pueden retener agua y generalmente contienen suficientes nutrientes minerales para soportar una población microbiológica inicial activa¹⁰. Para alcanzar características estructurales adecuadas, se utiliza una mezcla de materiales, incluyendo una fracción gruesa para prevenir altas caídas de presión. A pesar de esto, la media orgánica es degradada con el tiempo, perdiendo su estructura y su capacidad de retener agua, lo que induce a la canalización y disminución de la eficiencia.

La alta superficie y el bajo contenido de agua en el biofiltro son apropiados para el tratamiento de contaminantes hidrofílicos. Las características estructurales del soporte determinan la altura de la media de filtración que usualmente varían de 0.8 m y 1.20 m para materiales orgánicos. Esto significa que se necesita tener una gran área para el biofiltro lo que resulta ser una desventaja para aplicaciones donde el espacio es limitado.

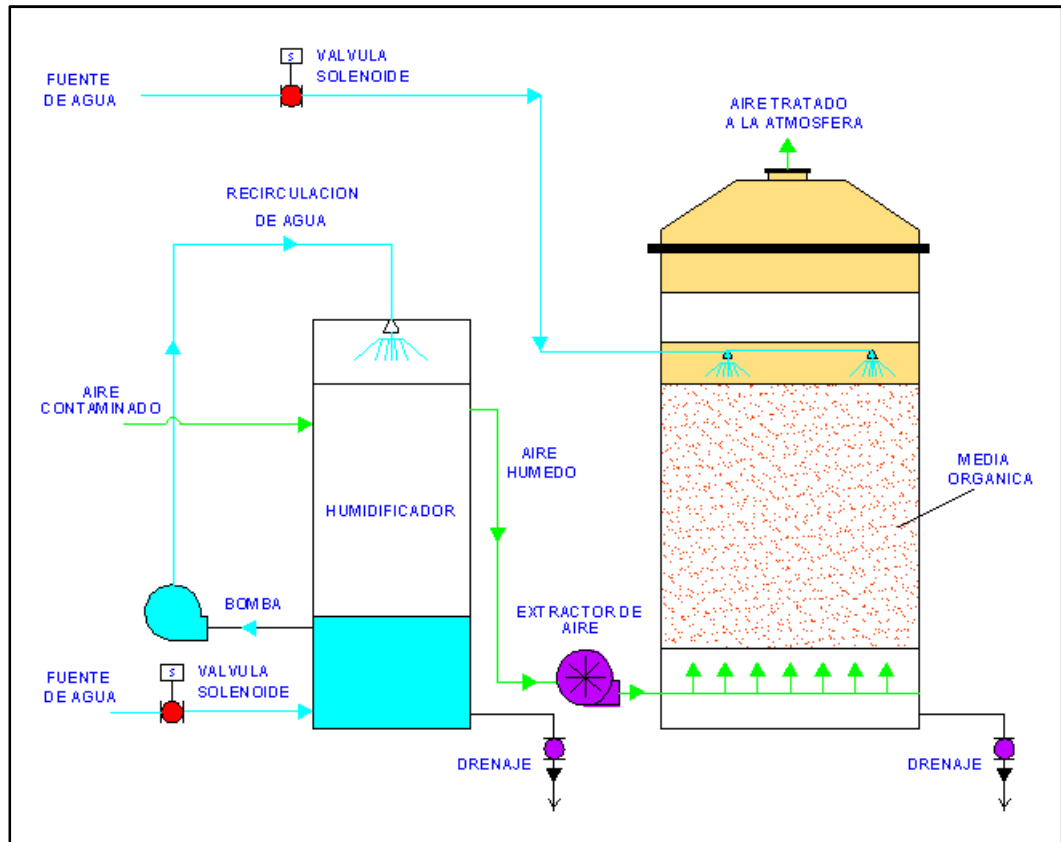


Figura 3.8: Diagrama típico de un biofiltro prefabricado (Cardenas-González et al. 1999).

Por otro lado, los biofiltros solo son eficientes para tratar gases con concentraciones promedio de H_2S alrededor de 20 ppm. La Jacksonville Electric Authority (JEA) instaló varios biofiltros prefabricados tipo bandejas en estaciones de bombeo donde verificó que estos sistemas solo fueron eficientes para tratar flujo de aire con concentraciones de H_2S de 25 ppm o menos. A mayores concentraciones, los biofiltros requerirán el reemplazo frecuente de la media de filtración y una intensa labor para el desmontaje de las secciones de las bandejas ⁵⁵.

b) Biofiltro percolador

El Biofiltro percolador consiste de un recipiente con un tipo de media inorgánica como soporte para el crecimiento microbiano y que usualmente trata flujos de aire con concentraciones de H_2S entre 25 y 50 ppm.

En estos sistemas se requiere el suministro de agua potable y nutriente a la media de filtración. En plantas de tratamiento de aguas residuales, el efluente tratado puede ser usado para suministrar suficientes nutrientes al biofiltro percolador pero en aplicaciones de sistemas de alcantarillado, los nutrientes suplementarios deben dosificarse.

En la actualidad, compañías como Evoqua, Biorem, IMS entre otras fabrican unidades que usan medias como arcilla expandida u oxido de silicio. Otros tipos de biofiltros percoladores usan medias de plástico, de alta densidad, ligera en peso y son instaladas en forma vertical para minimizar el área requerida.

Los biofiltros percoladores con media de plástico pueden tratar concentraciones de H_2S mayores a 100 ppm. En el año 2000, la JEA instaló este sistema en una estación de bombeo de aguas residuales donde la concentración de H_2S en los gases olorosos contenía 300 ppm. Los resultados alcanzados fueron exitosos y los niveles de olores en el gas tratado fueron consistentemente no detectables, con costos operacionales muy económicos para tratar altas concentraciones de H_2S . Además, las medias sintéticas fueron resistentes a los ácidos y se espera una vida de por lo menos 10 años antes de su reemplazo ⁶⁷.

c) Contactor biológico rotativo

En los contactores biológicos rotativos, el aire contaminado es transportado a un reactor que contiene discos montados en un eje rotatorio que gira a aproximadamente 2 rpm. El aire puede ser alimentado tangencialmente a los discos o a través de un eje hueco perforado (Figura 3.9).

Los discos se encuentran parcialmente sumergidos (35 a 40% de la superficie) en una solución acuosa que contiene nutrientes y sirven como soporte a la biopelícula. El movimiento de los discos favorece la transferencia de masa y el control de crecimiento de la biomasa bacteriana ⁷¹.

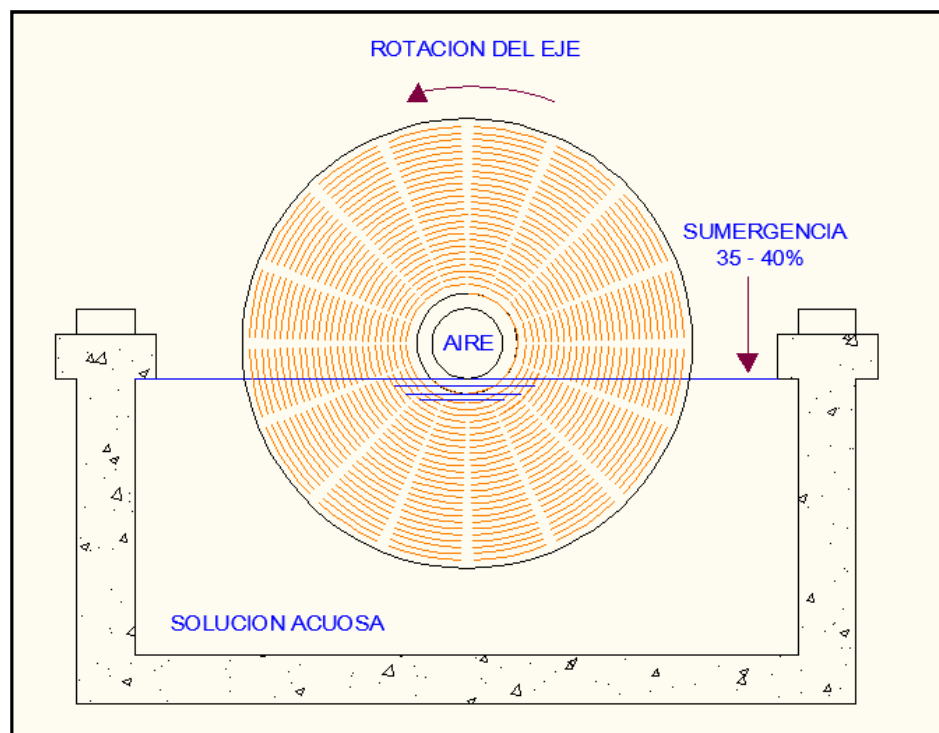


Figura 3.9: Esquema de funcionamiento de un contactor biológico rotativo (Metcalf & Eddy, 1998).

d) Biodepurador

El biodepurador consiste de una etapa de separación física o torre de absorción, seguida de una etapa de tratamiento biológico en un biorreactor de fase líquida. El biodepurador opera como un lavador químico convencional excepto que la solución química es reemplazada por una solución bioactiva que se distribuye sobre la sección superior de la torre de absorción mientras el aire oloroso ingresa en forma ascendente.

El empaque en la torre de absorción es usado principalmente para la transferencia de masa y no como un medio de adherencia para la biomasa. En esta configuración, el proceso es más adecuado para la remoción de compuestos olorosos orgánicos por los organismos heterotróficos. La mayor cantidad de biomasa se encuentra suspendida en la solución bioactiva recirculada donde los microorganismos oxidan parcialmente los compuestos olorosos y luego en la torre de absorción se completa la oxidación.

El biorreactor de fase líquida es un tanque aireado con una población heterotrófica altamente activa. Para lograr una alta tasa de biodegradación, el biorreactor requiere niveles óptimos de oxígeno, el suministro de nutrientes así como el control del pH en un rango óptimo para la actividad biológica. La biomasa suspendida y los subproductos disueltos se acumulan en la torre de absorción, por lo cual se produce un lixiviado que debe evacuarse del proceso. Asimismo, regularmente se debe agregar agua fresca al biorreactor para compensar cualquier pérdida de agua o evaporación.

En otros biodepuradores, el licor mixto de un lodo activado es usado como solución bioactiva y es recirculada del sedimentador secundario hacia el biorreactor donde nuevamente absorben los compuestos olorosos que son oxidados en el tanque de aireación (Figura 3.10).

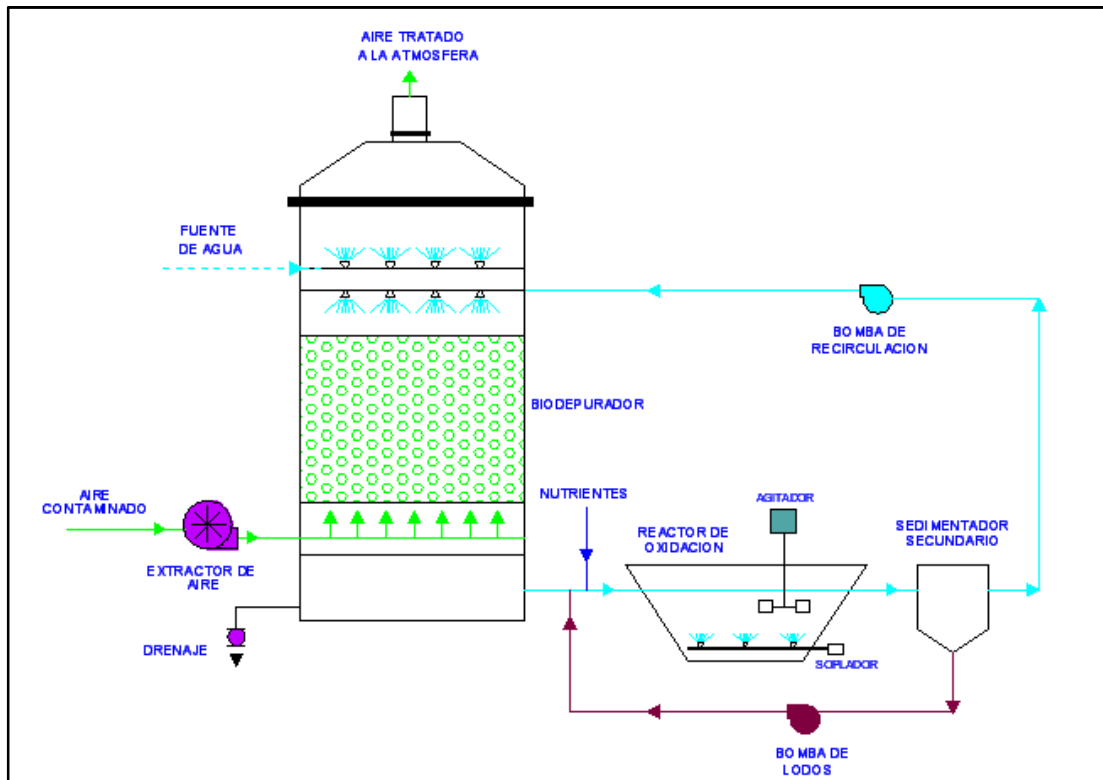


Figura 3.10: Diagrama esquemático de un sistema biodepurador (Van Groenestijn, 2001).

e) Biorreactor de membrana

En un biorreactor de membranas, el gas fluye a través de una membrana tubular o hueca hacia una biopelícula en una fase acuosa donde los microorganismos degradan los compuestos olorosos. La solución acuosa suministrada al biorreactor es almacenada en un reservorio donde se suministra oxígeno, nutrientes y el pH y temperatura son controlados (Figura 3.11).

Las membranas usadas en estos reactores son de diferentes tipos como polar o hidrofóbicas y son instalados en configuraciones de fibras huecas u hojas planas. Las membranas pueden ser fabricadas con materiales muy diversos y tienen diferentes propiedades químicas (solubilidad y selectividad) y físicas (Esfuerzo mecánico, tamaño del poro, espesor y porosidad). En membranas hidrofóbicas

semipermeable, como látex o silicona, la velocidad de transferencia está relacionada con la solubilidad y la difusión del contaminante.

Las membranas microporosas son fabricadas de materiales como Teflón, polipropileno o politetrafluoroetileno (PTFE) y tienen tamaños de poros de 0.1 a 1.0 μm .

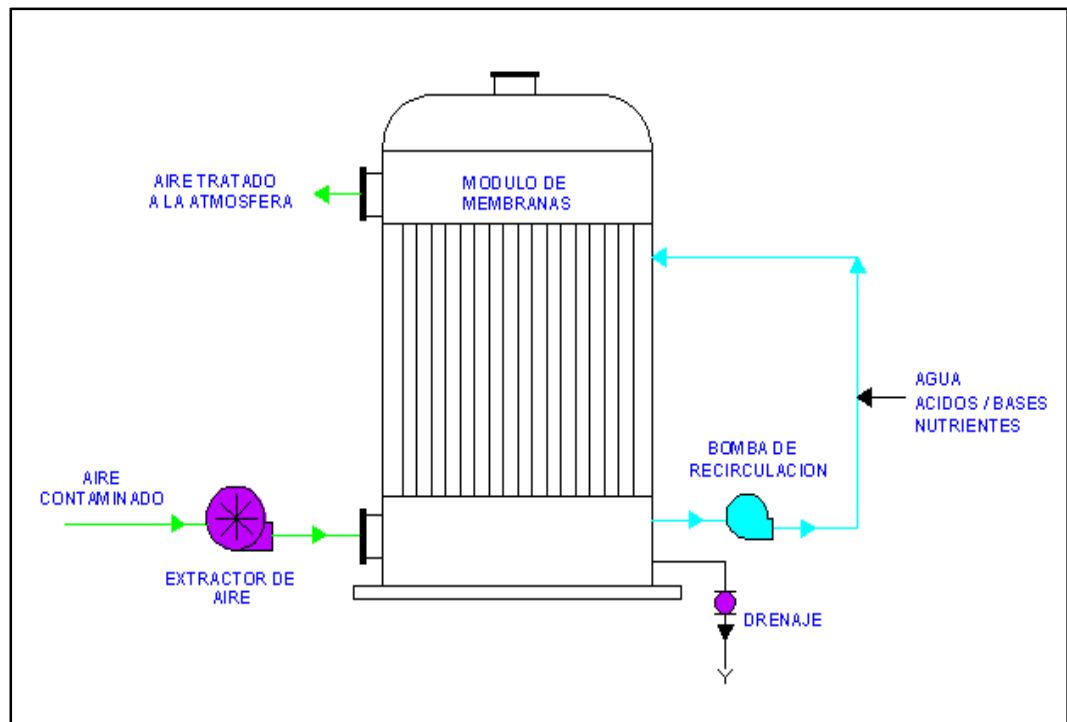


Figura 3.11: Esquema de un biorreactor de membrana (Fitch, 2000)

f) Biorreactor de crecimiento suspendido

En los biorreactores de crecimiento suspendido, el aire contaminado es burbujeado en el volumen de líquido que contiene los microorganismos suspendidos. Varias configuraciones han sido propuestas para estos sistemas como por ejemplo, en el proceso de lodos activados donde la actividad biológica del tratamiento de aguas residuales municipales es usada simultáneamente para tratar el aire contaminado (Figura 3.12).

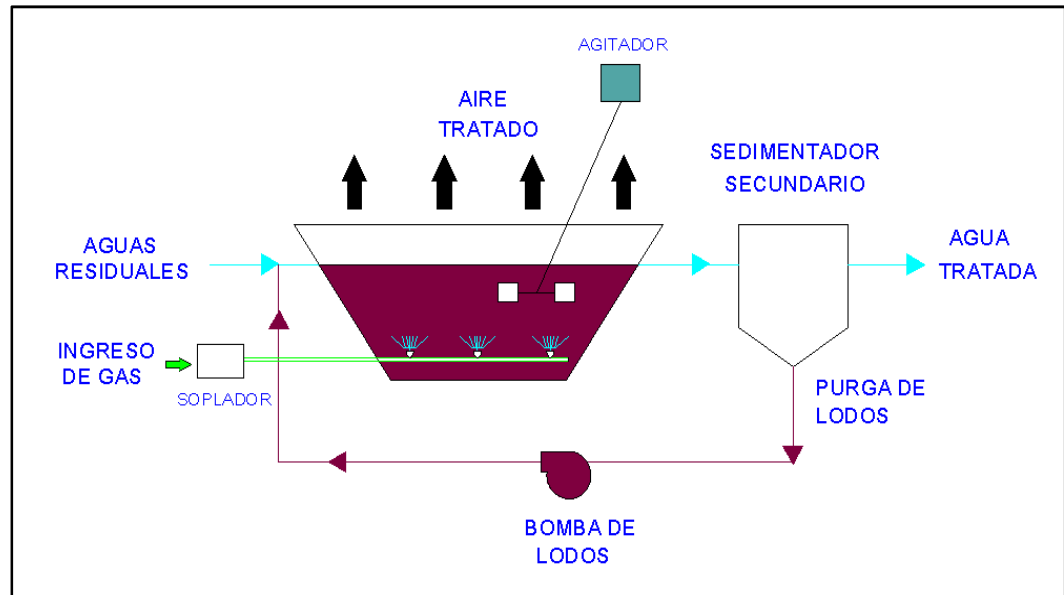


Figura 3.12: Diagrama esquemático de un biorreactor de crecimiento suspendido (Bielefeldt, 2001)

Las características del reactor tales como concentración de biomasa, aireación y diseño de difusores son generalmente definidas según el requerimiento del tratamiento de las aguas residuales. En otros casos, el reactor es concebido específicamente para el tratamiento de los contaminantes en el aire, y pueden ser tanques o columnas de aireación de diferentes configuraciones tales como sistema airlift, o discos. Estos sistemas son diseñados para optimizar la transferencia de masa de las burbujas de aire hacia el volumen líquido donde ocurre la biodegradación y permite el control de las condiciones de la población microbiológica.

3.7.4 Ventajas y desventajas del tratamiento biológico

La biofiltración presenta algunas ventajas sobre otras tecnologías como tener un diseño simple y flexible, con menores costos de inversión. Los procesos biológicos son utilizados para tratar altos flujos de aire con concentraciones bajas debido al menor costo de energía eléctrica en comparación con tecnologías como la incineración que adicionalmente necesita la adición de combustible (Tabla 3.10).

Además, en los sistemas de biofiltración no existe una corriente residual secundaria como en el depurador o adsorción y las emisiones de gases de efecto invernadero generados como el dióxido de carbono son relativamente bajas. El material de la media de filtración es económico y algunas veces están disponibles en el sitio como por ejemplo el uso de astillas y/o cortezas de madera en la industria de productos forestales.

Tabla 3.10: Costos de operación y mantenimiento de tecnologías para el control de COV y H₂S

Tecnología	Costo total (USD / 1,000 m³ aire)
Incineración	4.60
Cloro	2.2
Ozono	2.2
Carbón activado	0.7
Biofiltración	0.25

Fuente: Bohn (1992)

Las tecnologías de tratamiento biológico de olores también presentan otras ventajas sobre los tratamientos físicos y químicos convencionales. Muchos químicos usado para el control de olores de las aguas residuales son oxidantes pesados o tiene rangos de pH que hace peligroso su manejo, transporte y almacenamiento. La naturaleza de los procesos biológicos evita el uso de químicos peligrosos debido a que éstos afectan adversamente al ser humano y tendría el mismo efecto en los microorganismos. Los biorreactores comúnmente operan solo con agua y nutrientes y generan subproductos seguros y compatibles con el medio ambiente.

Existen también algunas desventajas para el uso de los biorreactores. Los criterios de diseño aún continúan en desarrollo y la media de empaque puede necesitar el reemplazo frecuente (2 a 4 años). Más aún, algunos biofiltros pueden requerir una gran área para su

instalación y a menudo puede ser una restricción en lugares donde el terreno es costoso o no está disponible. Además, la canalización, compactación de la media (especialmente en el compost), la naturaleza frágil y la variabilidad de los sistemas biológicos pueden algunas veces no ser atractiva para tratar flujos de gas industriales sin experiencias previas.

3.8 Aspectos generales para la implementación de tecnologías de control de olores en fase vapor

La implementación de un sistema de control de olores en fase vapor, requiere de acciones previas para contener las emisiones en las fuentes, ventilar las áreas hermetizadas y transportar los gases contaminantes.

La construcción de un edificio o la instalación de una cobertura alrededor de la fuente de olores es el primer paso para contener los gases generados. Seguidamente, la presión negativa de aire debe ser mantenida en el espacio debajo de la cobertura o en el edificio. La presión negativa de aire previene la fuga de los olores molestos a la atmósfera, creando un flujo de aire hacia el interior a través de cualquier grieta, respiradero o abertura.

La presión negativa es creada mediante un extractor que genera la ventilación del aire oloroso a una tasa mayor que el suministro de aire. El volumen de ventilación de aire en el espacio sobre el tiempo es conocido como el flujo de ventilación, que varía en función de las condiciones específicas tales como tipo de cobertura, presencia o ausencia de trabajadores.

3.8.1 Contención de olores

La selección apropiada de las coberturas depende de muchos factores como son el proceso a controlar, la accesibilidad, facilidad de construcción, durabilidad, estética, costos y seguridad para los trabajadores. Sin embargo, los materiales de construcción son un tema clave junto con las condiciones específicas del sitio,

particularmente en lo referente a la naturaleza corrosiva del proceso a hermetizar.

Una alternativa de cobertura es construir un edificio para contener la fuente de olores y facilitar el acceso de los trabajadores en caso de realizar el mantenimiento o reparación de equipos. Desafortunadamente este tipo de cobertura requiere la máxima cantidad de volumen de aire a ser tratado, como resultado de grandes áreas y altos requerimiento de ventilación. En una planta de tratamiento de aguas residuales, los equipos de pretratamiento (Cámaras de rejas y desarenadores) así como los equipos de deshidratación de lodos usualmente se encuentran dentro de edificios (Figura 3.13) o estructuras domo geodésicas.



Figura 3.13: Sistema de pretratamiento instalado dentro de una caseta de fibra de vidrio.

En los procesos donde no se requiere el acceso del personal tales como canales, estaciones de bombeo, tanques de mezcla o clarificadores primarios, se pueden utilizar coberturas planas o barreras tipo arco. Los materiales más comunes usados en estas aplicaciones son los siguientes:

- **Concreto.-** Este material tiene la capacidad de soportar un mayor peso pero también agrega la mayor carga muerta. Cuando es usado en tapas removibles, el peso excesivo dificulta su retiro para las labores de mantenimiento o inspección. Por otro lado, el concreto está sujeto a la corrosión y debe ser tratado con productos químicos para reducir este problema.
- **Aluminio.-** Este material proporciona una fuerza de tracción alta, con un área de sección transversal delgada siendo una estructura ultraliviana. El aluminio es utilizado especialmente para fabricar coberturas tipo domo geodésica para tanque circulares. Además, el aluminio no tiene problemas de corrosión si es protegido con una capa anodizada.
- **Fibra de vidrio.-** Este material proporciona una gran resistencia a la corrosión y típicamente cuenta con una capa inhibidora de radiación UV. La fibra de vidrio es ligera y es aplicada para cubrir todo tipo de geometría de tanques y canales con una durabilidad prolongada. En la figura 3.14 se muestra tapas de fibra de vidrio instalados en canales rectangulares.
- **Acero inoxidable.-** Este material es utilizado casi exclusivamente para tapas removibles en canales. Los grados de acero comúnmente utilizados son el 304 o 316 y ser más costoso que el aluminio pero con una buena resistencia a la corrosión.
- **Lonas o geomembrana.-** Estos materiales requieren de una estructura de soporte para prevenir hundimientos y acumulación de agua de lluvias. La durabilidad de las geomembranas es menor que otros materiales, por lo cual vienen siendo usadas para cubrir canales, tanques (cuadrados, rectangulares o circulares) y cámaras húmedas.
- **Madera.-** Este material es aplicado para cubrir aberturas pequeñas tales como canales y artesas en forma temporal. La madera es económica pero con una durabilidad limitada y no cuenta con un soporte estructural para caminar en forma segura.

- **PVC.-** Este material también vienen siendo usado a menor escala con limitado éxito debido a que no cumplen con los criterios estructurales y seguridad indicados anteriormente.



Figura 3.14: Canales cubiertos con tapas de fibra de vidrio

3.8.2 Flujo de ventilación

La metodología de diseño de los sistemas de ventilación rara vez es descrita en los Reglamentos Nacionales de Edificaciones para instalaciones como plantas de tratamiento de aguas residuales. Algunas organizaciones tales como la National Fire Protection Association (NFPA) y Factory Mutual proporcionan información o recomendaciones prácticas para áreas específicas de ventilación. Por ejemplo, la NFPA ha desarrollado una guía de ventilación titulado Standard 820 Revisión 1999 – “Standard for Fire Protection in Wastewater Treatment and Collection Facilities”⁴⁸.

Aunque la información suministrada en la NFPA 820 no es vinculante, muchas empresas y autoridades han adoptado sus recomendaciones como el estándar industrial. En esta guía se define las tasa de ventilación y la clasificación eléctrica para plantas de tratamiento de

aguas residuales y edificaciones. Para este tipo de instalaciones, el estándar describe dos opciones: la primera alternativa es considerar una tasa de ventilación con un objetivo estricto para las instalaciones eléctricas y la segunda alternativa es utilizar una tasa de ventilación continua de 6 a 12 veces/hora para áreas con requerimientos eléctricos clase 1, división 2 o áreas no clasificadas completamente.

Antes de calcular el flujo de ventilación para áreas de procesos cubiertos, es importante entender la accesibilidad del personal. Las tasas de ventilación son diferentes para espacios accesibles y no accesibles para los trabajadores. Una alta tasa de ventilación es aplicada para áreas de proceso o unidades cubiertas donde el personal estaría presente para cumplir con sus actividades. Como regla general, las siguientes tasas de ventilación pueden ser aplicadas:

- Espacios no accesible para trabajadores: 4 a 6 veces/hora y
- Espacios accesible para trabajadores: 12 a 20 veces/hora

Existen diversos métodos para calcular el flujo de ventilación en el espacio de aire de los procesos unitarios hermetizados. En las siguientes líneas se examina con mayor detalle el flujo de ventilación para las categorías indicadas.

a) Espacios no accesibles para trabajadores

Los espacios no accesibles para trabajadores en plantas de tratamiento de aguas residuales comprenden las zonas debajo de tanques y canales cubiertos por tapas que no permiten el ingreso de los trabajadores. Este tipo de procesos son clasificados como clase 1, división 1 (A prueba de explosión) y requiere que todo el equipamiento eléctrico se ubique a una distancia mínima de 0.90 m de la fuente de olores.

La ventilación en este tipo de aplicaciones es usada para eliminar el aire oloroso en la cobertura así como limitar la corrosión de las estructuras de concreto y metálicas. Además, la ventilación permite mantener una presión negativa que asegura que los el aire oloroso no escapen hacia la atmósfera y sea transportado hacia el sistema de control de olores.

El flujo de ventilación puede ser calculado por tres métodos principales. El primer método consiste en calcular el volumen de aire acumulado, asumiendo el nivel más bajo de agua o lodos y multiplicarlo por una tasa de renovación de aire (veces/hora). Como una regla general, en áreas no accesibles para trabajadores, el rango de la tasa de renovación de aire varía de 4 a 6 veces/hora.

La tasa de renovación de aire de 4 veces/hora es considerada el valor mínimo en la cual la humedad dentro del espacio de aire estaría controlada. Las tasas de ventilación menores originan el aumento de humedad en los elementos estructurales en el espacio de aire y el H₂S es fácilmente convertido a ácido sulfúrico en el ambiente.

El segundo método, y significativamente más difícil, es calcular el flujo sobre todas las aberturas en el sistema de cobertura y considerar un diferencial de presión. Una estimación de las aberturas entre las placas de cobertura, válvulas y compuertas, escotillas y tapas de inspección deben ser consideradas para calcular el área total. Este valor es multiplicado por una velocidad específica que atraviesa el área abierta y determinará el flujo de ventilación, a una presión diferencial específica. Por ejemplo, una velocidad de 6,4 m.s⁻¹ (1,265 ft.min⁻¹) es requerida para desarrollar un diferencial de presión de 0.02488 kpa (0.1 pulgadas de agua) entre el espacio de aire de la cobertura y la atmósfera.

El tercer método considera la ventilación requerida para reducir las altas concentraciones de un compuesto específico. El flujo de ventilación seleccionado deberá tener en cuenta las concentraciones del compuesto para que el diseño de la tecnología de control de olores alcance el grado de eficiencia deseado.

El flujo de ventilación para espacios no accesibles para trabajadores, corresponderá al mayor valor calculado por los 3 métodos indicados. Algunos fabricantes de sistemas de coberturas recomiendan la aplicación de una tasa de flujo estándar por unidad de área de superficie ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$). Sin embargo, estas tasas varían considerablemente entre fabricantes por lo cual es recomendable comparar el flujo obtenido con el valor calculado por el primer método indicado para garantizar la eficiencia del fabricante.

El flujo de ventilación para espacios no accesible asume que la superficie del líquido o sólido debajo de la cobertura no está aireado. Los flujos de ventilación altos son necesarios cuando se considera que el aire es difundido y liberado a través de la superficie sólido-líquido. El método más sencillo para estimar el flujo total de ventilación es calculando el flujo de ventilación como si la difusión de aire no está presente y sumar el flujo de aire que será inyectado o difundido a la matriz sólida o líquida.

b) Espacios accesibles para trabajadores

Las edificaciones y estructuras ocupadas por los trabajadores son típicamente ventiladas a tasas de renovación de aire altas, de acuerdo con las guías de la NFPA 820. El aire es típicamente filtrado, temperado a $12.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ y suministrado mecánicamente a las áreas ocupadas por los trabajadores.

Los olores de aguas residuales son algunas formas de compuestos reducidos de azufre como el H_2S , y que son más pesados que el aire. Por consiguiente, el lado de aspiración del sistema de ventilación

debería extraer el aire de los espacios muertos inferiores, donde el sulfuro de hidrógeno tiende a acumularse.

Un resumen de los métodos de evaluación de los flujos de ventilación para los espacios no accesible y accesible para trabajadores es ilustrado en la figura 3.15.

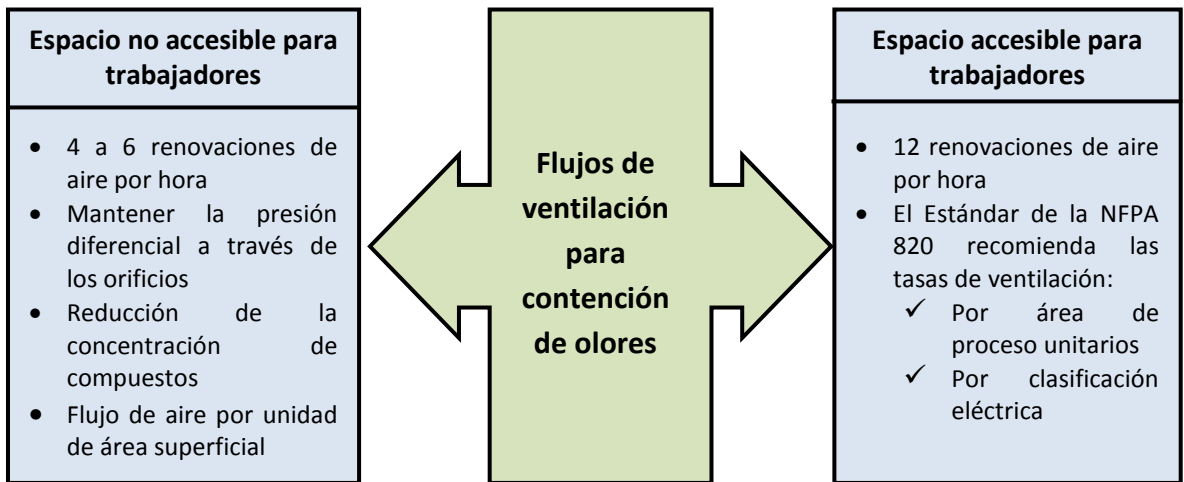


Figura 3.15: Resumen de los métodos de evaluación del flujo de ventilación

3.9 Mecanismo de la biofiltración

El mecanismo de remoción de olores en las tecnologías de biofiltración ha sido estudiado y documentados ampliamente. Esencialmente, dos procesos ocurren simultáneamente; mientras el aire oloroso atraviesa el biorreactor, los compuestos son transferidos del aire a la fase líquida, adsorbidos en el medio o absorbidos en una película de agua. Este primer paso depende de la solubilidad de los compuestos olorosos en el agua y de la constante de gas de la Ley de Henry. Una vez que los compuestos son disueltos en el agua, el segundo paso que ocurre es la degradación biológica aeróbica de los compuestos a través de una biopelícula donde crece un cultivo biológico.

3.9.1 Equilibrio

El movimiento de los contaminantes del aire a la fase líquida ocurre de acuerdo con las leyes de la física. En equilibrio, la partición entre el aire y el líquido, es descrito por la Ley de Henry donde las concentraciones en el agua serían proporcionales a las concentraciones en el aire, multiplicado por una constante (Ver ítem 3.5)

Las constantes de la Ley de Henry presentan valores casi todos por debajo de 1, haciendo que contaminantes hidrofílicos y los biofiltros sean compatibles. Esto significa que en un biofiltro, muchos de los contaminantes probablemente estén en el agua que en el aire. Esta característica contribuye a la retardación de los contaminantes que el aire mueve a través del biofiltro¹⁸.

3.9.2 Tasa de transferencia

En un biofiltro, la transferencia de masa del contaminante se realiza en 3 etapas tal como se muestra en la figura 3.16. Inicialmente, el flujo de aire ingresa al biofiltro en un régimen turbulento lo que origina que los contaminantes se muevan por difusión y convección. En las proximidades de la interfase, el flujo de aire se convierte en laminar por lo cual, los contaminantes experimenten un lento mecanismo transporte. Sin embargo, el flujo de aire es utilizado rápidamente por los biofiltros por lo cual la capa laminar se mantiene delgada y no constituye un factor limitante. La transferencia de masa desde el aire al agua se presume ocurre a una velocidad que es proporcional al grado en que la concentración en el agua está por debajo del valor de equilibrio.

El agua junto con la biopelícula son considerados como una capa entre la fase sólida y gaseosa. La biopelícula es una capa relativamente uniforme de células embebidas con un gel polisacárido producido por los microorganismos donde la difusión de los contaminantes es muy lenta.

La fase de biofiltración referente a la adsorción o disolución de los contaminantes involucra varios mecanismos complejos. Las moléculas contaminantes pueden ser disueltas en el agua pero también pueden ser adsorbidos en la media de filtración o recolectados en la superficie del agua¹⁸.

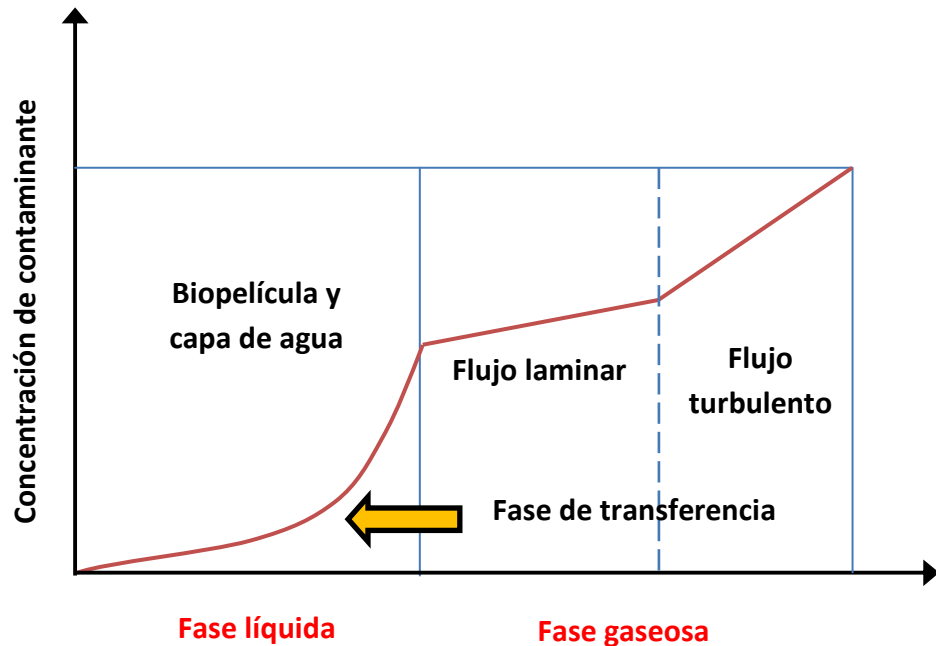


Figura 3.16: Modelo de transferencia de gas en un biofiltro (Devinny, 1999)

La última fase de la biofiltración es la degradación y la transformación de los contaminantes. Esta fase está limitada por uno o varios factores como la insuficiencia de nutrientes inorgánicos, oxígeno, microorganismos y la concentración de sustrato. Las tasas de degradación son limitadas por el fenómeno de difusión más que por la actividad biológica¹⁸.

La degradación aeróbica predomina en los biofiltros y las concentraciones bajas de los contaminantes en el flujo de aire no reducen el oxígeno disponible aun cuando se oxidan completamente. Las condiciones anaerobias pueden ocurrir debajo de la película aeróbica y dentro de poros alejados en la media de filtración donde la

difusión de oxígeno es limitada. Por ello, es importante mantener una biopelícula delgada y con buena capacidad de desprendimiento.

3.9.3 Biodegradación de contaminantes

a) Biopelícula

La biopelícula es el elemento clave de los biofiltros involucrados en la eliminación de contaminantes. La biopelícula es la masa de organismos que crecen en la superficie del medio sólido y que realizan sus actividades metabólicas para transformar los contaminantes a subproductos inofensivos como dióxido de carbono, agua y sales minerales¹⁸.

El espesor de la biopelícula está influenciado por varios factores que incluyen la velocidad del flujo a través de los biofiltros, el material de la media de filtración y la configuración de los sistemas de tratamiento. El espesor de la biopelícula usualmente varía desde decenas de micrómetros a más de 1 cm, aunque un 1 mm es el valor promedio observado⁷³.

La actividad metabólica aumenta con el espesor de la biopelícula hasta un nivel denominado el 'espesor activo'. Por encima de este nivel, la difusión de nutrientes se convierte en un factor limitante, lo que diferencia una biopelícula 'activa' de una 'inactiva'³⁶.

b) Biocinética

Las poblaciones microbiológicas mixtas identificadas en los biorreactores de tratamiento de gases residuales, crecen o mueren a diferentes tasas por lo que el perfil del consorcio evoluciona con el tiempo. Las posibles nuevas especies arriban con el flujo de aire y se establecen en los biorreactores, dependiendo de su adaptabilidad a las condiciones predominantes.

La tasa de crecimiento de cada especie microbiana depende de la concentración de carbono y fuente de energía, las condiciones ambientales como la temperatura, pH, agua y nutrientes disponibles. La relación entre el crecimiento y la concentración de sustrato puede ser descrito por el modelo de Monod (1942):

$$\mu = \frac{\mu_{\max} CL}{K_s + CL} \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde:

μ : Tasa de crecimiento específico (h^{-1})

CL: concentración de sustrato ($g.L^{-1}$)

μ_{\max} : Tasa máxima de crecimiento celular (h^{-1})

K_s : Constante de saturación media ($g.L^{-1}$)

De acuerdo con el modelo de Monod, a concentraciones de contaminantes altos ($CL \gg K_s$), el crecimiento alcanza el μ_{\max} y no cambiaría con la concentración (Reacción de orden cero). Cuando las concentraciones son muy bajas ($CL \ll K_s$), la tasa de biodegradación es aproximadamente proporcional a la concentración del contaminante (Reacción de primer orden). En un biofiltro es posible que la cinética sea de orden cero cerca a la zona de ingreso donde la concentración es alta, pero a lo largo del biofiltro, la cinética será de primer orden debido a que las concentraciones son menores.

3.9.4 Generación de subproductos

Los contaminantes que ingresan al biofiltro puede ser compuestos orgánicos volátiles o compuestos inorgánicos como el sulfuro de hidrógeno o amonio que pueden ser convertidos a dióxido de carbono, agua o sulfatos y nitratos por un único organismo.

Alternativamente, el compuesto puede ser convertido a productos secundarios y transferido a otros organismos. Un compuesto complejo o dificultoso de degradar puede experimentar diferentes

transformaciones en varias especies microbiológicas antes de la mineralización. Una fracción del carbono del contaminante sería incorporada en la biomasa que luego será degradada como organismos muertos y serán consumidos por otros. La biomasa puede escapar en el aire o el lixiviado en pequeñas cantidades en comparación con existente en el biofiltro (Figura 3.17).

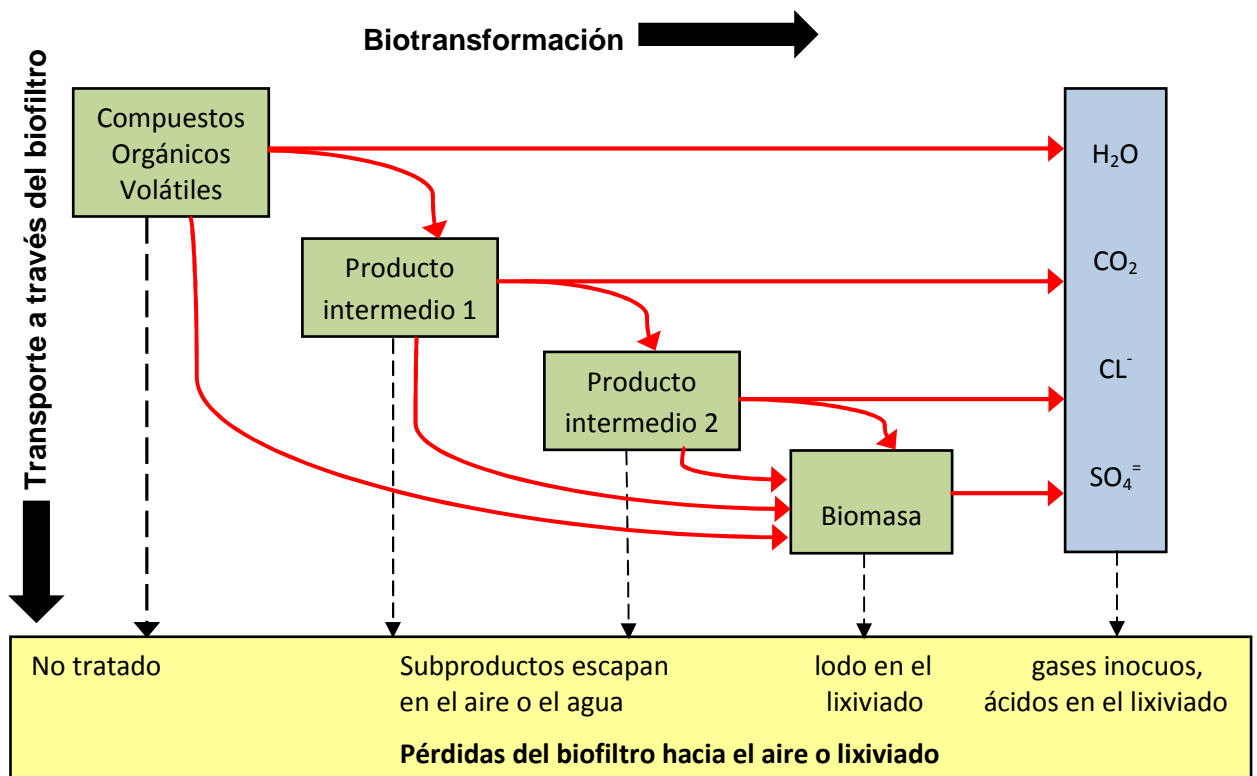


Figura 3.17: Biotransformación y proceso de transporte en biofiltros

En un biofiltro operando exitosamente a baja carga, las transformaciones biológicas son rápidas en comparación con el transporte físico. Los elementos presentes en el contaminante de ingreso serán predominantemente convertidos a productos minerales y biomasa que deberá mantenerse casi constante para evitar el taponamiento de la media de filtración. Una forma de predecir el crecimiento excesivo de biomasa es realizando un balance de masa

del carbono donde la diferencia entre la concentración de ingreso y salida representaría la tasa de acumulación de biomasa.

3.10 Microbiología en los biorreactores

3.10.1 Especies microbiológicas en el tratamiento de gases

La composición de la comunidad microbiológica y la supervivencia de los microorganismos en un biofiltro depende de las condiciones físicas y químicas en la media de filtración. La diversidad de los microorganismos activos depende de la composición del flujo de ingreso, la naturaleza del contaminante a tratar y las condiciones ambientales prevalentes.

El uso de un consorcio microbiológico, cultivos mixtos o lodo de aguas residuales es común para la puesta en marcha de biorreactores en que remueven contaminantes olorosos o COV¹³. En los biofiltros que usan medias orgánicas naturales se espera que contengan diversos organismos, incluyendo bacterias, actinomicetos, hongos, algas y protozoarios, en comparación con medias sintéticas o inertes que pueden tener una población menor o nula.

De acuerdo con Bohn (1992), las poblaciones microbiológicas en biofiltros son de aproximadamente 1 billón de microorganismos por gramo de material orgánico⁷. Las bacterias y hongos son ciertamente los dos grupos dominantes en los sistemas de biofiltración. Varias especies de bacterias pertenecientes a los géneros *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Bacillus*, *Corynebacterium*, *Sphingomonas*, *Xanthomonas*, *Nocardia*, *Mycobacterium*, *Rhodococcus*, *Xanthobacter*, *Clostridium* y *Enterobacter* han sido identificadas en los biorreactores³². Asimismo, el uso de hongos como el *Phanerochaete chrysosporium*, *Trametes versicolor*, *Pleurotus ostreatus* y *Bjerkandera adusta* han sido identificadas en los estudios de biofiltración para la eliminación de Compuestos Orgánicos Volátiles¹³. Los hongos son generalmente resistentes a condiciones

ambientales extremas y son adecuados para la remoción de compuestos hidrofóbicos como el alquilbenceno y el estireno.

El análisis de las estructuras de las comunidades microbiológicas y sus cambios es importante durante el proceso de biodegradación. Las especies en el biofiltro son diferentes desde que la concentración de oxígeno y contaminantes disminuye en la matriz al incrementarse la distancia desde el punto de ingreso del gas.

Los métodos de cultivos dependientes e independientes vienen siendo aplicados para la caracterización de la comunidad microbiológica. Los cambios temporales y de espacio en las poblaciones bacterianas, y la diversidad de la comunidad microbiológica durante los procesos de biodegradación pueden ser determinados usando métodos moleculares sofisticados⁶⁴.

3.10.2 Inoculación de especies

La inoculación en un biofiltro se realiza con el objetivo de reducir los procesos de aclimatación. La selección y preparación de un inóculo apropiado para obtener una población saludable de microorganismos es fundamental en la operación exitosa del biorreactor. Los cultivos mixtos procedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales u origen similar vienen siendo usados como inóculo debido a que contienen una variedad de organismos resistentes, con un amplio rango degradativo y la habilidad de crecer en un ambiente fluctuante.

La inoculación usando una especie microbiana específica ha sido demostrada para reducir el período de aclimatación y mejorar la eficiencia de remoción de algunos compuestos. Kelly & Smith (1990) aislaron especies microbianas que convierten el Sulfuro de dimetilo (DMS) y Disulfuro de dimetilo (DMDS) en diferentes ambientes microbianos. Muchas de estas bacterias pertenecen a los géneros *Hyphomicrobium* metilrotrofico o *Thiobacillus* autotrófico que utilizan el Sulfuro de metilo como fuente de energía y carbono. Sin embargo, es

difícil establecer un límite entre los diferentes tipos fisiológicos de bacterias en el contexto de su posición taxonómica y usualmente se espera, tener un completo espectro de bacteria con capacidades combinadas metilotróficas y autotróficas³⁴.

3.10.3 La naturaleza de la biopelícula microbiana

La actividad de degradación microbiológica en un biofiltro percolador ocurre en la película microbiana adherida en la superficie de la media de filtración ³⁵. En un biorreactor típico, la población microbiológica constituye un consorcio mixto de células localizadas a diferentes profundidades en la biopelícula y que estarían expuestas a ambientes diferentes con respecto a la concentración de oxígeno, dióxido de carbono, contaminantes del aire, componentes celulares de organismos moribundos y lisis.

El uso del microscopio electrónico y otras herramientas permiten caracterizar la arquitectura de la biopelícula y conocer la topografía de la superficie para facilitar su construcción computarizada tridimensional. El dispositivo Robbins modificado permite investigar las capacidades de los microorganismos para colonizar superficies con diferentes grados de aspereza ³⁵.

El crecimiento de los microorganismos en la biopelícula no puede ser modelado como una capa uniforme plana. Engesser & Plaggemeier (2000) describieron que el establecimiento de la biopelícula se inicia cuando las macromoléculas son adsorbidos y los microorganismos son luego transportados a la superficie y obligados a una adhesión inicial directa. El crecimiento de estos microorganismos resulta en la generación de estructuras polisacáridas adhesivas.

La biopelícula ha sido descrita como una forma filamentosa áspera, que acomoda las bacterias en microcolonias en una matriz cerrada a través del cual el agua, el substrato (contaminantes) y oxígeno pueden acceder más fácilmente a los organismos. Típicamente, las

biopelículas de especies mixtas contienen asociaciones complejas de bacterias, algas y hongos, los cuales son excelentes colonizadores de superficie. Las capas de hifas y Exopolisacaridos bacterianos contribuyen a la adherencia y a las funciones de retardación del secado de la biopelícula, y sirven como nutrientes y soporte a otros organismos.

En la figura 3.18 se muestra las probables formas de biopelícula que se desarrollarían en los sistemas de biofiltración.

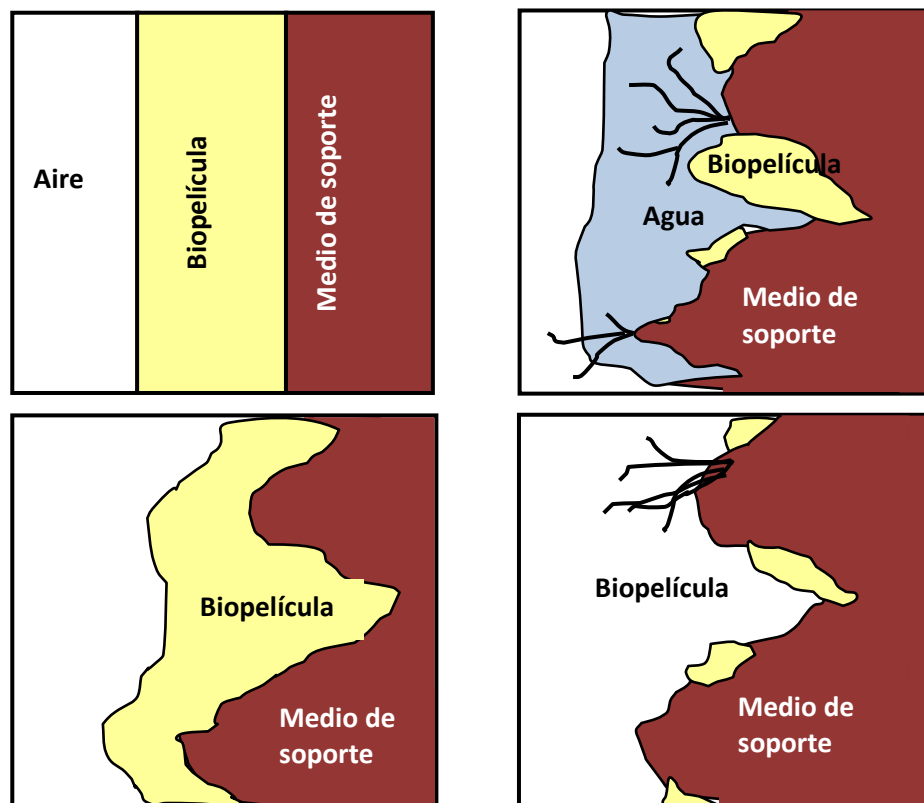


Figura 3.18: Diversas configuraciones de biopelículas en sistemas de biofiltración (Devanny, 1999)

3.10.4 Bioquímica del tratamiento biológico

a) Proceso biológico heterotrófico

Los organismos heterotróficos son usados en el proceso de biofiltración para degradar una amplia variedad de compuestos orgánicos. El término heterotrófico (a veces referido como quimioheterotrófico) es usado para describir una clase de microorganismos que consumen los átomos de carbono de los compuestos orgánicos como fuente de energía para su crecimiento celular.

Muchas especies de bacterias, protozoarios, amebas y hongos usan los procesos heterotróficos. Todos los compuestos orgánicos que originan los problemas de olores en las instalaciones de aguas residuales domésticas son volátiles y los biofiltros heterotróficos tienden a mostrar una habilidad para remover un amplio rango de COV. Los biofiltros también pueden degradar una amplia variedad de compuestos en base a petróleo y tienen un uso extensivo para tratar los gases liberados de los procesos de extracción de vapor del suelo. Además, los biofiltros pueden remover una variedad de hidrocarburos alifáticos, hidrocarburos aromáticos (incluido estireno), alcoholes, éteres, aldehídos, cetonas y aminas.

Varios cultivos de bacterias y hongos han sido identificados en la degradación de contaminantes orgánicos como por ejemplo para la acetona (*Rhodococcus*, *Corynebacterium*), butanol (*Pseudomonas*, *Rhodococcus*), diclorometano (*Hyphomicrobium*), etanol (*Candida*, *Saccharomyces*), isopropanol (*Pseudomonas*), metanol (*Pseudomonas*), metano (*Methylomonas*), fenol (*Pseudomonas*) y estireno (*Nocardia*, *Exophiala jeanselmei*, *Phanerochaete*).

En general, las tecnologías de biofiltración pueden degradar la mayoría de COV y compuestos tóxicos volátiles generados en las instalaciones de tratamiento de las aguas residuales municipales e

industriales, si operan con suficiente tiempo de residencia del gas y condiciones ambientales apropiadas.

b) Proceso biológico autotrófico

Las tecnologías de control de olores biológicos usan los organismos autotróficos para remover rápidamente los compuestos inorgánicos. El término autotrófico significa autoalimentación y los organismos incluidos en esta categoría son a veces referidos como quimiautótrofos debido a que utilizan los compuestos inorgánicos como su fuente de energía y obtienen el carbono para su crecimiento celular del dióxido de carbono disuelto en el agua.

El proceso biológico autotrófico es dominado exclusivamente por las bacterias que consumen los compuestos inorgánicos en base de nitrógeno (NH_3 , NH_4^+ , NO_2), azufre (H_2S , HS) y fierro (Sales de fierro Fe^{++}), contenidos en el gas contaminante. Algunos organismos autotróficos también pueden degradar algunos compuestos orgánicos de bajo peso molecular como el Disulfuro de carbono, Metil mercaptano y Etil mercaptano.

Las especies que pertenecen a los géneros *Thiobacillus*, *Desulfobacter*, *Hyphomicrobium*, *Xanthomonas* y *Chlorobium* son conocidas por su capacidad de transformación del H_2S y gases residuales contaminantes de SO_2 . Las especies *Xanthomonas* sp pueden remover el H_2S como un gas individual o en presencia de otros compuestos que contienen azufre como el Sulfuro de dimetilo. Dependiendo del tipo de bacteria, la biodegradación del H_2S ocurre en condiciones aeróbicas teniendo al O_2 como aceptor de electrones⁵³. El metabolismo de las especies como el *Thiobacillus*, *Thermothrix* y *Beggiato* han sido estudiados intensivamente en la oxidación de compuestos de azufre inorgánico (H_2S y Tiosulfato) y azufre orgánico (Sulfuro de Dimetilo y Disulfuro de Dimetilo)⁶³. Las características de algunas de estas bacterias se muestran en la tabla 3.11.

Tabla 3.11: Característica de algunas bacterias implicadas en la degradación de H₂S y otros compuestos de azufre

Condición	<i>Thiobacillus ferrooxidans</i>	<i>Thiobacillus thiooxidans</i>	<i>Thiobacillus novellus</i>	<i>Thiobacillus thioaerarius</i>	<i>Thiobacillus denitrificans</i>	<i>Thermotrix azoensis</i>	<i>Thiothrix nivea</i>	<i>Thioalkalispira microaerophila</i>	<i>Thiomicrospira frisia</i>
Rango de crecimiento de pH	--	0.5 - 6.0	5.7 - 9.0 (a)	5 - 9	--	6.0 - 8.5	6 - 8.5	8 - 10.4	4.2 - 8.5
pH óptimo	1.3 - 4.5	2.0 - 3.5	7.0	7.5	6.8 - 7.4	7.0 - 7.5	--	10	6.5
Rango de crecimiento de temperatura	10 - 37 °C	10 - 37 °C	10 - 37 °C (a)	--	--	53 - 86 °C (termofilia)	--	--	3.5 - 39 °C
Temperatura óptima (°C)	30 - 35	28 - 30	30	28	28 - 32	76 - 78	15 - 30	--	32 - 35
*G+C	56 - 59	--	67.2	62	63	39.7	44 - 55	58.9	39.6
Tipo de células	Gram-negativa	Gram-negativa	Gram-negativa (a)	Gram-negativa	--	Gram-negativa	Gram-negativa	Gram-negativa	Gram-negativa
Grupo	--	--	α -2 Proteobacteria	β - Proteobacteria	β - Proteobacteria	β - Proteobacteria	γ - Proteobacteria	γ - Proteobacteria	γ -Proteobacteria
Formación de esporas	ninguno	ninguno	ninguno	--	--	ninguno	--	--	--
Movilidad	0 a varios flagelos polares	--	No móvil	Móvil	Móvil por medio de un flagelo polar	Móvil	Sin flagelo	Móvil por medio de un flagelo polar único	Móvil



Tabla 3.11: Característica de algunas bacterias implicadas en la degradación de H₂S y otros compuestos de azufre

Condición	<i>Thiobacillus ferrooxidans</i>	<i>Thiobacillus novellus</i>	<i>Thiobacillus thioparvus</i>	<i>Thiobacillus denitrificans</i>	<i>Thermotrix azorensis</i>	<i>Thiothrix nivea</i>	<i>Thioalkalispira microaerophila</i>	<i>Thiomicrospira frisia</i>
Forma	Bacilo, 0.5-1.0 µm	Bacilo, 0.4-0.8 x 0.8-2.0 µm	Bacilo, 0.9-1.8 µm	Bacilo, 0.5 x 1.0-3.0 µm	Bacilo, 0.3-0.8 x 2-5 µm	Bacilo, 0.7-2.6 x 0.7-5.0 µm	Espirilos, 0.3-0.45 x 1-4 µm	Bacilo doblado 0.3-0.5 x 2.7 µm
Nivel trófico	Quimiotrófico obligado	Mixotrófico (quimiotrófico facultativo)	Quimiotrófico obligado	Quimiotrófico obligado	Quimiotrófico obligado	Mixotrófico (quimiotrófico facultativo)	Quimiotrófico obligado	Quimiotrófico obligado
Ejemplo de fuente de energía	Ion Ferroso y compuestos reducidos de azufre	H ₂ S, metil mercaptano, Sulfuro de dimetilo, Disulfuro de dimetilo	Tiosulfato, sulfuros	Tiosulfato, tetratiónato, tiosulfato, sulfuro, azufre elemental	Tiosulfato, tetratiónato, H ₂ S, azufre elemental	Comp. de azufre inorgánico, Comp. orgánicos simple	Sulfuro, polisulfuro, azufre elemental, tiosulfato	Tiosulfato, tetratiónato, sulfuro de hidrogeno
Requerimiento de oxígeno	Facultativo anaerobio**	Aerobio estrictamente	Aerobio estrictamente	Facultativo anaerobio***	Aerobio estrictamente	Aerobio estrictamente y microaerófilo	Aerobio estrictamente y microaerófilo	Aerobio estrictamente
Depósito de azufre	--	--	Extracelular	--	Intracelular	Intracelular	Intracelular	Extracelular
Referencias	Colorado School of Mines	Cha, et al. (1999), Kelly et al. (2000)	Massanau, et al (1997)	Kelly and Wood (2000)	Odintsova et al (1995)	Howarth et al (1999)	Sorokin, et al. (2002)	Brinkhoff et al. (1999)

* G = guanina; C = citosina

** Bajo condiciones anaeróbicas, *T. ferrooxidans* puede crecer en azufre elemental usando ion férrico como un aceptor de electrón.

*** Crece como un quimiotrófico anaerobio por el uso de nitrato, nitrito u óxido nítrico.

El *Thiobacillus* sp tiene la habilidad de crecer en varias condiciones ambientales como deficiencia de oxígeno y condiciones ácidas. El *Thiobacillus thiooxidans* crece a pH menores a 1 mientras que otras especies de *Thiobacillus* sp como *T. thioparus*, *T. denitrificans* y *T. novellus* (bacteria neutrofilica) se desarrollan en un medio neutral a pH de 6 a 8. El *Thiobacillus denitrificans* es capaz de crecer facultativamente en compuestos de azufre y reducir el nitrato (NO₃-) a nitrógeno gas mientras que *Thiobacillus novellus* es una bacteria mixotrófica que puede crecer heterotróficamente.

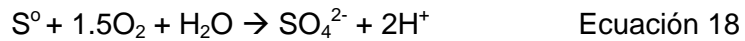
Otras especies de bacterias son capaces de degradar los compuestos de azufre en condiciones neutrofilica, alcalino y termofílica. El *Thermothrix azorensis* y *Thiothrix nívea* son bacterias neutrofilica y se desarrollan bien en un pH de 6 a 8. La temperatura de crecimiento óptimo para el *Thermothrix azorensis* es entre 76 y 86°C⁵⁰.

Las especies de *Beggiatoa* sp y *Thiothrix* sp., ambos γ-Proteobacteria microaerofilicos, tienen funciones nutricionales mixotróficas y son capaces de degradar el H₂S usando fuentes de energía orgánico e inorgánico⁵³.

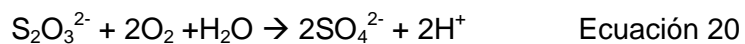
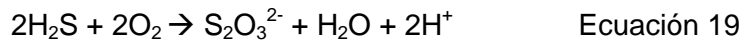
Las reacciones globales que ocurren en un biorreactor de remoción de sulfuro en condiciones aeróbicas (biológicas) son indicadas en las ecuaciones 16 y 17. En condiciones limitadas de oxígeno, el azufre es el mayor producto final, mientras que se producirá sulfatos si el sulfuro es limitado.



Además, dependiendo de las condiciones de reducción, ocurrirá una mayor oxidación del sulfato si el sulfuro es limitado pero el azufre elemental (S^0) está presente ³⁴.



Todas las reacciones indicadas originan cambios del pH, al igual que las reacciones abióticas paralelas que ocurren como la oxidación de sulfuro a tiosulfato (no biológico). Asimismo, el tiosulfato también puede ser oxidado biológicamente a sulfatos.



3.11 Biofiltro percolador

3.11.1 Antecedentes

La tecnología de biofiltros percoladores es antigua, habiendo sido usado en los años 40 cuando se observó que los flujos de aire oloroso fueron ingresados a través de un filtro percolador típico de tratamiento de aguas residuales, donde muchos de los compuestos olorosos fueron absorbidos en la película de agua y luego oxidados por la biomasa existente en el empaque.

Los primeros biofiltros percoladores fueron construidos en Alemania y comúnmente y contenían roca lava como media de filtración, la cual fue usada exitosamente por muchos años. La investigación de nuevas medias de filtración hicieron que la roca lava sea cada vez menos utilizada debido a que con este material solo se alcanzaban eficiencias de remoción de H_2S entre 85% y 98%. Además, la roca lava proporcionaba menor disponibilidad de área superficial por unidad de volumen y muchos poros se llenaban con agua, originando una menor disponibilidad para la oxidación del gas H_2S .

En los años 90, en Europa se empezaron a desarrollar los biofiltros percoladores prefabricados que utilizaban otros materiales inertes o sintéticos como media de empaque, lo cual producía una remoción consistente de H_2S mayor a 99%. Además, estos biofiltros requerían de recipientes menos robustos por el menor peso de los materiales de filtración. En Europa, existieron numerosas investigaciones en el diseño y operación de biofiltros percoladores en sistemas de aguas residuales orientadas a reducir el consumo de energía eléctrica y los productos químicos.

En los últimos 15 años, los biofiltros percoladores continúan siendo estudiados con el propósito de evaluar nuevas medias de filtración, analizar las estructuras microbiológicas y establecer los modelos de remoción de COV y H_2S en sistemas de tratamiento municipales e instalaciones industriales. En la tabla 3.12 se muestra un resumen de algunos estudios realizados recientemente⁶⁵.

Los biofiltros percoladores pueden tener diseños radicalmente diferentes dependiendo de los compuestos olorosos que se requiere eliminar. Sin embargo, esta tecnología puede tratar principalmente compuestos inorgánicos tales como el gas H_2S y compuestos orgánicos de alto peso molecular como Disulfuro de carbono y algunos mercaptanos si se usa una media compacta y de alta área superficial.

Tabla 3.12: Investigaciones realizadas para la remoción de sulfuro de hidrógeno usando biotritros percoladores.

Escala	Tipo de media	Volumen de media	Contaminantes olorosos y concentración de entrada del gas	Flujo de aire y tiempo de contacto	Bacteria	Eficiencia de remoción	Inoculación	Referencia
Laboratorio	Anillos de polipropileno	10 L	170 ppm H ₂ S, 2.2 g.m ⁻³ tolueno	1 m ³ .h ⁻¹ , 36 s	Bacteria oxidante de sulfuros, degradadores de tolueno	100% H ₂ S, 25-75% (tolueno)	Si (Degradadores de tolueno de un biofiltro percolador)	Cox and Deshusses (2001)
Piloto	---	3.3 m ³	Emisiones de plantas de tratamiento de aguas residuales: 10-50 ppm H ₂ S, 0-150 ppb COV, Trazas de otros compuestos	660 m ³ .h ⁻¹ , 21 s	---	98 % H ₂ S, 50-70% COV	---	Cox and Deshusses (2002)
Real	Empaques plásticos estructurados	51 m ³	Aire de planta de celolán: 60-155 ppm H ₂ S, 35-100 mg.m ⁻³ CS ₂	44,200 m ³ .h ⁻¹ (Flujo total), 4-10 s	---	85-99% H ₂ S, 40-70% CS ₂	---	Cox and Deshusses (2002)
Real	Espuma de poliuretano	500 m ³ (6 unid)	Olores de compañía de tabaco: 800-1200 OU	11 s	---	> 90% H ₂ S	---	Kim et al (2002)
Real	Espuma de poliuretano	7.3 m ³	Aire oloroso de planta de tratamiento de aguas residuales: 5-25 ppm H ₂ O, 67 ppb sulfuro de carbono, 192 ppb MM, 70 ppb CS ₂	1.0-2.3 s	<i>Hydrococcus</i> sp.	> 97% H ₂ S, 67% MM, 44% sulfuro de carbono, 35% CS ₂	Si (fodo activado de planta de tratamiento de aguas residuales)	Gabriel and Deshusses (2003)

* MM = Metil mercaptano; DMS = Sulfuro de dimetilo; DMDS = Disulfuro de dimetilo

3.11.2 Descripción del proceso

En los biofiltros percoladores, el aire contaminado ingresa a través de una media de filtración, en forma ascendente o descendente. La media de filtración es generalmente un material inerte como empaques de plástico extruido o espuma sintética, arcilla expandida y roca lava. Este material proporciona la superficie necesaria para la adherencia de la biopelícula y el contacto gas-líquido.

Durante el proceso, una solución acuosa es rociada en forma intermitente sobre la media de filtración, lo que proporciona humedad y nutrientes lo que favorece el desarrollo de microorganismos autotróficos que degradan los contaminantes en la biopelícula formada. Sin embargo, en algunos, una fracción de contaminantes también puede ser removida por los microorganismos suspendidos en el líquido recirculado (Figura 3.19).

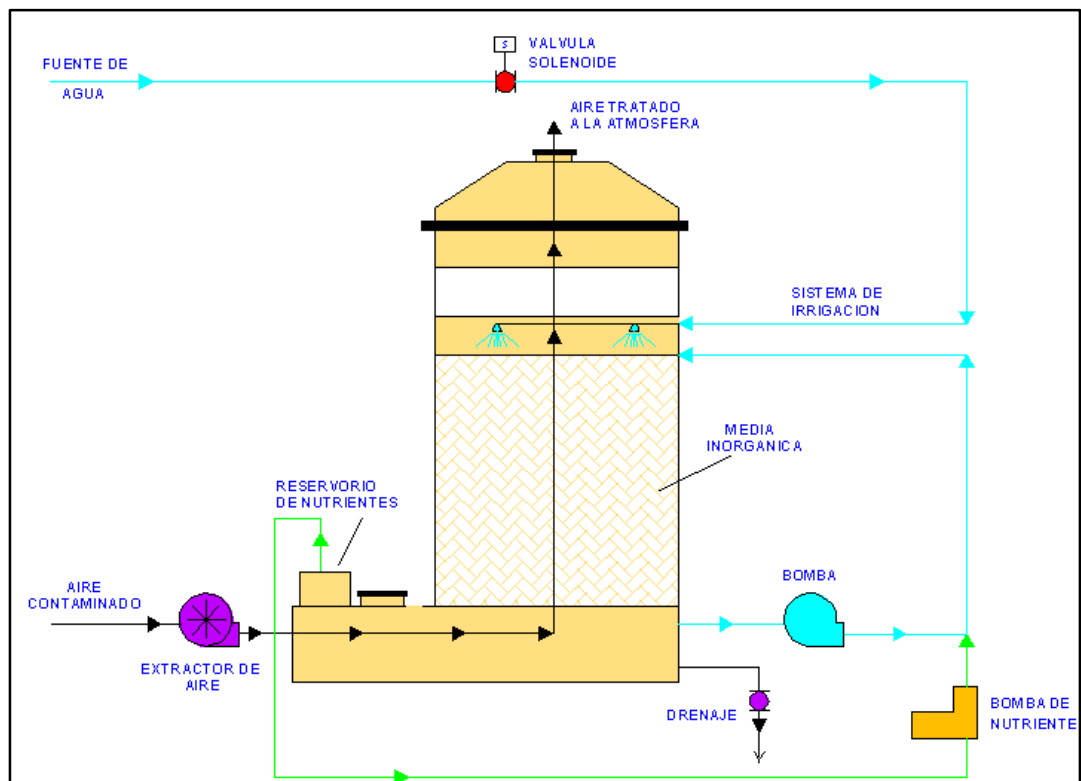


Figura 3.19: Esquema típico de un biofiltro percolador (Syed, 2006)

Por otro lado, los metabolitos de la biodegradación junto con una pequeña cantidad de biomasa abandonan el sistema por la purga del líquido lixiviado. Usualmente, menos del 10% de los contaminantes de carbono que ingresan al sistema son eliminados por esta vía.

3.11.3 Terminología de la biofiltración

a) Tiempo de contacto de lecho vacío (EBCT)

El tiempo de residencia en un biorreactor es un factor importante en la efectividad global de remoción de olores y ocurre mientras el aire está en contacto con la media de filtración. Este período comúnmente es expresado como el tiempo de contacto de lecho vacío (EBCT) y no considera los factores de porosidad de la media de filtración.

El EBCT depende del volumen de la media y el flujo de aire a tratar, siendo comúnmente expresado en segundos y calculado mediante la siguiente fórmula:

$$EBCT = V_m \times 3600 / F \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde:

EBCT= Tiempo de residencia en lecho vacío (s)

F = Flujo de aire contaminado ($m^3 \cdot h^{-1}$)

V_m = Volumen de la media de filtración (m^3)

Los organismos autotróficos en los biofiltros requieren entre 15 a 20 segundos de EBCT en una media orgánica para remover el H_2S y cumplir con sus procesos metabólicos. Esta rápida oxidación ocurre por la alta solubilidad relativa del H_2S y por la alta tasa de metabolismo de la bacteria *Thiobacillus*. En el caso de la remoción de COV, en un biofiltro con media orgánica se puede requerir de 30 a 60 segundos de tiempo de contacto, dependiendo de la solubilidad de los compuestos específicos.

Los compuestos orgánicos extremadamente difíciles de degradar pueden requerir mayor tiempo de contacto de gas antes de alcanzar su remoción total. En el tratamiento de aguas residuales municipales, algunos de los compuestos más difíciles de remover provienen de los procesos de tratamiento de lodos tales como oxidación de aire húmedo y digestión aerobia termofílica autotermal (ATAD). En una planta de tratamiento en College Station - Texas, el olor de un proceso ATAD no pudo ser removido en un biofiltro con 60 segundos de EBCT pero fueron exitosamente tratados cuando el biofiltro operó con 75 segundos de EBCT ⁷⁴.

En un biorreactor con medias inorgánicas o sintéticas, se requerirá un menor tiempo de contacto de gas para alcanzar una alta remoción de H₂S y COV debido a las mayores tasas de crecimiento celular y oxidación.

b) Carga volumétrica y velocidad superficial

La carga volumétrica y la velocidad superficial son términos relacionados con el ascenso de aire que ingresa al sistema. Estos parámetros son calculados mediante las siguientes fórmulas:

$$VL = F / Vm \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde:

VL = Carga volumétrica (m³.m⁻³.min⁻¹)

F = Flujo de aire (m³.min⁻¹)

Vm = Volumen de la media de filtración (m³)

$$Vs = F / A \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde:

Vs = Velocidad superficial (m.min⁻¹)

F = Flujo de aire (m³.min⁻¹)

A = Área superficial (m²)

c) Carga másica de ingreso

La carga másica se refiere a la cantidad de contaminante que ingresa al biofiltro por unidad de volumen de material filtrante por unidad de tiempo. La carga másica es generalmente calculado como:

$$L = C_i \times F / V_m \quad \text{Ecuación 24}$$

Donde:

L = Carga contaminante ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$)

C_i = Concentración de ingreso H_2S ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)

F = Flujo de aire contaminado ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)

V_m = Volumen de la media de filtración (m^3)

Normalmente la concentración de gas es reportada en volumen por lo que es necesario convertirlo en peso. En el caso del H_2S , la concentración en peso es calculada utilizando la siguiente fórmula:

$$C_i (\text{g} \cdot \text{m}^{-3}) = \frac{\text{Concentración (ppmv)} \times 34}{24,776} \quad \text{Ecuación 25}$$

3.11.4 Diseño y operación de biofiltro percoladores

Los parámetros típicos de diseño y operación de los biofiltros percoladores se muestran en la tabla 3.13. Los parámetros indicados son valores promedios y es importante indicar que algunos biofiltros percoladores son diseñados u operados fuera de estos rangos.

Durante muchos años, el suministro de nutrientes ha sido investigado especialmente en la remoción de COV. Aunque no existe un acuerdo o regla universal para determinar el suministro óptimo generalmente es admitido que el exceso de nutrientes resultaría en un incremento en la formación de biomasa y el taponamiento del lecho, conduciendo a la falla del sistema ⁷⁵.

Tabla 3.13: Parámetros típicos de diseño y operación de biofiltros percoladores¹⁶

Parámetro	Valor
Altura de la media de filtración	1 a 2.5 m
Área de la sección transversal	1 a 3,000 m ²
Flujo de aire purificado	100 a 1'000,000 m ³ .h ⁻¹
Volumen vacío del empaque ^(a) - Anillos de plástico, espumas o empaque estructurales - Roca lava, arcilla expandida	90 a 95% ~ 50%
Tiempo de contacto de lecho vacío	2 a 60 segundos
Caída de presión	1 a 5 cm columna de agua por metro de altura del lecho
Temperaturas de operación	10–30 °C
Velocidad superficial ^(b)	1 a 16 m.min ⁻¹
Velocidad del líquido percolado ^(c)	0.01 a 10 m.h ⁻¹
pH del líquido de reciclaje	~ 7 para control de COV o compuestos difíciles de degradar, 1 a 2 para control del H ₂ S
Suministro de nutrientes inorgánicos (N, P, K, trazas)	Usualmente 0.05 a 1 veces de la cantidad calculada mediante estequiometría
Concentración de contaminantes a tratar - COV - Olores	2.6 a 10 g.m ⁻³ 500 a 50,000 unidades de olor
Eficiencias típicas de remoción de contaminantes	60 – 99.9+%

(a) Valores del reactor en la puesta en marcha. Con el tiempo, el crecimiento de biomasa decrece la porosidad del lecho típicamente entre 10% a 30%.

(b) Flujo de ingreso / sección del área transversal de la media

(c) Flujo de irrigación/ sección del área transversal de la media.

Los biofiltros percoladores para el control de olores y H_2S usualmente no están sujetos a problemas de taponamiento probablemente por la ineficiencia relativa de los organismos autotróficos en lo que se refiere al crecimiento y producción de biomasa. Las medidas de control de la biomasa en los biofiltros han sido estudiadas por numerosos investigadores; sin embargo, en esta tesis no serán discutidos.

Otro aspecto importante es que los biofiltros percoladores pueden ser operados con el gas y el líquido fluyendo en paralelo o en contracorriente. La operación en paralelo es frecuentemente preferido para el tratamiento de COV debido a que la operación en contracorriente resulta en la separación del contaminante de la fase líquida en la salida de gas del reactor, causando de este modo un bajo tratamiento. Por supuesto, el grado de separación dependerá de la concentración de los contaminantes disueltos en el líquido reciclado, que a su vez depende de otros parámetros. La operación en contracorriente es comúnmente preferida para el tratamiento de H_2S y compuestos de azufre, ya que éstos tienen una limitada transferencia de masa y existen pocos contaminantes disueltos en el líquido filtrado. El rango típico de velocidades superficiales es de 0,01 hasta 10 $m.h^{-1}$.

Los biofiltros percoladores normalmente operan con tasas de irrigación mucho menores que los lavadores químicos, resultando en el humedecimiento parcial del lecho de empaque. Sin embargo, en el tratamiento de contaminantes como el H_2S que produce ácido, el líquido filtrado también sirve para el control de pH. Si la tasa de irrigación es baja, el líquido percolado no es capaz de eliminar los ácidos producidos con rapidez suficiente y el pH podría disminuir hasta llegar a la inhibición del proceso.

3.11.5 Desempeño del biofiltro

En la evaluación del desempeño de un biofiltro se considera la eficiencia de remoción y la capacidad de eliminación. Por razones prácticas, las investigaciones académicas están principalmente referidas a la capacidad de eliminación máxima que ocurre a una concentración de contaminante relativamente alta y con una eficiencia de remoción mínima de aproximadamente 90%.

a) Eficiencia de remoción (ER)

La eficiencia de remoción (*ER*) es la fracción del contaminante removido por el biofiltro y es expresado como porcentaje.

La eficiencia de remoción se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Eficiencia de remoción (ER)} = \frac{(C_e - C_s) \times 100\%}{C_e} \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde:

C_e = Concentración de ingreso del contaminante ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)

C_s = concentración de salida del contaminante ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)

b) Capacidad de eliminación (CE)

La capacidad de eliminación (*CE*) es la masa del contaminante degradado por unidad de volumen del material del biofiltro por unidad de tiempo. La capacidad de eliminación es calculada mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Capacidad de eliminación de contaminante (CE)} = \frac{(C_e - C_s) * F}{V_m} \quad \text{Ecuación 27}$$

Donde:

CE = Capacidad de eliminación de contaminante ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3} \text{ h}^{-1}$)

C_e = Concentración de ingreso del contaminante ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)

C_s = Concentración de salida del contaminante ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)

F = Flujo de aire ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)

V_m = Volumen de la media (m^3)

c) Capacidad de eliminación máxima

El rendimiento de un biofiltro es usualmente reportado como una función de la carga másica en vez de la concentración de ingreso. Esto permite la comparación de sistemas de diferentes tamaños operados bajo diferentes condiciones.

Un supuesto subjetivo es que el rendimiento depende solo de la carga contaminante, es por esta razón que las condiciones de flujo de aire alto con bajas concentraciones conllevan a capacidades de eliminación similares a flujos de aire bajo con altas concentraciones. Este supuesto es generalmente válido debido a que la concentración de contaminantes comúnmente encontrado en los biofiltros son suficiente altos para que la micro-cinética sea de orden cero. Esto no es totalmente verdadero a concentraciones de contaminantes muy bajas (típicamente debajo de $0.05 - 0.1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$), en particular para contaminantes con coeficientes altos de la Ley de Henry debido a que la cinética de primer orden prevalecería en la biopelícula resultando en una reducción de la capacidad de eliminación máxima.

En la figura 3.20 se muestra una curva típica de la capacidad de eliminación vs. Carga de contaminante. De esta figura se observa que esencialmente existen 3 regímenes de operación:

a) **Carga baja.**- También llamada régimen de primer orden. La capacidad de eliminación y la carga másica son idénticas y el contaminante es completamente removido. El biofiltro percolador está operando eficientemente por debajo de su capacidad de eliminación máxima y el rendimiento se incrementa proporcionalmente con la carga.

- b) **Rango intermedio.**- En esta zona ocurre la ruptura de los contaminantes. Las altas concentraciones o flujos de aire ocasionan que la capacidad de eliminación se incremente pero a menor grado que la carga másica.
- c) **Carga alta.**- También llamada régimen de orden cero. El biofiltro percolador está operando a su capacidad de eliminación máxima. El incremento de la concentración del contaminante o el flujo de aire no resulta en un mayor incremento en la capacidad de eliminación y la eficiencia de remoción decrece.

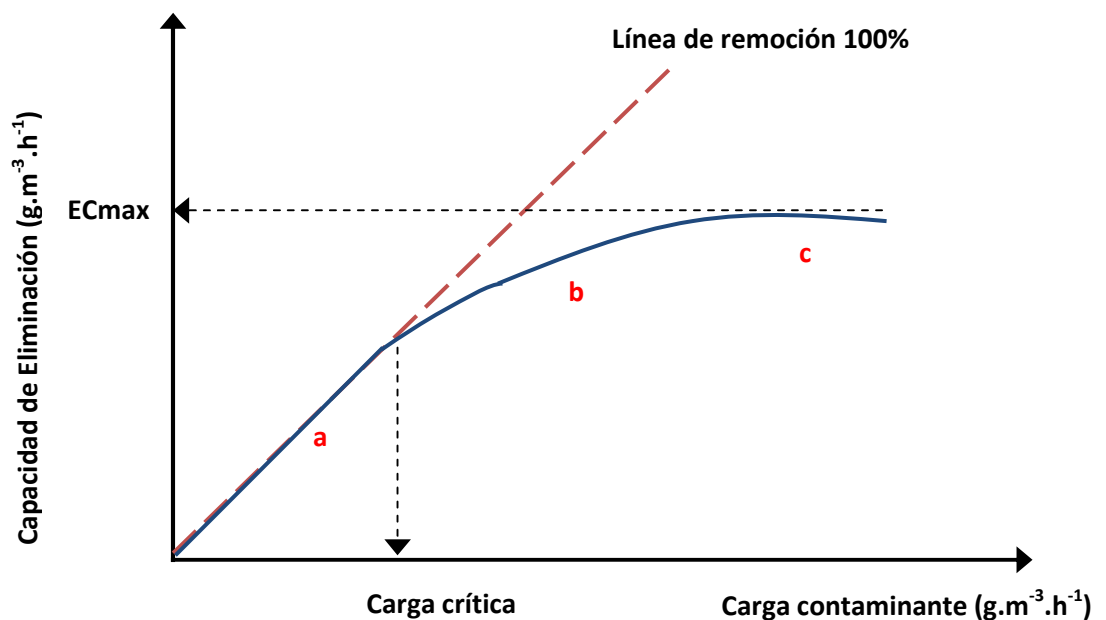


Figura 3.20: Curva típica de la capacidad de eliminación vs. Carga contaminante para un biofiltro percolador (Deshusses, 2000)

En este contexto, la identificación de la carga crítica es un parámetro valioso y es definida como la carga máxima antes que la remoción se desvíe significativamente de la línea de remoción de 100%. Sin embargo, existen algunas limitaciones para el uso de la carga crítica debido a que es relativamente sensible para la concentración de ingreso del contaminante.

La capacidad de eliminación máxima del H₂S reportado por diversos autores es variable. Deshusses¹⁶ encontró que la capacidad máxima de eliminación en biofiltros percoladores varía entre 5 y 200 g.m⁻³.h⁻¹, aunque la mayoría de estudios fueron realizados a nivel laboratorio. Huub & Deshusses (2002), reportaron que la capacidad de eliminación para el tolueno y H₂S fueron de 70 g.m⁻³.h⁻¹ y 20 g.m⁻³.h⁻¹ respectivamente, en un biofiltro percolador con anillos de polipropileno y un EBCT de 36 segundos. Por otro lado, Kraakaman³¹ en un biofiltro percolador con material sintético y construido a nivel de laboratorio, reportó una carga crítica de H₂S de 70 g.m⁻³.h⁻¹.

3.11.6 Componentes de los biofiltros percoladores

Todos los biofiltros percoladores cuentan con los siguientes componentes comunes:

- Ducto de aire
- Regulador
- Extractor
- Media de filtración
- Sistema de humidificación e irrigación
- Sistema de drenaje
- Control e instrumentación

Los biorreactores pueden tener mucho mas equipamiento e instrumentación dependiendo de las condiciones específicas para el cual ha sido diseñado.

a) Ductos

El aire contaminado debe ser extraído de la fuente y conducido hacia el sistema de control de olores a través de una red de ductos. El movimiento del aire en el ducto y el sistema de extracción es gobernado por los principios básicos de la ingeniería mecánica. Sin embargo, existen algunos aspectos que deben ser considerados en

el diseño y selección del material del ducto, especialmente para evitar el problema de la corrosión.

Las tuberías y accesorios usados en la red de ductos deberían ser resistentes a una solución de ácido sulfúrico al 10% en peso para evitar daños por la oxidación biológica del gas H_2S en el interior de las superficies. El polivinilo de cloruro (PVC) o polietileno de alta densidad (HDPE) son usados en aplicaciones debajo del terreno, mientras que la fibra de vidrio con resina de vinilester y el acero inoxidable 316, son considerado los estándares en ductos superficiales. En ambientes donde la corrosión es leve, el aluminio o acero inoxidable 304 pueden ser utilizados.

En cuanto a las formas, los ductos usados para los sistemas de control de olores son típicamente circulares o rectangulares. En algunos casos, la selección de la forma del ducto depende del material de construcción. Por ejemplo, la construcción de ductos de aluminio es casi exclusivamente rectangular mientras que con la fibra de vidrio es fácil fabricar un ducto circular o tubería usando la técnica de fibra arrollado.

Respecto al tamaño del ducto, el diseño está en función del flujo de aire oloroso y la presión dentro de la red. Un criterio de diseño es mantener una velocidad de aire en el ducto de 1,500 a 2,500 $ft.min^{-1}$ sin exceder una pérdida de presión de 0.0622 Kpa (0.25 pulgadas de agua) cada 30.48 m de longitud.

La caída de presión en el ducto debería ser calculada según los estándares de la American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., *Fundamental Handbook* (ASHRAE, 2001) o Sheet Metal and Air Conditioning Contractors' National Association Inc., *HVAC Systems Duct Design Manual* (SMACNA, 1990)

b) Regulador de flujo

El uso de reguladores en cualquier red de ductos de ventilación es requerido para balancear los flujos de aire y/o aislar el equipamiento del sistema. Los reguladores deben ser instalados en cada conexión del ducto o rejilla de ventilación de la fuente de olores.

Los dispositivos más utilizados en ductos circulares son los reguladores tipo paleta o válvula de mariposa que actúan con eficiencia y consiguen el control del flujo del sistema. En los sistemas de biofiltración y carbón activado es recomendable instalar un regulador antes del extractor para permitir que el recipiente sea aislado y se evite el ingreso del flujo durante el período de cambio de la media de filtración.

Los materiales de los reguladores de flujo deben ser resistentes a la corrosión y usualmente son fabricados del mismo material del ducto es decir fibra de vidrio, aluminio, PVC o acero inoxidable.

c) Extractores

Los extractores comúnmente usados en los biofiltros son tipo centrífugos con impulsor inclinado. Este tipo de extractor puede producir flujos de aire y operar a las presiones requeridos en este tipo de sistemas. Los biofiltros, prefabricados generalmente operan en un rango de presión entre 0.12 y 3.0 kpa de agua (0.5 a 12 pulgadas) mientras que algunos biofiltros de lecho de tierra operan a presiones mayores de 5.0 kpa de agua (20 pulgadas). Este rango de presiones es necesario para superar las pérdidas de presión en el ducto y en la media de filtración.

Las pérdidas de presión en el ducto dependen del flujo de aire, diámetros, longitudes, válvulas y otros accesorios usados mientras que las pérdidas de presión en la media de filtración dependen del tipo de material. En una media orgánica de 1 m de altura, la pérdida de presión pueden estar en el rango de 0.12 kpa (0.5 pulgadas de

agua) durante el arranque y 2.5 kpa (10 pulgadas) cerca al final de su vida útil.

Los extractores de flujo axial no son usados en los biofiltros por su limitada presión que generalmente es de 0.75 Kpa (3.0 pulgadas de agua). Adicionalmente, los extractores axiales tienen una abertura en el ducto para el sistema de accionamiento del impulsor que permite el escape de olores. Los sopladores de desplazamiento positivo no deben usarse en los sistemas de biofiltros debido a que su presión de descarga de aire es muy alta y los volúmenes son bajos, ocasionando que los costos de operación sean elevados.

Los extractores también están propensos a la condensación interna en la cobertura, por lo cual estos equipos deben tener un drenaje para permitir la descarga de agua. Además, los extractores experimentarían corrosión si transportan gases como el H_2S , siendo necesaria que toda la superficie expuesta al flujo de aire pueda resistir a una solución de ácido sulfúrico al 7% en peso que equivale a un pH de 0.5.

d) Media de filtración

Las medias de filtración usadas en los biofiltros percoladores pueden ser materiales inorgánicos en forma de granos, con alta área superficial, porosa o no porosa, o materiales sintéticos como plásticos, cerámicos y espumas.

Existen diversos materiales que pueden ser usadas exitosamente en los biofiltros percoladores pero cada una de ellas tiene sus ventajas y desventajas (Tabla 3.14). Las condiciones locales y los compuestos olorosos a tratar son los factores primarios a considerar cuando se selecciona la media de filtración. Además, la disponibilidad y el costo de los materiales pueden tener gran influencia en esta selección.

Tabla 3.14: Características de las medias de filtración inorgánica y sintética ²⁶

Material	Ventajas	Desventajas
Granular (grava, roca lava, arcilla expandida, etc)	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo y fácilmente disponible • Superficie áspera para la adherencia de la biopelícula • Usado en filtros percoladores de tratamiento de agua • Tiene contenido metálico que puede reaccionar con el H₂S y formar sulfuros metálicos 	<ul style="list-style-type: none"> • Baja área superficial • Baja fracción de vacíos que pueden ser fácilmente obstruidos • Alta densidad de masa • Alta caída de presión del gas si el tamaño es pequeño
Almohadillas de malla fibrosa	<ul style="list-style-type: none"> • Alta área superficial • Baja densidad de masa • Baja caída de presión en la fase gas • El área superficial de la biopelícula se incrementa con el espesor 	<ul style="list-style-type: none"> • Menor diámetro de paso libre que puede obstruirse fácilmente • Compactación debido al peso de la biomasa, incrementando la caída de presión y causando taponamiento
Espuma polimérica de celda abierta	<ul style="list-style-type: none"> • Buena retención de agua • Alta área superficial • Baja densidad de masa • Retiene el crecimiento de biomasa • Alta porosidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Dependiendo del número de poros por pulgada, puede obstruirse fácilmente • Dificultad para el desprendimiento de la biomasa • Compactación debido al peso de la biomasa
Empaque plástico extrudido	<ul style="list-style-type: none"> • Comercialmente disponible en muchos tamaños y formas • Buena distribución del líquido • Baja caída de presión • Baja densidad de masa • Algunos diseños tienen una alta fracción de vacíos • Buen contacto gas-líquido 	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollado para torres de absorción de gas donde las tasas de flujo líquido son muy altas • Superficie no disponible para la adherencia y crecimiento de la biopelícula • Insuficiente fracción de vacíos, especialmente con los tamaños pequeños
Plástico extrudido	<ul style="list-style-type: none"> • Alta área superficial • Baja caída de presión en la fase de gas • Alta fracción de vacíos • Baja densidad de masa • Gran diámetro de pase libre • Fácilmente soportable 	<ul style="list-style-type: none"> • Superficie plástica no disponible para la adherencia y crecimiento de la biopelícula • Originalmente usado en filtros percoladores de tratamiento de agua • Tiene que ser cortado para fijarse en el recipiente • Altos costos por unidad de volumen
Cerámico	<ul style="list-style-type: none"> • Alta área superficial • Baja caída de presión de la fase gaseosa • Alta fracción de vacíos • Baja densidad de masa • Gran diámetro de pase libre • Fácilmente soportable 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiene que ser cortado para fijarse en el recipiente • Alto costo por volumen unitario • No fabricado para tamaños grandes • Poco estudios experimentales en biofiltración

Fuente: Govind (2005)

Los materiales minerales o inorgánicos cumplen la misma función que la media orgánica y proporcionan una superficie para el crecimiento de las bacterias. Asimismo, los materiales usados deben garantizar las mismas condiciones ambientales y requerimientos nutricionales para el crecimiento de las bacterias autotróficas y heterotróficas. La media inorgánica típicamente no contiene nutrientes para la asimilación biológica, por lo cual una solución de nutrientes debe ser agregada junto con el agua.

Las medias inorgánicas son más resistentes a las condiciones ácidas causadas por la oxidación del gas H_2S . La arena silíceo, granito, basalto y otros minerales silíceos puros son típicamente usadas por su resistencia a los fuertes ácidos minerales. Las pruebas con ácido deberían ser realizadas en cualquier material mineral propuesto, sumergiendo las muestras por 24 horas en una solución de ácido sulfúrico al 10% en peso y observar cualquier decoloración en el líquido o daño de los granos.

Las características deseadas para una buena media de filtración inorgánica son las siguientes:

- **Alta fracción de vacíos.**- La media inorgánica debería tener una alta fracción de espacios vacío (> 80%) para que la biopelícula crezca y el crecimiento de la biomasa no sea fácilmente desprendida.
- **Alta área superficial.**- La biopelícula crece en la superficie de la media de soporte y por esta razón, si esta área superficial es grande, el contacto entre la biopelícula y el contaminante gaseoso también será mayor.
- **Baja caída de presión.**- Los costos de operación son proporcionales a la caída de presión a través del lecho del biofiltro, por lo cual se requieren materiales que originen una menor caída de presión.

- **Superficie hidrofílica.** Una buena capacidad de humidificación en la media de filtración mejora la adherencia de la biopelícula, retiene el agua y evita el secado.
- **Baja densidad total.** El peso total de la media depende de su densidad de masa. Los materiales ligeros o con bajas densidades permiten reducir el costo del recipiente del biofiltro.

e) Sistema de humidificación e irrigación

El control de la humedad e irrigación es crítico en un biofiltro percolador debido a que un exceso de agua llena los poros de la media de filtración y puede causar el desarrollo de zonas anaerobias, compactación y reducción del área superficial disponible para los microorganismos. Por otro lado, la poca cantidad de agua provoca el secado de la media de filtración así como la aparición de fisuras que causan la canalización y cortocircuitos.

La clave para mantener la humedad óptima en un biorreactor es entendiendo la relación entre la temperatura del aire y el contenido de humedad. Muchas veces, el aire que ingresa al biofiltro tiene una alta humedad relativa porque proviene de un proceso hermetizado muy cercano a la superficie del agua residual. Dependiendo de la temperatura ambiental, cuando el aire ingrese al biofiltro ocurrirá la evaporación o condensación del agua, muchas veces en forma simultáneamente. Si el flujo de aire frío que atraviesa la media de filtración está en modo condensado, el agua sería depositada en el lecho mientras que si el flujo de aire caliente está en modo de evaporación, tomará agua de la media de filtración.

Las condiciones de evaporación y condensación pueden ocurrir en un biorreactor en cualquier momento y no se puede prever. Por esta razón, los sistemas de humidificación e irrigación deben ser diseñados para asegurar una condición de óptima de humedad. Las formas típicas de irrigación en los biorreactores son los siguientes:

- Humidificación del flujo de ingreso de aire.
- Irrigación profunda con mangueras.
- Irrigación superficial con rociadores.

La humidificación en el ducto es una vía simple para proporcionar humedad al flujo de aire. En este sistema, las boquillas rociadoras son instaladas en el extremo de una tubería de acero inoxidable 316 que se inserta a través de un acople adaptador directamente en el centro del ducto de aire. Las boquillas comúnmente se ubican para rociar agua en sentido del extractor y opuesta a la dirección del flujo de ingreso para proporcionar un mayor tiempo de contacto del aire.

En un biofiltro, los sistemas de humidificación son tipo cascada y similar a un lavador húmedo donde el agua se aplica directamente en la sección superior de la media de filtración mientras el flujo de aire ingresa en sentido ascendente. De esta forma, el aire recoge la humedad necesaria (Figura 3.21).



Figura 3.21: Sistema de humidificación del flujo de aire en un biofiltro orgánico (Biorem, 2000)

Por otro lado, la irrigación de lecho profundo es una forma de proporcionar humedad en un biofiltro construido en el suelo. En este sistema se utilizan mangueras que son instaladas a través de la media para proporcionar un efecto de capas de irrigación. La ventaja de este tipo de irrigación es que se usa menos agua y se evita zonas saturadas en la media de filtración. Si el agua es aplicada directamente en la superficie del biofiltro, la zona superior llega a estar saturada mientras el líquido llega a las capas inferiores. La aplicación de agua directamente a la zona que necesita evita la sobresaturación. Por ejemplo, en un biofiltro con 1 m de profundidad se necesitaría un máximo de dos zonas de irrigación; las mangueras se instalarían a 150 mm y 600 mm por encima del túnel.

El tipo de irrigación superficial es utilizado principalmente en biofiltros percoladores prefabricados. Este sistema consiste de una red de tuberías con rociadores fijos o móviles, instalados en la sección superior del biofiltro con el objetivo irrigar toda la superficie de la media de filtración.

f) Sistema de drenaje

El exceso de irrigación y el agua condensada debe ser recolectado y evacuado para su disposición final en una alcantarilla o en un proceso de tratamiento adecuado. En los biofiltros construidos en el terreno, el piso está inclinado y tiene una geomembrana de HDPE que permite el almacenamiento y el drenaje del lixiviado.

El sistema de drenaje en los biofiltros percoladores prefabricados es simple. La sección inferior del biofiltro tiene una tubería de drenaje con una trampa P para evitar la fuga de aire oloroso debido a que esa zona se encuentra bajo presión. El sistema de drenaje también permite recolectar los sedimentos acumulados con los años y las partículas que interfieren en la media de filtración. Por esta razón, el sistema de drenaje de los biofiltros debería estar equipado con un registro de limpieza en todos los puntos muertos y tramos de tubería

largos. Esto permite que la tubería de drenaje sea limpiada o succionada y se remuevan los sedimentos y materiales indeseados.

La disposición del lixiviado debe realizarse cuidadosamente para asegurar que no exista contacto con cualquier otro material o superficie que pudiera ser afectado adversamente por el ácido. La técnica más común de disposición es descargar el lixiviado directamente hacia el flujo de un colector o proceso de tratamiento. Usualmente, existe suficiente alcalinidad en la corriente receptora para amortiguar el efecto del drenaje ácido, aunque esto debería ser verificado en cada aplicación.

g) Control e instrumentación

Los biofiltros deben ser equipados, como mínimo, con un manómetro de presión en el ducto para verificar el fin de la vida útil de la media de filtración. La media de filtración puede requerir su reemplazo cuando el flujo de aire de diseño no puede ser alcanzado a la presión de diseño máxima del extractor. Esto indica que el extractor está operando con un flujo de aire mínimo y podrían ocurrir fugas potenciales de olores. Por ejemplo, una media orgánica en base a compost empieza con una pérdida de carga (Lectura en el manómetro) entre 12 y 50 mm (0.5 y 2 pulgadas de agua) pero es diseñada para una presión máxima de 200 a 250 mm (8 a 10 pulgadas de agua). El monitoreo de la presión también es un indicador de un exceso de agua de irrigación debido a que la pérdida de carga se incrementará cuando la media de filtración tiene mayor humedad.

Algunos otros instrumentos usados en los biofiltros incluyen medidores de flujo en el ducto principal, sensores de humedad y sensores de gases específicos en línea que pueden ser enlazados a un Sistema de Supervisión de Control y Adquisición de Datos (SCADA). Además, en el ducto deberían existir puntos de control

para el uso de anemómetros o tubos pitot que permitan medir la velocidad del aire.

3.11.7 Parámetros que afectan la biofiltración

a) pH

Los microorganismos tienen un rango de pH óptimo y específico para sus actividades metabólicas. En un biofiltro, el ácido sulfúrico es producido especialmente cuando se tratan altas concentraciones de H_2S . Muchos intentos se han realizado para ajustar o incrementar el pH en un biofiltro como por ejemplo irrigar periódicamente la media de filtración con una solución con pH alto (buffer).

Las enmiendas de media carbonatada con conchas de ostras o calizas también han sido utilizadas, sin embargo estos materiales se convierten rápidamente en sulfato de calcio (gypsum) que se depositará en el biofiltro como una pasta delgada³⁸. El Gypsum típicamente migra hacia la sección inferior de la media donde se compacta. En general, las experiencias desarrolladas para ajustar (o incrementar) el pH en la media de filtración no han sido favorables y en muchos casos dañan la flora biológica del biofiltro.

Muchas especies de bacterias del género *Thiobacillus* tienen una única habilidad para convertir el gas H_2S en ácido sulfúrico en presencia de oxígeno. Cada especie de bacteria *Thiobacillus* solo puede sobrevivir en condiciones ambientales específicas. Algunas especies solo crecen bien en superficies con pH de 6.5 a 9. Sin embargo, cuando el pH disminuye por debajo de 6.5, estas bacterias mueren y otras especies que pueden soportar pH bajos crecen en la superficie. El proceso de colonización sucesiva continúa hasta que nuevas especies puedan sobrevivir en condiciones de pH entre 4.0 y 6.5. La producción de ácido sulfúrico origina que el pH disminuya por debajo de 4 y nuevas especies como el *Thiobacillus Thiooxidans* pueden sobrevivir en estas condiciones. En pruebas de laboratorio,

esta bacteria creció bien cuando estuvo expuesto a una solución de ácido sulfúrico al 7% en peso, que equivale a un pH de aproximadamente 0.5³⁷.

Las especies que producen la mayor cantidad de ácido son también las más rápidas de convertir el H₂S. El incremento del pH en la media de filtración modifica las condiciones y originan oxidantes menos robustos que pueden morir bajo algunas circunstancias. Las experiencias han demostrado que la selección de una media de filtración apropiada y ciclo de irrigación periódicos no requieren de enmiendas o productos químicos para regular el pH.

b) Humedad

El contenido de humedad en la media de filtración es un factor crítico para el desempeño del biorreactor debido a que los microorganismos necesitan de agua para llevar a cabo sus actividades metabólicas normales⁵¹. El poco contenido de humedad provoca el secado del lecho, junto con el desarrollo de fisuras que causan la canalización y cortocircuito. Esto también limita de agua a los microorganismos, causando una reducción significativa en la tasa de biodegradación. Por otro lado, el exceso de agua inhibe la transferencia de oxígeno y contaminantes hidrofóbicos a la biopelícula, promoviendo el desarrollo de zonas anaeróbicas en el lecho que limitan la velocidad de reacción. Además, el exceso de agua puede resultar en la emisión de gases olorosos por la falta de oxígeno, incrementando la contrapresión por la reducción del volumen de vacíos y la canalización del gas dentro del lecho.

El contenido óptimo de agua varía con los diferentes tipos de medias de filtración, dependiendo del área superficial, la porosidad y otros factores. Ottengraf⁵¹ recomienda un contenido de humedad de 40% a 60% (en peso) para una amplia variedad de materiales orgánicos sin tener en cuenta el tipo o tamaño de las partículas. Si la media de filtración contiene mayormente materiales pequeños tales como

compost de residuos de jardín, arroz o greda, la humedad óptima debería ser más alta que los materiales grandes tales como compost, cortezas de árboles o astillas de maderas. Los requerimientos de humedad típicamente son de 40% a 60% para musgo de turba, 20% a 40% para compost cribado y 15% a 25% para suelos y arenas ³⁰. En materiales inorgánicos, el contenido de humedad óptimo varía entre 20% y 30% en peso seco, mientras que en medias sintéticas, existe muy poca información acerca del contenido de humedad requerido.

c) Temperatura

La temperatura es una de las variables más importantes en la tasa de crecimiento microbiológico y determina el tipo de especies presentes en una comunidad microbológica⁷². En la operación exitosa de un biorreactor, la temperatura debería mantenerse relativamente constante. La temperatura del biofiltro es principalmente influenciada por la temperatura del flujo de ingreso de aire y por las reacciones biológicas exotérmicas en el lecho. Como la temperatura se incrementa, las tasas de crecimiento celular y metabólico se incrementan pero la absorción decrece. Sin embargo, por encima de cierta temperatura crítica, ocurrirá la inactivación de ciertas proteínas y un abrupto cese del crecimiento. La temperatura óptima de varias especies presenta un rango amplio, pero muchas aplicaciones de biofiltros se desempeñan a temperaturas en el rango mesofílico (20-45°C) y a menudo 35-37°C es considerada como la temperatura óptima ⁷².

Giggey et al. (1994) reportaron que los biofiltros tratando gases de azufre reducidos y terpenos funcionaron bien en condiciones de invierno a temperaturas ambiente por debajo de 0°C. Sin embargo, Shareefdeen et al ⁵⁸ observaron un decrecimiento en la remoción de H₂S cuando la temperatura descendió por debajo de 10°C. Estos investigadores sugirieron agregar vapor para mantener el balance de

calor en el biofiltro en climas fríos, aunque esto significaría incrementar los costos de operación.

d) Nivel de oxígeno

El oxígeno es vital para la operación de los biofiltros debido a que los microorganismos predominantes son aerobios. Las bacterias heterótrofas aeróbicas presentes en el lecho del biofiltro requieren al menos de 5% a 15% de oxígeno en el flujo de ingreso de aire para sus metabolismos.

Yang et al ¹ mostraron que la biofiltración puede estar limitado de oxígeno en sistemas con cargas altas, mostrando que la biofiltración con 63% de oxígeno en el flujo de ingreso incrementa la tasa de remoción máxima de metanol de 120 a 145 g.m⁻³.h⁻¹ sobre el aire regular (21% oxígeno). Además, el incremento en el contenido de oxígeno superior a 80% no contribuye a mejorar la eficiencia del biofiltro.

En general, en muchos sistemas de control de contaminación de aire, el suministro de oxígeno no es un problema debido a su abundancia en el flujo de ingreso de aire y además, la biopelícula es relativamente delgada. Sin embargo, en biofiltros sobrecargados puede ser una limitación, resultando en la formación de ácidos y otros productos intermedios.

e) Nutrientes

Los microorganismos en un biofiltro requieren de nutrientes para su crecimiento y reproducción óptima⁷². Los requerimientos de nutrientes son principalmente nitrógeno y fósforo, pero también se necesita pequeñas cantidades de azufre, hierro, manganeso, magnesio, calcio y otras trazas de metales ⁵⁸.

En un biofiltro percolador de media inorgánica, los nutrientes deberán ser suministrados para mejorar el rendimiento. En los biofiltros de

lecho de tierra, una solución de nutrientes debe ser agregada periódicamente (Cada uno o dos semanas) para el crecimiento y las funciones celulares de las bacterias. Las medias orgánicas como el compost y turba, contienen nutrientes que contribuyen al crecimiento normal de los microorganismos. Algunos estudios han demostrado que el rendimiento de los biofiltros con media orgánica puede ser mejorado con la adición de nutrientes solubles en el agua de irrigación pero típicamente no es necesario.

f) Caída de presión

En un biofiltro, la síntesis de la biomasa origina una acumulación de la masa microbiana con el tiempo, que ha sido relacionado con un incremento en la resistencia del flujo de aire en el lecho. La acumulación de biomasa es mayor en las secciones de ingreso de los biofiltros y produce un cambio en las características del lecho como por ejemplo, la reducción en los espacios de vacío de partículas y la compactación del material en medias naturales como astillas de madera. Estos cambios causan la canalización y el incremento de la caída de presión.

En general, la caída de presión se incrementa linealmente con el incremento del flujo de gas y comienza a ser exponencial a velocidades de flujo altas¹. Además, a una tasa de flujo de gas determinada, la caída de presión aumenta exponencialmente con el incremento de la biomasa y con la disminución del tamaño de partícula, especialmente para las partículas menores a 1 mm. El aumento exponencial de la biomasa significa que una menor caída de presión total se obtendrá si el crecimiento de biomasa es distribuida a lo largo del biofiltro, en lugar de ser localizada en regiones específicas⁴⁷. La compactación del lecho del biofiltro en períodos prolongados por sobre riego también ocasiona una alta caída de presión.

Numerosos investigadores han desarrollado ecuaciones predictivas para describir la caída de presión en los biofiltros con diversos materiales, pero no existe ninguna correlación que pueda predecir la caída de presión para lechos de diferentes tamaños de partícula. Higgins et al (1982) desarrollaron ecuaciones para predecir las pérdidas de presión en pilas de compost. Sin embargo, Williams (1988) encontró que la ecuación no predice la pérdida de carga a través de un biofiltro que utiliza compost de lodo.

Estas herramientas predictivas pueden proporcionar guías para la selección de la media de filtración, sin embargo la variabilidad en las características físicas de los materiales (Distribución de tamaño de partícula, espacio de poros disponibles y densidad), el crecimiento de la biomasa y las características del gas son tan variable de un medio a otro que se requieren mediciones en el sitio a lo largo del tiempo para evaluar detalladamente la caída de presión en cada aplicación.

g) Profundidad de la media

La profundidad de la media en biofiltros varía entre 0.5 a 2.5 m. Una profundidad de 1 m a 1.2 m parece ser común para permitir un tiempo de residencia suficiente, minimizando los requerimientos de área de terreno del biofiltro. Algunos fabricantes recomiendan el uso de múltiples capas de media en biofiltros ya que estos tendrían menor superficie para tasa de carga altas ³⁷. Un biofiltro de mayor profundidad podría ser utilizado pero la pérdida de carga del sistema se incrementa y en este caso, existirá potencial para la compactación en la sección inferior de la media de filtración.

h) Pretratamiento del gas contaminante

Las comunidades microbianas en los biofiltros pueden ser envenenadas por la presencia de contaminantes tóxicos, excesiva concentración del contaminante o la variación de las condiciones ambientales. Por esta razón, en el funcionamiento óptimo de los biofiltros, el acondicionamiento de los gases residuales podría ser

necesario. El suministro suficiente de oxígeno y humedad, un rango aceptable de pH y temperatura en lecho del biofiltro son indispensables para la supervivencia de la comunidad microbiana ⁶⁹.

Las cargas altas de partículas en el gas residual pueden afectar negativamente el funcionamiento de un biofiltro debido a la obstrucción del sistema de distribución de aire y la propia media de filtración ⁷⁷. Las opciones de tratamiento pueden incluir la humidificación para el control de la temperatura y humedad o el uso de dispositivos para eliminar las partículas tales como un lavador húmedo o un precipitador electrostático húmedo.

i) Mantenimiento

La frecuencia de mantenimiento de un biofiltro depende de varios factores como la temperatura y humedad relativa de los gases residuales, el contenido de humedad del lecho del filtro, la estabilidad de la media de filtración y la pérdida de presión². En biofiltros prefabricados, los requerimientos de mantenimiento usualmente corresponden al reemplazo del material filtrante.

La media orgánica utilizada en los biofiltros, necesita ser reemplazada en 2 o 3 años. El período de tiempo que un biofiltro puede operar en una sola carga de media de filtración depende de la mezcla inicial de los materiales, las condiciones climáticas, la producción y cantidad de ácido en la media y el tipo de irrigación suministrado. El monitoreo de la presión, la caída de presión y las mediciones del flujo de aire ayudan a predecir cuando esto ocurre. La media de filtración removida usualmente es enviada a un relleno sanitario para su disposición final.

Por otro lado, el mantenimiento preventivo de los equipos electromecánicos e instrumentación del sistema se deberá realizar según la frecuencia recomendada por los fabricantes y de esta manera garantizar una operación continua del biorreactor.

3.11.8 Costos de los biofiltros percoladores

a) Costos de inversión

Los costos de inversión de los biofiltros percoladores pueden variar considerablemente con el tamaño y los materiales de construcción. El tamaño de los biofiltros percoladores depende del flujo de aire, la concentración de contaminante a ser tratado, el tipo de media de filtración y la eficiencia de remoción requerida. Asimismo, la presencia de gases corrosivos como el H₂S o vapores solventes influyen en la selección del material de recipiente (Polietileno, fibra de vidrio o HDPE).

Por otro lado, los costos asociados al ducto y el tablero de control eléctrico pueden ser significativos, por lo cual antes del diseño y construcción del biorreactor se debe tener en cuenta las propiedades de los contaminantes a tratar para seleccionar los materiales más adecuados.

Deshusses y Cox¹⁵ propusieron una simple correlación para estimar los costos de inversión de los biofiltros percoladores en base al volumen de la media. El costo calculado es para biofiltros percoladores simples, construidos con materiales económicos y que incluyen equipos básicos como extractor, bombas y electrodos de nivel pero no considera los costos del ducto y el sistema de control eléctrico.

$$\text{Costo de inversión (USD)} = 13,000 \times V_m^{0.757} \quad \text{Ecuación 28}$$

del biofiltro percolador

Donde:

$$V_m = \text{volumen de la media de filtración (m}^3\text{)}$$

Los costos obtenidos con la ecuación 28 es una estimación con un \pm 20% de precisión y son aplicados para volúmenes de media de filtración en el rango de 5 a 1000 m³. Sin embargo, para una evaluación económica detallada, los costos de inversión pueden ser obtenidos de las cotizaciones de diversos fabricantes de sistemas de biofiltración.

b) Costos de operación y mantenimiento

En la determinación de los costos de operación del biofiltro percolador se deberá incluir lo siguiente:

- **Costos de insumos (agua y nutrientes).**- Los nutrientes, productos químicos para el control del pH y agua representan una fracción de 10% a 30% de los costos totales de operación.
- **Electricidad.**- El consumo eléctrico del extractor de aire usualmente representa la mayor fracción de los costos de operación total.
- **Personal de mantenimiento.**- El mantenimiento del biofiltro percolador es mínimo. Una estimación razonable es de 2 a 4 horas por semana para las actividades de preparación de la solución de nutrientes, inspección del sistema de riego y mantenimiento preventivo de los equipos electromecánicos.
- **Control del crecimiento de la biomasa.**- Si el biofiltro percolador experimenta problemas de taponamiento de la media de filtración se deberán incluir los costos para el control del crecimiento de la biomasa. Estas acciones puede ser significativo y representar más de la mitad del costo total de operación. Desafortunadamente, aún existe limitada experiencia en biofiltros a escala real, por lo cual se recomienda evaluar cuidadosamente las medidas de control a aplicar.
- **Costos de inversión (amortización).**- Desde que la operación del biofiltro percolador es relativamente económico, la amortización de la inversión es significativo comparado con otros costos. Asumiendo una vida útil del equipo de 10 a 20 años, la fracción promedio representa entre 20% a 40% del costo total de

operación y mantenimiento. Por esta razón, la selección cuidadosa de los materiales y tamaño apropiado del biofiltro es importante para minimizar los costos de inversión inicial.

Una forma conveniente de comparar los costos de operación y mantenimiento de un biofiltro percolador es el reporte de los costos por miles de m^3 de aire tratado, es decir dividiendo los costos anuales incurridos por el volumen de aire tratado (En miles de m^3). Según Deshusses y Cox (2003), los rangos usuales de los costos de operación, sin incluir la inversión inicial, varía entre USD 0.05 a USD 1.5 por 1,000 m^3 de aire tratado, y cuando la amortización está incluida, el rango varía de USD 0.1 a USD 3.0 por 1,000 m^3 .

El amplio rango refleja la variedad de aplicaciones posible y el tamaño de los biofiltro percoladores. Usualmente, los costos de operación y mantenimiento de los biofiltros percoladores grandes tienden a ser más económicos por volumen unitario de aire tratado que los biofiltros percoladores pequeños.

4. MATERIALES Y METODOS

4.1 Descripción de experimentos

La presente tesis se desarrolló en el biofiltro percolador, a escala real, instalado en la estación de bombeo CBD 326-2 en el distrito de Villa El Salvador. Las actividades desarrolladas iniciaron el 01 de octubre de 2012 y finalizaron el 10 de Marzo de 2013, completando un período de 161 días. Asimismo, el estudio fue dividido en 3 fases para cumplir con los objetivos propuestos:

- **Fase I:** Puesta en marcha del biofiltro percolador con media de arcilla expandida.
- **Fase II:** Evaluación y determinación de la eficiencia de remoción de H₂S en el biofiltro percolador
- **Fase III:** Determinación de los costos de inversión, operación y mantenimiento del biofiltro percolador.

Durante la fase de puesta en marcha, el biofiltro percolador operó con un flujo de ingreso de 381 m³.h⁻¹ (menor al flujo de diseño), con el propósito de favorecer el crecimiento gradual de los microorganismos y la aclimatación de las bacterias sulfato-reductoras a las características del gas oloroso

En la etapa de evaluación, el flujo de ingreso se incrementó gradualmente a 448 m³.h⁻¹, 572 m³.h⁻¹, 662 m³.h⁻¹ y 862 m³.h⁻¹ con el propósito de modificar el tiempo de contacto de gas (EBCT) y la carga másica. La regulación del flujo de ingreso se realizó usando un variador de frecuencia para incrementar o reducir la velocidad del motor del extractor.

En la fase de evaluación, el biofiltro percolador operó por un período de 25 a 30 días para cada flujo de ingreso y la eficiencia del sistema fue determinada en términos de remoción de H₂S. Asimismo, el control del biofiltro percolador se llevó a cabo mediante los análisis de humedad, sulfatos, pH y temperatura en la media de filtración y en el lixiviado.

4.2 Estación de bombeo de desagües CBD 326-2

4.2.1 Descripción

La estación de bombeo CBD 326-2 es uno de los componentes del proyecto “Ampliación y Mejoramiento de los Sistemas de Agua Potable y Alcantarillado para el Esquema 7mo, 9no y 10mo Sector de Villa El Salvador”.

La estación de bombeo CBD 326-2 se encuentra ubicada en el Parque Central de la Av. 200 Millas en el Sector 10 de Oasis de Villa en el distrito de Villa El Salvador.



Figura 4.1: Vista panorámica de la Estación de bombeo CBD 326-2

Los desagües generados en las habilitaciones de áreas de drenaje específicas son conducidas mediante un colector de 250 mm de diámetro hacia la estación de bombeo, la cual ha sido diseñada para un caudal máximo horario de 40.7 l.s^{-1} (Tabla 4.1)

Tabla 4.1:**Parámetros de diseño de la estación de bombeo CBD 326-2**

Descripción		Valores	Unidad
Población servida	Año 0	23,717	habitantes
	Año 18	39,036	habitantes
Caudales de diseño	Promedio	22.6	l.s^{-1}
	Máximo	40.7	l.s^{-1}

Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Componentes

La estación de bombeo CBD 326-2 está conformada por una planta compacta de pretratamiento, un separador de arena, una cámara seca y húmeda, sala de tableros eléctricos, sala de grupo electrógeno, oficina, sistema hidroneumático y un biofiltro para el control de olores.

Las aguas residuales pretratadas en esta estación son bombeadas mediante una tubería de impulsión de 250 mm de diámetro y 936.6 m de longitud hacia la planta de tratamiento Huáscar para su disposición final.

En la figura 4.2 se muestra un esquema con los componentes de la estación de bombeo de desagües CBD 326-2.

a) Planta compacta de pretratamiento

La planta compacta de pretratamiento mecanizado se encuentra instalada antes de la cámara húmeda y ha sido diseñada para un caudal máximo horario de 40.7 l.s^{-1} .

La planta compacta consiste de un tanque rectangular de acero inoxidable 304 con dimensiones de 0.85 m de ancho, 5.80 m de longitud y 1.94 m de altura total donde se encuentran los equipos para la remoción de residuos sólidos y arenas que contienen las aguas residuales:

- Tamiz fino y compactador de residuos sólidos
- Tornillo transportador de residuos sólidos compactados
- Desarenador aireado

Un tamiz fino con una malla perforada de 3 mm se encuentra ubicado en la sección de ingreso del tanque para retener los residuos flotantes que contienen las aguas residuales. Este tamiz opera en forma automática en función del nivel aguas arriba y como consecuencia de la obstrucción de la superficie de la canastilla. Un tambor rotatorio eleva los residuos retenidos que son descargados en una canaleta central que tiene un tornillo helicoidal que transporta, compacta y deshidrata los desechos (Figura 4.3).

Adicionalmente, el tamiz tiene un sistema integrado de limpieza conformado por un cepillo raspador y una barra con boquillas pulverizadoras para inyectar agua a presión y lavar los residuos que permanecen en la canastilla. Este sistema permite el lavado de las sustancias solubles que contienen los residuos sólidos y que originan olores.

Los residuos sólidos lavados y compactados provenientes del tamiz son descargados en un tornillo helicoidal de 273 mm y son transportados hacia un contenedor, ubicado en la plataforma de operación de la estación.



Figura 4.3: Tamiz fino y compactador de residuos sólidos

Por otro lado, la sección rectangular del tanque tiene paredes laterales inclinadas y un sistema de aireación que propicia un flujo helicoidal que permite la sedimentación de la arena y la separación de las grasas del afluente.

Las arenas sedimentadas son transportadas mediante un tornillo helicoidal de acero inoxidable de 168 mm de diámetro hacia la zona de ingreso donde posteriormente son bombeadas hacia un clasificador de arena. Asimismo, el tanque desarenador se encuentra cubierto con tapas removibles para evitar el escape de gases olorosos (Figura 4.4).

Respecto al sistema de aireación, el aire a presión es generado por un compresor que tiene las siguientes características:

- Flujo de aire : 11.3 m³.h⁻¹
- Potencia : 0.45 KW
- Presión de operación : 1,000 mbar
- Diámetro tubería de aire : 3/8"
- Velocidad de Rotación : 1,450 min⁻¹



Figura 4.4: Tanque desarenador aireado

b) Sistema de bombeo y clasificador de arena

La arena acumulada en la tolva del desarenador es impulsada mediante dos bombas centrifugas horizontales (operación alternada) y una tubería de acero al carbono de 100 mm de diámetro hacia un clasificador de arena. En cada equipo de bombeo se han instalado válvulas de compuertas y válvulas check para el correcto funcionamiento del sistema.

El clasificador asegura una eficiencia de separación de 95% para arenas con tamaños mayores a 0.2 mm, dependiendo de la velocidad del flujo y la densidad de las partículas (Figura 4.5). La arena separada es lavada para retirar la materia orgánica que sedimenta como consecuencia de las bajas velocidades.

El lavado de arenas se realiza inyectando agua a presión por la sección inferior del tanque, con el propósito de crear un lecho fluidizado lo que permite la separación de la materia orgánica por la diferencia de densidades. La arena limpia y deshidratada es transportada mediante un tornillo inclinado y descargada a un contenedor mientras que el agua separada es retornada a la cámara húmeda.



Figura 4.5: Equipo clasificador y lavador de arena

c) Cámara húmeda y cámara seca

La estación de bombeo CBD 326-2 tiene forma circular y está conformada por una cámara húmeda, destinada a almacenar los desagües, y una cámara seca donde se encuentran instalados los equipos electromecánicos y sus accesorios complementarios. En la tabla 4.2 se muestra las dimensiones de la estación de bombeo.

Tabla 4.2: Dimensiones de la estación de bombeo CBD 326-2

Descripción		Valores	Unidad
Cámara húmeda y seca	Diámetro interno	5.60	m
	Área útil	23.51	m ²
	Altura total	8.56	m
	Volumen total	201.24	m ³
Cámara húmeda	Área útil	8.67	m ²
	Altura libre	6.56	m
	Nivel mínimo	1.20	m
	Nivel máximo	2.00	m
	Volumen útil	6.94	m ³

Fuente: Elaboración propia

El volumen útil de la cámara húmeda se determinó en función de la variación de caudales, considerando un tiempo de almacenamiento adecuado para evitar las condiciones sépticas de las aguas residuales y minimizar la generación de olores. El período de retención en la cámara húmeda para los caudales máximo y mínimo varió entre 8.3 y 18.5 minutos respectivamente. La altura útil en la cámara húmeda fue de 0.80 m para reducir los problemas de control de nivel y evitar ciclos de bombeo muy amplios.

En cuanto a la cámara seca, las dimensiones consideraron los espacios necesarios para la instalación de las bombas, tuberías, accesorios y válvulas de la línea de impulsión. En la cámara seca se encuentran instaladas dos bombas centrifugas verticales que operan en forma alternada y en función de las fluctuaciones del caudal de ingreso. Los ciclos de arranque y parada de las bombas son controlados automáticamente mediante un sensor de nivel ultrasónico que se encuentra instalado en el techo de la cámara húmeda.

Las características de los equipos de bombeo son las siguientes:

- Numero de bombas : 02 (1 operación + 1 reserva)
- Caudal por bomba : 40.7 l.s^{-1}
- Altura dinámica total : 16.09 m
- Potencia de la bomba : 20 HP
- Diámetro tubería de succión : 250 mm
- Diámetro tubería de impulsión : 200 mm

d) Cámara de válvulas

En la estación de bombeo, la tubería de impulsión procedente de la cámara húmeda se dirige a una cámara de válvulas, equipada con un medidor de caudal electromagnético de 200 mm de diámetro, un transmisor de presión y una válvula de aire de 50 mm de diámetro.

A partir de esta estructura, la tubería de impulsión del agua residual pretratada es de hierro dúctil K-9, con un diámetro de 250 mm y una longitud de 936 m hasta su disposición final en la Planta de tratamiento Huáscar.

e) Sistema hidroneumático

El suministro de agua potable a la estación de bombeo CBD 326-2 proviene de la red pública a través de una tubería de PVC de $\frac{3}{4}$ " de diámetro. La red de distribución interna de agua está conformada por dos ramales; uno que abastece directamente a los servicios higiénicos y el otro que llega a una cisterna de concreto que será utilizada para el sistema hidroneumático.

La cisterna de almacenamiento está equipada con una válvula de flotador, electrodos de nivel y tiene las siguientes dimensiones:

- Volumen total : 7.80 m³
- Volumen útil : 6.00 m³
- Largo : 2.00 m
- Ancho : 2.00 m
- Nivel mínimo : 0.40 m
- Nivel máximo : 1.50 m

El sistema hidroneumático está conformado por dos bombas centrifugas horizontales de 10 m³.h⁻¹, instaladas encima de la cisterna, y un tanque hidroneumático de 119 galones de capacidad (Figura 4.6). Estos equipos se encuentran ubicados dentro de una sala con dimensiones de 2.10 m de longitud, 2.10 m de ancho y 2.60 m de altura. El agua presurizada es utilizada para el lavado del tamiz, lavado de arena y para el sistema de irrigación del biofiltro percolador.

El funcionamiento del tanque hidroneumático es controlado mediante un presostato que ha sido regulado para operar en el rango de 30 a 50 psi. Cuando la presión es menor a 30 psi, el presostato envía una señal para el encendido de las bombas (en forma alternada) y se inicia el llenado del tanque hidroneumático mientras que la bomba se apaga cuando la presión alcanza los 50 psi. El agua presurizada del tanque hidroneumático se distribuye a los equipos indicados mediante una red de tuberías de PVC con diámetros entre 1 $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{4}$ ".



Figura 4.6: Equipos del sistema hidroneumático

f) Sala de grupo electrógeno

La acometida eléctrica a la estación de bombeo viene en 220 voltios y llega hasta el medidor eléctrico, ubicado en la fachada principal, y continúa hasta el tablero de Transferencia Automática (TTA) que se encuentra ubicado en una sala con dimensiones de 3.90 m de longitud, 4.30 m de ancho y 2.60 m de altura.

En esta misma sala se encuentra instalado un grupo electrógeno con capacidad de 60 Kw / 75 KVA que permite el arranque de todos los equipos mecánicos en forma automática en caso de falta de energía eléctrica o en situaciones de emergencia.

g) Sala de tableros eléctricos

Desde el tablero de transferencia automática se distribuye la energía eléctrica al tablero general de fuerza que se encuentra ubicado en una sala con dimensiones de 4.00 m de longitud, 2.25 m de ancho y 2.60 m de altura. Además, en esta sala se encuentran instalados los tableros de control para el funcionamiento automático de los equipos de la planta compacta, equipos de bombeo e instrumentación así como el banco de condensadores y el tablero de distribución.

h) Oficinas y servicios higiénicos

En la estación de bombeo se ha construido una oficina y servicios higiénicos para el personal de operación. Las dimensiones de la oficina son 2.15 m de longitud, 1.60 m de ancho y 2.60 m de altura, mientras que los servicios higiénicos tienen conexión de agua potable directamente de la red pública.

4.3 Biofiltro percolador**4.3.1 Descripción**

El biofiltro percolador instalado en la estación de bombeo CBD 326 -2 es un sistema prefabricado que ha sido diseñado para eliminar los compuestos de azufre volátiles, principalmente el H_2S , que contienen los gases olorosos generados en la planta compacta de pretratamiento y en la estación húmeda.

En este sistema, un extractor de aire conduce los gases olorosos en sentido ascendente a través de la media de filtración (arcilla expandida) y permanece un tiempo de contacto suficiente para remover los compuestos contaminantes. El aire purificado es descargado hacia la atmósfera a través una chimenea de salida.

Respecto al sistema de irrigación, un caudal de agua potable es distribuido en forma intermitente y en contracorriente al flujo de ingreso de aire para humedecer la media de filtración, maximizar la transferencia de masa y facilitar la oxidación biológica de los compuestos olorosos que son absorbidos en el líquido. Asimismo, la dosificación de nutrientes se realiza con una bomba de diafragma durante los ciclos de irrigación y de este modo poder satisfacer los requerimientos de la biomasa existente en la media de filtración.

Por otro lado, el lixiviado generado en el proceso de biofiltración es continuamente eliminado del recipiente a través de una válvula de bola y una red de tuberías. En la figura 4.7 se muestra un esquema de funcionamiento del biofiltro percolador.

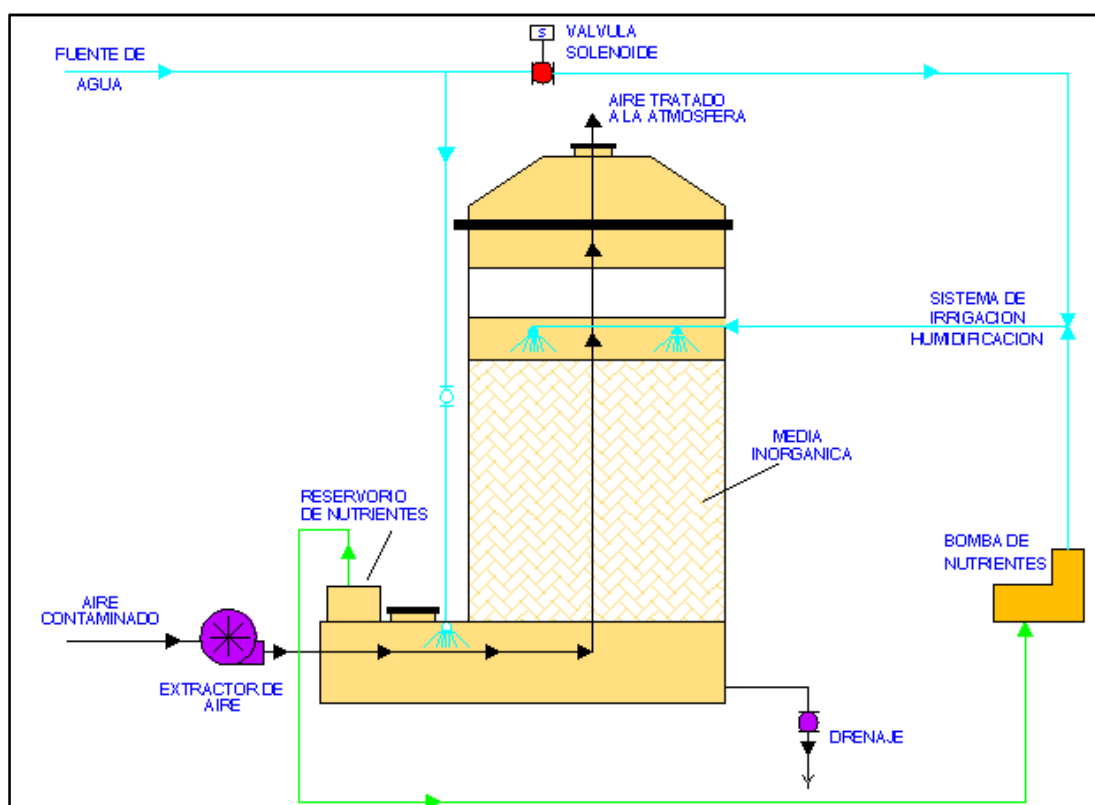


Figura 4.7: Esquema de funcionamiento del biofiltro percolador en la estación de bombeo CBD 326-2 (Siemens, 2007)

4.3.2 Características del gas oloroso

a) Flujo de ingreso

El flujo de ingreso al biofiltro percolador se calculó en multiplicando el volumen de aire sobre el nivel de agua en la planta compacta y en la cámara húmeda por una tasa de renovación de aire.

En el cálculo del flujo de aire se consideró una tasa de renovación de aire de 10 veces/h, siendo mayor al valor mínimo de 6 veces/hora recomendado por la NFPA (1999). La alta tasa de renovación de aire fue utilizada debido a que la estación CBD 326-2 recibe el rebombeo de 3 estaciones, llegando el afluente con un mayor grado de septicidad, lo que origina altas concentraciones de H_2S . Además, durante el funcionamiento del compresor del desarenador aireado se origina turbulencia en el agua y propicia un mayor escape de gases.

Por otro lado, según lo establecido por la NFPA (1999), en el cálculo del flujo total de aire a tratar se adicionó el caudal del compresor del desarenador aireado que correspondió a $11.3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (Tabla 4.3).

Tabla 4.3: Calculo del flujo de ingreso al biofiltro percolador en la estación de bombeo CBD 326-2

Fuente de olor	Largo (m)	Ancho (m)	Altura libre (m)	Volumen acumulación aire (m^3)	Tasa de renovación (veces/h)	Flujo de aire ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)
Planta compacta	5.8	0.85	0.35	1.73	10.00	17.30
Compresor de aire	---	---	---	---	---	11.30

Fuente de olor	Radio (m)	Área útil (m^2)	Altura libre (m)	Volumen acumulación aire (m^3)	Tasa de renovación (veces/h)	Flujo de aire ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)
Cámara húmeda	2.35	8.67	6.54	56.72	10.00	567.20
FLUJO DE AIRE TOTAL ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)						595.80

b) Concentración de ingreso de H₂S

La estación de bombeo CBD 326-2 fue construida y no fue posible realizar mediciones de H₂S hasta el inicio de su operación. Por tal motivo, la predicción de la concentración de H₂S en los gases generados se realizó a través de un balance de masas de sulfuro total en los colectores y tuberías de impulsión del sistema de alcantarillado del proyecto CODIMUVES.

La predicción de la concentración de sulfuro total se realizó utilizando las ecuaciones del modelo desarrollado por Pomeroy y Parkhurst (1985). La información de diseño de los componentes del sistema de alcantarillado fue obtenida del expediente técnico del proyecto mientras que los parámetros físico-químicos de los desagües fueron proporcionados por SEDAPAL. Las aguas residuales en los colectores contenían una DBO₅ entre 350 y 380 mg.L⁻¹, una concentración de oxígeno disuelto menor a 0.5 mg.L⁻¹ y se asumió una concentración de sulfuro total de 0.3 mg.L⁻¹, tomando como referencia las investigaciones realizadas por Pomeroy (1982) en California.

Respecto a las tuberías de impulsión, la concentración de DBO₅ se determinó mediante un balance de masas a partir de los resultados de la caracterización del afluente que ingresa a la estación de bombeo CBD 326-2 (Anexo 8.2). El monitoreo de las aguas residuales fue realizado el día 03 de Enero de 2013 y se obtuvo un valor de DBO₅ de 432.6 mg.L⁻¹, pH de 7.5 y temperatura de 21.75 °C.

La estimación de las concentraciones de DBO₅ y sulfuro total en la confluencia de dos tuberías se realizó mediante la siguiente ecuación de balance de masas:

$$C_m = \frac{Q_1 \times C_1 + Q_2 \times C_2}{Q_1 + Q_2} \quad \text{Ecuación 29}$$

Donde:

Q_1 = Caudal tributario 1 (l.s^{-1})

Q_2 = Caudal tributario 2 (l.s^{-1})

C_1 = Concentración del parámetro en caudal tributario 1 (mg.L^{-1})

C_2 = concentración del parámetro en caudal tributario 2 (mg.L^{-1})

C_m = Concentración del parámetro en el caudal total (mg.L^{-1})

De los cálculos realizados en el anexo 8.3, se determinó que la concentración de sulfuro total en los desagües que ingresarán a la estación de bombeo CBD 326-2 será de 4.52 mg.L^{-1} . Además, según los estudios realizados por Meyer (1980) en colectores en Central Trunk en Sacramento-California, la concentración de sulfuro disuelto en el agua residual representa aproximadamente el 70% del sulfuro total. Por otro lado, en función del pH y temperatura del agua residual, el H_2S representó el 18% del sulfuro disuelto, correspondiendo una concentración de 0.57 mg.L^{-1} . Con este último valor y utilizando la fórmula de Henry, se estimó que la concentración máxima de H_2S en el flujo de aire a tratar en el biofiltro percolador (a 1 atmósfera de presión) sería de 145.6 ppm.

c) Humedad relativa y temperatura

La estación de bombeo CBD 326-2 fue construida y no fue posible realizar mediciones de humedad relativa y temperatura en el gas oloroso producido. Por tal motivo, ambos parámetros fueron asumidos según las condiciones climatológicas locales.

La humedad relativa en el gas a tratar se asumió en el rango de 90% a 95% debido a que el aire extraído de las fuentes de olores se encuentra cercano al nivel de agua. En cuanto a la temperatura, el rango considerado fue de $15 \text{ }^\circ\text{C}$ a $30 \text{ }^\circ\text{C}$ que es la variación típica de la temperatura ambiental en Lima.

4.3.3 Parámetros de diseño

El diseño del biofiltro percolador se realizó en función del flujo de ingreso y las características del gas a tratar. El primer paso fue evaluar y seleccionar un material de filtración que elimine la concentración estimada de H₂S en los gases generados en la estación de bombeo. En este caso, la media de filtración seleccionada fue arcilla expandida, un material inorgánico poroso que puede remover continuamente una concentración de H₂S de 50 ppm y soportar concentraciones puntuales de hasta 150 ppm.

Por otro lado, en el biofiltro percolador se definió un tiempo de contacto de gas (EBCT) de 12.25 segundos, de acuerdo con las investigaciones realizadas, a escala piloto, con arcilla expandida. Los otros parámetros de diseño se calcularon utilizando las ecuaciones indicadas en el ítem 3.11.3 donde se determinó que la carga másica promedio de H₂S es 20.15 g.m⁻³.h⁻¹, la velocidad superficial de 5.87 m.min⁻¹ y carga volumétrica de 4.89 m³.m⁻³.min⁻¹ (Tabla 4.4). La operación del biofiltro percolador con estos parámetros permitirá alcanzar una eficiencia de remoción promedio de H₂S de 99.90%.

Tabla 4.4: Parámetros de diseño del biofiltro percolador de la estación de bombeo CBD 326-2

Descripción	Valor	Unidad
Flujo de ingreso	595.8	m ³ .h ⁻¹
Conc. de H ₂ S en el flujo de ingreso (promedio)	50	ppm
Conc. de H ₂ S en el flujo de ingreso (máximo)	145.6	ppm
Carga másica de H ₂ S (promedio)	20.15	g.m ⁻³ .h ⁻¹
Carga volumétrica	4.89	m ³ .m ⁻³ .min ⁻¹
Velocidad superficial	5.87	m.min ⁻¹
Área de la media de filtración	1.69	m ²
Altura de la media de filtración	1.20	m
Tiempo de contacto de gas (EBCT)	12.25	s
Eficiencia de remoción de H ₂ S (promedio)	99.90	%
Conc. de H ₂ S en el aire purificado (promedio)	0.050	ppm

4.3.4 Componentes del biofiltro percolador

El biofiltro percolador está conformado por los siguientes componentes:

a) Ducto de ingreso

La red de ductos para el transporte del aire contaminado consiste de tuberías y accesorios de PVC – clase 10, con diámetros de 90 mm y 160 mm para la planta compacta y cámara húmeda respectivamente. Los diámetros de las tuberías se calcularon en función del flujo de ingreso y manteniendo velocidades entre 1,500 y 1,800 ft.min⁻¹ según lo recomendado por la WEF ⁷⁴. Asimismo, en el diseño del ducto se determinó una caída de presión de 2 pulgadas columna de agua considerando la longitud de tuberías y accesorios.

b) Extractor de aire

El extractor del biofiltro percolador es tipo centrífugo, fabricado en fibra de vidrio reforzada y con un flujo máximo de 1,735 m³.h⁻¹ (1,020 CFM) a una presión estática de 10 pulgadas columna de agua (Figura 4.8).



Figura 4.8: Extractor centrífugo fabricado en fibra de vidrio

El motor de accionamiento del extractor está ensamblado directamente y tiene las siguientes características:

- Potencia : 5.0 HP
- Frecuencia : 60 Hz
- Velocidad máxima : 3480 RPM
- Grado de protección : IP 55

De acuerdo con los cálculos indicados en el ítem 4.3.2, el flujo de diseño fue de $595.8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (350 CFM) mientras que la presión estática total en las tuberías y media de filtración fue de 5.0 pulgadas columna de agua. Por tal motivo, el motor del extractor se reguló a una velocidad de 2,518 RPM, que correspondió a una frecuencia de 43 Hz, para obtener el flujo de diseño a la presión indicada.

c) Recipiente

El recipiente del biofiltro percolador tiene forma rectangular y fue fabricado en fibra de vidrio reforzada, cubierta con una capa de resina de viniléster para proteger de la radiación ultravioleta y los ácidos generados en el proceso.



Figura 4.9: Biofiltro fabricado en fibra de vidrio reforzada

Las dimensiones del recipiente del biofiltro percolador son 2.05 m de longitud, 1.30 m de ancho y 2.90 m de altura total incluyendo la chimenea de descarga del aire tratado. La sección transversal donde se encuentra la media de filtración es de forma cuadrada y tiene dimensiones de 1.30 m x 1.30 m.

d) Media de filtración

La media de filtración utilizada en el biofiltro percolador es arcilla expandida fragmentada (Figura 4.10). El volumen total de este material es de 2.02 m³ mientras que la altura de la capa es 1.20 m.



Figura 4.10: Arcilla expandida utilizada como media de filtración

En la tabla 4.5 se indican las características más importantes de la arcilla expandida. Este material inorgánico poroso contiene aproximadamente 60% de silicato y feldespato y tiene una capacidad de retención de agua de 30 a 40%. Otro aspecto importante es que la arcilla expandida tiene una buena resistencia a los ácidos, lo que permite una vida útil de aproximadamente 8 a 10 años y menores costos de operación y mantenimiento.

Tabla 4.5: Características de la arcilla expandida en el biofiltro percolador

Descripción	Valores
Densidad peso seco	850 a 1,100 Kg.m ⁻³
Capacidad retención de agua	30% a 40%
Tamaño de partículas	5 a 25 mm (90%)
Porosidad	50 %
pH	8.1 a 8.4

Fuente: Pacific Custom Material Inc.

e) Sistema de irrigación y dosificación de nutrientes

El biofiltro percolador tiene un gabinete fabricado en fibra de vidrio reforzada, con grado de protección NEMA 12 donde se encuentran todos los accesorios necesarios para el control del sistema de irrigación y dosificación de nutrientes (Figura 4.11).

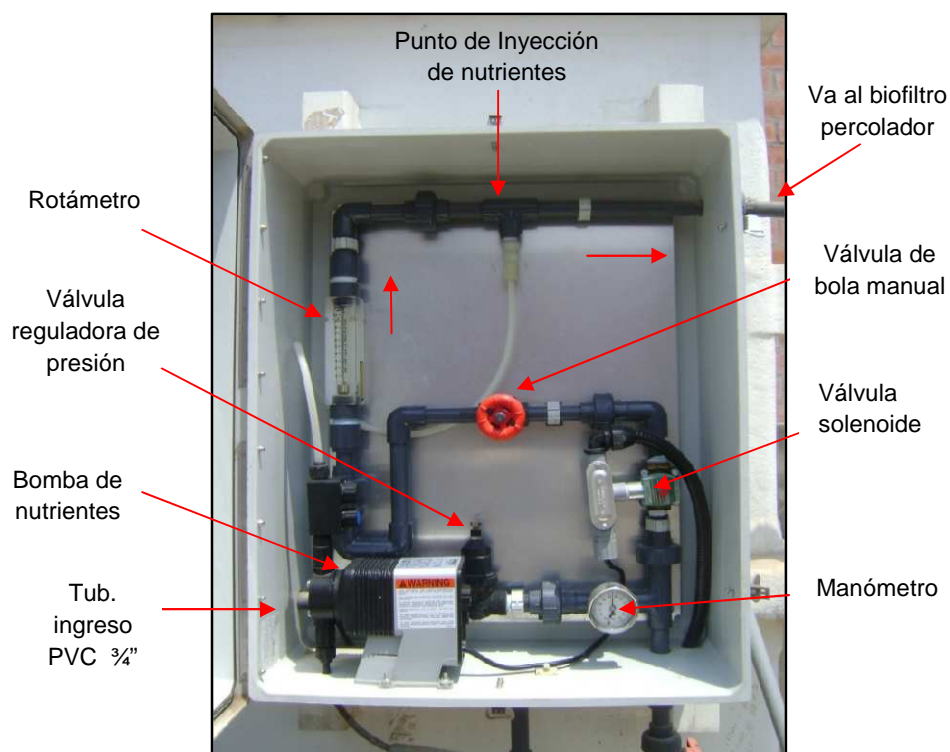


Figura 4.11: Gabinete con los componentes del sistema de irrigación y dosificación de nutrientes

Las especificaciones técnicas de los componentes del sistema de irrigación y dosificación de nutrientes son los siguientes:

- **Válvula reguladora de presión**

- Rango de presión : 15 a 150 PSI
- Material del cuerpo : Bronce
- Elementos internos : Acero inoxidable 316
- Conexión : ¾" NTP

- **Manómetro de presión**

- Rango de presión : 0 – 60 PSI
- Tamaño : 2 pulgadas
- Material : acero inoxidable 316
- Conexión : ¼" NTP

- **Válvula solenoide**

- Rango de presión : 5 a 125 PSI
- Material del cuerpo : Latón
- Material del disco y sello : Buna N
- Conexión : ¾" NTP
- Potencia : 6.1 W
- Voltaje : 120 V, 60 Hz

- **Válvula de bola**

- Material del cuerpo : PVC
- Accionamiento : Manual
- Conexión : ¾" NTP

- **Rotámetro de agua**

- Rango : 1-10 GPM
- Mat. tubo de medición : acrílico
- Conexión : 1" NTP

- **Bomba dosificadora de nutrientes**

- Tipo : Diafragma
- Capacidad : 1.25 GPH @ 80 PSI
- Potencia : 50 W
- Voltaje : 120 V, 60 Hz
- Manguera de succión : 1/4"
- Manguera de impulsión : 3/8"

La conexión de agua a este gabinete proviene del sistema hidroneumático a través de una tubería de PVC de 3/4". Todos los componentes instalados dentro del gabinete se encuentran interconectados con tuberías de PVC de 3/4" de diámetro y permiten regular la presión y el caudal de agua deseado hacia el biofiltro.

La tubería que ingresa hacia el biofiltro es de PVC de 3/4" de diámetro y en la sección superior del recipiente se ha instalado 4 boquillas rociadoras para distribuir el agua sobre la superficie de la media de filtración. Cada boquilla rociadora tiene una conexión de 1/4" y puede atomizar un flujo máximo de 2 GPM a una presión de 10 psi.

Respecto a la dosificación de nutrientes, el biofiltro tiene un reservorio de fibra de vidrio de 16 galones de capacidad donde se prepara una solución de nutrientes. La bomba de diafragma impulsa esta solución en forma intermitente y lo inyecta en la tubería de conducción de agua que va al biofiltro percolador.

f) Sistema de drenaje

El biofiltro percolador tiene una válvula de bola de 2" de diámetro, instalado en la sección inferior del recipiente para eliminar continuamente el lixiviado generado en el proceso (Figura 4.12).

El sistema de drenaje se complementa con una red de tuberías y accesorios de PVC de 2" de diámetro y una trampa P para evitar el

escape de olores. Esta tubería conduce el lixiviado y es descargado en el buzón by-pass de la planta compacta de pretratamiento.



Figura 4.12: Válvula de bola para el drenaje de lixiviado

g) Tablero eléctrico

El tablero eléctrico permite el control del extractor de aire, la válvula solenoide del sistema de irrigación y la bomba dosificadora de nutrientes. El voltaje suministrado al tablero eléctrico y el extractor de aire es de 220V, trifásico, 60 Hz.

El gabinete del tablero eléctrico fue fabricado en fibra de vidrio, con grado de protección NEMA 4X y externamente tiene los siguientes componentes (Figura 4.13):

- Accionamiento de desconexión ON-OFF
- Lámpara de señalización principal
- Pulsador de la válvula solenoide
- Selector ON-OFF para el extractor de aire.
- Selector MAN-OFF-AUTO para la bomba dosificadora de nutrientes
- Lámparas de señalización de cada equipo.

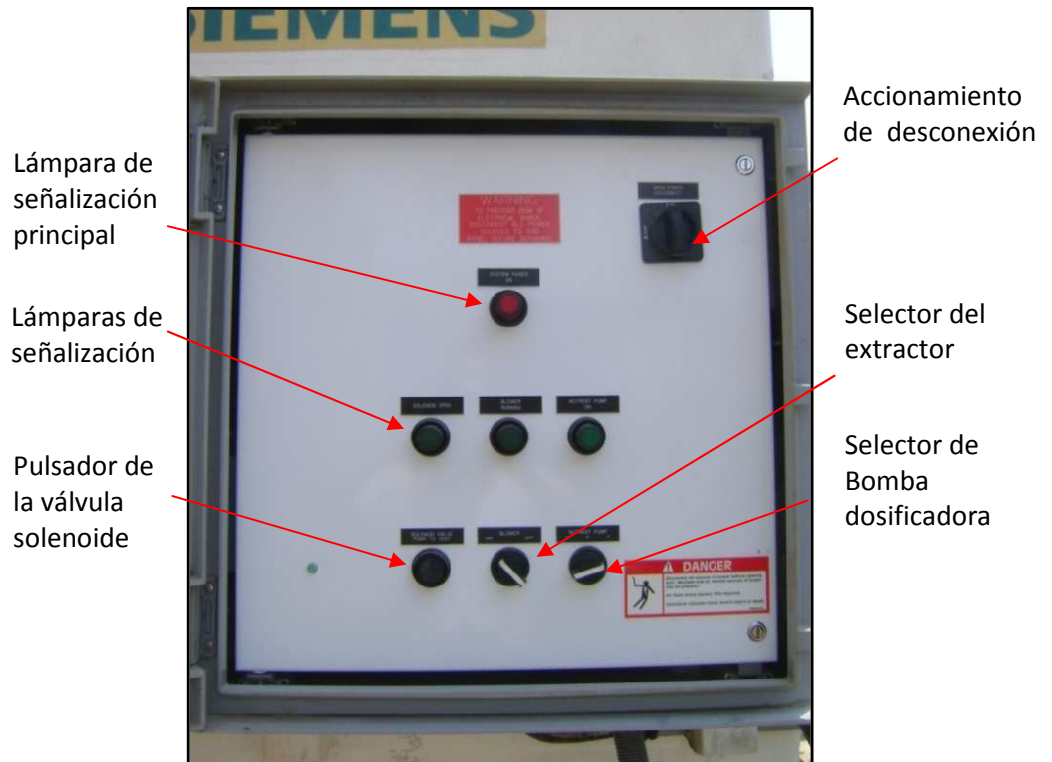


Figura 4.13: Vista externa del tablero eléctrico del biofiltro percolador

En el interior del tablero se encuentran diversos componentes eléctricos y electrónicos como interruptores automáticos, relés y un transformador de 220 V a 120 V para suministrar el voltaje para la bomba dosificadora de nutrientes y válvula solenoide. Asimismo, el tablero tiene dos temporizadores para la programación de los tiempos de funcionamiento y apagado de la válvula solenoide del sistema de irrigación de agua. Adicionalmente, en el tablero se ha instalado un variador de frecuencia (VFD) para regular la velocidad de operación del motor del extractor de aire y de esta manera modificar el flujo de ingreso al biofiltro percolador.

En la figura 4.14 se muestra un plano general con los componentes del biofiltro percolador.

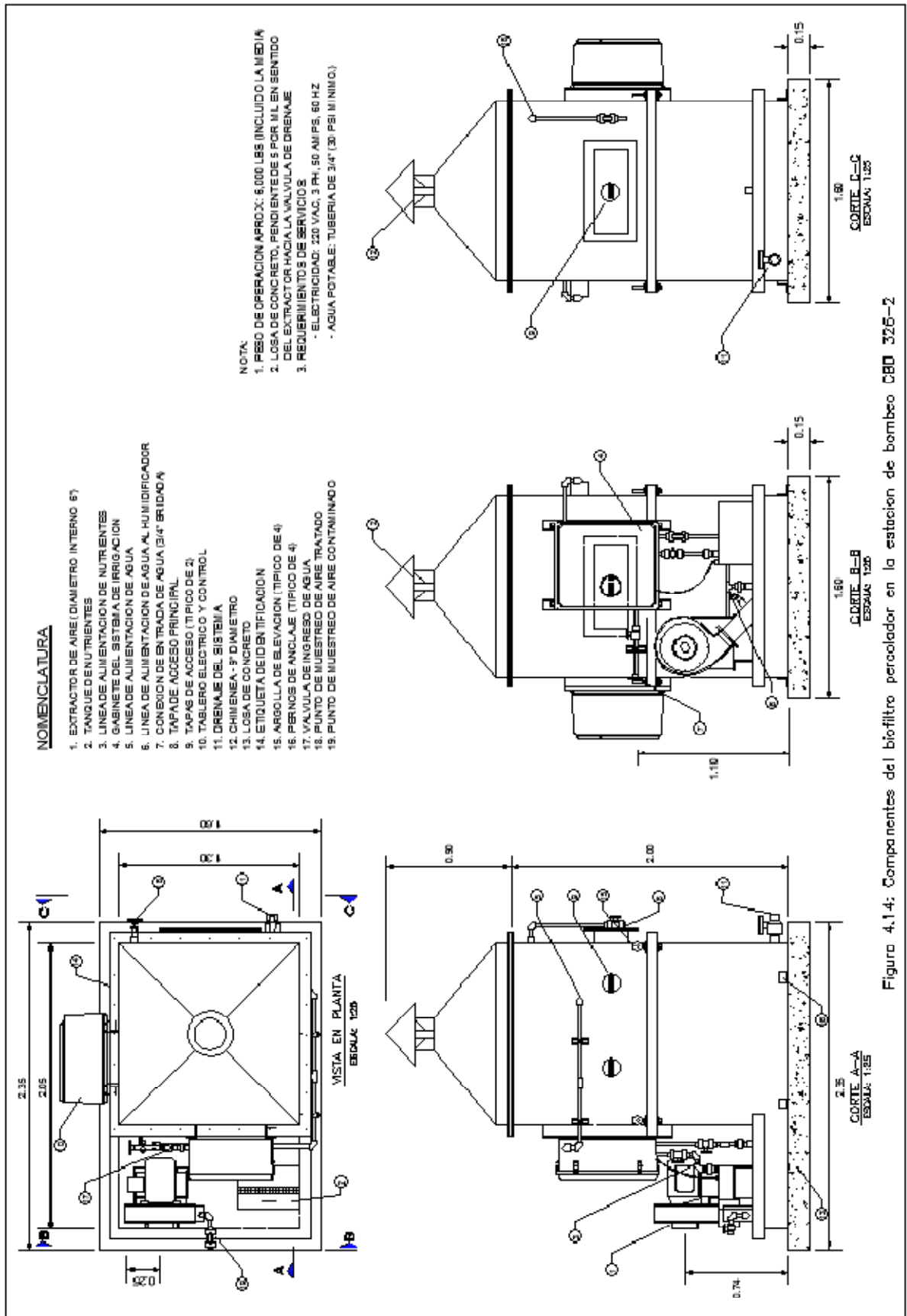


Figura 4.14: Componentes del biofiltro aerador en la estación de bombeo C80 325-2

4.4 Instalación del biofiltro percolador

Los trabajos de instalación y montaje del biofiltro percolador fueron realizados entre el 01 y 16 de octubre de 2012. Las actividades desarrolladas fueron las siguientes:

- Construcción de una losa de concreto con pendiente de 5 por mil en dirección del extractor hacia la tubería de drenaje. Las dimensiones de la losa de concreto fueron de 2.50 m de largo, 2.50 m de ancho y 0.20 m de altura útil.
- Instalación de una almohadilla de neopreno de 6 mm (1/4") de espesor sobre la losa de concreto. La almohadilla de neopreno permitió minimizar las irregularidades de la losa de concreto y prevenir la humedad.
- Izaje y descarga del biofiltro percolador sobre la losa de concreto. La descarga del equipo se realizó con una grúa de 10 toneladas y correas de nylon que fueron aseguradas a las argollas de elevación del biofiltro.
- Instalación de la red de ductos de PVC – U en diámetros de 90 mm y 160 mm para transportar los gases generados en la planta compacta y cámara húmeda hasta el biofiltro percolador.
- Instalación de acople flexible de caucho con abrazaderas metálicas delante del extractor centrífugo para evitar las vibraciones excesivas del motor (Figura 4.15).
- Instalación de pernos de acero inoxidable 316 con sistema químico adhesivo Hilti para el anclaje del biofiltro sobre la losa de concreto.
- Instalación de tuberías de PVC – clase 10 de 3/4" de diámetro para la conducción de agua potable desde el tanque hidroneumático hasta el gabinete del sistema de irrigación del biofiltro.
- Instalación de trampa P y tubería de PVC de 2" de diámetro para el drenaje del lixiviado del biofiltro percolador hacia el buzón by-pass de la planta compacta.
- Instalación de tubería de acero al carbono de 1" de diámetro para ventilar la cámara húmeda y garantizar la presión negativa.

- Instalación de tuberías y accesorios de PVC – SAP de 1 ½” de diámetro y cables eléctricos THW de 4 mm² desde el centro de control de motores hasta la caja de paso en pedestal de concreto.
- Instalación de tubería flexible tipo conduit desde la caja de paso hasta el tablero eléctrico del biofiltro percolador.



Figura 4.15: Instalación de acople flexible delante del extractor centrífugo.

4.5 Pruebas de funcionamiento del biofiltro

Las actividades previas para el arranque mecánico del biofiltro percolador consistieron en verificar la correcta instalación del sistema así como las pruebas de funcionamiento de los equipos electromecánicos. Las observaciones encontradas se registraron en la “*Lista de verificación de montaje del biofiltro*” (Ver anexo 8.4) y se procedió con su corrección inmediata.

Las pruebas y programación de los equipos electromecánicos se llevaron a cabo los días 19 y 20 de Octubre de 2012 y entre las actividades realizadas fueron las siguientes:

- Medición de voltaje y amperaje en el tablero eléctrico del biofiltro percolador.
- Programación del variador de frecuencia con los parámetros de operación del motor del extractor (Figura 4.16).
- Verificación del funcionamiento del extractor en modo automático y manual.
- Regulación del flujo de operación del extractor utilizando el variador de frecuencia.
- Verificación del funcionamiento de la válvula solenoide en modo manual.
- Verificación del funcionamiento de la bomba dosificadora de nutrientes en modo automático y manual.
- Programación de los temporizados con los tiempos de encendido y apagado de la válvula solenoide del sistema de irrigación de agua.



Figura 4.16: Programación del variador de frecuencia y regulación del flujo del extractor.

4.6 Arranque biofiltro percolador

El arranque del biofiltro percolador se inició con un flujo de aire menor al diseño con el propósito de favorecer el crecimiento gradual de los microorganismos y la aclimatación de las bacterias sulfato reductoras a las características del gas oloroso. Por tal motivo, en el tablero eléctrico se reguló la frecuencia del motor del extractor a 40 Hz que según el catalogo del fabricante corresponde a un flujo de aire de $340 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (200 CFM) y que representó aproximadamente el 57% del flujo de diseño.

Seguidamente, en el tablero eléctrico se definieron los ciclos de irrigación con el propósito de mantener una humedad adecuada en la media de filtración. La irrigación se realizó en forma intermitente, con un tiempo de funcionamiento de la válvula solenoide de 2.5 minutos cada 30 minutos. Asimismo, en el gabinete del sistema de irrigación se reguló el suministro de agua potable a un caudal de 6 GPM a una presión de 30 psi.

Respecto al suministro de nutrientes, en el reservorio del biofiltro percolador se preparó 16 galones de solución, mezclando 0.25 galones de fertilizante líquido para plantas y 15.75 galones de agua potable. En la tabla 4.6 se muestra la composición química del fertilizante líquido utilizado que contiene principalmente nitrógeno, fósforo y potasio.

Tabla 4.6: Composición química del fertilizante líquido

Compuesto	Porcentaje
Nitrógeno total	
1.5% amonio	
1.5% nitrato	10%
7.0% urea	
Fosfato (P_2O_5)	10%
K (K_2O)	10%
Fe	0.1%
Mn	0.05%
Zn	0.05%



La bomba dosificadora de nutrientes fue regulada a un flujo de 0.12 GPH y en el tablero eléctrico, el selector respectivo se colocó en la posición AUTO lo que significó que la dosificación de nutrientes se realizará durante los ciclos de irrigación (Figura 4.17).



Figura 4.17: Ajuste de la dosis en la bomba dosificadora de nutrientes.

Finalmente, el arranque del biofiltro percolador se inició cuando el selector del extractor de aire fue colocado en la posición ON. A partir de ese instante, el sistema funcionó continuamente (24 horas por día) en modo automático.

4.7 Programa de monitoreo

El programa de monitoreo y análisis se llevó a cabo durante las fases de puesta en marcha, aclimatación y evaluación del biofiltro percolador, iniciándose el día 21 de Octubre de 2012 y finalizando el 10 de Marzo de 2013.

4.7.1 Parámetros

La operación exitosa de un biofiltro percolador consiste en mantener un cultivo microbiológico vigoroso y saludable, siendo necesario controlar los parámetros físico-químicos en el proceso de biofiltración para mantenerlo dentro de los valores óptimos.

De acuerdo con Devinny¹⁸ y en función de los objetivos de la investigación, se definieron los siguientes parámetros físico-químicos para el control operacional en el biofiltro percolador (Tabla 4.7).

Tabla 4.7: Parámetros de control en el biofiltro percolador

Punto de muestreo	Parámetro de control	Objetivo
Gas de ingreso	Velocidad de aire (ft.min ⁻¹)	Determinar el flujo de aire de ingreso
	Flujo de aire (m ³ .h ⁻¹ o CFM)	Determinar el tiempo de contacto de lecho vacío (EBCT), velocidad superficial y carga volumétrica.
Gas de ingreso y salida	Concentración de H ₂ S (ppm o ppb)	Calcular la carga másica y capacidad de eliminación.
	Concentración de COV (ppb)	Verificar la eficiencia de remoción de otros compuestos olorosos
	Temperatura (°C)	Controlar el caudal de irrigación y humedad
Media de filtración	Humedad (%)	Determinar el rango de humedad aceptable
	Caudal de agua para irrigación (GPM)	Verificar el balance de agua
	Caudal de solución de nutrientes (GPH)	Controlar el crecimiento de la población microbiológica
	pH y sulfatos (mg.L ⁻¹)	Verificar la acidificación del biofiltro, inhibición ácida, etc
	Temperatura (°C)	Verificar el rango óptimo
Lixiviado	pH y sulfatos (mg.L ⁻¹)	Verificar la acidificación del biofiltro

4.7.2 Puntos de medición y muestreo

a) Ducto de aire

En el ducto de aire se estableció un punto de medición (D1) con el objetivo de determinar la velocidad del aire para diferentes frecuencias de operación (Hz) del extractor y que será utilizada para calcular el flujo de ingreso al biofiltro percolador durante la fase de puesta en marcha y evaluación. La frecuencia del extractor fue regulada utilizando el variador de velocidad instalado en el tablero eléctrico.

La ubicación del punto de medición se definió siguiendo la metodología recomendada por la U.S. EPA "*Method: Sample and velocity traverses for stationary sources*"²². El punto de medición en el ducto fue ubicado a 8 diámetros corriente abajo y 2 diámetros corrientes arriba, en un tramo recto para evitar cualquier alteración del flujo por curvas, ampliaciones o reducciones. En esta sección se perforó 2 orificios de ½" de diámetro para insertar el dispositivo de medición de la velocidad del aire.



Figura 4.18: Perforación de orificios en el ducto para la medición de la velocidad del aire.

b) Biofiltro percolador

Los puntos de muestreo de gases y medición de la concentración de H_2S fueron en las válvulas de bola de 1", ubicadas en el ingreso del extractor (G1) y en la salida del aire tratado (G2). En la figura 4.19 se observan los puntos de muestreo indicados.

**G1: Ingreso del extractor****G2: Salida del aire tratado**

Figura 4.19: Ubicación de los puntos de muestreo G1 y G2 para la medición de gases en el biofiltro percolador

Adicionalmente, en el sistema de biofiltración se definieron 2 puntos de muestreo para el control de los parámetros operacionales. El punto de control B1 fue ubicado en el buzón de descarga del lixiviado, mientras que el segundo punto de control B2 fue ubicado en la media de filtración, a una altura de 0.90 m (Figura 4.20). La toma de muestras y mediciones se realizaron típicamente en horas de la mañana.

**B1: Descarga de lixiviado****B2: Media de filtración****Figura 4.20: Ubicación de los puntos de control B1 y B2 en el sistema de biofiltración**

4.7.3 Frecuencia de muestreo

En la tabla 4.8 se indica la frecuencia de muestreo y evaluación en los puntos de control G1 y G2 del biofiltro percolador. Las mediciones de H_2S se realizaron con una frecuencia de 2 veces por semana a fin de determinar las concentraciones promedios diarias.

Respecto a los parámetros físico-químicos, en la tabla 4.9 se indica la frecuencia de evaluación en los puntos de control B1 y B2. El análisis de estos parámetros permitió verificar si el biofiltro percolador operaba correctamente o era necesario aplicar alguna medida correctiva.

Tabla 4.8: Frecuencia de evaluación de los parámetros en las muestras de gases

Parámetro	Punto de muestreo	Unidad	Frecuencia	Método
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	Flujo de ingreso (G1)	ppm	2 veces por semana (24 horas con rango de 1 minuto)	Electroquímico
	Aire purificado (G2)	ppb	2 veces por semana (24 horas con rango de 1 minuto)	Electroquímico
Temperatura	Flujo de ingreso (G1)	°C	2 veces por semana (24 horas con rango de 1 minuto)	Electrodo
Compuestos orgánicos volátiles (COV)	Flujo de ingreso (G1) y aire purificado (G2)	ppb	Única	Cromatografía de gas / Espectrometría de masa (GC/MS)
Compuestos de azufre Volátiles	Flujo de ingreso (G1) y aire purificado (G2)	ppb	Única	Cromatografía de gas / Detector fotométrico de flama / Espectrometría de masa (GC/FPD/MS)

Tabla 4.9: Frecuencia de evaluación de los parámetros físico-químicos en el biofiltro percolador

Parámetro	Punto de muestreo	Unidad	Frecuencia	Método/Norma
pH y Temperatura	Lixiviado (B1) y Media de filtración (B2)	°C	3 veces por semana	Electrodo / SM 4500-H ⁺
Sulfatos (SO ₄)	Lixiviado (B1) y Media de filtración (B2)	mg.L ⁻¹	2 veces por semana	EPA 9038 (1986)
Humedad	Media de filtración (B2)	%	2 veces por semana	NOM-021-RECNAT-2000 - Método AS 5

4.7.4 Métodos de medición y análisis

a) Velocidad y flujo de aire en el ducto

Antes de iniciar las mediciones de velocidad del aire, el diámetro interno del ducto fue verificado. El espesor del ducto se determinó insertando una varilla graduada en los orificios del punto de control D1 y se obtuvo la lectura correspondiente (Tabla 4.10). El diámetro interno del ducto se determinó de la diferencia del diámetro nominal menos 2 veces el espesor de la pared de la tubería.

Tabla 4.10:
Características del ducto de PVC en el punto de medición D1

Descripción	Valor	Unidad
Diámetro nominal	160	mm
Espesor	7.7	mm
Diámetro interno	144.6	mm
Presión nominal	10	bares

Fuente: Elaboración propia.

La medición de velocidades en el ducto se realizó con un anemómetro digital marca Dwyer serie 471 (Figura 4.21). El procedimiento consistió en insertar la sonda de 8" de longitud en los orificios del punto de control D1 y anotar las lecturas de velocidad cada minuto para diversas frecuencias de operación del extractor (Hz). La velocidad promedio de aire fue calculada del registro de 12 lecturas consecutivas.

Por otro lado, el flujo de aire efectivo que ingresará al biofiltro fue calculado mediante el método de área-velocidad, utilizando la siguiente fórmula:

$$F_e = \frac{\pi \times D_i^2 \times V_{pr}}{4} \quad \text{Ecuación 30}$$

Donde:

F_e = Flujo de aire efectivo (CFM)

V_{pr} = Velocidad promedio del aire ($\text{ft} \cdot \text{min}^{-1}$)

D_i = Diámetro interno del ducto (ft)



Figura 4.21: Medición de la velocidad en el ducto utilizando un anemómetro digital.

b) Sulfuro de hidrógeno

Las concentraciones de H_2S y temperatura en el flujo de ingreso al biofiltro percolador fueron medidas en el punto de control G1, utilizando un analizador portátil Jerome modelo X860-0001 con rango de 0 a 200 ppm (Figura 4.22). Este analizador tiene un registrador que permitió almacenar los datos continuamente.



Figura 4.22: Instalación del analizador Jerome modelo X860-001 en el punto de muestreo G1.

Las concentraciones de H_2S en el aire tratado del biofiltro percolador fueron medidas en el punto de control G2, utilizando un analizador portátil Interscan modelo 1999b, con rango de 0 a 2 ppm (Figura 4.23)



Figura 4.23: Instalación del analizador Interscan en el punto de muestreo G2

c) Compuestos Orgánicos Volátiles

Los análisis de los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) fueron realizados, por única vez, con el propósito de conocer la composición de los gases de ingreso y aire purificado en el biofiltro percolador.

Las muestras de gases fueron recolectadas en bolsas de polipropileno marca SKC, modelo 232, con capacidad de 10 litros. El llenado de las bolsas se realizó utilizando una bomba de vacío marca SKC Inc., modelo 222-2301 (Figura 4.24).



Figura 4.24: Llenado de la bolsa de polipropileno con la muestra de aire purificado.

El procedimiento para el llenado de las bolsas con las muestras de gases fue el siguiente:

- Instalar una manguera de PTFE de $\frac{1}{4}$ " de diámetro desde el punto de muestreo del biofiltro hacia la conexión de aspiración de la bomba de vacío.

- Instalar otra manguera de PTFE de ¼" de diámetro desde la conexión de descarga de la bomba hacia la válvula de la bolsa de polipropileno.
- Abrir la válvula de la bolsa sujetando el vástago lateral y girando en sentido antihorario.
- Encender la bomba de vacío y llenar las bolsas hasta un 80% de su volumen máximo.
- Apagar la bomba de vacío y cerrar la válvula de la bolsa, sujetando el vástago lateral y girando en sentido horario hasta que quede completamente ajustado.
- Desconectar las mangueras del punto de muestreo y de las conexiones de la bomba de vacío.

Las bolsas de polipropileno con las muestras de gases fueron enviadas vía aérea a las instalaciones del laboratorio MAYFLY en Connecticut en los Estados Unidos para la identificación de los Compuestos de azufre volátiles y COV.

Los análisis de los Compuestos de Azufre Volátiles se realizaron según los procedimientos descritos en los Métodos 15 y 16 del Código Federal de Regulaciones 40 CFR de la U.S. EPA ²³. En ambos métodos, las muestras de gases son diluidas con aire seco limpio (si es necesario) y luego se toma una alícuota de la muestra diluida que es analizada mediante el principio de Cromatografía de gases (GC) y Detección fotométrica de flama (FPD).

La identificación de otros COV (aromáticos, hidrocarburos, halogenados) se desarrolló según el procedimiento descrito en el Compendio de Métodos TO-15 "Determinación de Compuestos Orgánicos Volátiles en aire recolectado en frascos especialmente preparado y analizado por la técnica de Cromatografía de gas - Espectrometría de masa (GC - MS)" de la U.S. EPA²¹.

d) Parámetros físico-químicos

La recolección de muestras de agua residual, lixiviado y media de filtración del biofiltro percolador fueron realizadas en forma puntual y enviados a las instalaciones del laboratorio J. Ramón Perú S.A.C.

Los parámetros físico-químicos se realizaron según los procedimientos descritos en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater de la American Public Health Association y Test methods for evaluating solid waste/physical/chemical methods de la U.S. EPA²⁰.

El procedimiento de los parámetros fisicoquímicos realizados en las muestras del lixiviado y media de filtración del biofiltro percolador fue el siguiente:

- **PH y Temperatura**

El pH y la temperatura en las muestras de lixiviado y en la media de filtración del biofiltro percolador fueron medidos en el sitio con un medidor portátil Hanna Instruments, modelo HI 98127 (Figura 4.25).



Figura 4.25: Medición de pH y temperatura en las muestras de lixiviado.

Las muestras del lixiviado fueron recolectadas en la descarga de la tubería de drenaje del biofiltro y se procedió con la lectura de pH en forma directa. En la media de filtración, la medición de pH se realizó según lo descrito en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 Método AS-02 que indica la preparación de una solución de suelo:agua con un factor de dilución de 1:2. El procedimiento para preparar la solución consistió en pesar 50 gramos de arcilla expandida y colocarlo en un vaso de precipitado de 250 ml. Seguidamente, se agregó 100 ml de agua destilada y se agitó por 30 minutos. Después de este tiempo, se procedió con la lectura del pH y temperatura en la solución sobrenadante.

- **Sulfatos (SO_4)**

Las muestras de lixiviado y la solución sobrenadante de la media de filtración fueron recolectadas en frascos de polietileno de 500 ml y refrigeradas a 4 °C.

La determinación de sulfatos se realizó según lo indicado en el Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes de la U.S. EPA (1986) - Método 9038 que consistió en convertir el ión sulfato a una suspensión de sulfato de bario en condiciones controladas. La turbiedad resultante fue determinada con un turbidímetro y comparada con una curva preparada de una solución de sulfato estándar.

- **Humedad**

La humedad en la media de filtración se determinó según el procedimiento descrito en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Método AS-5 que es aplicada para suelos orgánicos o minerales. La toma de muestras en la media de filtración se realizó en forma puntual en el punto de control B2, a una altura de 0.90 m y fueron colocadas en bolsas de polietileno.

El método AS-5 utiliza el principio gravimétrico para medir la cantidad de agua que contiene una muestra de suelo y que es relacionada a la masa de suelo seco. La humedad fue determinada por la diferencia entre el peso húmedo y peso seco después que la muestra fue colocada en una estufa a temperatura de 105°C por un período de 24 horas. La fórmula utilizada para calcular la humedad fue la siguiente:

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{(\text{Psh} - \text{Pss}) \times 100}{\text{Pss}} \quad \text{Ecuación 31}$$

Donde:

Psh: Peso húmedo de la muestra (g)

Pss: Peso seco de la muestra (g)

5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1 Flujo de ingreso al biofiltro

El día 21 de octubre de 2012 entre las 9:00 y 11:00 horas se procedió con las mediciones de velocidades del aire en el punto de muestreo D1 del ducto para diversas frecuencias de operación del extractor (Hz).

En la tabla 5.1 se muestran los resultados de estas mediciones así como los cálculos de la velocidad promedio ($\text{ft}\cdot\text{min}^{-1}$) y el flujo de ingreso (en CFM y $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$) para frecuencias de operación entre 40 y 48 Hz.

Tabla 5.1: Flujo de ingreso en el ducto para diferentes frecuencias de operación del extractor

Número de mediciones	Frecuencia de operación del extractor				
	40 Hz	42 Hz	44 Hz	46 Hz	48 Hz
	Velocidades en el ducto ($\text{ft}\cdot\text{min}^{-1}$)				
1	1,236	1,388	1,715	1,976	2,555
2	1,233	1,272	1,828	2,210	2,961
3	1,204	1,771	1,844	2,188	3,001
4	1,156	1,604	1,854	2,204	3,027
5	1,099	1,526	1,898	2,225	2,894
6	1,089	1,353	1,912	2,189	2,805
7	1,352	1,518	1,750	2,059	2,592
8	1,323	1,578	1,852	2,177	2,760
9	1,383	1,555	1,895	2,206	2,843
10	1,388	1,364	2,037	2,266	2,894
11	1,353	1,353	2,119	2,345	3,081
12	1,392	1,378	2,140	2,383	3,025
Velocidad promedio ($\text{ft}\cdot\text{min}^{-1}$)	1,267.3	1,490.2	1,903.6	2,202.3	2,869.8
Flujo de ingreso (CFM)	224.02	263.43	336.50	389.30	507.28
Flujo de ingreso ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)	381.00	448.00	572.28	662.07	862.73

Las velocidades promedio se encontraron en el rango de 1,267 a 2,869 $\text{ft}\cdot\text{min}^{-1}$. El flujo de aire efectivo se calculó utilizando la ecuación 30 que consistió en multiplicar el área interna del ducto y la velocidad promedio. Los valores del flujo de aire calculados variaron entre $381 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ y $862 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$.

Por otro lado, la frecuencia máxima del extractor fue regulada solo hasta 48 Hz debido a que en esta condición, las velocidades alcanzaron valores de hasta $3,081 \text{ ft}\cdot\text{min}^{-1}$, estando muy cerca de la velocidad máxima recomendada por la WEF ⁷⁴. Además, según la información del fabricante, si el extractor opera con velocidades superiores a $3,000 \text{ ft}\cdot\text{min}^{-1}$ se producirá una mayor pérdida de presión y aumentará la presión estática

5.2 Puesta en marcha y aclimatación

La fase de puesta en marcha y aclimatación del biofiltro percolador se inició el día 21 de Octubre de 2012 a las 14:00 horas y finalizó el 17 de noviembre de 2012, completando un período de 26 días. Un aspecto importante fue que no se realizó la inoculación de ningún tipo de bacterias y/o lodos en la media de filtración para acelerar la fase de aclimatación.

Durante la puesta en marcha, el biofiltro percolador operó con un flujo efectivo de ingreso de $381 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ (224 CFM), un tiempo de contacto de gas (EBCT) de 19.2 segundos, una carga volumétrica (CV) de $3.13 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{m}^{-1}$ y una velocidad superficial (VS) de $3.76 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$.

La fase de puesta en marcha culminó cuando los parámetros de control en el biofiltro percolador se mantuvieron estables y cuando la eficiencia de remoción de H_2S alcanzó un 99%.

5.2.1 Concentración de H_2S en el flujo de ingreso

El monitoreo de la concentración de H_2S en el flujo de ingreso al biofiltro percolador se realizó desde el inicio de la puesta en marcha. Del registro de datos se verificó que la concentración diaria de H_2S varió entre 1.1 y 181 ppm como consecuencia del rebombeo continuo proveniente de las otras estaciones del proyecto. Durante esta

condición, las concentraciones de H₂S se incrementaron rápidamente por un corto tiempo y luego disminuyeron gradualmente hasta concentraciones mínimas. La fluctuación del H₂S en el flujo de ingreso se presentó durante todo el día y fueron más frecuentes entre las 10:00 y 20:00 horas.

La figura 5.1 muestra un ejemplo típico de la variación diaria de la concentración de H₂S correspondiente a los días 13 y 14 de Noviembre de 2012 (Día 23). De este monitoreo se determinó que la concentración promedio fue de 21.03 ppm, con una desviación estándar de ± 35.95 , lo que confirmó la variabilidad de los datos con respecto al promedio. Además, el 89% de los datos registrados fueron menores a 50 ppm que es el valor máximo de exposición recomendado por la OSHA. La máxima concentración de H₂S registrada fue de 166 ppm y se presentó a las 23:08 horas por las condiciones de operación explicadas anteriormente.

Durante la puesta en marcha, el flujo de ingreso presentó concentraciones promedio de H₂S entre 8.26 y 21.03 ppm y el biofiltro percolador operó con cargas másicas entre 2.13 y 5.42 g.m⁻³.h⁻¹. En los días de monitoreo, la concentración promedio de H₂S en el flujo de ingreso no alcanzó el valor de diseño (50 ppm) y la cargas másicas promedio fueron menores a 20.15 g.m⁻³.h⁻¹ (Tabla 5.2).

En cuanto a la temperatura, el flujo de ingreso presentó valores promedio diarios entre 18.7 °C y 20.6 °C, estando muy cerca del rango mesofílico. La temperatura del gas fue importante por tener efecto en el tipo de microorganismos que se desarrollarán en la media de filtración y en la velocidad de las reacciones cinéticas de degradación microbiológica.

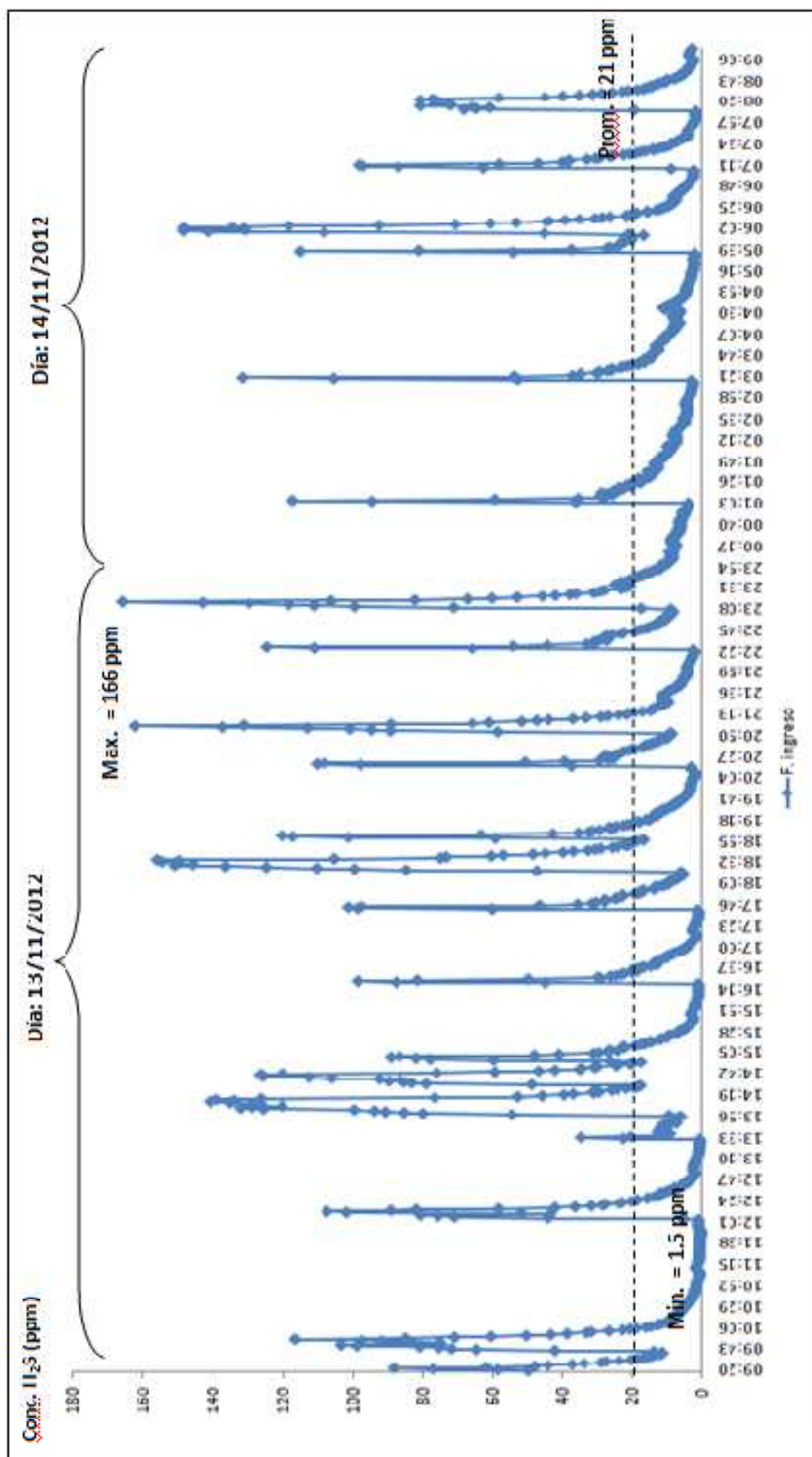


Figura 5.1: Variación diaria de la concentración de H₂S en el flujo de ingreso al biofiltro percolador (Días 13 y 14 de Noviembre de 2012)

5.2.2 Concentración de H₂S en el aire purificado y eficiencia de remoción.

En la figura 5.2 se muestra la eficiencia de remoción promedio de H₂S en el biofiltro percolador durante la fase de puesta en marcha. De esta figura se observa que la remoción de H₂S empezó inmediatamente y al culminar el segundo día, la eficiencia fue de 90.24%, mientras que entre los días 4 y 9, la remoción de H₂S se incrementó gradualmente y varió entre 96.03% y 97.41%. A partir del día 12, la remoción de H₂S alcanzó una eficiencia de 99.66% y se mantuvo estable hasta culminar la puesta en marcha.

Respecto al aire purificado, durante los 9 primeros días, la concentración promedio de H₂S disminuyó progresivamente desde 1.37 ppm hasta 0.47 ppm como consecuencia de la oxidación del sulfuro por las bacterias sulfato reductoras. El día 12, la concentración de H₂S fue 0.059 ppm y con el transcurrir del tiempo, la disminución continuó lentamente. Sin embargo, el día 23, el biofiltro percolador operó con la carga másica máxima de H₂S (5.42 g.m⁻³.h⁻¹) y la concentración en el aire purificado se incrementó ligeramente a 0.0691 ppm. Al finalizar la puesta en marcha (Día 26), la concentración de H₂S fue de 0.027 ppm (Tabla 5.2).

Por otro lado, desde el día 12, las concentraciones promedio de H₂S en el aire purificado cumplieron con el límite máximo permisible de 0.1 ppm establecido por la OMS. La variación diaria de la concentración de H₂S presentó un comportamiento casi estable pero se identificaron algunos valores que superaron este límite, especialmente cuando la estación de bombeo recibía el rebombeo de aguas residuales y el flujo de aire presentaba las máximas concentraciones de H₂S (> 100 ppm). Estos valores puntuales fueron identificados en diversas horas del día, especialmente entre las 12:00 y 19:00 horas en que los rebombeo fueron más frecuentes.

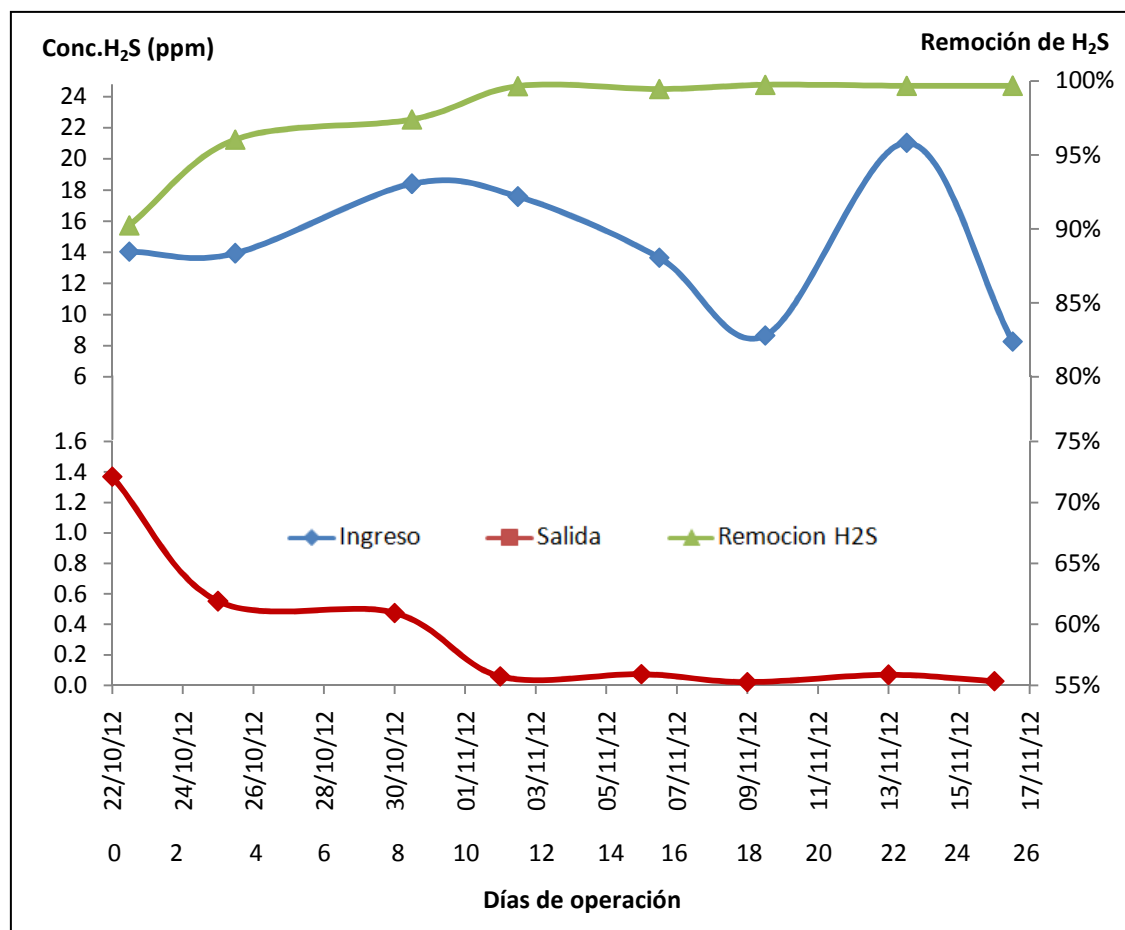


Figura 5.2: Eficiencia de remoción promedio de H₂S en el biofiltro percolador durante la puesta en marcha.

En la figura 5.3 se muestra un ejemplo de la variación típica diaria de la concentración de H₂S en el aire purificado correspondiente a los días 13 y 14 de noviembre de 2012 (Día 23). De este monitoreo se determinó que la concentración promedio fue de 0.0691 ppm y se verificó que el 25% de los datos registrados fueron superiores a 0.1 ppm. Asimismo, el valor máximo registrado fue de 0.3 ppm que se presentó a las 14:30 horas.

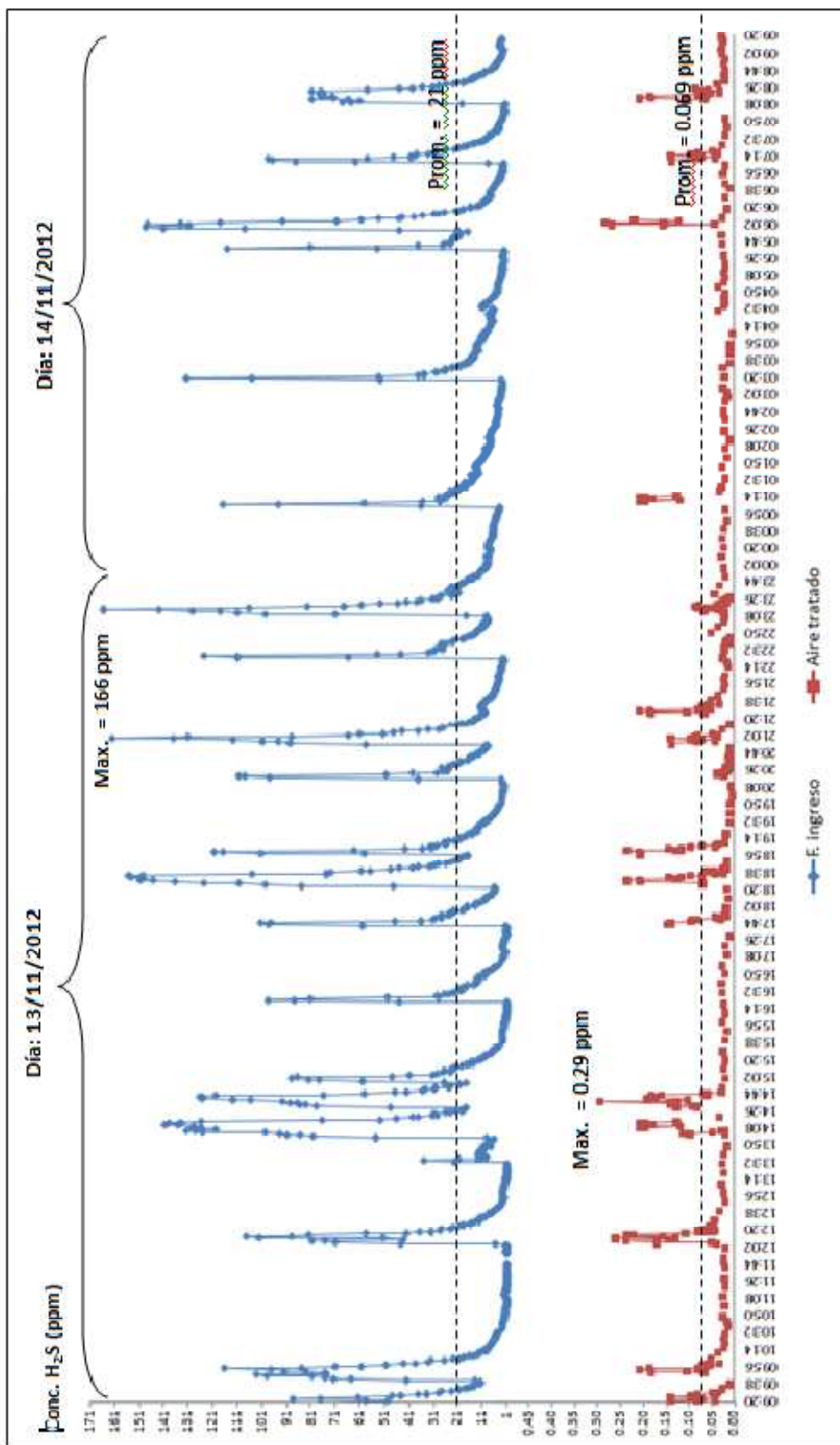


Figura 5.3: Variación diaria de la concentración de H₂S en el flujo de ingreso y aire purificado en el biofiltro percolador (Días 13 y 14 de Noviembre de 2012)

Tabla 5.2: Concentración de H₂S y temperatura en el biofiltro percolador durante la fase de puesta en marcha y aclimatación

Fecha	Días de operación	Flujo de ingreso (m ³ .h ⁻¹)	EBCT (s)	Concentración de H ₂ S (ppm)						Eficiencia de remoción prom. (%)	Temperatura (°C)			Carga másica prom. H ₂ S (g.m ⁻³ .h ⁻¹)
				Ingreso		Salida		Prom.	Min.		Max.	Min.	Max.	
Prom.	Max.	Min.	Prom.	Max.	Min.	Prom.	Max.			Min.				Prom.
22/10/12	1	381	19.2	14.04	181.2	1.1	1.370	2.0	0.26	90.24	18.67	21.7	17.3	3.62
25/10/12	4			13.93	141.4	1.2	0.552	1.45	0.10	96.04	19.92	25.2	17.5	3.59
30/10/12	9			18.39	138.4	1.3	0.476	1.06	0.01	97.41	19.89	24.3	18.3	4.74
02/11/12	12			17.57	148.6	1.5	0.059	0.50	0.004	99.66	20.37	24.3	18.5	4.53
06/11/12	16			13.65	83.7	2.0	0.074	0.25	0.001	99.45	20.07	24.5	18.4	3.52
09/11/12	19			8.65	68.8	1.3	0.022	0.12	0.004	99.74	19.87	23.8	18.1	2.23
13/11/12	23	21.03	166	1.5	0.069	0.29	0.006	99.67	20.50	24.6	18.7	5.42		
16/11/12	26	8.26	96.2	2.1	0.027	0.26	0.005	99.68	20.60	26.3	18.6	2.13		

Fuente: Elaboración propia

5.2.3 PH en la media de filtración y lixiviado

El pH en el lixiviado y media de filtración fueron monitoreados continuamente en los puntos de control B1 y B2 respectivamente. Antes de iniciar las evaluaciones, se analizaron los valores de pH y sulfatos en el agua potable del sistema de irrigación y en el agua destilada con el propósito de verificar si ocasionarían alguna distorsión en los resultados.

Por estas razones, el día 22 de Octubre de 2012 entre las 8:30 y 9.30 horas se procedió con la toma de muestras y análisis de ambos parámetros. En la tabla 5.3 se muestra los resultados de las evaluaciones donde se observa que la concentración de sulfatos en el agua potable se encontró cercano a 250 mg.L^{-1} , límite máximo permisible de calidad establecido por el Ministerio de Salud⁴². Asimismo, el pH del agua potable y agua destilada estuvieron cerca del valor neutro, por lo que ambos no incidieron en los resultados obtenidos.

Tabla 5.3: Análisis de sulfatos y pH en el agua potable y agua destilada

Parámetro	Unidad	Agua potable	Agua destilada
pH	--	7.6	7.1
Temperatura	°C	19.8	21.0
Sulfatos (SO ₄)	mg.L ⁻¹	246.3	0.00

En la figura 5.4 se muestra la variación del pH en la media de filtración y en el lixiviado. Durante los primeros 4 días de operación, el pH en la sección superior de la media de filtración se mantuvo entre 8.6 y 8.9 debido a que el agua de irrigación lavaba la arcilla expandida y liberaba sólidos suspendidos que mantuvieron el pH en el rango alcalino. A partir del día 9, como consecuencia de las reacciones de oxidación del H₂S y la formación de la biopelícula, el pH empezó a

descender gradualmente hasta alcanzar valores entre 6.5 a 6.7 que se mantuvieron constante hasta culminar la puesta en marcha (Día 26).

En cuanto al lixiviado, el pH descendió gradualmente desde 8.1 a hasta 3.8 debido a que muchas de las reacciones de oxidación del H_2S se producen cerca de la sección de ingreso del biofiltro. La disminución del pH estuvo relacionada con la mayor producción de ácidos en el proceso, lo cual fue verificado con el incremento gradual de la eficiencia de remoción de H_2S .

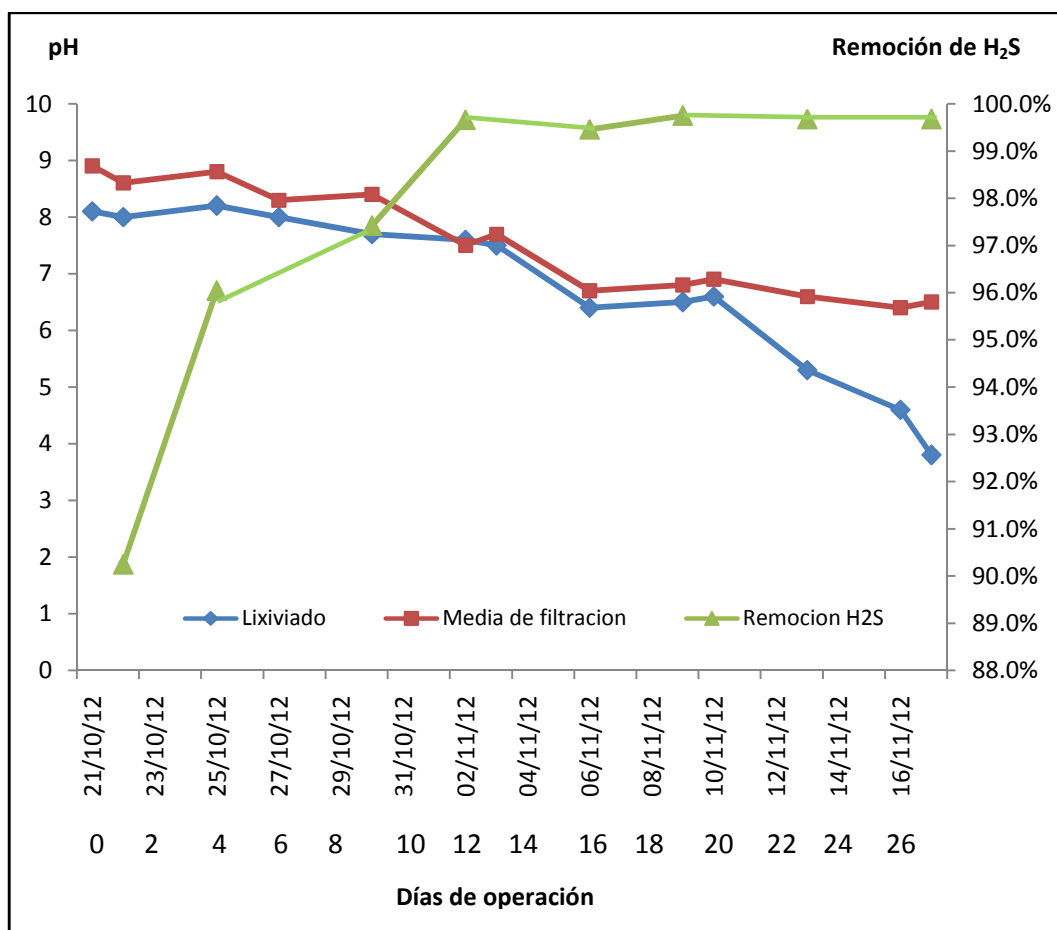


Figura 5.4: Valores del pH y remoción promedio de H_2S en el biofiltro percolador durante la fase de puesta en marcha.

5.2.4 Sulfatos en la media de filtración y lixiviado

El control de los compuestos de azufre en el lixiviado y en la media de filtración se llevó a cabo solo con el análisis de sulfatos debido a que, en nuestro país, los laboratorios no cuentan con equipamiento especializado para determinar el porcentaje de azufre total, sulfitos, sulfatos y azufre elemental.

En la figura 5.5 se observa que durante los 4 primeros días, la concentración de sulfatos en el lixiviado (sección de ingreso) fue de 258 mg.L⁻¹, casi similar al valor en el agua potable utilizada para la irrigación. A partir del día 5, la concentración de sulfatos empezó a incrementarse gradualmente por la remoción del H₂S, alcanzando valores entre 337 y 356.6 mg.L⁻¹. Asimismo, la mayor producción de sulfatos se identificó el día 23 cuando la carga másica de ingreso fue de 5.49 g.m⁻³.h⁻¹.

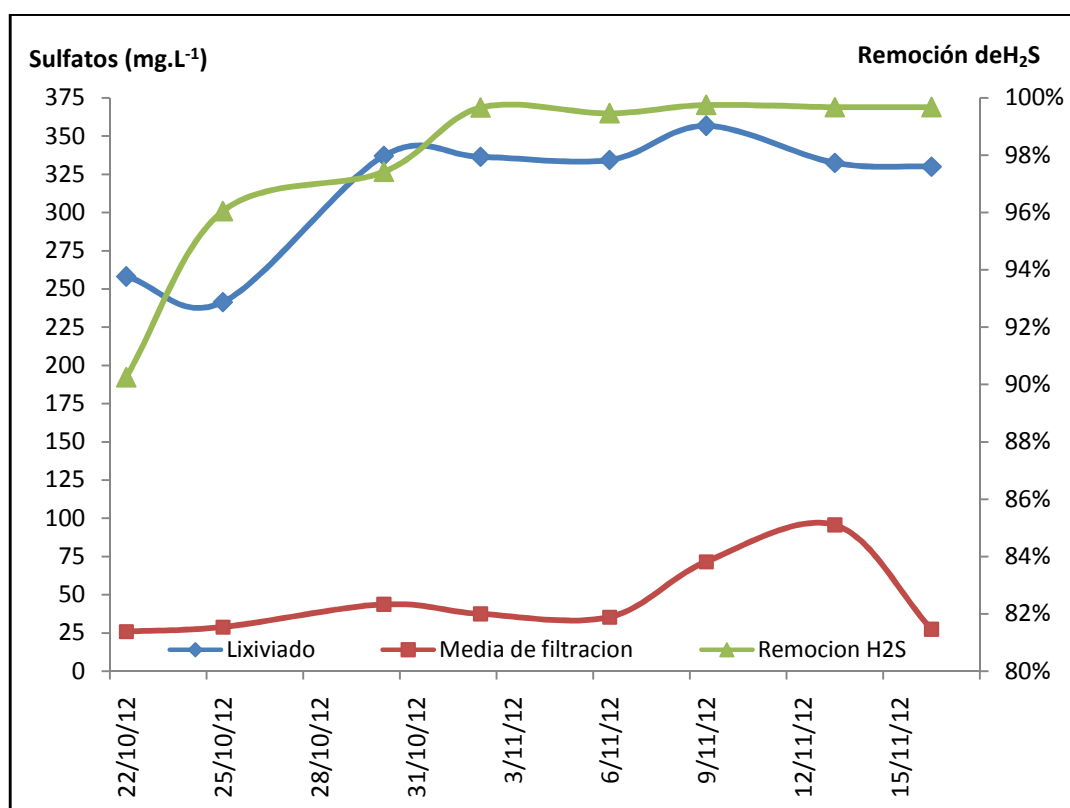


Figura 5.5: Concentración de sulfatos y remoción promedio de H₂S en el biofiltro percolador durante la puesta en marcha.

En cuanto a la media de filtración, la concentración de sulfatos fue menor y varió entre 25 y 95 mg.L⁻¹. Además, se verificó que el suministro del agua potable fue importante para el control de la humedad y para evitar la acumulación excesiva de ácidos que podrían inhibir el proceso biológico.

5.2.5 Humedad en la media de filtración

La irrigación de la media de filtración se realizó en forma intermitente, suministrando un caudal de agua potable de 6 GPM por un tiempo de de 2.5 minutos cada 30 minutos de operación. Asimismo, la solución de nutrientes suministrada fue de 0.12 GPH que se agregó durante los ciclos de irrigación.

Durante la puesta en marcha, el contenido de humedad en la sección superior de la arcilla expandida se mantuvo principalmente en el rango de 23% a 25% en peso seco, siendo similar a lo reportado por Shareedeen para materiales inorgánicos⁵⁸. A partir del día 16 (385 horas de operación), el tiempo de irrigación se incrementó a 3 minutos debido a que la humedad descendió hasta 20% y se identificó una mayor acumulación de sulfatos en la media de filtración (71.6 a 95.6 mg.L⁻¹).

El contenido de humedad en el biofiltro permitió alcanzar una eficiencia de remoción de H₂S de 99.66% que se mantuvo casi estable desde el día 12 hasta finalizar la puesta en marcha.

Por otro lado, con la tasa de irrigación de agua, se calculó que la velocidad del líquido percolado (TLV) correspondió a 0.8 m.h⁻¹. Este parámetro es importante para la adhesión de la biomasa en la media de filtración, la apropiada transferencia de masa gas-líquido y para el lavado del azufre acumulado.

En la tabla 5.4 se muestra un resumen de los parámetros de control en el biofiltro percolador.

Tabla 5.4: Parámetros de control en el biofiltro percolador durante la fase de aclimatación y puesta en marcha.

Fecha	Flujo de ingreso (m ³ .h ⁻¹)	Horas de operación	Lixiviado (B1)			Media de filtración (B2)			
			pH	T (°C)	SO ₄ (mg.L ⁻¹)	pH	T (°C)	SO ₄ (mg.L ⁻¹)	Humedad (%)
21/10/12	381	2.5	8.1	19.3	---	8.9	18.2	---	---
22/10/12		25.5	8.0	19.6	258	8.6	21.1	25.97	23
25/10/12		90.5	8.2	18.8	241.3	8.8	22.4	28.9	23
27/10/12		138	8.0	19.3	---	8.3	29.5	---	---
30/10/12		210.5	7.7	19.7	337	8.4	20.2	43.62	25
02/11/12		281.5	7.6	19.8	336.4	7.5	21.6	---	24
03/11/12		306.5	7.5	19.6	---	7.7	19.3	37.35	---
06/11/12		381.5	6.4	20.3	334.3	6.7	21.4	---	20
09/11/12		450	6.3	18.4	356.6	6.8	21.4	71.60	24
10/11/12		474.5	6.6	19.2	---	6.9	21.6	---	---
13/11/12		546.5	5.3	19.5	332.4	6.5	21.0	95.58	25
16/11/12		618.5	4.6	19.5	330	6.4	24.1	27.31	23
17/11/12		642.5	3.8	21.0	---	6.5	26.1	---	---

5.2.6 Resumen de parámetros de operación en la puesta en marcha

Durante la fase de puesta en marcha, el biofiltro percolador operó con un 64% del flujo de diseño, un EBCT de 19.2 segundos y un 26.90% de la carga másica promedio, lo que permitió alcanzar una remoción de H₂S dentro de los niveles esperados (> 99.5%). Asimismo, la carga volumétrica y velocidad superficial estuvieron por debajo de los valores de diseño (Tabla 5.5)

La operación del biofiltro percolador con una carga másica menor garantizó un mayor tiempo para que los contaminantes se difundan y sean oxidados en la biopelícula adherida en la media de filtración.

Tabla 5.5: Resumen de los parámetros de operación durante la fase de puesta en marcha

Parámetros	Unidad	Diseño	Puesta en marcha
Flujo de ingreso	$\text{m}^3.\text{h}^{-1}$	595.8	381
Tiempo de contacto de gas (EBCT)	s	12.25	19.2
Concentración de H_2S en el flujo de ingreso (promedio)	ppm	50	8.26- 21.03
Carga másica de ingreso (promedio)	$\text{g}.\text{m}^{-3}.\text{h}^{-1}$	20.15	2.13 - 5.42
Concentración de H_2S en el aire purificado (promedio)	ppm	0.050	0.022 – 1.37
Eficiencia de remoción H_2S	%	99.90	90.24 – 99.74
Carga volumétrica	$\text{m}^3.\text{m}^{-3}.\text{h}^{-1}$	4.90	3.13
Velocidad superficial	$\text{m}.\text{min}^{-1}$	5.88	3.76

5.3 Evaluación del biofiltro percolador

La fase de evaluación del biofiltro percolador se inició el 18 de noviembre de 2012 y culminó el 10 de marzo de 2013, completando un período total de 113 días.

Durante esta fase, el flujo de ingreso al biofiltro percolador se incrementó gradualmente a $448 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$, $572 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$, $662 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ y $862 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$. En cada etapa de evaluación, el biofiltro percolador fue monitoreado y evaluado por un período de 25 a 30 días.

5.3.1 Concentración de H_2S en el flujo de ingreso y aire purificado

Durante la fase de evaluación, las concentraciones diarias de H_2S en el flujo de ingreso presentaron el mismo comportamiento variable que en la fase de puesta en marcha.

De las mediciones realizadas se verificó que las concentraciones promedio de H₂S variaron entre 6.88 y 34.35 ppm, siendo menores a la concentración de diseño (50 ppm). Asimismo, las concentraciones máximas variaron en el rango de 47.2 y 165 ppm. Sin embargo, entre los días 30 y 37, las otras estaciones de bombeo del proyecto no operaron normalmente y la estación de bombeo CBD 326-2 recibió desagües altamente degradados, lo que originó un inusual incremento en las concentraciones de H₂S, variando entre 237 y 285.2 ppm (Tabla 5.6).

En cuanto a la temperatura, el flujo de ingreso presentó valores promedios diarios de 19.8 °C a 25.9 °C. Estos valores se encontraron en el rango mesofílico y fueron importantes para determinar la predominancia de las poblaciones microbiológicas.

Respecto al aire purificado, independientemente del flujo de ingreso, las concentraciones promedio de H₂S variaron entre 0.0261 y 0.072 ppm, cumpliendo con el límite permisible de 0.1 ppm establecido por la Organización Mundial de la Salud. Sin embargo, algunas concentraciones puntuales superaron este límite, especialmente cuando el flujo de ingreso presentó concentraciones de H₂S mayores a 100 ppm.

Tabla 5.6: Concentraciones de H₂S y temperatura en el biofiltro percolador durante la fase de evaluación

Fecha	Días de operación	Flujo de ingreso (m ³ .h ⁻¹)	EBCT (s)	Concentración de H ₂ S (ppm)									Temperatura (°C)			Carga másica prom. H ₂ S (g.m ⁻³ .h ⁻¹)
				Ingreso			Salida			Eficiencia de remoción prom. (%)	Prom.	Ingreso				
				Prom.	Max.	Min.	Prom.	Max.	Min.			Prom.	Max.	Min.		
20/11/12	30			28.94	237	2.0	0.028	0.07	0.010	99.90	19.8	21.6	18.7	8.77		
23/11/12	33			34.25	285.2	2.1	0.026	0.10	0.008	99.92	21.55	26.9	19.5	10.41		
27/11/12	37			18.67	280.5	1.7	0.026	0.09	0.015	99.86	20.85	24.9	19.3	5.66		
30/11/12	40	448	16.3	10.93	87.2	1.9	0.030	0.06	0.016	99.72	21.66	33.6	18.3	3.31		
04/12/12	44			7.52	92.0	1.8	0.028	0.07	0.016	99.61	20.41	22.2	19.6	2.28		
07/12/12	47			12.15	98.4	2.1	0.027	0.04	0.018	99.77	22.43	30.4	20.1	3.68		
11/12/12	51			7.71	131.2	2.2	0.029	0.05	0.016	99.62	22.23	28.8	19.9	2.33		
13/12/12	53			11.08	160.1	2.0	0.032	0.12	0.018	99.70	22.79	28.9	20.8	3.36		
18/12/12	58			19.93	98.4	1.7	0.0314	0.05	0.018	99.84	22.0	28.0	19.9	7.71		
21/12/12	61			16.81	165.0	1.2	0.0650	0.15	0.024	99.61	22.69	27.5	20.7	6.50		
26/12/12	66			6.88	46.7	1.4	0.0325	0.07	0.021	99.52	23.94	32.6	20.3	2.66		
28/12/12	68	572	12.8	10.88	108.5	1.3	0.0562	0.08	0.031	99.48	22.83	30.0	20.2	4.21		
03/01/13	74			15.65	153.4	2.3	0.0589	0.09	0.021	99.62	22.83	29.1	20.1	6.05		
05/01/13	76			14.06	92.0	1.3	0.0567	0.11	0.032	99.60	23.78	31.8	20.7	5.44		
08/01/13	79			16.96	160.1	1.4	0.0642	0.12	0.035	99.62	23.83	31.2	21.3	6.56		

Tabla 5.6: Concentraciones de H₂S en el biofiltro percolador durante la fase de evaluación (continuación)

Fecha	Días de operación	Flujo de ingreso (m ³ .h ⁻¹)	EBCT (s)	Concentración de H ₂ S (ppm)						Temperatura (°C)			Carga másica prom. H ₂ S (g.m ⁻³ .h ⁻¹)	
				Ingreso			Salida			Eficiencia de remoción prom. (%)	Ingreso			
				Prom.	Max.	Min.	Prom.	Max.	Min.		Prom.	Max.		Min.
10/01/13	81	572	128	15.54	106.7	1.5	0.0585	0.11	0.036	99.62	23.98	29.9	21.8	6.01
17/01/13	88			14.45	114.1	1.6	0.0365	0.07	0.018	99.74	23.38	30.9	20.8	5.59
24/01/13	95			13.07	91.1	1.2	0.0584	0.10	0.035	99.55	24.51	32.0	21.4	5.85
29/01/13	100			15.58	106.5	2.2	0.0540	0.15	0.025	99.65	24.5	31.8	21.7	6.97
01/02/13	103		11	16.87	119.9	1.7	0.0522	0.08	0.026	99.69	25.0	31.3	22.0	7.55
05/02/13	107	662		16.29	105.4	1.7	0.0516	0.09	0.021	99.68	25.1	31.1	21.2	7.29
08/02/13	110			20.53	118.6	2.3	0.0630	0.09	0.034	99.69	25.94	30.8	24.3	9.19
12/02/13	114			12.57	73.6	1.9	0.0579	0.08	0.037	99.53	25.25	32.8	22.0	5.63
15/02/13	117			17.04	102.5	1.9	0.0684	0.09	0.044	99.59	24.94	33.0	21.8	9.93
19/02/13	121			17.25	95.0	2.8	0.0686	0.08	0.054	99.60	23.02	28.9	21.0	10.06
22/02/13	124			11.53	57.8	1.4	0.0594	0.09	0.038	99.48	24.45	30.9	21.9	6.72
26/02/13	128	862	8.5	12.00	68.9	1.8	0.0720	0.09	0.054	99.40	23.94	30.1	21.4	7.00
01/03/13	131			12.33	109.7	1.6	0.065	0.08	0.048	99.47	24.42	30.8	21.8	7.19
05/03/13	135			11.34	63.1	1.7	0.0674	0.08	0.051	99.40	24.62	30.5	22.0	6.61
08/03/13	138			11.09	67.6	1.2	0.061	0.07	0.043	99.45	24.89	31.5	22.0	6.46

5.3.2 Efecto del tiempo de contacto de gas en la remoción de H₂S

El efecto del tiempo de contacto del gas en la eliminación de H₂S fue estudiado por la variación del flujo de ingreso a través del biofiltro percolador. Las evaluaciones fueron realizadas con cargas máxicas promedio de H₂S entre 2.28 y 10.41 g.m⁻³.h⁻¹ y se verificó que la carga de diseño (20.15 g.m⁻³.h⁻¹) no fue excedida en ningún momento para los tiempos de contacto de gas entre 8.5 y 16.3 segundos.

La figura 5.6 muestra las concentraciones promedio de H₂S en el flujo de ingreso y aire purificado así como la eficiencia de remoción. De esta figura se observa que cuando se disminuyó el tiempo de contacto de gas en el biofiltro percolador, las concentraciones de H₂S en el aire purificado se incrementaron.

Las concentraciones menores de H₂S en el aire purificado variaron entre 0.0261 y 0.0324 ppm y se alcanzaron cuando el biofiltro percolador operó con el mayor tiempo de contacto (16.3 segundos). Además, como se muestra en la figura 5.10 no existió un efecto aparente en la remoción de H₂S con los tiempos de retención de 11 y 12.8 segundos y las concentraciones de H₂S variaron entre 0.031 y 0.065 ppm. Sin embargo, cuando el tiempo de contacto de gas disminuyó a 8.5 segundos, la eficiencia de remoción de H₂S descendió ligeramente hasta 99.40% y las concentraciones de H₂S en el aire purificado se incrementaron entre 0.059 y 0.072 ppm.

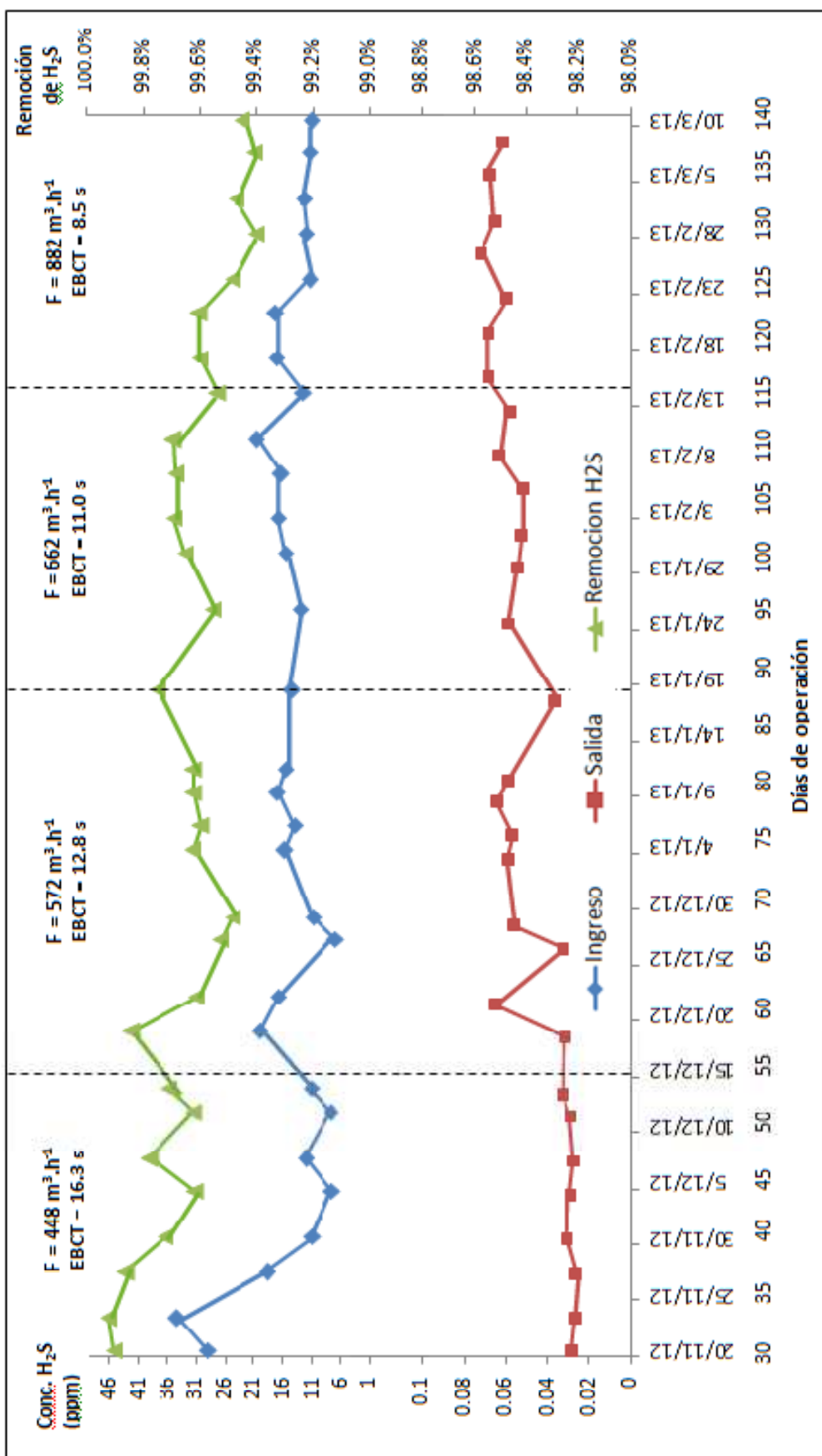


Figura 5.6: Eficiencia de remoción promedio de H₂S en función del tiempo de contacto de gas durante la fase de

5.3.3 Efecto de la carga másica en la remoción de H₂S

Durante la fase de evaluación, el biofiltro percolador operó con cargas másicas promedio de H₂S entre 2.28 y 10.41 g.m⁻³.h⁻¹ y tiempos de contacto de gas (EBCT) entre 8.5 y 16.3 segundos.

Como se mencionó anteriormente, el flujo de ingreso al biofiltro percolador se incrementó gradualmente, con el propósito de reducir el tiempo de contacto de gas e incrementar la carga másica hasta el valor de diseño (20.15 g.m⁻³.h⁻¹). Desafortunadamente, cuando el biofiltro operó con el mayor flujo de aire (862 m³.h⁻¹), las concentraciones promedio de H₂S variaron entre 11 y 17.25 ppm, por lo cual solo se alcanzó una carga másica máxima de 10.06 g.m⁻³.h⁻¹ (Tabla 5.7).

Tabla 5.7: Carga másica de ingreso y Capacidad de Eliminación promedio durante la fase de evaluación

Fecha	Día de operación	Flujo de ingreso (m ³ .h ⁻¹)	Carga másica promedio H ₂ S (g.m ⁻³ .h ⁻¹)	Capacidad de eliminación (g.m ⁻³ .h ⁻¹)	EBCT (s)
20/11/2012	30	448	8.77	8.76	16.3
23/11/2012	33		10.41	10.40	
27/11/2012	37		5.66	5.65	
30/11/2012	40		3.31	3.30	
04/12/2012	44		2.28	2.27	
07/12/2012	47		3.68	3.67	
11/12/2012	51		2.33	3.32	
13/12/2012	53		3.36	3.35	
18/12/2012	58	572	7.71	7.70	12.8
21/12/2012	61		6.51	6.48	
26/12/2012	66		2.66	2.65	
28/12/2012	68		4.21	4.19	
03/01/2013	74		6.06	6.03	

Tabla 5.7: Carga másica de ingreso y Capacidad de Eliminación promedio durante la fase de evaluación (*Continuación*)

Fecha	Día de operación	Flujo de ingreso ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	Carga másica promedio H_2S ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$)	Capacidad de eliminación ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$)	EBCT (s)
05/01/2013	76	572	5.44	5.42	12.8
08/01/2013	79		6.56	6.54	
10/01/2013	81		6.01	5.99	
17/01/2013	88		5.59	5.58	
24/01/2013	95	662	5.86	5.83	11.0
29/01/2013	100		7.00	6.95	
01/02/2013	103		7.56	7.53	
05/02/2013	107		7.30	7.27	
08/02/2013	110		9.20	9.16	
12/02/2013	114		5.63	5.60	
15/02/2013	117	862	9.94	9.90	8.5
19/02/2013	121		10.06	10.02	
22/02/2013	124		6.72	6.69	
26/02/2013	128		7.00	6.96	
01/03/2013	131		7.19	7.15	
05/03/2013	135		6.63	6.57	
08/03/2013	138		6.47	6.43	

En la figura 5.7 se muestra la carga másica de ingreso promedio versus la capacidad de eliminación de H_2S (CE) en el biofiltro percolador para tiempos de contacto de gas entre 8.5 y 16.3 segundos. De esta figura se observa que en todas las condiciones de operación, la carga másica y la capacidad de eliminación fueron muy similares (Régimen de primer orden), lo que indica que el contaminante fue removido casi por completo.

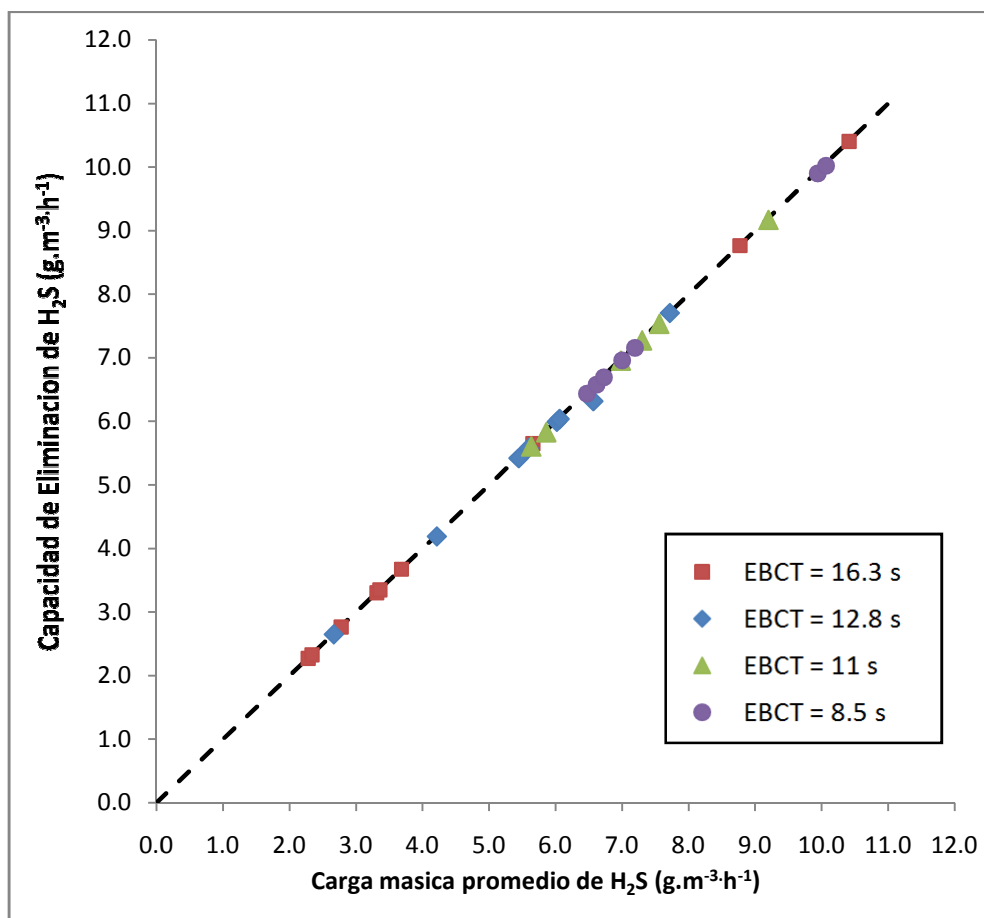


Figura 5.7: Capacidad de eliminación de H₂S en el biofiltro percolador en función del tiempo de contacto de gas (EBCT)

Por otro lado, en la figura 5.7 no fue posible identificar la carga crítica, es decir el valor en la cual la eficiencia de remoción de H₂S se desvía de la línea recta. Esto significa que el biofiltro percolador puede operar con cargas másicas mayores a 10.41 g.m⁻³.h⁻¹, inclusive para un tiempo de contacto de gas de 8.5 segundos. Deshusses¹⁶ reportó que la capacidad de eliminación máxima de H₂S se encuentra generalmente en el rango de 5 a 200 g.m⁻³.h⁻¹, aunque la mayoría de estos valores han sido determinados en estudios a nivel de laboratorio, con diversos tipos de medias de filtración y en condiciones controladas.

5.3.4 Efecto de la velocidad superficial en la remoción de H₂S.

La velocidad superficial del gas en el biofiltro percolador varió entre 4.42 y 8.50 m.min⁻¹. Estos valores coincidieron con los estudios de Gabriel y Deshusses²⁵ que indican que la velocidad superficial del gas en biofiltros orgánicos y biofiltros percoladores usualmente se encuentran dentro del rango de 1 a 16.6 m.min⁻¹ siempre que la velocidad del líquido percolado (TLV) no exceda de 10 m.h⁻¹.

En la figura 5.8 se observa que cuando el biofiltro percolador operó con una mayor velocidad superficial (VS), la eficiencia de remoción de H₂S descendió ligeramente. Si bien es cierto que el incremento de la velocidad del gas permite incrementar el coeficiente de transferencia de la película de gas, el tiempo de contacto de gas es un factor que incide en la degradación del sustrato. Kim y Deshusses³³ observaron que el desempeño de un biofiltro percolador tratando bajas concentraciones de H₂S en muy cortos tiempos de contacto de gas depende de la velocidad de gas.

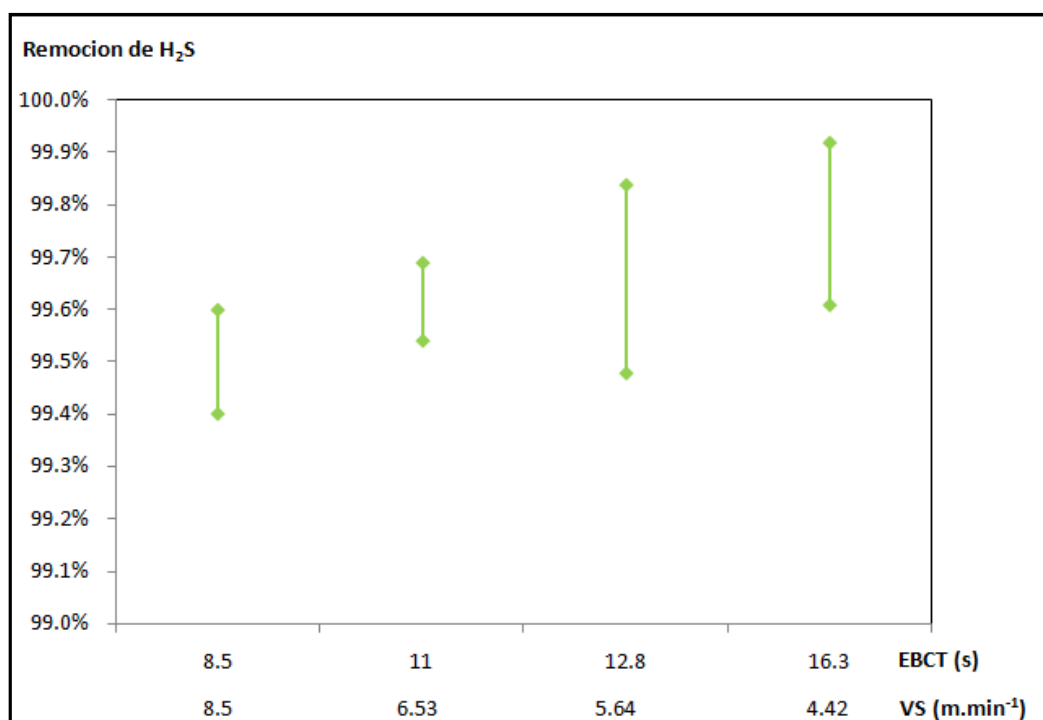


Figura 5.8: Velocidad superficial (VS) y remoción promedio de H₂S en el biofiltro percolador durante la fase de evaluación

5.3.5 Efecto del pH y temperatura en la remoción de H₂S

El pH es un parámetro importante que impacta en la microbiología del biofiltro y en el equilibrio ácido-base del H₂S. En la figura 5.9 se muestra la variación del pH en la media de filtración y en el lixiviado para las 4 condiciones de operación. Como se observa, el pH en la sección superior de la media de filtración se mantuvo cercano al rango neutro, alcanzando valores entre 5.7 y 7.9. Sin embargo, cuando el biofiltro percolador operó con un flujo de ingreso de 572 m³.h⁻¹ (EBCT = 12.8 s), entre los días 80 y 84, el pH descendió hasta 5.7 por lo cual se incrementó el tiempo de irrigación a 3.5 minutos para lavar los ácidos acumulados. El control del pH se realizó solo con la adición de agua sin utilizar ninguna solución de hidróxido o carbonato de sodio.

Respecto a la temperatura, en la media de filtración se obtuvieron valores promedios diarios entre 20.4 °C y 30.6 °C. El incremento de la temperatura se produjo con el cambio de estación de primavera a verano.

En cuanto al lixiviado, el pH fue menor que en la sección superior de la media. Durante la operación con el flujo de ingreso de 448 m³.h⁻¹, el pH varió entre 3.7 y 4.6, mientras que en las 3 últimas condiciones de operación, el pH descendió y se mantuvo casi estable en el rango de 2.6 a 3.3. Para estas condiciones, en el biofiltro percolador se alcanzaron eficiencias de remoción de H₂S entre 99.34% y 99.84%. Los resultados obtenidos coincidieron con los estudios desarrollados por Gabriel en la cual la operación de un biofiltro con pH bajo resultó tener un mejor desempeño en la remoción de H₂S ²⁵.

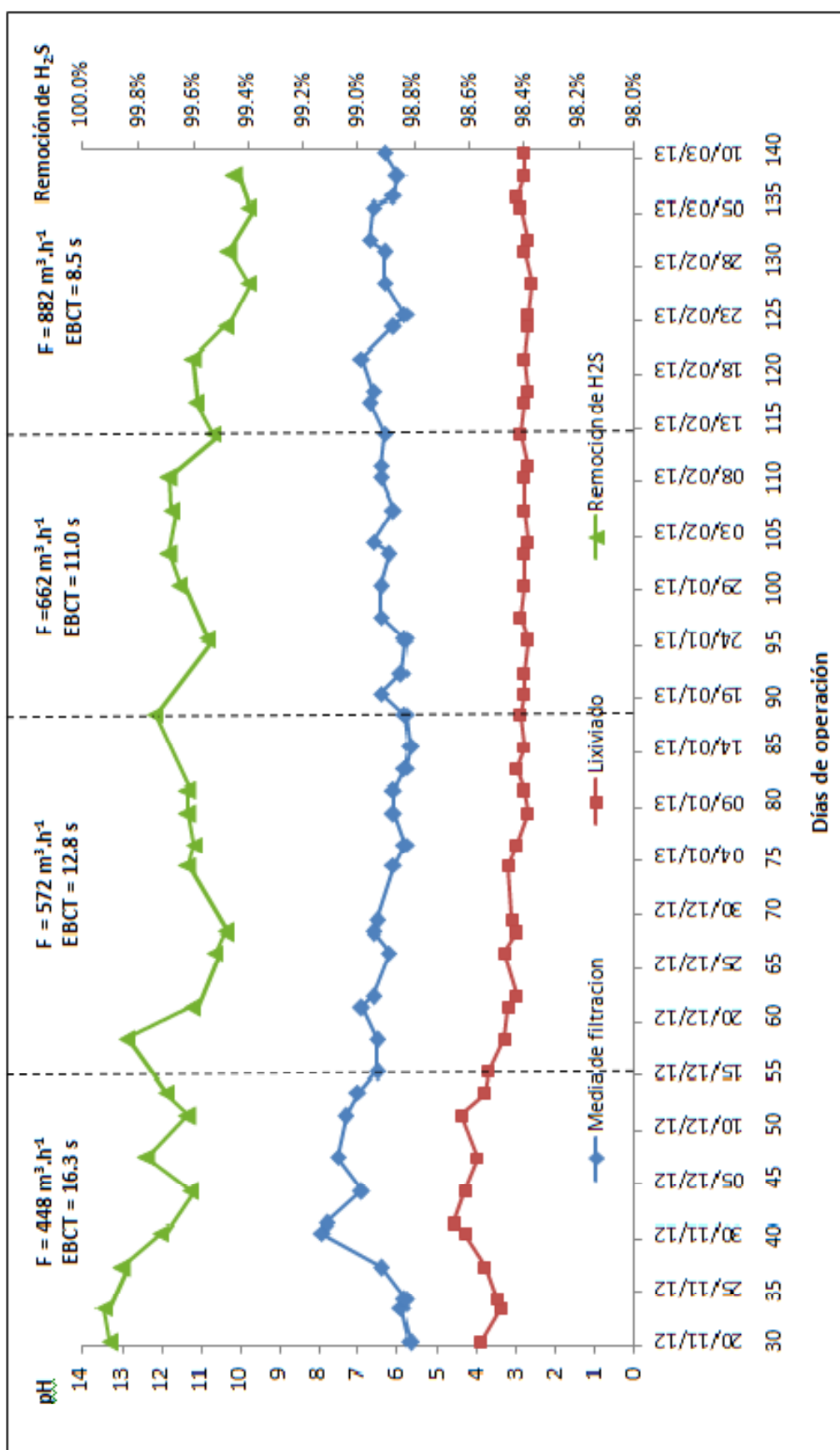


Figura 5.9: Valores del pH y remoción promedio de H₂S en el biofiltro percolador durante la fase de evaluación

5.3.6 Efecto de sulfatos en la remoción de H₂S

En la figura 5.10 se muestra la variación de sulfatos en la media de filtración y lixiviado durante la fase de evaluación. Como se observa, la concentración de sulfatos en el lixiviado se incrementó gradualmente cuando el biofiltro percolador operó con flujos de ingreso entre 448 y 662 m³.h⁻¹. Las mayores concentraciones de sulfatos variaron entre 398 y 508 mg.L⁻¹ y se identificaron cuando el biofiltro percolador operó con cargas másicas de 2.28 a 9.20 g.m⁻³.h⁻¹ y EBCT de 11 a 12.8 segundos. Con estos parámetros de operación, el incremento de sulfatos fue directamente proporcional con la eficiencia de remoción de H₂S que alcanzó valores entre 99.48% y 99.84%.

En la última condición de operación, el biofiltro percolador operó con un flujo de ingreso de 862 m³.h⁻¹ y un EBCT de 8.5 segundos y se observó que los sulfatos en el lixiviado fueron menores y variaron entre 363.9 y 394.8 mg.L⁻¹. Los sulfatos disminuyeron probablemente por el limitado sustrato para la población microbológica existente debido a que las cargas másicas de H₂S (6.47 a 10 g.m³.h⁻¹) fueron casi similares cuando el biofiltro percolador operó con el flujo de ingreso de 662 m³.h⁻¹. Además, en esta condición, se evidenció una ligera disminución en la eficiencia de remoción de H₂S.

Respecto a la media de filtración, cuando el biofiltro percolador operó con el flujo de ingreso de 448 m³.h⁻¹, la concentración de sulfatos alcanzó un valor máximo de 60.37 mg.L⁻¹. Con el transcurrir de los días, la concentración de sulfatos disminuyó gradualmente a valores entre 5.45 y 25.6 mg.L⁻¹, independientemente del incremento del flujo de ingreso. Las bajas concentraciones de sulfatos en la media de filtración indicaron que los ciclos de irrigación fueron adecuados, lo que permitió el control de la humedad y se evitó la acumulación excesiva de ácidos que puedan inhibir la actividad biológica.

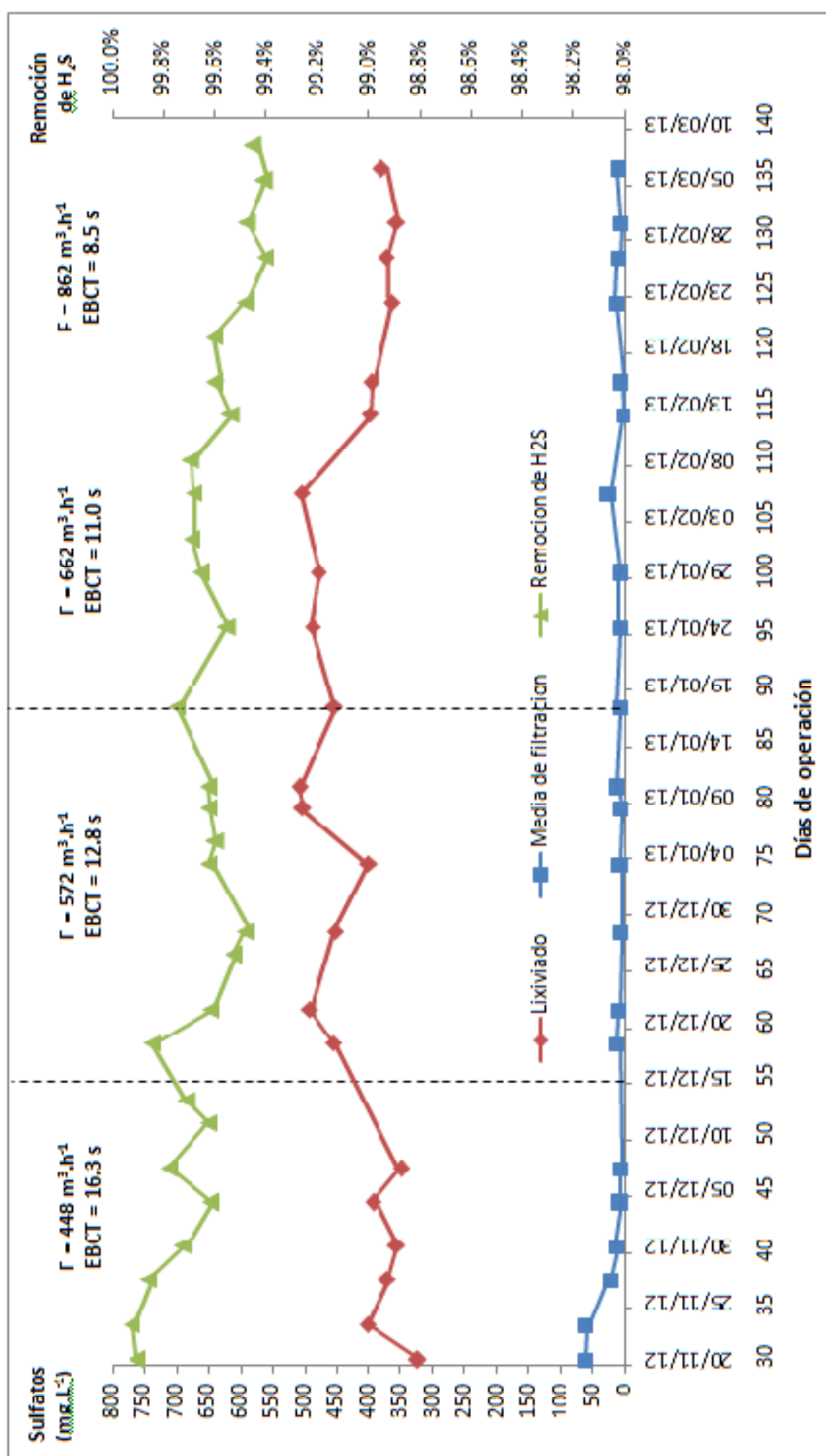


Figura 5.10: Concentración de sulfatos y remoción promedio de H₂S en el biofiltro percolador durante la fase de evaluación

5.3.7 Efecto de la humedad en la remoción de H₂S

La fase de evaluación se inició con el biofiltro percolador operando con un flujo de ingreso de 448 m³.h⁻¹. En esta condición, la irrigación de la media de filtración se realizó en forma intermitente, suministrando un caudal de agua potable de 6 GPM por un tiempo de 3 minutos cada 30 minutos de operación. Además, la dosis de nutrientes se mantuvo en 0.12 GPH. Con estos parámetros, la humedad en la sección superior de la arcilla expandida se mantuvo en el rango de 21% a 25% en peso seco.

A partir del día 58, con el incremento del flujo de aire a 572 m³.h⁻¹, el tiempo de irrigación se aumentó a 3.5 minutos al verificar que la humedad descendió hasta 21% (Tabla 5.8). Este tiempo de irrigación y la dosis de nutrientes se mantuvieron cuando el biofiltro percolador operó con el flujo de ingreso de 662 m³.h⁻¹. Sin embargo, en la última condición de operación (150% del flujo de diseño), el caudal de agua se incrementó a 7 GPM con un tiempo de irrigación de 3.5 minutos debido a que el mayor flujo de aire producía un mayor secado de la media (Humedad 20%). Asimismo, la dosis de nutrientes se incrementó de 0.12 GPH a 0.20 GPH.

Respecto a la remoción de H₂S, el biofiltro percolador alcanzó eficiencias consistentemente altas de 99.60% a 99.92% con los valores de humedad indicados. Sin embargo, cuando el biofiltro operó con el flujo máximo de aire, la eficiencia de remoción de H₂S descendió ligeramente hasta 99.40%.

Por otro lado, en función de los caudales de irrigación indicados, la velocidad del líquido percolado (TLV) varió entre 0.8 y 0.95 m.h⁻¹. De acuerdo con Kim³³, el coeficiente de transferencia de masa de la película de gas generalmente se incrementa cuando la TLV se encuentra en el rango de 0.1 a 4 m.h⁻¹ pero esta tendencia cambia y se mantiene constante cuando la TLV es superior a 6.3 m.h⁻¹.

Los resultados obtenidos demostraron que la velocidad del gas permitió una alta eficiencia de remoción de H₂S y tuvo un efecto positivo en la tasa de adherencia de la biomasa en la biopelícula. Asimismo, la velocidad del líquido percolado contribuyó con el lavado del azufre acumulado en la sección superior de la media, lo que se verificó con las bajas concentraciones de sulfatos (6.5 a 11.5 mg.L⁻¹). Es importante mencionar que el lixiviado fue eliminado continuamente y no fue recirculado al biofiltro en ningún momento.

Tabla 5.8: Parámetros de control en el biofiltro percolador durante la fase de evaluación

Fecha	Flujo de ingreso (m ³ .h ⁻¹)	Horas de operación	Lixiviado (B1)			Media de filtración (B2)				
			pH	T (°C)	SO ₄ (mg.L ⁻¹)	pH	T (°C)	SO ₄ (mg.L ⁻¹)	Humedad (%)	
20/11/12	448	714.5	3.9	19.6	323	5.7	20.5	60.37	23	
23/11/12		785.5	3.4	21.3	402.3	5.9	27.4	58.39	22	
24/11/12		809.5	3.5	20.2	---	5.8	21.8	---	---	
27/11/12		882.5	3.8	21.2	307.4	6.4	22.7	22.39	25	
30/11/12		961.5	4.3	21.4	356	7.9	23.8	11.36	24	
01/12/12		980	4.6	23.2	---	7.8	25.0	---	---	
04/12/12		1051	4.3	20.6	393.3	6.9	20.4	8.03	22	
07/12/12		1122.5	4.0	20.9	349.3	7.5	24.3	7.38	22	
11/12/12		1218.5	4.4	22.4	---	7.3	26.3	---	---	
13/12/12		1266.5	3.8	22.5	---	7.0	27.7	---	---	
15/12/12		1314.5	3.7	22.2	---	6.5	24.5	---	---	
18/12/12		572	1386.5	3.3	22.1	453.8	6.5	21.8	12.48	21
21/12/12			1457.5	3.2	21.8	491.7	6.9	23.5	10.24	21
22/12/12	1482.5		3.0	22.5	---	6.6	23.4	---	---	
26/12/12	1579.5		3.3	23.3	---	6.2	23.7	---	---	
28/12/12	1627.5		3.0	23.6	452.3	6.6	24.9	6.23	23	
29/12/12	1650.5		3.1	24.0	---	6.5	26.0	---	---	
03/01/13	1770.5		3.2	22.6	400.1	6.1	24.5	7.71	21	

Tabla 5.8: Parámetros de control en el biofiltro percolador durante la fase de evaluación

Fecha	Flujo de ingreso (m ³ .h ⁻¹)	Horas de operación	Lixiviado (B1)			Medio de filtración (B2)			
			pH	T (°C)	SO ₄ (mg.L ⁻¹)	pH	T (°C)	SO ₄ (mg.L ⁻¹)	Humedad (%)
05/01/13	572	1818	3.0	21.8	---	5.8	22.5	---	---
08/01/13		1891	2.7	23.4	503	6.1	24.5	5.45	24
10/01/13		1940	2.8	23.6	508	6.1	26.7	11.6	---
12/01/13		1987	3.0	24.5	---	5.8	26.4	---	25
14/01/13		2036.5	2.8	24.5	---	5.7	26.8	---	25
17/01/13		2107	2.9	23.3	453.5	5.8	24.4	7.09	23
19/01/13		2156	2.8	26.1	---	6.4	27.5	---	---
21/01/13		2202.5	2.8	23.2	---	5.9	25.2	---	---
24/01/13		662	2275.5	2.7	23.5	486.6	5.8	25.6	6.40
26/01/13	2347		2.9	24.3	---	6.4	27.2	---	---
29/01/13	2420		2.8	24.8	478.5	6.4	26.2	6.60	25
01/02/13	2491.5		2.8	24.2	---	6.2	27.3	---	---
02/02/13	2518.5		2.7	25.3	---	6.6	30.6	---	---
05/02/13	2586.5		2.8	24.4	505.2	6.1	28.2	25.6	20
08/02/13	2658.5		2.8	24.2	---	6.4	26.5	---	---
09/02/13	2684.5		2.7	25.5	---	6.4	26.6	---	---
12/02/13	2755.5		2.9	24.9	398.1	6.3	26.8	8.63	20
15/02/13	862	2827.5	2.8	24.6	394.8	6.7	26.5	5.48	23
16/02/13		2852.5	2.7	25.2	---	6.6	29.1	---	---
19/02/13		2924.5	2.8	23.9	---	6.9	26.2	---	25
22/02/13		2995	2.7	23.5	363.9	6.1	27.4	11.33	---
23/02/13		3021	2.7	25.0	---	5.8	28.3	---	---
26/02/13		3092.5	2.6	25.5	371.6	6.3	27.7	8.89	24
01/03/13		3164.5	2.8	24.5	355.9	6.3	24.8	6.20	23
02/03/13		3188	2.7	24.4	---	6.7	25.0	---	---
05/03/13		3261	2.9	24.3	---	6.6	25.4	---	---
06/03/13		3283	3.0	23.7	379.4	6.1	26.3	10.45	---
08/03/13		3332.5	2.8	24.4	---	6.0	24.8	---	23
10/03/13	3379.5	2.8	24.6	---	6.3	24.9	---	---	

5.3.8 Remoción de otros compuestos olorosos

El 21 de Enero de 2013 (Día 92) en horas de la mañana se realizó el muestreo y llenado de las bolsas de polipropileno con los gases del flujo de ingreso y el aire purificado del biofiltro percolador. Las muestras de gases fueron enviadas via aérea hacia el Laboratorio Mayfly en Connecticut, Estados Unidos donde el 24 de Enero de 2013 se realizaron los análisis e identificación de Compuestos de Azufre Volátiles y COV.

La toma de muestras de gases se realizó cuando el biofiltro percolador operó con un flujo de ingreso de $572 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ y un tiempo de contacto de gas de 12.8 segundos, con la finalidad de conocer la eficiencia de remoción de otros compuestos olorosos para las condiciones de diseño.

En la tabla 5.9 se muestra un resumen de los principales compuestos olorosos identificados y la eficiencia de remoción en el biofiltro percolador. La lista completa de todos los COV se indican en el anexo 8.6.

Tabla 5.9: Eficiencia de remoción de compuestos olorosos en el biofiltro percolador

Compuestos Orgánicos Volátiles	Ingreso (ppb)	Salida (ppb)	% Eficiencia de remoción
Compuestos aromáticos			
Benceno	23	24	0
Tolueno	134	66	50.74
Etil benceno	6.2	6.5	0
Xileno	10	6.9	41.0
Compuestos de nitrógeno			
Acetona	19	7.0	63.15
Hexano	8.1	2.4	70.37
Propanol	0.3	0.1	66.67

Tabla 5.9: Eficiencia de remoción de compuestos olorosos en el biofiltro percolador (Continuación)

Compuestos Orgánicos Volátiles	Ingreso (ppb)	Salida (ppb)	% Eficiencia de remoción
Compuestos de Azufre			
Sulfuro de hidrógeno	15,642	30	99.80
Metil mercaptano (MM)	1,313	9.6	99.27
Sulfuro de Dimetilo (DMS)	11	3.1	71.8
Disulfuro de carbono (CS ₂)	34	16	52.94
Disulfuro de Dimetilo (DMDS)	18	10	44.40
Trisulfuro de Dimetilo (DMTS)	48	1.1	97.70

De la tabla 5.9 se observa que el flujo de ingreso contenía compuestos de azufre volátiles típicos de las aguas residuales municipales, predominando el Sulfuro de hidrógeno y el Metil mercaptano mientras que otros compuestos se encontraron en muy bajas concentraciones. La eficiencia de remoción del Sulfuro de hidrógeno y Metil mercaptano en el biofiltro percolador fueron de 99.80% y 99.27% respectivamente (Figura 5.11)

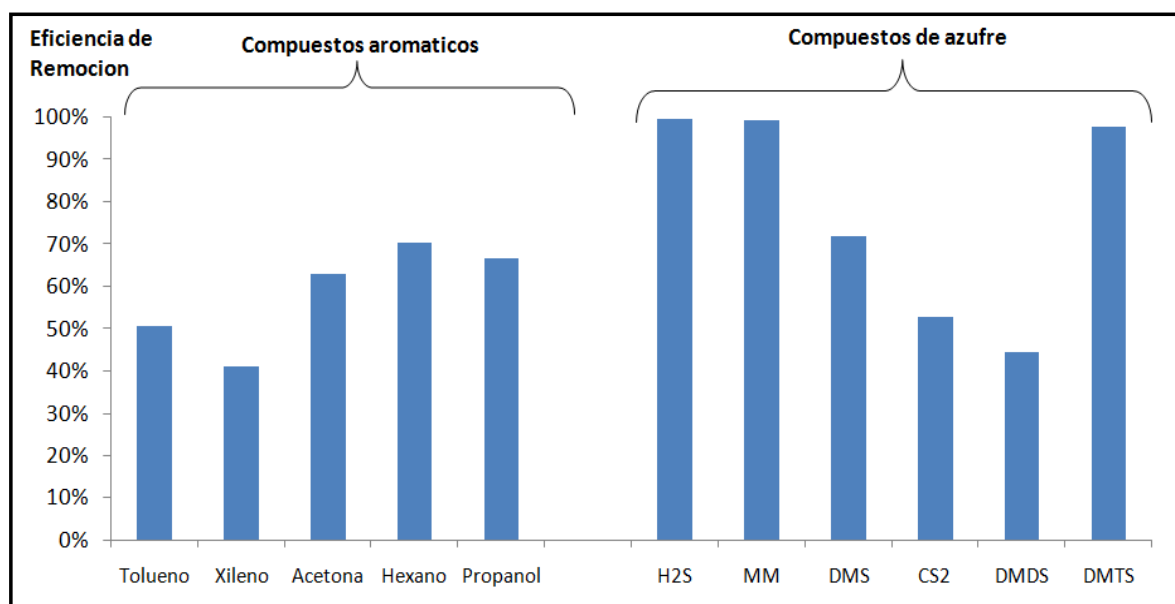


Figura 5.11: Eficiencia de remoción de Compuestos Orgánicos Volátiles en el biofiltro percolador

Por otro lado, los COV se encontraron en muy bajas concentraciones y no contribuyeron al problema de olores. A pesar que el biofiltro percolador no fue diseñado para remover COV, algunos compuestos como el Tolueno y Xileno fueron removidos en 50.74% y 41% respectivamente por las condiciones de operación, especialmente el EBCT de 12.8 segundos. Estos resultados coincidieron con las investigaciones de Torres ⁶⁶ que en un biofiltro percolador con media sintética y operando con un EBCT de 11 a 20 segundos se alcanzaron remociones de Tolueno de 50% a 74% y Xileno de 6% a 57%.

En cuanto al benceno, único compuesto regulado por nuestra legislación, en el flujo de ingreso se encontró en muy bajas concentraciones (23 ppb) y no fue removido en el biofiltro percolador.

5.3.9 Resumen de los parámetros de operación en la fase de evaluación

En la tabla 5.10 se muestra un resumen de los parámetros para las 4 condiciones de operación durante la fase de evaluación. De esta tabla se observa que la concentración promedio de H₂S en el flujo de ingreso varió entre 6.88 y 20.53 ppm. A pesar de las fluctuaciones de H₂S, la eficiencia de remoción en el biofiltro percolador varió en el rango de 99.40% a 99.92%.

En la última condición de operación, el flujo de ingreso se incrementó hasta un 150% del flujo de diseño; sin embargo esta situación no afectó considerablemente el desempeño del biofiltro ya que la carga másica promedio no superó en ningún momento la carga de diseño (20.15 g.m⁻³.h⁻¹). La carga másica máxima alcanzada durante la fase de evaluación representó el 51.60 % de la carga de diseño.

Tabla 5.10: Resumen de los parámetros de operación del biofiltro percolador durante la fase de evaluación

Parámetro	Unidad	Diseño	Condiciones de operación			
			Nº 01	Nº 02	Nº 03	Nº 04
Flujo de ingreso	m ³ .h ⁻¹	595.8	448	572	662	862
Tiempo de contacto de gas (EBCT)	s	12.25	16.3	12.8	11.0	8.5
Concentración de H ₂ S en el flujo de ingreso (promedio)	ppm	50	7.5 – 34.5	6.88 – 19.93	12.57 – 20.53	11.09 – 17.25
Carga másica de ingreso (promedio)	g.m ⁻³ .h ⁻¹	20.15	2.28 – 10.4	2.66 – 7.71	5.63 – 9.20	6.47 – 10.0
Concentración de H ₂ S en el aire purificado (promedio)	ppm	0.050	0.026 – 0.032	0.031 - 0.065	0.052 – 0.063	0.059 – 0.072
Eficiencia de remoción de H ₂ S	%	99.90	99.61 – 99.92	99.48 – 99.84	99.54 – 99.69	99.40 – 99.60
Carga Volumétrica	m ³ .m ⁻³ .min ⁻¹	4.90	3.68	4.70	5.44	7.08
Velocidad superficial	m.min ⁻¹	5.88	4.42	5.64	6.53	8.50

5.4 Costos de inversión, operación y mantenimiento

5.4.1 Costos de inversión

La inversión total del sistema de biofiltración en la estación de bombeo CBD 326-2 consideró los costos de ingeniería, fabricación, instalación mecánica así como los gastos de transporte marítimo del biofiltro, desaduanaje, transporte local y otros trabajos menores.

El costo de inversión del biofiltro percolador con capacidad de tratamiento de 595.8 m³.h⁻¹ (350 CFM) fue de USD 70,000 sin incluir impuestos. Este costo estuvo influenciado por el tipo y la

calidad de los materiales, la calidad de los equipos electromecánicos y el tablero eléctrico.

Adicionalmente, con esta información, se estimó que el costo unitario de inversión del biofiltro percolador fue USD 117 por cada $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ de aire purificado. Los costos de inversión reportados por diversos investigadores son muy variables. Van Lith et al ⁷⁰ reportó que los costos unitarios de inversión varían entre USD 5.0 y 150 por cada $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ y dependen del flujo de ingreso, la carga de contaminantes, el tipo de media de filtración y los materiales de construcción del biofiltro.

El costo unitario calculado permite una rápida estimación de la inversión requerida para la implementación de esta tecnología de control de olores en otras aplicaciones o proyectos similares.

5.4.2 Costos de operación y mantenimiento

El costo mensual de operación y mantenimiento se calculó para el funcionamiento continuo del biofiltro percolador y consideró los costos de los insumos como agua potable, nutrientes, energía eléctrica y personal para la labor de mantenimiento (Tabla 5.11)

El precio unitario de los servicios de energía eléctrica y agua potable correspondió de las tarifas establecidas por las Empresas Prestadoras de estos servicios en Lima, mientras que el costo de los insumos fue determinado según los precios de mercado. Respecto al mantenimiento, este costo correspondió a la labor del personal que estuvo a cargo de la operación diaria del biofiltro y que realizó el mantenimiento de los equipos mecánicos según la frecuencia recomendada por el fabricante.

Tabla 5.11: Costo de operación y mantenimiento del biofiltro percolador en la estación de bombeo CBD 326-2

1.0	Insumo	Caudal de agua (GPM)	Consumo mensual (m ³) ^a	Precio unitario (USD/m ³) ^b	Costo mensual (USD)
1.1	Agua potable	6.0	98.11	0.529	51.90
	Insumo	Fertilizante líquido (Galones) ^c	Consumo mensual (litros)	Precio unitario (USD/litro)	Costo mensual (USD)
1.2	Solución de nutrientes	0.25	0.95	6.0	5.68
2.0	Energía eléctrica	Demanda (Kw)	Consumo mensual (Kwh)	Precio unitario (USD/Kwh) ^e	Costo mensual (USD)
2.1	Extractor de aire	2.64	1,904.22	0.08	152.34
2.2	Bomba dosificadora de nutrientes ^d	0.05	3.60	0.08	0.288
2.3	Válvula solenoide ^d	0.006	0.44	0.08	0.035
3.0	Personal	Cantidad	Horas mensual (HH)	Precio unitario (USD/HH)	Costo mensual (USD)
3.1	Técnico/operador ^f	1	12	6	72

Costo total O&M (USD/mes)	282.24
Flujo de diseño (m³.h⁻¹)	595.8
Flujo de diseño (m³/mes)	428,976
Costo unitario O&M (USD/ 1,000 m³ de aire purificado)	0.658

Notas:

- Los ciclos de irrigación fueron intermitentes con un tiempo de 4,320 minutos por mes.
- La tarifa de agua utilizada fue tipo social e incluyó el costo del servicio de alcantarillado.
- La solución de nutrientes se preparó una vez por mes, utilizando 0.25 galones de fertilizante líquido y 15.75 galones de agua potable.
- La bomba dosificadora y válvula solenoide operaron solo durante los ciclos de irrigación.
- La tarifa de energía eléctrica es tipo MT3 (Luz del Sur) e incluyó el costo en horas punta.
- El sueldo mensual de un operador correspondió a 3,500 soles sin incluir beneficios sociales.
- El tipo de cambio utilizado fue de 1 USD = 2.8 soles.

De la tabla anterior se observa que el costo de operación mensual fue de USD 282.24 sin incluir impuestos, mientras que el costo unitario correspondió a USD 0.658 por cada 1,000 m³ de aire purificado. Este valor se encontró en el rango reportado por Deshusses y Cox que indica que el costo unitario para biofiltros percoladores varía entre USD 0.5 y USD 1.5 por 1,000 m³ de aire purificado sin incluir la inversión y amortización¹⁶. Asimismo, Ottengraf reportó costos unitarios de operación de USD 0.25 a USD 1.25 por 1,000 m³ de aire purificado en biofiltros instalados en plantas de tratamiento de aguas residuales en Holanda ⁵².

En la tabla 5.12 se muestra la distribución de los costos de operación y mantenimiento. De esta tabla se observa que la energía eléctrica representó el 54% del costo de O&M; además en el cálculo no se incluyó los costos por el control del crecimiento excesivo de la biomasa en la media de filtración y la amortización.

Tabla 5.12: Distribución de los costos de operación y mantenimiento en el biofiltro percolador

Ítem	Descripción	Costo mensual (USD)	% de distribución
1	Agua potable y nutrientes	57.58	20.40
2	Energía eléctrica	152.66	54.09
3	Personal	72.00	25.51
4	Control de la biomasa	0	0
5	Amortización	0	0
	TOTAL (USD)	282.24	100%

Finalmente, en el cálculo del costo de O&M no se consideró el precio de la media de filtración debido a que se estima su reemplazo cada 8 años si el biofiltro opera en las condiciones normales de diseño. La arcilla expandida tiene un precio aproximado de USD 3,800 (sin incluir impuestos) y deberá ser agregado al costo mensual en el período correspondiente.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- En los gases generados en la estación de bombeo CBD 326-2 se verificó que los compuestos de azufre predominantes fueron el Sulfuro de Hidrógeno y el Metil mercaptano.
- El ingreso frecuente de desagües proveniente de otras estaciones de bombeo originaron que las concentraciones diarias de H₂S en el flujo de aire al biofiltro percolador oscilarán entre 1.2 y 181 ppm.
- Las concentraciones promedio de H₂S en el flujo de ingreso al biofiltro percolador variaron entre 6.88 y 34.5 ppm y no se alcanzó la concentración promedio de diseño (50 ppm).
- En la fase de puesta en marcha, el biofiltro percolador operó con un flujo de aire de 381 m³.h⁻¹ (64% del flujo de diseño), carga másicas promedio entre 2.13 y 5.42 g.m⁻³.h⁻¹ y un tiempo de contacto de gas de 19.2 segundos, logrando la estabilización del proceso después de 26 días.
- En la fase de evaluación, el biofiltro percolador operó con flujos de ingreso entre 448 y 862 m³.h⁻¹, tiempos de contacto de gas entre 8.5 y 16.3 segundos y una carga másica máxima de 10.40 g.m⁻³.h⁻¹, alcanzando eficiencias de remoción de H₂S entre 99.40% y 99.92%.
- La reducción del tiempo de contacto de gas a 8.5 segundos originó un aumento en la concentración promedio de H₂S en el aire purificado de 0.052 a 0.072 ppm.
- La operación del biofiltro percolador con flujos de aire entre 572 a 662 m³.h⁻¹ y tiempo de contacto de gas de 11 a 12.8 segundos alcanzó una remoción estable de H₂S de 99.66% ± 0.18, independiente de las variaciones en la concentración de ingreso.
- Durante la fase de evaluación, la concentraciones promedio de H₂S en el flujo de aire purificado varió entre 0.026 y 0.072 ppm, cumpliendo con el límite permisible de 0.1 ppm recomendado por la Organización Mundial de la Salud.

- La operación del biofiltro percolador con un tiempo de contacto de gas de 12.5 segundos permitió la remoción de algunos Compuestos Orgánicos Volátiles como el Tolueno y Xileno, alcanzando eficiencias de 50.74% y 41% respectivamente.
- La arcilla expandida es un material poroso con alta capacidad de absorción de agua y resistencia a los ácidos lo cual permitió alcanzar una eficiencia de remoción de H_2S entre 99.4 y 99.7%.
- La irrigación de la media de filtración se realizó en forma intermitente, con un caudal de agua potable de 6 a 7 GPM lo que permitió mantener una humedad entre 23% y 25%.
- La capacidad de eliminación máxima del biofiltro percolador no fue determinada debido a que las cargas máxicas de H_2S no alcanzaron el valor de diseño de $20.15 \text{ g.m}^{-3}.\text{h}^{-1}$.
- El pH entre 2.5 y 3.0 en el lixiviado estuvieron correlacionados con las altas eficiencia de remoción de H_2S ($> 99.40\%$) que se alcanzaron en el biofiltro percolador.
- Las concentraciones máxicas de sulfatos en el lixiviado variaron entre 398.1 y 508 mg.L^{-1} y se produjeron cuando el biofiltro percolador operó con cargas máxicas de H_2S entre 5.63 y 9.20 $\text{g.m}^{-3}.\text{h}^{-1}$.
- Las concentraciones de sulfatos en la sección superior de la media de filtración variaron entre 5.48 y 60.37 mg.L^{-1} debido a que la irrigación evitó una acumulación excesiva que inhiba la actividad biológica.
- El costo de inversión unitario del biofiltro percolador correspondió a USD 117 por cada $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ de aire purificado.
- El costo mensual de operación y mantenimiento del biofiltro percolador operando con un flujo de aire de 585 $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ fue de USD 282.24.
- El costo unitario de operación y mantenimiento fue de USD 0.658 por cada 1,000 m^3 de aire purificado.
- El consumo de energía eléctrica representó el 54% de los costos de operación y mantenimiento, correspondiendo, casi en su totalidad, al funcionamiento del extractor centrífugo.

6.2 Recomendaciones

- El biofiltro percolador debe estar equipado con dispositivos que permitan regular el flujo de ingreso de aire y la irrigación de la media de filtración según los parámetros de operación deseado.
- La puesta en marcha de un biofiltro percolador puede realizarse sin inoculación lo cual permite que los microorganismos que contiene el flujo de aire se adapten a las condiciones ambientales y a los contaminantes a degradar.
- Los analizadores portátiles de H₂S deben calibrarse según la frecuencia recomendada por el fabricante para evitar el registro de datos erróneos.
- La capacidad de eliminación máxima deberá determinarse cuando el biofiltro percolador opere con cargas máxicas de H₂S superiores a 20.5 g.m⁻³.h⁻¹ y tiempos de contacto de gas entre 8.5 y 12 segundos.
- El contenido de humedad en la arcilla expandida deberá realizarse en los meses de verano e invierno para verificar si el caudal de agua aplicado es insuficiente o excesivo.
- El monitoreo de los parámetros de pH, sulfatos, temperatura y humedad son importantes en el control del proceso biológico para realizar los ajustes necesarios y alcanzar una alta remoción de H₂S.
- El personal de operación debe realizar el mantenimiento de los equipos electromecánicos del biofiltro percolador según la frecuencia recomendada por el fabricante para garantizar el funcionamiento continuo del sistema.
- El programa de evaluación del biofiltro percolador deberá repetirse al quinto año de funcionamiento de la estación de bombeo para verificar y/o ajustar los parámetros de operación.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Allen, E.; Yang, Y. (1994). "Biofiltration control of hydrogen sulfide. Design and operational parameters". *Journal Air & Waste Management Association* N° 44, 863-868 pp.
2. Allen, E.; Yang, Y. (1994). "Biofiltration control of hydrogen sulfide. Kinetics, biofilter performance and maintenance". *Journal Air & Waste Management Association* N° 44, 1315-1321 pp.
3. American Public Health Association; American Water Works Association, Water Environment Federation (1998). "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater". 20th Edition. Washington, 1100 pp.
4. Arizona Instrument LLC (2011). "Operation manual Jerome 860 hydrogen sulfide monitor". USA, 30 pp.
5. Autoridad Nacional del Ambiente (2006). "Anteproyecto de Normas para el Control de Olores Molestos". República de Panamá, 29 pp.
6. Bielefeldt, A. (2001). "Activated sludge and suspended growth bioreactors. In: Bioreactors for waste gas treatment. Kluwer, Dordrecht, 215–254 pp.
7. Bohn, H. (1992). "Consider biofiltration for decontaminating gases". *Chemical Engineering Progress* Vol. 88, 34-40 pp.
8. Boswell, J.; John, P. et al (2006). "Design, construction, installation and operation of compact bio-oxidation system to manage odors at the city of Wilsonville WWTP". Water Environment Foundation, USA, 8 pp.
9. Cadena, F.; Peters, R. (1988). "Evaluation of chemical oxidizers for hydrogen sulphide control". *Journal Water Pollution Control Federation* Vol. 60, 1259–1263 pp.
10. Cárdenas-González, B.; Ergas, S. (1999). "Evaluation of full-scale biofilter media performance". *Environmental Program* Vol. 18, 205–211 pp.
11. Consorcio Real (2008). Expediente Técnico del proyecto "Ampliación y Mejoramiento de los Sistemas de Agua Potable y Alcantarillado para el Esquema 7mo, 9no y 10mo Sector de Villa El Salvador"
12. Corona, M. (2008). "Legislación sobre olores en Chile". Universidad de Sevilla, España. 9 pp.
13. Cox, H.; Deshusses, M. (1998). "Biological waste air treatment in biotrickling filters". University of California. *Journal Biotechnology* Vol. 9, 256-262 pp.

14. Deshusses, M.; Cox, H. (2002). "Co-treatment of H₂S and toluene in a biotrickling filter". Chemical Engineering Journal N° 87. 101-110 pp.
15. Deshusses, M.; Cox, H. (2003). "Biotrickling filters for air pollution control". University of California, USA, 16 pp.
16. Deshusses, M.; Cox, H. et al. (2001). "Combined Sulfide and VOC Removal Using Vapor-Phase Bioreactors". University of California, 130 pp.
17. Deshusses, M. (1997). "Biological waste air treatment in biofilters". University of California. Biotechnology Vol. 7, 335-339 pp.
18. Devanny, J.; Deshusses, M.; Webster, T. (1999). "Biofiltration for air pollution control". Lewis Publishers, 299 pp.
19. Environmental Protection Agency (1985). "Design manual: Odor and corrosion control in sanitary sewerage system and treatment plant". Cincinnati, USA, 132 pp.
20. Environmental Protection Agency (2007). SW-846 "Test methods for evaluating solid waste/physical/chemical methods". USA, 3500 pp.
21. Environmental Protection Agency (1999). Compendium Method TO-15 "Determination of volatile organic compounds (VOCs) in air collected in especially-prepared canister and analyzed by gas chromatography/mass spectrometry". USA, 67 pp.
22. Environmental Protection Agency (2007). "CFR -Title 40 – Protection of Environment. Chapter I, Subchapter C – Air program. Appendix A – 1 Part 60: Sample and Velocity Traverses for Stationary Sources". USA, 4 - 11 pp.
23. Environmental Protection Agency (2007). "CFR -Title 40 – Protection of Environment. Chapter I, Subchapter C – Air program. Appendix A – 6 Part 60: Method 15 and 16. USA, 918-1033 pp.
24. Environmental Protection Agency (1993). "Report to Congress on hydrogen sulfide air emissions associated with the extraction of oil and natural gas". Office of Air Quality Planning and Standards.
25. Gabriel, D.; Deshusses, M. (2003). "Performance of a full-scale biotrickling filter treating H₂S at a gas contact time of 1.6 to 2.2 seconds". Environmental Progress Vol. 22, N° 2, 8 pp.
26. Govind, R.; Narayan, S. (2005). "Selection of bioreactor media for odor control". University of Cincinnati, 37 pp.

27. Govind, R. (2004). "Biotreatment of Odors and Volatile Compound Emissions from Wastewater Treatment Plants". University of Cincinnati, 23 pp.
28. International Water Association (2001). "Odours in wastewater treatment: Measurement, modeling and control". IWA Publishing, London, 435 pp.
29. Interscan Corporation (2011). "Instruction manual 4000 series digital portable analyzer". USA, 28 pp.
30. Iranpour, R.; Deshusses, M. (2005). "Literature review of air pollution control biofilters and biotrickling filters for odor and volatile organic compound removal". Journal Environmental Progress Vol. 24, N° 3, 254-267 pp.
31. Kraakman, N. et al (1998). "Biological treatment of waste gases containing H₂S in combination with either odor or CS₂". Conference of biofiltration USC-TRG, Los Angeles, 91-98 pp.
32. Kennes, C.; Veiga, M. (2001). "Bioreactors for waste gas treatment". Kluwer, Dordrecht, 47-98 pp.
33. Kim, S.; Deshusses, M. (2005). "Understanding the limits of H₂S degrading biotrickling filters using a differential biotrickling filter". University of California. Chemical Engineering Journal N° 113, 119-126 pp.
34. Kuenen, J. (1975). "Colorless sulphur bacteria and their role in sulphur cycle". Plant Soil N° 43, 49-76 pp.
35. Lappin-Scott et al (1995). "Microbial biofilms". Annual Revision Microbiology N° 49, 711–745 pp.
36. Lazarova, V.; Manem, J. (1995). "Biofilm characterization and activity analysis" in water and wastewater treatment. Water Research Vol. 29, 2227–2245 pp.
37. Leson, G.; Winer, A. (1991). "Biofiltration: an innovative air pollution control technology for VOC emissions". Journal Air & Waste Management Association N° 8, 1045–1054 pp.
38. Logue, C.; Kowalski, D. (1994). "Compost biofilter: A decade of trial and error in implementation of an innovative odor control technology". Water Environmental Federation Conference in Jacksonville, Florida.
39. Metcalf & Eddy (2003). "Wastewater Engineering: treatment and reuse". Fourth Edition. McGraw Hill, USA, 1819 pp.
40. Ministerio del Medio Ambiente (2008). "Decreto Supremo N° 003-2008-MINAN". Lima, 4 pp.

41. Ministerio del Medio Ambiente (2009). "Decreto Supremo N° 011-2009-MINAM". Lima, 8 pp.
42. Ministerio de Salud (2011). "Reglamento de la calidad del agua para consumo humano". D.S. N° 031-2010-SA. Lima, 46 pp.
43. Ministerio de Salud (2003). "Decreto Supremo N° 009-2003-SA". Lima, 9 pp.
44. Ministerio de Salud (2005). "Decreto Supremo N° 012-2005-SA". Lima, 1 pp.
45. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2007). "Norma OS.090 - Plantas de tratamiento de aguas residuales". Lima, 54 pp.
46. Morales, M. et al (2003). "Effect of drying on biofilter performance: modeling and experimental approach". *Environmental Science Technology* Vol. 3, 985–992 pp.
47. Morgan-Sagastume, F. et al (2001). "Effects of biomass growth on gas pressure drop in biofilters". *Journal of Environmental Engineering* Vol. 127, 388–396pp.
48. National Fire Protection Association (1999). "NFPA 820 Standard for Fire protection in wastewater treatment and collection facilities". Massachusetts, USA, 68 pp.
49. Occupational Safety and Health Administration (2005). "Fact sheet hydrogen sulfide", USA, 2 pp.
50. Odintsova et al (1996). "Thermothrix azorensis sp. nov., an obligately chemolithoautotrophic, sulfur-oxidizing, thermophilic bacterium". *International Journal of Systematic Bacteriology* N° 46, 422-428 pp.
51. Ottengraf, S. (1986). "Exhaust gas purification". *Biotechnology* Vol. N° 8, Germany, 425-452 pp.
52. Ottengraf, S. (1987). "Biological system for waste gas elimination". Elsevier publications, Cambridge, Vol. 5, 132-136 pp.
53. Prescott, M. et al (2003). "Microbiology". 5th edition. New York, McGraw-Hill, 1236 pp.
54. Presidencia del Consejo de Ministros (2001). "Decreto Supremo N° 074-2001-PCM". Lima, 16 pp.
55. Rafferty, K.; Haecker, S.; Parker, R. (2004). "A coordinated approach to odor control in Collier County, Florida". 77th Annual Water Environment Federation Conference WEFTEC. New Orleans, USA, 12 pp.

56. Revah, S.; Morgan-Sagastume, F. (2005). "Methods of odor and VOC control". In *Biotechnology for Odor and Air Pollution Control*. Germany, 43 – 63 pp.
57. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2003). "Norma Oficial Mexicana NOM-021-REC NAT 2000: Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis". México, 85 pp.
58. Shareefdeen, Z. et al (2003). "Hydrogen Sulfide removal in synthetic media biofilters". *Environmental Progress* Vol. 22, No 3, 207-213 pp.
59. Shareefdeen, Z.; Singh, A. (2005). "Biotechnology for odor and air pollution control". Germany, 410 pp.
60. Siemens Water Technologies (2008). "Operation & Maintenance Manual of odor control for CODIMUVES project". California, 100 pp.
61. SKC Inc. (2001). "Operating instructions sample bags 232 series". USA, 4pp.
62. Smet, E., Van Langenhove, H. (1998). "Abatement of volatile organic sulfur compounds in odorous emissions from the bio-industry". *Journal Biodegradation* Vol. 09, 273–284 pp.
63. Stanier, R.; Ingraham, J.; Wheelis, M.; Painter, P. (1986). "The Microbial World". 5th Edition, Prentice-Hall, 896 pp.
64. Stapleton R. et al (1998). "Nucleic acid analytical approaches in bioremediation: site assessment and characterization". *Journal microbiological Methods* N° 32, 165–178 pp.
65. Syed, M.; Soreanu, G. et al (2006). "Removal of hydrogen sulfide from gas streams using biological processes - A review". *Wastewater Technology Centre Environment Canada, Ontario*, 14pp.
66. Torres, E. et al (1996). "Evaluation of two biotechnologies controlling POTW air emissions". *Proceeding of 1996 USC-TRG Conference on Biofiltration*. Los Angeles, 107-114 pp.
67. Van Durme, G. (2001). "New Vapor-Phase treatment Technologies". *Proceeding of the 74th Annual Water Environment Federation Technical Exposition and Conference*. Atlanta, Georgia.
68. Van Durme, G. et al (2003). "Odor and VOC removal in a biotrickling filter system at Hyperion". *Proceeding of 76th Annual Water Environment Federation Technical Exposition and Conference*. Los Angeles, California.

69. Van Lith, C.; David, S. (1990). "Design criteria for biofilters". ClairTech, Utrecht, Netherlands Institution of Chemical Engineers Symposium N° 116, 127–132 pp.
70. Van Lith, C.; Leson, G. (1996). "Evaluating design options for biofilters". Conference of Biofiltration USC: an Air Pollution Control Technology. Los Angeles, 77–84 pp.
71. Von Rohr, R.; Ruediger, P. (2001). "Rotating biological contactors" In Bioreactors for waste gas treatment. Kluwer, Dordrecht, 201–214 pp.
72. Wani, A. et al (1997). "Biofiltration: a promising and cost effective control technology for odors, VOCs and air toxics". Journal of Environmental Science and Health A32, 2027–2055 pp.
73. Wanner, O.; Gujer, W. (1984). "Competition in biofilms". Water Science Technology Vol.17, 27– 44 pp.
74. Water Environment Federation (2004). "Control of odors and emissions from wastewater treatment plants". Manual of practice N° 25. Alexandria, 537 pp.
75. Water Environment Federation (1995). "Odor control in wastewater treatment plant". Manual of practice N° 22. Alexandria, 282 pp.
76. Weber, F.; Hartmans, S. (1996). "Prevention of clogging in a biological trickle bed reactor removing toluene from contaminated air". Biotechnology Bioengineering N° 50, 91–97 pp.
77. Williams, T.; Miller, F. (1992). "Biofilters and facility operations". Journal Biocycle N° 33, 75–79 pp.
78. World Health Organization (2003). "Hydrogen sulfide: human health aspect". Geneva, 41 pp.

8. ANEXOS

8.1 Normas Nacionales de calidad del aire

DECRETO SUPREMO N° 003-2008-MINAM ESTANDARES DE CALIDAD AMBIENTAL PARA AIRE

Tabla 01: Estándar de Calidad Ambiental para el Dióxido de azufre SO₂

Parámetro	Período	Valor ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	Vigencia	Formato	Método de análisis
Dióxido de azufre (SO ₂)	24 horas	80	1 de enero de 2009	Media aritmética	Fluorescencia UV (Método automático)
	24 horas	20	1 de enero de 2014		

Tabla 02: Estándar de calidad ambiental para Compuestos Orgánicos Volátiles, Hidrocarburos Totales (HT) y Material Particulado (PM_{2,5})

Parámetro	Periodo	Valor	Vigencia	Formato	Método de análisis
Benceno ¹	Anual	4 $\mu\text{g.m}^{-3}$	1 de enero de 2010	Media aritmética	Cromatografía de gases
		2 $\mu\text{g.m}^{-3}$	1 de enero de 2014		
Hidrocarburos Totales (HT) expresado como hexano	24 horas	100 mg.m^{-3}	1 de enero de 2010	Media aritmética	Ionización de la llama de hidrógeno
Material Particulado con diámetro menor a 2,5 micras (PM _{2,5})	24 horas	50 $\mu\text{g.m}^{-3}$	1 de enero de 2010	Media aritmética	Separación inercial filtración (Gravimetría)
	24 horas	25 $\mu\text{g.m}^{-3}$	1 de enero de 2014	Media aritmética	
Hidrógeno Sulfurado (H ₂ S)	24 horas	150 $\mu\text{g.m}^{-3}$	1 de enero de 2009	Media aritmética	Fluorescencia UV (Método automático)

1. Único Compuesto Orgánico Volátil (VOC) regulado

8.1 Normas Nacionales de calidad de aire (*continuación*)

DECRETO SUPREMO N° 012-2005-SA
REGLAMENTO DE LOS NIVELES DE ESTADOS DE ALERTA
NACIONALES PARA CONTAMINANTES DEL AIRE

Tipo de alerta	Material particulado (PM ₁₀)	Dióxido de azufre (SO ₂)	Monóxido de carbono (CO)	Sulfuro de Hidrógeno (H ₂ S)
Cuidado	> 250 µg.m ⁻³ prom. aritmético 24 horas	> 500 µg.m ⁻³ prom. móvil 3 horas	> 15,000 µg.m ⁻³ prom. móvil 8 horas	> 1,500 µg.m ⁻³ prom. aritmético 24 horas
Peligro	> 350 µg.m ⁻³ prom. aritmético 24 horas	> 1,500 µg.m ⁻³ prom. móvil 3 horas	> 20,000 µg.m ⁻³ prom. móvil 8 horas	> 3,000 µg.m ⁻³ prom. aritmético 24 horas
Emergencia	> 420 µg.m ⁻³ prom. aritmético 24 horas	> 2,500 µg.m ⁻³ prom. móvil 3 horas	> 35,000 µg.m ⁻³ prom. móvil 8 horas	> 5,000 µg.m ⁻³ prom. aritmético 24 horas

DECRETO SUPREMO N° 011-2009-MINAM
LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES PARA LAS EMISIONES DE LA
INDUSTRIAS DE HARINA Y ACEITE DE PESCADO Y HARINA DE
RESIDUOS HIDROBIOLOGICOS

Contaminante	Concentración (mg.m ⁻³)
	Plantas existentes, las instalaciones nuevas, las que se reubiquen y del traslado físico
Sulfuro de hidrógeno, sulfuros	5
Material particulado (MP)	150

8.1 Normas Nacionales de calidad de aire (continuación)

DECRETO SUPREMO Nº 014-2010-MINAM
LIMITES PERMISIBLES PARA LAS EMISIONES GASEOSAS Y DE
PARTICULAS DE LAS ACTIVIDADES DEL SUBSECTOR
HIDROCARBUROS

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE EMISIONES GASEOSAS Y DE PARTÍCULAS
PARA ACTIVIDADES DE HIDROCARBUROS EN CURSO

PARÁMETRO REGULADO	ACTIVIDADES DE PROCESAMIENTO Y REFINACIÓN DE PETRÓLEO		ACTIVIDADES DE EXPLOTACIÓN	
	Concentración en cualquier momento mg/m ³	Concentración Media Aritmética Anual mg/m ³	Concentración en cualquier momento mg/m ³	Concentración Media Aritmética Anual mg/m ³
Dióxido de Azufre (SO ₂)	2 500	2 000	1 200	1 000
Óxidos de Nitrógeno (NOx)	550	500	550	500
Partículas para Craqueo Catalítico(1)	400	300	---	---
Partículas para otros casos	150	100	150	100
Monóxido de Carbono (CO) para Craqueo Catalítico	2 000	1 500	---	---

Nota: Los valores están expresados a 25°C, 1 atmósfera de presión, base seca, y 11% de oxígeno.
 (1) Aplica siempre y cuando el promedio anual de la descarga de partículas sea inferior a 750 kg/día. En caso contrario se considerará el valor de partículas para otros casos.

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE EMISIONES GASEOSAS Y DE PARTÍCULAS
EN ACTIVIDADES O INSTALACIONES DE HIDROCARBUROS NUEVAS

PARÁMETRO REGULADO	Concentración en cualquier momento	
	Explotación en Tierra mg/Nm ³	ACTIVIDADES DE PROCESAMIENTO Y REFINACIÓN DE PETRÓLEO mg/Nm ³
Material Particulado (PM)	50	50
Compuestos Orgánicos Volátiles, incluyendo benceno (COV)	20	20
Sulfuro de Hidrógeno (H ₂ S)	30	10
Óxidos de Azufre (para producción de petróleo) (SOx)	1 000	---
Unidades de recuperación de azufre	---	150
Otras unidades	---	500
Óxidos de Nitrógeno (NOx)	---	450
Usando gas como combustible	320 (o 86 ng/J)	
Usando petróleo como combustible	460 (o 130 ng/J)	
Niquel (Ni)		1
Vanadio (v)		5
Olor	No molesto en el punto receptor	

Leyenda:
 mg/Nm³ miligramos/Normal metro cúbico (0°C y 1 atmósfera y base seca y 3% de exceso de oxígeno)
 ng/J nanogramos/joule

8.2 Parámetros físico-químicos del afluente a la estación de bombeo CBD 326-2

LABORATORIO DE MEDIO AMBIENTE



INFORME DE ENSAYO N° MA13010013

Nombre del Cliente : IMADI S.R.L.
Domicilio Legal : AV. MRCAL BENAVIDES NRO. 1385 - SAN VICENTE DE CAÑITE
Solicitado Por : Javier Grimaldo
Referencia : CBD 326-2 VILLA EL SALVADOR

DATOS DE LA MUESTRA

Procedencia	CAMARA HUMEDA	Fecha de Muestreo	: 03/01/2013
Plan de Muestreo	Realizado por el Cliente	Fecha de Recepción	: 03/01/2013
Cantidad de Muestras	: 1	Fecha Inicia Ensayo	: 03/01/2013
Condición de la Muestra	En buen estado de conservación y preservación		

MÉTODOS DE ENSAYO

Parámetros	Método
Acidez y grasas	SM 5520-B
Alcalinidad total	SM 5220-B
Oxígeno Biológico de Oxígeno	SM 5210-B
Oxígeno Químico de Oxígeno	SM 5220-D
Fósforo total	SM 4500-P-E
Nitritos totales (N ₂ O)	SPW 4500-7 (1994)
Nitrógeno Amomiacal	SM 4500-NH ₂ -C
Nitrógeno total	SM 4500-N _{tot} -D
Sólidos Disueltos Totales	SM 2540-D
Sólidos Suspensos Totales	SM 2540-C
Sulfatos	SPW 4500 (1995)
Temperatura*	SM 2550-B
pH*	SM 4531 H+ B

*Parámetros medidos en campo.

SM: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater APHA, AWWA, WEF 21st Ed. 2005, EPA: U.S. Environmental Protection Agency, Methods for Organic Analysis of Water and Wastes.


© 2012 J. Ramon Quality Control Culture. Todos los derechos reservados. No se permite la reproducción o el uso no autorizado de esta información sin el consentimiento escrito de J. Ramon Quality Control Culture.

www.jramoncorp.com

Oficina Administrativa: Paseo de la República 378C, San Pedro.
Laboratorio: Calle Zaragoza 337, Mochales

8.2 Parámetros físico-químicos del afluente a la estación de bombeo CBD 326-2 (Continuación)

LABORATORIO DE MEDIO AMBIENTE



J. Ramon
Quality Control Culture


INFORME DE ENSAYO N° MA13010013

Parámetro	Unidad	Coef. Cliente	C.H.
		Coef. Lab	1218876
		Tipo de Prueba	
		U.O.	Resultado
Aceites y grasas	mg/l	1	90
Alcalinidad total	mg/L-CaCO ₃	1	178
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	2	452.3
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	8	842.4
Ferros total	mg/L	0.01	21.17
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	0.02	45.3
Nitrógeno total	mg/L	1	49
Sólidos Suspendedos Totales	mg/L	3	313
Sólidos Suspendedos Volátiles	mg/L	3	408.9
Sulfato	mg/L	0.106	91.14
Temperatura	°C	0.01	21.78
pH	-	0.1	7.50

Legenda: L.D = Límite de detección - = No analizado


Tiempo de Retención del Muestra		
A 1044 - N.703 - 1day	Acididad Total: 14.0mg	AlS DQ0.50, 289mg
ICP - 200mg		DQ0, 489mg

Medanos, 11 de Enero del 2012


Milagros Ramírez Arroyo
 Jefe de Operaciones Medio Ambiente
 CDP 489

1. El presente informe sólo es válido para el uso de diagnóstico de la empresa.
 2. Este informe es propiedad de J. Ramon Quality Control Culture y no debe ser reproducido o utilizado para fines comerciales sin el consentimiento escrito de J. Ramon Quality Control Culture.
 3. El presente informe es válido por un periodo de 90 días desde la fecha de emisión del mismo. Después de este periodo, el cliente debe pagar un costo adicional para la revalidación del mismo.

www.jramoncdp.com



Oficina Administrativa, Paseo de la República 5780, San Isidro
 Laboratorio, Calle Domingo Elías 331, Medanos

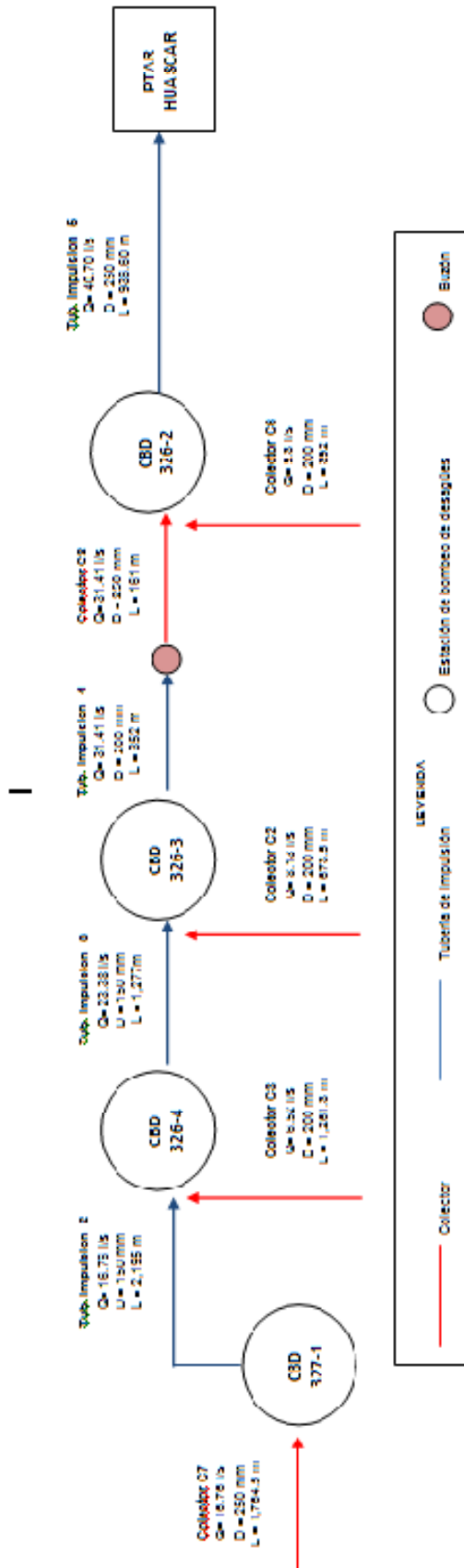
8.3 Predicción de la concentración de H₂S en las emisiones de la estación de bombeo CBD 326-2

El proyecto Ampliación y Mejoramiento de los Sistemas de Agua Potable y Alcantarillado para los Esquemas 7mo, 9no y 10mo Sector de Villa El Salvador - CODIMUVES” consistió en la instalación de 7 colectores y la construcción y equipamiento de 5 estaciones de Bombeo de desagües con sus respectivas tuberías de impulsión y rebose. Asimismo, las obras incluyeron la construcción de 2 reservorios de almacenamiento y la instalación de sus tuberías de aducción y rebose para complementar la infraestructura de agua potable existente en la zona.

En el diseño del sistema de alcantarillado se consideró que los colectores recolectan y transportan las aguas residuales generadas en áreas de drenaje específicas hacia las 5 estaciones de bombeo. Por las condiciones topográficas de la zona, los desagües son bombeados en forma secuencial hasta llegar a las plantas de tratamiento San Juan y Huáscar para su disposición final.

El sistema de alcantarillado se inicia con el colector N° 7 que transporta las aguas residuales hacia la Estación CBD 327-1 donde luego es bombeado hacia la Estación CBD 326-4. En esta estación se reúne con los desagües provenientes del colector N° 3 y luego son impulsados hacia la estación CBD 326-3 donde se reúne con el colector N° 2. La tubería de impulsión de estación descarga los desagües en el primer buzón del colector N° 08 para luego ser transportados por gravedad hasta la estación de bombeo CBD 326-2. Esta última estación también recibe los desagües provenientes del colector N° 6 que luego son impulsados hasta la Planta de tratamiento Huáscar para su disposición final (Figura 8.1).

Por otro lado, el colector N° 01 transporta los desagües hacia la estación de bombeo CBD 326-1 donde es impulsado y descargado al colector existente, ubicado en la Av. Pastor Sevilla. Este colector transporta las aguas residuales hacia la PTAR San Juan de Miraflores para su disposición final.



Parámetros de diseño de colectores por gravedad

Descripción	Caudal máx. Horario (l/s)	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Tirante agua (m)	Relación Y/D	Velocidad (m/s)	Pendiente (m/m)	Tiempo de tránsito (h)
Colector C7	18.75	1784.3	250	3.11	0.44	0.93	0.0043	0.527
Colector C3	6.52	1261.13	200	0.058	0.29	1.03	0.012	0.340
Colector C2	8.13	873.34	200	3.06	0.3	1.29	0.018	0.145
Colector C5	31.41	181	200	3.11	0.41	1.45	0.010	0.300
Colector C6	9.1	392	200	3.06	0.30	1.25	0.015	0.197

Parámetros de diseño de tuberías de impulsión

Descripción	Caudal de bombeo (l/s)	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Velocidad (m/s)	Tiempo de tránsito (h)
Tubo Impulsión L2	16.75	2195	150	0.94	0.64
Tubo Impulsión L3	33.36	1277	150	1.32	0.27
Tubo Impulsión L4	31.41	351	200	1.00	0.10
Tubo Impulsión L5	40.70	535.6	250	0.87	0.31

Figura 8.1: Componentes del sistema de alcantarillado del proyecto CODIMUNES

8.3 Predicción de la concentración de H₂S en las emisiones de la estación de bombeo CBD 326-2

En las siguientes tablas se muestran los cálculos del balance de masas de DBO y concentración de sulfuro total en los colectores del sistema de alcantarillado.

Balance de masas de DBO₅ en el sistema de alcantarillado del proyecto CODIMUVES

Componente	Caudal (i) (l/s)	DBO (i) (mg/L)	Caudal (ii) (l/s)	DBO (ii) (mg/L)	DBO mezcla (mg/L)
CBD 326-2	31.4	456.52	9.3	350	432
Tub. Impulsión L4	23.38	482.43	8.13	380	456
Tub. Impulsión L3	16.76	521.68	6.52	380	482

Concentración de sulfuro total en los colectores del proyecto CODIMUVES

Parámetros	Símbolo	Colectores					Unidad
		Nº 02	Nº 03	Nº 06	Nº 07	Nº 08	
Diámetro tubería	D	0.2	0.2	0.2	0.25	0.25	m
Pendiente	S	0.018	0.0116	0.015	0.0043	0.01	m/m
Tirante de agua residual	Y	0.06	0.058	0.06	0.11	0.1	m
Velocidad del agua residual	V	1.29	1.03	1.25	0.88	1.48	m/s
Coef. De generación de sulfuro	M'	3.2x10 ⁻³	3.2x10 ⁻³	3.2x10 ⁻³	3.2x10 ⁻³	3.2x10 ⁻³	m/h
Coef. Por perdidas de sulfuro	m	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	---
Conc. Sulfuro total (inicial)	Si	0.3	0.3	0.3	0.3	5.96	mg/L
Demanda Bioquímica Oxígeno	DBO	350	380	350	380	456	mg/L
Temperatura del agua residual	T	22	22	22	22	22	°C
Tiempo de tránsito	t	0.145	0.34	0.087	0.527	0.03	horas
Perímetro mojado	P	0.231	0.22746	0.23	0.3626	0.347	m
Profundidad hidráulica	dm	0.07	0.06	0.06	0.11	0.10	m
Ancho de superficie	b	0.12	0.12	0.12	0.25	0.2	m
Conc. sulfuro límite	S(lim)	1.05	1.45	1.14	1.70	1.47	mg/L
Conc. sulfuro Total (final)	Sf	0.60	1.05	0.53	0.91	5.70	mg/L

8.3 Predicción de la concentración de H₂S en las emisiones de la estación de bombeo CBD 326-2 (Continuación)

En las siguientes tablas se muestra los cálculos de la concentración de sulfuro total en las tuberías de impulsión. Asimismo, en la figura 8.2 se muestra un diagrama con el balance de masas del sulfuro total y H₂S en el sistema de alcantarillado.

Concentración de Sulfuro total en las tuberías de impulsión del proyecto CODIMUVES

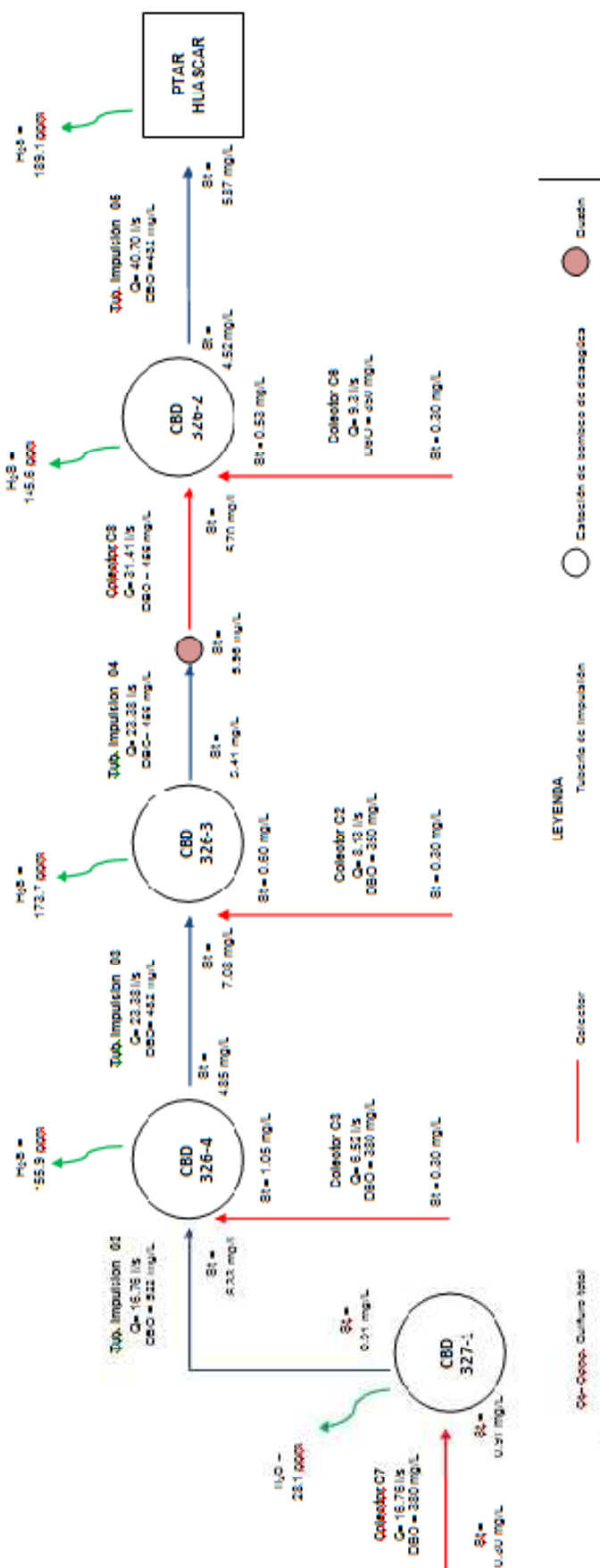
Parámetros	Símbolo	Tuberías de impulsión				Unidad
		Nº 02	Nº 03	Nº 04	Nº 05	
Conc. Sulfuro total (inicial)	Si	0.91	4.85	5.41	4.52	mg/L
Coeficiente de flujo de sulfuro	M	0.5×10^{-3}	0.5×10^{-3}	0.5×10^{-3}	0.5×10^{-3}	m/h
Tiempo de tránsito	t	0.643	0.286	0.10	0.31	h
Demanda Bioquímica Oxígeno	DBO	522	482	456	432	mg/L
Temperatura del agua residual	T	22	22	22	22	°C
Diámetro tubería	D	0.15	0.15	0.20	0.25	m
Conc. sulfuro Total (final)	Sf	6.33	7.08	5.96	5.87	mg/L

Balance de masas de la concentración de sulfuro total en la fase líquida

Componentes	Caudal (i) (l/s)	Sulfuro Total (i) (mg/L)	Caudal (ii) (l/s)	Sulfuro total (ii) (mg/L)	Sulfuro total mezcla (mg/L)
CBD 326-4	16.76	6.33	6.52	1.05	4.85
CBD 326-3	23.38	7.08	8.13	0.60	5.41
CBD 326-2	31.4	5.70	9.3	0.53	4.52

Concentración de H₂S en fase líquida y gaseosa en las estaciones de bombeo del proyecto CODIMUVES (1 atmósfera , 20°C)

Componentes	Fase líquida			Fase gaseosa
	Conc. Sulfuro total (mg/L)	Conc. Sulfuro disuelto (mg/L)	Conc. H ₂ S (mg/L)	Conc. H ₂ S (ppm)
CBD 327-1	0.91	0.64	0.11	28.1
CBD 326-4	4.85	3.39	0.61	155.9
CBD 326-3	5.41	3.78	0.68	173.7
CBD 326-2	4.52	3.16	0.57	145.6
PTAR Huascar	5.87	4.10	0.74	189.1



Concentración de H₂S en la fase líquida y gaseosa (1 atmósfera, 20 °C)

Componente	Fase líquida		Fase gaseosa	
	Conc. sulfuro total (mg/L)	Conc. sulfuro diluido (mg/L)	Conc. H ₂ S (mg/L)	Conc. H ₂ S (ppm)
CBD 327-1	0.91	0.54	3.11	28.1
CBD 326-4	4.85	3.39	3.61	155.9
CBD 326-3	5.41	3.78	3.68	173.7
CBD 326-2	4.52	3.16	3.57	145.6
PTAR HUA SCAR	5.87	4.10	3.74	189.1


Figura 8.2: Balance de masas de sulfuro total y H₂S en el sistema de alcantarillado del proyecto CODIMUVES

8.4 Lista de verificación de la instalación y montaje del biofiltro percolador



Proyecto: CODIMUVES	Estación de bombeo: CBD 326-2
Ubicación: Villa El Salvador	Fecha: 19.10.2012

IT.	DESCRIPCION	COMPLETO?		COMENTARIOS
		SI	NO	
I	BIOFILTRO PERCOLADOR			
1.1	Limpieza de losa de concreto	X		
1.2	Instalación de almohadilla de neopreno	X		
1.3	Instalación de pernos de anclaje de acero inoxidable	X		
1.4	Instalación de damper o válvula mariposa tipo wafer en el ducto.		X	
1.5	Instalación de chimenea de salida	X		
II	DUCTOS y TUBERIAS			
2.1	Instalación de ducto de PVC DN 90 y DN 160	X		
2.2	Instalación de acople flexible en ducto	X		
2.3	Instalación tubería de agua potable PVC - 3/4"	X		
2.4	Instalación de tubería de drenaje PVC DN 50 y trampa P	X		
2.5	Instalación de tubería de ventilación – DN 25 en cámara húmeda	X		Material: tubería de acero al carbono
III	INSTALACIONES ELECTRICAS			
3.1	Instalación de tuberías y accesorios desde CCM a caja de paso en zona de biofiltro	X		
3.2	Cableado eléctrico desde el CCM a la caja de paso en la zona del biofiltro	X		
3.3	Instalación de tubería conduit desde la caja de paso a tablero eléctrico del biofiltro	X		
IV	PRUEBAS DE EQUIPOS	AUTO	MANUAL	COMENTARIOS
4.1	Voltaje en tablero eléctrico biofiltro y extractor			220 V, trifásico, 60 Hz
4.2	Operación del extractor de aire (5 HP)	X	X	Ok
4.3	Voltaje de equipos auxiliares y control			120 V, monofásico, 60 Hz
4.4	Operación de Válvula solenoide	X	X	Ok
4.5	Operación de Bomba de nutrientes	X	X	Ok
V	OBSERVACIONES			
5.1	Se requiere ajustar las abrazaderas del acople flexible según las recomendaciones indicadas			
5.2	Se debe retirar la válvula de muestreo de agua ubicado cerca del motor del extractor de aire.			
5.3	Se deberá realizar el lijado y pintado del motor del extractor para evitar la corrosión			
5.4	Se requiere la regulación del presostato del tanque hidroneumático para suministrar agua potable con una presión entre 30 y 50 psi para la irrigación del biofiltro percolador			

8.5 Certificados de calibración de los analizadores portátiles de H₂S

 interscan corporation 21700 Nordhoff St. Chatsworth, CA 91311 (800) 458-6153		CERTIFICATE OF CALIBRATION Certificate Number <input type="text" value="3392"/>	
Address: <input type="text" value="LIMA, PERU"/>		Instrument Serial Number <input type="text" value="23866"/>	
Instrument Model Number <input type="text" value="4170-1999b"/>		Sensor Serial Number <input type="text" value="67256"/>	
Sensor Model Number <input type="text" value="117-SQ1999b"/>			
Calibration Information			
Calibration Gas Supplier:	<input type="text" value="Scott-Marrin"/>		
*Certified Level (CL):	<input type="text" value="9910"/>	ppb	Note: CL or CGL values are used in the Calibration and Calibration verification process
*Certified Generated Level (CGL):	<input type="text" value="1982"/>	ppb	
Standard Serial Number:	<input type="text" value="CC86192"/>		
Calibration Standard:	<input type="text" value="Cylinder Span Gas"/>		
Calibrated Range:	<input type="text" value="0-1999 ppb"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Electronic Calibration
Gas Type:	<input type="text" value="Hydrogen Sulfide"/>		
Instrument Flow Rate:	<input type="text" value="1000"/>	ml/min	
*Accuracy of calibration +/-	.8%		
Environment Temp °C <input type="text" value="34"/>		Thermometer MID <input type="text" value="IS-00144"/>	
Environment Relative Humidity % <input type="text" value="30"/>		Hygrometer MID <input type="text" value="IS-00144"/>	
Environment Pressure Torr (mmHg) <input type="text"/>		Pressure MID: <input type="text"/>	
<input type="checkbox"/> Instrument Received in Tolerance <input type="checkbox"/> Instrument Received Out of Tolerance <input checked="" type="checkbox"/> Instrument is New			
Technician: <input type="text" value="Robert Ramos"/>			
Date:	<input type="text" value="8/21/2012"/>		
Calibrate	<input type="checkbox"/> 3 months	<input checked="" type="checkbox"/> 6 months after initial use	<input type="text"/>
Certificate Notes <input type="text"/>			
<small>It is recommended that the instrument be returned to Interscan annually for recertification within factory specifications. Recertification does not alter original factory warranty. This is to verify the above referenced analyzer and sensor has been tested, calibrated and approved by Interscan to the above indicated standards. Calibration is most accurate on the range indicated, with lower response for dead range levels. Note: Any readjustment of the CAL or SPAN settings invalidates this certification.</small>			
END OF REPORT			
1 of 1			
9010003-B			

8.5 Certificados de calibración de los analizadores portátiles de H₂S
(continuación)

		interscan corporation	
21700 Nordhoff St. Chatsworth, CA 91311 (800) 458-6153			
PORTABLE ANSI / NCSL CERTIFICATE OF CALIBRATION			
Certificate Number	6489		
Customer	GLOBAL ENERGY AND WATER		
Address	LIMA, PERU		
Instrument Serial Number	23866	Instrument Model Number	4170-1999b
Sensor Serial Number	67256	Sensor Model Number	117-SQ1999b
Calibration Information			
Calibration Gas Supplier:	Scott-Marrin		
*Certified Level (CL):	8910	ppb	Note: CL or CGL values are used in the Calibration and Calibration verification process
*Certified Generated Level (CGL):	1982	ppb	
Standard Serial Number:	CC88192		
Calibration Standard:	Cylinder Span Gas		
Calibrated Range:	U-1999	ppb	<input checked="" type="checkbox"/> Electronic Calibration
Gas Type:	Hydrogen Sulfide		
Instrument Flow Rate:	1000	ml/min	
Calibration As Left:	1982	ppb	***ECS
Rotameter 1 Serial Number	IS-00006	Flow Rate:	500 ml/min
Rotameter 2 Serial Number	IS-00146	Flow Rate:	2000 ml/min
Thermometer Serial Number	IS-00144	Temperature:	32 °C
Instrument Received in Tolerance	<input type="checkbox"/>	Instrument Received Out of Tolerance	<input type="checkbox"/>
		Instrument is New	<input checked="" type="checkbox"/>
*Accuracy of calibration +/-	5%	Technician:	 Robert Ramoa
Date:	8/21/2012		
Calibrate	<input type="checkbox"/> 3 months	<input checked="" type="checkbox"/> 6 months after initial use	
<small>This is to certify the above referenced analyzer and sensor has been tested, calibrated and approved by the Interscan Quality Control Department, in accordance with the requirements of ANSI/NCSL Z540-1-1994 and ISO 10012-1: 1992, using the above gas standard and test equipment. Gas standard and test equipment accuracies are certified traceable to the National Institute of Standards and Technology (NIST), or to measurable conditions created in our laboratory using established physical constants and / or natural phenomena and recognized procedures.</small>			
<small>Note: Any disturbance of the CAL or SPAN adjustment invalidates this certification.</small>			
5010004-B	1 of 2		


8.6 Reporte de compuestos olorosos en el flujo de ingreso y aire purificado en el biofiltro percolador

		MoL Wt.		Volatile Sulfur Compounds	
				10:15 AM BioF ZB 4000 Inlet PPB	10:10 AM BioF ZB 4000 Outlet PPB
	OT*				
Hydrogen Sulfide	0.4	34	15,642	30	
COS	55	60	11	19	
Methanethiol (MM)	0.01	48	1,313	9.6	
Ethianethiol (t)	0.01	62	△	△	
Dimethyl Sulfide	1	62	11	3.1	
Carbon Disulfide	10	76	34	16	
2-Propanethiol (t)		76	△	△	
(Methylthio) ethane (t)		76	△	△	
Methyl Thirane (t)		84	△	△	
Allyl Methyl Sulfide	0.1	88	△	△	
Diethyl Sulfide		90	△	△	
Methylthioacetate		90	△	△	
1-(Methyl thio) propane (t)		90	△	△	
1-(Methylthio) (Z)-1-Propene (t)		90	△	△	
Dimethyl Disulfide	2.2	94	18	10	
2-M-1-(Methylthio) Propane (t)		104	△	△	
Diisopropyl Disulfide (t)		118	△	△	
2-(Methylthio) Butane (t)		104	△	△	
Methyl Ethyl Disulfide		108	0.24	△	
Methyl Thiophene		98	△	△	
Dimethyl Thiophene		112	△	△	
3-Ethyl Thiophene		112	△	△	
Methyl Propyl Disulfide (t)		122	△	△	
Diethyl Disulfide (t)	2	122	△	△	
2,2-bis(ethylthio) Propane (t)		164	△	△	
Dimethyl Trisulfide	0.01	126	48	1.1	
Methyl isopropyl Disulfide (t)		122	△	△	
Methyl 2-propenyl Disulfide		120	△	△	
M-1-M-1-(Mthio)ethyl Disulfide (t)		168	△	△	
Diisobutyl Disulfide (t)		178	△	△	


OT* = Odor Thresholds (ppb) - odor threshold are always reported in a range to reflect inherent human variability, the values reported in this column are the lowest we took from the literature

Chemical Free | Odors • Air • Fire • Corros • Water Investigation

8.6 Reporte de compuestos olorosos en el flujo de ingreso y aire purificado en el biofiltro percolador (*Continuación*)

MAYFLY ODOOR LABORATORY					
450 Flanders Road Mystic, CT 06355				(860) 536-7431 FAX (860) 536-2212	
Client: Siemens Water Received: 1/24/13 Reported: 1/26/13 Analysis: 1/24/13					
Project ID: MF-3009 Sample ID: Air Sample Type: Tedlar Bag Sample Vol: 400 ml					
Lima, Peru			Volatile Organic Compounds		
1/21/2013					
Page 1 of 2					
Compound	Cas#	Mol. Wt.	Rtime	10:15 AM BioF ZB 4000 Inlet PPB	10:00 AM BioF ZB 4000 Out PPB
Aromatics					
Benzene	71-43-2	78	17.33	23	24
Toluene	108-88-3	92	23.12	134	66
Ethyl benzene	100-41-4	106	27.05	6.2	6.5
O,P-Xylene	106-42-8	106	27.38	23	23
M-Xylene	108-38-3	106	28.38	10	5.9
Styrene	100-42-5	104	28.53	3.7	4.4
Propyl benzene	103-65-1	120	30.68	0.6	<1
4-Ethyltoluene	100-44-7	120	30.90	6.8	14
Trimethyl benzene	108-67-8	120	31.72	5.7	5.8
p-Cymene (4-IsopropylToluene)	99-87-6	134	32.35	2.1	0.3
Indane	496-11-7	118	33.20	0.3	0.2
Diethyl Benzene	25340-17-4	134	35.66	1.1	1.9
Methyl Naphthalene	1321-94-4	142	40.75	0.1	2.0
Halogen Compounds					
Chloroform	67-66-3	118	15.58	31	15
Bromodichloromethane	75-27-4	162	21.08	0.2	0.1
Perchloroethylene	127-18-4	166	24.88	0.3	1.5
Hydrocarbons					
Pentane	109-66-0	46	4.93	20	56
1,3-dimethyl cyclopentane	2532-58-3	98	11.28	0.3	7.8
Hexane	110-54-3	86	11.80	0.4	54
1_Methyl-Cyclopentene	693-69-0	67	15.23	35	38
Heptane	142-82-5	100	18.50	24	10
Methyl Cyclohexane	108-87-2	98	19.97	15	16
Methyl Cyclopentane	96-37-7	84	20.16	0.4	3.1
Major Hydrocarbon-1	NA	156	32.68	12	20
Major Hydrocarbon-2	NA	156	33.90	5.4	7.6
Undecane	1120-21-4	156	36.15	0.4	0.7
Total Hydrocarbons (as Heptane)	NA	128		128	272
Oxygen & Nitrogen Compounds					
Methyl Vinyl Ketone	78-94-4	70	7.65	27	31
Dihydro Furan(t)	1191-99-7	70	6.43	<1	13

8.6 Reporte de compuestos olorosos en el flujo de ingreso y aire purificado en el biofiltro percolador (*Continuación*)

MAYFLY  ODOR LABORATORY					
450 Flanders Road Mystic, CT 06355				(860) 536-7431 FAX (860) 536-2212	
Client: Siemens Water Received: 1/24/13 Reported: 1/26/13 Analysis: 1/24/13					
Project ID: MF-3009 Sample ID: Air Sample Type: Tedlar Bag Sample Vol: 400 ml					
Lima, Peru 1/21/2013			Volatile Organic Compounds		
Page 2 of 2					
Compound	Cas#	Mol. Wt.	Rtime	10:15 AM BioF ZB 4000 Inlet PPB	10:00 AM BioF ZB 4000 Out PPB
Oxygen & Nitrogen Compounds					
Ethanol	64-17-5	46	7.25	133	155
Propanal	123-38-6	58	8.00	0.3	0.1
Acetone	67-64-1	58	8.67	19	7
Isopropyl Alcohol	67-63-0	60	9.31	2.1	6.4
3-Methyl Furan	930-27-8	82	14.19	1.9	0.3
Tetrahydrofuran	109-99-9	72	15.88	0.7	0.7
(Methyl Butanal), 2-Methyl Butraldehyde	96-17-3	86	18.46	1.1	0.4
Propanoic Acid	79-09-4	100	24.20	8.0	0.2
Hexanal (5-ppb)	66-25-1	124	25.72	8.1	2.4
N-Butyric Acid	107-92-6	88	27.16	0.1	4.4
2-Butoxyethanol (butyl cellosolve)	111-76-2	118	29.62	0.1	4.3
Pentyl Furan	3777-69-3	138	31.45	0.2	0.8
Benzaldehyde	100-52-7	106	32.13	0.1	2.2
Hexanoic Acid	142-62-1	116	31.97	0.1	2.4
2-Ethyl 1-Hexanol	104-76-7	130	33.27	5.0	12
Nonanal	124-19-6	142	35.12	1.1	1.5
1-Phenyl - 1,2-Propanedione (I)	579-07-7	148	35.08	<1	3.0
Octanoic acid	124-07-2	144	37.45	0.1	8.0
Butyl Isobutyrate	97-87-0	144	42.65	4.7	7.3
Decanoic Acid	334-48-5	172	42.13	0.1	6.5
Sulfur Compounds (See VSC Table)					
Terpenes & Fragrance Compounds					
β -Phellandrene	4221-98-1	136	28.93	1.2	0.1
α -Pinene	80-56-8	136	29.48	4.5	1.1
Camphene	79-92-5	136	30.22	2.8	0.2
β -Pinene	127-91-3	136	31.21	2.8	0.3
Limonene	138-86-3	136	32.64	24	2.5
Camphor	76-22-2	152	37.85	0.1	0.3

Chemical Firm (Odors • Air • Fire • Claims • Water) Investigation

8.7 Registro de parámetros de control en el lixiviado

Camara de bombeo: CBD 326-2

Ubicación: Villa El Salvador

Fecha	Hora	Flujo de aire (m ³ /h)	pH	Temperatura (°C)	Sulfatos (mg/L)	Observaciones/ comentarios
21/10/12	14:00	381	8.10	19.8	—	Arranque del biofiltro
21/10/12	16:30	381	8.10	19.3	—	Arranque (hora: 13:30)
22/10/12	15:30	381	8.00	19.6	258	
25/10/12	8:30	381	8:20	18.8	241.3	
27/10/12	9:00	381	8.00	19.3	—	
27/10/12	10:00	381	7.90	21.3	—	
30/10/12	8:30	381	7.70	19.7	337	
02/11/12	8:30	381	7.60	19.8	336.4	
03/11/12	9:30	381	7.5	19.6	—	
06/11/12	12:30	381	6.4	20.3	334.3	
07/11/12	8:30	381	6.3	18.4	356.6	
10/11/12	9:30	381	6.6	19.2	—	Se agrego 500ml de nrt.
10/11/12	10:30	381	6.8	19.1	—	Se aumentó la dosis 35/35
13/11/12	9:30	381	5.3	19.5	332.4	
16/11/12	9:00	381	4.6	19.5	330	
17/11/12	9:00	381	3.8	21.0	—	Se incrementó flujo de aire
17/11/12	10:00	381	3.8	20.6	—	a 42H ² (hora: 10:30 ml)
20/11/12	9:00	448	3.7	19.6	323	
20/11/12	10:00	448	3.7	19.2	—	
23/11/12	8:30	448	3.4	21.3	—	
23/11/12	9:30	448	3.3	21.5	402.3	
24/11/12	8:30	448	3.5	20.0	—	
24/11/12	9:30	448	3.5	20.2	—	
27/11/12	9:30	448	3.8	21.2	370.4	Se incrementó irrigación a 4'
30/11/12	16:15	448	4.3	21.4	356	Se disminuye irrigación a 2.5'
01/12/12	11:00	448	4.6	23.2	—	Se incrementó dosis de nrt.
01/12/12	12:30	448	4.7	22.0	—	a 40/40
04/12/12	8:40	448	4.3	20.6	373.3	
04/12/12	10:10	448	4.5	21.6	—	
07/12/12	8:30	448	4.0	20.9	349.3	
11/12/12	9:45	448	4.4	22.4	—	
13/12/12	8:20	448	3.8	22.5	—	Se incrementó irrigación
13/12/12	9:30	448	3.9	21.4	—	a 3'
15/12/12	9:10	448	3.7	22.2	—	se incrementó flujo de aire
15/12/12	10:10	448	3.7	21.7	—	a 44H ² (hora: 9:45 ml)
18/12/12	9:30	572	3.3	22.1	453.8	

Responsable:



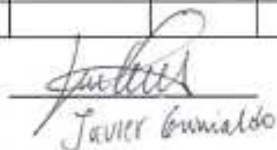
8.7 Registro de parámetros de control en el lixiviado (*Continuación*)

Camara de bombeo: CBD 326-2

Ubicación: Villa El Salvador

Fecha	Hora	Flujo de aire (m ³ /h)	pH	Temperatura (°C)	Sulfatos (mg/L)	Observaciones/ comentarios
05/02/13	8:30	662	2.8	24.4	505.2	
05/02/13	9:50	662	2.7	24.4	—	
08/02/13	8:50	662	2.8	24.1	—	
08/02/13	10:00	662	2.8	24.2	—	
09/02/13	9:30	662	2.8	24.9	—	
09/02/13	10:30	662	2.7	25.5	—	
12/02/13	8:30	662	2.8	24.2	399.1	se aumenta flujo de aire
12/02/13	9:30	662	2.9	24.4	—	0.48 K ₂ (hora 9:30)
15/02/13	8:40	662	2.8	24.4	394.8	se prepara solución de N ₂
15/02/13	9:40	662	2.8	24.6	—	agregó 245ml
16/02/13	9:40	862	2.9	24.6	—	
16/02/13	10:40	862	2.7	25.2	—	
19/02/13	9:00	862	2.7	23.6	—	
19/02/13	10:30	862	2.8	23.9	—	
22/02/13	9:00	862	2.7	23.5	363.9	
22/02/13	10:30	862	2.9	24.8	—	
23/02/13	11:00	862	2.7	25.0	—	
23/02/13	12:00	862	2.8	25.1	—	
26/02/13	8:50	862	2.8	23.9	371.6	
26/02/13	10:30	862	2.6	25.5	—	
01/03/13	9:00	862	3.1	24.1	355.9	
01/03/13	10:30	862	2.8	24.5	—	
02/03/13	8:30	862	2.9	24.4	—	
02/03/13	10:00	862	2.7	24.3	—	
05/03/13	8:30	862	3.1	24.6	—	
05/03/13	11:00	862	2.9	24.3	—	
06/03/13	8:45	862	3.0	23.7	379.4	
08/03/13	9:30	862	2.9	24.9	—	
09/03/13	10:30	862	2.8	24.4	—	
10/03/13	8:00	862	2.9	23.9	—	se ajusta flujo de aire
10/03/13	9:30	862	2.8	24.6	—	→ 46 K ₂ (hora 10:00 am)
						(FIN DE LA INVESTIGACION)

Responsable:



JAVIER GRIMALDO

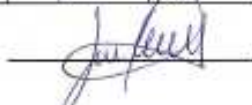
8.8 Registro de parámetros de control en la media de filtración

Camara de bombeo: CBD 326-2

Ubicación: Villa El Salvador

Fecha	Hora	Flujo de aire (m ³ /h)	pH	Temperatura (°C)	Sulfatos (mg/L)	Humedad (%)	Observaciones/ comentarios
21/10/12	14:15	381	8.9	18.2	—	—	Quemadura del hoshella
21/10/12	16:30	381	8.8	18.6	—	—	Arrolador (HORA 13:30)
22/10/12	15:20	381	8.6	21.1	25.97	23%	
25/10/12	8:30	381	8.8	22.4	28.90	23%	
25/10/12	9:30	381	8.5	24.4	—	—	
27/10/12	9:00	381	8.3	29.5	—	—	
27/10/12	10:30	381	8.3	32.0	—	—	
30/10/12	8:30	381	8.4	20.3	43.62	25%	
02/11/12	8:50	381	7.5	21.6	37.33	24%	
02/11/12	9:30	381	7.6	23.0	—	—	
03/11/12	8:10	381	7.7	19.3	—	—	
03/11/12	9:20	381	7.8	19.6	—	—	
06/11/12	12:30	381	6.7	21.4	35.36	20%	Se incrementó el t. de irrigación a 3'
06/11/12	13:30	381	6.8	21.4	—	—	
09/11/12	8:45	381	6.8	20.5	—	—	
09/11/12	9:10	381	6.8	20.5	74.6	24%	
10/11/12	9:10	381	6.7	21.6	—	—	
10/11/12	9:30	381	6.8	21.2	—	—	
12/11/12	8:45	381	6.6	23.0	95.58	25%	
13/11/12	9:30	381	6.7	23.3	—	—	
16/11/12	8:45	381	6.4	24.1	—	—	
16/11/12	9:30	381	6.4	23.8	27.31	23%	
17/11/12	8:50	381	6.5	26.1	—	—	Se incrementó flujo de agua a 42 lit/ (10:50)
17/11/12	9:30	381	6.4	26.6	—	—	
20/11/12	8:30	448	5.7	20.2	60.37	23%	
20/11/12	9:20	448	5.7	20.5	—	—	
23/11/12	8:20	448	5.9	22.5	58.39	27%	
23/11/12	9:40	448	6.0	27.4	—	—	
24/11/12	8:15	448	5.8	21.8	—	—	
24/11/12	9:15	448	5.8	20.9	—	—	
27/11/12	9:40	448	6.4	22.7	22.37	25%	Se incrementó irrigación a 4' (10:40 am)
27/11/12	9:40	448	6.5	25.0	—	—	
30/11/12	15:30	448	7.9	23.7	11.36	24%	Se disminuyó
30/11/12	16:15	448	8.0	24.3	—	—	Irrigación a 2.5'
01/12/12	11:00	448	7.8	30.7	—	—	Se incrementó dosis
01/12/12	12:00	448	7.8	23.0	—	—	de Nutrientes 40/40

Responsable:



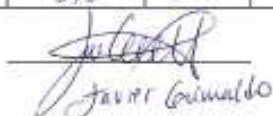
8.8 Registro de parámetros de control en la media de filtración (Continuación)

Camara de bombeo: CBD 326-2

Ubicación: Villa El Salvador

Fecha	Hora	Flujo de aire (m3/h)	pH	Temperatura (°C)	Sulfatos (mg/L)	Humedad (%)	Observaciones/ comentarios
04/12/12	8:40	448	6.9	20.4	8.03	22%	
04/12/12	10:00	448	7.0	20.5	—	—	
07/12/12	8:15	448	7.5	21.3	7.39	22%	
07/12/12	9:15	448	7.5	22.3	—	—	
11/12/12	8:15	448	7.3	26.3	—	—	
11/12/12	9:15	448	7.4	26.6	—	—	
13/12/12	8:10	448	7.0	22.3	—	—	
13/12/12	9:10	448	7.3	22.7	—	—	
15/12/12	7:30	448	6.5	24.5	—	—	Se incrementa flujo de aire a 4442 (9:45)
15/12/12	9:00	448	6.5	24.8	—	—	
18/12/12	8:20	572	6.3	22.7	12.48	21%	
18/12/12	9:10	572	6.5	22.7	—	21%	
21/12/12	8:30	572	6.9	23.7	10.24	21%	
21/12/12	9:15	572	6.8	23.6	—	—	
22/12/12	8:15	572	6.6	23.4	—	—	
22/12/12	9:15	572	6.3	24.5	—	—	
26/12/12	9:15	572	6.2	23.7	—	—	
26/12/12	10:15	572	6.0	24.5	—	—	
28/12/12	8:45	572	6.6	24.9	—	—	
28/12/12	10:15	572	6.5	25.5	6.23	23%	
29/12/12	9:00	572	6.3	28.5	—	—	
29/12/12	10:15	572	6.5	26.0	—	—	
03/01/13	8:30	572	5.8	24.5	7.71	21%	
03/01/13	9:30	572	6.1	24.9	—	—	
05/01/13	7:45	572	5.8	22.5	—	—	
05/01/13	9:00	572	5.7	25.3	—	—	
08/01/13	9:00	572	6.1	24.5	—	—	
08/01/13	10:00	572	5.9	25.4	5.45	24%	
10/01/13	8:30	572	6.1	24.7	—	—	
10/01/13	9:30	572	5.8	26.1	11.60	—	
12/01/13	9:00	572	5.8	26.4	—	25%	
12/01/13	10:00	572	5.9	26.5	—	—	
14/01/13	9:00	572	5.6	26.8	—	25%	
14/01/13	10:00	572	5.7	26.5	—	—	
17/01/13	8:15	572	5.8	24.4	7.09	23%	
17/01/13	9:15	572	5.7	24.6	—	—	

Responsible:



JAVIER GRIMALDO

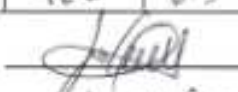
8.8 Registro de parámetros de control en la media de filtración (Continuación)

Camara de bombeo: CBD 326-2

Ubicación: Villa El Salvador

Fecha	Hora	Flujo de aire (m3/h)	pH	Temperatura (°C)	Sulfatos (mg/L)	Humedad (%)	Observaciones/ comentarios
19/01/13	9:00	572	6.4	27.5	—	—	
19/01/13	10:00	572	6.4	27.0	—	—	
21/01/13	9:25	572	5.9	25.2	—	—	
21/01/13	9:25	572	5.7	24.9	—	—	
24/01/13	8:15	662	5.6	25.6	6.40	24%	
24/01/13	9:15	662	5.8	25.4	—	—	
26/01/13	9:15	662	6.4	26.7	—	—	
26/01/13	10:00	662	6.3	26.4	—	—	
29/01/13	8:45	662	6.4	26.5	—	—	
29/01/13	9:30	662	6.3	27.1	6.60	25%	
01/02/13	8:30	662	6.2	27.8	—	—	
01/02/13	9:30	662	6.2	28.0	—	—	
02/02/13	11:30	662	6.6	30.6	—	—	
02/02/13	12:30	662	6.5	29.4	—	—	
05/02/13	8:00	662	6.1	28.2	25.60	20%	
05/02/13	9:30	662	6.0	27.5	—	—	
08/02/13	8:30	662	6.4	26.0	—	—	
08/02/13	9:30	662	6.4	26.6	—	—	
09/02/13	9:30	662	6.3	28.7	—	—	
09/02/13	10:30	662	6.4	29.6	—	—	
12/02/13	8:00	662	6.3	26.8	—	—	
12/02/13	9:30	662	6.3	28.0	1.63	20%	se incrementa el t.
15/02/13	8:30	862	6.7	26.5	—	—	de irrigación a 3.5'
15/02/13	9:30	862	6.6	26.8	5.49	23%	se incrementa de nuevo
16/02/13	9:30	862	6.4	27.1	—	—	de irrigación 20/50
16/02/13	10:30	862	6.6	29.1	—	—	
19/02/13	9:00	862	6.9	26.2	—	—	
19/02/13	10:00	862	7.0	26.4	—	25%	
22/02/13	9:00	862	6.2	26.5	—	—	
22/02/13	10:00	862	6.1	27.4	11.33	—	
23/02/13	11:00	862	5.7	27.7	—	—	
23/02/13	12:00	862	5.8	28.2	—	—	
24/02/13	9:00	862	6.3	27.7	—	—	
24/02/13	10:00	862	6.3	27.9	8.99	24%	
01/03/13	9:00	862	6.2	25.1	—	—	
01/03/13	10:00	862	6.3	25.6	6.70	23%	


Responsable:



Javier Grimaldo

8.9 Ejemplo de reporte de sulfatos y humedad en la media de filtración (24.01.2013)

LABORATORIO DE MEDIO AMBIENTE




J. Ramon
Quality Control Culture

INFORME DE ENSAYO N° MA13010452

Cod. Cliente	B1		
Cod. Lab.	130-1122		
Tipo de Producto	Suelo, Sotamientos		
Parámetro	Unidad	L.D.	Resultados
Humedad	%	f	24

Leyenda: L.D = Límite de detección - = No analizado

Miércoles, 6 de Febrero del 2013


Milagros Ramirez Arroyo
 Jefe de Operaciones Medio Ambiente
 CCP 689

Uso del Informe:


1. El presente informe es válido para el uso de información de referencia.

2. Si los resultados que figuran en el presente informe son negativos, el mismo es el caso para una publicación por el cliente en cualquier momento antes de dar inicio a los 30 días hábiles de la fecha de emisión de este documento, salvo que su disponibilidad sea en periodo restricto, en cuyo caso el período de validez será definido por sus respectivas autoridades reguladoras.

3. El presente informe de ensayo de un laboratorio externo de calidad superior, no substituirá a una evaluación ambiental previa, control de la calidad y los registros de acuerdo a los leyes vigentes tanto en materia ambiental. Esta actividad se realiza dentro de un sistema de gestión ambiental, sobre autorización emitida por J. Ramon del Perú, S.A.C.

www.jramoncorp.com

Oficinas Administrativas: Paseo de la República 3793, San Isidro
Laboratorio: Calle Domingo Elías 201, Miraflores



8.9 Ejemplo de reporte de sulfatos y humedad en la media de filtración (24.01.2013) (Continuación)

LABORATORIO DE MEDIO AMBIENTE



INFORME DE ENSAYO N° MA13010453

Cod. Cliente	B1		B2	
	1301123		1301126	
Cod. Lab.	1301123		1301126	
Tipo de Producto	Fuente doméstico		Fuente doméstico	
Parámetros	Unidad	L.D.	Resultados	
Sulfatos	mg/l	0,156	486,5	6,403

Legenda: L.D = Límite de detección - = No analizado

Tiempo de Reactividad de Sulfatos
SO ₄ ²⁻ : 200mg

Miraflores, 7 de Febrero del 2013


Milagros Ramirez Arroyo
 Jefe de Operaciones Medio Ambiente
 CQP 689

Usado Interno
 1. El presente informe solo es válido para el uso de Fuentes de la referencia.
 2. El uso de este informe que incluye el presente informe puede ser utilizado únicamente en el caso que sea autorizado por el cliente o entidad emisora según corresponda a los 20 días calendario de la fecha de emisión de este documento, salvo que la periodicidad sea lo contrario, en cuyo caso el período de validez será definido por las necesidades del trabajo ambiental.
 3. El presente informe de ensayo es un documento oficial de origen público, su reproducción o uso en forma alguna podrá ser utilizada como evidencia en la justicia y en cualquier otro ámbito legalmente establecido.
 Este contiene la información necesaria para la toma de decisiones, salvo autorización expresa de J. Ramon S.A.C.