

# MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO

## OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES: TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE LODOS

50



# MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO

## OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES: TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE LODOS

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

Manual de agua potable, alcantarillado y Saneamiento  
Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales:  
Tratamiento y Disposición de Lodos

ISBN: 978-607-8246-90-8

D.R. © Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales  
Boulevard Adolfo Ruiz Cortines No. 4209 Col. Jardines en la Montaña  
C.P. 14210, Tlalpan, México, D.F.

Comisión Nacional del Agua  
Insurgentes Sur No. 2416 Col. Copilco El Bajo  
C.P. 04340, Coyoacán, México, D.F.  
Tel. (55) 5174•4000

Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento

Impreso y hecho en México  
Distribución Gratuita. Prohibida su venta.  
Queda prohibido su uso para fines distintos al desarrollo social.  
Se autoriza la reproducción sin alteraciones del material contenido en esta obra,  
sin fines de lucro y citando la fuente

# CONTENIDO

Presentación	VII
Objetivo general	IX
Introducción a la operación y mantenimiento de PTARM: Tratamiento y disposición de lodos	XI
1. Aspectos generales	1
2. Operación y mantenimiento de los sistemas de espesamiento y deshidratación de lodos residuales	7
2.1. Acondicionamiento de lodos	7
2.1.1 Operación del sistema de acondicionamiento de lodos	7
2.1.2 Acondicionadores inorgánicos	14
2.1.3 Acondicionadores orgánicos	17
2.2. Espesamiento de lodos residuales	24
2.2.1 Objetivos	24
2.2.2 Introducción	24
2.2.3 Espesamiento por gravedad	26
2.2.4 Espesamiento de banda por gravedad	38
2.3. Deshidratación de lodos	48
2.3.1 Objetivos	48
2.3.2 Introducción	48
2.3.3 Filtro prensa de banda	48
2.3.4 Lechos de secado	62
2.3.5 Cosas para recordar	66
3. Operación y mantenimiento de reactores aerobios de lodos residuales	69
3.1. Objetivos	69
3.2. Introducción	69
3.2.1 Descripción del proceso de estabilización aerobia	69
3.2.2 Tipos de estabilización aerobia	69
3.3. Selección y diseño del equipo	72
3.3.1 Aeración con difusores	72
3.3.2 Aeradores mecánicos superficiales	73
3.3.3 Aeradores mecánicos sumergibles	74
3.3.4 Sopladores	74
3.3.5 Tipos de reactores	75
3.3.6 Tuberías requeridas	76
3.4. Modo de operación del reactor	77
3.4.1 Operación semicontinua	77
3.4.2 Operación continua	77

3.4.3 Operación de auto-calentamiento	77
3.4.4 Operación aerobia-anóxica	78
3.5. Desempeño del proceso	82
3.5.1 Control de la temperatura	82
3.5.2 Control del pH	86
3.5.3 Destrucción de sólidos volátiles y reducción de los sólidos fijos	86
3.5.4 Tasa específica de consumo de oxígeno	87
3.5.5 Calidad del sobrenadante	88
3.5.6 Características del lodo desaguado	88
3.5.7 Reducción de nitrógeno amoniacal y remoción de nitrógeno en los biosólidos	88
3.5.8 Reducción de fósforo en los biosólidos y biofósforo	89
3.5.9 Reducción de microorganismos patógenos	89
3.5.10 Características estéticas del lodo estabilizado	89
3.5.11 Producto del tiempo de retención de sólidos por la temperatura (día °C)	90
3.5.12 Flexibilidad del sistema	90
3.6. Arranque del reactor	92
3.7. Control de la operación	95
3.8. Recolección de datos y control analítico del proceso	96
3.9. Fallas en el proceso	96
3.9.1 Incremento en la carga orgánica	97
3.9.2 Olores molestos del lodo estabilizado	97
3.9.3 Exceso de espuma	97
3.9.4 pH bajo (alto contenido de amoníaco)	97
3.9.5 Bajo oxígeno disuelto	98
3.10. Fallas en los equipos	99
3.10.1 Obstrucción de los difusores de aire	99
3.10.2 Sopladores y válvulas	100
3.10.3 Aeradores mecánicos	100
3.10.4 Congelación	101
3.10.5 Sedimentación de los lodos	101
3.11. Mantenimiento	101
3.11.1 Sistema de suministro de aire u oxígeno	101
3.11.2 Equipo de bombeo y mezclado	101
3.11.3 Registros	102
3.12. Seguridad e higiene	103
3.13. Cosas para recordar	103
4. Operación y mantenimiento de reactores anaerobios de lodos residuales	105
4.1. Objetivos	105
4.2. Introducción	105
4.3. Tipos de estabilización anaerobia	106
4.3.1 Estabilización mesofílica convencional	106

4.3.2	Estabilización avanzada	107
4.3.3	Estabilización ácido/gas	107
4.3.4	Estabilización termofílica	108
4.3.5	Estabilización multietapas	108
4.3.6	Estabilización de altas concentraciones de sólidos	108
4.4.	Procesos de pretratamiento para la estabilización	109
4.4.1	Tratamiento de ultrasonido	109
4.4.2	Hidrólisis térmica	109
4.4.3	Pasteurización	110
4.4.4	Homogeneización	110
4.5.	Equipos e instalaciones para la estabilización anaerobia	110
4.5.1	Configuración del tanque	110
4.5.2	Reactores secundarios	112
4.5.3	Cubiertas del reactor y mantenimiento	113
4.5.4	Mezclado del reactor	116
4.5.5	Calentamiento del reactor	125
4.6.	Operación del reactor	132
4.6.1	Arranque del equipo	132
4.6.2	Operación del reactor	136
4.7.	Parámetros que deben controlarse para evitar fallas en la operación del reactor	140
4.7.1	Control de toxicidad	140
4.7.2	Formación de espuma en el reactor	140
4.7.3	Frecuencia de la limpieza del reactor	142
4.8.	Control y pruebas	145
4.8.1	Temperatura	146
4.8.2	Potencial de hidrógeno	146
4.8.3	Alcalinidad	147
4.8.4	Ácidos volátiles	147
4.8.5	Relación ácidos volátiles : alcalinidad	147
4.9.	Guía de solución de problemas	149
4.10.	Manejo de biogás	149
4.10.1	Introducción	149
4.10.2	Usos del gas	158
4.10.3	Purificación del biogás	159
4.10.4	Equipos de una planta de biogás	165
4.10.5	Mantenimiento de los equipos de una planta generadora de biogás	175
4.10.6	Sistemas de seguridad del gas, dispositivos de control, operación y mantenimiento requerido	181
4.10.7	Reglamentos y lineamientos	185
4.11.	Cosas para recordar	192
5.	Operación y mantenimiento de rellenos sanitarios de lodos residuales	195

5.1. Introducción	195
5.2. Principales factores de operación de los rellenos sanitarios	195
5.2.1 Área de relleno de lodos	196
5.2.2 Codisposición	200
5.2.3 Trincheras o zanjas	201
5.2.4 Procedimientos generales de operación	205
5.3. Equipamiento	213
5.4. Herramientas de trabajo	220
5.5. Implementos de protección personal	220
5.6. Sistema de seguridad e higiene	221
5.7. Mantenimiento	224
5.7.1 Introducción	224
5.7.2 Sistema de monitoreo	236
5.7.3 Clausura de un relleno de lodos	238
5.8. Captura de biogás	246
5.8.1 Introducción	246
5.8.2 Captura y limpieza del biogás	246
5.8.3 Métodos de eliminación de lixiviados	256
5.8.4 Cosas para recordar	258
Conclusiones	261
Tabla de conversiones de unidades de medida	263
Bibliografía	273
Ilustraciones	277
Tablas	283
Ecuaciones	287
Anexo	289
Anexo 1	289
Anexo 2	291
Anexo 3	297
Anexo 4	301
Formatos y reportes	301

# PRESENTACIÓN

Uno de los grandes desafíos hídricos que enfrentamos a nivel global es dotar de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento a la población, debido, por un lado, al crecimiento demográfico acelerado y por otro, a las dificultades técnicas, cada vez mayores, que conlleva hacerlo.

Contar con estos servicios en el hogar es un factor determinante en la calidad de vida y desarrollo integral de las familias. En México, la población beneficiada ha venido creciendo los últimos años; sin embargo, mientras más nos acercamos a la cobertura universal, la tarea se vuelve más compleja.

Por ello, para responder a las nuevas necesidades hídricas, la administración del Presidente de la República, Enrique Peña Nieto, está impulsando una transformación integral del sector, y como parte fundamental de esta estrategia, el fortalecimiento de los organismos operadores y prestadores de los servicios de agua potable, drenaje y saneamiento.

En este sentido, publicamos este manual: una guía técnica especializada, que contiene los más recientes avances tecnológicos en obras hidráulicas y normas de calidad, con el fin de desarrollar infraestructura más eficiente, segura y sustentable, así como formar recursos humanos más capacitados y preparados.

Estamos seguros de que será de gran apoyo para orientar el quehacer cotidiano de los técnicos, especialistas y tomadores de decisiones, proporcionándoles criterios para generar ciclos virtuosos de gestión, disminuir los costos de operación, impulsar el intercambio de volúmenes de agua de primer uso por tratada en los procesos que así lo permitan, y realizar en general, un mejor aprovechamiento de las aguas superficiales y subterráneas del país, considerando las necesidades de nueva infraestructura y el cuidado y mantenimiento de la existente.

El Gobierno de la República tiene el firme compromiso de sentar las bases de una cultura de la gestión integral del agua. Nuestros retos son grandes, pero más grande debe ser nuestra capacidad transformadora para contribuir desde el sector hídrico a **Mover a México**.

**Director General de la Comisión Nacional del Agua**



## OBJETIVO GENERAL

El *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS)* está dirigido a quienes diseñan, construyen, operan y administran los sistemas de agua potable, alcantarillado y saneamiento del país; busca ser una referencia sobre los criterios, procedimientos, normas, índices, parámetros y casos de éxito que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en su carácter de entidad normativa federal en materia de agua, considera recomendable utilizar, a efecto de homologarlos, para que el desarrollo, operación y administración de los sistemas se encaminen a elevar y mantener la eficiencia y la calidad de los servicios a la población.

Este trabajo favorece y orienta la toma de decisiones por parte de autoridades, profesionales, administradores y técnicos de los organismos operadores de agua de la República Mexicana y la labor de los centros de enseñanza.



# INTRODUCCIÓN A LA OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PTARM: TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE LODOS

Este manual es una guía general para la operación y mantenimiento de los sistemas de tratamiento de lodos residuales generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales y desarrolla los aspectos más importantes de los siguientes tópicos:

- Importancia de la operación y mantenimiento de los sistemas de tratamiento de lodos y algunas consideraciones generales para el manejo del lodo
- Operación y mantenimiento de los sistemas de acondicionamiento, espesamiento y deshidratación de lodos residuales más utilizados en las plantas del país
- Operación del proceso de estabilización aerobia convencional y de la estabilización con fases aerobias y anóxicas. Señala los parámetros de control, fallas de los procesos y equipos, así como aspectos generales de mantenimiento
- Operación y recomendaciones generales para el mantenimiento de reactores anaerobios. Se hace una descripción general sobre el manejo y uso del biogás tomando en cuenta aspectos de mantenimiento y seguridad que se consideran en una planta de biogás. Como método de disposición final de lodos se describen los principales tipos de rellenos de lodos y los procedimientos generales de operación, los equipos requeridos, el sistema de control y la clausura de un relleno de lodos. Así mismo se muestra la opción de captura y aprovechamiento del biogás generado en el relleno y el manejo del lixiviado.

El libro contiene anexos que complementan los aspectos de operación. Así como algunos ejemplos de formatos que se pueden utilizar para el control de la operación de los sistemas descritos.



# 1

## ASPECTOS GENERALES

Este libro está encaminado a ser guía para la operación y mantenimiento de los sistemas de lodos residuales generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, con énfasis en las operaciones y procesos más utilizados en las plantas de tratamiento en México.

El manejo de los lodos residuales es uno de los aspectos más importantes del tratamiento de aguas residuales. Si no se retiran los lodos generados en los diferentes procesos de tratamiento de agua con la velocidad y en el momento adecuado, la planta no va a operar de manera eficiente y no se cumple con los estándares de calidad en el efluente. Para tener éxito en el tratamiento y disposición de lodos, se necesita una comprensión clara de la naturaleza de los lodos, cómo se producen y cómo deben manejarse. El manejo del lodo (ilustración 1.1) incluye operaciones unitarias tales como acondicionamiento, espesamiento, y deshidratación. Además, el tratamiento incluye los procesos de estabilización, que pueden llevarse a cabo en condiciones aerobias o anaerobias y finalmente la disposición final de los biosólidos.

### Objetivos del libro:

- Describir los componentes básicos de las operaciones y procesos de

tratamiento de lodos utilizados en México

- Comprender los objetivos de la operación y mantenimiento de los principales sistemas de tratamiento de lodos
- Conocer los procedimientos básicos para la evaluación del proceso

Para un funcionamiento adecuado del tren de tratamiento de lodos, es indispensable que los operadores cuenten con los conocimientos y herramientas teóricas para la correcta operación de cada una de las operaciones unitarias que intervienen, tales como el espesamiento y la deshidratación; así como de los procesos de estabilización de los lodos residuales (aerobios o anaerobios). La complejidad generalmente se incrementa con la capacidad de tratamiento de la planta. El manejo eficiente de los lodos también es importante debido a que la calidad de las corrientes de recirculación de estos procesos tendrán un impacto directo en los procesos de tratamiento del agua que pueden afectar el cumplimiento de las condiciones o normas de descarga. Solo teniendo la capacidad de diagnosticar problemas y ajustar los parámetros de operación se podrá lograr un eficiente manejo de los lodos residuales y de las corrientes que se recirculan al sistema de tratamiento de agua.

Ilustración 1.1 Ejemplos de acondicionamiento (parte superior izquierda), espesamiento (parte superior derecha), y equipo de deshidratación (parte inferior)



Para evitar confusiones, se van a revisar los principales términos que se utilizan en este libro y se dispone de un glosario que aparece en el anexo del mismo.

El término **lodo** se utiliza cuando se hace referencia a la mezcla de agua y sólidos que se bombea desde el fondo de los sedimentadores primarios o secundarios. Los términos **sólidos** y **residuos** se refieren a la porción de las partículas sólidas de los lodos que se compone de microorganismos, compuestos inorgánicos y

orgánicos, oligoelementos y nutrientes. Cuando el lodo se deshidrata hasta el punto en que ya no puede fluir como un líquido, se conoce como **torta o lodo deshidratado**. El término **biosólidos** se refiere al producto sólido principalmente orgánico que se produce en los procesos de tratamiento biológico de aguas y lodos residuales y que puede aprovecharse o utilizarse de acuerdo a las normas y disposiciones locales y nacionales. En la ilustración 1.2 se muestran ejemplos de torta de lodos y biosólidos.

Ilustración 1.2 Lodos deshidratados (torta) y biosólidos



Es muy importante entender cómo se generan sólidos en el proceso de tratamiento y reconocer las diferencias en las características del lodo. Los tipos más comunes de lodos de aguas residuales son los lodos primarios y los desechos de lodos activados o purga de lodos activados. Las plantas que utilizan tratamiento avanzado, tales como la precipitación química del fósforo, producen sólidos que pueden diferir de los lodos primarios o desechos de lodos activados.

El lodo primario se compone de sólidos sedimentados resultantes del tratamiento primario y que se separaron del agua residual. El lodo primario difiere de otros residuos generados en la planta y varía de una planta a otra, dependiendo de lo que se descarga en el sistema de alcantarillado. Los sólidos presentes en lodos primarios están compuestos principalmente de materiales fibrosos, celulosa, sólidos inorgánicos y arena. El lodo primario es normalmente más fácil de espesar y deshidratar que cualquier otro lodo producido durante el tratamiento. Un sedimentador primario puede utilizarse como una unidad de espesamiento mediante el mantenimiento de un manto de lodos y eliminando el lodo de manera intermitente. De esta manera el lodo se puede espesar de 2 a 7 por ciento de sólidos.

En las plantas que no eliminan la arena en las obras de captación, esta debe ser retirada del lodo primario antes de que se espese. Por lo general, desarenadores de vórtice (ilustración 1.3) se utilizan para este propósito.

Ilustración 1.3 Desarenador de vórtice (ciclón)



El desecho o purga de lodos activados, es la porción del lodo sedimentado que se retira de los sedimentadores secundarios y que no se regresa al proceso para mantener un tiempo de residencia celular medio óptimo o una relación alimento/microorganismos. Este lodo se produce por el contacto de las aguas residuales con los microorganismos, principalmente bacterias y también contiene compuestos orgánicos insolubles. Su desecho es más difícil de deshidratar que los lodos primarios, ya que contiene grandes cantidades de agua ligada que generalmente se retira del proceso en concentraciones entre 0.5 y 3.0 por ciento de sólidos, pero es generalmente menor del 1 por ciento.

Algunos sistemas de tratamiento de aguas residuales con remoción de nutrientes y todas las plantas de tratamiento físico-químico producen lodos químicos. Estos lodos se componen de floculantes químicos y precipitados. Los floculantes químicos incluyen polímeros orgánicos, sales de aluminio (sulfato de aluminio) y sales de hierro (cloruro férrico y sulfato ferroso). Los lodos químicos pueden ser difíciles de espesar y deshidratar. Los lodos de sulfato de aluminio son normalmente difíciles de deshidratar por su naturaleza gelatinosa.

Los lodos férricos y ferrosos se deshidratan más fácilmente y si se mezclan, pueden mejorar la deshidratación del lodo primario y secundario. La tEjemplos de los resultados de deshidratación obtenidos con diversos tipos de lodos. (WEF, 2001) compara los resultados de deshidratación obtenidos con diferentes tipos de lodos.

La mayoría de las plantas de tratamiento incluyen instalaciones para el tratamiento de lodos residuales con equipo para acondicionar, espesar y deshidratar lodos. Después del proceso de espesamiento, muchas plantas añaden otro proceso llamado estabilización. Existen varios tipos básicos de estabilización; aerobia, anaerobia y alcalina. Cuando el lodo se estabiliza usando uno de estos procesos, sus características cambian y esto afecta la capacidad de los sistemas de acondicionamiento y deshidratación.

### Procedimientos básicos para la evaluación del proceso

Existen varias pruebas básicas de laboratorio que proporcionan información sobre los parámetros clave utilizados para supervisar el funcionamiento y el rendimiento de los procesos de tratamiento de lodos. Estos parámetros

Tabla 1.1 Ejemplos de los resultados de deshidratación obtenidos con diversos tipos de lodos. (WEF, 2001)

Ejemplos de rendimiento de centrífuga con diversos tipos de lodos.	
Lodos	% de sólidos totales en la torta
Lodo primario	28-34
Lodo primario estabilizado anaeróticamente	35-40
Desecho de lodos activados	14-18
Desecho de lodos activados estabilizado anaeróticamente	14-18
Mezcla de lodo estabilizado aeróticamente (primario + desecho de lodos activados)	28-32
Mezcla de lodo estabilizado anaeróticamente (primario +desecho de lodos activados)	26-30
Lodo con sulfato de aluminio	12-16
Lodo con hierro	12-16
Lodo estabilizado aeróticamente por aireación extendida	18-22

Ilustración 1.4 Equipo y material de laboratorio para la medición de sólidos totales y volátiles



incluyen el porcentaje de sólidos totales y volátiles. Ambos, pueden determinarse a partir de una serie de procedimientos de laboratorio llevados a cabo en la misma muestra. En la ilustración 1.4 se muestra el equipamiento para estos procedimientos de laboratorio.

El procedimiento detallado se puede revisar en las Normas Oficiales Mexicanas para laboratorio (NMX-AA-034), o en los manuales de laboratorio de cada Institución o Empresa que se encarga de la planta de tratamiento.

En forma general, el procedimiento utilizado para determinar el porcentaje de sólidos totales y volátiles es el siguiente:

1. Pesar un crisol de evaporación vacío
2. Añadir una muestra de lodos bien mezclada (aproximadamente 25 mL) al crisol, y pesar el lodo y el crisol juntos
3. Colocar el crisol y la muestra en un baño de vapor o en un horno de secado a 98 °C y evaporar a sequedad
4. Colocar el crisol y la muestra en el horno de secado durante una hora a 103 °C
5. Pesar el crisol y la muestra seca juntos después de que se han enfriado completamente

A partir de los datos obtenidos mediante este método y utilizando la ecuación 1.1 se puede calcular el porcentaje de sólidos totales (% ST).

$$\% \text{ de ST} = \frac{\text{Masa de sólidos secos}}{\text{Masa de lodo húmedo}} \times 100$$

$$\% \text{ de ST} = \frac{\text{Peso del crisol y la muestra seca} - \text{peso del crisol}}{\text{Peso del crisol y muestra húmeda} - \text{peso de crisol}} \times 100$$

Ecuación 1.1

Un ejemplo de cálculo de porcentaje de sólidos totales se muestra a continuación. Los datos utilizados se obtuvieron del secado de la muestra y el procedimiento de pesaje descrito anteriormente.

- Peso del crisol = 20.29 g
- Peso del crisol con la muestra húmeda = 39.61 g
- Peso del crisol con la muestra seca = 20.88 g

Con los datos anteriores, introduzca los números en la ecuación y calcule el porcentaje de sólidos totales.

$$\% \text{ de ST} = \frac{\text{Masa de sólidos secos}}{\text{Masa de lodo húmedo}} \times 100$$

$$\% \text{ de ST} = \frac{\text{Peso del crisol y la muestra seca} - \text{peso del crisol}}{\text{Peso del crisol y muestra húmeda} - \text{peso de crisol}} \times 100$$

$$\% \text{ ST} = \frac{0.59 \text{ g}}{19.32 \text{ g}} \times 100$$

$$\% \text{ ST} = 3.05$$

El porcentaje de sólidos volátiles también puede determinarse a partir de la misma muestra. Para obtener los datos necesarios para calcular el porcentaje de sólidos volátiles, realizar la determinación de sólidos totales, a continuación, realizar los siguientes pasos adicionales:

6. Coloque el crisol y la muestra seca en un horno o mufla a 550 ° C hasta que se alcance una masa constante
7. Permita que la muestra se enfríe por completo en un desecador, pesar el crisol y las cenizas juntos

En la ecuación 1.2 se muestra la fórmula para calcular el porcentaje de sólidos volátiles.

$$\% SV = \frac{\text{Masa de sólidos volátiles}}{\text{Masa de sólidos secos}} \times 100$$

$$\% SV = \frac{\text{Peso del crisol y la muestra seca} - \text{Peso del crisol y cenizas}}{\text{Peso del crisol y la muestra seca} - \text{Peso del crisol}} \times 100$$

Ecuación 1.2

Para mostrar la forma de calcular el porcentaje de sólidos volátiles, se tomarán los siguientes datos:

- Peso del crisol = 20.29 g
- Peso del crisol y muestra seca = 20.88 g
- Peso del crisol y cenizas = 20.66 g

Introducir estos datos en la ecuación y calcular el porcentaje de sólidos volátiles.

$$\% SV = \frac{20.88 \text{ g} - 20.66 \text{ g}}{20.88 \text{ g} - 20.29 \text{ g}} \times 100$$

$$\% SV = \frac{0.22 \text{ g}}{0.59 \text{ g}} \times 100$$

$$\% SV = 37$$

Otras técnicas de laboratorio para los parámetros que más se utilizan en el tratamiento y manejo del lodo aparecen en los anexos del libro.

# 2

## OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LOS SISTEMAS DE ESPESAMIENTO Y DESHIDRATACIÓN DE LODOS RESIDUALES

### 2.1. ACONDICIONAMIENTO DE LODOS

El acondicionamiento es importante para obtener un adecuado espesamiento o deshidratación de lodos. Los aspectos teóricos y de diseño del acondicionamiento y deshidratación de lodos aparecen en el MAPAS, en los capítulos 6 y 12 del libro "Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: tratamiento y disposición de lodos.

Los objetivos de esta unidad son los siguientes:

- Explicar los procesos que intervienen en el acondicionamiento
- Indicar cómo se relacionan los procesos de acondicionamiento, espesamiento, deshidratación y otros procesos de tratamiento
- Identificar y describir la función de los diversos tipos de equipos de acondicionamiento
- Desarrollar un plan de resolución de problemas para procesos de acondicionamiento
- Explicar los aspectos relacionados con la seguridad y medidas relacionadas con el manejo de los productos químicos utilizados para el acondicionamiento

### 2.1.1 OPERACIÓN DEL SISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO DE LODOS

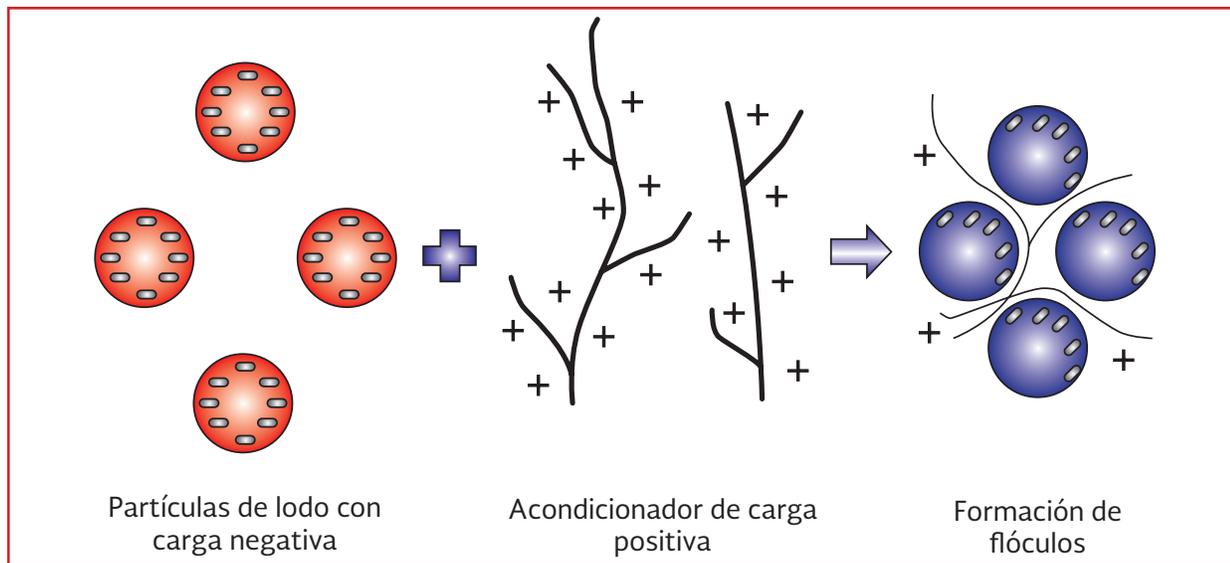
El acondicionamiento adecuado es fundamental en el proceso de manejo ya que permite preparar los lodos producidos en el proceso de tratamiento para el espesamiento y la deshidratación.

Generalmente, el lodo está cargado negativamente, por lo que sus partículas de lodo se repelen entre sí. La adición de un acondicionador con carga positiva (ilustración 2.1) supera este efecto (coagulación) y permite que las partículas más pequeñas se unan formando masas más grandes llamadas flóculos (floculación). El acondicionamiento permite que el agua se drene de los sólidos más fácilmente.

Los productos químicos para el acondicionamiento se seleccionan considerando su capacidad para influir sobre la carga de las partículas del lodo. Los productos para el acondicionamiento de uso más frecuente son los productos químicos inorgánicos, como la cal y el cloruro férrico y los productos químicos orgánicos, como polímeros.

Las sales férricas y la cal fueron anteriormente los productos químicos más populares para

Ilustración 2.1 Acondicionamiento de Lodos - coagulación y floculación (Water Environment Federation, 2001)



el acondicionamiento y se utilizan para la deshidratación usando filtros de vacío y filtros de presión. Sin embargo, los filtros de vacío se utilizan poco y muchas plantas ahora utilizan productos químicos orgánicos (polímeros) para acondicionar los lodos antes de la deshidratación por filtración a presión.

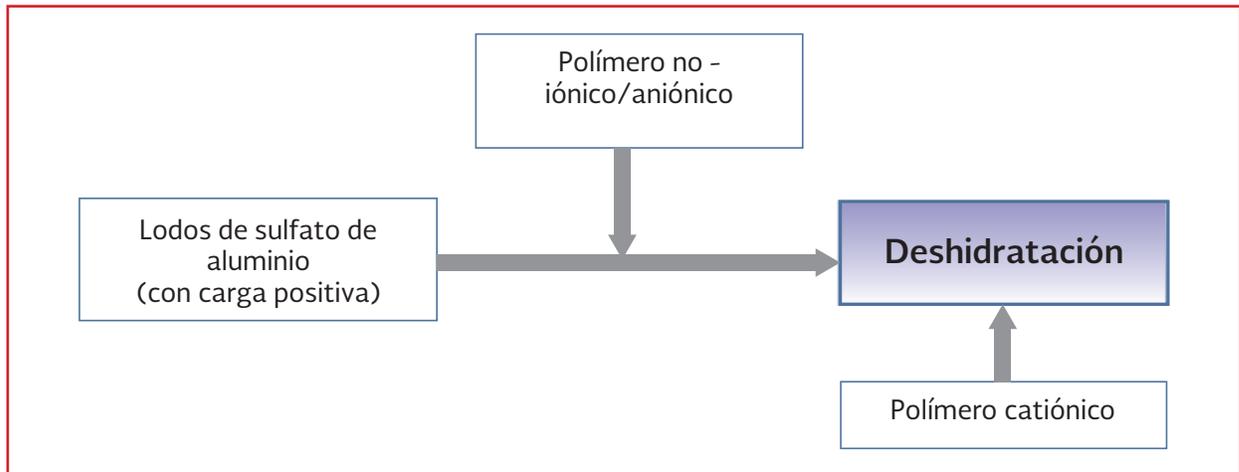
El acondicionamiento con polímeros es el más utilizado en la actualidad. Estos agentes orgánicos son de alto peso molecular (también denominados polielectrolitos). Los polímeros pueden transportar diferentes cargas, los cargados positivamente se denominan catiónicos; los cargados negativamente se denominan aniónicos y los polímeros neutros se denominan no iónicos. Los polímeros catiónicos son el tipo más utilizado en las plantas de tratamiento de aguas residuales para acondicionamiento de los lodos. Sin embargo, es necesario realizar pruebas de jarras para la determinación del agente orgánico. Por ejemplo, si una planta de aguas residuales tiene un lodo con carga positiva, probablemente sea necesario la adición de un polímero no iónico o aniónico antes del acondicionamiento con un polímero

catiónico (ilustración 2.2). Las pruebas piloto de los lodos determinarán el polímero que se debe utilizar.

Diferentes factores influyen en la selección de un acondicionador químico. Estos incluyen el rendimiento, requisitos de manejo de materiales y almacenamiento, el tipo de equipos utilizados para el espesamiento y la deshidratación, las opciones de disposición y los factores económicos.

Los requisitos de rendimiento para un producto químico están fuertemente influenciados por los procesos de lodos utilizados después del acondicionamiento. Por ejemplo, el porcentaje de sólidos requerido puede ser diferente para el composteo, la aplicación al suelo o la incineración. El rendimiento también se mide por la producción de un filtrado o centrifugado de alta calidad, que generalmente se recircula a obra de toma de la planta de tratamiento. Los problemas de calidad incluyen una alta concentración de sólidos, alta carga orgánica, pH extremo (es decir, ácido o básico), y la producción de olores molestos. Los problemas

Ilustración 2.2 Ejemplo de la utilización de polímeros de carga diferente en el acondicionamiento de lodos (Water Environment Federation, 2001)



de calidad son motivo de preocupación, ya que pueden crear problemas en el proceso de tratamiento principal.

El costo de la eliminación o disposición de los lodos afecta la elección de los productos químicos para el acondicionamiento. Los acondicionadores inorgánicos aumentan significativamente la generación de lodos, incrementando el costo de la disposición. En la tabla 2.1 aparecen diferentes opciones para el almacenamiento de los acondicionadores. La forma de almacenamiento y el manejo del lodo producido son criterios importantes para selección. Éstos aspectos se discuten en detalle en capítulos posteriores.

En la actualidad, la mayoría de las plantas de tratamiento de aguas residuales utilizan polímeros en lugar de productos químicos

inorgánicos. Los polímeros producen una torta seca y no incrementan la masa de lodo como lo hacen los acondicionadores inorgánicos. Los polímeros se manejan fácilmente y suelen ser menos peligrosos que la mayoría de los productos químicos inorgánicos. Como se mencionó anteriormente, el peso del material para su eliminación es uno de los factores que determinan el costo total de disposición. Los polímeros pueden lograr el mismo o un mejor rendimiento de deshidratación que los productos químicos inorgánicos incrementando mucho menos el peso del material deshidratado. Como se muestra en el ejemplo 2.1, esto se traduce en un menor costo de disposición.

Para determinar el ahorro global, es necesario primero calcular la producción diaria de lodos de la planta.

Tabla 2.1 Opciones de almacenamiento para los acondicionadores (Water Environment Federation, 2001)

Químico	Opciones de almacenamiento
Cal hidratada	Silo, bolsas
Cal viva	Silo, bolsas
Cloruro férrico	Depósito de líquido a granel
Polímero, seco	Bolsas, contenedores
Polímero, emulsión	Bidones
Polímero, líquido	Tanque de líquido a granel, bidones

Se presenta un ejemplo del costo del acondicionamiento utilizando cloruro férrico y otro usando polímero para comprobar que el costo de disposición es menor en sistemas que utilizan polímeros.

**Ejemplo 2.1 Costo para la disposición de lodos acondicionados con cloruro férrico**

Datos:

- Óptima dosificación de cloruro férrico = 50 kg / tonelada de lodo seco (Nota: Esto se determina mediante una prueba de jarras)
- Costo de disposición = \$ 1 600 / t de lodo seco
- Cantidad de lodo a disposición = 1 500 kg de lodos secos
- Equivalencia: 1 t = 1 000 kg

1. Cálculo del peso total de lodos a disposición:

El peso total de lodos = peso de los lodos a disposición + peso de acondicionador = 1 500 kg de sólidos secos + 50 kg de cloruro férrico = 1 550 kg

2. Se convierte el peso a toneladas:

- Peso total de lodos = 1 550 kg = 1.55 t

3. Se calcula el costo de disposición (Cd):

$$Cd = 1.55 t \left( \frac{\$ 1 600}{t} \right) = \$2 480/t \text{ de sólidos secos}$$

**Ejemplo 2.2 Costo para la disposición de los lodos acondicionados con polímero**

Datos:

- Dosis óptima de polímero = 3 kg / t de lodo seco
- Costo de disposición = \$ 1 600 / t
- Peso de los sólidos a ser eliminados = 1 500 kg de lodos secos
- Equivalencia: 1 t = 1 000 kg

1. Cálculo del peso total de lodos a disposición:

El peso total de lodos = peso de los sólidos a disposición + peso del polímero = 1 500 kg de sólidos secos + 3 kg de polímero = 1 503 kg

2. Se convierte el peso a toneladas:

- Peso total de lodos = 1 503 kg = 1.503 t

3. A continuación, se calcula el costo de disposición (Cd):

$$Cd = 1.503 t \left( \frac{\$ 1 600}{t} \right) = \$2 405/t \text{ de sólidos secos}$$

Durante el acondicionamiento, las pruebas de laboratorio se utilizan no sólo para seleccionar los productos químicos y determinar las dosis adecuadas, sino también para controlar el rendimiento del sistema. El control del proceso y seguimiento del acondicionamiento de lodos es muy importante desde ambos puntos de vista, económico y operacional. El uso de gran cantidad de acondicionador es costoso y los objetivos deseados no se llegan a lograr. Si se usa muy poco acondicionador, los resultados de deshidratación pueden ser pobres, aumentando el costo de manejo y disposición. A continuación se describen algunas pruebas básicas útiles para evaluar el acondicionamiento.

## Ensayos o prueba de jarras

Se utiliza habitualmente para seleccionar los agentes o productos para el acondicionamiento, especialmente cuando una gran variedad de productos potencialmente eficaces están disponibles en el mercado. Permite evaluar el rendimiento de diferentes acondicionadores a diversas concentraciones. Los pasos para realizar una prueba de jarra son los siguientes:

1. Llenar los recipientes de 1 L (por ejemplo, vasos de precipitados) con 600 mL de lodo
2. Colocar los recipientes bajo las paletas del agitador de la banda. Las paletas no deben estar en contacto con el fondo del vaso de precipitado
3. Ajustar la velocidad del agitador a 75-100 revoluciones por minuto
4. Añadir diferentes dosis de las sustancias químicas a los vasos de precipitado
5. Después de 30 segundos, detener la agitación

6. Registrar la formación de flóculos y las características de sedimentación

Cuando se determina el producto químico adecuado y su dosis óptima, se presenta una sedimentación rápida, con flóculos grandes y fuertes y un sobrenadante transparente.

Otra prueba de laboratorio, la prueba de tiempo de filtración (también conocida como la prueba del embudo Buchner) a menudo se utiliza para confirmar los resultados de la prueba de jarra. Para realizar una prueba de tiempo de filtración, use la dosis óptima obtenida de la prueba de jarras. En la ilustración 2.4 se muestra el equipo necesario para llevar a cabo esta prueba.

Para la prueba de tiempo de filtración, se preparan las muestras de la misma manera que para la prueba de jarras y se mezcla durante 30 segundos, a continuación:

1. Coloque un embudo Buchner a través de un tapón de goma en la parte superior

Ilustración 2.3 Aparato de prueba de jarras.

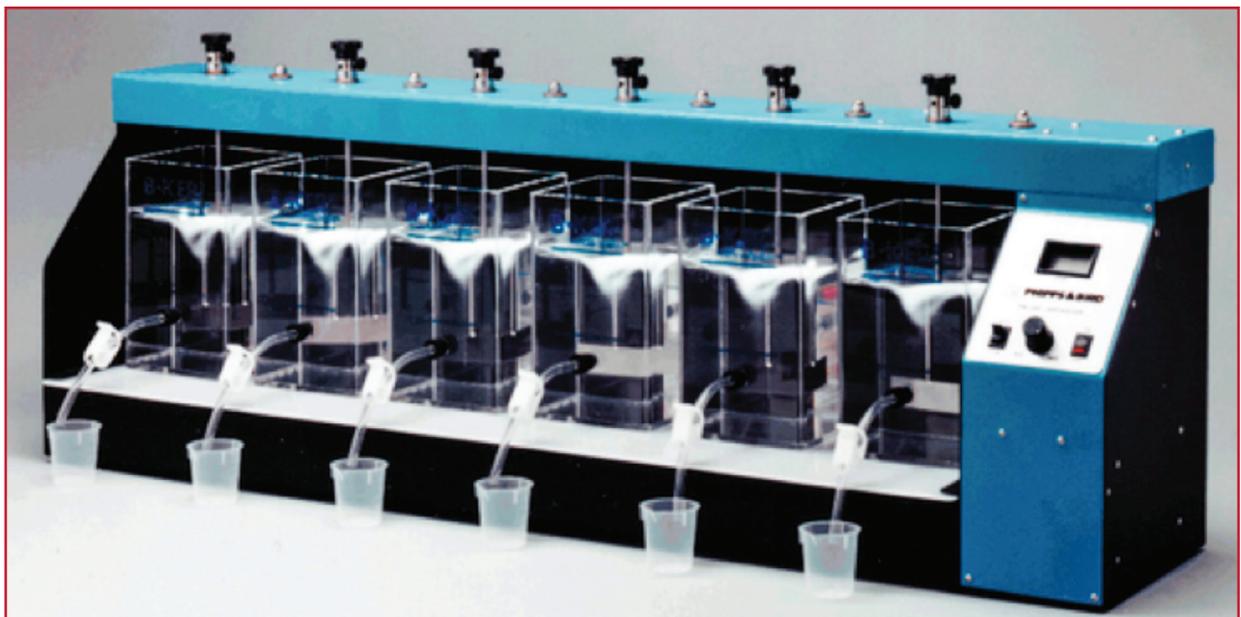
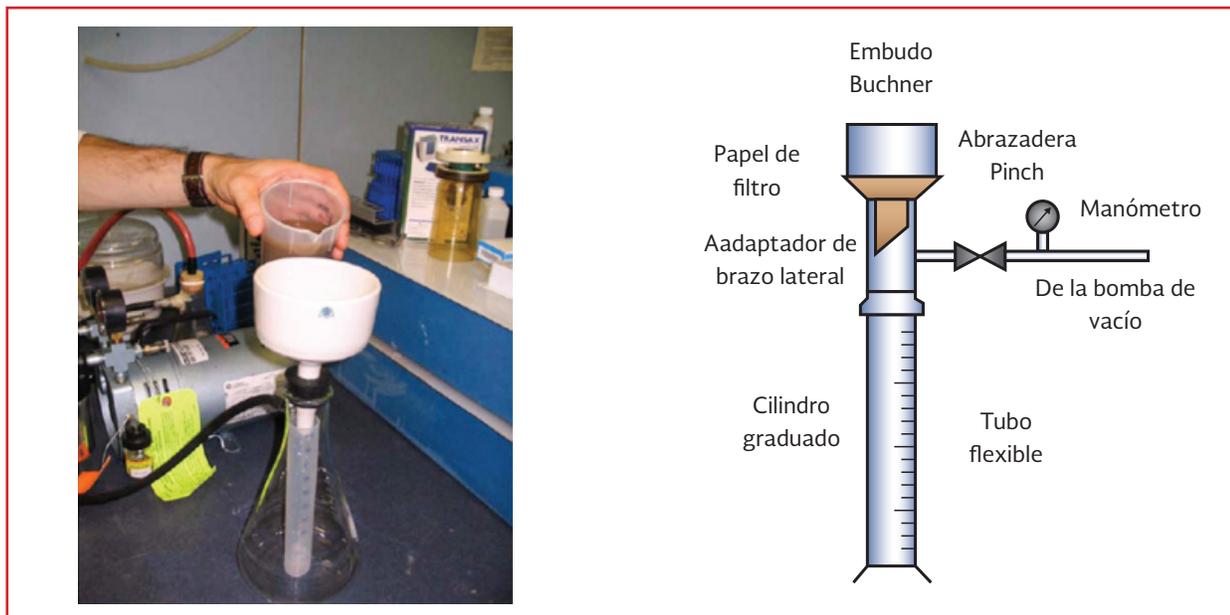


Ilustración 2.4 Aparato utilizado para la prueba de tiempo de filtración



del cilindro graduado

2. Coloque un filtro de papel en el embudo
3. Vierta 100 ml de lodo acondicionamiento en el embudo
4. Después de 2 minutos de drenaje por gravedad, encienda la bomba de vacío
5. A intervalos de 15 segundos, mida la cantidad de filtrado liberado hasta que el vacío se rompa y pase a cero
6. Registre el tiempo y el volumen de filtrado

Seleccione el producto químico y la dosis que produce mayor volumen de agua libre (filtrado) en el menor tiempo.

Existen otras pruebas de laboratorio que se muestran en la Tabla 2.2. Estas pruebas están diseñadas para simular el funcionamiento de equipos específicos y se pueden utilizar para solucionar problemas de operación del equipo y optimizar los productos químicos de acondicionamiento utilizados.

El operador debe ser capaz de aplicar los resultados de pruebas de laboratorio, como los de la prueba de jarras a los procesos reales y saber realizar los cálculos necesarios.

En primer lugar, se indicará cómo calcular una concentración de polímero.

Tabla 2.2 Pruebas que se utilizan para optimizar el funcionamiento de los diversos tipos de equipos de manejo de lodos

Pruebas de laboratorio	Equipos relacionados
Prueba de tiempo de filtración modificada	Espesador de banda por gravedad Filtro prensa de bandas por gravedad
Prueba velocidad ascensional	Unidad de flotación por aire disuelto
Prueba de filtro de hoja modificado	Filtros prensa de banda

### Ejemplo 2.3 Cálculo de la dosis de polímero

Se disolvieron 8 gramos de polímero seco en 500 mL de agua. Calcule la concentración en  $\text{mg L}^{-1}$

$$8 \text{ g} \left( \frac{1000 \text{ mg}}{\text{g}} \right) = 8000 \text{ mg de polímero}$$

$$\left( \frac{8000 \text{ mg}}{500 \text{ mL}} \right) \left( \frac{1000 \text{ mL}}{1 \text{ L}} \right) = 16000 \text{ mg L}^{-1}$$

### Ejemplo 2.4 Calcular la cantidad de acondicionador requerido a partir de datos obtenidos en la prueba de jarras

A partir de la prueba de jarras se encontró que la adición de 8 mL de una solución de polímero con una concentración de 10 000  $\text{mg L}^{-1}$  fue la que obtuvo mejores resultados. A partir de este resultado calcule la cantidad de polímero que se debe agregar por litro de lodo. En la prueba de jarras se utilizaron 700 mL de lodo.

$$D_p = C_{sp} \times \frac{\text{Volumen de la solución de polímero añadido}}{\text{Volumen de muestra de lodos}}$$

$$D_p = 10000 \text{ mg L}^{-1} \times \frac{8 \text{ mL}}{700 \text{ mL}} = 114.28 \text{ mg L}^{-1}$$

Donde:

$$\begin{aligned} D_p &= \text{Dosificación de polímero} \\ C_{sp} &= \text{Concentración de la solución de polímero} \end{aligned}$$

Se debe agregar una dosis de 114  $\text{mg L}^{-1}$  de lodo.

También es importante saber el porcentaje de sólidos totales de la muestra de lodos utilizados en la prueba de jarras. Esto le dará una base matemática para ajustar la dosis de polímero si el porcentaje promedio total de sólidos en el

proceso cambia. En el ejemplo se va a utilizar una concentración de sólidos totales de 4.6 por ciento para los cálculos. La tasa de alimentación de polímero se puede calcular multiplicando la dosis de polímero por la velocidad o tasa de alimentación de los lodos (ver más abajo).

La velocidad o tasa de alimentación de polímero = (dosificación de polímero) (tasa de alimentación de lodos)

El ejemplo 2.5 presenta paso a paso un cálculo de la tasa de alimentación de polímero.

### Ejemplo 2.5 Cálculo de la tasa de alimentación de polímero

Datos:

- Dosificación de polímero = 160  $\text{mg L}^{-1}$
- Tasa o velocidad de flujo de lodos = 8  $\text{L s}^{-1}$
- Equivalencias:
  - 1 kg = 1 000 000 mg
  - 1 min = 60 s
  - 1 h = 60 min
  - 1 d = 24 h

Velocidad de alimentación de polímero = (dosificación de polímero) (tasa de flujo de lodo).

$$= 160 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times 8 \frac{\text{L}}{\text{s}} = 1280 \text{ mg s}^{-1}$$

Convertir a  $\text{kg d}^{-1}$ :

$$1280 \frac{\text{mg}}{\text{s}} \times 60 \frac{\text{s}}{\text{min}} \times 60 \frac{\text{min}}{\text{h}} \times 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000000 \text{ mg}} = 110.59 \text{ kg d}^{-1}$$

Para tener una mejor comprensión, en el ejemplo 2.6 se calculará la cantidad de polímero que se está utilizando por tonelada de lodos secos.

### Ejemplo 2.6 Cálculo de polímero por tonelada de lodo seco.

Datos:

- Velocidad de flujo de lodos = 8 L s<sup>-1</sup>
- Porcentaje de sólidos = 4.6%
- Velocidad de alimentación de polímero = 69 kg d<sup>-1</sup>
- Equivalencias:
  - 1 L de agua pesa 1 kg
  - 1 min = 60 s
  - 1 h = 60 min
  - 1 d = 24 h
  - 1 t = 1000 kg

1. Se convierte la tasa de flujo de lodo al peso de lodo acondicionado por día:

Peso de los lodos ( $P_l$ ) = (tasa de flujo de lodo) (factores de conversión)

$$P_l = \left(8 \frac{L}{s}\right) \left(60 \frac{s}{min}\right) \left(60 \frac{min}{h}\right) \left(24 \frac{h}{d}\right) \left(1 \frac{kg}{L}\right) \left(\frac{1 t}{1000 kg}\right)$$
$$P_l = 691.2 t \text{ de lodo } d^{-1}$$

2. A continuación, se calcula el peso de sólidos secos acondicionados por día:

Peso de sólidos ( $P_s$ ) = (peso del lodo) (porcentaje sólidos)

- $P_s = 691.2 t \text{ de lodo } d^{-1} \times 0.046$
- $P_s = 31.79 t \text{ de sólidos secos } d^{-1}$

3. A continuación, se calcula el peso de polímero por tonelada de sólidos secos ( $P_p$ ):

$$P_p = \frac{\text{Velocidad de alimentación de polímero}}{\text{Peso de sólidos}}$$
$$P_p = \frac{69 \text{ kg de polímero } d^{-1}}{31.79 t \text{ de sólidos secos } d^{-1}}$$

$P_p = 2.17 \text{ kg de polímero } t^{-1} \text{ de sólidos secos}$

### 2.1.2 ACONDICIONADORES INORGÁNICOS

Se van a revisar los acondicionadores inorgánicos más usados: la cal y el cloruro férrico.

#### Cal viva o cal hidratada

La cal se utiliza normalmente en conjunto con el cloruro férrico. Se utiliza para elevar el pH, el cual disminuye como resultado de la adición de cloruro férrico. La adición de cal también proporciona cierto control de olores molestos porque los compuestos de sulfuro que producen olor se convierten en formas no volátiles. Otro de los beneficios es que la cal reacciona con el bicarbonato presente en el lodo y forma el carbonato de calcio ( $CaCO_3$ ), que tiene una estructura granular. La presencia de este compuesto reduce la compresibilidad de los lodos y mejora el drenaje de los sólidos.

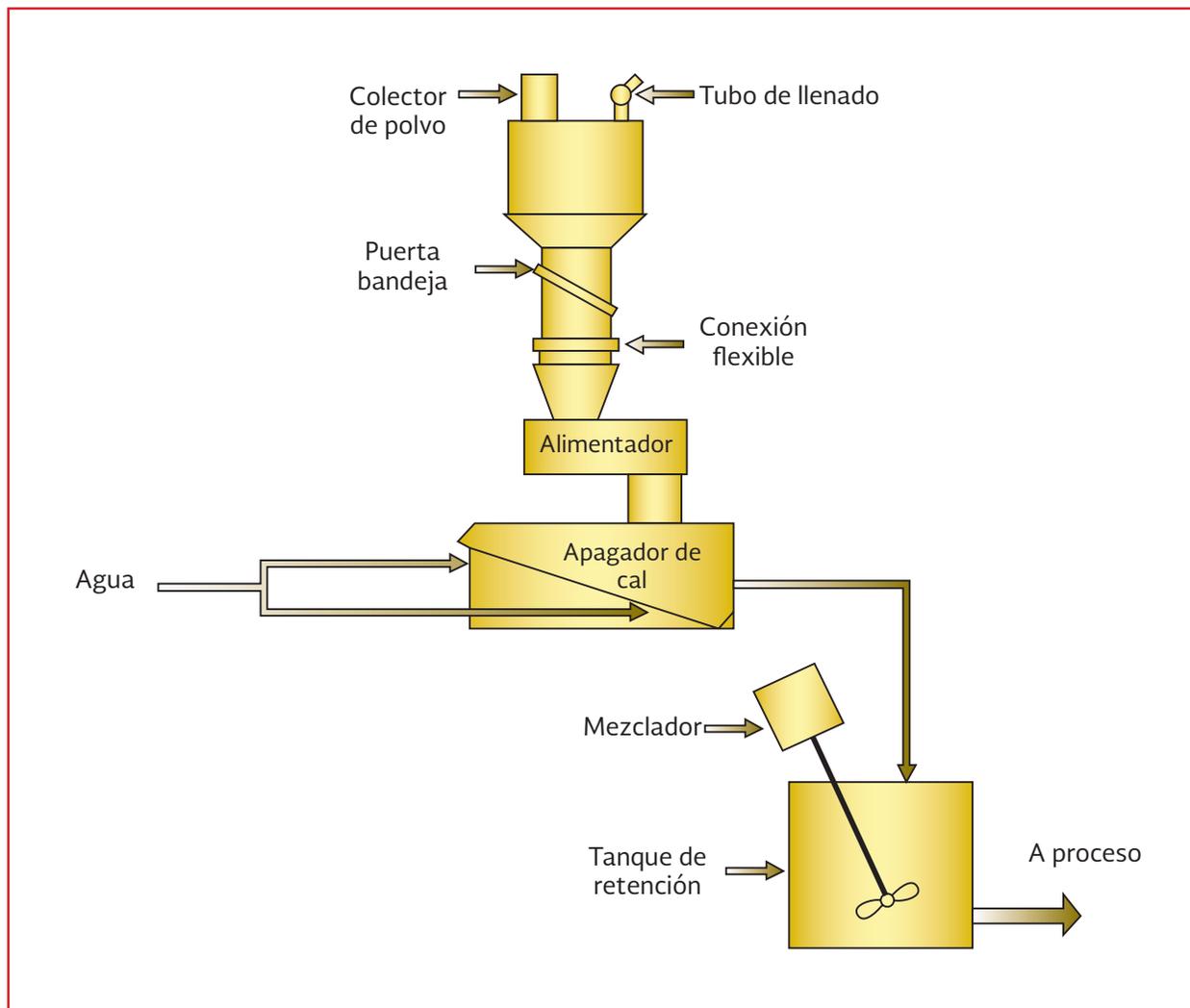
Los tipos de cal utilizados son la cal viva ( $CaO$ ) y cal hidratada  $Ca(OH)_2$ , los cuales se entregan como material seco. Las instalaciones pequeñas utilizan bolsas de cal hidratada, mientras que las instalaciones de mayor tamaño suelen utilizar grandes cantidades de cal viva que se almacenan en silos (ilustración 2.5). La cal hidratada se mezcla bien con el agua; sin embargo su costo unitario es superior al de la cal viva. Por este motivo, la cal hidratada se utiliza normalmente en pequeñas plantas. La cal viva es más rentable para grandes plantas de tratamiento.

La cal viva (cal de gravilla) es menos costosa, pero requiere mayor mano de obra para su uso que la cal hidratada. Dado que se requiere el apagado. El apagado requiere equipo especial (ilustración

Ilustración 2.5 Almacenamiento de cal



Ilustración 2.6 Equipos de apagado – Cal (Water Environment Federation, 2001)



2.6) que también aumenta los costos de manejo. Para apagar la cal viva, se añade una parte de cal viva a cuatro partes de agua para formar una solución al 25 por ciento de lechada de cal. Debido a que el apagado de la cal es un proceso exotérmico, se genera calor cuando se combinan la cal viva y el agua; se recomienda precaución. La temperatura óptima de apagado es 74 a 77 °C (165 a 170 °F). Cuando la temperatura está fuera de este rango, puede dar lugar a una cal apagada de forma incompleta.

La cal se almacena en recipientes y estancos para evitar la absorción de la humedad atmosférica, lo que la hace inestable. La cal seca no es corrosiva para el acero o el concreto, por lo tanto se pueden utilizar como recipientes de almacenamiento. Si la cal se humedece, se corroe el acero. El almacenamiento de la cal viva es especialmente difícil porque absorbe fácilmente la humedad y forma grumos. Las lechadas de cal podrían recubrir las tuberías y equipos y causar obstrucciones. Se deben instalar líneas de agua dulce para el lavado de las instalaciones, en puntos clave a lo largo del sistema, para evitar la formación de obstrucciones.

La seguridad es una consideración clave para el uso de la cal. Esta puede causar quemaduras graves si entra en contacto con la piel y/o los ojos. También es irritante para las mucosas y los pulmones. Consulte las hojas de datos de seguridad de materiales para conocer las consideraciones de seguridad asociadas con las diversas formas de la cal. Además, puesto que el apagado de la cal es un proceso exotérmico, se generan altas temperaturas durante la reacción química que potencialmente pueden ser peligrosas. Siempre se deben observar buenas prácticas de seguridad que se enumeran a continuación cuando se trabaja con cal:

- Utilice protección ocular (gafas/careta)
- Utilice protección respiratoria
- Use guantes de goma
- Use ropa de manga larga
- Use un delantal de goma, y
- Trabaje en un ambiente libre de polvo y bien ventilado

### **Cloruro férrico**

El cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ) se utiliza como un coagulante en el proceso de acondicionamiento. El mecanismo por el cual las sales férricas acondicionan los lodos es la formación de complejos solubles con carga positiva. Estos se forman cuando se añade cloruro férrico al agua. Estos complejos promueven la coagulación por adsorción y neutralización de carga.

Cuando en el acondicionamiento se utiliza cal con cloruro férrico, se prefieren puntos separados para la adición. El cloruro férrico debe añadirse antes de la cal, debido a que si se adicionan al mismo tiempo disminuye el efecto de coagulación / floculación del cloruro férrico. La dosis de cal añadida es típicamente de dos a cuatro veces mayor que la de cloruro férrico.

El cloruro férrico se recibe y se almacena en estado líquido. Es muy corrosivo para los metales y se debe almacenar por encima del suelo, en tanques de acero ahulados, plástico, o tanques de plástico reforzado con fibra de vidrio (ilustración 2.7). Aunque una solución de cloruro férrico es bastante estable, se necesita un control de temperatura en las zonas más frías, ya que se cristaliza a bajas temperaturas. Las medidas de seguridad deben tenerse siempre en cuenta cuando se trabaja con el cloruro férrico, ya que tiene un pH bajo. Estas precauciones son las mismas que se deben observar cuando

Ilustración 2.7 Tanque de almacenamiento de cloruro férrico



se trabaje con cualquier otro material ácido. Siempre alimente  $\text{FeCl}_3$  al agua, no el agua al  $\text{FeCl}_3$  y protéjase del contacto directo con la sustancia.

### 2.1.3 ACONDICIONADORES ORGÁNICOS

Los polímeros orgánicos son muy versátiles en el acondicionamiento de lodos. Como se señaló anteriormente, los polímeros se utilizan con más frecuencia que los químicos inorgánicos debido a que mejoran el rendimiento de la deshidratación, agregan menos masa, no disminuyen el poder calorífico del lodo, su manejo es sencillo, no contribuyen a los problemas de mantenimiento y operación, y se pueden utilizar con todos los tipos de equipos para espesamiento y deshidratación de lodos (ilustración 2.8).

Los polímeros pueden usarse para mejorar el rendimiento del espesamiento ya que permiten incrementar la carga de lodos a la unidad de espesamiento; mejorar la captación de sólidos; y/o propiciar el aumento de la concentración de

sólidos en el lodo espesado, en el material flotante o en la descarga del espesador. El polímero también mejorará el rendimiento del equipo de deshidratación. De hecho, algunos equipos como los filtros prensa de banda, requieren para un buen desempeño o rendimiento que el lodo esté acondicionado en primer lugar con polímero. El uso de polímeros en los equipos de deshidratación aumentan el porcentaje de sólidos de la torta descargada de la unidad y la tasa de captura de sólidos.

Los polímeros usados en la deshidratación de lodos son productos químicos solubles en agua, por lo general hechos de monómeros de acrilamida. Los polímeros de poliacrilamida se producen cuando la acrilamida y otros monómeros se combinan para formar moléculas largas y eslabones de una cadena (ilustración 2.9). La carga del polímero se determina por la carga del monómero. Como se dijo anteriormente, polímeros catiónicos (con carga positiva) se utilizan normalmente para el acondicionamiento porque las partículas de lodo están cargadas negativamente.

Ilustración 2.8 Equipos para el espesamiento y deshidratación. (a) Unidad de flotación por aire disuelto, (b) centrífuga, (c) filtro prensa de banda, (d) filtro de presión



a) Unidad de flotación por aire disuelto



b) Centrífuga



c) Filtro prensa de banda



d) Filtro prensa de placas

Son varios los criterios cualitativos que se utilizan para clasificar los polímeros

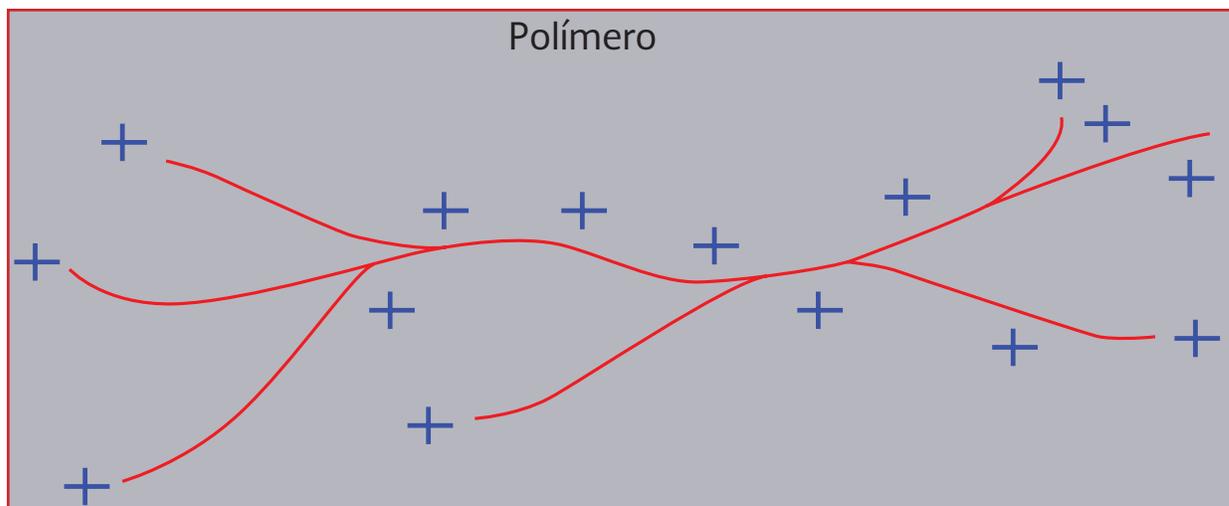
- Densidad de carga, que se determina por la cantidad de monómero cargado en el polímero
- Peso molecular, que se determina por la longitud de la cadena de monómero
- Tipo de monómero o monómeros utilizados para formar el polímero

Las características de las partículas de los lodos que se van a tratar determinarán el peso molecular del polímero requerido y densidad de carga. Por ejemplo, se requiere una mayor densidad de carga cuando las partículas a ser acondicionadas son finas y cuando la hidratación o las cargas superficiales son altas. También recuerde, se requieren polímeros con cargas negativas (aniónicos) o sin carga (no iónico) para ciertas aplicaciones.

El mejor polímero para una aplicación específica es el que se selecciona en la planta de tratamiento mediante la realización de pruebas a escala laboratorio y a escala real utilizando varios tipos de polímeros y caracterizando los sólidos generados. Usted puede utilizar la prueba de jarras y las pruebas de filtración mencionadas anteriormente a nivel laboratorio y planta piloto con varios polímeros y comprobar los resultados a escala real en su equipo de espesamiento y deshidratación.

Los polímeros se suministran habitualmente como polvos secos o líquidos. Algunos fabricantes también suministran polímero en forma de gel, sin embargo esto no es común. La vida útil de polímero seco suele ser de varios años. La vida útil del líquido es mucho más corta, normalmente de varios meses. La selección de la forma física del polímero (seco, líquido o gel) depende de varios factores incluyendo: el tipo

Ilustración 2.9 Representación visual de la molécula de polímero



y las características de los lodos a procesar; el equipo utilizado; y a menudo, la preferencia del personal de la planta que trabaja en el acondicionamiento y deshidratación de lodos.

Los polímeros secos están disponibles en forma de polvo, gránulos, bolas o en forma de copos, dependiendo del proceso de fabricación. Los polímeros secos deberán almacenarse en un lugar fresco y seco. Si estos polímeros están expuestos a la humedad, tienden a formar grumos, haciéndolos inservibles. Los polímeros secos contienen 94 a 100 por ciento de producto activo (la cantidad de producto químico polimérico contenido en la materia), siendo por lo tanto el costo de envío más bajo por unidad de peso de producto activo. Sin embargo, debido a que los polímeros secos son difíciles de preparar adecuadamente, a menudo todo el producto activo no se utiliza de manera eficiente.

Las formas líquidas son generalmente menos estables que los polímeros secos y por lo tanto, tienen tiempos de almacenamiento más cortos que los polímeros secos y también son más caros. Sin embargo, los polímeros líquidos siguen siendo muy populares debido a la facilidad con

la que se preparan y se alimentan al proceso. Los polímeros líquidos tienen dos presentaciones: soluciones y emulsiones

Los polímeros en solución se forman por polimerización en agua. Su contenido de producto activo puede variar de 3 a 50 por ciento en peso, aunque el rango más típico utilizado en aplicaciones de acondicionamiento de lodos es de 5 a 10 por ciento. Esto es porque las soluciones más diluidas tienen viscosidades más bajas, lo que permite un manejo más fácil del material. Los polímeros en solución también se pueden clasificar como homopolímeros, copolímeros, o de Mannich. Los homopolímeros contienen sólo un tipo de monómero, mientras que los copolímeros se componen de al menos dos tipos de monómeros. Las soluciones de homopolímero y copolímero tienen de bajo a mediano peso molecular.

Los polímeros de Mannich son los producidos cuando poliacrilamidas reaccionan con formaldehído y dimetilamina. Se menciona la presencia de formaldehído, un compuesto carcinógeno, en estos polímeros.

Los polímeros de Mannich tienen alto peso molecular y viscosidad alta. Estos se manejan y se alimentan por lotes a los procesos de lodos a través de bombas lobulares o de engranes. La viscosidad es una preocupación en el bombeo y para mantenerla en un rango aceptable, la concentración del producto activo se mantiene baja, por lo general entre 2 a 10 por ciento. Los costos de transporte pueden ser muy altos para los polímeros Mannich debido a su bajo contenido de producto activo.

Los polímeros en emulsión contienen producto activo de 30 a 50 por ciento y pueden llevar a un porcentaje significativamente mayor de producto activo a viscosidades mucho más bajas que los de Mannich. El proceso de preparación de polímeros en emulsión es un poco más complicado que el de Mannich porque la emulsión debe romperse mecánicamente antes de la dosificación. Bombas dosificadoras se utilizan generalmente para alimentar emulsiones a los procesos de lodos.

Al seleccionar el tipo de polímero, se debe considerar el equilibrio entre los costos directos y los costos de transporte y la cantidad de mano de obra necesaria para trabajar con cada uno de ellos (Tabla 2.3). Generalmente, en los Estados

Unidos los polímeros de Mannich se utilizan en las plantas con capacidad mayor a 38 000 m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup> y las plantas más pequeñas tienden a usar emulsiones o polímeros secos.

Ahora se examinará el equipo utilizado para preparar adecuadamente por lotes y alimentar polímero y polímeros secos. El equipo requerido varía con el tipo de polímero que se utiliza. En la ilustración 2.10 se presenta un esquema de un sistema típico de polímero seco.

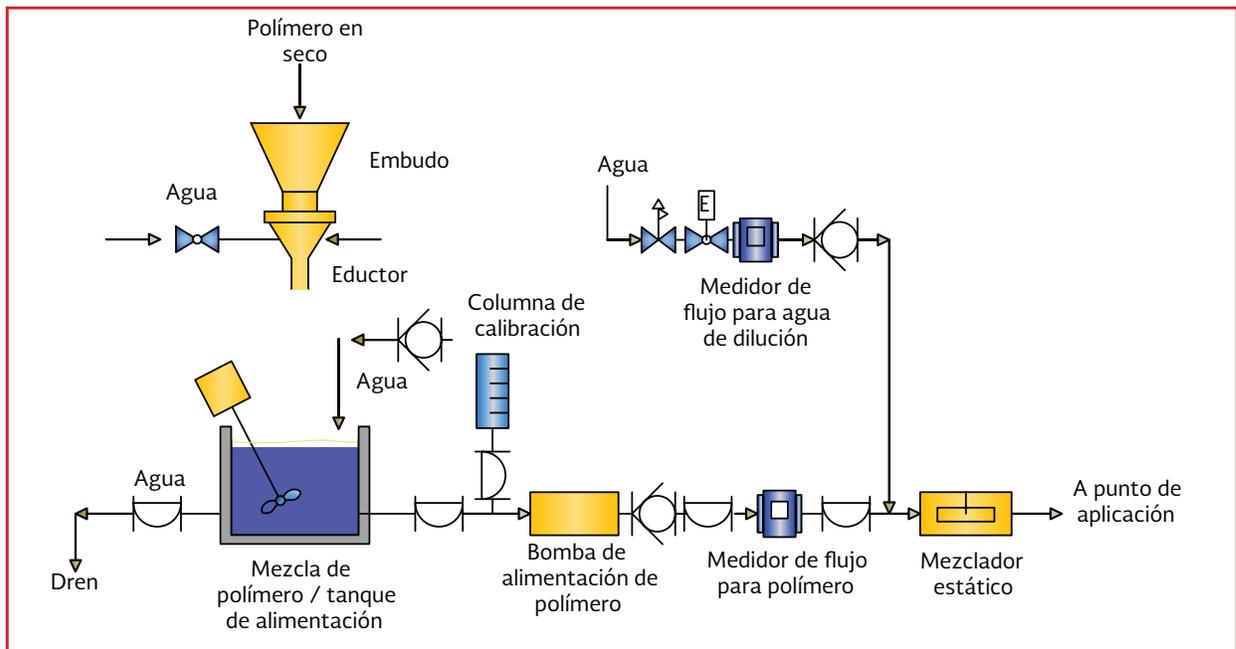
Las soluciones de polímero seco se preparan al hacer manualmente lotes o mediante el uso de un sistema de distribución automática disponible comercialmente. Independientemente del método utilizado, se debe seguir la siguiente secuencia de eventos:

1. Prehumectación del polímero
2. Mezcla con agua adicional y madurarlo en un tanque de mezcla
3. Bombeo desde el tanque de mezcla
4. Adición de agua para el logro de la concentración deseada
5. Mezcla del agua de dilución y la solución de polímero
6. Alimentación al proceso de manejo de lodos

Tabla 2.3 Comparación de tipos de polímeros

Tipo de polímero	Vida útil	Actividad	Costos de transporte	Consideraciones sobre el manejo y mezcla
Seco	2 Años	94 – 100%	bajo	Necesita cuidados especiales.
Líquido Solución	Menos de 6 meses	3 – 50%	moderado	Sencillo.
Mannich	6 meses	2 – 10%	alto	Es difícil de bombear. Contiene formaldehído, un carcinógeno.
Emulsión	2 - 12 meses	30 – 50%	moderado	Es necesaria la etapa de rompimiento de la emulsión

Ilustración 2.10 Sistema de alimentación de polímero seco. (Water Environment Federation, 2001)



La prehumectación se logra generalmente mediante la alimentación de polímero seco a través de un embudo o cono y luego a través de un eductor donde se mezcla con agua. La etapa de prehumectación es el paso más crítico. Si se realiza de forma inadecuada, el polímero no entra en solución correctamente y forma grumos denominados “ojos de pescado”, debido a su apariencia.

Después de la prehumectación, el polímero entra en el tanque de mezcla. Aquí la solución se agita con una mezcladora de baja velocidad (400 a 500 rpm) hasta que el polímero esté completamente en solución. La intensidad de mezclado debe ser suficiente para disolver adecuadamente el polímero pero lo suficientemente lento como para evitar romper cualquiera de las cadenas moleculares. Típicamente la mezcla debe continuar de 30 a 60 minutos para asegurar que todo el polímero se disuelva completamente. El polímero no disuelto puede causar problemas tales como obstrucción de las bombas o tuberías o ensuciamiento en las bandas y telas del filtro. La etapa de mezcla también permite que el

polímero madure. Durante la maduración, la molécula se desenrolla y asume una forma que permite la floculación del lodo. Si las soluciones de polímero no se permiten madurar, no se logra el funcionamiento adecuado. Sin embargo, la solución diluída de polímero no es estable y puede llegar a ser ineficaz si se permite que el período de maduración en el tanque de mezcla sea muy largo. El período mínimo de maduración suele ser de 30 minutos. Muchos polímeros disueltos pierden actividad después de aproximadamente 24 horas.

Es importante seguir las recomendaciones del fabricante para el producto específico que se usa. Algunos sistemas de acondicionamiento incluyen un paso adicional, donde el polímero en solución se mezcla con el agua de dilución por medio de un mezclador estático antes de que la solución de polímero sea bombeada al punto de aplicación. Esta agua adicional puede asegurar una buena mezcla de los lodos y el polímero, mejorando así la eficiencia del proceso de acondicionamiento.

La ubicación del punto de alimentación de polímero es muy importante. Un punto de adición que está demasiado cerca de la unidad de espesamiento o deshidratación puede ocasionar que no se tenga el tiempo suficiente para que el polímero reaccione con el lodo. La adición del polímero demasiado lejos de la unidad, puede permitir demasiada mezcla, rompiendo los flocúlos. Dos o tres puntos de aplicación diferentes deben ser diseñados en la tubería de alimentación de polímero, a diferentes distancias de las unidades de espesamiento o deshidratación debido a que las características del lodo pueden cambiar rápidamente y puede ser necesario variar el punto de aplicación (ilustración 2.11)

El primer paso al usar un polímero en emulsión es propiciar su mezcla. Esto se puede hacer con un mezclador de alta velocidad; mezclador estático; dispersor de polímero líquido o mejor aún, por medio de una unidad especial para el rompimiento de la emulsión y la alimentación del polímero. (ilustración 2.12). El segundo paso en el trabajo del polímero en emulsión es permitir que el polímero madure, al igual que un polímero

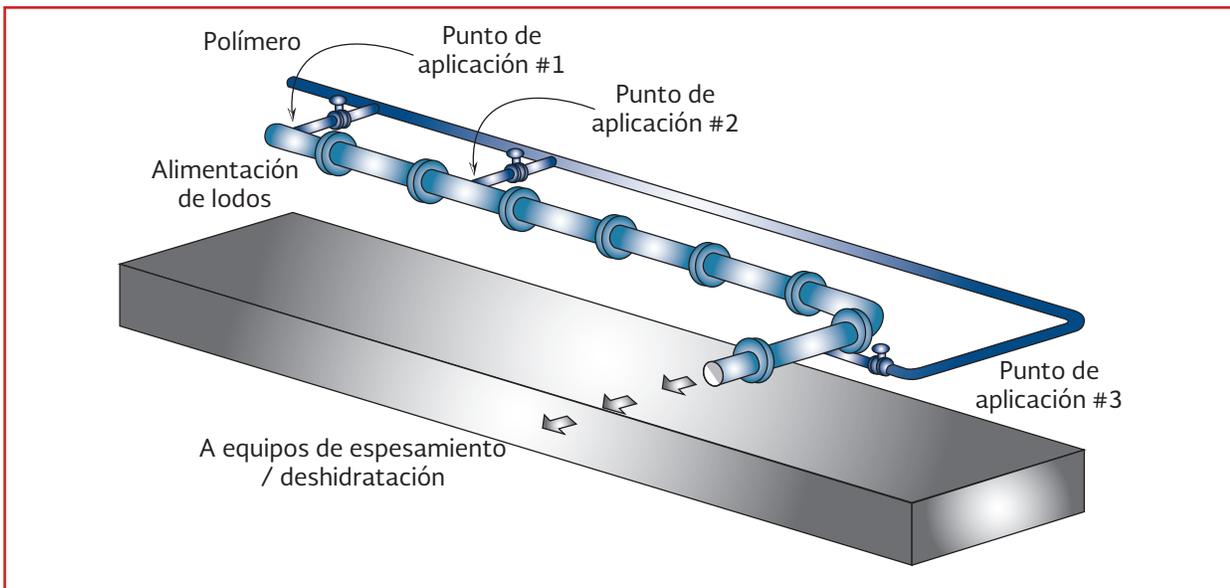
Ilustración 2.12 Equipo para romper la emulsión y unidad de alimentación de polímero



seco, para garantizar un rendimiento óptimo. El fabricante le recomendará el tipo apropiado de la mezcla y la unidad de alimentación para la aplicación en su planta. Si se utilizan dispositivos de mezcla de alta velocidad, se deben definir las tasas de agua de dilución primaria y secundaria para satisfacer las especificaciones del polímero que se utiliza.

Los polímeros líquidos no requieren la etapa de prehumectación inicial o de ruptura, que es necesaria con los polímeros secos o las emulsiones, por lo tanto, los polímeros líquidos

Ilustración 2.11 Tubería diseñada con múltiples puntos de aplicación de polímero (Water Environment Federation, 2001)



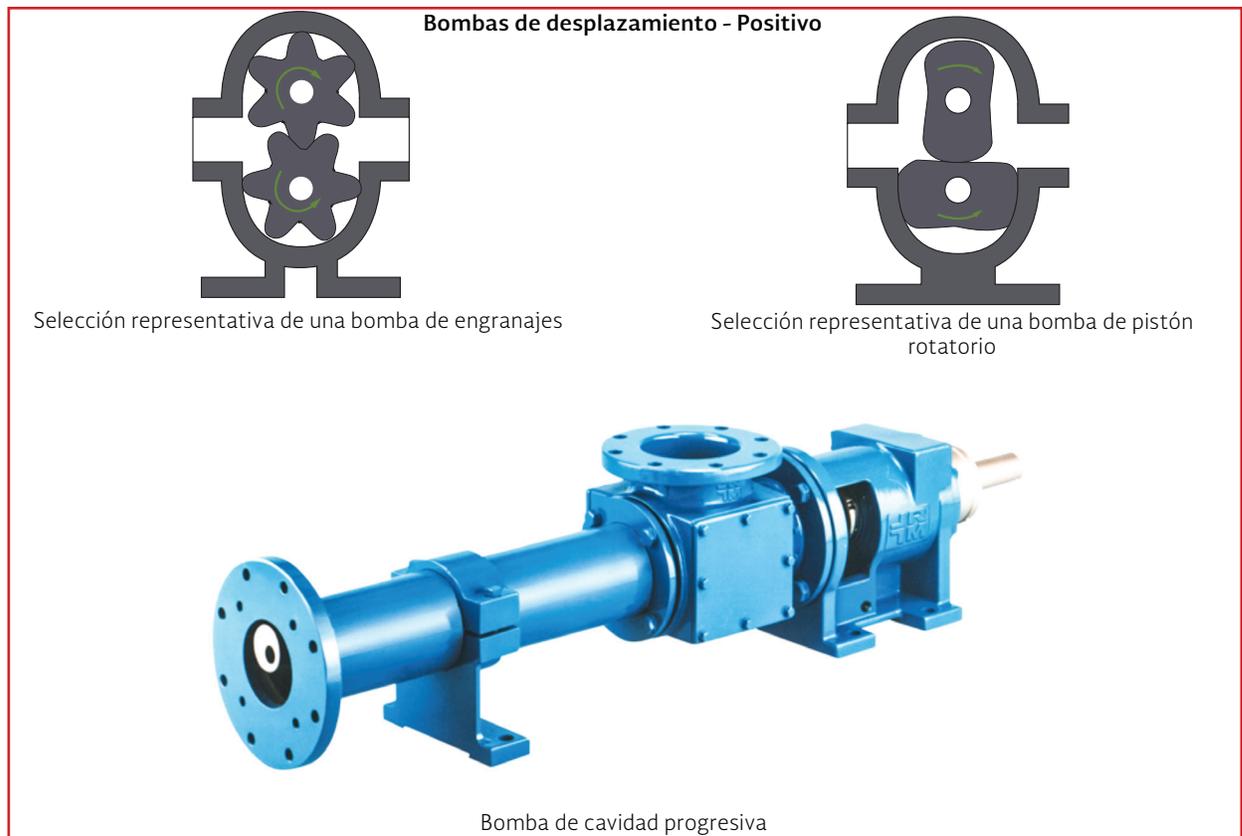
son mucho más fáciles de usar. Las plantas que utilizan grandes cantidades de polímeros líquidos tienen unidades para el mezclado y tanques de alimentación, pero estos polímeros también pueden ser alimentados, mediante mezcladores estáticos y rotámetros y dilución en línea. Al igual que con el polímero seco, el punto de adición de polímero líquido es fundamental para un rendimiento óptimo. La ubicación ideal de aplicación variará con el tipo de lodo y la cantidad de turbulencia en las tuberías. Se debe contar con dos o tres puntos alternativos de aplicación. La realización de pruebas piloto o ensayos con una unidad escala uno a uno es generalmente la mejor manera de determinar la ubicación óptima de los puntos de alimentación.

En general, el equipo que se utilizará para los sistemas de polímeros debe estar hecho de acero

inoxidable, plástico u otro material resistente a la corrosión. No utilice el equipo que tenga componentes de aluminio, latón o bronce. No se deben emplear equipos con partes de caucho con polímeros de emulsión porque la base de aceite degradará el caucho. Las bombas de transferencia de polímeros y de alimentación son generalmente bombas de desplazamiento positivo con engranajes, lóbulos o bombas de cavidad progresiva (ilustración 2.13). Las bombas centrífugas no son una buena opción para utilizarse con polímeros porque las fuerzas de corte desarrolladas por la acción centrífuga de los impulsores pueden alterar el polímero y destruir su capacidad de formación de flóculos.

Al igual que con cualquier producto químico, asegúrese de comprender todos los aspectos de seguridad relacionados con los polímeros.

Ilustración 2.13 Bombas para la transferencia y alimentación de polímeros



Cuando se trabaja con polímeros secos, se debe usar una máscara y gafas de protección contra el polvo (ilustración 2.14). Así mismo, el área de trabajo debe estar bien ventilada para eliminar el polvo y humo. Los derrames de polímero seco se deben barrer o aspirar, evitando el contacto con el agua. Hay muchos productos disponibles que están especialmente diseñados para permitir el fácil barrido de polímero seco. No barra ni descargue polímero seco en un desagüe. Una vez mojado, se hincha y puede obstruir el drenaje. Si el polímero se moja, es necesario el uso de productos de limpieza adecuados y lavar el área con abundante agua. El polímero líquido y la solución de polímero son resbaladizos. Se debe tener mucho cuidado cuando se trabaja en el área de un derrame de polímero. El uso de guantes al manipular polímero ayuda a prevenir la irritación de la piel. Lavar cuidadosamente el cuerpo después del contacto con cualquier tipo de polímero.

En resumen, hay varias medidas de seguridad que son muy importante cuando se trabaja con polímeros: Usar protección para los ojos, guantes de goma, un delantal de goma y protección respiratoria durante la manipulación de los polímeros. Limpiar los derrames inmediatamente debido a que presentan riesgo

Ilustración 2.14 Equipo de protección del operador



de resbalones. En el mercado están disponibles productos para la limpieza de derrames.

## 2.2. ESPESAMIENTO DE LODOS RESIDUALES

El espesamiento es una operación básica dentro del esquema de tratamiento de lodos, pues reduce el volumen del material a tratar en los procesos subsecuentes.

### 2.2.1 OBJETIVOS

- Entender el proceso de espesamiento y su relación con otros procesos del tratamiento del agua residual
- Conocer el funcionamiento de varios tipos de equipos de espesamiento de lodos
- Identificar los problemas comunes que se presentan durante el proceso de espesamiento y conocer las soluciones prácticas
- Identificar las prácticas de seguridad para el manejo adecuado de los lodos residuales

### 2.2.2 INTRODUCCIÓN

El principal propósito del espesamiento de lodos es la reducción del volumen de material tratado para los procesos subsecuentes. De esta forma, con el espesamiento se pueden incrementar la concentración de sólidos de los lodos de 0.5 a 4 por ciento, lo cual disminuye su volumen ocho veces. Como se mencionó esta reducción beneficia los tratamientos posteriores como la digestión, deshidratación, secado y disposición final. El espesamiento también reduce la capacidad requerida en los reactores y el equipo; la cantidad de químicos para el

acondicionamiento; el calor para los digestores; y el volumen del lodo que debe ser transportado, secado o incinerado. Los sistemas que son utilizados para el espesamiento se describen detalladamente en el libro del MAPAS: Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: tratamiento y disposición de lodos.

En el ejemplo 2.7 se ilustra la reducción del volumen de lodos si se tiene una concentración inicial en el lodo de 0.5 por ciento de sólidos totales (ST) y se espesa hasta 4 por ciento de sólidos totales:

**Ejemplo 2.7 Comparación del volumen de lodo cuando tiene una concentración de 0.5 por ciento ST y cuando se espesa hasta 4 por ciento de ST. Considérese que la planta de tratamiento tiene una producción de lodos de 25 000 kg d<sup>-1</sup>**

Datos:

- Producción de lodos = 25 000 kg d<sup>-1</sup>
- Equivalencias:
  - 1 m<sup>3</sup> de agua pesa 1 000 kg
  - Flujo de lodos = Producción de lodos /concentración

### 1. Cálculo del flujo de lodo con 0.5% de ST

$$\text{Flujo} = 25\,000 \text{ kg d}^{-1} / (0.005 \times 1\,000 \text{ kg} / 1 \text{ m}^3) = 5\,000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$$

Cuando el lodo tiene 0.5% de ST, su volumen equivale a 5 000 m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup>

### 2. Cálculo del flujo de lodo después de espesamiento hasta 4 por ciento de ST

$$\text{Flujo} = 25\,000 \text{ kg d}^{-1} / (0.04 \times 1\,000 \text{ kg m}^{-3}) = 625 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$$

Cuando el lodo tiene 4 por ciento de ST, su volumen equivale a 625 m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup>

### 3. Cálculo de la reducción de volumen de lodo

$$5\,000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} / 625 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} = 8$$

El espesamiento redujo ocho veces el volumen de lodo.

Una apropiada operación del espesador es muy importante para el proceso de tratamiento de aguas residuales. Si el espesador opera mal, produce un sobrenadante de muy mala calidad que al retornarse a la planta de tratamiento afecta al proceso biológico incrementando la demanda de oxígeno e incrementado la carga orgánica sobre el reactor biológico. Esto trae como consecuencia una disminución en el porcentaje de remoción de materia orgánica en la planta, que puede llevar al incumplimiento de las condiciones de descarga y afectar el funcionamiento del sedimentador secundario. Un espesador mal operado produce un lodo con baja concentración de sólidos e incrementa los costos del tratamiento del lodo.

Para el espesamiento de lodos se usan diferentes tipos de equipos que utilizan la fuerza de gravedad, la flotación y métodos mecánicos. En este libro se presentan los dos tipos de sistemas de espesamiento más utilizados en México: el espesamiento por gravedad y el espesamiento por gravedad con bandas.

### 2.2.3 ESPESAMIENTO POR GRAVEDAD

Como su nombre lo indica este tipo de equipo utiliza la fuerza de la gravedad para separar los sólidos. Este proceso es similar al que ocurre en un clarificador primario. El espesamiento por gravedad generalmente se utiliza para espesar lodo primario, debido a que es más difícil espesar por gravedad el lodo secundario del proceso de lodos activados. También puede usarse para espesar la mezcla de lodo primario más el lodo activado de desecho. Generalmente un espesador por gravedad puede espesar el lodo de 3 al 6 por ciento de sólidos totales. Si solo se alimenta lodo primario puede alcanzar del 5 al 10 por ciento. En la Tabla 2.4 se muestra la concentración típica de sólidos a la salida del espesador por gravedad.

#### 2.2.3.1 Descripción del espesador por gravedad

Los espesadores por gravedad son tanques por lo general circulares con una profundidad o altura de la columna de agua de 3 a 4 metros y un diámetro hasta 25 metros. El fondo del sedimentador se diseña con una pendiente entre 1:6 y 1:3. Muy rara vez se construye un espesador rectangular porque su desempeño no es satisfactorio. Son de construcción robusta igual que los sedimentadores debido a los altos torques que manejan. Tienen un mecanismo de rastras giratorio que se mueven con velocidades de (0.08 a 0.1 m s<sup>-1</sup>).

El espesador por gravedad (ilustración 2.15) incluye el siguiente equipamiento:

- Rastra o rastrillos móviles con piquetas, tuberías verticales o ángulos con el objeto de ayudar a liberar gases y prevenir formación de vacíos o conificación. Sin embargo las piquetas pueden presentar problemas en plantas donde no se realice efectivamente el cribado para remover desechos como trapos o materiales fibrosos
- Mecanismo de accionamiento de velocidad variable que puede usarse para incrementar la velocidad de las rastras para agitar el manto de lodos y liberar burbujas de gas atrapadas, así como prevenir la formación de vacíos o conificación
- Equipo para la remoción de espumas que incluye un desnatador y una caja para recolección de espumas
- El equipo auxiliar incluye bombas de desplazamiento positivo, indicador de luz o de sonido de la altura del manto de lodos, y timers para variar la frecuencia de bombeo

A continuación se presentan los principios de operación, el control del proceso, problemas y sus soluciones y los aspectos de operación y mantenimiento.

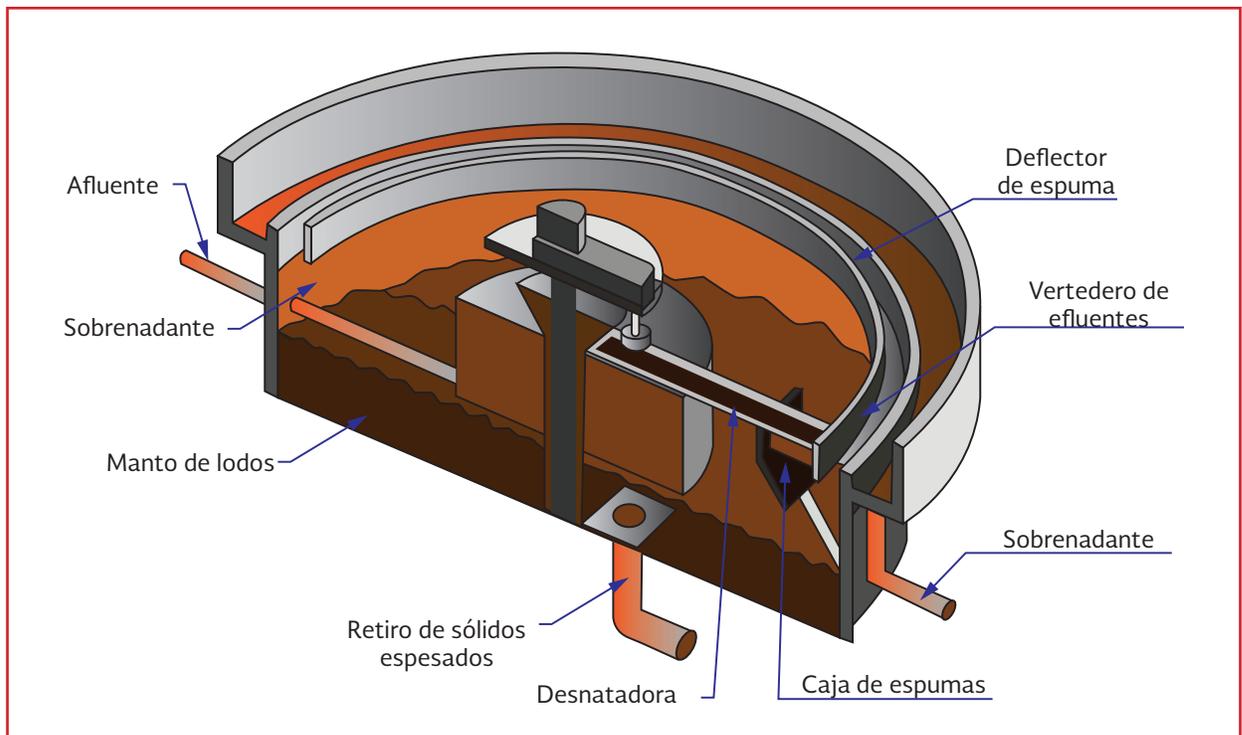
#### 2.2.3.2 Operación del espesador por gravedad

En el espesador por gravedad (ilustración 2.16) el afluente entra en la parte central del tanque. El lodo espesado se retira del espesador por el fondo del tanque. El sobrenadante se retira por

Tabla 2.4 Concentración típica de sólidos a la salida del espesador por gravedad. (Water Environment Federation, 2001)

Tipo de lodo	Porcentaje de sólidos totales
Lodo primario	5-10
Mezcla de lodo primario y lodos activados de desecho	2-4

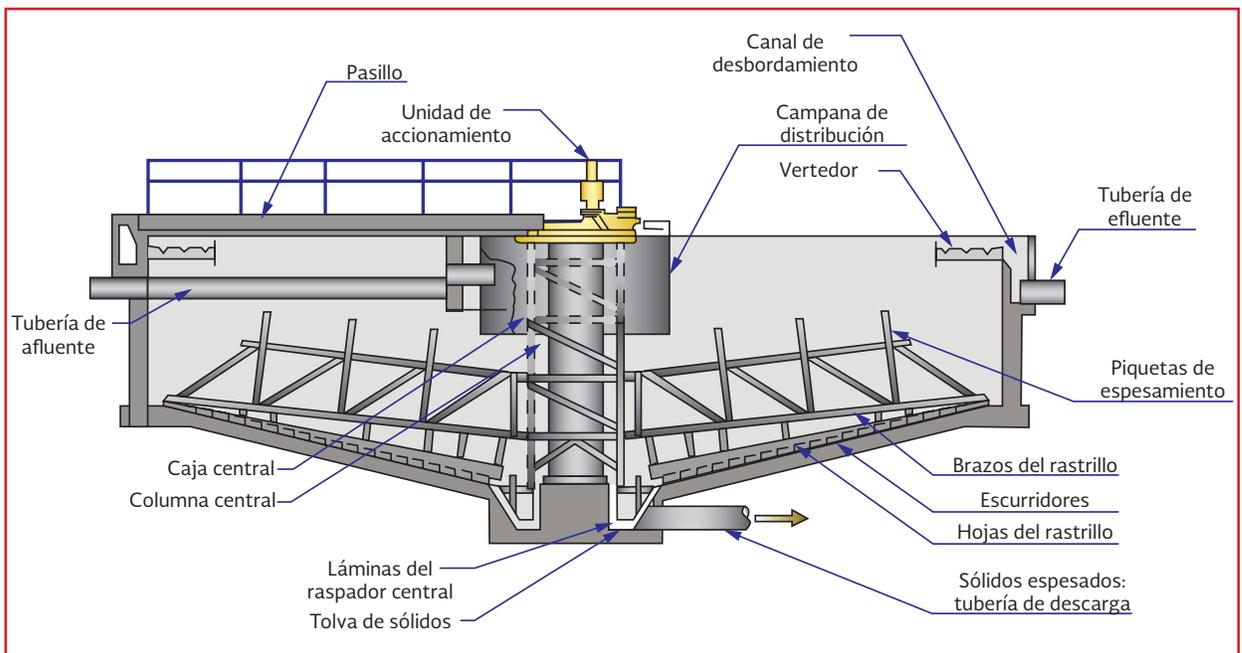
Ilustración 2.15 Componentes del espesador por gravedad (Water Environment Federation, 2001)



medio de una canaleta superior para enviarse a la entrada de la planta de tratamiento o al sedimentador primario.

En forma general el lodo primario o la mezcla de lodo primario más el lodo activado de desecho ingresa a través de una columna central o por medio de una entrada lateral del tanque para

Ilustración 2.16 Partes que conforman un espesador por gravedad. (Water Environment Federation, 1998)



descargarse en un alimentador central. El flujo se distribuye en el centro en una zona con baffles, donde se reduce la velocidad, permitiendo la sedimentación de los sólidos. El fondo del tanque tiene una pendiente que permite que una rastra recolectora de lodo dirija al lodo espesado hacia una pequeña caja recolectora ubicada en el fondo de la parte central del tanque. El lodo espesado se retira generalmente por medio de una bomba de desplazamiento positivo, de lóbulos rotatorios, de diafragma o de cavidad progresiva. Las bombas pueden operar en forma manual o automática. Los controladores automáticos más utilizados incluyen timers, equipos de frecuencia variable y control lógico programable.

El mejor desempeño del espesador se consigue cuando se tiene una descarga continua del lodo espesado. La velocidad de bombeo para la descarga de lodos puede controlarse automáticamente para mantener el mismo nivel de manto de lodos.

La descarga de lodo espesado también debe considerar la cantidad de lodo que se alimenta al espesador, el tiempo de retención y la concentración de sólidos requerida en el lodo espesado. En forma más sencilla: en base seca se debe retirar la misma cantidad de lodos que entra.

Durante la operación se debe llevar un control y conocer dos parámetros: la velocidad de carga de sólidos, y la velocidad de sobreflujo o carga

superficial. El operador debe mantener estos dos parámetros (Tabla 2.5) dentro de los rangos recomendados.

A continuación se ilustra la forma de calcular estos dos parámetros:

**Velocidad o tasa de carga de sólidos:** se obtiene dividiendo el peso de los lodos secos entre el área superficial del espesador.

**Velocidad de carga de sólidos:** peso de lodos secos / Área superficial de espesador.

**Velocidad de sobreflujo o carga superficial:** esta se calcula dividiendo el flujo de lodo entre el área superficial del espesador.

A continuación se da un ejemplo de como el operador puede calcular estos dos parámetros de operación del espesador.

**Ejemplo 2.8 Velocidad o tasa de carga de sólidos**

10 500 kg d<sup>-1</sup> de lodo primario se envían a espesador por gravedad de 12 metros de diámetro. Calcule la velocidad o tasa de carga de sólidos sobre el espesador.

Datos:

- Diámetro del espesador = 12 m
- Peso de lodo seco alimentado = 10 500 kg d<sup>-1</sup>

Tabla 2.5 Parámetros de operación recomendados para los espesadores por gravedad

Parámetro de control	Rango
Velocidad o tasa de carga de sólidos	100-150 kg/m <sup>2</sup> .d
Velocidad de sobreflujo o carga superficial	16-32 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d

## 1. Cálculo área superficial del espesador

- $d =$  diámetro del espesador = 12 m
- $r =$  radio del espesador = 6 m
- Área superficial =  $\pi d^2/4$  o  $\pi r^2 = \pi (6)^2 = 113.09 \text{ m}^2$

## 2. Cálculo de velocidad o tasa de carga de sólidos

- Velocidad o tasa de carga de sólidos = Peso de los lodos secos / área superficial del espesador.
- Velocidad o tasa de carga de sólidos =  $10 \text{ 500 kg d}^{-1} / 113.09 \text{ m}^2 = 92.84 \text{ kg d}^{-1} \text{ m}^{-2}$

La velocidad o tasa de carga de sólidos se encuentra en los rangos recomendados.

### Ejemplo 2.9 Velocidad de sobreflujo o carga superficial

$2500 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  de lodo primario se envían a un espesador por gravedad de 12 metros de diámetro. Calcule la velocidad de sobreflujo o carga superficial sobre el espesador.

Datos:

- Diámetro del espesador = 12m
- Flujo de lodos alimentado =  $2 \text{ 500 m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$

## 1. Cálculo área superficial del espesador

- $d =$  diámetro del espesador = 12 m
- $r =$  radio del espesador = 6 m
- Área superficial =  $\pi d^2/4$  o  $\pi r^2 = \pi (6)^2 = 113.09 \text{ m}^2$

## 2. Cálculo de velocidad de sobreflujo o carga superficial

- Velocidad de sobreflujo o carga superficial = Flujo de lodo alimentado / área superficial del espesador
- Velocidad de sobreflujo o carga superficial =  $2 \text{ 500 m}^3 \text{ d}^{-1} / 113.09 \text{ m}^2 = 22.1 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \text{ m}^2$

La velocidad de sobre flujo o carga superficial sobre el espesador se encuentra en los rangos recomendados.

### 2.2.3.3 Rendimiento

Los espesadores de gravedad habitualmente producen lodo espesado que va del 6 al 12 por ciento de sólidos cuando el espesamiento es de lodos primarios. El porcentaje de sólidos se reduce entre 3 y 8 por ciento cuando se utiliza una combinación de lodo primario y secundario. La Tabla 2.6 indica diversas fuentes de lodo con sus correspondientes concentraciones de sólidos previstos. La literatura muestra poca correlación entre el porcentaje de sólidos en el lodo alimentado a un espesador por gravedad y la concentración del lodo espesado. La captura prevista de sólidos oscila entre 90 y 95 por ciento. En la tabla 2.7 se muestran los datos de rendimiento de las instalaciones típicas.

### 2.2.3.4 Operación durante la puesta en marcha de un espesador por gravedad

El siguiente procedimiento aplica durante la puesta en marcha de un espesador de lodos residuales:

- Revisar el mecanismo móvil o tornamesa para asegurar que esté correctamente instalado y gire en la dirección apropiada
- Revisar el mecanismo del sistema de encendido y apagado de la alarma

Tabla 2.6 Características de la fuente de lodos y sólidos totales (Water Environment Federation, 2001)

Fuente de lodos	Baja viscosidad- porcentaje ST	De alta viscosidad- porcentaje ST
Lodos primarios crudos	<6	6 – 12
Lodos secundario crudos	<2	2 – 6
Lodos primarios y secundarios crudos	<3	3 – 8
Lodos digeridos	<4	4 – 10
Lodos químicos		
• Cal	<15	15 – 40
• Alumbre y lodos férricos	<2	2 – 6
Lechadas químicas	1 – 30	---
Lechadas de cenizas de incineración	5 – 20	---

Tabla 2.7 Rendimiento a gran escala del espesador por gravedad

Tipo de lodos <sup>a</sup>	Diámetro del espesador × SWD <sup>b</sup> (m × m)	Concentración de ST en la alimentación	Concentración de ST del lodo espesado (porcentaje SV)	Concentración del lodo espesado, mg L <sup>-1</sup>	Carga de sólidos lb / ft <sup>2</sup> / día	SVR, <sup>c</sup> días	Comentarios
DLA	14.02 × 3.048	1.2	5.6 (57)	140	240	3	Baja volatilidad. 40 a 60% digerido.
P+DLA+DS	21.03 × 3.048	---	9.9 (70.3)	205	---	0.8	40 a 60% de lodo digerido.
P+DLA	17.068 × 3.048	0.3	7.8	156	107	---	21% DLA
DLA	21.03 × 3.048	0.23	0.26-3.0	24	44	---	.

<sup>a</sup> DLA = Residuos o desecho de lodos activados o purga de lodos; P = lodo primario; DS = lodos digeridos.

<sup>b</sup> SWD = profundidad lateral del agua

<sup>c</sup> SVR = relación de volumen de lodos; es decir, el volumen del manto de lodo dividido por el volumen de lodo espesado eliminado diariamente.

Nota: lb / sq ft/día × 4,882 = kg/m<sup>2</sup> \* d; ft × 3.281 = m.

para asegurar que estén operando apropiadamente. Dado que los ajustes son de fábrica este mecanismo debe funcionar bien y hay que verificarlo cuando el vendedor entrega el equipo y pedir la garantía correspondiente. Esto es el caso para todos los equipos. Evitar hacer los ajustes en sitio porque se puede perder la garantía

- Seleccionar la tasa de carga de sólidos para la puesta en marcha del espesador por gravedad. Una sobrecarga de lodo requiere un gran torque y puede causar problemas en el mecanismo. Checar y comenzar a operar el mecanismo de

espesamiento con agua limpia antes de alimentar el lodo

- Evitar poner en marcha un espesador que contiene lodo acumulado. Para evitar una sobrecarga, el lodo se debe sacar y disponer antes de poner en marcha el mecanismo
- Antes de bombear el lodo a los procesos siguientes, se debe permitir que se acumulen suficientes sólidos en el espesador para sellar completamente la tubería de desbordamiento
- Verificar los niveles de los vertedores del espesador después de que se ha acumulado un manto de lodo. Niveles

bajos en los vertedores se deben a una velocidad alta del flujo en estas áreas lo que genera corrientes que mueven el manto de lodo, pasando los sólidos al vertedor y generando un sobrenadante de mala calidad

- Revisar y ajustar el mecanismo de desnatado para maximizar la cantidad de nata que se retira en la caja de espumas y minimizar la cantidad de sobrenadante (agua) transportado con el desnatado
- Evitar arrancar el espesador con una capa de hielo en la unidad. Tanto el sistema como la tubería de conducción se deberán drenar cada vez que se pone fuera de servicio para evitar el congelamiento

#### 2.2.3.5 Control del proceso de espesamiento por gravedad

##### **Pretratamiento**

El lodo que entra al espesador por gravedad debe estar cribado y desmenuzado para prevenir la entrada de basura o materiales fibrosos y se debe bombear continuamente. Si el bombeo continuo no es posible, la alimentación del sistema deberá ser lo más continua posible. La alimentación continua favorece la formación de un manto de lodos estable y uniforme y reduce la gasificación del lodo que evita su flotación. La operación exitosa de un espesador por gravedad depende de tener una baja tasa de alimentación en forma continua.

##### **Tipo de lodo**

Cuando se lleva a cabo el espesamiento del lodo primario y secundario, los lodos se mezclan y combinan con agua de compensación, (llamada

también elutriación), antes de introducirse al espesador. El agua de compensación, adicionada para mantener una carga hidráulica constante, también se usa como una fuente oxidante. Esta práctica produce una alimentación con características más uniformes, como mayor concentración de oxígeno disuelto (OD), que ayuda a evitar la estratificación.

Los lodos primarios se espesan más fácilmente por gravedad. Este tipo de lodos tienden a sedimentar más rápidamente y forman un lodo espeso que puede bombearse fácilmente sin ayuda química. Por estas razones, los lodos primarios son frecuentemente espesados sin agregar reactivos químicos.

Espesamiento de los lodos activados de desecho merece mayor atención. Los lodos activados de desecho (DLA) tienen una gran área superficial por unidad de masa, lo que resulta en bajas tasas de sedimentación y una resistencia a la compactación. Los lodos biológicos tienden a estratificarse en el espesador por gravedad sin dejar su actividad biológica, por lo que pueden producir gases y causar la flotación de los lodos.

Los estudios demuestran que el lodo espesado no cambia cuando la relación de lodos secundarios a lodos primarios varía entre 25 y 59 por ciento. En algún punto por encima de este porcentaje, un aumento en la proporción de lodos secundarios a lodos primarios provocará una disminución en la concentración del lodo espesado.

Si los lodos activados comienzan a gasificarse y a flotar se puede adicionar a la alimentación un agente bacteriostático, tal como cloro, permanganato de potasio, o peróxido de hidrógeno para reducir la actividad biológica, reduciendo así la producción de gas y el olor.

### **Efecto del potencial de hidrógeno**

El proceso de espesamiento por gravedad es sensible al pH y se han encontrado instalaciones de tratamiento que reaccionan de manera diferente a los cambios. La observación del proceso de espesamiento y la experimentación son los únicos métodos para determinar los efectos de los cambios de pH y de la forma en que se pueden manejar.

### **Efecto de la temperatura**

El espesamiento es sensible a los cambios en las temperaturas del proceso, por lo tanto las tasas de carga deben reducirse a los valores más bajos cuando las temperaturas exceden 15 °C (59 °F) a 20 °C (68 °F), esto depende de la relación de lodos primarios y secundarios. Las temperaturas más altas requieren dilución adicional.

Las corrientes de recirculación con alta temperatura, como el sobrenadante de un reactor anaerobio, provocarán la estratificación térmica en los espesadores de gravedad reduciendo la velocidad de sedimentación. También, si se introduce centrifugado o filtrado, este puede contener sólidos biológicamente activos, causando gasificación y un aumento del manto de lodos. Los efectos de estas corrientes se pueden minimizar dosificándolas lentamente al espesador o llevando estas corrientes a otro punto donde causen menos efectos negativos.

### **Espumas**

Los procedimientos de manejo de la espuma puede afectar significativamente el aspecto del espesador. Una excesiva acumulación de espumas en un espesador por gravedad es antiestética y causa problemas de olor. Hay dos

métodos para manejar las espumas. La primera es tratarlas inmediatamente después de que se retiran de los sedimentadores de la instalación. La segunda es enviarlas al espesador y juntarlas para un tratamiento o disposición posterior. La dificultad con la segunda alternativa es que los espesadores de gravedad rara vez cuentan con equipos de desnatado capaces de manejar grandes cantidades de espuma, particularmente la que se ha acumulado y posiblemente congelado y endurecido.

### **Manto de lodos**

Mantener un manto de lodos en el espesador promueve el espesamiento por compactación, reduce al mínimo la formación de vacíos o canales, y reduce la necesidad de alimentar al espesador en forma intermitente. La profundidad del manto de lodos permisible varía con la temperatura. Las temperaturas más altas requieren mantos menos profundos. Típicamente, un manto de lodo entre 0.3 y 1.5 m (1 y 5 pies) de profundidad, puede mantenerse con temperaturas más frescas y tanques más profundos. La profundidad del manto de lodo afecta la concentración de sólidos en el lodo espesado. Por esta razón el operador debe experimentar para determinar el rango de profundidades que optimicen la concentración de sólidos en el lodo espesado. Los resultados dependerán de la temperatura. Una vez que se determina la profundidad óptima, el bombeo debe ser modulado para mantener el manto dentro de un rango óptimo. El aumento de los tiempos de retención puede provocar el deterioro de otros aspectos de la operación de espesador por gravedad. Bajo ninguna circunstancia el manto de lodo puede llegar a la altura del dispositivo de alimentación de lodo.

### **Tiempo de residencia o retención de lodos**

Dependiendo de la temperatura, el tiempo de retención de lodos en el espesador por gravedad debe oscilar entre 1 y 2 días para lodos primarios. El tiempo de retención para las mezclas de lodos primarios y secundarios debe oscilar entre 18 y 30 horas, dependiendo de la temperatura. Tiempos de retención más largos causan problemas, como gasificación del lodo e incremento de la dosis de químicos en operaciones de deshidratación aguas abajo.

### **Bombeo de lodos espesados**

Al igual que la alimentación de lodos, el bombeo de lodos espesados debe ser lo más continuo posible. Las tasas de bombeo pueden ajustarse para cumplir con la concentración requerida de sólidos. La mejor forma para el desarrollo de un programa de bombeo regular, es la variación de la duración de bombeo y los ciclos para conseguir la concentración de sólidos deseada.

Se necesitan velocidades de bombeo de por lo menos  $0.75 \text{ m s}^{-1}$  ( $2.5 \text{ pies s}^{-1}$ ) para evitar la deposición de sólidos. Al bombear lodos altamente concentrados, el aumento de la viscosidad aumentará la carga de bombeo. Pequeños aumentos en la concentración de lodo por encima de un nivel de 8 por ciento producen grandes aumentos en la presión de operación.

### **Agua de dilución o elutriación**

El agua de dilución para el espesador consiste principalmente en el efluente de la planta (agua del licor mezclado del proceso de lodos activados o efluente secundario) y ofrece varias ventajas. El oxígeno disuelto (OD) presente

en el líquido recirculado ayuda a reducir la actividad biológica anaerobia que de otro modo causaría gasificación, flotación y producción de olores. Además, el proceso de elutriación tiende a eliminar carbohidratos solubles, nitrógeno amoniacal, fosfatos, grasas, aceites, y partículas finas. La cloración del agua de elutriación puede ser utilizada para reducir la actividad biológica que provoca la gasificación de los lodos. La desventaja de la elutriación es la eliminación de sales que pueden aumentar los requerimientos de acondicionamiento de lodos. Con la digestión anaerobia para mantener la estabilidad del reactor, se deben evitar las fluctuaciones en la concentración del lodo espesado con la ayuda de la elutriación.

### **Control mecánico**

Durante la operación del espesador el indicador del torque o el sonido de la alarma de sobrecarga pueden indicar la elevación del torque del mecanismo de recolección de lodos. En este caso, debe suspenderse la alimentación al espesador para evitar que el problema empeore. No gire el mecanismo de la unidad por intervalos o "posición", porque eso podría sobrecargar y posiblemente, dañar la unidad antes de que el mecanismo de paro pueda operar. Tampoco coloque alambre alrededor de la protección de sobrecarga de la unidad, porque es probable que esto dañe el mecanismo. En su lugar, se debe eliminar la causa de la sobrecarga del torque, probablemente debida a un objeto extraño o una sobreacumulación de lodos. Esto puede implicar sacar de operación y vaciar el espesador por gravedad.

Si el espesador está fuera de servicio por más de 1 hora, se debe suspender el flujo para evitar una sobrecarga de torque. Si el espesador permanece

fuera de servicio durante un día o más, los lodos deben ser evacuados y reemplazados con el efluente de la planta después de la desinfección.

### 2.2.3.6 Principales problemas de operación y soluciones

En esta sección se describen los problemas de funcionamiento más comunes y los métodos para su manejo. La tabla 2.8 presenta una guía para la solución de problemas que a menudo experimentan los espesadores de gravedad y las posibles soluciones.

#### Exceso de espuma

El exceso de espuma (ilustración 2.17) se produce frecuentemente por prolongados tiempos de retención en el espesador. La espuma puede reducirse llevando directamente los lodos del tanque de aeración para mantenerlos frescos. El mantenimiento de niveles más bajos en el manto de lodos o el aumento de la decantación también puede solucionar el problema. En algunos casos, la espuma eliminada de las superficies del sedimentador secundario, entra directamente al espesador por gravedad para su acumulación y eliminación final. Esta práctica se debe evitar

debido a que el sistema de eliminación de espuma del espesador generalmente no está equipado para manejar grandes cantidades de espuma. La colocación de un sistema de pulverización cerca de la caja de espuma ayuda al mantenimiento de una espuma suave y adecuada para el bombeo. La espuma causada por *Nocardia* puede ser eliminada rociándola con agua clorada. Una manguera de alta presión rompe la acumulación de espuma y así el mecanismo de desnatado puede removerla con facilidad. En casos severos, la acumulación de espuma puede ser succionada hacia un camión para darle una disposición adecuada.

#### Acumulación de grasa

La acumulación de grasa en las líneas del fondo del espesador puede alterar el manejo de lodos. Para la limpieza de estas líneas se emplea agua a alta presión y se logra el desalojo de las acumulaciones de grasa. Una forma de combatir las acumulaciones de grasa es el llenado de las líneas con lodo estabilizado, permitiendo que el lodo permanezca en reposo durante al menos un día y posteriormente eliminar el lodo y la grasa acumulada. Si la línea se puede aislar, una limpieza periódica con vapor puede reducir

Ilustración 2.17 Problemas que presentan los espesadores, (a) formación de algas y (b) formación de espuma y grasa



Tabla 2.8 Espesador por gravedad guía de solución de problemas

Indicadores / observaciones	Causa probable	Acción	Soluciones
Olor séptico, abultamiento del lodo	Velocidad de bombeo de lodos espesados es demasiado baja	Revise el sistema de bombeo de lodos espesados para un funcionamiento correcto.	Aumentar la velocidad de bombeo de lodos espesados
		Revise el funcionamiento del mecanismo de recolección del espesador	Aumentar la velocidad de recolección, reparar el mecanismo
	Tasa de desbordamiento (derrame) del espesador es demasiado baja	Verifique la velocidad de desbordamiento (derrame)	Aumentar el flujo de afluente al espesador Una parte del efluente secundario o licor mezclado del tanque de aeración puede enviarse al espesador (si es necesario) para tener una tasa de desbordamiento de 16 a 24.5 m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> (400 a 600 g d <sup>-1</sup> pie <sup>-2</sup> )
	Septicidad en el espesador	Mida el oxígeno disuelto en el espesador	Añadir agentes oxidantes al lodo que entra al espesador (0.5 a 1.0 mg L <sup>-1</sup> )
Lodo no es lo suficientemente espeso	Tasa de desbordamiento es demasiado alta.	Verifique la velocidad de desbordamiento	Disminución del caudal del afluente de lodos
	Tasa de bombeo de lodo espesado es demasiado alta	Concentración de lodo	Disminución del caudal afluente de lodo
	Cortocircuitos del flujo a través del tanque	Utilice tinte u otro trazador para comprobar si hay cortocircuito	Comprobar vertederos de efluentes; reparación o nivelación. Compruebe deflectores de afluentes; reparar o reubicar
Sobrecarga de torque del mecanismo de recolección de lodos	Gran acumulación de lodos	Inspeccione a lo largo de los brazos del colector	Agite el manto de lodos a la altura de los brazos del colector con chorros de agua. Aumentar la tasa de remoción de lodos
		Objeto extraño atascado en el mecanismo	Intente extraer el objeto extraño con un dispositivo de agarre. Si el problema persiste drene el espesador y compruebe que el mecanismo de funcionamiento esté libre
	Alineación incorrecta del mecanismo	Alineación	Vuelva a alinear el mecanismo
Agitación del agua	Mala programación de la bomba del afluente	Ciclo de la bomba	Modificar ciclo de la bomba; reducir el flujo y aumentar el tiempo
Crecimientos biológicos excesivos en superficies y vertederos (lodos)	Programa de limpieza inadecuado		La limpieza frecuente y minuciosa de las superficies. Aplicar la cloración
Fuga de aceite	Falla en los sellos de aceite	Sello de aceite	Reemplace el sello
Rodamiento ruidoso o caliente o junta universal	Desgaste excesivo La alineación incorrecta Falta de lubricación	Alineación Lubricación	Reemplazar rodamientos o juntas Alinear las juntas o rodamientos, según sea necesario Lubricar rodamientos o juntas
Sobrecarga de la bomba.	Ajuste inadecuado del embalaje. Bomba obstruida	Revise el embalaje Compruebe si hay basura en la bomba	Ajuste de embalaje Limpieza de la bomba
Partículas de lodo fino en el efluente	Residuos de lodos activados	Residuos de lodos activados en el afluente de espesador	Mejorar acondicionamiento de los lodos activados. Espesar el lodo activado de desecho en un espesador de flotación

interrupciones. En casos graves, puede usarse un dispositivo hidráulico conocido como limpiador de chorro hidráulico para eliminar los bloqueos.

### **Septicidad del lodo**

La septicidad de lodos se caracteriza por la flotación de lodos, arrastre de sólidos en el sobrenadante, malos olores y la reducción de las concentraciones en el lodo espesado. El almacenamiento de los lodos por mucho tiempo, ya sea en el espesador por gravedad o en los sedimentadores secundarios o clarificadores aguas arriba provoca septicidad. Esta condición puede solucionarse temporalmente con la adición de agentes bacteriostáticos, tales como cloro o peróxido de hidrógeno. La aeración del lodo que entra al espesador o la elutriación para proporcionar oxígeno disuelto puede reducir el problema. La tasa de desbordamiento (derrame) no debe exceder de  $32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , si se utiliza el efluente del secundario para diluir el lodo.

### **Bulking o abultamiento de lodos**

El bulking o abultamiento de lodos se identifica por el levantamiento del manto de lodos. El manto se dispersa dando como resultado un sobrenadante de mala calidad y una baja concentración de sólidos en el lodo espesado. El abultamiento de lodos es evidencia de problemas en otros lugares de la planta de tratamiento; por lo tanto, el problema debe ser resuelto en su origen.

El control del abultamiento de lodos debe considerarse de alta prioridad para evitar costos excesivos de químicos y reducir otras alteraciones en el proceso en toda la planta. Cualquier intento de hacer frente al problema del abultamiento

de lodos en el espesador por gravedad debe llevarse a cabo sólo en el corto plazo debido a los gastos que implica. La cloración o la adición de peróxido de hidrógeno al lodo pueden reducir los materiales extracelulares gelatinosos característicos de algunas bacterias que causan el bulking. Agentes de carga tales como la bentonita se utilizan para la captura de los lodos para la formación de un manto. La adición de polímeros ayuda algunas veces al aumento de volumen. En el peor de los casos, el contenido del espesador puede ser bombeado a un lecho de secado para eliminar los lodos de mala calidad, hasta que se mejoren sus características.

### **Formación de vacíos o conificación**

La formación de vacíos o conificación ocurre cuando el sobrenadante claro se bombea a través del manto de lodos para producir una concentración baja en el lodo espesado. Un aumento en la profundidad del manto de lodo reducirá la posibilidad de formación de vacíos. El bombeo de lodos a una velocidad de flujo alta por períodos cortos lleva a la formación de vacíos. Una posible solución es la reducción de la velocidad de bombeo y el aumento de la duración del bombeo de lodos. Los casos severos pueden requerir el reemplazo de las bombas de lodo, por bombas de flujo intermitente de émbolo o bombas de diafragma.

#### **2.2.3.7 Mantenimiento preventivo**

#### **Los elementos de mantenimiento semanales incluyen:**

- Comprobar los niveles de aceite y garantizar que la ventilación esté abierta en la tapa de llenado de aceite

- Inspeccionar todos los desagües de condensado y eliminar de cualquier humedad acumulada
- Examinar la unidad de control de los interruptores límite
- Examinar visualmente el desnatador para asegurar el funcionamiento del deflector espuma y la caja de espuma

**Los elementos de mantenimiento mensual incluyen:**

- Inspección de limpiadores de los desnatadores para controlar el desgaste
- Ajuste de las cadenas de accionamiento o correas

**Los elementos de mantenimiento anual incluyen:**

- Desmontaje de la unidad y el examen de todos los engranes, sellos de aceite y rodamientos. Se deben examinar los engranes y superficies de apoyo en busca de desgaste abrasivo, de puntuación y picaduras
- Comprobación del aceite por la presencia de cualquier metal que podría ser un precursor de problemas futuros. El espesador se debe drenar y revisar todas las partes del mecanismo que están sumergidas. Debe prestarse especial atención al mantenimiento de los recubrimientos de protección, a las conexiones de tuberías flexibles, conexiones atornilladas, y escurridores, si se utilizan

- Sustitución de cualquier pieza que tenga una vida útil esperada de menos de un año. Es mucho más fácil sustituir estos elementos durante el mantenimiento programado que durante una crisis

**Otros elementos de mantenimiento de rutina se enumeran a continuación:**

- Utilización de materiales resistentes a la corrosión cuando sea posible para resistir ambientes hostiles
- Instale las placas de protección en el puente de espesador por gravedad para evitar la caída de objetos en el tanque. Cualquier objeto en el tubo de descarga de la corriente de fondo o debajo del mecanismo detiene rápidamente el funcionamiento del espesador
- Si algún objeto cae al tanque, detenga inmediatamente la operación del espesador para evitar la sobrecarga de torque
- Durante las rondas de la planta, observar regularmente y registrar el indicador de torque, la mejor señal de problemas mecánicos
- Compruebe regularmente el funcionamiento de la bomba del lodo espesado, ya que estas bombas se desgastan rápidamente
- Siga el programa de lubricación recomendado por el fabricante y utilice los lubricantes recomendados. Generalmente, el aceite debe cambiarse después de las primeras 250 horas de funcionamiento y después cada 6 meses

### 2.2.3.8 Seguridad

**Las buenas prácticas de seguridad incluyen los siguientes procedimientos:**

- Cuando se trabaja en el equipo de espesamiento desconecte la alimentación y siga los procedimientos de cierre, bloqueo de salida y etiquetado
- No desconecte la unidad si el indicador de torque registra algún dato. Si la energía se almacena en los resortes que activan el indicador de torque, la liberación de los resortes podría causar daños a la unidad
- Cuando trabaje en el espesador, siga los procedimientos generales de seguridad de la planta, incluyendo aquellos para la entrada a espacios confinados o áreas donde puedan existir gases tóxicos como el sulfuro de hidrógeno y metano

### 2.2.4 ESPESAMIENTO DE BANDA POR GRAVEDAD

#### 2.2.4.1 Descripción del proceso

Los espesadores de banda por gravedad (ilustración 2.18) separan el agua libre de los lodos a través de un drenaje por gravedad a lo largo de una cinta horizontal porosa. Generalmente es necesario el acondicionamiento químico del lodo para separar del agua libre los sólidos en forma de flóculos. Un conducto de alimentación extiende el lodo acondicionado de manera uniforme sobre una banda horizontal en movimiento. Los accesorios para arado (chicanos) distribuyen más los lodos sobre la banda y crean surcos para acelerar el drenaje a través de la banda. Los arados también ruedan los lodos para mejorar aún más la separación de los sólidos del líquido. El filtrado se recoge en una charola o bandeja para su retorno a la corriente de proceso de la planta de tratamiento. Una

Ilustración 2.18 Espesador de bandas por gravedad



rasqueta o espátula situada al final de la banda separa el lodo espesado. En algunos equipos, hay una rampa o prensa que precede a la cuchilla rascadora provocando turbulencia y mezcla, mejorando de este modo la deshidratación. Agua con alta presión (en forma de aerosol) limpia continuamente la banda.

La capacidad hidráulica de un espesador de banda depende de un factor fijo, el tamaño de la máquina que se especifica por el tamaño de la banda. Otros factores que afectan la capacidad son: la densidad de los lodos, la relación entre porosidad de la banda y la reacción del polímero, y la velocidad de la banda.

#### 2.2.4.2 Descripción del equipo

Un sistema de espesamiento de bandas por gravedad (ilustración 2.19) tiene los siguientes componentes:

- Sistema de acondicionamiento de lodos que incluye:
  - Bomba de alimentación de lodos
  - Sistema de alimentación y mezclado de polímero
  - Tanque de floculación o mezclador
- Espesador de bandas de operación continua que incluye:
  - Tolva de entrada
  - Arados (chicanos)

Ilustración 2.20 Espesador de bandas en funcionamiento se observan los arados y la capa de lodo sobre la banda

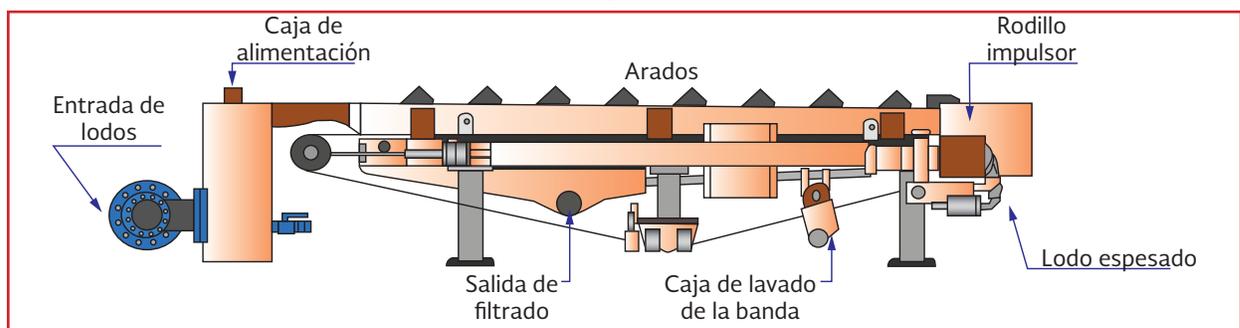


- Rasquetas
- Rampas o presas
- Sistema de lavado de la banda
- Sistema de seguimiento de la banda
- Sistema de tensión de la banda
- Unidad de accionamiento
- Instrumentación y panel de control
- Materiales y recubrimientos
- Accesorios para recibir el lodo espesado

#### 2.2.4.3 Operación durante la puesta en marcha y paradas

Los pasos generales para la puesta en marcha de un espesador de bandas se dan a continuación. Las instrucciones de funcionamiento específicas para los diferentes equipos comerciales deben obtenerse del fabricante del sistema. Antes de la puesta en marcha, deben revisarse cuidadosamente cada uno de los siguientes elementos:

Ilustración 2.19 Esquema de un espesador de bandas por gravedad



- La banda debe estar libre de basura y de escombros
- Que los arados (chicanos) estén colocados correctamente
- La banda esté alineada sobre los rodillos
- Los sensores estén bien conectados a las bandas
- La rampa o presa esté colocada correctamente
- Los depósitos tengan los niveles de líquido adecuados

Los procedimientos operativos para la puesta en marcha mecánica incluyen las siguientes tareas:

- Encender la bomba hidráulica
- Ajustar la tensión de la banda para tener la tensión adecuada
- Comprobar la presión del sistema hidráulico
- Encender o prender el sistema de lavado;
- Revisar las válvulas y boquillas para un rociado adecuado
- Revisar la presión del sistema de agua de lavado
- Encender la unidad de accionamiento principal
- Revisar el control de la velocidad
- Activar el sistema
- Verificar que el sistema esté libre de obstrucciones

Después de que la unidad de accionamiento se energiza, un buen procedimiento para la puesta en marcha comprende los siguientes pasos:

1. Ajustar la velocidad de la banda a la velocidad deseada. Si no existe una velocidad predeterminada, utilizar una velocidad inicial de 15 a 20 m min<sup>-1</sup> (50 a 66 pies min<sup>-1</sup>)

2. Energizar la bomba de polímero y ajustarlo a la velocidad de alimentación requerida. Espere el tiempo necesario para que el polímero llegue al punto de inyección antes de iniciar el siguiente paso
3. Energizar la bomba de lodos y ajustarla a la velocidad de alimentación predeterminada o deseada
4. Ajustar la mezcla de lodos-polímero. Por lo general, con una mezcla adecuada, el resultado es un lodo fino y granular
5. Dejar que el sistema se estabilice, mientras se monitorea las siguientes variables:

- Distribución de los lodos en la sección de gravedad
- Tasas de drenaje
- Patrón de alineación de la banda
- Posición del depósito de los lodos en la sección de gravedad
- Eficacia de lavado de la banda
- Porcentaje de lodo espesado
- La consistencia de los lodos y de flujo de polímero

El procedimiento para el apagado es exactamente al contrario que para la puesta en marcha en la mayoría de las máquinas. Después de que los lodos y el flujo de polímeros se han detenido, la máquina pasa por un período de lavado. La máquina y el sistema de agua de lavado se mantienen operando durante 10 a 15 minutos (o el período recomendado por el fabricante), mientras que el operador revisa y remueve cualquier residuo de lodos. Esto evita la obstrucción de la banda, se extiende la vida útil de la máquina, e impide que el lodo se seque en la máquina. Nunca permita que los lodos se sequen en la máquina.

#### 2.2.4.4 Control del proceso

El operador puede utilizar cuatro variables para optimizar la operación del espesamiento: tasa de alimentación de polímero, la densidad de los lodos, velocidad de la banda y los ajustes mecánicos. Cada una de estas variables se discute a continuación y en la tabla 2.9 se resumen sus efectos.

#### Velocidad de alimentación del polímero

Las tres variables principales que rigen la floculación son:

- Tipo de polímero utilizado
- Potencia de mezclado
- Condiciones para la floculación y el tiempo

El operador necesita las recomendaciones de una empresa de confianza que venda polímeros para determinar el tipo de polímero para la operación específica de espesamiento. Cada compañía que fabrica polímeros ofrece diferentes líneas de polielectrolitos. Si los polímeros de una compañía no proporcionan el desempeño requerido se pueden probar productos de otra compañía. En general, mantener la concentración de polímero entre 0.10 y 0.25 por ciento en volumen proporciona buena floculación.

La tasa de dosificación de polímero versus la concentración de los sólidos en la corriente de lodo se puede representar como una curva en forma de campana. Los cambios en las cargas o en el proceso en otras partes de la planta, se reflejarán en cambios en las características de los lodos de alimentación y también habrá cambios en la eficacia del polímero utilizado

Tabla 2.9 Variables que afectan el rendimiento del espesador por gravedad

Cambios de variables	Concentración de sólidos espesados <sup>a</sup>	Recuperación de sólidos <sup>a</sup>	Uso de polímeros <sup>a</sup>	Rendimiento de sólidos	Rendimiento hidráulico
Aumentar la concentración de lodos alimentados	I	I o S	D	— <sup>b</sup>	— <sup>b</sup>
Aumentar la velocidad de alimentación de lodos	D	D	I	— <sup>b</sup>	— <sup>b</sup>
Edad de lodos alta <sup>c</sup>	D	D	I	D	D
Edad de lodo baja <sup>c</sup>	I	I	D	I	I
Incrementar el uso de polímeros sobre el óptimo	— <sup>d</sup>	— <sup>a</sup>	—	D o S	D o S
Aumentar la velocidad de la banda	D	D	—	D	D
Disminuir la velocidad de la banda	I	I	D o S	D	D
La banda demasiado suelta. (porosa)	D	I	I	I	I
Banda con tejido de poro muy fino. (ajustado)	D	I	I	D	D
Baja presión en el agua de lavado	D	D	I	D	D
Poco volumen de agua de lavado	D	D	I	D	D

<sup>a</sup> I = Incrementa; D = disminuye; S = sin cambio esperado

<sup>b</sup> Los límites de rendimiento del espesador dependen del flujo hidráulico a bajas concentraciones de sólidos en el lodo alimentado (0,5 a 1,5%) y de la tasa de alimentación de sólidos para altas concentraciones de sólidos (2 a 3%).

<sup>c</sup> Los efectos indicados son para los lodos activados de desecho crudos o estabilizados aerobiamente. Los lodos estabilizados anaerobiamente con mayor edad de lodo generalmente tienen características muy buenas de espesamiento.

<sup>d</sup> Un incremento en la dosis de polímero sobre el óptimo mejora ligeramente la recuperación de sólidos y la concentración sólidos en la torta; Sin embargo, aumentar demasiado la dosificación de polímero, disminuye el rendimiento del espesador y aumenta el costo de operación.

y en su nivel de dosificación óptimo. Por lo tanto, el operador necesita experimentar con el sistema para encontrar el punto donde un incremento o reducción de la dosis de polímero reduce el rendimiento. En general, a medida que aumenta el contenido de sólidos biológicos en la corriente de lodo, aumenta la dosis de polímero requerido.

Se requiere un nivel mínimo de energía (energía de mezcla) para provocar la floculación. La energía necesaria varía con la fuerza del flóculo, el esfuerzo cortante determinado para cada polímero, y las tasas de flujo.

Las buenas condiciones de floculación requieren la reacción completa de la mezcla de polímero con los lodos. El operador puede ajustar este tiempo de reacción, cambiando la posición de entrada de polímero, permitiendo así diferentes períodos para la mezcla, o por el cambio de la velocidad del flujo hidráulico.

### **Densidad de lodos (velocidad de alimentación hidráulica / velocidad de alimentación de sólidos)**

El control de la densidad del lodo funciona de la siguiente manera: si se requiere producir una cantidad determinada ( $\text{kg h}^{-1}$ ) de lodo espesado, la densidad de los lodos de alimentación debe ser lo suficientemente alta como para permitir una cierta pérdida de sólidos mientras se obtiene la producción horaria requerida a una tasa de flujo específica. Por otra parte, si la densidad de los lodos de alimentación desciende por debajo de la requerida, se debe aumentar la velocidad de alimentación para mantener la producción. En segundo lugar, ya que los cambios de densidad de los lodos causan variaciones en la reacción del polímero con el lodo, la adición de polímero

necesita un ajuste para mantener la eficacia con respecto a las reacciones de desorción de agua. Si el lodo se desagua fácilmente, se puede alimentar más sin causar inundaciones.

El tipo de tejido de la banda y su porosidad deben tomarse en cuenta. Si el tejido está demasiado apretado, el taponamiento de la banda puede retardar la liberación del agua descrito anteriormente. Si el tejido es demasiado flojo, partículas de lodo pueden pasar a través de la banda, lo que reduce la velocidad de captura y la producción.

### **Velocidad de la banda**

La velocidad de la banda es también una variable importante. Asumiendo el control de las variables anteriores, el aumento de la velocidad de la banda tiene una desventaja de rendimiento. Cuando la velocidad de la banda es mayor, el rendimiento de la unidad puede disminuir debido a que el porcentaje de sólidos espesados generalmente disminuye.

### **Ajustes mecánicos**

El operador puede ajustar varios dispositivos mecánicos que influyen en el rendimiento del espesador. Estos dispositivos incluyen rampas o presas, distribución de entrada, arados y ajuste del ángulo de la banda. Cada uno de éstos se describen a continuación

### **Rampas o presas**

Las rampas o presas, situadas en el extremo de la descarga de la banda, mejoran la eficiencia de espesamiento, al servir como una restricción a los sólidos que se aproximan a lo largo de la banda ajustable. Dependiendo del tipo de

rampa o presa, los sólidos que vienen de frente se ven obligados a crear fuerzas de corte y de compresión, que causan la liberación del agua libre de sólidos. El ajuste de la rampa o presa depende de las características de alimentación de los lodos.

Con lodos que presenten un flóculo débil, la perturbación de la rampa o presa debe reducirse al mínimo para evitar la destrucción de flóculo por un exceso de fuerza cortante. Los lodos fuertes, producen mayor concentración en el lodo espesado. El operador ajusta la rampa o presa para obtener la mayor concentración de sólidos espesados, con el menor costo del polímero.

En ocasiones, el incremento en la concentración máxima de sólidos obtenida en el lodo, excede la capacidad de transporte de las instalaciones receptoras. En este caso la rampa o presa puede ajustarse para reducir a la concentración requerida para el transporte de sólidos.

#### **Distribución de lodos a la entrada**

La distribución uniforme de los lodos a través del área efectiva de la banda, ayuda a lograr el máximo rendimiento. El método de distribución de entrada varía entre los diferentes equipos comerciales. Independientemente del método, una buena distribución requiere mantener la entrada libre de trapos, astillas de madera, y otras partículas que puedan desviar el flujo.

#### **Arados (chicanos)**

Los arados o chicanos mueven el lodo sobre la banda a medida que viaja desde la entrada hasta el extremo de descarga. La ubicación de los arados se ajusta mediante una prueba de ensayo y error para

proporcionar el máximo de giro, sin incrementar las fuerzas de corte.

#### **Ángulo de la banda**

En algunos casos, el operador puede ajustar el ángulo de inclinación de la banda a aproximadamente 7 grados sobre la horizontal. El aumento del ángulo comprime el lodo para mejorar el espesamiento. En general, el aumento en el ángulo de inclinación funciona mejor en lodos con flóculos resistentes.

#### **2.2.4.5 Rendimiento**

Una forma de dar seguimiento al desempeño del espesador por gravedad es medir el porcentaje de recuperación de sólidos capturados. Si se captura el 95 por ciento de 100 kilos de sólidos alimentados al espesador por gravedad, 95 kilos irán a un proceso de estabilización y los 5 kilos restantes salen en el filtrado y se regresan al sistema de tratamiento de agua. Otro factor que debe calcularse es la carga hidráulica y la carga de sólidos sobre el espesador.

Las fórmulas para calcular estos parámetros son:

- Captura de sólidos =  $(\text{Peso de sólidos en el lodo espesado} / \text{peso de los sólidos en el lodo alimentado}) \times 100$
- Tasa o velocidad de carga hidráulica =  $\text{Flujo de lodo alimentado} / \text{Ancho de la banda}$
- Tasa o velocidad de carga de sólidos =  $\text{Tasa o velocidad de alimentación de lodo} / \text{Ancho de banda}$
- Valores típicos para este parámetro se encuentra entre 140 a 400 kg h<sup>-1</sup> por metro de ancho de banda

## Ejemplo 2.10

Calcular la cantidad de sólidos capturados y la velocidad de carga hidráulica en un espesador por gravedad de 2 metros de ancho de banda. La unidad opera ocho horas por día. El flujo de lodos alimentado a la unidad es de  $22 \text{ L s}^{-1}$  con una concentración de sólidos de 0.8 por ciento. El volumen de lodo espesado es de  $67\,500 \text{ L d}^{-1}$  con una concentración de sólidos del 6 por ciento.

### Datos:

- Espesador por gravedad con 2 metros de ancho banda
- Flujo de lodos alimentado =  $22 \text{ L s}^{-1}$
- Concentración de sólidos en el lodo alimentado = 0.8 %
- Volumen de lodo espesado =  $67\,500 \text{ L d}^{-1}$
- Concentración de sólidos en el lodo espesado = 6 %
- Tiempo de operación del espesador = 8 horas por día
- Peso de sólidos alimentados a la banda de gravedad =  $4\,400 \text{ kg d}^{-1}$
- Equivalencia 1 L de agua pesa 1 kg

### 1. Cálculo de los sólidos capturados

- Captura de sólidos (%) = (Peso de sólidos en el lodo espesado / peso de los sólidos en el lodo alimentado)  $\times 100$
- **Se calcula el peso de sólidos en el lodo espesado**
  - Peso de los sólidos en el lodo espesado = Volumen de lodo  $\times$  concentración del lodo
  - Peso de los sólidos en el lodo espesado =  $67\,500 \text{ L d}^{-1} \times 1 \text{ kg} / 1 \text{ L} \times 0.06 = 4\,050 \text{ kg d}^{-1}$

### – Se calcula el peso de los sólidos en el lodo alimentado

- Peso de los sólidos en el lodo alimentado = Volumen de lodo alimentado  $\times$  Concentración del lodo alimentado
- Volumen de lodo alimentado =  $22 \text{ L s}^{-1} \times 60 \text{ s min}^{-1} \times 60 \text{ min h}^{-1} \times 8 \text{ h d}^{-1} = 633\,600 \text{ L d}^{-1}$
- Peso de sólidos en el lodo alimentado =  $633\,600 \text{ L} / \text{D} \times 1 \text{ kg} / 1 \text{ L} \times 0.008 = 5\,068.8 \text{ kg d}^{-1}$

### – Se calcula el % de sólidos capturado

- Captura de sólidos (%) =  $4\,050 \text{ kg d}^{-1} / 5\,068.8 \text{ kg d}^{-1} \times 100 = 79.9 \%$

### 2. Cálculo de la velocidad o tasa de carga hidráulica

- Tasa o velocidad de carga hidráulica = Flujo de lodo alimentado / ancho de la banda
- Tasa o velocidad de carga hidráulica =  $22 \text{ L s}^{-1} / 2 \text{ m} = 11 \text{ L s}^{-1}$  por metro de ancho de banda

### 3. Cálculo de la tasa o velocidad de carga de sólidos

- Tasa o velocidad de carga de sólidos = Tasa o velocidad de alimentación de lodo / ancho de banda
- **Se convierte la alimentación diaria a alimentación horaria**
  - Velocidad de lodo alimentado =  $4\,400 \text{ kg d}^{-1} \times 1 \text{ d} / 8 \text{ h} = 550 \text{ kg h}^{-1}$
  - Tasa o velocidad de carga de sólidos =  $550 \text{ kg h}^{-1} / 2 \text{ m} = 275 \text{ kg h}^{-1}$  por metro de ancho de banda

La velocidad de carga de sólidos sobre la banda del espesador se encuentra en los rangos recomendados.

La Tabla 2.10 resume los rangos típicos de desempeño esperado para espesadores de bandas y la tabla 2.11 muestra los rangos de carga hidráulica para los distintos tamaños de banda. En la tabla 2.12 se encuentran las características de los espesadores que actualmente operan en los Estados Unidos de América.

#### 2.2.4.6 Principales problemas y soluciones

En la tGuía de solución de problemas para el filtro de bandas por gravedad<sup>3</sup> se presenta una guía de diagnóstico que identifica problemas y presenta posibles soluciones en la operación de un filtro de bandas por gravedad.

Tabla 2.10 Rangos típicos de desempeño de los espesadores por gravedad

Tipo de lodos	Sólidos en la alimentación (%)	Agua removida (%)	Sólidos en los lodos espesados (%)	Sólidos recuperados (%)
Primario	3.0 – 6.0	40 – 75	7 – 9 93 – 98	
Desecho de lodos activados	0.5 – 1.0	70 – 90	4 – 9	93 – 99
Primario y desecho de lodos activados	2.0 – 4.0	50	5 – 9	93 – 98
Digestión aerobia	0.8 – 2.0	70 – 80 4 – 6	90 – 98	
Digestión anaerobia	2.5 – 5.0	50	5 – 9	90 – 98
Fibras de papel	4.0 – 8.0	50 – 60	9 – 15	87 – 99

Tabla 2.11 Rangos de carga hidráulica típica para el espesador por gravedad

Tamaño de la banda <sup>a</sup> , m	Rango de carga hidráulica <sup>b</sup> , gpm
1.0	100 – 250
1.5	150 – 375
2.0	200 – 500
3.0	300 – 750

<sup>a</sup> Ancho efectivo para la deshidratación

<sup>b</sup> Asume 0,5 a 1,0% de sólidos en el lodo alimentado y lodos municipales. Tenga en cuenta que las variaciones en la densidad del lodo, la porosidad de la banda, la dosis del polímero y la velocidad de la banda pueden cambiar las tasas de flujo para cualquier ancho de banda.

Tabla 2.12 Características de los espesadores en operación que trabajan con una mezcla de lodos

Características de rendimiento	Tamaño de la banda, 1.0 m	Tamaño de la banda, 2.0 m
Rango de caudal del afluente, gpm	0 – 250	175 – 300
Caudal medio del afluente, gpm	95	175
Concentración de sólidos del afluente, mg L <sup>-1</sup>	Media: 4000 Rango: 1000 – 10 000	Media: 19 000 Rango: 5000 – 40 000
Concentración de sólidos del efluente, mg L <sup>-1</sup>	Media: 90 000 Rango: 40 000 – 120 000	Media: 57 500 Rango: 50 000 – 70 000
Concentración de sólidos, porcentaje	Media: 6.75 Rango: 2 – 12	Media: 6.0 Rango: 5 – 7
Requerimientos del personal para mantenimiento, h/d	2.0	3.0
Dosis de polímero, lb polímero seco / toneladas sólido seco	8.5	3 – 9
Costos de polímero, Pesos \$/t sólido seco	\$ 126.56	\$ 156.33

<sup>a</sup>Equipos auxiliares en las anteriores instalaciones incluyen: bombas de agua de dilución, sistema de mezcla de polímeros, sistema de alimentación del polímero, variadores de velocidad y bombas para lodos espesados.

Tabla 2.13 Guía de solución de problemas para el filtro de bandas por gravedad

Problema	Causa probable	Solución
No hay formación de flóculos en el tanque de mezcla	No hay suficiente polímero	Aumentar la dosis de polímero o disminuir los sólidos en la alimentación
	Polímero viejo e inactivo Polímero incorrecto	Prepare un nuevo lote Realice una prueba para la selección de polímeros
Buena formación de flóculos en la mezcla de tanque, pero el lodo espesado sale mal	Tiempo de contacto (reacción) del polímero y del lodo demasiado corto	Inyectar polímero en una fase previa o antes de la bomba de lodos
	Exceso de polímero	Aumentar los sólidos en la alimentación y disminuir el polímero
	Banda obstruida	Abrir válvula de lavado Abrir válvula de refuerzo Limpiar el sistema de lavado Limpiar la banda con solución cáustica
	Contenido de sólidos muy alto.	Disminuir la cantidad de sólidos en los lodos Aumentar la velocidad de la banda
Filtrado muy sucio	Flóculo inestable	Aumentar, disminuir o cambiar el polímero Mover el punto de inyección de polímero más cerca o en el tanque de mezcla
	Flóculo demasiado pequeño	Igual que el anterior Disminuir la velocidad del mezclador Lodos muy concentrados en la alimentación
Los lodos se derraman en la entrada a la banda	Velocidad de la banda muy lenta	Aumentar la velocidad de la banda
	Concentración de lodo alimentado muy alta Las pantallas de deshidratación están tapadas	Disminuir la concentración en el lodo alimentado Limpiar el sistema de lavado Ajustar la frecuencia del ciclo de lavado
La banda se centra en el carro, pero la banda no está centrada en los rodillos	Válvula de detección no está correctamente alineada	Realignar la válvula de detección
Banda estable, el carro no está centrado, la banda no está centrada en los rodillos	Los rodillos no están paralelos La banda no está bien acomodada	Calzar los rodillos para que queden paralelos Arreglar la banda o reemplazar
Banda se recorre o viaja hacia un lado	Tensión de la correa muy apretada La distribución desigual de los lodos El rodamiento de los rodillos está dañado	Tensar correctamente banda Distribución correcta de la banda Localizar y reemplazar los rodamientos
	Dirección del circuito respondiendo al revés Dirección de circuito no responde	Invierta los cables de la válvula o cilindro afectado Reemplace o repare la válvula de dirección Reemplace o repare la banda de acoplamiento
Continuamente la banda se va hacia a un lado.	Cilindro de dirección muy desgastado Rodillos fuertemente desalineados La banda en mal estado	Reemplace o repare el cilindro Realigne los rodillos Cambie la banda
	Dirección de la válvula fuera de la alineación Presión del aceite hidráulico insuficiente Distribución desigual de lodo	Realigne la válvula Sustituya el aceite o repare o reemplace la unidad de presión hidráulica Distribución correcta

Tabla 2.13 Guía de solución de problemas para el filtro de bandas por gravedad (continuación)

Problema	Causa probable	Solución
Aparecen tiras sucias	Boquillas o toberas de lavado obstruidas Presión del agua demasiado baja Sistema de aspersión no adecuado Sólidos acumulados bajo la cuchilla	Limpie o reemplace las toberas Aumente la presión Reemplace o utilice la bomba de refuerzo para aumentar la presión Limpiar Cuchilla
Salpicaduras en el extremo de las bandas		Instale protectores contra salpicaduras
Rodamientos propensos al desgaste		Instale los rodamientos de alta resistencia

#### 2.2.4.7 Mantenimiento preventivo

Las actividades de mantenimiento más importantes se enumeran a continuación.

- Diario:
  - Revisar el flujo de agua en el depósito
  - Revisar el sistema en busca de fugas
  - Revisar la banda de poliéster buscando daños
  - Revisar el indicador del filtro en la línea de retorno de agua
  - Verificar la temperatura del aceite. Si excede los límites de operación, desconecte o apague el sistema y determine la razón del sobrecalentamiento
- Semanal:
  - Lubricar los rodamientos de los rodillos
  - Cambiar elementos cuando sea necesario o dictado por la experiencia
- Semi-Anual:
  - Análisis del líquido hidráulico
  - Revisar el lubricante del reductor
- Anual:
  - Reacondicionar el aceite o seguir las recomendaciones obtenidas en el análisis hidráulico
  - Cambiar la lubricación del reductor
- Fuera de operación prolongada:
  - Lubricar los rodamientos
  - Girar todos los ejes cada 60 días
  - Seguir los procedimientos para poner en marcha el paquete de energía hidráulica

#### 2.2.4.8 Seguridad

- Como con cualquier procedimiento para el manejo de lodos, se debe considerar la presencia de olores por H<sub>2</sub>S y conocer sus efectos tóxicos. Cuando trabaje en el espesador, siga los procedimientos generales seguridad de la planta. Deben seguirse las precauciones de seguridad para garantizar una ventilación adecuada, monitoreo y otros procedimientos
- Una conexión o cable de emergencia debe instalarse a lo largo y a cada lado de la banda del espesador por gravedad. El cable de emergencia debe detener la banda del espesador, desconectar todo el equipo auxiliar, y permanecer en la posición de paro hasta que se reinicie manualmente

## 2.3. DESHIDRATACIÓN DE LODOS

### 2.3.1 OBJETIVOS

- Explicar el proceso de deshidratación y la forma en que se relaciona con otros procesos de tratamiento de aguas residuales
- Conocer la función de los diversos tipos de equipo de deshidratación
- Explicar la solución de problemas y las prácticas de seguridad

### 2.3.2 INTRODUCCIÓN

El proceso de deshidratación se realiza para incrementar la concentración de sólidos en el lodo, mediante la eliminación del agua. La concentración final de sólidos de la torta de lodo varía con el tipo de deshidratación. Por lo tanto, es importante basar la selección del proceso de deshidratación para la planta en el porcentaje de sólidos requerido en el lodo deshidratado de acuerdo al método de tratamiento. Por ejemplo, si en la planta se utiliza un incinerador, se requiere que el equipo de deshidratación produzca una torta con no menos de 25 por ciento de sólidos totales para tener un uso eficiente del combustible. Sin embargo, para la aplicación al suelo, 20 por ciento de sólidos o menos pueden ser adecuados.

Procesos de deshidratación actuales incluyen sistemas de secado al aire, como los lechos de secado de arena o los lechos de secado con ayuda de vacío; o métodos mecánicos, tales como los filtros prensa de banda, centrífugas o filtros de presión. En esta unidad, se describirá un proceso de secado al aire como son los lechos de secado de arena y un proceso de deshidratación

mecánico, el filtro prensa de bandas. Estos son los sistemas que más se utilizan en México. Para obtener más información sobre estos procesos se puede consultar el MAPA, en el capítulo 12 del libro "Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: tratamiento y disposición de lodos".

### 2.3.3 FILTRO PRENSA DE BANDA

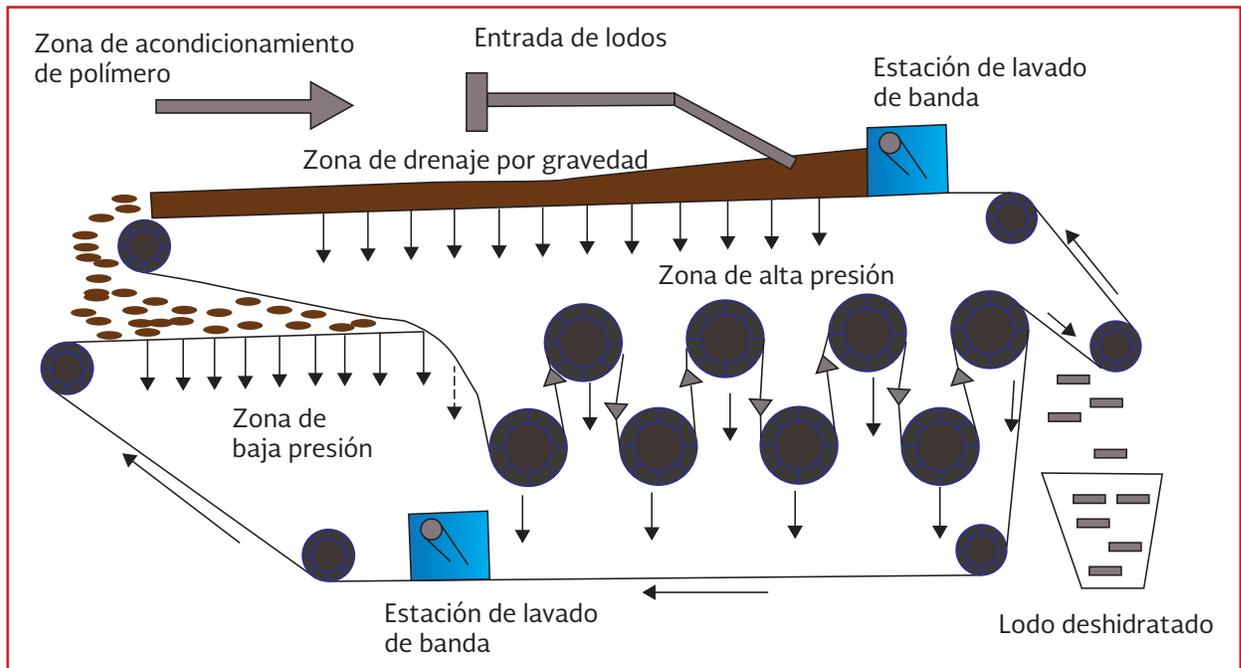
Esta sección describe la operación y control de procesos para filtros prensa de banda. Así como también sus necesidades de operación y mantenimiento.

Los filtros prensa de banda utilizan la gravedad y la presión para eliminar el agua del lodo acondicionado. Están diseñados sobre la base de un concepto simple: Lodos intercalados entre dos cintas porosas se hacen pasar sobre y bajo rodillos de diferentes diámetros. A medida que el diámetro de los rodillos disminuye, las fuerzas de presión y de corte se ejercen sobre el lodo permitiendo extraer el agua. Aunque en el mercado existen diferentes diseños de filtros prensa de bandas, todos ellos incorporan los siguientes elementos básicos:

- Zona de acondicionamiento del polímero
- Zona de drenaje por gravedad
- Zona de baja presión
- Zona de alta presión

**Zona de acondicionamiento de polímero:** La ilustración 2.21 identifica estas zonas en un esquema simplificado de filtro prensa de banda. La zona de acondicionamiento del polímero puede ser un pequeño depósito con un mezclador de velocidad variable (aproximadamente 265 a 379 L (70 a 100 galones)) situado de 0.6 a 0.9 m (2 a 3 pies) de la prensa, un tambor giratorio

Ilustración 2.21 Zonas de procesamiento de filtro prensa de banda



unido a la parte superior de la prensa, o un inyector en línea. Cada fabricante por lo general suministra estas instalaciones con el filtro prensa de banda. La preparación y aplicación efectiva del polímero son fundamentales para el desempeño óptimo del filtro prensa de bandas.

**Zona de drenaje por gravedad:** Tiene una banda plana o ligeramente inclinada que es única para cada modelo de prensa. Esta zona elimina el agua libre (agua intersticial en la mezcla de lodos) por gravedad. Si el lodo está correctamente acondicionado, el operador debe esperar un aumento en la concentración de sólidos en esta zona de 7 a 10 puntos porcentuales a comparación de la concentración de sólidos en la alimentación. Por ejemplo, se alimenta al filtro prensa una combinación de lodo primario y lodos activados de desecho con 3 por ciento de sólidos totales, al final de la zona de gravedad se obtendrá un lodo con alrededor de 10 a 13 por ciento de sólidos. Si el lodo no drena bien en

esta zona, pueden ocurrir problemas tales como obstrucción de las bandas y taponamiento de la malla de la banda.

**Zona de baja presión:** también llamada la zona de cuña por algunos fabricantes, las cintas superior e inferior se unen con el lodo, formando un “sándwich” de lodos. La zona de baja presión prepara el lodo mediante la formación de una torta de lodo firme capaz de soportar las fuerzas mayores dentro de la zona de alta presión.

**Zona de alta presión:** a medida que las bandas superior e inferior avanzan sobre y debajo de una serie de rodillos con diámetros decrecientes, el lodo se comprime progresivamente. Algunas prensas tienen una zona de alta presión independiente con bandas o cilindros hidráulicos para aumentar aún más la presión en el lodo, produciendo de este modo una torta seca. Esto es adecuado para la incineración que necesita la torta más seca posible.

Antes de la aplicación del lodo este debe ser acondicionado con polímero. Una vez que el lodo es acondicionado, fluye sobre la banda inferior y en la zona de drenaje por gravedad. En esta zona, los lodos se distribuyen a todo lo ancho de la banda para que el agua libre drene por gravedad, aumentando el contenido de sólidos hasta un 10 por ciento. Después de que la mayor parte del agua libre se ha drenado, el lodo acondicionado entra en la zona de alta presión en los rodillos del filtro prensa de banda. Aquí se presiona el lodo entre dos bandas que montan sobre los rodillos que ofrecen aumento gradual de compresión. Se elimina el agua adicional del lodo desde la zona de baja presión, creada por los rodillos de gran diámetro, a la zona de alta presión, creada por los rodillos de pequeño diámetro. Una vez que el lodo pasa a través de las cuatro zonas, la deshidratación es completa. Las rasquetas (ilustración 2.22) se utilizan para eliminar cualquier resto de torta de lodo de las bandas. Finalmente, chorros de agua a alta presión (ilustración 2.23) limpian las bandas después de que se descarga el lodo deshidratado. Para reducir el rociado y el chapoteo, estos sistemas de lavado son normalmente cerrados.

Ahora que se tiene una comprensión general de cómo funciona un filtro prensa de banda, se presentan más detalladamente algunos de los componentes de un filtro prensa de banda. Existen dos grandes categorías: los componentes que son en realidad la prensa y los equipos auxiliares tales como sistemas de alimentación de lodos y polímeros.

Los componentes integrales a la prensa que tienen el mayor efecto sobre el rendimiento son: la transmisión, el sistema de alineación y el sistema de lavado. La transmisión de la banda utiliza un motor de velocidad variable para ajustar la velocidad de la banda. Cuanto más

Ilustración 2.22 Filtro prensa de banda (rasquetas)



Ilustración 2.23 Sistema de lavado de rociado de filtro prensa de banda



Ilustración 2.24 Sistemas de control del filtro prensa de bandas



rápido se muevan las bandas, se forma una capa más delgada entre las dos bandas. El aumento de velocidad de la banda puede aumentar el rendimiento, pero la concentración de sólidos en

la torta de lodo disminuye debido al tiempo de deshidratación. A la inversa, cuando las bandas se mueven más lentamente, una capa más gruesa de lodo se forma entre las dos bandas, produciendo una concentración mayor en la torta de sólidos, pero un rendimiento inferior. Se puede ajustar la velocidad de la banda para obtener mejores resultados cuando cambien las características de los lodos que se alimentan.

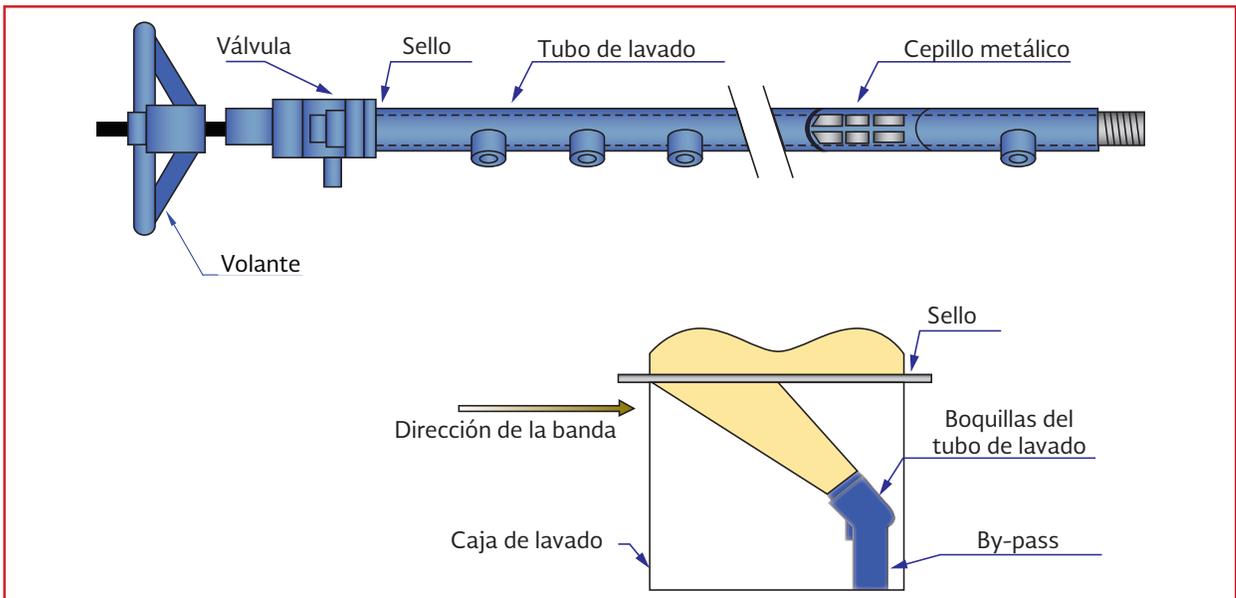
El sistema de alineación de la banda es importante en el filtro prensa de bandas. Este sistema mantiene las bandas centradas a medida que avanzan sobre los rodillos. Si los rodillos no están exactamente paralelos y aplicando la misma presión en todo el ancho de la banda, las bandas realizarán un movimiento hacia un lado o el otro. La alineación inadecuada puede provocar el contacto entre la banda y el marco y el desgarramiento de las mismas. Para mantener las bandas “en línea” se necesita equipo como sensores, cilindros de control hidráulicos o neumáticos y rodillos de alineación, que hacen ajustes finos constantemente. Los sensores están en contacto constante con los bordes de ambas

bandas. Cuando una banda comienza a desviarse fuera de la línea, el sensor de borde envía una señal eléctrica a los cilindros hidráulicos o neumáticos. Los cilindros se mueven, cambiando la tensión aplicada a la banda mediante rodillos de alineación y se realiza el ajuste de la banda quedando otra vez alineada.

El sistema de lavado de la banda consiste en chorros de agua a alta presión (ilustración 2.25) que se utilizan para limpiar las bandas después de que el lodo deshidratado se descarga. Esta operación de limpieza es muy importante para la eficiencia general del proceso. Si las bandas no se limpian bien, se tapan. El taponamiento reduce la capacidad para drenar el agua libre de la torta de lodo, disminuyendo la concentración de sólidos resultante. Por otra parte, la acumulación de sólidos en la banda puede provocar que las bandas se deslicen, lo que resulta en problemas graves de alineación.

Hay otros equipos mecánicos que son muy importantes para el rendimiento del filtro prensa de banda, pero que no son en realidad

Ilustración 2.25 Sistema de lavado de los filtros prensa de banda. (Water Environment Federation, 2001)

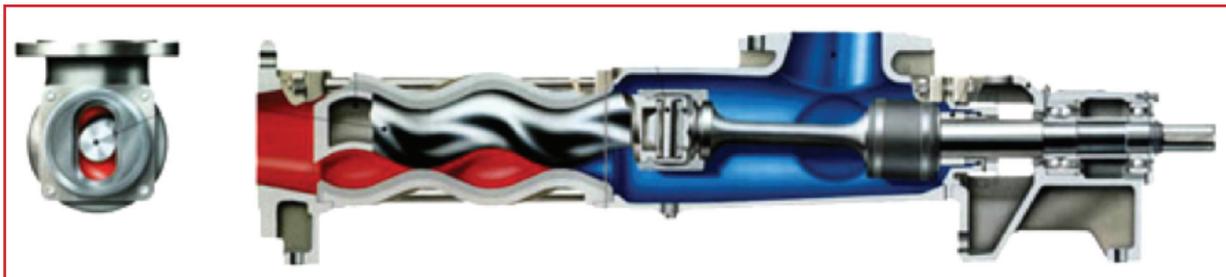


parte de la prensa. Estos componentes auxiliares incluyen cribadoras o trituradoras de lodos; bombas para la alimentación de polímero y del lodo; puntos de alimentación de polímero; y en algunos casos, los tanques de floculación. Una criba o trituradora (ilustración 2.26) por lo general se instala en la línea de alimentación de lodos para garantizar que el lodo sea homogéneo y no contenga materiales que puedan tapan o perforar las bandas o que pudieran quedar atrapados detrás de la cuchilla. La eliminación o trituración de sólidos de gran tamaño da como resultado una capa más uniforme de lodos y una presión más constante entre las bandas.

Ilustración 2.26 Trituradoras en línea para sólidos



Ilustración 2.27 Bomba de cavidad progresiva



Las bombas de alimentación de los lodos y de polímero también son importantes para el buen funcionamiento de un filtro prensa de banda. Por lo general son de velocidad variable y de desplazamiento positivo. Estas bombas, tales como la bomba de cavidad progresiva (ilustración 2.27), son muy adecuadas para lodo y/o polímero que se mueve a una tasa ajustable, lo que permite la máxima eficiencia de funcionamiento del filtro prensa de banda. A continuación, se añade polímero al lodo antes de entrar en un tanque de mezcla o floculación o antes de un mezclador en línea. La ubicación del punto de adición del polímero puede tener un efecto significativo sobre el desempeño del filtro prensa de banda. Para estabilizar el rendimiento del filtro prensa de banda, un operador puede variar el punto de adición en respuesta a las cambiantes condiciones de lodos y de polímeros.

Cuando se utiliza un tanque de floculación este suele tener un mezclador con un motor de accionamiento de velocidad variable. El propósito del depósito de floculación es crear una zona de turbulencia del flujo, que permite a los lodos y al polímero mezclarse y formar un flóculo fuerte. Esto es fundamental para proporcionar una mezcla adecuada con tiempo de retención suficiente para permitir la formación de flóculos antes de que el lodo se descargue al filtro prensa de banda. Sin embargo, la mezcla no debe ser tan vigorosa, ya que destruye al flóculo. Si las velocidades de mezcla se aumentan hasta el punto donde se producen fuerzas de corte, la

concentración de sólidos de la torta y la tasa de captura de sólidos del filtro prensa de banda disminuirá de manera significativa.

### 2.3.3.1 Control del proceso

El control del proceso para filtros prensa de banda típicamente consiste en el cálculo de la tasa de

carga de sólidos, dosificación de polímero, y tasa de captura de los sólidos. Se dará un ejemplo del cálculo de cada uno de estos parámetros. En la (ecuación 2.1) se muestra la fórmula para calcular la tasa de carga de sólidos para un filtro prensa de banda. Las tasas típicas de carga de sólidos se ubican en el orden de 400 a 500 kg h<sup>-1</sup> (900 a 1100 lb h<sup>-1</sup>) por metro de ancho de banda.

$$Tasa\ de\ carga\ de\ sólidos = \frac{Velocidad\ de\ alimentación\ de\ sólidos\ (en\ base\ seca)}{Ancho\ de\ la\ banda}$$

Ecuación 2.1

Rango para la tasa de carga de sólidos  
400 a 500 kg·h<sup>-1</sup> por metro de ancho de banda  
(900 a 1100 lb·h<sup>-1</sup> por metro de ancho de banda)

#### Ejemplo 2.11 Cálculo de la tasa o velocidad de carga sólidos de un filtro prensa de banda

##### Datos:

Velocidad de alimentación de lodos = 9.2 L s<sup>-1</sup>  
con el 3 por ciento de sólidos totales

Se utiliza un filtro prensa de 2 metros de ancho de banda

- Equivalencias:
- 1 litro de agua pesa 1 kg
- 1 min = 60 segundos
- 1 h = 60 min

#### 1. Cálculo de la tasa de alimentación sólidos

Tasa de alimentación de sólidos = tasa de alimentación de lodos × porcentaje de sólidos

$$= 9.2\ L\ s^{-1} \times 1.0\ kg\ L^{-1} \times 60\ s\ min^{-1} \times 60\ min\ h^{-1} \times 0.03 = 994\ kg\ h^{-1}$$

Después se calcula la tasa de carga de sólidos (Tcs):

$$Tcs = \frac{Velocidad\ de\ alimentación\ de\ sólidos\ (en\ base\ seca)}{Ancho\ de\ la\ banda}$$

Tasa de carga de sólidos = 994 kg h<sup>-1</sup> / 2 m

$$= 497\ kg\ h^{-1}\ por\ metro\ de\ ancho\ de\ banda$$

#### 2. Cálculo de la tasa de dosificación de polímero

La tasa de dosificación del polímero se calcula dividiendo el peso de polímero seco aplicado por el peso de los sólidos alimentados a la banda, como se muestra en la ecuación 2.2

$$Tasa\ de\ dosificación\ de\ polímero = \frac{Peso\ seco\ de\ polímero}{Peso\ seco\ de\ los\ sólidos}$$

Ecuación 2.2

Se presenta un ejemplo de cálculo de la tasa de dosificación de polímero:

**Datos:**

- Tasa de alimentación de la solución de polímero = 0.33 L s<sup>-1</sup> en una solución al 0.5 por ciento
- Tasa de alimentación de lodos = 12.4 L s<sup>-1</sup> con el 3% de sólidos totales
- Se utiliza un filtro prensa de banda de 2 m, y se opera un turno de 8 horas por día.
- Equivalencias:
  - 1 L de agua pesa 1 kg
  - 1 ton = 1000 kg
  - 1 min = 60 s
  - 1 hora = 60 min

**Captura de sólidos en el filtro prensa**

$$Tasa\ de\ dosificación\ de\ polímero = \frac{Peso\ seco\ de\ polímero}{Peso\ seco\ de\ los\ sólidos}$$

Calcular el peso seco de polímero:

Peso seco de polímero (*P<sub>sp</sub>*) = Tasa de alimentación de polímero × unidad de tiempo de ejecución × concentración de la solución

- $P_{sp} = 0.33\ L\ s^{-1} \times 60\ s\ min^{-1} \times 60\ min\ h^{-1} \times$

$$Captura\ de\ sólidos = \frac{Peso\ de\ los\ sólidos\ de\ a\ lim\ entación - Peso\ de\ los\ sólidos\ del\ filtrado}{Peso\ de\ los\ sólidos\ de\ a\ lim\ entación} \times 100\ %$$

**Ejemplo 2.12 Cálculo de captura de sólidos.**

**Datos:**

- Tasa de alimentación de lodos = 11.0 L s<sup>-1</sup> con un 3% de sólidos totales
- Caudal del filtrado = 1.39 L s<sup>-1</sup> a 1% de

$$8\ h\ d^{-1} \times 0.005 \times 1.0\ kg\ L^{-1} = 47.52\ kg\ d^{-1}$$

A continuación, se calcula el peso seco de los lodos:

Peso seco de sólidos = tasa de alimentación de lodos × unidad de tiempo de ejecución × porcentaje de sólidos en el lodo:

- $= 12.4\ L\ s^{-1} \times 60\ s\ min^{-1} \times 60\ min\ h^{-1} \times 8\ h\ d^{-1} \times 0.03 \times 1.0\ kg\ L^{-1} \times 1\ t / 1\ 000\ kg = 10.7\ t\ d^{-1}$

Después se calcula la tasa de dosificación de polímero:

Tasa de dosificación de polímero:

$$= (47.52\ kg\ d^{-1}) / (10.7\ t\ d^{-1}) = 4.44\ kg\ de\ polímero / t\ de\ lodo\ en\ base\ seca$$

Se dosifica 4.44 kg de polímero por cada tonelada de lodo seco.

**Captura de sólidos en el filtro prensa**

El monitoreo de la captura de sólidos en un filtro prensa de banda también es necesario para el control y optimización del sistema. La fórmula para calcular la captura de sólidos se muestra en la (ecuación 2.3).

Ecuación 2.3

sólidos totales

- El filtro prensa de banda se opera 8 horas por día
- Equivalencias:
  - 1 L de agua pesa 1 kg
  - 1 min = 60 s
  - 1 hora = 60 min

$$C_s = \frac{P_{sa} - P_{sf}}{P_{sa}} \times 100\%$$

Donde:

$C_s$	=	Captura de sólidos
$P_{sa}$	=	Peso de los sólidos de alimentación
$P_{sf}$	=	Peso de los sólidos del filtrado

### 1. Calcular el peso de los sólidos de alimentación:

Peso de los sólidos de alimentación ( $P_{sa}$ ) = Tasa de alimentación de lodos × unidad de tiempo de ejecución × porcentaje de sólidos

$$P_{sa} = 11.0 \text{ L s}^{-1} \times 60 \text{ s min}^{-1} \times 60 \text{ min h}^{-1} \times 8 \text{ h d}^{-1} \times 0.03 \times 1.0 \text{ kg L}^{-1} = 9\,504 \text{ kg d}^{-1}$$

### 2. A continuación, calcular el peso de los sólidos de filtrado:

Peso de sólidos de filtrado ( $P_{sf}$ ) = Tasa de flujo de filtrado × unidad de tiempo de ejecución × porcentaje de sólidos

$$P_{sf} = 1.39 \text{ L s}^{-1} \times 60 \text{ s min}^{-1} \times 60 \text{ min h}^{-1} \times 8 \text{ h d}^{-1} \times 0.01 \times 1.0 \text{ kg L}^{-1} = 400 \text{ kg d}^{-1}$$

### 3. Después se calcula la captura de sólidos:

Captura de sólidos ( $C_s$ ) =  $((9\,504 \text{ kg d}^{-1} - 400 \text{ kg d}^{-1}) / 9\,504 \text{ kg d}^{-1}) \times 100 \%$

$$C_s = (9\,104 \text{ kg d}^{-1} / 9\,504 \text{ kg d}^{-1}) \times 100\% = 96 \%$$

La carga de sólidos, la dosis del polímero y la captura de sólidos son parámetros importantes en la medición del rendimiento del filtro

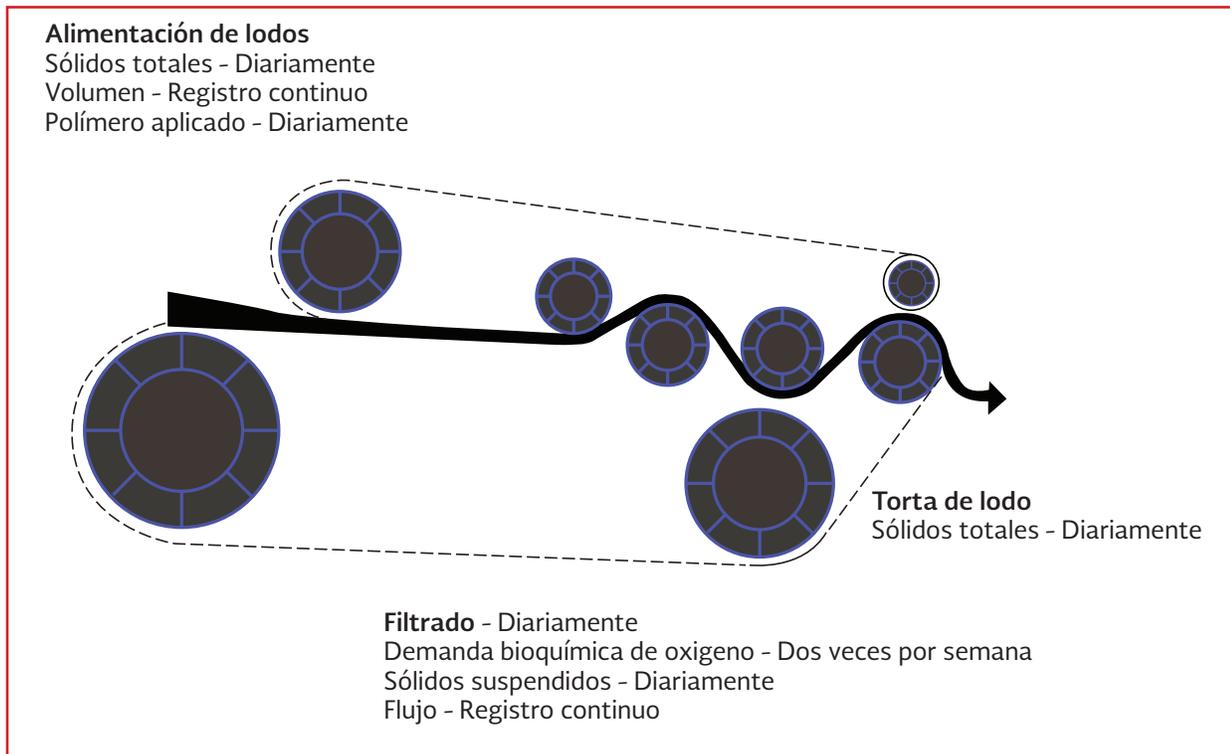
prensa de banda. Dos maneras de aumentar la eficiencia general del filtro prensa de banda son las siguientes:

- Optimizar la alimentación de polímero con un enfoque en la captura de los sólidos. Observar la condición general de los lodos durante el periodo de acondicionamiento (en el tanque de floculación) y mientras que el lodo se está desplazando a través de la zona de gravedad, hacer ajustes en el proceso según sea necesario
- Realizar ajustes en la tasa de alimentación de lodos, según sea necesario para alcanzar la concentración óptima de torta de sólidos en respuesta a los cambios en las características del lodo alimentado

Al igual que en cualquier unidad de proceso, debe medir el desempeño del filtro prensa de banda para determinar si se está logrando una eficiencia óptima. Se tiene que comparar la entrada con la salida al igual que se hace para otros procesos unitarios. La ilustración 2.28 muestra los parámetros clave que deben ser controlados y la frecuencia recomendada.

Los parámetros de referencia deben ser establecidos para medir qué tan bien está funcionando el filtro prensa de banda. Después de desarrollar puntos de referencia, a continuación, se puede hacer un ajuste y documentar cualquier cambio en el rendimiento. El manual de operación y mantenimiento de la planta debe indicar el rendimiento que se espera de acuerdo al diseño. La tDesempeño esperado del filtro prensa de bandas con varios tipos de lodos4 enumera algunos datos típicos para diferentes tipos de lodos.

Ilustración 2.28 Puntos para controlar el desempeño del filtro prensa de bandas. (WEF,2001)



Es importante tener un buen registro de los datos de operación para detectar a buen tiempo, cambios en el rendimiento del equipo, en las características del lodo o problemas mecánicos. Los datos del registro de operación se pueden introducir a una hoja de cálculo, que puede ser utilizada en la toma de decisiones. El uso de un gráfico de tendencia es una forma de análisis de datos con respecto al tiempo. Los gráficos de tendencias ilustran condiciones pasadas y actuales, permiten predecir posibles problemas,

y además, sirven de guía para la toma diaria de decisiones. Es importante definir los objetivos de la planta respecto a la deshidratación: ¿es el objetivo minimizar los costos o lograr la más alta concentración de torta de sólidos, sin importar el costo? Diferentes situaciones requieren un enfoque diferente; sin embargo, generalmente se desea lograr un equilibrio en la optimización de consumo de polímero, requerimientos de mano de obra y los costos de disposición final. Además, el método de disposición o eliminación de lodos

Tabla 2.14 Desempeño esperado del filtro prensa de bandas con varios tipos de lodos

Tipo de lodos	% de sólidos de alimentación	% de torta de sólidos	Polímero aplicado kg t <sup>-1</sup> sólidos secos
Lodo primario	3-10	28-44	1-4.5
Desecho de lodos activados	1-3	12-32	1-11
Primario + desecho de lodos activados	3-6	20-35	1-5
Anaerobio primario + desecho de lodos activados	3-9	18-44	1.5-4.5
Aerobio primario + desecho de lodos activados	1-8	12-30	1-4

para su planta determinará la concentración de sólidos en el lodo deshidratado.

### 2.3.3.2 Procedimientos para el arranque y paro del filtro prensa de bandas

Los procedimientos de arranque y paro pueden variar ligeramente en función del diseño de un filtro prensa de banda. Los procedimientos detallados se proporcionan en el manual de operación y mantenimiento (O & M) proporcionado por el fabricante del equipo. Se describirán algunos de los procedimientos generales:

Los sistemas de deshidratación de filtro prensa de bandas están equipados con paneles de control que inician o arrancan automáticamente los componentes del sistema en orden secuencial. Una secuencia de arranque típica es la siguiente:

1. Encienda el compresor de alimentación de aire para equipos neumáticos
2. Arranque el sistema de agua de lavado de la banda
3. Arranque el sistema de movimiento de la banda
4. Arranque los transportadores (si corresponde)
5. Arranque el tanque de mezclado o agitador del sistema de floculación
6. Encienda la bomba de alimentación de la floculación
7. Abra la válvula solenoide del agua de dilución para la floculación
8. Inicie la alimentación de lodos

Un tiempo adecuado entre los pasos permite la puesta en marcha sin perturbación del proceso. Si falla uno de los pasos de la secuencia anterior, una alarma suena y el sistema se apaga. Los fallos típicos son:

- Baja presión de aire
- Baja presión de agua
- Banda rota
- Bajo flujo de polímero
- Bajo flujo de lodo
- Mala alineación de la banda

Cuando el filtro prensa de banda se encuentra listo, los operadores inician el ajuste de lo siguiente:

- Velocidad de alimentación de lodos
- Velocidad de alimentación del floculante
- Velocidad del floculador
- Velocidad de la banda
- Tensión de la banda

Una secuencia de apagado general de un filtro prensa de banda es la siguiente:

1. Apague las bombas de alimentación de polímero y lodos
2. Permita que la prensa siga funcionando hasta que toda la torta de lodo haya sido descargada y todas las bandas se hayan lavado a fondo
3. Apague el sistema de agua de lavado
4. Detenga el sistema de transmisión de la banda
5. Apague el compresor de aire
6. Pare el transportador de la torta de lodo

La limpieza del equipo del filtro prensa de banda es esencial para mantener una alta eficiencia. Como paso final en el proceso de apagado, se limpian las bandas y equipos con una lavadora de alta presión, manguera de agua y boquillas. La limpieza de la banda es esencial para prevenir su taponamiento por polímero seco o residuos de lodos. Así mismo, se limpia el exceso de lodo debajo de las poleas y bandejas de drenaje de filtrado.

### 2.3.3.3 Variables del proceso

Los filtros prensa de bandas se pueden utilizar para deshidratar la mayoría de lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. Sin embargo, el operador debe estar familiarizado con las variables que afectan al rendimiento, como el tipo de lodos y sus características, requisitos de acondicionamiento y la velocidad, la tensión, el tipo y la malla de la banda.

#### **Tipo de lodo**

El tipo de lodo a deshidratar, su origen, y el grado de estabilización afecta en gran medida el grado de deshidratación de un filtro prensa de banda. Un lodo diluido (0.5 a 1.0 por ciento de sólidos) requiere más drenaje por gravedad, una dosis más elevada de polímero y un mayor tiempo de deshidratación que un lodo más concentrado. Si aumentan los sólidos de alimentación, la torta de sólidos y el rendimiento de sólidos también aumentan. Además, el tipo de proceso utilizado para estabilizar los lodos, así como la relación lodo primario / lodo secundario, afecta directamente a la concentración de sólidos que puede alcanzar la torta.

#### **Acondicionamiento del lodo**

Los lodos que se deshidratan en un filtro prensa de bandas, primero deben acondicionarse con polímero para garantizar un rendimiento óptimo. El polímero produce un fenómeno conocido como súper floculación, que forma partículas de flóculos grandes y fuertes que permiten que el agua libre drene fácilmente en la zona de drenaje por gravedad del filtro prensa de banda. Este fenómeno de super floculación también produce un lodo capaz de soportar

las presiones generadas durante el proceso de deshidratación.

En ocasiones, un sistema de post encalado funciona para la estabilización de lodos. No obstante, en algunas plantas se han deshidratado lodos primarios acondicionados con cal en filtros prensa de banda con pobres resultados como: torta con baja concentración de sólidos, captura baja de sólidos y cegamiento de la malla de la banda. Si es necesario el uso de este proceso se recomienda la siguiente secuencia: en primer lugar, el lodo se acondiciona con el polímero y se deshidrata y luego se añade cal para la torta de lodo.

Por lo general, los polímeros catiónicos se utilizan para acondicionamiento de lodos. A veces se utiliza un sistema de dos polímeros: un polímero catiónico con un aniónico o un polímero no iónico, para facilitar la deshidratación mejorando la liberación de la torta de la banda de deshidratación superior. Los polímeros requieren una cuidadosa selección para el aseguramiento de un rendimiento óptimo. Debe consultarse a los representantes de los fabricantes de polímeros para la selección y prueba del polímero. Esto ayuda a la selección del mejor polímero para una aplicación determinada.

#### **Características y funcionamiento de la banda**

La velocidad de la banda, la tensión y la malla afectan directamente a la sequedad de la torta y el rendimiento de sólidos e influyen significativamente en la capacidad de deshidratación del filtro prensa de banda. El operador puede controlar estas variables y debe experimentar con diferentes velocidades, tensiones y mallas hasta conseguir el rendimiento óptimo.

El operador generalmente establece la velocidad de la banda a la tasa mínima que permita drenar flóculos de lodo sin causar acumulación del filtrado en la zona de drenaje de gravedad. El drenaje adecuado por gravedad asegura que los flóculos sean comprimidos sin extrusión. La velocidad de la banda también afecta el espesor de la torta de lodo y por tanto, la sequedad de la torta. Es importante tener en cuenta que una torta gruesa puede ser más seca que una delgada. El operador debe experimentar con la velocidad de la banda para la determinación de la velocidad que genere los mejores resultados.

La tensión de la banda por encima de un cierto nivel no aumenta la sequedad de la torta, pero impulsa los lodos más profundamente en los poros de la banda. Además, el exceso de tensión puede taponar las bandas, dando lugar a alteraciones del proceso, como un filtrado que no drene y encharcamiento en la zona de drenaje por gravedad, a pesar de la aparente floculación adecuada. Si las bandas no se mantienen limpias, su tensión debe reducirse inmediatamente.

Las bandas de deshidratación, tejidos de fibras de monofilamento de poliéster, están disponibles en varias combinaciones de armado, permeabilidades al aire, y capacidades de retención de partículas. Estos parámetros influyen en gran medida en el rendimiento de la prensa.

Por ejemplo, un lodo con una alta concentración de lodo activado (80 a 100 por ciento) puede requerir una banda con una alta capacidad de permeabilidad al aire y retención de alto contenido de sólidos; un lodo primario podría requerir lo contrario. Dado que los tipos de lodos y calidades varían considerablemente entre las plantas, los fabricantes de máquinas y los operadores efectúan una evaluación de

diferentes tejidos, permeabilidades y capacidades de retención de sólidos en cada planta para que se garantice un rendimiento óptimo.

Existen dos tipos de bandas: divididas y continuas. Las bandas divididas, el tipo más común en el mercado, se unen con un dispositivo de empalme llamado clipeador de costura. El uso de estas bandas es factible para todos los modelos de filtros prensa de bandas. La banda continua o sin fisuras sólo se utiliza en ciertas prensas de acuerdo con las recomendaciones del fabricante de la prensa. Los fabricantes de bandas continuas afirman que tienen una vida más larga que la de tipo dividido; sin embargo, hay pocos datos disponibles en la actualidad para el fundamento de esta afirmación.

#### 2.3.3.4 Mantenimiento preventivo

Además de la limpieza, hay algunas medidas de mantenimiento de rutina que se realizan en los filtros prensa de banda. En primer lugar, se observa el equipo mientras está en funcionamiento. Se comprueba diariamente el estado del mecanismo de accionamiento, bandas, bombas, transportadores, y el sistema de polímero. Ruidos inusuales, vibración excesiva, sobrecalentamiento y fugas de lubricante son indicadores de mal funcionamiento del equipo y sus causas deben ser investigadas con prontitud. Además, se requiere un seguimiento cuidadoso del ajuste de la cuchilla, ya que todo lo que atraviesa después de la cuchilla regresa al inicio de la planta. Ajustes periódicos de la cuchilla reducen significativamente la cantidad de sólidos recirculados al sistema de tratamiento. El operador es capaz de solucionar los problemas del proceso de filtro prensa de banda y entre más hábil se vuelve en el análisis de los problemas es más eficiente la ejecución del proceso.

### 2.3.3.5 Problemas frecuentes y soluciones

Existen tres grandes problemas que ocurren con el funcionamiento del filtro prensa de banda: bajo contenido de sólidos, baja tasa de captura de sólidos y baja carga de sólidos. Si la concentración de sólidos en el lodo deshidratado es inferior a la concentración objetivo, esto puede deberse a un problema con la velocidad o tensión de la banda, la dosis de polímero, o una combinación de éstos. Si se piensa que la velocidad de la banda es el problema, se reduce la velocidad en pequeños incrementos (de alrededor del 10 por ciento) para el aumento del espesor de la torta. El aumento de la profundidad de la torta requiere una mayor presión en las bandas.

Después de unos 15 o 20 minutos a la nueva velocidad de la banda, se toma una muestra de la torta y se compara la concentración de sólidos con esa medida antes del ajuste. Se continúa este proceso hasta conseguir la concentración de sólidos deseada. Otra posible causa de la baja concentración de sólidos de la torta es el flujo de polímero o la dosis. Un pequeño aumento en la dosificación de polímero genera un desagüe más rápido en la zona de gravedad, produciendo una torta seca, sin embargo, demasiada dosificación de polímero causa el mismo efecto que utilizar muy poco polímero. Si el aumento de la dosificación de polímero no funciona, se disminuye la dosis. Después de unos 15 o 20 minutos con la nueva dosis de polímero, se toma una muestra de la torta para la comparación de la concentración de sólidos antes y después. Se continúa este proceso hasta la consecución de la concentración de sólidos deseada. La tensión de la banda también afecta a la torta de sólidos. Se aumenta la tensión de la banda en incrementos de 10 a 15 por ciento, asegurándose de que la banda no se inicie a ciegas. Después de unos

15 o 20 minutos en el nuevo ajuste de tensión, tomar una muestra de la torta y se compara la concentración de sólidos con la de la muestra anterior. Se continúa este proceso hasta la consecución la concentración de sólidos deseada o hasta que la banda empiece a taponarse. Es importante la precaución para no aumentar la tensión más allá de las recomendaciones de los fabricantes.

Una baja captura de sólidos ocurre si el lodo se derrama o escurre a los lados de las bandas o a través del tejido de la banda en la zona de alta presión. Este problema se corrige mediante el ajuste de la velocidad de la banda, el flujo de polímero y/o la dosificación, y la tensión de la banda. El ajuste de la velocidad de la banda se hace de forma gradual hasta que el lodo deje de exprimirse hacia fuera de las bandas. Se deja que el filtro prensa de banda se estabilice y se toma una muestra de filtrado y de la torta de lodos para la determinación de la mejora de la captura de sólidos. Cambios pequeños en el flujo o en la dosificación de polímero afectan el drenaje del agua en la zona de gravedad. Por lo tanto, el ajuste de polímero mejora el drenaje y lleva a una torta final seca. Se deja que el filtro prensa de banda se estabilice durante 15 o 20 minutos y se toman muestras del filtrado y de la torta de sólidos. Por último, la disminución la tensión de la banda también mejora la tasa de captura sólidos. Se disminuye poco a poco la tensión de la banda, hasta que la torta de lodos escurra por las bandas. Se permite un tiempo de 15 o 20 minutos para que la prensa se estabilice y se toman muestras del filtrado y de la torta.

Una carga con bajo contenido de sólidos es el resultado de una disminución en la concentración de sólidos o en la tasa de flujo de alimentación de sólidos. Una baja carga de sólidos se corrige

mediante la toma de una muestra para determinar la concentración de sólidos en la alimentación, se revisa la bomba de alimentación, y se verifica que la línea de alimentación esté libre de objetos que obstruyan el flujo de lodo a la prensa. Si estos pasos no resuelven el problema, es necesaria la evaluación del proceso previo, como el espesamiento y la digestión. También se debe controlar cualquier cambio en la purga de lodos activados como el índice volumétrico de lodos (IVL) o un aumento de organismos filamentosos que cause bajo contenido de sólidos. Si no se observan problemas en la verificación de estos parámetros, se comprueban las características del afluente de la planta. En ocasiones, las características del agua residual del afluente cambian significativamente y provocan la falta

de concentración de los sólidos en los procesos de sedimentación o en los espesadores.

En la Tabla 2.15 se muestran las causas típicas y las medidas preventivas para la reducción de los problemas operativos asociados con los filtros prensas de banda.

Durante el funcionamiento del filtro pueden generarse olores desagradables. Para su control se utilizan sistemas de ventilación adecuados y productos químicos neutralizantes como el permanganato de potasio. El permanganato de potasio, disponible como un polvo soluble, se mezcla con agua y se introduce directamente en la línea de alimentación de lodos a la prensa. La dosis varía de 0.5 a 2.0 mg kg<sup>-1</sup>, (1 a 4 libras /

Tabla 2.15 Causas y prevención de los problemas de funcionamiento de los filtros prensa de banda

Causas	Medidas preventivas
Mal acondicionamiento del lodo debido a: Variación de las características de alimentación de los lodos	Mejorar las prácticas de acondicionamiento por: Asegurar una alimentación continua y un buen mezclado de lodos antes de la deshidratación
La inadecuada selección de polímero o tasa de dosificación	Los polímeros deben ser cuidadosamente seleccionados y probados. La tasa de selección y la dosificación debe revisarse con frecuencia, sobre todo cuando se esperan cambios en las características del lodo
Punto incorrecto de aplicación	Examinar o corregir el punto donde se aplica polímero
El lodo no drena adecuadamente	Evaluar: Velocidad de la prensa y tiempo de drenado Selección de polímeros y sistema de acondicionamiento de lodos Tejido de la banda y la selección de materiales Posición de los arados para el movimiento lateral de lodo, si está equipado
Pérdida de lodos en las bandas	Reducir la tensión de la banda Ajustar la velocidad de la banda superior Reducir la velocidad de alimentación de lodos
El mantenimiento no es adecuado	Capacitar a los operadores para mantener adecuadamente el área de prensa. Proporcionar equipos de limpieza a vapor para ayudar a la limpieza
Prácticas de seguridad deficientes	Proporcionar capacitación en seguridad y aplicar rigurosamente las reglas para mantener el equipo de seguridad en su lugar
Falta de equipo para control de aerosoles y de otros equipos protectores que facilitan la operación	Diseño o sustitución de equipo de extracción o protección
Mal funcionamiento de alambres de disparo (fusibles) e interruptores finales para facilitar la operación de la unidad	Diseño de equipos de seguridad para minimizar la interferencia con la operación

tonelada seca), pero se encuentra en función de la cantidad de sulfuro de hidrógeno en el lodo. El uso de permanganato incrementa el costo de deshidratación.

El mal acondicionamiento de los lodos causa serios problemas. La ubicación incorrecta del punto de alimentación de polímero conduce a un mal acondicionamiento.

Típicamente, los polímeros y los lodos se canalizan a la unidad de acondicionamiento. Deben existir diferentes puntos para la alimentación de polímero: uno en la unidad de acondicionamiento, uno dentro de la tubería de alimentación de lodos de 0.6 a 0.9 m (dos a tres pies) corriente arriba de la unidad, y uno cerca de 7.5 m (25 pies) corriente arriba. Aunque estos lugares son especialmente críticos para una nueva instalación donde las características del lodo no son bien conocidas, son necesarios para cualquier planta, pues las características del lodo cambian. A veces el lodo se acondicionará mejor con tiempos de contacto largos con el polímero; en algún momento tiempos más cortos darán como resultado un mejor acondicionamiento.

#### 2.3.3.6 Seguridad

En la operación de un filtro prensa de banda se utiliza equipo de seguridad adecuado. El filtro prensa se diseña para el apagado automático de la alimentación de lodos. Por ejemplo, este se activará si la banda no se encuentra bien colocada. La unidad debe tener un botón para paro de emergencia y un interruptor de paro de emergencia ubicado en el panel de control. El cable o el botón de paro de emergencia detienen el filtro prensa de banda y los equipos auxiliares. El equipo debe permanecer en la posición

de paro hasta que el problema se identifica y corrige y el cable o botón de paro de emergencia, se restablece manualmente.

### 2.3.4 LECHOS DE SECADO

La deshidratación natural de lodos es uno de los primeros métodos que ha sido utilizado en la práctica para la reducción del contenido de agua de los lodos y para el facilitamiento de su manejo en su disposición final. La deshidratación natural incluye el uso de lechos de arena abiertos o cubiertos y otros tipos de lechos de secado. El costo y disponibilidad de terreno, los impactos estéticos de grandes áreas de lechos y la extensa mano de obra requerida para remover el lodo son factores que obstaculizan el uso de procesos naturales en muchas plantas grandes. Los costos de energía, sin embargo, son más bajos que los de sistemas alternativos, además han sido optimizados mediante métodos de remoción de lodos, uso de polímeros y otras consideraciones de diseño.

#### 2.3.4.1 Descripción de los lechos de secado de arena

Los lechos de arena son menos sensibles a la concentración de sólidos en el afluente y producen un lodo más seco a comparación de cualquier método con dispositivo mecánico. La tVentajas y desventajas de lechos de secado de lodos<sup>16</sup> presenta algunas de las ventajas y desventajas del método de lechos de secado.

El secado en arena es un proceso que requiere más mano de obra y terreno. Sin embargo, las frecuentes reparaciones y los altos costos de inversión inicial de los sistemas mecánicos, hacen atractivo el secado en arena donde

Tabla 2.16 Ventajas y desventajas de lechos de secado de lodos

Ventajas	Desventajas
El costo inicial es bajo para plantas pequeñas, donde no es necesario un control estricto de lixiviados con recubrimientos y hay terreno disponible Requerimientos mínimos de operación y capacitación Bajo consumo de energía eléctrica Baja sensibilidad a la variabilidad del lodo Bajo consumo de químicos Alto contenido de sólidos en la torta seca de lodos	Requiere de grandes superficies de terreno Visible al público en general Impacto de los efectos del clima sobre el diseño Requerimiento de lodo estabilizado Molestia por olores e impacto visual Mucha mano de obra para la remoción del lodo seco Obtención de permisos y posible contaminación de aguas freáticas Costos de combustibles y equipo para la limpieza del sistema de lechos

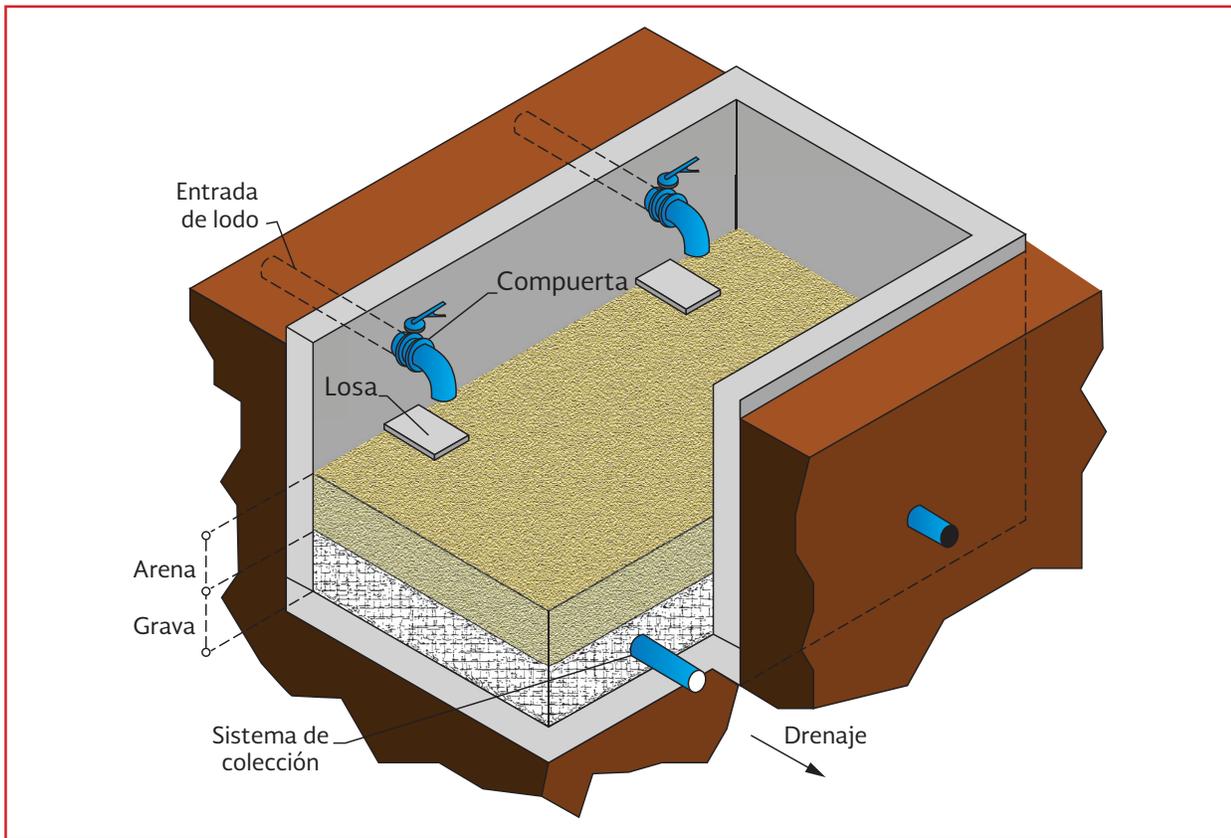
hay disponibilidad de terreno y condiciones ambientales aceptables. No obstante el costo adicional del recubrimiento y el monitoreo de la calidad del agua subterránea incrementan los costos.

Los lechos de secado de arena son los más tradicionales y comunes dentro de la tecnología de lechos de secado. En la ilustración 2.29 se muestran las características típicas de un lecho de secado de lodos. Los lechos de secado son generalmente rectangulares para permitir el retiro o acopio del lodo con un cargador frontal. Las dimensiones pueden ser de 4.5 a 18 m de ancho y de 15 a 45 m de largo, con paredes típicamente de concreto (WEF *et al.*, 2012). Por lo general, se colocan de 10 a 23 cm de arena y de 20 a 46 cm de grava graduada o piedra. La arena es generalmente de 0.3 a 1.2 mm de diámetro y tiene un coeficiente de uniformidad menor de 5.0. La grava normalmente se clasifica de 0.3 a 2.5 cm de diámetro efectivo. Anteriormente la tubería de desagüe inferior o drenaje era normalmente de arcilla vitrificada, pero actualmente se utiliza más la tubería de plástico. Las tuberías son mayores de 10 cm de diámetro, cuentan con una separación de 2.4 a 6 m de distancia y una pendiente mínima de 1 por ciento (US, EPA, 1979) (Metcalf & Eddy, 2003).

En los siguientes puntos se describe con mayor detalle las características de los lechos de secado de arena (Mijaylova, 1999):

- **Paredes laterales:** El lecho de secado debe tener paredes verticales con un bordo libre (arriba de la capa de arena) de 0.5 a 0.9 metros. Las paredes se forman de tierra, tabloncillos de madera preferentemente tratados para evitar pudrición; viguetas de concreto; concreto reforzado o bloques de concreto colocados alrededor de la capa de arena y extendidos hacia el bajo dren de grava, como una manera de evitar la penetración de hierbas y pasto
- **Bajo dren:** Generalmente se construye de tubería perforada de plástico o arcilla vitrificada, con una pendiente hacia un colector principal o tubería de salida
- **Tubería principal del bajo dren:** Es un tubo de no menos de 100 mm de diámetro y una pendiente mínima de 1 por ciento. La distancia entre la tubería es entre 2.5 a 6 m y toma en cuenta la forma de retiro del lodo para no dañar el bajo dren
- **Membrana impermeable:** En caso de que las infiltraciones pongan en peligro el agua subterránea, se sella el piso con

Ilustración 2.29 Lecho de secado de arena típico, (WEF, et al., 2012)



una membrana impermeable. El área alrededor del sistema del bajo dren se rellena con grava gruesa

- **Capa de grava:** La grava es graduada y tiene una profundidad de 200 a 460 mm, con el material relativamente grueso en el fondo. Las partículas de grava varían entre 3 y 25 mm de diámetro
- **Capa de arena:** la profundidad de la capa de arena varía de 200 a 460 mm; sin embargo, se sugiere una profundidad mínima de 300 mm, lo que asegura un buen efluente y la reducción de las pérdidas de arena debido a las operaciones de limpieza. La arena se compone de partículas limpias, duras, resistentes, libres de arcilla, limo, polvo u otra materia extraña; un coeficiente de uniformidad no mayor de 4.0, pero de

preferencia debajo de 3.5; y un tamaño efectivo de los granos de arena entre 0.3 y 0.75 mm. Es posible el uso de grava pequeña y carbón de antracita triturado a tamaño efectivo de 0.4 mm de diámetro

- **Divisiones:** Para la remoción manual del lodo, los lechos de secado están divididos en secciones de 7.5 m de ancho, pero dependen del método de remoción utilizado. Se han construido lechos con longitudes de 30 a 60 m. Sin embargo, si se van usar polímeros, la longitud no deberá exceder de 15 a 20 m para evitar problemas de distribución del lodo. El ángulo de reposo para muchos lodos tratados con polímeros puede ser tan bajo como 1.120, pero puede ser mayor. Las divisiones pueden componerse de terracería o paredes construidas con

bloques de concreto, concreto reforzado, tablonces y postes ranurados. En caso de utilizar tablonces, estos se extienden de 0.6 a 0.9 m debajo de la capa de grava

- **Decantadores o sistema de recolección de agua:** Se instala un sistema para el decantamiento y retiro del sobrenadante ya sea en forma continua o intermitente, en el perímetro del lecho. Los decantadores son útiles en el caso de lodos secundarios relativamente diluidos, lodos tratados con polímeros y en la remoción de agua pluvial
- **Canal de distribución de lodo:** El lodo se aplica a las distintas subdivisiones de los lechos a través de conductos cerrados o tuberías a presión con válvulas en las salidas de cada sección de lecho, o a través de un canal abierto con aberturas laterales controladas mediante compuertas manuales. Después de cada uso, la limpieza del canal es más fácil. En cualquier caso, se requiere una losa de concreto de 130 mm de espesor y 0.90 m<sup>2</sup> de superficie para la recepción del lodo y así evite la erosión de la superficie de arena
- **Rampas y pasillos:** Si se utiliza un camión para la remoción de la torta seca, se requieren rampas y pasillos de concreto a lo largo del eje central de cada sección

#### 2.3.4.2 Operación y mantenimiento

En el diseño de lechos de secado se toma en cuenta su operación y mantenimiento:

- **Aplicación de lodos:** Una capa delgada de lodo se seca con mayor rapidez,

sin embargo, se requiere una cantidad importante de mano de obra por unidad de volumen de lodo para la remoción del lodo seco. Se utiliza una mayor superficie de arena para una aplicación somera a comparación de una profunda debido a que las aplicaciones más frecuentes ocasionan mayor pérdida de arena durante el proceso de remoción. Como alternativa, se considerarán aplicaciones múltiples de una capa delgada (menor de 1 por ciento de sólidos secos). Para un lodo estabilizado aerobiamente, las aplicaciones múltiples permiten la colocación de mayor cantidad de lodo (una capa más gruesa). No se aconseja el uso de este procedimiento con lodo anaerobio o tratado con polímero

- **Remoción de lodo seco:** Actualmente muchas plantas utilizan equipo para remoción mecánica, reduciendo los requerimientos de mano de obra. Generalmente, para la remoción mecánica es suficiente un contenido de sólidos secos de 20 a 30 por ciento
- **Mantenimiento de lechos:** En las latitudes norte, el otoño y la primavera son las estaciones preferidas para la realización de las operaciones de mantenimiento en los lechos abiertos y el equipo relacionado con los mismos. El trabajo en el exterior durante el invierno frecuentemente es impráctico, y los lechos no se programan para mantenimiento durante la época de secado del verano. Aunque la reposición de la superficie de los lechos de secado es tal vez el mayor gasto de mantenimiento, otros aspectos no deben ser omitidos. Por

ejemplo, los bajo drenes ocasionalmente se taponan y deben limpiarse. Las válvulas y compuertas que controlan el flujo de lodo a los lechos, se mantienen herméticas y así se evita que el lodo húmedo se derrame hacia los lechos durante los períodos de secado. Las líneas de lodos deberán ser lo suficientemente herméticas para evitar que el lodo pase de un compartimiento a otro, especialmente si se permite demasiado asentamiento de la superficie de arena. Finalmente, las paredes exteriores o taludes alrededor de los lechos se deben mantener herméticos

- **Reposición de arena:** Un poco de arena se pierde durante cada operación de remoción de lodo, la cantidad depende del método utilizado para la remoción de la torta de lodo. Una revisión periódica de la profundidad de la arena, desde un punto de referencia preestablecido es una rutina hasta que se establece un patrón de remoción de arena. Además de la reposición de la arena, la nivelación periódica de la superficie minimiza la pérdida de arena. Una ligera descompactación de suelo antes de la nivelación ayuda a mejorar la filtración
- **Control de vegetación:** Plantas de tomate y otras pueden surgir del lodo digerido si la temperatura de digestión fue menor a los 27 °C, aunque normalmente no son problemáticas. La hierba, pasto y otros tipos de vegetación, encontradas frecuentemente en la superficie de los lechos o en el lodo durante el secado, provienen principalmente del área circundante. Con la excepción de los lechos de tierra, toda la vegetación se

remueve antes de la aplicación del lodo. La aspersión con un herbicida aprobado seguido de un mezclado con rastrillo para la incorporación al suelo de la vegetación muerta ha dado buenos resultados en el control de la vegetación

- **Control de olores y moscas:** Un lodo bien digerido normalmente no produce malos olores en los lechos de secado. En cambio, el lodo orgánico digerido parcialmente produce malos olores. Los olores se controlan en forma eficiente mediante la adición al lodo de hipoclorito de calcio. La cal hidratada que se utiliza para el control de olores tapona a la arena. Si las moscas se convierten en un problema, se controla mediante la destrucción de los sitios de reproducción, con trampas o plaguicidas adecuados. Estos químicos se rocian sobre el lodo, especialmente en las fisuras del lodo en proceso de secado. La limpieza general y un buen saneamiento del sitio de la planta controlan estos insectos. La mosca se ataca con insecticidas químicos u otras estrategias de control con mayor efectividad en el estado de larva. En la tabla 2.17 se muestra una guía de solución de problemas para este tipo de lechos.

### 2.3.5 COSAS PARA RECORDAR

- En el proceso de manejo de lodos, el acondicionamiento adecuado es fundamental ya que prepara los lodos producidos en el proceso de tratamiento para el espesamiento y la deshidratación
- La prueba de jarras es un método de laboratorio que se utiliza habitualmente

Tabla 2.17 Guía de solución de problemas para lechos de arena

Indicaciones / observaciones	Causa probable	Comprobación o monitoreo	Soluciones
Tiempo de deshidratación excesivo	La profundidad de la capa de lodo aplicado es muy grande	Por lo general, es suficiente agregar 20 cm de lodo	Aplicar una capa de lodos menos profunda y medir la reducción de volumen durante un período de tres días En la siguiente aplicación se pone dos veces el volumen que se reduce en tres días
	Limpieza de lecho incorrecta	Tomar nota del estado de las camas vacías	Después de retirar los lodos secos, se limpia y rastrilla toda la superficie del lecho y si es necesario se coloca de 0.254 a 2.54 cm de arena limpia
	El sistema de desagüe se ha obstruido o las tuberías están rotas		Limpiar el lecho con agua limpia y destapar el desagüe Revisar el lecho de arena y cambiarlo si es necesario Revisar las líneas de desagüe principalmente durante el invierno para evitar que se congelen
	Lechos de tamaño insuficiente	Efectos de la adición de polímero	Generalmente para una buena deshidratación se aplica de 2 a 15 kilos de polímero catiónico por tonelada de lodo seco
	Condiciones climáticas	Temperatura, precipitación	Cubrir o delimitar la cama del lecho para su protección de la intemperie
Líneas de alimentación de lodos colmatadas	Acumulación de arena y sólidos en las líneas		Abra las válvulas completamente al iniciar la la aplicación de lodos para limpiar las líneas; enjuagar las líneas si es necesario
Se extrae del digestor lodo muy diluido	Hay conificación en el digestor		Reducir la velocidad de extracción de lodos
Los vectores se reproducen en camas de lodos			Romper la torta de lodo y usar larvicidas tales como bórax o borato de calcio o matar moscas adultas con insecticida adecuado
Olores cuando se aplica el lodo	Digestión inadecuada de lodos	Operación de proceso de digestión	Establecer el correcto funcionamiento del proceso de digestión
El lodo es polvoriento y se desmorona	Secado excesivo	Contenido de humedad	Retire los lodos cuando alcancen entre 40-60% de humedad

para la selección de los agentes o productos para el acondicionamiento, especialmente cuando una gran variedad de productos potencialmente eficaces están disponibles en el mercado

- El espesamiento es una operación básica dentro del esquema de tratamiento de lodos para la reducción del volumen del material para tratamiento en los procesos subsecuentes
- En el espesamiento se incrementa la concentración de sólidos de los lodos de 0.5 a 4 por ciento, lo cual disminuye su volumen en ocho veces. La reducción del volumen beneficia los tratamientos posteriores tales como la estabilización, la deshidratación, el secado y la disposición final; también reduce la capacidad requerida en los reactores y el equipo, la cantidad de químicos requeridos para el acondicionamiento.

dicionamiento, el calor requerido para los reactores y el volumen del lodo que debe ser transportado, secado o incinerado

- El proceso de deshidratación incrementa la concentración de sólidos en el lodo y se considera una segunda etapa del proceso de reducción de agua. Los procesos de deshidratación incluyen sistemas de secado al aire, como los lechos de secado de arena o los lechos de secado con

ayuda de vacío; o métodos mecánicos, tales como los filtros prensa de banda, centrífugas o filtros de presión

- Los lechos de secado de arena son menos sensibles a la concentración de sólidos afluentes y producen un lodo más seco que cualquier método con dispositivo mecánico, son los más tradicionales y comunes dentro de la tecnología de lechos de secado

# 3

## OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE REACTORES AEROBIOS DE LODOS RESIDUALES

### 3.1. OBJETIVOS

Los objetivos de este capítulo son conocer:

- Los equipos que se utilizan en la estabilización aerobia de lodos
- Los parámetros que deben monitorearse para lograr una operación adecuada en los reactores aerobios de lodos residuales
- Las mediciones que deben realizarse para medir el desempeño del proceso
- Las fallas que pueden presentarse frecuentemente tanto en el proceso como en los equipos y saber cómo solucionarlas
- El mantenimiento y la periodicidad adecuada para mantener los equipos y accesorios en óptimo estado

### 3.2. INTRODUCCIÓN

La estabilización aerobia de lodos residuales es el proceso biológico más utilizado en México para la estabilización de lodos. Por lo tanto existen reactores aerobios de lodos en muchas plantas de tratamiento de aguas residuales y mucha experiencia en la operación y mantenimiento. La estabilización aerobia de lodos se emplea para la estabilización de los lodos activados de desecho o purga de lodos activados, o para la

mezcla de lodo primario y lodo secundario utilizando reactores abiertos o cerrados.

#### 3.2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ESTABILIZACIÓN AEROBIA

Los microorganismos aerobios y los facultativos usan oxígeno y obtienen energía de la materia orgánica biodegradable disponible en los lodos del agua residual durante la estabilización aerobia. Sin embargo, cuando la alimentación disponible en los lodos de aguas residuales es inadecuada, los microorganismos empiezan a consumir su propio protoplasma para obtener energía y poder llevar a cabo las reacciones para su mantenimiento. Eventualmente las células sufren lisis, con lo cual liberan la materia orgánica degradable, la cual es usada por otros microorganismos. Los productos finales de la estabilización aerobia frecuentemente son dióxido de carbono, agua y materiales no degradables (polisacáridos, hemicelulosa y celulosa).

#### 3.2.2 TIPOS DE ESTABILIZACIÓN AEROBIA

Existente un número de variaciones en el proceso de estabilización aerobia, las cuales dan como resultado otros tipos de estabilización:

1. Mesofílica convencional
2. Oxígeno de alta pureza
3. Termofílica
4. Estabilización aerobia criofílica

Sin embargo, la estabilización aerobia mesofílica convencional es la más usada en el proceso de estabilización aerobia.

### 3.2.2.1 Estabilización aerobia mesofílica convencional

Históricamente el proceso de estabilización aerobia convencional fue ampliamente usado para estabilizar los lodos residuales de PTARs municipales e industriales (Grady, Daigger, & Lim, 1999). Este proceso incluye ventajas como:

1. Un diseño y un proceso de operación simple
2. Costos moderados
3. La capacidad de almacenar sólidos

No obstante presenta las siguientes desventajas:

1. Se presenta un alto consumo de energía
2. Reducción en la actividad biológica durante climas fríos
3. Agotamiento de la alcalinidad
4. Una reducción deficiente de patógenos

Mucha de la materia orgánica biodegradable adicionada al reactor puede estabilizarse, si el tiempo de retención de sólidos (TRS) se mantiene adecuadamente en uno o más tanques aireados. Sin embargo debido a la naturaleza del mezclado en el reactor, algunos restos de materia orgánica biodegradable pueden no ser estabilizados (Grady, Daigger, & Lim, 1999).

Los parámetros de diseño y los tipos de reactores utilizados en la estabilización aerobia se describen en el capítulo 8 del libro del MAPAS: *Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: tratamiento y disposición de lodos*.

### 3.2.2.2 Estabilización aerobia, oxígeno de alta pureza

En este proceso de estabilización aerobia se usa oxígeno de alta pureza en lugar de aire. El flujo de recirculación y los lodos resultantes son muy parecidos a los obtenidos en la estabilización aerobia convencional. La concentración de los lodos en el afluente puede variar de 2 a 4 por ciento. La estabilización aerobia con oxígeno de alta pureza, se usa particularmente en climas fríos, debido a la sensibilidad en los cambios de temperatura del ambiente, al incremento en la tasa de la actividad biológica y a la naturaleza exotérmica del proceso.

Este tipo de estabilización se lleva a cabo en tanques abiertos o cerrados. Debido a que el proceso de estabilización es de naturaleza exotérmica, el uso de un tanque cerrado resulta en temperaturas elevadas de operación y en un incremento significativo en la tasa de reducción de los sólidos suspendidos volátiles. En tanques cerrados se forma una atmósfera de oxígeno de alta pureza que se mantiene por encima de la superficie del líquido y el oxígeno es transferido al lodo a través de aeradores mecánicos.

En tanques abiertos, el oxígeno se introduce al lodo mediante difusores especiales que producen burbujas de oxígeno en minutos. Las burbujas son disueltas antes de alcanzar la interfase aire-líquido (Metcalf & Eddy, 2002). El proceso de

estabilización aerobia usando oxígeno de alta pureza es costoso por el requerimiento de la generación de oxígeno.

### 3.2.2.3 Estabilización aerobia termofílica auto térmica

La estabilización aerobia termofílica autotérmica representa una variación de la estabilización aerobia convencional y de la estabilización aerobia con oxígeno de alta pureza. En este proceso el lodo alimentado es espesado para proporcionar una concentración de sólidos alimentados al reactor mayor a 4 por ciento. Los reactores son aislados para conservar el calor producido en la degradación biológica de los sólidos orgánicos por bacterias termofílicas. La temperatura de operación termofílica en reactores aislados se encuentra en el rango de 45 a 70 °C, sin que se proporcione calor externo suplementario, debido a este fenómeno, el proceso se denomina “auto térmico” (Metcalf & Eddy, 2002). Otros dispositivos de aeración y mezclado se localizan dentro del tanque.

Las principales ventajas de este tipo de estabilización son las siguientes:

1. Disminución del TRS (se requiere un volumen pequeño para alcanzar una reducción en los sólidos suspendidos) de aproximadamente 5 a 6 días y lograr una reducción en los sólidos volátiles de 30 a 50 por ciento; similar a la estabilización aerobia convencional
2. Gran reducción de bacterias y virus comparada con la estabilización aerobia mesofílica (Metcalf & Eddy, 2002)
3. Cuando los reactores están bien

mezclados y se mantienen a 55 °C o más, los virus, patógenos, bacterias, huevos viables de helmintos y otros parásitos se reducen a niveles bajos detectables, cumpliendo así los requerimientos en la reducción de patógenos para los biosólidos de clase A

No obstante las principales desventajas de este tipo de estabilización son las siguientes:

1. Características deficientes de desaguado de los biosólidos (Daigger G. T., *et al.* 1988)
2. Formación de olores no deseables
3. Falta de nitrificación y/o desnitrificación (Daigger G. T., *et al.* 1988)
4. Altos costos de inversión
5. Se requiere control de espuma para asegurar una transferencia efectiva de oxígeno (Metcalf & Eddy, 2002)

Este proceso es relativamente estable, auto regulable con respecto a la temperatura, se recupera rápidamente de pequeñas alteraciones y no es afectado fuertemente por las variaciones en la temperatura del aire externo.

### 3.2.2.4 Estabilización aerobia criofílica

La operación de la estabilización aerobia a bajas temperaturas (menores de 20 °C) es conocida como estabilización aerobia criofílica. Aunque no es ampliamente usada, la investigación se ha concentrado en la optimización de la operación del reactor. Esta investigación sugiere que la edad del lodo en el reactor incrementa con respecto a la disminución en la temperatura de operación, para el mantenimiento de un nivel aceptable de reducción de los sólidos suspendidos.

### 3.3. SELECCIÓN Y DISEÑO DEL EQUIPO

Los equipos usados en la estabilización aerobia para el suministro de aire y mezclado incluyen aeradores mecánicos convencionales, difusores de burbujas gruesas, difusores de burbujas finas o aeradores de agua. El dispositivo más eficaz propicia la oxigenación y la mezcla requerida, así como flexibilidad. En la estabilización aerobia de lodos, se evitan los difusores cerámicos de burbujas finas porque estos son susceptibles a obstrucciones. Aunque los difusores de burbujas finas trabajan efectivamente en la aeración continua de reactores aerobios, estos presentan limitaciones en la operación efectiva de reactores aerobios en modo anóxico-aerobio (Daigger G. T., y otros, 1998).

#### 3.3.1 AERACIÓN CON DIFUSORES

Comúnmente los difusores de aire de burbuja se colocan en el fondo del reactor y los de cabezal sumergido cerca del fondo del reactor y en forma lateral, como se muestra en la ilustración 3.1. De esta manera se induce un patrón de mezcla cruzada o en espiral. Los difusores de aire más ampliamente usados son del tipo de burbujas grandes y burbujas pequeñas. Los sistemas de difusión de aire de cabezal sumergido tienen las siguientes características:

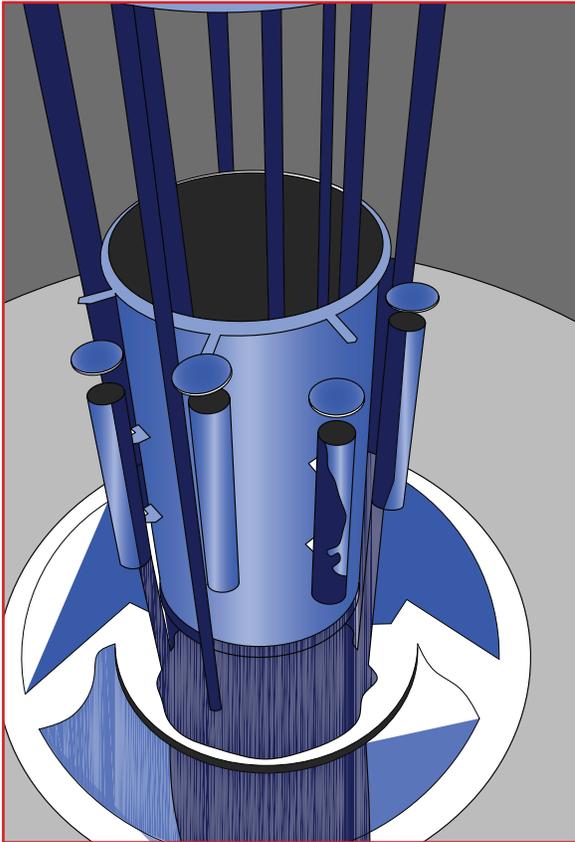
- Tienen a incrementar la temperatura del reactor
- No son afectados por condiciones de formación de espuma
- Para su limpieza, se requiere la remoción completa de los ensambles si presentan taponamientos u obstrucciones durante la operación anóxica

Ilustración 3.1 Sistemas de aeración con difusores



Para reactores aerobios de lodos se recomienda el uso de un sistema de difusión que evite el taponamiento o la obstrucción. Estos equipos se denominan equipos de aeración de no obstrucción. Estos proporcionan una fuerza de corte completa de alto rango y están diseñados específicamente para altas concentraciones de sólidos en el rango de 4 a 8 por ciento. Estos sistemas de aeración están combinados con un orificio en la parte superior, el cual se regula para el cumplimiento de la demanda de los perfiles de aire requeridos. Así mismo los difusores de no obstrucción aseguran que no ocurran obstrucciones durante la operación anóxica. La válvula de seguridad y los tubos de aspiración están incorporados dentro del diseño, ya que se ha demostrado que estos proporcionan un mezclado rápido y la acción de corte necesaria para la transferencia de oxígeno y el logro de la reducción de sólidos volátiles en lodos con alta concentración de sólidos. La limitante de este sistema es la necesidad de profundidades mayores de 6.1m (20 ft). La ilustración 3.2, muestra una instalación de un sistema de este tipo. La ilustración 3.3, muestra las vistas de

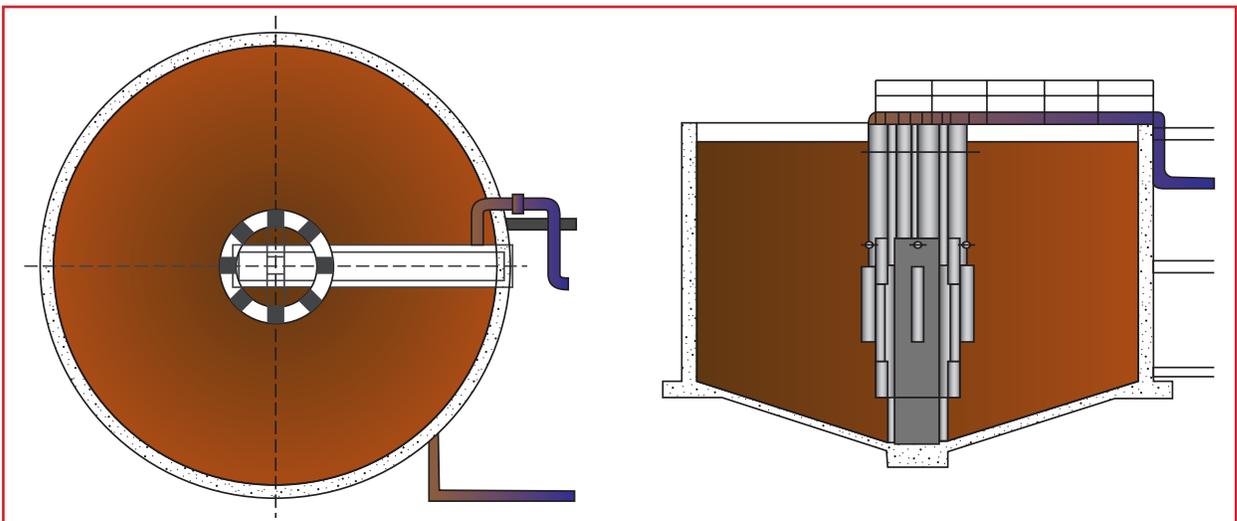
Ilustración 3.2 Instalación típica de un tubo de aspiración en Paris, Illinois



planta y sección transversal de los dibujos técnicos para el mismo proyecto.

En resumen, la aeración con tubos de corte o sistemas de tubos de aspiración:

Ilustración 3.3 Vistas de planta y secciones del reactor aerobio en Paris, Illinois. El reactor aerobio es de 14 m (45 ft) de diámetro por 9.4 m (31 ft) de profundidad (Daigger, Graef, & Eike, 1997)



- Es específicamente designada para una alta concentración de sólidos (4 a 8 por ciento de sólidos suspendidos)
- Tiende a incrementar la temperatura del reactor
- No requiere mantenimiento porque se usan sistemas de no obstrucción
- Requiere tanques grandes con profundidades mayores a 6.1m (20ft)

### 3.3.2 AERADORES MECÁNICOS SUPERFICIALES

Los aeradores mecánicos superficiales (ilustración 3.4) de alta y baja tasa son eficientes en la transferencia de oxígeno (cantidad de oxígeno alimentada por el aerador, el cual es absorbido por los lodos) en instalaciones fijas o de flotación. Comúnmente los aeradores mecánicos superficiales:

- Suministran oxígeno eficientemente a reactores aerobios, si la concentración de sólidos es menor de 2.5 por ciento
- Tienen requerimientos mínimos de mantenimiento
- Son afectados fuertemente por la formación de espuma

- Son afectados durante el tiempo de enfriamiento por la acumulación de hielo

### 3.3.3 AERADORES MECÁNICOS SUMERGIBLES

Los aeradores mecánicos sumergibles constan de un impulsor rotatorio sumergible montado en un eje motor extendido verticalmente dentro de la base de aeración. El aire comprimido es proporcionado debajo del impulsor.

Generalmente los aeradores mecánicos sumergibles (ilustración 3.5), no son afectados por la formación de espuma o de hielo.

### 3.3.4 SOPLADORES

Los sopladores de aire centrífugos (ilustración 3.6) y los sopladores de aire rotatorios de desplazamiento positivo (ilustración 3.7), son empleados en la estabilización aerobia. Para sistemas de estabilización de dos etapas, se recomienda contar con un mínimo de tres sopladores. Si se seleccionan sopladores rotatorios de desplazamiento positivo, al menos dos de los tres sopladores deben equiparse con motores de doble velocidad o motores de velocidad variable

Ilustración 3.4 Aerador mecánico superficial



Ilustración 3.5 Aerador mecánico sumergible



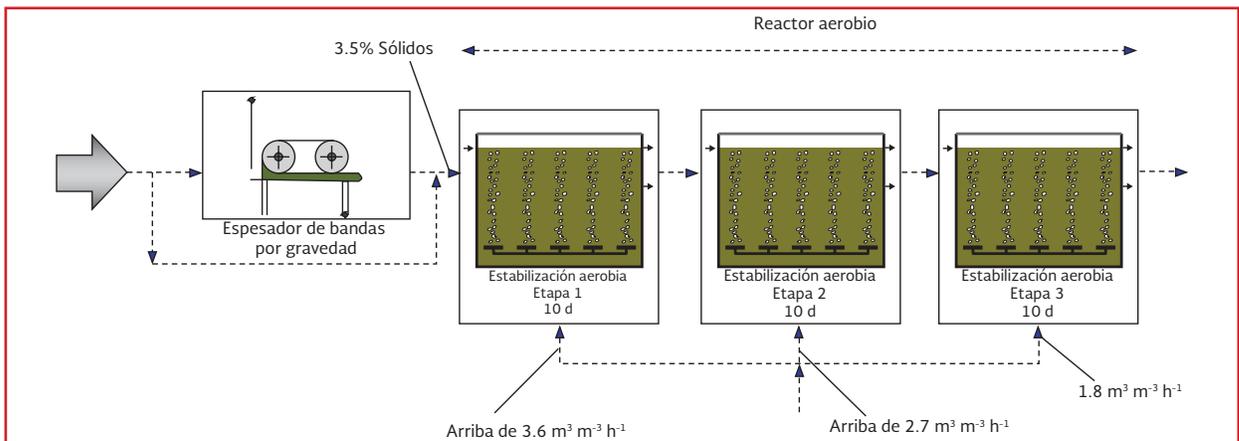
Ilustración 3.6 Soplador centrífugo



Ilustración 3.7 Soplador rotatorio de desplazamiento positivo



Ilustración 3.8 Distribución del flujo de aire para un sistema de estabilización aerobia con previo espesamiento (Daigger G., et al, 1999)



que proporcionen flexibilidad y optimicen el proceso. Un ejemplo para dicho sistema incluye un soplador asignado para el suministro de aire al primer reactor (un motor de doble velocidad está incluido en esta máquina); un soplador asignado para la operación del segundo reactor y un soplador en modo de espera que puede emplearse para el suministro máximo del flujo de aire.

La ilustración 3.8 muestra un diagrama de flujo de un sistema de estabilización aerobia de tres etapas con previo espesamiento y un total de 30 días de TRS operado a 20 °C. Este diagrama muestra el flujo de aire recomendado y requerido para las tres etapas (Daigger *et al.*, 1999).

### 3.3.5 TIPOS DE REACTORES

Los reactores aerobios pueden ser tanques abiertos o cerrados. Los tanques abiertos son más comunes; sin embargo en la última década los diseños más usados son los tanques cubiertos que tienen grandes profundidades. La altura de la pared del tanque es de 7.3 m (24 ft) y un tirante de agua de 6.7 m (22 ft). Si el pre espesamiento está incluido en el diseño, los tanques son generalmente de 6.1 m (20 ft) de profundidad o más; para estructuras redondas,

los tanques son de 6.1 a 9.1 m (20 a 30 ft) de profundidad y de 9.1 a 18 m (30 a 60 ft) de diámetro.

El uso de cubiertas reduce los problemas de congelamiento, pérdidas de calor y la evaporación superficial. El uso de cubiertas combinado con el pre espesamiento incrementa el rendimiento de la estabilización aerobia convencional debido al incremento en la reducción de los sólidos volátiles y la destrucción de patógenos. En general la cubierta no es requerida si la temperatura del líquido del reactor puede mantenerse a 20 °C durante todo el año, después del espesamiento. Si la temperatura está por debajo de este valor, deben usarse cubiertas económicas.

Muchos reactores aerobios se construyen permitiendo que el nivel del líquido fluctúe muy poco en el primer tanque para maximizar la eficiencia de la transferencia y el mezclado. Algunos reactores aerobios se diseñan con pendientes en el fondo para que los lodos estabilizados sean retirados por el fondo; otros están diseñados con un vertedor de desbordamiento. Los reactores aerobios se construyen de acero y concreto reforzado. En climas fríos los tanques de acero ubicados sobre el piso son aislados. Los tanques de concreto

y acero que están a nivel del suelo, están bien aislados por éste, si el agua subterránea se drena.

Al menos se instalan dos tanques para flexibilidad del proceso y equipos, en caso de que alguno de los tanques necesite reparación. El aumento del tamaño del reactor como factor de seguridad genera problemas de operación debido a las pérdidas de calor y a los incrementos en los requerimientos de energía para el mezclado. Los dos esquemas mostrados en la ilustración 3.9 y en la ilustración 3.10, son ejemplos de dos procesos de tratamiento de lodos para el desaguado y el manejo del lodo en la estabilización aerobia. La ilustración 3.9, muestra la opción de desaguado en dos etapas y la ilustración 3.10, muestra la opción de manejo del lodo en la estabilización aerobia de tres etapas.

### 3.3.6 TUBERÍAS REQUERIDAS

Se cuenta con tuberías para la alimentación de lodos, decantación o retiro de sobrenadante, retiro de los lodos estabilizados y suministro de aire al sistema de aeración. Si es posible deben proporcionarse arreglos de tubería para el lavado de las líneas de salida de los lodos con efluente de la planta de tratamiento. El cabezal de tuberías permite una derivación a cada tanque.

Ilustración 3.9 Opción de desaguado, tratamiento de lodos en dos etapas (Daigger G., et al 1999)

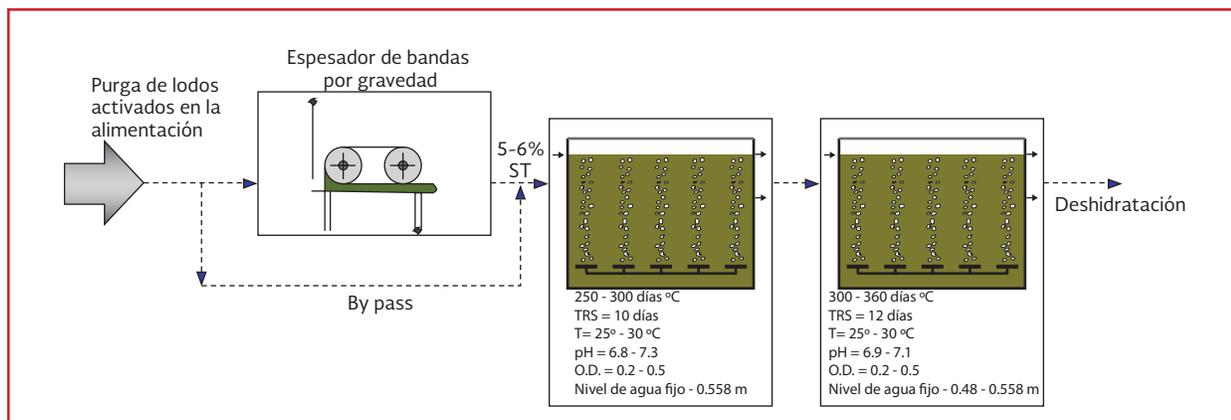
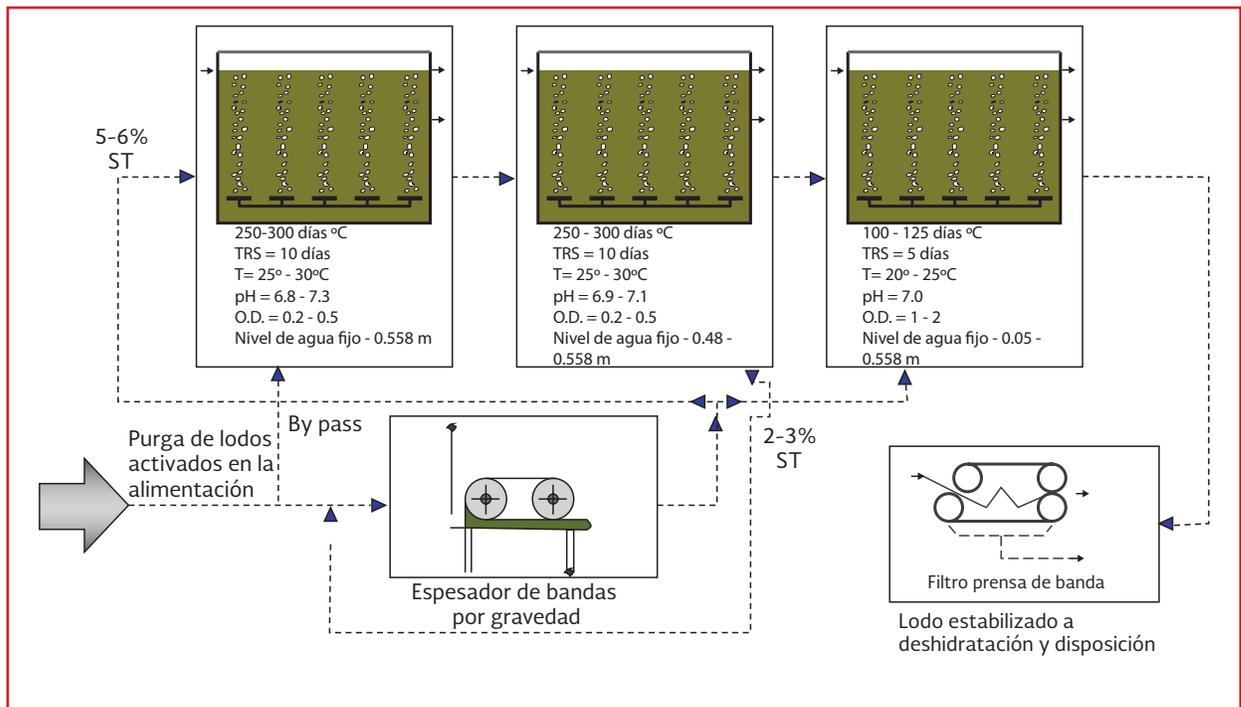


Ilustración 3.10 Opción de manejo del lodo, estabilización aerobia en tres etapas (Daigger G. , et al, 1999)



### 3.4. MODO DE OPERACIÓN DEL REACTOR

#### 3.4.1 OPERACIÓN SEMICONTINUA

En algunas plantas de tratamiento, el reactor aerobio de lodos opera de forma semi-continua. En este procedimiento los lodos se bombean directamente del sedimentador al reactor. El tiempo requerido para el llenado del reactor depende del volumen del tanque y del volumen del lodo residual. Cuando se utiliza sistema de aeración con difusores, el lodo que entra al tanque se encuentra en aeración continua durante la operación de llenado.

Cuando el lodo se encuentra estabilizado y se planea el retiro del reactor, se suspende la aeración y se permite que el lodo sedimente. A continuación se retira o decanta el sobrenadante, el cual regresa a la planta de tratamiento. El lodo espesado se remueve con una concentración

entre 0.5 y 4.0 por ciento de sólidos totales y se llena de nuevo con lodo fresco.

#### 3.4.2 OPERACIÓN CONTINUA

La operación de un reactor aerobio de lodos en forma continua es similar a la operación del reactor de lodos activados. El lodo se bombea directamente a tasa constante y el reactor opera a un nivel constante. El sobreflujo se envía a un tanque de separación sólido-líquido. El lodo espesado y estabilizado se retorna hacia el reactor de lodos o se envía directamente hacia el tratamiento posterior. Los reactores que operan en forma continua tienen bajas concentraciones de sólidos suspendidos.

#### 3.4.3 OPERACIÓN DE AUTO-CALENTAMIENTO

Esta forma de operación es poco utilizada. En este caso el reactor de lodos opera a

temperatura termofílica aprovechando el calor generado durante la estabilización de la materia orgánica. En esta forma de operación, se eleva la temperatura del agua a 60 °C, si se libera el calor requerido durante la degradación biológica. Esto se logra alimentando al reactor con una concentración mayor a 4 por ciento de sólidos totales. Las ventajas de esta forma de operación son:

- Mayor velocidad de degradación de la materia orgánica, disminuyendo el volumen del reactor
- Producción de un lodo relativamente libre de patógenos (lodo tipo A)
- Menores necesidades de oxígeno que el requerido por el proceso mesofílico
- Mayor facilidad para deshidratación del lodo

#### 3.4.4 OPERACIÓN AEROBIA-ANÓXICA

Esta técnica permite a los operadores la nitrificación, desnitrificación, control de pH y alcalinidad así como la optimización de la estabilización aerobia con éxito, ahorrando energía.

##### **Nitrificación y desnitrificación**

En la ecuación 3.1 se describe el proceso de estabilización aerobia. Como se observa en la ecuación, la oxidación de la biomasa produce dióxido de carbono, agua y amoníaco.

La Tabla 3.1 incluye un resumen de ecuaciones de la nitrificación y la desnitrificación (ecuación 3.1 a ecuación 3.6), las cuales facilitan la explicación del proceso.

El amoníaco se combina con parte del dióxido de carbono para la producción de una forma de bicarbonato de amonio. Frecuentemente ocurre una nitrificación parcial y una porción del nitrógeno queda como amoníaco. Este sistema nitrifica hasta que el pH disminuye lo suficiente y comienza la inhibición de bacterias nitrificantes, como se observa en la ecuación 3.4 (nitrificación parcial). Esto ocurre únicamente cuando el lodo que se alimenta al digestor tiene baja alcalinidad. En este caso, existe una mezcla del amoníaco y el nitrato producido al mismo tiempo. Un ejemplo de esto es lo que ocurre en la sedimentación, donde el amoníaco acumulado en el lodo no puede removerse, porque este no tiene suficiente alcalinidad para la inducción de la reacción, resultando en olores desagradables.

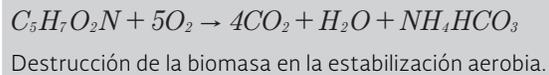
La ecuación 3.5 muestra que si el oxígeno de los nitratos se usa como una fuente de oxígeno para la estabilización de la biomasa, tal como se utiliza en el proceso de la corriente líquida, entonces la nitrificación y la desnitrificación pueden completarse. La oxidación de la biomasa con nitrato, libera amoníaco y también produce gas nitrógeno, además de bicarbonato, que es una forma de alcalinidad.

La ecuación 3.6 muestra el balance estequiométrico de la nitrificación y desnitrificación. La biomasa oxidada se convierte a dióxido de carbono, gas nitrógeno y agua.

La nitrificación y la desnitrificación se logran con las siguientes formas de operación:

1. Con etapas de aeración y no aeración, (por ejemplo 75 por ciento con aire, 25 por ciento sin aire)
2. Con concentraciones bajas de oxígeno disuelto y la creación de condiciones

Tabla 3.1 Resumen de las ecuaciones que describen los procesos de nitrificación y desnitrificación (Daigger, Graef, & Eike, 1997)



Ecuación 3.1



Nitrificación del nitrógeno amoniacal liberado.

Ecuación 3.2



Nitrificación completa

Ecuación 3.3



Con nitrificación parcial

Ecuación 3.4



Desnitrificación usando nitrógeno de nitrato como aceptor de electrones.

Ecuación 3.5



Con nitrificación y desnitrificación completa

Ecuación 3.6

que permitan que la nitrificación y la desnitrificación ocurran simultáneamente.

Estos procedimientos operativos son similares a los usados en el proceso del tratamiento del agua.

Los beneficios de los procesos de nitrificación y desnitrificación son los siguientes:

1. Recuperación de la alcalinidad y balance del pH
2. Ahorro de energía
3. Menores concentraciones de oxígeno disuelto y de requerimientos de oxígeno
4. Remoción de nitrógeno
5. Remoción de fósforo

Como se muestra en estudios realizados en Kuwait en un ambiente controlado a 20 °C y un TRS de 10 días, la duración del estado anóxico se optimiza de 8 a 16 h d<sup>-1</sup> (Al-Gushain, Hamoda, & El-Ghany, 2004). La Ilustración 3.11, muestra que la remoción de nitrógeno total en el sobrenadante se optimiza con un ciclo anóxico de 8 horas. (Al-Gushain, Hamoda, & El-Ghany, 2004).

### Recuperación de la alcalinidad y balance del potencial de hidrógeno

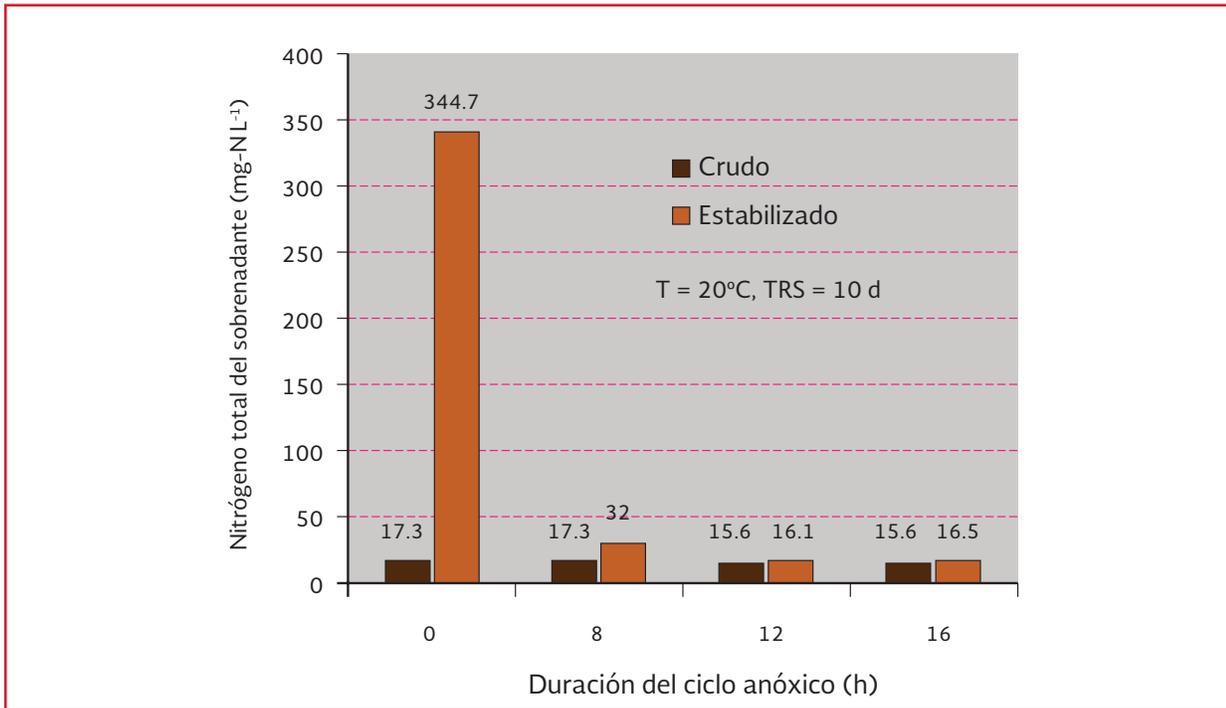
Los siguientes cambios ocurren en el balance de la alcalinidad si se presenta una nitrificación y desnitrificación completa:

- La destrucción de la biomasa produce 1 mol de alcalinidad = +1 mol de alcalinidad
- La nitrificación destruye 2 moles de alcalinidad = -2 moles de alcalinidad
- La desnitrificación produce 1 mol de alcalinidad = +1 mol de alcalinidad
- Consumo de alcalinidad durante la nitrificación y la desnitrificación = 0 moles de alcalinidad

El resultado final y el beneficio de la nitrificación y la desnitrificación completa es que la alcalinidad no se consume en el proceso de estabilización aerobia.

Si los lodos alimentados contienen suficiente alcalinidad, el pH permanece neutro. Si ocurre una nitrificación y una desnitrificación completa, mediante la incorporación de un ciclo anóxico, el amonio y el nitrato residual están en el rango de 10 a 20 mg L<sup>-1</sup> (Hao, Kim, & Al-Ghusain, 1991), (Matzuda, Ide, & Fujii, 1988).

Ilustración 3.11 Efecto de la duración del ciclo anóxico en la concentración de nitrógeno total en el sobrenadante (WEF, 2008)



Esta es una razón por la que el pH es un indicador primario del control del proceso de estabilización aerobia y permite a los operadores la optimización de las técnicas de nitrificación y desnitrificación. Si en la alimentación no está disponible la alcalinidad suficiente para el balance del pH biológico, se requiere la adición de químicos al reactor. Para la solución de este problema, se adiciona bicarbonato de sodio, cal o hidróxido de sodio al lodo alimentado directamente en el reactor. La ilustración 3.12 es el resultado de un estudio en donde se evalúa el efecto de una alta concentración de oxígeno disuelto y alta temperatura en las fluctuaciones de pH en un sistema de estabilización en tres etapas (Daigger G. , et al., 1999). Las observaciones del estudio son las siguientes:

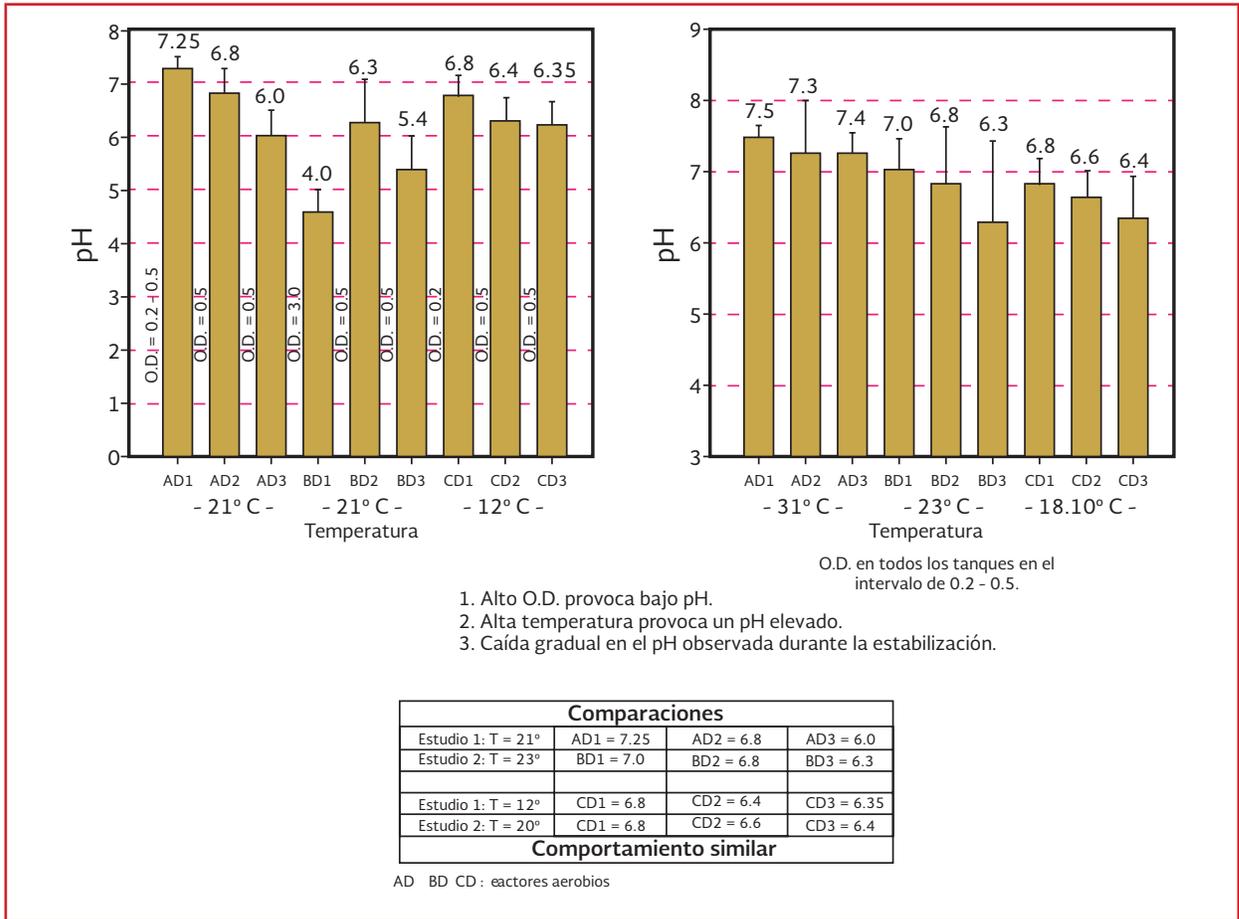
1. Alta concentración de oxígeno disuelto causa una reducción en el pH. Esto

- se observa en la ilustración 3.12 si se compara el reactor AD1 que trabaja con una concentración de oxígeno disuelto entre 0.2-0.5 mg L<sup>-1</sup> el pH es de 7.25 y el reactor BD1 que trabaja con una concentración de oxígeno de 3.0 mg L<sup>-1</sup> (alto oxígeno disuelto) el pH es de 4.6. Los dos reactores operan a la misma temperatura (21 °C). Esto indica que la nitrificación causa una disminución en el pH y convierte el amoníaco a nitratos
2. Una temperatura alta causa una elevación en el pH y es más rápida la generación de amoníaco por la degradación de las proteínas heterotróficas

### Ahorro de energía

El requerimiento de oxígeno en el proceso se reduce de 7 moles de oxígeno / moles de biomasa destruida para el proceso aerobio completo

Ilustración 3.12 Efecto del pH en un reactor aerobio (O.D. = oxígeno disuelto) (Daigger G., et al 1999)



(Ecuación 3.3), a 5.75 moles de oxígeno / moles de biomasa destruida para el proceso de estabilización anóxico-aerobio (Ecuación 3.6). Si la nitrificación y la desnitrificación completas ocurren de la fuente de oxígeno, el ahorro de energía se realiza como se muestra a continuación:

- Destrucción de biomasa requiere **5 moles de oxígeno**
- Nitrificación completa requiere **7 moles de oxígeno**
- Nitrificación completa y desnitrificación completa requiere **5.75 moles de oxígeno**
- Ahorro neto de la nitrificación y la desnitrificación **1.25 moles de oxígeno**

Aproximadamente el 18 por ciento de ahorro de energía se obtiene por la reducción de los requerimientos de oxígeno durante la fase anóxica.

### Separación sólido-líquido

El desempeño de un reactor aerobio de lodos depende de una buena separación sólido-líquido. Para la obtención de una buena separación se toman en cuenta las siguientes recomendaciones durante la operación:

### Operación en continuo

En la operación en continuo se ajusta la velocidad del retorno de lodos para la obtención del mejor

balance entre la concentración del lodo de retorno y la calidad del sobrenadante.

Se ajusta la entrada al tanque o cámara de sedimentación y las características al flujo de salida para la reducción de cortos circuitos y turbulencia no deseada que impida o interfiera con la concentración de lodos.

Modificación o mejora de los vertedores y el arreglo de las tuberías.

### **Operación en forma discontinua o batch**

En la operación en forma discontinua o batch se suspende la operación del equipo de aeración para que el lodo sedimente. Se evita la formación de condiciones anaerobias optimizando el tiempo requerido para la separación sólido-líquido.

Se decanta la mayor parte del sobrenadante, y se conoce su calidad mediante el análisis del pH, sólidos suspendidos y la DQO o DBO.

Se extrae el lodo y se conduce a una segunda etapa de estabilización o a disposición final. Muchas plantas de tratamiento utilizan lechos de secado de arena y filtros de bandas para la deshidratación del lodo. Si el lodo que sale del reactor aerobio contiene de 0.5 a 1 por ciento de sólidos suspendidos se deshidrata hasta 6 por ciento de sólidos totales en los lechos de secado de arena.

Se carga nuevamente el reactor con lodo crudo. Se recomienda que el volumen y la concentración de lodo sea uniforme en cada período de operación. En algunas instalaciones la sedimentación y la extracción del lodo se realizan una vez a la semana, mientras que la adición o alimentación del lodo se hace

diariamente. De esta forma el volumen de lodo en el reactor se incrementa diariamente hasta la próxima decantación y extracción de lodo.

## **3.5. DESEMPEÑO DEL PROCESO**

El desempeño del reactor aerobio se mide en función de los objetivos del proceso. Los parámetros utilizados para la evaluación del son:

- Control de la temperatura
- Control del pH
- Grado o porcentaje de reducción de sólidos volátiles y grado o porcentaje de reducción de sólidos
- Tasa de consumo de oxígeno
- Calidad del sobrenadante
- Características de desaguado del lodo
- Reducción de la concentración de nitrógeno amoniacal y remoción del nitrógeno en los biosólidos
- Reducción de fósforo en los biosólidos y biofósforo
- Reducción de microorganismos patógenos
- Características estéticas de los lodos residuales (color, olor, porosidad, etc.)
- Producto del tiempo de retención de los sólidos por la temperatura (día °C)
- Flexibilidad del sistema

### **3.5.1 CONTROL DE LA TEMPERATURA**

Si existe la posibilidad de captura del calor generado por la destrucción de los sólidos volátiles, la temperatura del reactor puede controlarse.

Dependiendo de la localización geográfica y de las condiciones climáticas, los tanques requieren

o no la incorporación de una cubierta. Las cubiertas son usadas en climas fríos para ayudar al mantenimiento de la temperatura de los lodos en tratamiento. Las cubiertas no son empleadas si impiden la evaporación y los líquidos contenidos se calientan demasiado. Cuando el líquido se calienta en exceso, se generan malos olores y el efluente del proceso tiene una calidad muy pobre (California State University, 1991).

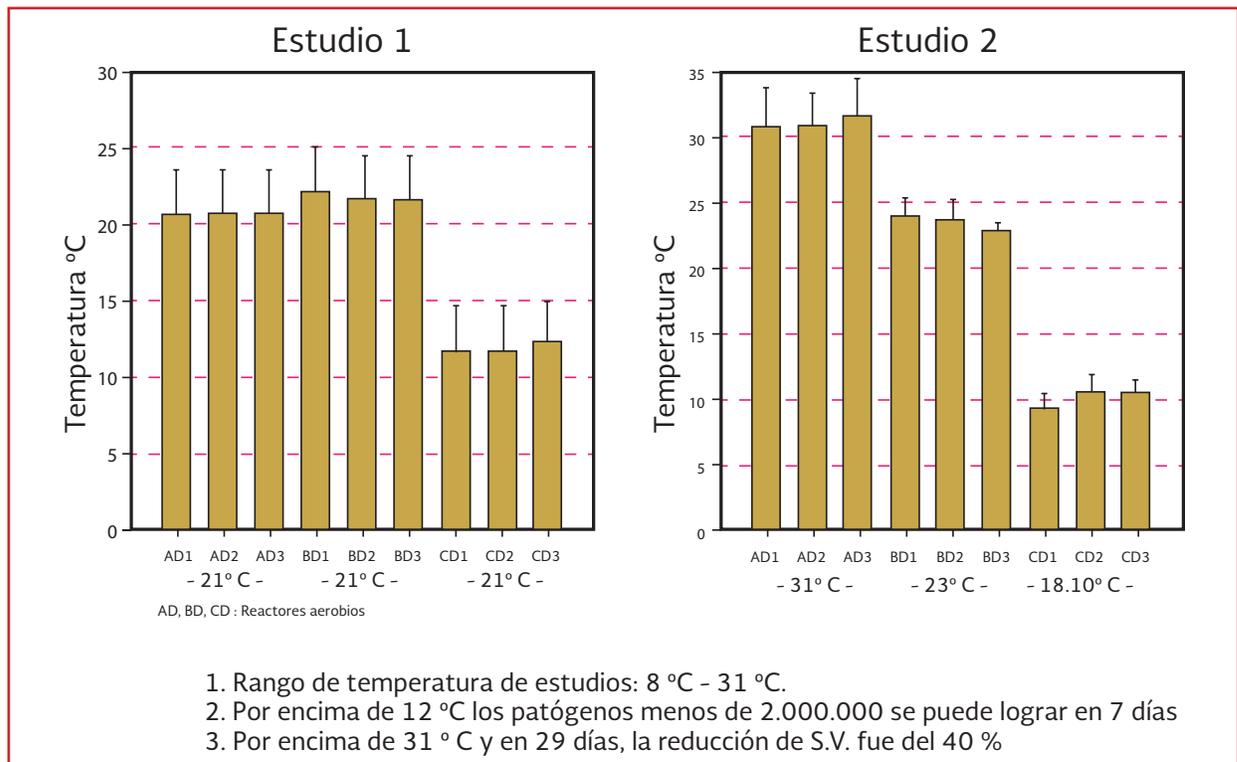
La temperatura del líquido en un reactor aerobio afecta significativamente la velocidad de reducción de los sólidos volátiles y la reducción de patógenos. La velocidad de reducción de los sólidos volátiles se incrementa con el aumento de la temperatura. Como en todos los procesos biológicos, cuanto mayor sea la temperatura, mayor será la eficiencia. A temperaturas menores de 10 °C (50 °F), el proceso no es efectivo. La ilustración 3.13, muestra aspectos de un estudio enfocado en la destrucción de

patógenos y en el desempeño de los sólidos volátiles en un sistema de estabilización de tres etapas operado a temperaturas en el rango de 8 a 31 °C. Las siguientes conclusiones se extraen de este estudio:

1. Arriba de 12 °C, los patógenos se reducen a menos de 2 000 000 NMP g<sup>-1</sup> en base seca, en 7 días
2. A temperatura por debajo de 10 °C, se requiere un mínimo de 25 días para la obtención del mismo resultado

El efecto de la temperatura en la destrucción de los sólidos volátiles se muestra con los datos obtenidos en la instalación de escala completa de Plum Creek, Colorado por Tim Grotheer (Daigger, Graef, & Eike, 1997). Esta planta de tratamiento fue convertida al sistema de estabilización aerobia. En la ilustración 3.14 se muestra el diagrama de flujo. Durante esta fase

Ilustración 3.13 Conclusiones del estudio del efecto de la temperatura en el desempeño de reactores aerobios (Daigger G., et al., 1999)



del proyecto, los lodos se espesaron previamente y se alimentaron a un sistema de estabilización en serie de 5 etapas. No se utilizaron cubiertas o aislamiento. Durante la fase 1 del proyecto, aunque el TRS total del sistema fue de 54.5 días, la reducción de sólidos volátiles en el mes

de febrero fue únicamente del 16 por ciento, cuando la temperatura era tan baja como 10 °C.

La ilustración 3.15, muestra la reducción de sólidos volátiles por mes en el sistema completo contra la concentración de sólidos y la temperatura. La

Ilustración 3.14 Diagrama de flujo del proceso de tratamiento de lodos, Plum Creek, Colorado (EBG= espesador de bandas por gravedad) (Daigger, Graef, & Eike, 1997)

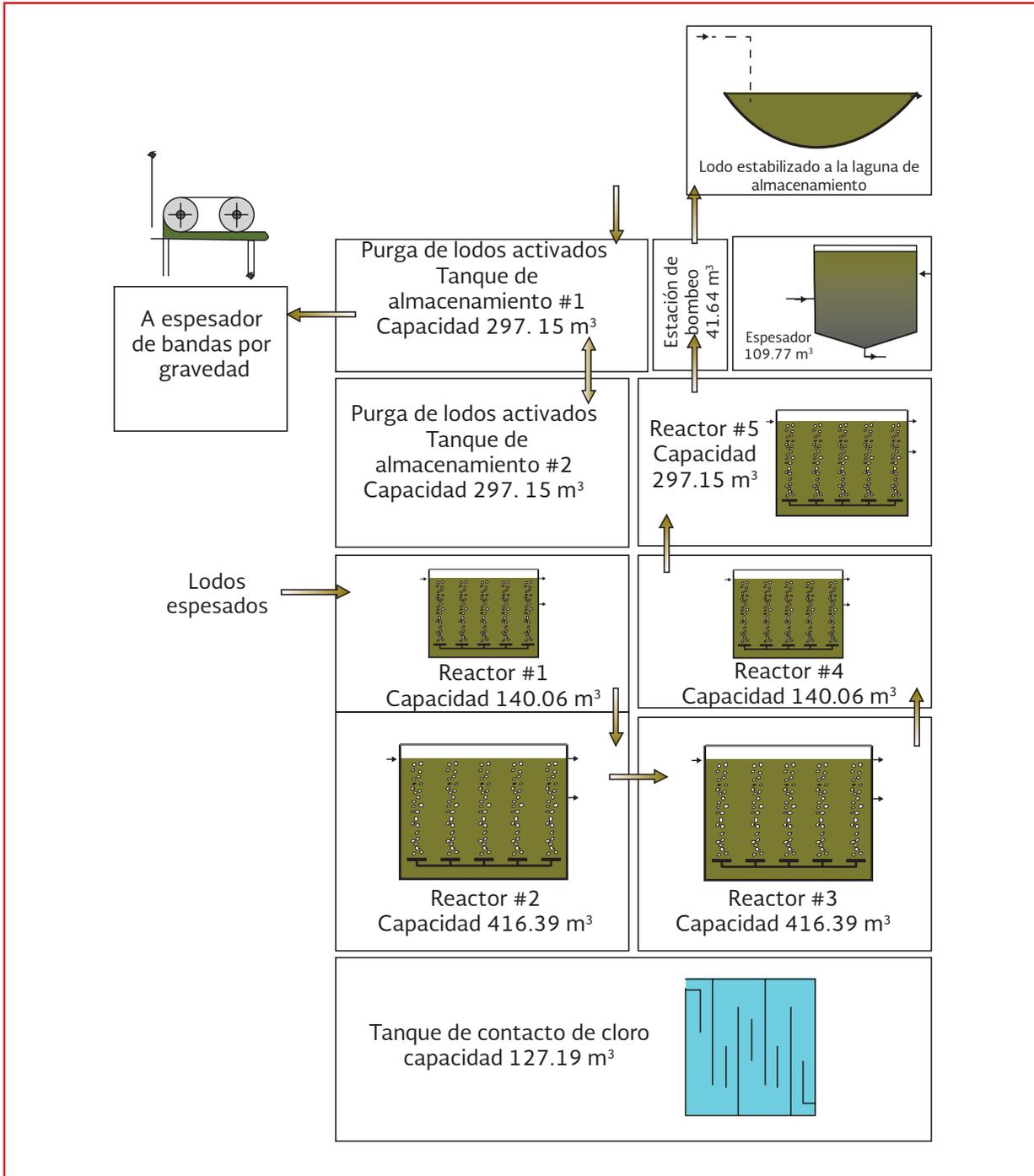


Ilustración 3.15 Reducción de sólidos volátiles contra la concentración de sólidos y temperatura de Plum Creek , Colorado (Daigger, Graef, & Eike, 1997)

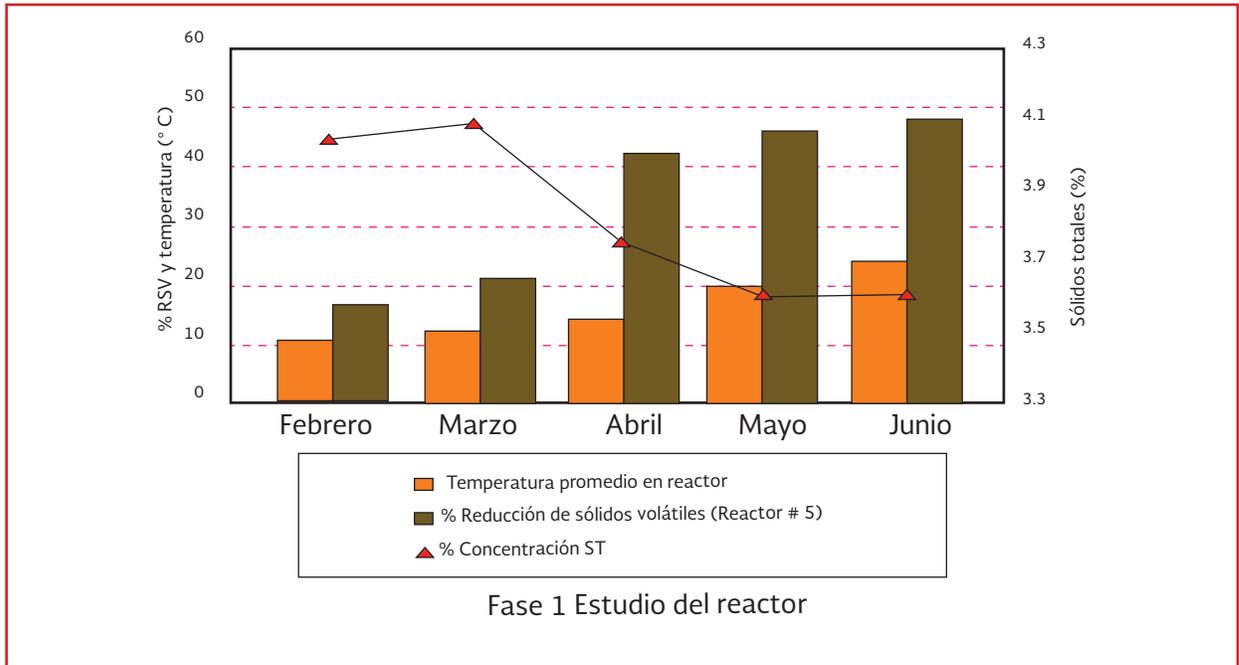


ilustración 3.16 muestra la reducción de sólidos volátiles por mes en cada etapa.

El estudio de Al-Gushain (Al-Gushain, Hamoda, & El-Ghany, 2004) evalúa el efecto de la temperatura en la destrucción de sólidos

volátiles a un TRS bajo de 10 días, con un ciclo anóxico de 8 horas. En la ilustración 3.17 se observa a 30 °C una destrucción de SSV del 42 por ciento, lo cual coincide con los resultados obtenidos en Plum Creek.

Ilustración 3.16 Reducción de los sólidos volátiles (RSV) por mes de cada reactor en serie, Plum Creek, Colorado (Daigger, Graef, & Eike, 1997)

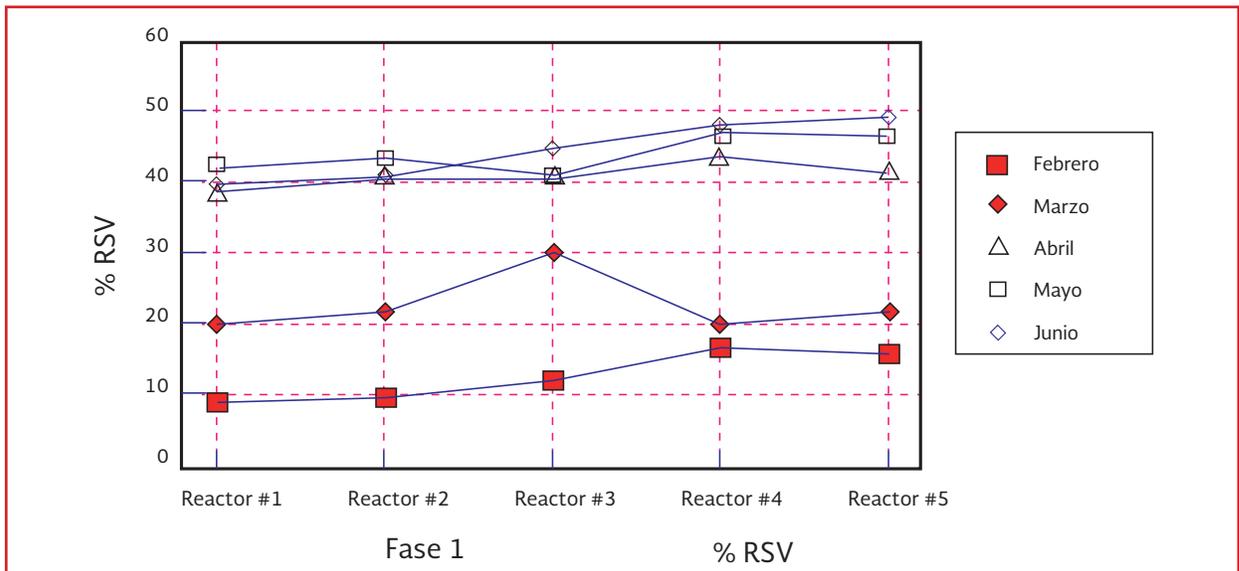
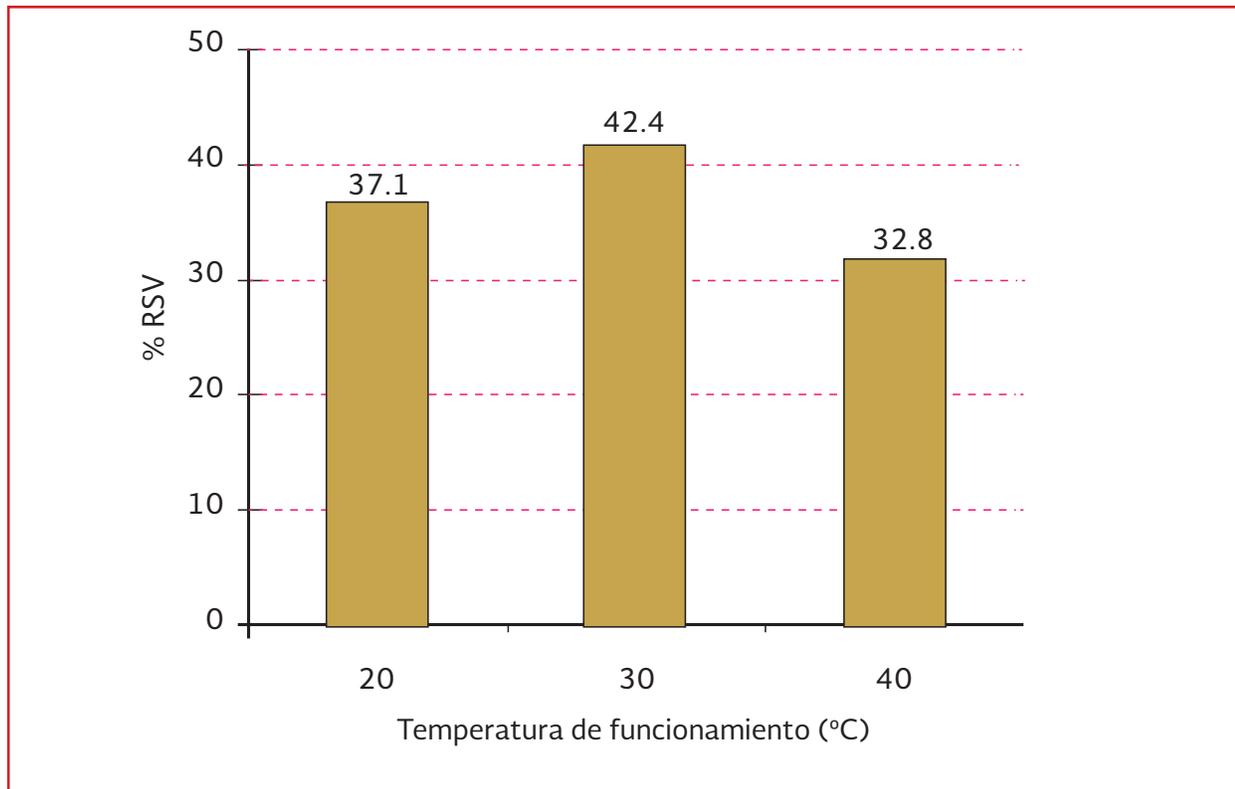


Ilustración 3.17 Efecto de la temperatura en la remoción de los SSV con un ciclo anóxico de 8 horas y un tiempo de retención de sólidos (TRS) de 10 días) (Al-Gushain, Hamoda, & El-Ghany, 2004)



### 3.5.2 CONTROL DEL PH

El control del pH es necesario si se quiere llevar a cabo la nitrificación del lodo. Esto generalmente aplica en lodos con concentraciones altas de nitrógeno amoniacal (mayores de  $500 \text{ mg L}^{-1}$ ) y una baja capacidad de amortiguamiento. Afortunadamente la mayoría de los reactores aerobios de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales no presentan ese problema. La nitrificación generalmente requiere una concentración de  $3 \text{ mg L}^{-1}$  de oxígeno disuelto.

### 3.5.3 DESTRUCCIÓN DE SÓLIDOS VOLÁTILES Y REDUCCIÓN DE LOS SÓLIDOS FIJOS

La estabilización aerobia resulta en la destrucción de los sólidos suspendidos volátiles

(SSV). Además si se selecciona una membrana para el espesamiento, los sólidos suspendidos fijos (SSF) también son reducidos. Esto ocurre porque los materiales (tanto orgánicos como inorgánicos) presentes en los sólidos suspendidos biodegradables son solubilizados y estabilizados. Sin embargo los componentes de SSV y SSF no son iguales. Consecuentemente, estos últimos (SSF) generalmente no son destruidos en la misma proporción.

Si el reactor aerobio opera con un tiempo de retención de sólidos y una temperatura adecuada, puede alcanzarse una reducción de sólidos suspendidos volátiles entre un 35 y 50 por ciento. En la tDatos de operación de reactores aerobios de lodos que tratan mezclas de lodo primario y lodos activados (EPA, 1978) se muestran ejemplos de datos de operación y del desempeño de los reactores aerobios

con operación discontinua. Se observa que el porcentaje de reducción de los SSV se encuentra en un rango de 21 a 46 por ciento dependiendo de algunas variables como tipo de lodo, tiempo de retención de sólidos y la temperatura.

### 3.5.4 TASA ESPECÍFICA DE CONSUMO DE OXÍGENO

La tasa de consumo oxígeno usada por los microorganismos depende de la tasa de oxidación biológica. La tasa específica de consumo de oxígeno de  $1.5 \text{ mg O}_2 \text{ (g SSV)}^{-1} \text{ h}^{-1}$  a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $68 \text{ }^\circ\text{F}$ ), es seleccionada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) como índice de la reducción adecuada en la atracción de vectores en un lodo estabilizado aerobiamente.

La tasa de consumo de oxígeno se usa para la determinación del nivel de actividad biológica y la destrucción de sólidos volátiles que ocurre en el reactor. La tasa específica de consumo de oxígeno es el procedimiento de prueba más común para muchos operadores en lugar de

la prueba tradicional de reducción de sólidos suspendidos volátiles. Sin embargo el ensayo de reducción de sólidos suspendidos volátiles es aún la opción preferida de la estabilización anaerobia, dado que la velocidad de consumo de oxígeno no aplica para sólidos estabilizados de forma anaerobia.

La tasa de consumo de oxígeno es un ensayo rápido y es independiente del valor inicial en el sistema o de la reducción de la tasa de consumo de oxígeno en el proceso anterior. Por otro lado, la reducción de sólidos volátiles es un porcentaje de los niveles de volátiles que entran al reactor. Durante la estabilización aerobia, si el lodo primario se adiciona al reactor para su estabilización este tiene una tasa específica de consumo de oxígeno de  $10 \text{ a } 30 \text{ mg O}_2 \text{ (g SSV)}^{-1} \text{ h}^{-1}$ . Para una operación por etapas, sin embargo, la tasa de consumo de oxígeno es de  $3 \text{ a } 10 \text{ mg O}_2 \text{ (g SSV)}^{-1} \text{ h}^{-1}$  en la primera etapa del reactor en comparación con un rango de  $10 \text{ a } 20 \text{ mg O}_2 \text{ (g SSV)}^{-1} \text{ h}^{-1}$  en la fase activa del proceso de lodos activados.

Tabla 3.2 Datos de operación de reactores aerobios de lodos que tratan mezclas de lodo primario y lodos activados (EPA, 1978)

TRS (d)	T ( $^\circ\text{C}$ )	% reducción SSV	pH	Alcalinidad ( $\text{mg L}^{-1}$ )	N-NH <sub>3</sub> ( $\text{mg L}^{-1}$ )	N-NO <sub>2</sub> ( $\text{mg L}^{-1}$ )	N-NO <sub>3</sub> ( $\text{mg L}^{-1}$ )
5	15	21	7.6	510	54	Trazas	No
10	15	32	7.6	380	3.2	1.28	64
30	15	40	6.6	81	4.0	0.36	170
60	15	46	4.6	23	38.0	0.23	835
5	20	24	7.6	590	54.0	Trazas	No
10	20	41	7.7	390	4.9	0.59	60
15	20	43	7.8	560	7.0	2.27	29
30	20	44	5.4	31	28.0	0.19	275
60	20	46	5.1	35	7.0	0.51	100
5	35	26	7.9	630	14.0	0.18	No
10	35	45	8.0	540	10.0	0.08	No

Un lodo bien estabilizado por el proceso de estabilización aerobia tiene una tasa de consumo de oxígeno en el rango de 0.1 a 1.0 mg O<sub>2</sub> (g SSV)<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>, inferior a los 1.5 mg O<sub>2</sub> (g SSV)<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>, propuestos por la USEPA (WEF, 2008).

### 3.5.5 CALIDAD DEL SOBRENADANTE

En el proceso de estabilización en régimen continuo o por lotes, se monitorea cuidadosamente la separación sólido-líquido, ya que una buena separación incrementa el rendimiento de un reactor aerobio. El líquido sobrenadante o filtrado debe presentar bajas concentraciones de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), SST y nitrógeno, para los dos tipos de operación continua y por lotes. La Tabla 3.3 enlista las características aceptables del sobrenadante en el proceso de estabilización aerobia (Metcalf & Eddy, 2002).

### 3.5.6 CARACTERÍSTICAS DEL LODO DESAGUADO

El lodo estabilizado de manera aerobia es de mejor calidad a comparación del tratado de forma anaerobia. En general, se ha observado que estos últimos requieren mayor cantidad de químicos para el acondicionamiento.

Los lodos que son difíciles de desaguar y

requieren altas dosis de químicos generalmente presentan bajos rendimientos y una calidad de filtrado o concentrado pobre (Metcalf & Eddy, 2002). La Tabla 3.4 muestra la dosis de polímeros adicionados a filtros prensa de bandas y a la centrifugas de taza sólida para el desaguado de los lodos. Como se muestra en la tabla, se requieren cantidades similares de polímero para los lodos primarios tratados anaerobiamente y los DLA tratados aerobiamente.

Los datos presentados en la Tabla 3.4, fueron recolectados en un proceso de estabilización aerobia, antes de la adopción de la operación aerobia-anóxica. Cuando se realizaron las modificaciones se mostró una mejora en las características de lodos de varias plantas de tratamiento. Basado en reportes preliminares elaborados por (Stensel & Bailey, 2000) en Paris, Illinois, los lodos estabilizados aerobiamente operados de forma aerobia-anóxica producen menos sólidos que los lodos estabilizados aerobiamente operados en completa aeración.

### 3.5.7 REDUCCIÓN DE NITRÓGENO AMONIAL Y REMOCIÓN DE NITRÓGENO EN LOS BIOSÓLIDOS

Aunque no es objetivo de la estabilización aerobia, el proceso de estabilización realiza la nitrificación. Para el logro de este objetivo,

Tabla 3.3 Características aceptables del sobrenadante de un sistema de estabilización aerobia (Metcalf & Eddy, 2002)

Parámetro	Rango aceptable	Valor de uso común
pH	5.9 a 7.7	7.0
DBO (mg L <sup>-1</sup> ), 5 día	9 a 1700	500
DBO (mg L <sup>-1</sup> ), filtrado 5 día	4 a 173	50
Sólidos suspendidos (mg L <sup>-1</sup> )	46 a 2000	1000
Nitrógeno Kjeldahl (mg L <sup>-1</sup> )	10 a 400	170
Nitrógeno de nitratos (mg L <sup>-1</sup> )	-- 30	
Fósforo total (mg L <sup>-1</sup> )	19 a 241	100
Fósforo soluble (mg L <sup>-1</sup> )	2.5 a 64	25

Tabla 3.4 Dosis de polímeros adicionados al filtro prensa de bandas y a la centrifuga de taza sólida para el desaguado de lodos (Water Environment Federation, 2008)

Tipo de lodo	Filtro prensa de bandas (g kg <sup>-1</sup> [lb ton <sup>-1</sup> ] sólidos secos)	Centrifuga de taza sólida (g kg <sup>-1</sup> [lb ton <sup>-1</sup> ] sólidos secos)
Primarios	1 a 4 (2 a 8)	0.5 a 2.5 (1 a 5)
Primarios y purga de lodos activados	2 a 8 (4 a 16)	2 a 5 (4 a 10)
Primarios y filtros percoladores	2 a 8 (4 a 16)	----
Purga de lodos activados	4 a 10 (8 a 20)	5 a 8 (10 a 16)
Primarios estabilizados anaerobiamente	2 a 5 (4 a 10)	3 a 5 (6 a 10)
Primarios estabilizados anaerobiamente y purga de lodos activados	1.5 a 8.5 (3 a 17)	2 a 5 (4 a 10)
Primarios estabilizados aerobiamente y purga de lodos activados	2 a 8 (4 a 16)	----

las concentraciones de oxígeno disuelto se llevan a de 2 mg L<sup>-1</sup> o más. Como resultado la concentración de nitratos se incrementa durante el proceso de estabilización.

El proceso de estabilización aerobia convencional, operado de una forma aerobia-anóxica, provee una nitrificación y desnitrificación completa y una reducción en el nitrógeno total. La tasa de carga anual para la aplicación de los biosólidos está típicamente limitada por la tasa de carga del nitrógeno. El proceso ideal para el cumplimiento de estos requerimientos es el proceso convencional operado de modo aerobio-anóxico.

### 3.5.8 REDUCCIÓN DE FÓSFORO EN LOS BIOSÓLIDOS Y BIOFÓSFORO

Tanto en la estabilización aerobia como en la anaerobia se libera fósforo; sin embargo, si el proceso de la estabilización aerobia convencional es operado de forma aerobia-anóxica o bajo

condiciones de poco oxígeno disuelto, la liberación de fósforo se minimiza.

### 3.5.9 REDUCCIÓN DE MICROORGANISMOS PATÓGENOS

Durante la estabilización aerobia de lodos, la reducción de microorganismos patógenos se incrementa con el aumento de la temperatura y del tiempo de retención de sólidos. La reducción de 1 grado de magnitud (1 logaritmo) se alcanza a temperaturas de 35 °C y con un tiempo de retención de sólidos de 15 días, o a 25 °C con un tiempo de retención de sólidos de 30 días. Por lo tanto el proceso de estabilización aerobia solo consigue una calidad de lodo tipo C o B.

### 3.5.10 CARACTERÍSTICAS ESTÉTICAS DEL LODO ESTABILIZADO

Es difícil lograr la sedimentación y deshidratación de los lodos estabilizados aerobiamente. Sin

embargo los lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales tratados por este tipo de proceso se deshidratan adecuadamente en lechos de secado de arena o por medio de equipo mecánico. El tiempo de retención de sólidos influye en las características de desaguado. Menores tiempos de retención de sólidos proporciona un lodo con mejores características de desaguado. Los tiempos de retención elevados dificultan el desaguado del lodo.

La generación de mal olor es otro problema potencial en las instalaciones de los reactores. Durante el proceso se generan subproductos que son fuentes de olor si el proceso no se opera adecuadamente.

### 3.5.11 PRODUCTO DEL TIEMPO DE RETENCIÓN DE SÓLIDOS POR LA TEMPERATURA (DÍA °C)

El TRS es un factor muy importante en la operación efectiva de la estabilización aerobia. El TRS es la masa total de los lodos biológicos en el reactor, dividido entre la masa promedio de los sólidos que son removidos diariamente del proceso. Incrementos en el TRS resultan en un incremento en el grado de reducción de sólidos volátiles.

Una relación o curva del TRS por temperatura (d °C) se utiliza para el diseño del sistema de estabilización aerobia. Esta curva también considera la calidad de la fuente. La curva original  $\text{TRS} \times T$  fue desarrollada por la USEPA a finales de 1970 (EPA,1978 y EPA,1979). Esta curva fue actualizada por Daigger G. et al., 1999, e incorpora los datos obtenidos de estudios piloto realizados por Lu Kwang Ju (Daigger G. et al.,1999) durante tres años en tres plantas de tratamiento.

La ilustración 3.18 muestra un diseño del proceso basado en 600 días °C, asumiendo que la alimentación tiene un contenido relativamente alto de sólidos degradables y la ilustración 3.19, muestra una operación alternativa considerando que los lodos alimentados tienen pocos sólidos degradables. En ocasiones ambos sistemas coexisten, en un punto estándar de diseño, si el pre espesamiento es incorporado al diseño, esto permite un incremento o decremento del TRS como sea necesario.

### 3.5.12 FLEXIBILIDAD DEL SISTEMA

En el diseño, es importante considerar la flexibilidad del reactor principalmente en un sistema que opera por etapas, donde se incorporan dos o más tanques de estabilización.

Si se usa un dispositivo mecánico en el espesamiento, se considera por lo menos un sistema de tuberías para derivación en caso paros o de mantenimiento del dispositivo.

La flexibilidad permite que el operador realice cambios en el proceso como resultado de variaciones en la temperatura, en el volumen de lodos, en la concentración de los lodos, toxicidad y posibles fenómenos meteorológicos, como lluvias fuertes o nieve.

Los equipos de los reactores aerobios, los sopladores y los equipos utilizados para el pre-espesamiento, cuentan como mínimo con la flexibilidad para la operación de la siguiente manera:

1. La opción de operación del reactor en serie y en paralelo
2. Los sistemas de aeración y sopladores se diseñan para el control de la aeración en la nitrificación y en la desnitrificación

Ilustración 3.18 Selección del producto del TRS por la temperatura (días °C) para una alimentación con alto contenido de sólidos degradables (Daigger G. , et al., 1999)

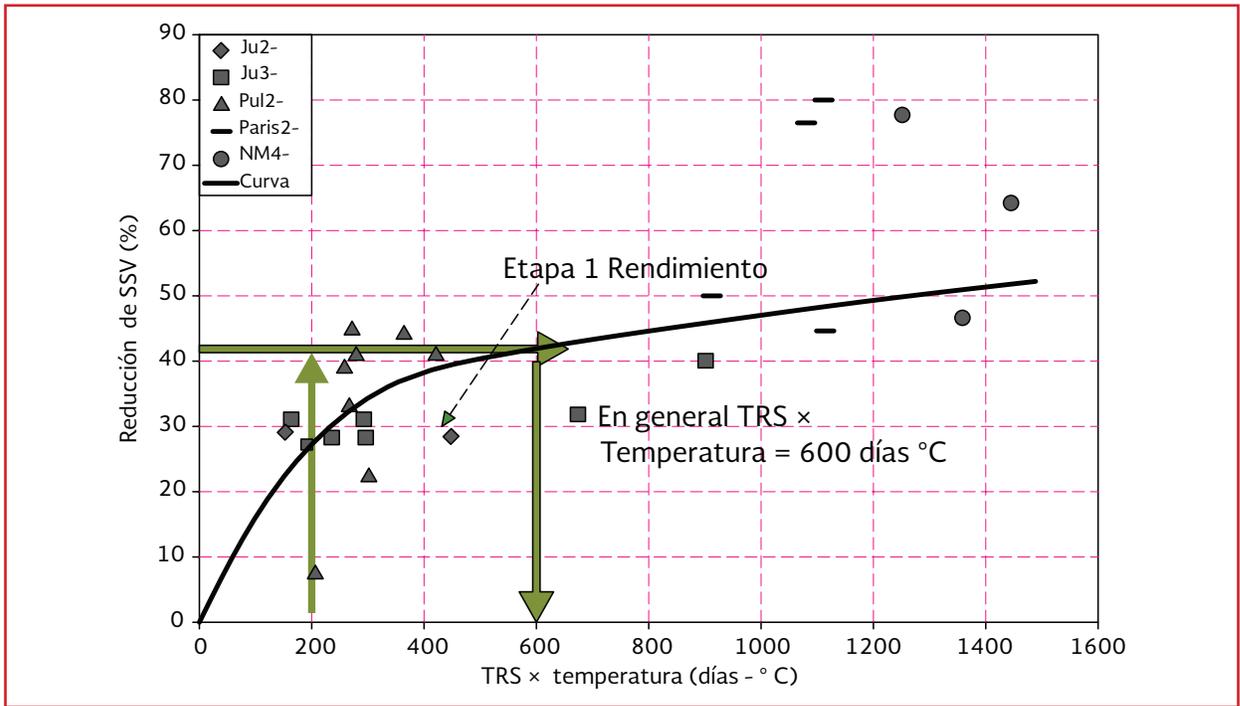
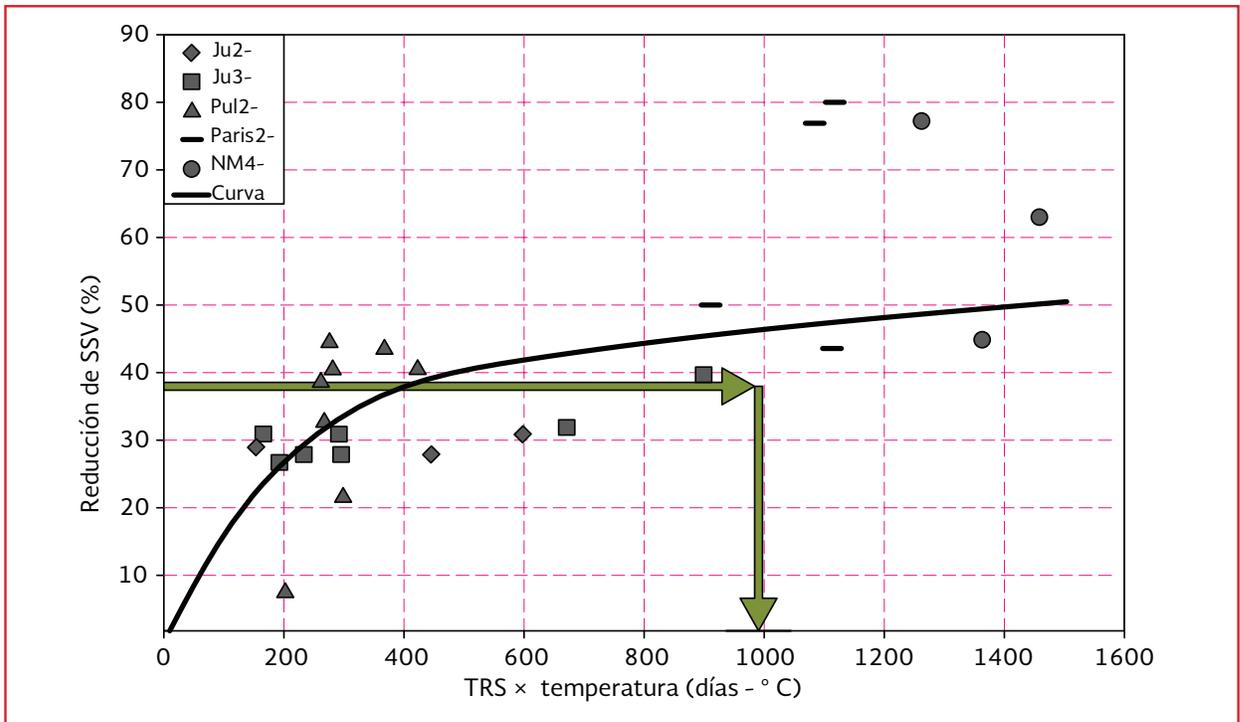


Ilustración 3.19 Selección del producto del TRS por la temperatura (días °C) para una alimentación con bajo contenido de sólidos degradables (Daigger G. , et al., 1999)



3. El sistema de aeración y los sopladores cuentan con flexibilidad para el paso de aire de reactor a reactor, como se requiera
4. El sistema de aeración y los sopladores son flexibles y permiten que el aire se proporcione a un reactor mientras que el otro reactor se encuentra fuera de operación. Los sopladores son flexibles en el caso de variaciones en el nivel del agua
5. La capacidad para la alimentación de sólidos sin espesamiento en dos de los tres tanques, en el verano y la realización del post espesamiento antes del tercer tanque. Por ejemplo se alimenta 1 por ciento de los sólidos al primer reactor cada día, como se muestra en la ilustración 3.20 y se realiza el post espesamiento antes del recorrido del líquido
6. La capacidad para el manejo de un circuito cerrado para el espesamiento del reactor y después un post espesamiento. Esto puede usarse durante el verano, para la reducción de la temperatura en el reactor. Por ejemplo, un bypass en el dispositivo de pre espesamiento y después alimentar el espesador directamente del primer reactor. Los lodos espesados regresan al mismo reactor o al segundo. Si un tercer reactor se encuentra presente, el lodo del segundo reactor se somete a un post espesado y se almacena en el tercer tanque en una concentración mucho mayor
7. La capacidad para el uso de un bypass (algunos días a la semana) en el proceso de pre espesamiento y los días restantes un pre espesamiento continuo. Por ejemplo, tres días de pre espesamiento por semana a 6 por ciento de sólidos suspendidos y un bypass de 0.7 por ciento de sólidos suspendidos, cuatro días por semana, al primer reactor. La

ilustración 3.21, muestra un esquema de la operación de una instalación a escala completa en Paris, Illinois presentado por Richard Yates (Daigger, Graef, & Eike, 1997). Como se observa en este ejemplo, esta forma de operación puede aplicarse en plantas donde los reactores están diseñados para el tratamiento de una combinación de lodos primarios y secundarios. Esto es generalmente para la optimización en el control de la temperatura y el control del proceso durante el verano y el invierno en plantas con gran cantidad de sólidos degradables

8. Flexibilidad en el pre y post espesamiento. La ilustración 3.22, muestra un ejemplo de un diagrama de flujo que muestra el arreglo de tuberías y el equipo necesario para el pre y el post espesamiento usando los mismos dispositivos de pre espesamiento

### 3.6. ARRANQUE DEL REACTOR

Para un arranque adecuado, se evita la sobre carga del reactor y se adiciona el lodo al reactor de acuerdo a un programa establecido para que sea constante.

Se opera continuamente el sistema de aeración el cual cuenta con la capacidad de suministro de una concentración de oxígeno disuelto mayor de  $0.5 \text{ mg L}^{-1}$  en forma continua.

Se verifica que no exista formación de espuma por exceso de aeración.

Si el volumen inicial de lodo no tiene suficiente agua para que el equipo de aeración

Ilustración 3.20 Flexibilidad en la operación de la estabilización aerobia, (Daigger G., et al., 1999)

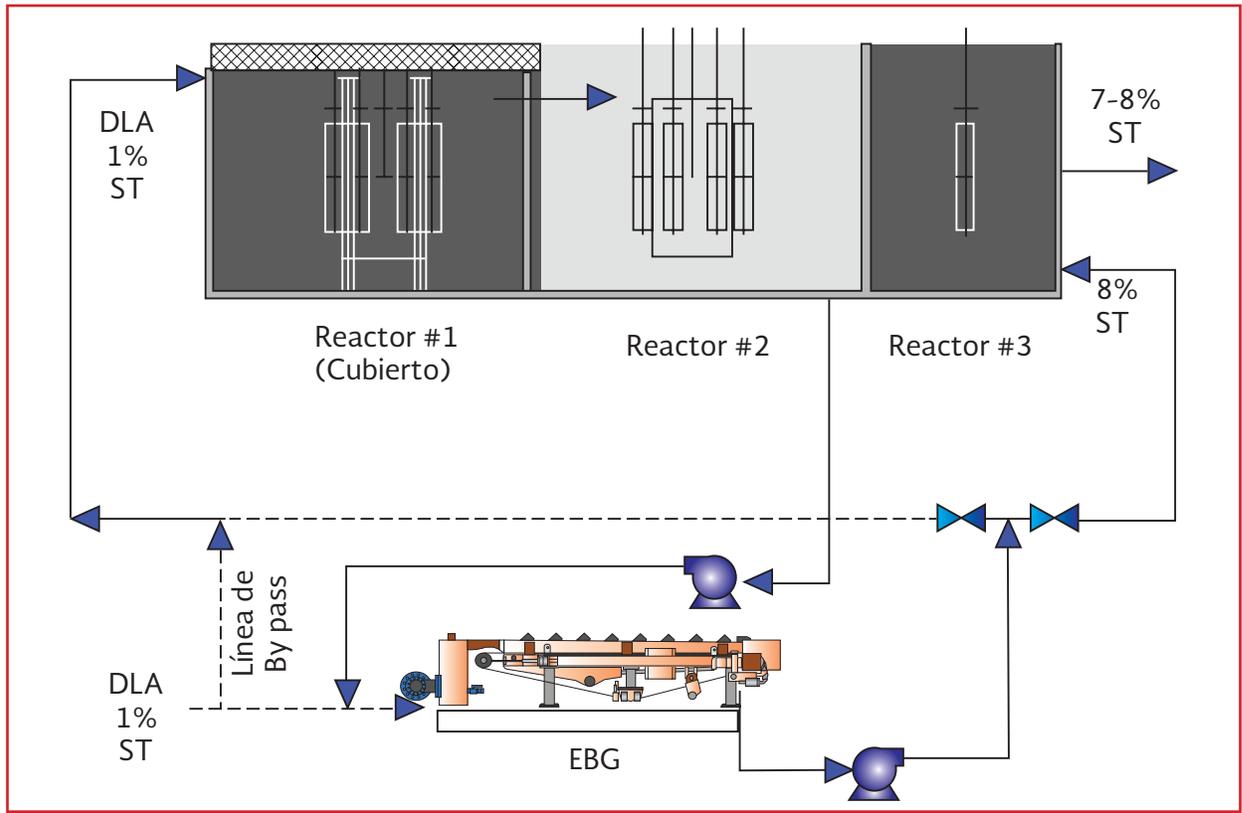


Ilustración 3.21 Esquema del diagrama de flujo de Paris, Illinois (psi = 55 KPa) (Daigger, Graef, & Eike, 1997)

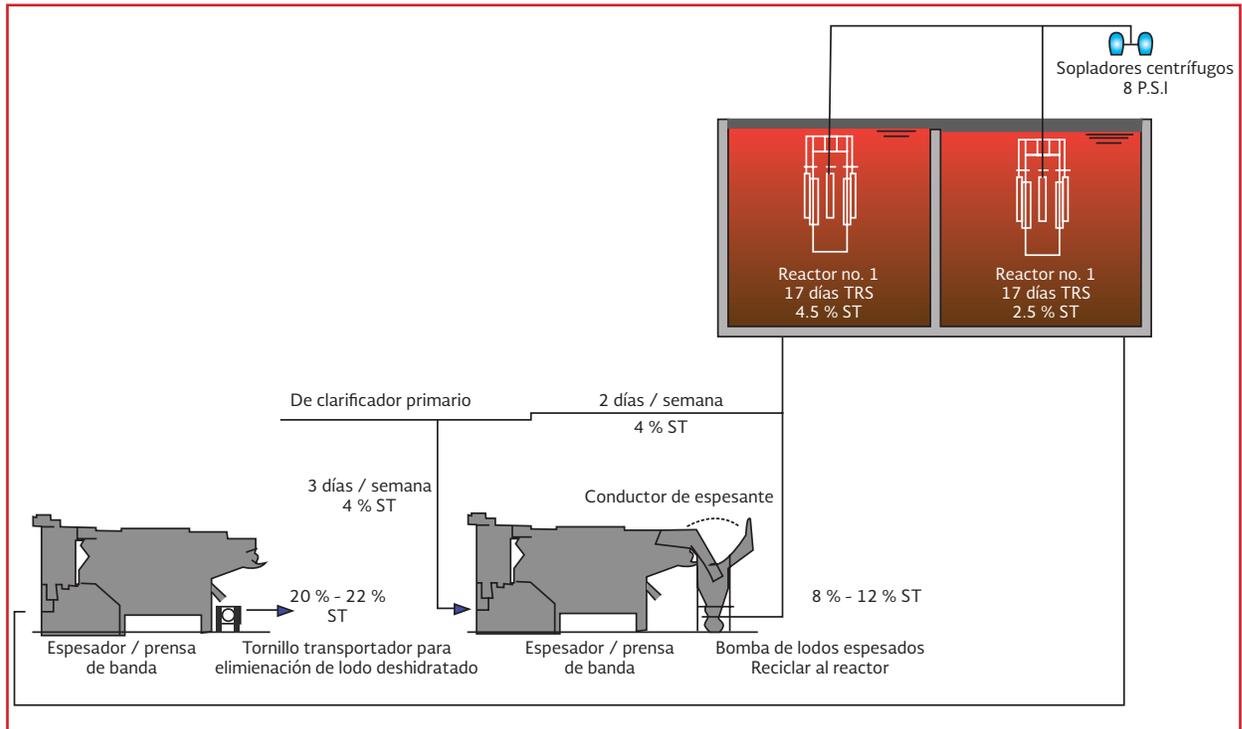
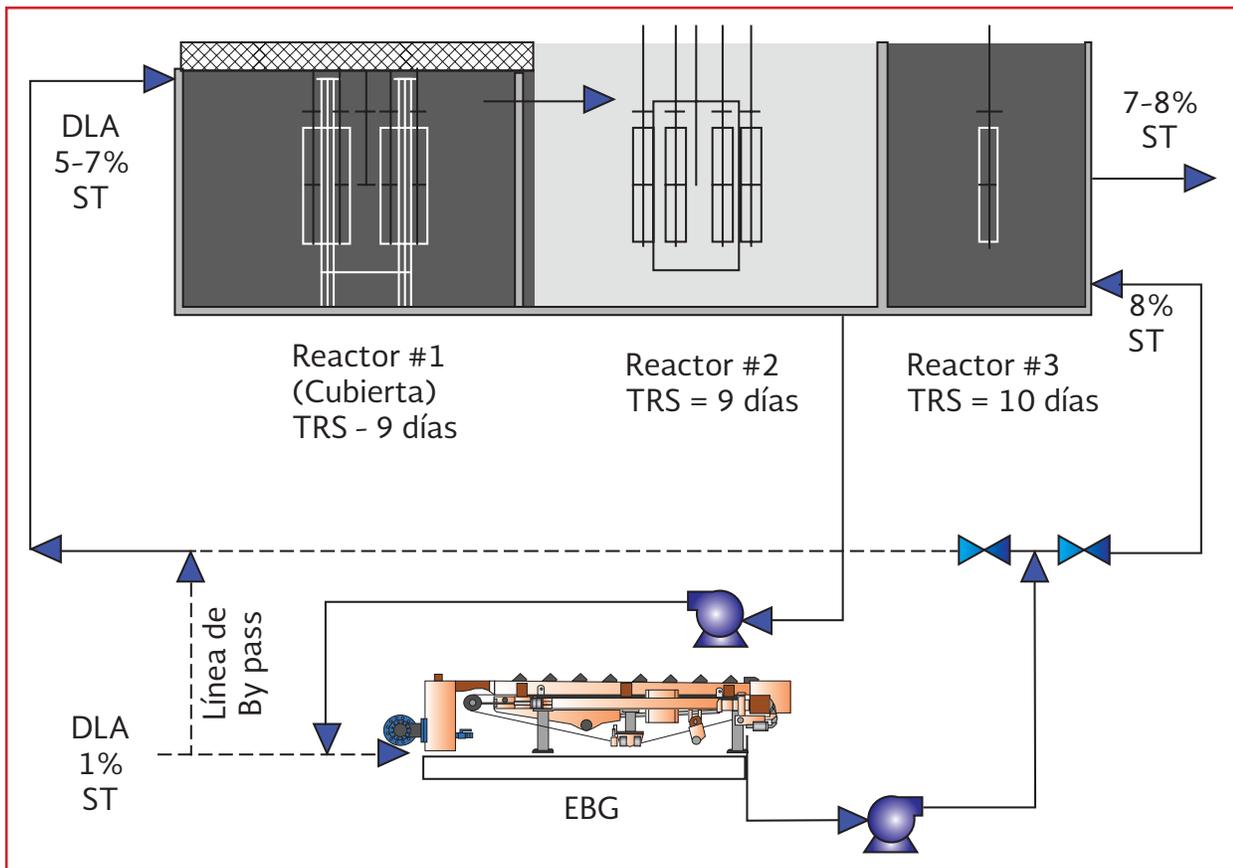


Ilustración 3.22 Esquema del sistema pre y post espesamiento. Estabilización durante 28 días a 20°C (DLA. = desecho de lodos activados, EBG= espesador de bandas de gravedad)



funcione adecuadamente se agrega más lodo o agua residual cruda (afluente a la planta de tratamiento) para obtener el volumen necesario.

El lodo se adiciona diariamente bajo un esquema regular o constante, en un período tan largo como sea posible. Así mismo, se determina periódicamente la concentración de sólidos suspendidos volátiles (SSV) y la tasa de consumo de oxígeno.

Los indicadores primarios del proceso para el control diario de la estabilización aerobia son: la temperatura, pH, oxígeno disuelto, olor y características de sedimentación. Amoníaco, nitrato, nitrito, fósforo, alcalinidad, TRS y la velocidad de consumo de oxígeno son

indicadores secundarios que son útiles en monitoreos de rendimientos a largo plazo y para la solución de problemas asociados con los indicadores primarios. Todos estos parámetros necesitan monitorearse durante el arranque para la optimización del sistema.

Al principio se retira solamente el sobrenadante y se permite una espera para que se desarrolle el proceso de estabilización. Cuando la tasa específica de consumo de oxígeno llega a los  $2 \text{ mg O}_2 (\text{g SSV})^{-1} \text{ h}^{-1}$  el lodo se extrae del reactor. El porcentaje de reducción de los SSV depende del tipo de lodo alimentado, la edad de lodo (tiempo de retención de sólidos), la temperatura y el tiempo de retención hidráulico.

El arranque de un reactor aerobio que trabaja con lodo primario toma más tiempo y requiere más oxígeno a comparación de la estabilización de un lodo activado.

El grado de estabilización depende de la concentración de sólidos en el reactor así como de la carga de sólidos que se alimentan. Como rutina se da seguimiento a los SSV en lugar de los SST. Cuando se incrementa la carga orgánica, aumenta también el tiempo de retención de sólidos y los requerimientos de oxígeno para el mantenimiento de una relación directa en el desempeño del proceso.

En los reactores completamente mezclados se utiliza la carga volumétrica y el tiempo de retención de sólidos para la estimación de la destrucción de los sólidos volátiles. El mantenimiento de una carga regular en el reactor ayuda a un mejor desempeño del proceso biológico, así como a la disminución del volumen y los requerimientos del equipo de aeración, sin embargo, también se utilizan operaciones discontinuas en la estabilización aerobia.

El sistema de alimentación continuo proporciona un sobrenadante de mala calidad a menos que la decantación se realice en un tanque separado que evite la turbulencia del tanque aerado o reactor, o que se suspenda la aeración mientras se efectúa la decantación. Los reactores de operación discontinua o batch no tienen ese problema ya que la decantación se realiza suspendiendo temporalmente la aeración permitiendo la separación del líquido en condiciones de quietud, sin turbulencia.

Los reactores aerobios sin cubierta operan a una temperatura cercana a la ambiente ya que

tienen áreas superficiales grandes y tiempos de retención largos. Si se utiliza el calor generado por el proceso y por la compresión del aire, se aísla el sistema y cubre el reactor. Las capas de espuma también reducen las pérdidas de calor.

### 3.7. CONTROL DE LA OPERACIÓN

En su mayor parte, la estabilización aerobia es un proceso autoregurable, a menos que el proceso se sobrecargue o el equipo no funcione. La vigilancia operacional de rutina incluye ensayos analíticos y chequeos periódicos de equipos eléctricos y mecánicos, como: sellos, cojinetes, temporizadores y reguladores.

Desde el punto de vista de los operadores, hay dos tipos de problemas relacionados entre sí, los cuales requieren de equipos y de procesos para solucionarlos.

Algunas veces, el mal funcionamiento del equipo causa un desequilibrio en el proceso y por las condiciones del proceso, el equipo detiene su operación normal.

El operador evalúa el desempeño del reactor aerobio de lodos siguiendo las siguientes recomendaciones:

1. Verificar la concentración de oxígeno disuelto para que no sea menor de  $0.1 \text{ mg L}^{-1}$  en cualquier punto del reactor
2. Verificar el tiempo de retención de sólidos para que sea por lo menos de 10 a 15 días para lodos activados y de 15 a 20 días para la mezcla de lodo primario y de lodos activados
3. Verificar el porcentaje de reducción de

sólidos suspendidos volátiles (SSV). Si la temperatura de operación de reactor es menor a 15 °C, la reducción de sólidos volátiles disminuye a 35 o 40 por ciento, a menos que se incremente el tiempo de retención

4. Verificar el pH, para que esté arriba de 6.0 unidades

La Tabla 3.5 proporciona una lista de parámetros primarios y secundarios que deben monitorearse. La frecuencia de los análisis es mayor durante el arranque y durante tiempos en los que se hacen cambios sustanciales a las condiciones de operación, por ejemplo en el caudal, en la fuente de lodos, en el cambio de polímeros, en el aumento o disminución en la concentración de sólidos en la alimentación y en el aumento o disminución en la temperatura de alimentación.

Si cualquiera de los parámetros especificados anteriormente se encuentra fuera del rango recomendado, se consulta la Tabla 3.6, que presenta una guía para la solución de problemas.

### 3.8. RECOLECCIÓN DE DATOS Y CONTROL

Tabla 3.5 Valores recomendados para el monitoreo parámetros primarios y secundarios (Stege & Bailey, 2003)

Parámetro monitoreado	Frecuencia	Rango de operación		
		Mínimo	Nominal	Máximo
Temperatura, °C	Diario	15	20	37
pH	Diario	6	7	7.6
Oxígeno disuelto, (mg L <sup>-1</sup> )	Diario	0.1	0.4 a 0.8	2.0
Alcalinidad, carbonato de calcio (mg L <sup>-1</sup> )	Semanal	100	>500	---
Nitrógeno amoniacal, (mg L <sup>-1</sup> )	Semanal	---	<20	40
Nitrato (mg L <sup>-1</sup> )	Semanal	---	<20	---
Nitrito (mg L <sup>-1</sup> )	Según se requiera	---	<10	---
Tasa específica de consumo de oxígeno (mg oxígeno h <sup>-1</sup> g sólido totales <sup>-1</sup> )	Según se requiera	---	<1.5	---
Fósforo (mg L <sup>-1</sup> )	Según se requiera		<5	

## ANALÍTICO DEL PROCESO

Se recomienda la realización de los siguientes parámetros de laboratorio para el conocimiento y correcta operación del proceso de estabilización:

- Sólidos suspendidos totales (SST)
- Sólidos suspendidos volátiles (SSV)
- Oxígeno disuelto
- Amoniacal
- Nitrato
- Fósforo
- pH
- Temperatura
- Caudal
- Tasa de flujo de aire
- Concentración de sólidos
- Coliformes fecales
- Alcalinidad
- Tasa específica de consumo de oxígeno

### 3.9. FALLAS EN EL PROCESO

El operador evalúa el funcionamiento del reactor aerobio, mediante los lineamientos descritos en

la Tabla 3.5, si durante la revisión, el operador encuentra que alguno de estos parámetros tiene un valor inusual.

En la tabla 3.6 se muestra una guía para identificar los problemas en un sistema de estabilización aerobia y solucionarlos.

### 3.9.1 INCREMENTO EN LA CARGA ORGÁNICA

El incremento en la carga orgánica causa problemas cuando la tasa de oxígeno requerida para la reacción de estabilización aerobia es mayor que la tasa a la cual el oxígeno se transfiere al lodo por el sistema de aeración de la planta. Generalmente el problema se resuelve con la reducción de la tasa de carga orgánica e incrementando el TRS. Esto se hace disminuyendo la masa del lodo del afluente, el volumen total adicionado y la cantidad de lodos retirados del reactor.

El nivel excesivo de sólidos en el reactor también causa una disminución en la concentración del oxígeno disuelto. Cuando el nivel de sólidos suspendidos alcanza o excede el 3.5 o 4 por ciento, se reduce la eficiencia en la transferencia de oxígeno. Esta reducción causa problemas operacionales debido a las bajas concentraciones de oxígeno disuelto, dependiendo de la capacidad del sistema de aeración.

### 3.9.2 OLORES MOLESTOS DEL LODO ESTABILIZADO

La cantidad inadecuada de oxígeno disuelto es la principal causa de olor en el proceso de estabilización aerobia. Para la corrección de los problemas de olor primero se incrementa la concentración de oxígeno disuelto

incrementando la aeración y segundo, se reduce la carga orgánica. Si estos procedimientos fallan, se adicionan químicos como permanganato de potasio o peróxido de hidrógeno, para la oxidación de los compuestos que causan olor en el reactor. Esta es considerada una solución cara y temporal para el problema. Los químicos que controlan el olor se adicionan a pequeños volúmenes de lodos en una prueba a escala laboratorio y de acuerdo al volumen del reactor se determina la cantidad de químicos necesarios.

### 3.9.3 EXCESO DE ESPUMA

La espuma se genera por factores simples como una sobrecarga orgánica o por factores complejos como el crecimiento de bacterias filamentosas, véase la ilustración 3.23. Para la reducción de la espuma se disminuye la carga orgánica, se instalan rociadores de agua los cuales causan la ruptura de la espuma, se reducen las excesivas tasas de aeración y se emplean químicos anti espumantes. Se recomienda cuidar durante el uso de rociadores de agua, pues existe el riesgo de dilución del contenido del reactor.

La remediación del crecimiento de las bacterias filamentosas es una tarea difícil que debe realizarse en los tanques de aeración. Algunos operadores adicionan oxidantes, como cloro y peróxido de hidrógeno, con y sin resultados beneficiosos. También se ha sometido al sistema con condiciones anaerobias durante varias horas. Los rociadores y los agentes antiespumantes utilizados para el control de espumas impactan y provocan un cambio en las bacterias filamentosas.

### 3.9.4 PH BAJO (ALTO CONTENIDO DE AMONIACO)

Durante el proceso de nitrificación y desnitrificación se obtiene un pH neutro. Cuando la biomasa se alimenta al sistema, se muestra un incremento en el pH como resultado de la oxidación de la biomasa y la producción de amoníaco. Este evento ocurre una vez por día, sí para el pre espesamiento se usa un espesador de bandas ocho veces por día, lo cual es considerado un ciclo de descarga en los reactores de flujo discontinuo secuencial (SBR) y en los bioreactores de membrana (MBR); o 24 veces por día, si se usa un espesador por gravedad en una operación batch. Para la nitrificación se requieren nitrificadores y una adecuada alcalinidad. El pH puede incrementarse de un pH inicial de 7 a 7.5 y después se disminuye a 7 otra vez. Cuando se proporciona oxígeno al sistema para la oxidación del amoníaco producido, el

subproducto es hidrógeno, que indica una caída en el pH abajo de 7 o un ambiente ácido. Si la desnitrificación o la adición de químicos no se incorpora al proceso para el balanceo de la pérdida de alcalinidad, entonces continua la caída en el pH. Si por otro lado, un ciclo anóxico es incorporado dentro del reactor, es posible la recuperación de la pérdida de alcalinidad y el incremento del pH sin la adición de químicos.

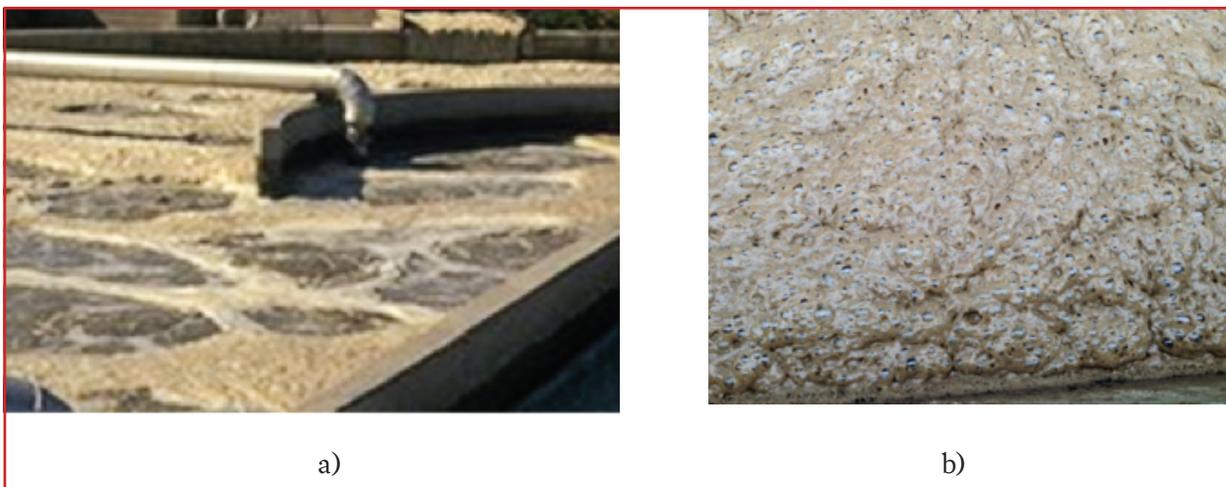
### 3.9.5 BAJO OXÍGENO DISUELTO

Una concentración de oxígeno disuelto aceptable es de 0.1 a 2 mg L<sup>-1</sup>, con un valor ideal de 0.5, arriba de 0.1 se considera oxígeno disuelto positivo; sin embargo, los equipos de oxígeno disuelto frecuentemente no son medios exactos ni confiables para controlar la concentración

Tabla 3.6 Guía para la solución de problemas en los reactores aerobios de lodos (EPA, 1978)

Indicador/observación	Causa probable	Verificación	Solución
Espuma en exceso	Sobrecarga orgánica	Carga orgánica	Reducir la velocidad de alimentación Incrementar los sólidos en reactor con decantación y recirculación de lodos
	Aeración deficiente	Oxígeno disuelto	Reducir la velocidad de alimentación
Baja concentración de oxígeno disuelto	Taponamiento	Decantar el reactor, retirar el lodo e inspeccionar los difusores	Limpia difusores o reemplazarlos por otro tipo
	Nivel del líquido inadecuado Mal funcionamiento de los sopladores	Revisar las especificaciones del equipo Velocidad del aire, presión en la tubería, revisar válvulas	Establecer el nivel adecuado del líquido Reparar fugas en tuberías, poner las válvulas en la posición correcta, reparar los sopladores
El lodo tiene mal olor	Sobrecarga orgánica Tiempo de retención de sólidos (TRS) inadecuado Aeración inadecuada	Verificar la carga orgánica, el TRS El oxígeno disuelto debe ser mayor a 1 mg L <sup>-1</sup> .	Reducir la velocidad de alimentación Incrementar la aeración o reducir la velocidad de alimentación
	Se produce la nitrificación y la alcalinidad del agua residual es baja En reactores con cubierta, el CO <sub>2</sub> se acumula y puede disolverse en el lodo	pH del sobrenadante	Adicionar bicarbonato de sodio al lodo que entra al reactor, o adicionar cal o hidróxido de sodio directamente al reactor. Aspirar o capturar CO <sub>2</sub>
Formación de hielo sobre el equipo mecánico	Se alcanzó la temperatura de congelación	Verifique la superficie del reactor para búsqueda de bloques de hielo	Romper o remover hielo antes de que cause daños

Ilustración 3.23 a) Formación de espuma en un reactor aerobio de lodos; b) espuma



de oxígeno disuelto, por lo tanto se sugiere una lectura mínima de 0.3. La lectura de la concentración de oxígeno disuelto se evalúa junto con la concentración de amoníaco.

Una disminución en los niveles de oxígeno disuelto puede presentarse por taponamientos en los difusores, mal funcionamiento de los sopladores o sobrecargas orgánicas. En este caso deben revisarse las especificaciones de los equipos, los caudales, las presiones en las tuberías, las válvulas y la carga orgánica. La limpieza de los difusores, reparación de los equipos si es necesario y si la causa es la carga orgánica, reducción de la alimentación del reactor o de la concentración de sólidos en el reactor, demanda de oxígeno y el incremento del oxígeno disuelto residual.

### 3.10. FALLAS EN LOS EQUIPOS

#### 3.10.1 OBSTRUCCIÓN DE LOS DIFUSORES DE AIRE

Una acumulación de trapos o arena en los difusores causa obstrucciones cuando el sistema de aeración se apaga para la concentración del

lodo estabilizado, antes de la decantación del sobrenadante, del retiro de los lodos o después de la desnitrificación. Si el aire está apagado durante un periodo de tiempo largo (algunas veces 6 a 12 h d<sup>-1</sup>) los trapos y la arena pueden quedarse en el interior del sistema de difusión. Cuando la aeración se reanuda, las partículas que obstruyen el difusor y eventualmente reducen el aire de descarga, causan un incremento en la presión de descarga del soplador. Como se menciona en la sección de diseño y selección del equipo, los difusores de burbujas finas no son recomendados para la estabilización debido a que estos son susceptibles a problemas de obstrucción.

Un mantenimiento efectivo previene obstrucciones. Cuando la eliminación de obstrucciones en el difusor es difícil, se recomienda la modificación del equipo, ya que esto puede reducir las. Otra alternativa es el uso de difusores con orificios en la parte superior, cada uno con tubos de goteo individuales. La probabilidad de que se generen obstrucciones se reduce, porque los orificios quedan localizados fuera del líquido. Por otro lado durante la desnitrificación o estado anóxico, el aire está apagado y los sólidos pueden acumularse en las

tuberías.

Para sistemas en los cuales se usa un pre espesamiento mecánico, los requerimientos de aire para el mezclado en el primer reactor (sistema de estabilización en serie) son críticos para el diseño y deben optimizarse. El mantenimiento de los sólidos suspendidos es importante, por lo que en esta aplicación se recomiendan tubos de cizalla o tubos de aspiración.

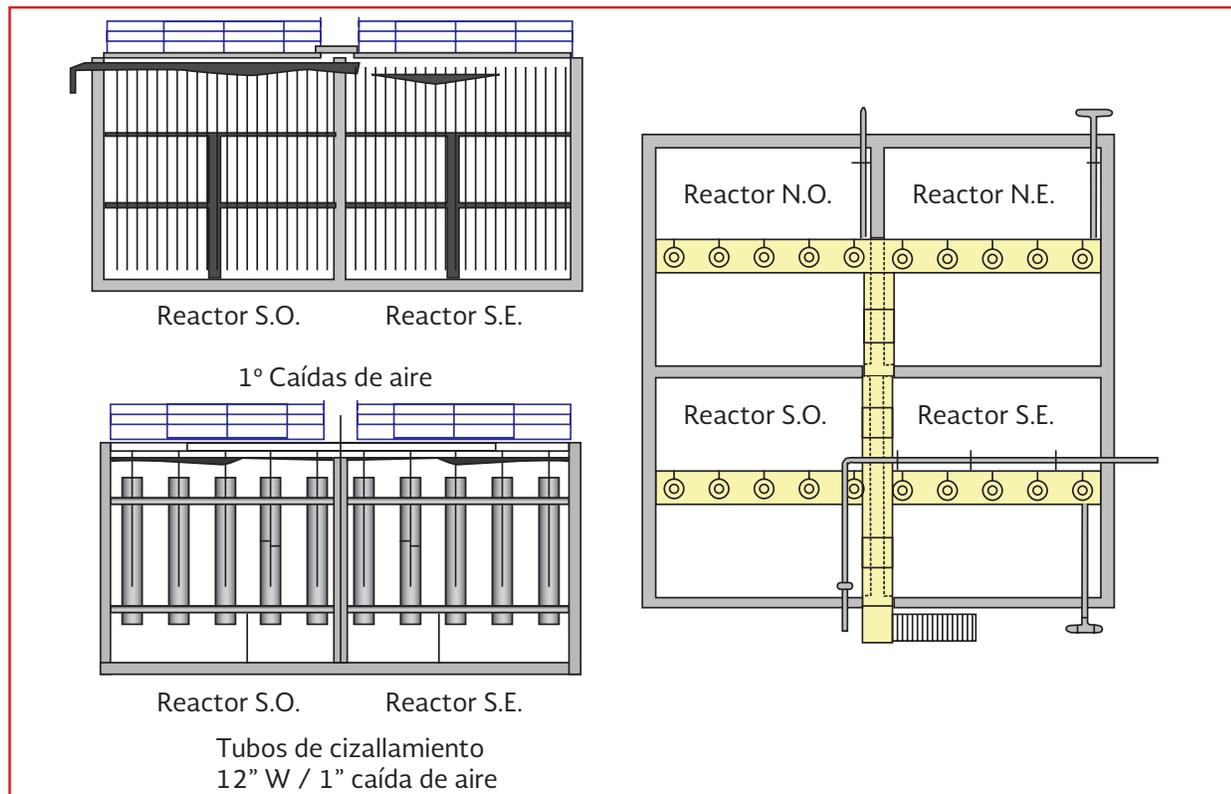
La ilustración 3.24, muestra un sistema de este tipo. Este proyecto incorpora pre espesamiento al 8 por ciento, con un espesador de bandas por gravedad, tiene cuatro reactores en serie y se encuentran cubiertos y aislados debido a la gran altitud y mínima temperatura de invierno. Un sistema de aeración tipo dual fue proporcionado en este proyecto, como se muestra en la

ilustración, para la operación a un alto y bajo nivel de agua (Daigger, Graef, & Eike, 1997).

### 3.10.2 SOPLADORES Y VÁLVULAS

Un sistema de aeración ineficiente o una carga orgánica excesiva en el reactor causa una baja concentración de oxígeno disuelto. Los deterioros en los sopladores, en los aeradores mecánicos o en los difusores de aeración resultan en pérdidas en la eficiencia de aeración. Es importante la revisión y monitoreo rutinario de la tasa de suministro de aire y las presiones en la tubería para la evasión de posibles problemas; registrando la posición de todas las válvulas de aire; revisando obstrucciones, fugas y presiones excesivas y checando ocasionalmente la potencia suministrada en el eje del aerador mecánico para la determinación de su condición.

Ilustración 3.24 Operación de un reactor con alta concentración de sólidos. PTAR los Lunas, Nuevo México, en cuatro etapas, sistema de pre-espesamiento, reactores cerrados y con aislamiento (Daigger, Graef, & Eike, 1997)



### 3.10.3 AERADORES MECÁNICOS

La eficiencia de los aeradores mecánicos disminuye si el nivel del líquido excede las especificaciones y disminuyen los límites de operación. Consulte los datos de ingeniería del fabricante y los manuales de operación y mantenimiento para los niveles límites de líquido.

### 3.10.4 CONGELACIÓN

Un tiempo prolongado a temperaturas bajo cero llevan a la formación de hielo en la superficie del líquido y en los equipos (aeradores mecánicos). Para la prevención de un mal funcionamiento y una posible ruptura durante el invierno, se examinan los reactores de posibles formaciones de hielo. Si existen, se corta el hielo y se remueve antes de que se dañen los accesorios por la acción del viento. Se utilice aire caliente para el descongelamiento de los aeradores mecánicos que presentan problemas por la formación de hielo en climas extremadamente fríos, en algunos casos es necesaria la construcción de cubiertas temporales que eviten el congelamiento.

### 3.10.5 SEDIMENTACIÓN DE LOS LODOS

La sedimentación ocurre cuando materiales arenosos entran al reactor y cuando los dispositivos de aeración y mezclado no crean suficiente turbulencia para la resuspensión de los lodos. La sedimentación de los lodos se previene mediante una mejora en la operación de los desarenadores o usando equipos de aeración y mezclado con mayor potencia.

## 3.11. MANTENIMIENTO

Los componentes del sistema de estabilización

aerobia de lodos que requieren atención regular incluyen:

- Sistema de suministro de aire u oxígeno
- Equipo de mezclado y bombeo
- Equipo de instrumentación y control

### 3.11.1 SISTEMA DE SUMINISTRO DE AIRE U OXÍGENO

El principal requerimiento de los sistemas de aeración o suministro de oxígeno es la inspección y servicios de los equipos de difusión de aire. Se programa la inspección del mecanismo de difusión por lo menos una vez al año.

El verano es la mejor época para la realización del mantenimiento en caso de que el reactor deba drenarse, ya que en esta época es más fácil el restablecimiento de la operación.

El reactor se prepara para el mantenimiento o inspección incrementando el tiempo de retención de sólidos en el reactor y disminuyendo la concentración de sólidos en la mezcla líquida del tanque de lodos activados para el almacenamiento de los lodos en este tanque, durante la inspección del reactor o digestor de lodos. Durante la inspección también se descarga el lodo estabilizado a los lechos de secado o a los equipos de deshidratación.

Se programa el mantenimiento teniendo listo el material y la mano de obra para que el reactor inicie su operación en 2 o 3 días.

Se reestablece la operación adicionando lodo de otro reactor o realizando el procedimiento de arranque anteriormente descrito.

### 3.11.2 EQUIPO DE BOMBEO Y MEZCLADO

Anualmente se debe dar mantenimiento a los equipos de mezclado y bombeo para revisión o cambio de cuchillas desgastadas o impulsores. Se reemplazan las partes defectuosas y se registran las piezas o componentes críticos para considerarlas en el inventario.

Así mismo, se brinda servicio del cambio de sellos, empaques y puntos de lubricación con la frecuencia que recomienda el fabricante.

### **Instrumentación y control**

Utilice un servicio especializado para el mantenimiento a los equipos de instrumentación y control.

Se imparten cursos de capacitación que ofrezcan los proveedores o fabricantes del equipo. En caso contrario es mejor la contratación del servicio de mantenimiento.

### **Programación**

Asignar tareas específicas de mantenimiento al personal de la planta de acuerdo a su capacitación, entrenamiento y experiencia. Un programa general de formación a los operadores de la planta, es la mejor inversión para el mantenimiento de la planta en óptimas condiciones.

### **3.11.3 REGISTROS**

Es muy importante mantener una operación adecuada y un registro del mantenimiento. El propósito del registro de los datos es el seguimiento a la información de operación, la cual permite la identificación y reproducción de las condiciones óptimas de funcionamiento. Los registros incluyen el volumen de los

lodos de alimentación, el porcentaje de sólidos alimentados, el volumen de los sólidos estabilizados y el porcentaje de sólidos en los lodos removidos. Si el lodo se transporta a algún lado, se deben registrar los costos mensuales de transporte.

Información adicional incluye datos de oxígeno disuelto, pH, amoníaco, nitrato y/o fósforo, tasa específica de consumo de oxígeno y/o reducción de SSV, reducción de patógenos, alcalinidad y salmonella.

Se debe contar con reportes mensuales en los puntos donde la capacidad del sistema de aeración está restringido en el suministro de los niveles deseables del oxígeno disuelto en el reactor, los datos del nivel de oxígeno disuelto se registran en un gráfico de tendencia.

Si se adicionan químicos al reactor para el control del pH o del olor, se registra el tipo y la cantidad de químicos adicionados.

Si se usan aeradores mecánicos, se registra el corte de energía y en el caso de sistemas de difusión de aire se registra el flujo de aire. Si no se tienen medidores de flujo, puede ser útil el registro del consumo de energía. Las pruebas frecuentes en los sistemas de aeración contribuyen a un ahorro de energía.

Si el operador ha elegido un proceso de estabilización de dos etapas, para el cumplimiento de las especificaciones requeridas por la autoridad de reducción significativa de patógenos (PSRP), el operador de la planta debe demostrar experimentalmente que los niveles de microorganismos patógenos se reducen satisfactoriamente en el lodo estabilizado. Un registro de patógenos se

presenta como prueba del cumplimiento. El proceso se opera monitoreando las condiciones de clima y temperatura.

Se debe contar con un sistema de registro simplificado, como el uso de formularios impresos, captura de datos a la computadora, o un sistema de código de colores. Se diseña el sistema como un método permanente para la vinculación de la rutina y el mantenimiento no programado con los procedimientos de inspección, reemplazo de equipos y la rendición de cuentas. Los registros se mantienen en un lugar donde estén disponibles para todo el personal de la PTAR.

### 3.12. SEGURIDAD E HIGIENE

La seguridad e higiene que debe guardarse en este sistema es similar al de un proceso de tratamiento de lodos activados, por lo tanto se consulta esta información en el MAPAS, en el capítulo 6 del libro “Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Lodos activados”.

### 3.13. COSAS PARA RECORDAR

- El proceso de estabilización aerobia convencional es muy usado para la estabilización de los lodos residuales de PTARs municipales e industriales, este se emplea para la estabilización de los LDA o purga de lodos activados, o para la mezcla de lodo primario y lodo secundario, utilizando reactores abiertos o cerrados
- Los microorganismos aerobios y los facultativos usan oxígeno y obtienen energía de la materia orgánica

biodegradable disponible en los lodos del agua residual durante la estabilización aerobia

- Este proceso incluye ventajas como: (1) un diseño y un proceso de operación simple, (2) costos moderados de construcción y (3) la capacidad de almacenamiento de sólidos. Dentro de las desventajas: (1) altos costos de energía, (2) reducción en la actividad biológica durante climas fríos, (3) agotamiento de la alcalinidad y (4) una reducción deficiente de patógenos
- La estabilización aerobia mesofílica convencional es la más usada en el proceso de estabilización aerobia. Sin embargo existe un número de variaciones en el proceso de estabilización aerobia: (1) mesofílica convencional, (2) oxígeno de alta pureza, (3) termofílica y (4) estabilización aerobia criofílica
- Los equipos usados en la estabilización aerobia para el suministro de aire y mezclado incluyen difusores, aeradores mecánicos superficiales, aeradores mecánicos sumergibles y sopladores
- Un reactor aerobio permite una operación de distintas formas: continua, semi continua, auto calentamiento y en fases aerobia y anóxica
- El desempeño del proceso de estabilización aerobia se determina midiendo la temperatura, el pH, la destrucción de sólidos volátiles, la tasa específica de consumo de oxígeno, la calidad del sobrenadante, las características del lodo desaguado, la reducción de nitrógeno amoniacal, la remoción de nitrógeno en los biosólidos, la reducción de fósforo en los biosólidos y biofósforo, la reducción de microorganismos patógenos, las

características estéticas del lodo estabilizado, el producto del tiempo de retención de los sólidos por la temperatura (día °C) y la flexibilidad del sistema

- Para el arranque del reactor aerobio de manera adecuada se cuida primero que la alimentación sea la adecuada en cantidad y de manera constante, el sistema de aeración cuenta con la capacidad de suministro continuo de una concentración de oxígeno disuelto mayor de  $0.5 \text{ mg L}^{-1}$ . El lodo se extrae del reactor cuando la tasa específica de consumo de oxígeno llega a los  $2 \text{ mg O}_2 (\text{g SSV})^{-1} \text{ h}^{-1}$ . El porcentaje de reducción de los SSV depende del tipo de lodo alimentado, la edad de lodo, la temperatura y el tiempo de retención hidráulico
- El desempeño del reactor se evalúa con la verificación de la concentración de oxígeno disuelto (no menor de  $0.1 \text{ mg L}^{-1}$  en cualquier punto del reactor); con la verificación del tiempo de retención de sólidos (de 10 a 15 días para lodos activados y de 15 a 20 días para la mezcla

de lodo primario y de lodos activados); revisión del porcentaje de reducción de sólidos suspendidos volátiles (RSV), (si la temperatura de operación de reactor es menor a  $15 \text{ °C}$ , la reducción de sólidos volátiles disminuye en un 35 - 40 por ciento, a menos que se incremente el tiempo de retención) y mediante la verificación del pH (el cual debe estar arriba de 6.0 unidades)

- Las fallas en el proceso de estabilización aerobia son debidas al: incremento en la carga orgánica, exceso de espuma, pH bajo y/o a una baja concentración de oxígeno
- Las fallas en los equipos usados en la estabilización aerobia son debidos a la obstrucción en los difusores de aire; daños en los sopladores, válvulas, aeradores mecánicos; a la congelación o a la sedimentación de los lodos
- Es muy importante el mantenimiento adecuado y periódico a los sistemas de suministro de agua, aire u oxígeno, equipo de mezclado y bombeo y al equipo de instrumentación y control

# 4

## OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE REACTORES ANAEROBIOS DE LODOS RESIDUALES

### 4.1. OBJETIVOS

Los objetivos de este capítulo son:

- Saber en qué consiste la estabilización anaerobia de lodos
- Conocer los equipos e instalaciones que integran el proceso
- Identificar los pasos a seguir en la operación del proceso
- Conocer los subproductos generados, particularmente el biogás, el cual es utilizado como una fuente importante de energía
- Conocer los componentes de una planta de biogás, los procesos de purificación y los dispositivos y reglamentos de seguridad para su manejo

### 4.2. INTRODUCCIÓN

La estabilización anaerobia es un proceso bioquímico multietapas que estabiliza diferentes tipos de materiales orgánicos. La estabilización de los lodos ocurre en tres etapas básicas de acuerdo a (Zehnder, 1978).

**Primera etapa:** Las enzimas extracelulares rompen complejos orgánicos sólidos. Los materiales orgánicos complejos que se alimentan

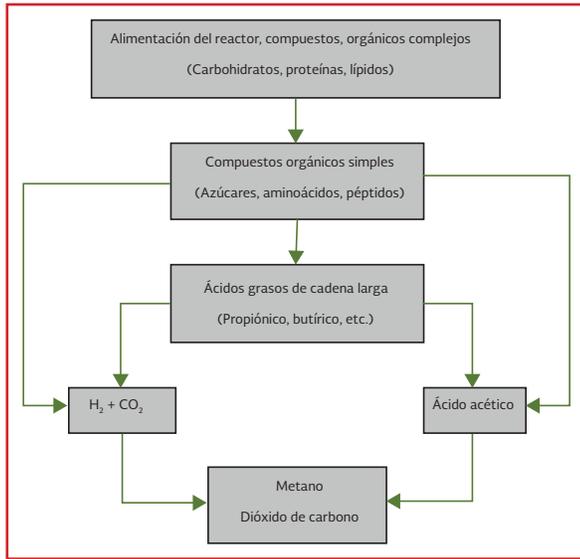
al reactor incluyen los lodos primarios, los lodos secundarios o purga de lodos del proceso de lodos activados y material coloidal.

**Segunda etapa:** Los microorganismos (bacterias acetogénicas o formadoras de ácido) convierten los productos de la primera etapa en ácido acético, ácido propiónico, hidrógeno, dióxido de carbono y otros ácidos orgánicos de bajo peso molecular.

**Tercera etapa:** Trabajan dos grupos de bacterias formadoras de metano. Un grupo convierte hidrógeno y dióxido de carbono a metano y el otro convierte acetato a metano y bicarbonato (dióxido de carbono en solución). Puesto que ambos grupos de bacterias son anaerobias, se requiere que los reactores estén cerrados para impedir la entrada del oxígeno. En la ilustración 4.1 se resumen los tres pasos del proceso.

En muchos casos las bacterias formadoras de metano controlan el proceso. Las formadoras de metano son muy sensibles a factores ambientales (altas concentraciones de amoníaco, bajas concentraciones de fósforo, pH bajo, temperatura y la presencia de sustancias tóxicas) y se reproducen muy lentamente. Las formadoras de metano en consecuencia crecen lentamente y mueren fácilmente. Sin embargo,

Ilustración 4.1 Proceso bioquímico en la estabilización anaerobia (WEF, 1998)



el diseño del proceso y la operación de la estabilización anaerobia convencional, están adaptados para satisfacer las necesidades de las bacterias formadoras de metano.

### 4.3. TIPOS DE ESTABILIZACIÓN ANAEROBIA

#### 4.3.1 ESTABILIZACIÓN MESOFÍLICA CONVENCIONAL

La mayoría de los sistemas de estabilización anaerobia actualmente en uso están configurados como reactores mesofílicos convencionales. En estos sistemas, todas las etapas del proceso bioquímico ocurren en el mismo reactor y son operadas a temperaturas mesofílicas es decir de 32 a 38 °C (90 a 100 °F). Los sistemas convencionales se clasifican en procesos de baja tasa (sin mezclado) o procesos de alta tasa, los cuales incluyen mezclado y calentamiento. El calentamiento y el mezclado empleado en los procesos de alta tasa producen condiciones uniformes en todo el tanque, lo cual resulta en

tiempos de retención cortos y condiciones más estables que en los procesos de baja tasa. En consecuencia muchos sistemas de estabilización de aguas residuales municipales usan el proceso de alta tasa.

La estabilización anaerobia estabiliza los sólidos suspendidos volátiles (SSV), típicamente 40 a 60 por ciento. La reducción o destrucción de los sólidos volátiles (Vd) puede ser calculada con la ecuación 4.1 con base a la masa de los sólidos volátiles en la alimentación y en la descarga del reactor.

$$Vd, (\%) = \left( \frac{SV_0 - SV_{L.E.}}{SV_0} \right) \times 100$$

Ecuación 4.1

Dónde:

Vd, (%) = Porcentaje de reducción o destrucción de sólidos volátiles

SV<sub>0</sub> = Concentración de sólidos volátiles en los lodos de entrada o alimentación

SV<sub>L.E.</sub> = Concentración de sólidos volátiles en los lodo estabilizados

Para el cálculo de Vd, se presentan y discuten varios métodos en la publicación "Control de Patógenos y Atracción de Vectores en Lodos de Aguas Residuales", de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (U.S. EPA). Esta incluye el método de balance de masa aproximado (BMA) y la ecuación de Van Kleeck. El método BMA asume que el flujo diario del reactor es de composición uniforme y estable. La ecuación 4.2 permite calcular este porcentaje:

$$Vd, (\%) = \frac{[(Q_0 \times SV_0) - (Q_{L.E.} \times SV_{L.E.})]}{Q_0 \times SV_0} \times 100$$

Ecuación 4.2

Donde:

Vd, (%) = Porcentaje de reducción o destrucción de sólidos volátiles

$Q_0$  = Flujo volumétrico de entrada o alimentación

$Q_{L.E.}$  = Flujo volumétrico de los lodos estabilizados

$SV_0$  = Concentración de sólidos volátiles en los lodos de entrada o alimentación

$SV_{L.E.}$  = Concentración de sólidos volátiles en los lodos estabilizados

El método de Van Kleeck se usa cuando el reactor no tiene una acumulación significativa de arena. Con la excepción del Vd calculado, todos los valores en la ecuación 4.3, representan fracciones de los sólidos volátiles.

$$Vd, (\%) = \left[ \frac{SV_0 - SV_{L.E.}}{SV_0 - (SV_0 \times SV_{L.E.})} \right] \times 100$$

Ecuación 4.3

Donde:

Vd, (%) = Porcentaje de reducción o destrucción de sólidos volátiles

$SV_0$  = Concentración de sólidos volátiles en los lodos de entrada o alimentación

$SV_{L.E.}$  = Concentración de sólidos volátiles en los lodo estabilizados

Los reactores son de tamaño adecuado para que proporcione un tiempo de retención suficiente que permita la estabilización. Los reactores de alta tasa tienen tamaños para un tiempo de retención de sólidos (TRS) promedio de 15 a 20 días. Tiempos de retención cortos (alrededor de 12 días) se usan frecuentemente en diseños europeos. El tiempo de retención hidráulica (TRH) se calcula con base al volumen del reactor y el volumen de lodos estabilizados removidos diariamente. Para sistemas que no usan decantación, el tiempo de retención de sólidos y el tiempo de retención hidráulica es el mismo.

#### 4.3.2 ESTABILIZACIÓN AVANZADA

El proceso de estabilización avanzada requiere de modificaciones en la configuración del reactor convencional para el logro de una estabilización más completa. Este proceso promueve la reducción de patógenos y mejora la operación del reactor. Casi todos los procesos de estabilización avanzada tienen reportado una mejor reducción de sólidos volátiles (Vd), comparado con la estabilización mesofílica convencional (Schafer, Farrell, Newman, & Vandenberg, 2002), lo cual incrementa el contenido de nutrientes solubles (amoníaco y fósforo) en la corriente de recirculación del deshidratador de lodos y así se incrementa la carga de nutrientes en los sistemas de tratamiento de aguas residuales.

#### 4.3.3 ESTABILIZACIÓN ÁCIDO/GAS

La estabilización ácido/gas, o estabilización en dos fases, se realiza en un sistema de dos reactores donde se proporcionan condiciones ambientales separadas a las bacterias formadoras de ácido y las bacterias formadoras de metano, así cada una optimiza el proceso especificado.

En la primera fase los sustratos alimentados son hidrolizados para producir ácidos grasos volátiles (AGV), los cuales son convertidos a metano y a dióxido de carbono en la segunda fase. La fase ácida requiere de un TRS de 1.5 a 2 días y la fase metanogénica requiere un mínimo de 10 a 15 días. El sistema ácido/gas se usa para el procesamiento de sólidos que son complejos para su estabilización incluyendo toda la purga de lodos activados (DLA) o en su mayoría sólidos alimentados del proceso de lodos activados con una formación significativa de espuma.

#### 4.3.4 ESTABILIZACIÓN TERMOFÍLICA

El proceso de estabilización termofílica incluye una o más etapas que son operadas a temperaturas termofílicas es decir de 55 °C (131 °F) o mayores. El objetivo principal del tratamiento termofílico es lograr una mayor destrucción de patógenos, sin embargo esto también puede incrementar la destrucción de sólidos volátiles y disminuir los tiempos de retención requeridos. La estabilización termofílica afecta el olor característico de los lodos estabilizados, de este modo incrementa el potencial del olor durante la descarga y el manejo de la torta. La estabilización termofílica requiere significativamente más energía que la necesaria para la estabilización mesofílica, por lo tanto la recuperación de calor es un paso importante en la estabilización termofílica. Con la ayuda de intercambiadores de calor, el calor descargado de los reactores termofílicos puede usarse para precalentar la alimentación del reactor.

#### 4.3.5 ESTABILIZACIÓN MULTIETAPAS

La estabilización multietapas incluye varias combinaciones de tratamientos mesofílicos y

termofílicos. La estabilización anaerobia con etapas de temperatura consiste de al menos una etapa termofílica seguida de una etapa mesofílica. El objetivo de la estabilización anaerobia con fases de temperatura es el aprovechamiento de las ventajas del tratamiento termofílico (incrementando la destrucción de patógenos y la Vd), donde se incluye una etapa mesofílica para la mitigación del olor y la mejora de la capacidad de deshidratación del lodo.

Algunos procesos de estabilización multietapas también incluyen tratamiento ácido/gas, usando la etapa termofílica con cualquiera de las dos fases, ácida o gaseosa.

#### 4.3.6 ESTABILIZACIÓN DE ALTAS CONCENTRACIONES DE SÓLIDOS

La estabilización anaerobia se utiliza para lodos alimentados con una concentración total de sólidos de 3 a 5 por ciento. Sin embargo, también se utiliza para concentraciones mayores de 7 a 8 por ciento de sólidos totales, como en algunas instalaciones europeas. Los reactores en estas instalaciones están generalmente equipados con mezcladores mecánicos montados en el techo o sistemas de bombeo con boquillas internas para el mezclado. La estabilización de un lodo con alto contenido de sólidos producen espuma, sin embargo sistemas anti espuma son usualmente incluidos.

El proceso de estabilización de altas concentraciones de sólidos reduce el volumen del reactor o incrementa la capacidad de un reactor existente. El incremento en la concentración de sólidos en el lodo alimentado a 6 o 7 por ciento ST, incrementa la viscosidad y cambia las características de mezclado. El

equipo de bombeo y los sistemas de mezclado diseñados para el manejo de la estabilización con concentraciones de alimentación de 3 a 5 por ciento de sólidos totales no manejan el proceso a mayores concentraciones de sólidos en el lodo alimentado. Consecuentemente todos los componentes del sistema de estabilización anaerobia, se diseñan para el manejo de procesos de alta concentración de sólidos. El proceso también incrementa la carga de sólidos volátiles en el reactor.

#### 4.4. PROCESOS DE PRETRATAMIENTO PARA LA ESTABILIZACIÓN

El pretratamiento es un proceso adicional al proceso convencional de estabilización anaerobia para la mejora del rendimiento del proceso, la reducción de sólidos volátiles, la destrucción de patógenos y la reducción de la formación de espuma. El tratamiento incluye la aplicación de energía en forma de ultrasonido, calor, presión o una combinación de estas.

##### 4.4.1 TRATAMIENTO DE ULTRASONIDO

El tratamiento de ultrasonido es usado para acondicionar los desechos de lodos activados (DLA) antes de la estabilización, lo cual mejora la estabilización, la  $V_d$  y disminuye la formación de espuma en el reactor. El ultrasonido es aplicado a los DLA por una serie de sondas instaladas en un tanque donde pasa el flujo de lodos. Las ondas de ultrasonido causan cavitación, generando microburbujas que se colapsan y liberan energía. La liberación de energía destruye la estructura de la célula de los microorganismos en los desechos de lodos

activados. El ultrasonido se emplea para tratar el flujo entero de DLA o únicamente una porción de estos.

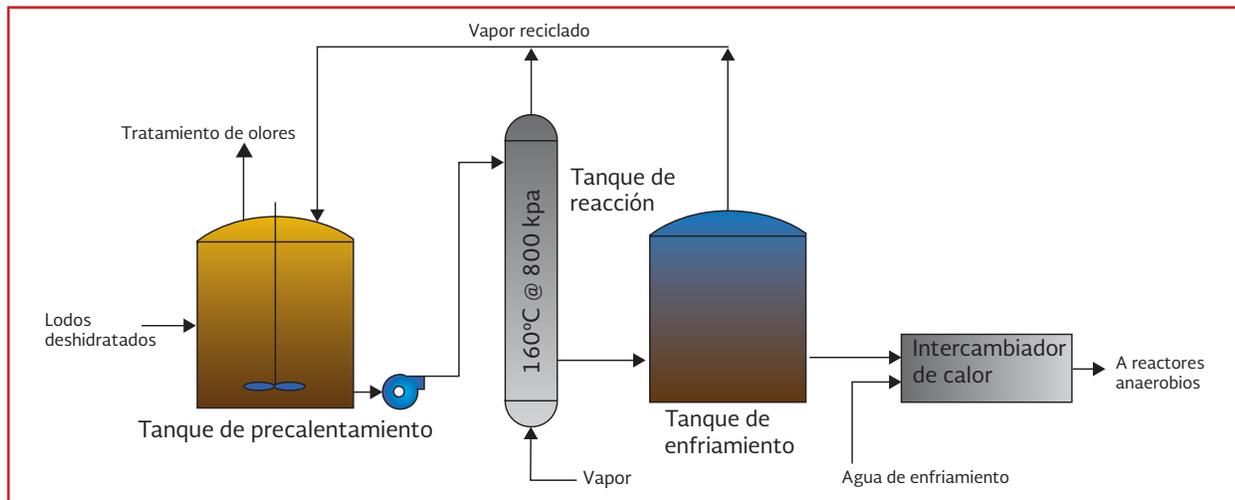
##### 4.4.2 HIDRÓLISIS TÉRMICA

La hidrólisis térmica se emplea para el incremento de la muerte de patógenos y para el acondicionamiento de los sólidos para una mejor estabilización, mediante calentamiento de los sólidos crudos bajo presión por un periodo corto. Los pretratamientos térmicos mejoran la capacidad de deshidratación de los lodos estabilizados liberando el agua ligada en las células bacterianas. Los procesos de hidrólisis térmica son mecánicamente complejos y producen desprendimiento de gases que son una fuente significativa de olores. Se diseñan a temperaturas de 150 a 220 °C (302 a 428 °F) y presiones de aproximadamente 1380 kPa (200 psi). El tiempo de reacción varía de 20 a 30 minutos.

El proceso de hidrólisis térmica incluye el precalentamiento de lodos a través de un intercambiador de calor antes de que estos entren al tanque de reacción. Se adiciona vapor al tanque de reacción para el mantenimiento de la temperatura y el incremento de la presión. Al término de la reacción por lotes, los sólidos son despresurizados y bombeados a través del intercambiador de calor para la disminución de su temperatura antes de la estabilización mesofílica. Se presenta en la ilustración 4.2 un proceso esquemático de un tipo de hidrólisis térmica, el sistema Cambi (Web, 2008).

La oxidación del aire húmedo es un tipo de hidrólisis térmica en el cual el oxígeno (en forma de aire u oxígeno puro) se adiciona a los sólidos antes del calentamiento y de la reacción.

Ilustración 4.2 Proceso de hidrólisis térmica (Water Environment Federation, 2008)



### 4.4.3 PASTEURIZACIÓN

La pasteurización consiste en el calentamiento de los lodos a temperaturas de 70 °C (158 °F) o mayores (al menos 30 minutos con un modo de operación por lotes o continuo con flujo pistón) para la destrucción de los organismos patógenos. Esto no necesariamente afecta la estabilización del lodo. Varios intercambiadores de calor se utilizan para el precalentamiento de los lodos entrantes y capturan el calor del lodo tratado. La concentración de sólidos del lodo alimentado afecta la capacidad del intercambiador de calor para alcanzar la temperatura esperada. Un gran número de sistemas de pasteurización patentados están disponibles, incluyendo Alpha-Bioterm, BioPasteur, Roediger<sup>R</sup>, y Eco-Therm<sup>R</sup>.

### 4.4.4 HOMOGENEIZACIÓN

La homogeneización se usa para el acondicionamiento de los desechos del proceso de lodos activados antes de la estabilización. Este es un proceso multietapas que rompe la pared celular de las bacterias, lo que promueve la Vd durante la estabilización anaerobia. Parecido al proceso ofrecido por Micro Sludge<sup>R</sup>, el cual incluye el uso de una solución cáustica

para debilitar a la pared celular y disminuir la viscosidad y el espesor de los DLA. Los DLA tratados pasan a través de una criba para la remoción de los desechos grandes e ingresan al homogeneizador a presiones altas. Este proceso está sujeto a caídas repentinas en la presión que causan el rompimiento de las células.

## 4.5. EQUIPOS E INSTALACIONES PARA LA ESTABILIZACIÓN ANAEROBIA

Las instalaciones para la estabilización anaerobia son construidas usando una variedad de configuraciones de tanques y tipos de equipos.

### 4.5.1 CONFIGURACIÓN DEL TANQUE

**Reactor cilíndrico.** El reactor más común es el tanque cilíndrico, también conocido como reactor “pancake”. Los tanques cilíndricos tienen fondos en forma de cono, con pendientes de 1:4 a 1:6 para facilitar la colección y remoción de lodos pesados y arena. Generalmente se construyen de concreto y pueden ser equipados con cubiertas para el almacenamiento del gas

del reactor. En Europa, los reactores cilíndricos son casi siempre construidos con relaciones 1:1. En la ilustración 4.3 se observan los reactores anaerobios que se usan con mayor frecuencia.

**Reactores en forma de huevo.** Estos reactores tienen fondos con pendientes más pronunciadas que los tanques cilíndricos (pendientes que son por lo menos 1:1). Se construyen de concreto o acero y existen varios modelos disponibles. Véase ilustración 4.4. Las características comunes de estos es que tienen un fondo cónico y la parte superior en forma de cúpula. Las ventajas de los reactores en forma de huevo incluyen una reducción en la acumulación de arena debido a sus pendientes pronunciadas en el fondo, una geometría que permite un mezclado más eficiente y así se reduce el uso de energía y disminuye la acumulación de espuma debido a la pequeña área superficial del líquido en la parte superior del reactor. Las desventajas de los reactores en forma de huevo incluyen menor

capacidad de almacenamiento del gas dentro del tanque y por su forma, es difícil aislarlo. Además, su perfil relativamente alto causa preocupaciones estéticas en algunas localidades. El reactor en forma de huevo se usa mucho en Europa y gana popularidad en Estados Unidos. Los costos de construcción de los reactores en forma de huevo pueden ser significativamente mayores que los tanques cilíndricos, no obstante estos costos se compensan por los bajos costos de operación, los cuales son atribuidos a una mayor eficiencia de mezclado y una menor limpieza.

**Tanques Imhoff.** Son tanques de estabilización de dos cámaras, los cuales constan de una cámara superior para la sedimentación y colección de sólidos y una cámara inferior donde los sólidos asentados son estabilizados anaerobiamente. Los tanques Imhoff son una tecnología vieja que no es raro ver en aplicaciones de tratamiento de aguas residuales municipales.

Ilustración 4.3 Reactores anaerobios



Ilustración 4.4 Reactor en forma de huevo



**Lagunas de estabilización anaerobia.** Consisten de lagunas de tierra equipadas con cubiertas de membrana flotantes que son usadas para contener y colectar el gas del reactor. Las lagunas no se calientan ni se mezclan. Debido a esto, la velocidad de estabilización es variable. Consecuentemente, las lagunas se diseñan para proporcionar grandes tiempos de retención de los lodos.

#### 4.5.2 REACTORES SECUNDARIOS

Casi toda la estabilización anaerobia de mediana a grande se facilita incluyendo dos reactores: primario y secundario. La mayor parte de la estabilización y producción de gas ocurre en el reactor primario. El diseño del sistema de estabilización, tasas de carga y el TRS se basa en el volumen del tanque primario; sin embargo, si el reactor secundario tiene calentamiento y

mezclado, su volumen activo puede ser incluido en el cálculo de la tasa de carga de operación y el tiempo de retención de sólidos.

Mientras que el reactor primario tiene mezclado y calentamiento para optimizar la estabilización y cumplir los requerimientos de reducción de patógenos, el reactor secundario puede o no mezclarse o calentarse. Los sistemas de calentamiento del reactor están casi siempre configurados para uso del equipo de intercambio de calor del reactor primario que genere calor al reactor secundario cuando el primario esta fuera de servicio.

Un reactor secundario sin calentamiento sirve para los siguientes propósitos: actúa como un tanque de almacenamiento para los sólidos estabilizados: como un tanque primario de espera; como una fuente de inóculo. Además,

en instalaciones donde el reactor se decanta, el reactor secundario ocasionalmente se emplea como tanque de separación o reposo para el retiro del sobrenadante, lo que incrementa la concentración de sólidos.

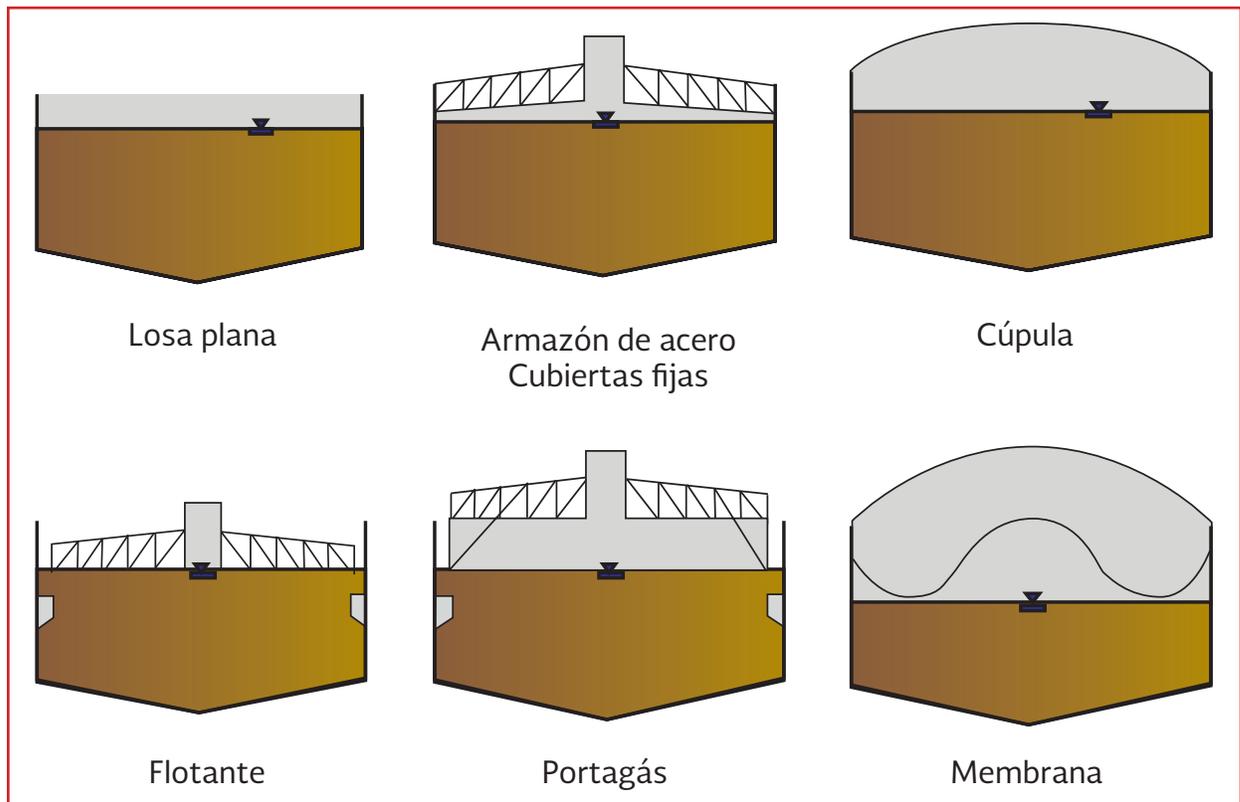
Debido a que un importante propósito del reactor secundario es su uso como un tanque de almacenamiento, este frecuentemente tiene cubiertas flotantes o membranas para permitir el retiro de lodo estabilizado. La capacidad de almacenamiento en el reactor secundario se limita por el desplazamiento de la cubierta. En cubiertas flotantes o cubiertas de almacenamiento de gas, el retiro de los sólidos finaliza antes de que la cubierta se apoye en los soportes de salida. El retiro excesivo de sólidos crea un vacío debajo de la tapa, lo cual causa el ingreso de aire al reactor y genera una condición potencialmente explosiva.

#### 4.5.3 CUBIERTAS DEL REACTOR Y MANTENIMIENTO

Las cubiertas del reactor mantienen el oxígeno fuera del ambiente anaerobio del reactor. Las cubiertas también previenen el escape del gas del reactor y el escape de olores a la atmósfera, reduciendo el peligro de explosión asociado con el gas metano y aislando la parte superior del reactor. Hay cuatro tipos básicos de cubiertas: fijas, flotantes, porta gas y de membrana (ilustración 4.5). En la tabla 4.1 se describen las características de los diferentes tipos de cubiertas.

**Cubiertas fijas.** Son de distintas formas constructivas. Las cubiertas de concreto reforzadas son de losa plana o en forma de cúpula y se soportan por las paredes del reactor o por columnas con materiales de diferentes espesores dependiendo el diseño.

Ilustración 4.5 Cubiertas del reactor (Water Environment Federation, 2008)



Algunas cubiertas fijas se construyen de placas de acero. Las placas de acero se soldan en la parte superior de la armadura o a una estructura en forma de arco. La estructura de soporte se conecta a la parte superior de la pared por un arreglo corredizo que permite que la cubierta se expanda o contraiga en respuesta a los cambios de temperatura.

Los reactores con cubiertas fijas requieren especial atención durante la adición y el retiro de los lodos. Si el reactor se encuentra lleno, es primordial que el flujo de entrada sea igual al de salida. Si se adicionan lodos sin el retiro de un volumen igual, se genera un incremento en la presión, lo cual provoca que la cubierta se levante. El retiro de lodos sin una correspondiente adición, genera un vacío que daña la cubierta o causa que se colapse.

Ambas condiciones, la sobre presurización y el vacío se solucionan instalando válvulas de seguridad; sin embargo, incluso con las válvulas, los sistemas de cubierta fija casi siempre desarrollan fugas de gas en la interfase de la cubierta y la pared del reactor.

**Cubiertas flotantes.** Estas flotan directamente en la superficie del líquido, soportadas por un sistema de rodamiento o carriles que están entre la pared y la estructura de la cubierta, que controlan el movimiento vertical y lateral de la cubierta y previenen una inclinación excesiva. Los sistemas con rieles están disponibles en configuraciones verticales o en espiral. Los sistemas de espiral permiten un control más eficiente de los movimientos verticales de la cubierta. Los rangos de movimiento vertical de las cubiertas flotantes son comúnmente de 1.5 a 3 m (5 a 10 ft), con una capacidad correspondiente para el retiro de los sólidos.

Las cubiertas flotantes ofrecen varias ventajas sobre las cubiertas fijas, de las cuales la más importante es la capacidad de variación del nivel del líquido en el reactor sin riesgo de sobrepresión o despresurización, porque esta se eleva y desciende con el nivel del líquido. Una cubierta flotante se compensa por la succión creada cuando se remueven los lodos, así como se minimiza la posibilidad de sobrepresión durante la adición de los lodos.

**Cubiertas para almacenamiento de gas.** Una cubierta porta gas es similar a una cubierta flotante; sin embargo, estas se diseñan para el almacenamiento de gas así como para su retiro del reactor. La cubierta porta gas, flota en el gas del reactor en lugar de la superficie del líquido. Está equipada con un faldón que se extiende por debajo de la superficie del líquido para la contención del gas. Un anillo de lastre o bloque de concreto bajo el faldón estabiliza la cubierta y ayuda al control de la presión del gas.

El operador revisa periódicamente la cubierta flotante para asegurarse que está en el nivel adecuado y que se mueve libremente. Una cubierta inclinada refleja una carga desigual resultado de una acumulación de agua, una carga desigual de nieve o una unión entre la pared y el recipiente de la cubierta. Durante la inspección es posible detectar la formación excesiva de espuma.

**Cubiertas de membrana.** Las cubiertas de membrana almacenan el gas y separan el contenido del reactor anaerobio de la atmósfera. Se muestra en la ilustración 4.6 una cubierta de membrana. La cubierta consiste de una membrana interna y una membrana externa, ambas membranas están conectadas a la pared del tanque, previenen el escape

del gas a la atmósfera. Un soplador infla la membrana externa. La membrana interna se infla y desinfla de acuerdo al volumen del gas acumulado. La membrana interna sube o baja toda la profundidad del tanque, lo que le permite mantenerse casi completamente vacío.

#### 4.5.3.1 Mantenimiento

**Protección a la corrosión.** Las superficies expuestas de los reactores anaerobios son vulnerables a la corrosión causada por la alta concentración de sulfuro de hidrógeno en el gas del reactor.

Si el reactor opera a pH bajo, el dióxido de carbono forma ácido carbónico, el cual es también corrosivo. Las áreas afectadas por la corrosión incluyen algunas superficies no sumergidas, tales como la parte inferior de la cubierta, las paredes del tanque que se encuentran arriba de la superficie del líquido y la superficie exterior de las cubiertas, las cuales están expuestas a la atmósfera. Si estas tienen alguna fuga en la cubierta que permita coleccionar el gas en el espacio ático, los elementos estructurales de la cubierta pueden también corroerse. La corrosión se minimiza usando materiales de construcción resistentes a la corrosión, recubrimientos protectores y protección catódica.

Tabla 4.1 Características de las cubiertas del reactor (Water Environment Federation, 2008)

	Cubiertas fijas	Cubiertas flotantes	Cubiertas Porta gas	Cubiertas de membrana
Capacidad de retiro	No recomendado	Sí	Sí	Sí
Almacenamiento de gas	No	No	Sí (limitado)	Sí
Posible olor	Bajo	Moderado	De bajo a moderado	Bajo
Recomendaciones de uso	Reactor primario	Reactores primario y secundario	Reactores primario o secundario	Reactores primario o secundario

Ilustración 4.6 Cubierta de membrana



Las superficies exteriores se inspeccionan trimestralmente. Las cubiertas de metal se recubren, si es necesario, usando el tipo de recubrimiento recomendado por el fabricante de cubiertas o los que se describen en las especificaciones de ingeniería. Generalmente las cubiertas necesitan recubrirse cada 5 a 10 años, dependiendo la localización y condiciones del clima.

La parte inferior de la cubierta se revisa siempre que el tanque se encuentre vacío y fuera de servicio. Las reparaciones incluyen lavado a presión, sanblasteo y recubrimiento.

Se evalúan las estructuras de las cubiertas que presenten corrosión porque el área ática de la cubierta de un reactor es vulnerable a la acumulación de gas y a la corrosión. En este caso el personal de la planta toma precauciones y sigue los códigos de seguridad.

**Problemas de olores.** Las cubiertas fijas del reactor se conectan directamente a la pared del mismo, formando un sello que previene el escape de olores y de gas del reactor. Las cubiertas flotantes y las cubiertas porta gas están separadas de la pared del tanque por un pequeño espacio de aproximadamente 8 cm el cual permite los movimientos de la cubierta. El líquido en el reactor forma un sello de agua en esta área, minimizando el escape del gas. Sin embargo, cuando hay formación de espuma, esta interfiere con el sello de agua y el gas del reactor escapa. La válvula reguladora de presión es la fuente más común de olor a gas en cubiertas fijas, flotantes y porta gas. El gas también escapa por sellos deteriorados y causa olores en las instalaciones del reactor. La inspección y el mantenimiento apropiado de las válvulas reguladoras de presión minimizan el escape de gas del reactor.

Las cubiertas de membrana están conectadas directamente a la pared del reactor, lo cual minimiza el escape de gas; sin embargo, el gas puede filtrarse en el espacio entre la membrana interna y externa. Durante la regulación de la presión, el aire se descarga de la cubierta de membrana. Además, si éstas tienen pequeñas perforaciones se presentan fugas o filtraciones que permiten que el gas del reactor entre en el espacio, y el aire se contamine con sulfuro de hidrógeno, compuestos orgánicos volátiles y olores asociados. Se instalan filtros de carbón en la línea de descarga de aire para la remoción del sulfuro de hidrogeno y minimización de olores.

#### 4.5.4 MEZCLADO DEL REACTOR

Para la generación de las condiciones ambientales para los microorganismos que realizan la estabilización anaerobia se utilizan reactores de alta tasa, los cuales tienen un sistema de mezclado y calentamiento, así como una alimentación uniforme de lodo espesado. Un mezclado efectivo provee los siguientes beneficios:

- Distribución de los lodos del afluente a través del reactor
- Dispersión de los lodos del afluente para un máximo contacto con los microorganismos
- Prevención de estratificación térmica
- Reducción de la acumulación de espuma
- Reducción de la acumulación de material asentado en el fondo del reactor
- Dilución de inhibidores de la estabilización, tales como materiales tóxicos, un pH desfavorable o la temperatura del lodo
- Aumenta la separación gas/líquido del reactor

Estos beneficios garantizan la estabilidad del proceso, el control de espuma y la prevención de la sedimentación de sólidos. Para el cumplimiento de los requerimientos del proceso, el contenido del reactor no debe sujetarse a grandes fluctuaciones de lodos crudos, concentración, temperatura, o productos metabólicos finales de las bacterias. Muchos reactores anaerobios contienen espuma, la cual se acumula en la superficie del líquido comenzando en puntos de baja turbulencia. La acumulación de espuma se controla con un buen mezclado. Los tanques de diámetros grandes permiten que se distribuya en un área grande, lo cual provoca, que sea más difícil que se incorpore. Una configuración apropiada del equipo de mezclado del reactor reduce o elimina la acumulación de espuma. Los depósitos de arena en el fondo del reactor anaerobio resultan en la pérdida de volumen activo, llevando a procedimientos de limpieza caros y excesivos extendiendo el tiempo de inactividad. La acumulación de arena ocurre frecuentemente dentro de los reactores convencionales de fondo plano. En reactores con pendientes en el fondo, la arena y sólidos sedimentables se deslizan por los lados a una localización única donde pueden ser removidos. Si la arena y los sólidos permanecen en el reactor por un extenso periodo, estos pueden concentrarse formando una masa sólida, la cual es difícil o casi imposible resuspender o remover a través del bombeo.

#### 4.5.4.1 Mezclado mecánico

El sistema de mezclado mecánico incluye sistemas de bombeo y mezcladores tipo impulsor.

**Sistemas de mezclado por bombeo.** Los sistemas de mezclado por bombeo constan

de bombas, tuberías e inyectores (ilustración 4.7). Las bombas son frecuentemente bombas “chopper” o bombas que incorporan en línea molinos o que previenen se acumulen materiales fibrosos y causen problemas de taponamiento. Las bombas son instaladas fuera del tanque lo cual facilita su mantenimiento. Los inyectores de alta tasa son colocados dentro del tanque y están orientados para la descarga de un patrón de flujo que mezcle completamente el contenido del tanque. El patrón de flujo varía dependiendo del fabricante; sin embargo, los patrones incluyen una configuración toroidal (patrón helicoidal girando alrededor del centro) y una zona de mezclado dual, combinando un patrón de flujo uniforme y flujo vertical para proveer una velocidad casi uniforme a través del tanque.

Los sistemas están diseñados de manera que los equipos dentro del reactor no necesiten mantenimiento regular. Las bombas requieren el mantenimiento que es típico para bombas de este tipo. Un incremento significativo en la presión de la descarga final de una bomba de mezclado indica un problema asociado con el equipo de mezclado, tal como tuberías obstruidas o inyectores obstruidos.

#### 4.5.4.2 Mezclado con impulsores

Los sistemas de mezclado con impulsores constan de un impulsor, un eje impulsor y un disco (ilustración 4.10). Los impulsores se montan en un tubo de aspiración a flujo directo dentro del tanque. El tubo de aspiración incluye inyectores de descarga, los cuales están tangencialmente dirigidos a la pared para la formación de una acción de remolino en el tanque. Las unidades impulsoras son típicamente reversibles, lo que permite la descarga en la parte superior o en el fondo del tubo de aspiración o para el

Ilustración 4.7 Esquema de un reactor mezclado por bombeo (Water Environment Federation, 2008)

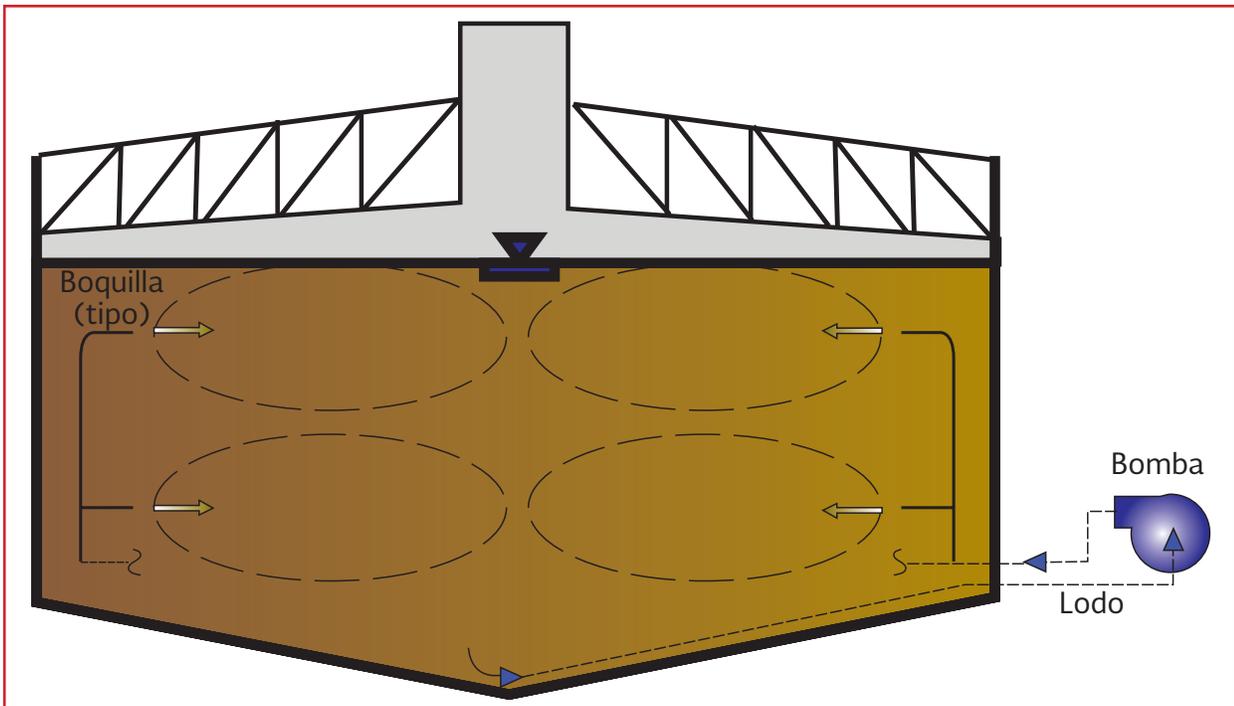


Ilustración 4.8 Sistema de bombeo para el mezclado del reactor



Ilustración 4.9 Boquilla del sistema de mezclado por bombeo

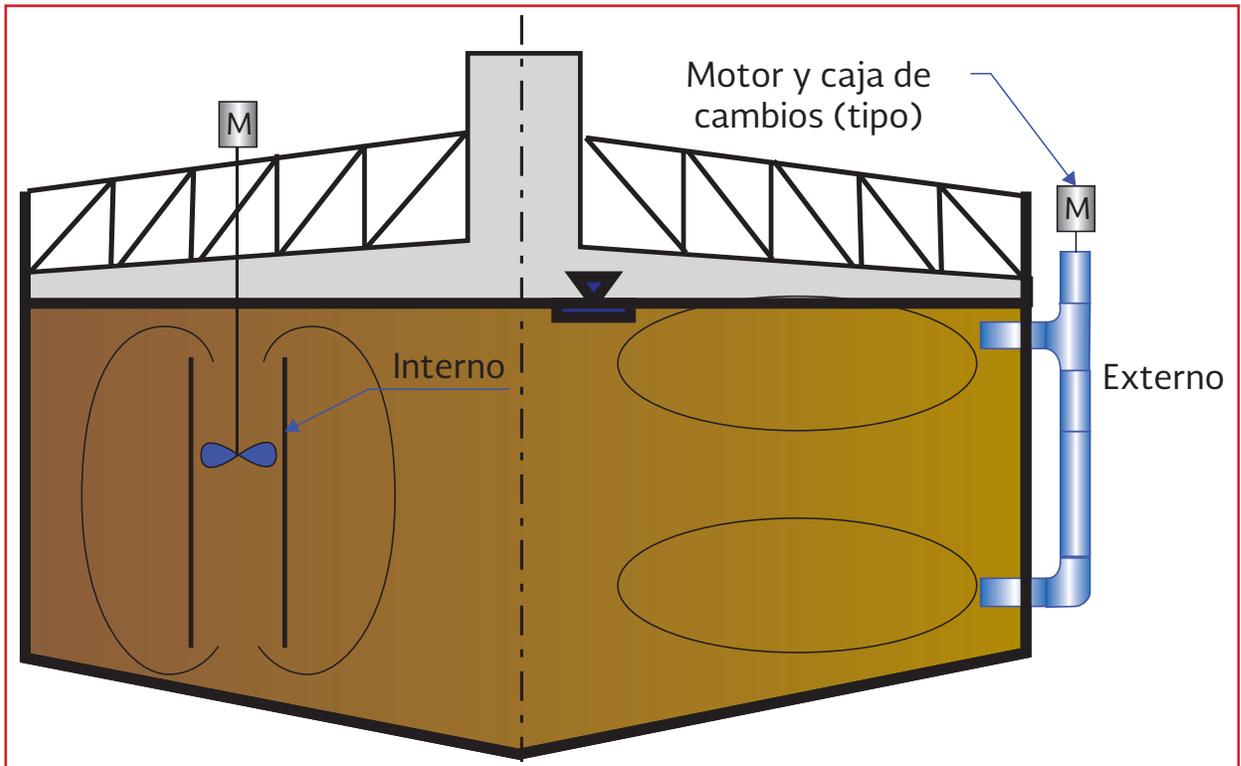


revertimiento del impulsor para limpieza de las obstrucciones. Algunas unidades revierten la dirección del impulsor por 2 horas cada 24 horas lo que evita la creación de depósitos en zonas de baja velocidad.

En el mezclado con impulsores se usan varias configuraciones. El ensamble del mezclador y el tubo de aspiración se montan en el centro, en el punto medio del radio o fuera del tanque. Los mezcladores de impulsor sin tubos de aspiración son montados en el centro del reactor.

Un problema común con los mezcladores de impulsor son los trapos, cabellos y otros materiales fibrosos enredados en la paleta y en el eje del mezclador, los cuales interfieren con la operación. Los fabricantes ofrecen impulsores “antialgas” para reducir este problema. La acumulación de trapos puede ser monitoreada midiendo el consumo de corriente del motor.

Ilustración 4.10 Sistema de mezclado con impulsores (Water Environment Federation, 2008)



Un mezclador sucio en ocasiones se limpia revirtiendo su dirección. Los mezcladores se desmontan por medio de una grúa o los tanques se descargan para la limpieza de acumulaciones de materiales extraños. Además para el monitoreo de la acumulación de residuos, la unidad de accionamiento y las piezas deben tener un servicio de acuerdo a las recomendaciones del fabricante. El tubo de acondicionamiento externo del sistema de mezcla esta sujeto a vibraciones, que requieren de mantenimiento correctivo.

#### 4.5.4.3 Mezclado con gas

Los cuatro mejores tipos de sistemas mezcladores de gas son: los difusores, las lanzas, las pistolas de burbuja y los levantadores de gas.

El compresor es el corazón de todos los sistemas mezcladores de gas. Los compresores utilizados incluyen los de lóbulo rotatorio, de paletas rotativas y de anillos líquidos, los cuales son descritos con más detalle en la sección titulada “manejo del biogás”. Para la remoción de la humedad y los sedimentos del gas del reactor se colocan dispositivos antes del compresor. La acumulación de sedimentos se elimina a intervalos regulares. Los difusores del fondo, la pistola de burbuja y los sistemas levantadores de gas incluyen un colector para el balanceo del flujo en un clima frío y protegerse del congelamiento.

Cada sistema mezclador de gas incluye medios para el control de la presión de gas, tales como válvulas reguladoras de presión, las cuales permiten que el gas regrese a la succión del compresor o se envíe a almacenamiento cuando la presión de descarga del compresor exceda los límites de operación. Si se configura

correctamente la abertura de las válvulas, estas abren solamente si se tapa la línea de descarga.

Un regulador de baja presión permite el regreso del gas cuando la presión en el reactor cae por debajo de un nivel predeterminado. Esto previene el desarrollo de un vacío en el reactor que extrae aire y crea una mezcla explosiva. El sistema regulador de baja presión mide la presión del gas por medio de una tubería conectada directamente al reactor. Si el sensor es conectado a la misma tubería de succión del compresor, puede obtenerse una lectura falsa. La línea de lectura debe mantenerse libre todo el tiempo.

Los interruptores de presión pueden usarse para controlar condiciones de alta y baja presión, pero su uso requiere que los sistemas sean reiniciados por un operador siempre que haya fluctuaciones de presión. Esto es particularmente problemático durante el arranque, cuando la presión del gas varía.

**Difusores de fondo.** Los sistemas de mezcla con difusores de fondo, incluyen difusores o cajas en el fondo del reactor cerca del centro del tanque. Todas las cajas reciben y descargan cantidades iguales de gas comprimido, creando una columna de gas ascendente.

Para el aseguramiento de la distribución del gas que entra a la caja, el flujo de gas se revisa periódicamente, porque las cajas son propensas al taponamiento. El taponamiento puede limpiarse cambiando la dirección del flujo de gas de entrada a través de la caja afectada o por lavado con agua a presiones altas. Los difusores inferiores pueden también cubrirse con lodos, los cuales afectan el patrón de mezclado en el reactor.

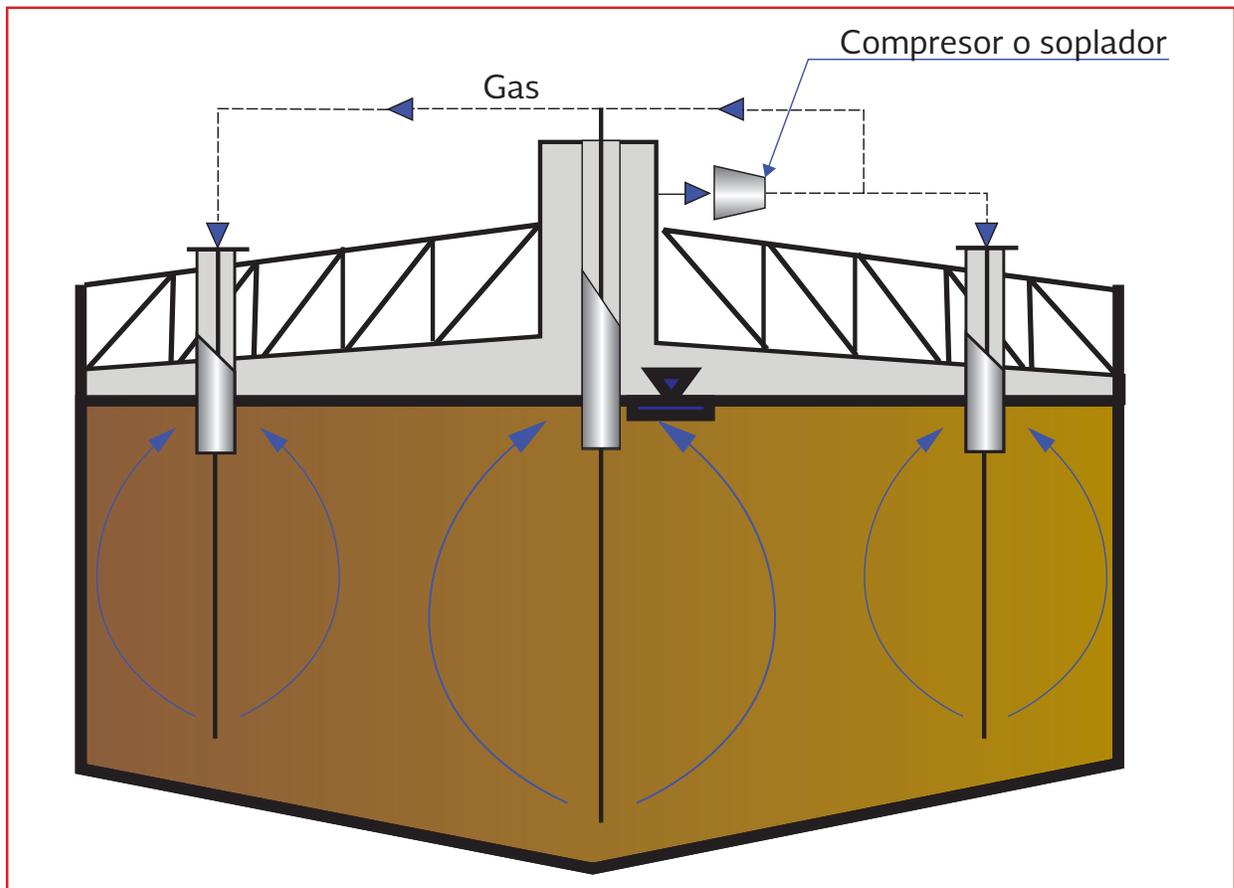
**Lanzas.** Un sistema de mezcla con lanzas descarga directamente el gas comprimido en varios puntos del tanque (ilustración 4.11). Secuenciando el flujo de gas en varios puntos provoca que el efecto de mezclado se distribuya a través del tanque. La profundidad máxima de mezclado se controla por la profundidad a la que el gas se descarga. Generalmente el mezclado se realiza de 1.8 a 2.4 m (6 a 8 ft) por debajo del punto de descarga del gas. Debajo de esta profundidad, los materiales sedimentan y pueden acumularse.

Las lanzas se distribuyen en un círculo generalmente a dos tercios del radio del tanque, con una lanza adicional en el centro. Las lanzas son generalmente de 5 cm (2 in) de diámetro, la tubería se monta en la cubierta de

descarga cerca del fondo del tanque. En muchas configuraciones, el paso del gas por las lanzas es intermitente, lo cual causa taponamientos con sólidos y trapos. Una tubería recta se usa para la minimización de taponamientos. Si ocurre un taponamiento se remueven las tapas de las lanzas para su limpieza.

El flujo secuencial de gas a las lanzas se controla por una serie de válvulas motorizadas o por una válvula rotatoria única. Las válvulas motorizadas remueven la humedad cuando están cerradas. Estas válvulas se inspeccionan regularmente ya que pueden deteriorarse debido a la humedad. Las válvulas rotatorias permiten un flujo de gas continuo, el cual reduce los problemas de humedad. Sin embargo, causa corrosión por el contacto con el gas del reactor lo cual es un problema significativo.

Ilustración 4.11 Esquema de mezclado con lanzas. (Water Environment Federation, 2008)



**Sistemas de mezclado de burbujas.** Los sistemas de burbuja constan de un generador de burbujas y un cilindro vertical. En la base del cilindro de un generador de burbujas ocurre la acumulación de gas comprimido y forma una sola burbuja grande la cual incrementa a través del cuerpo de la tubería, actuando como un pistón expandible. Se muestran en la ilustración 4.12 e ilustración 4.13, el sistema de mezclado y el equipo para el mezclado de burbujas. Las burbujas de gas obligan a los sólidos a elevarse a través del cilindro y a su salida por la parte superior. Después de que las burbujas salen del cilindro continúan subiendo hasta la superficie del líquido. Las burbujas de gas abandonan el cilindro con la misma velocidad que las nuevas burbujas salen del generador lo cual resulta en un flujo continuo de lodos y se establece

el patrón de circulación. Dependiendo del tamaño del tanque, se determina el número y la configuración de los cilindros necesarios. Los reactores equipados con sistema de mezcla de burbujas tienen una capacidad limitada, porque los cilindros se encuentran sumergidos.

Para una operación correcta del sistema, se requiere una distribución uniforme de flujo entre los cilindros de gas. Se lleva un control o revisión periódica en busca de líneas taponeadas o generadores de burbujas obstruidos. Si el tubo generador está muy curvado, es susceptible al taponamiento. Se requiere la limpieza de la tubería para eliminación del taponamiento. Un incremento del flujo de gas ayuda a la limpieza de un generador obstruido. Si estos métodos fallan, el tanque debe ser descargado para el acceso al generador.

Ilustración 4.12 Sistema de mezclado de pistolas de burbujas (Water Environment Federation, 2008)

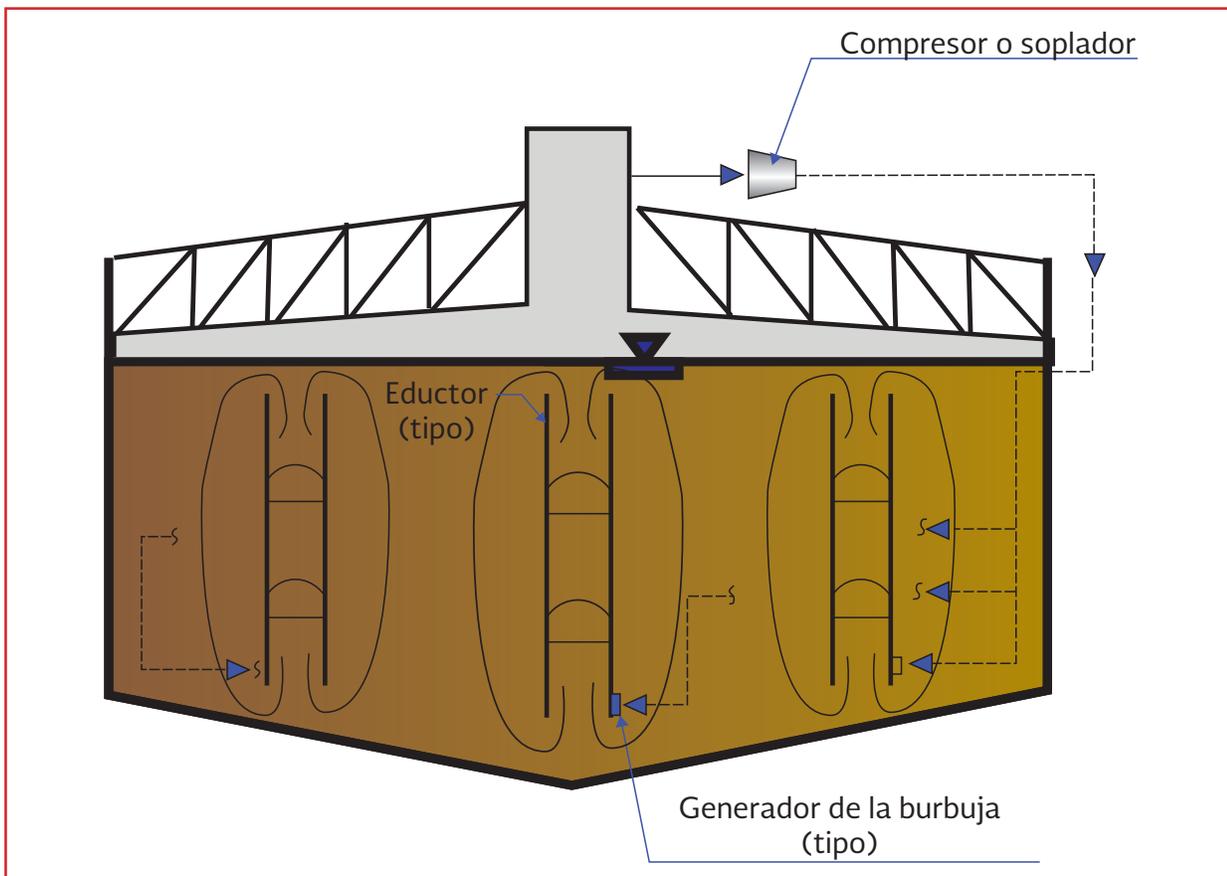
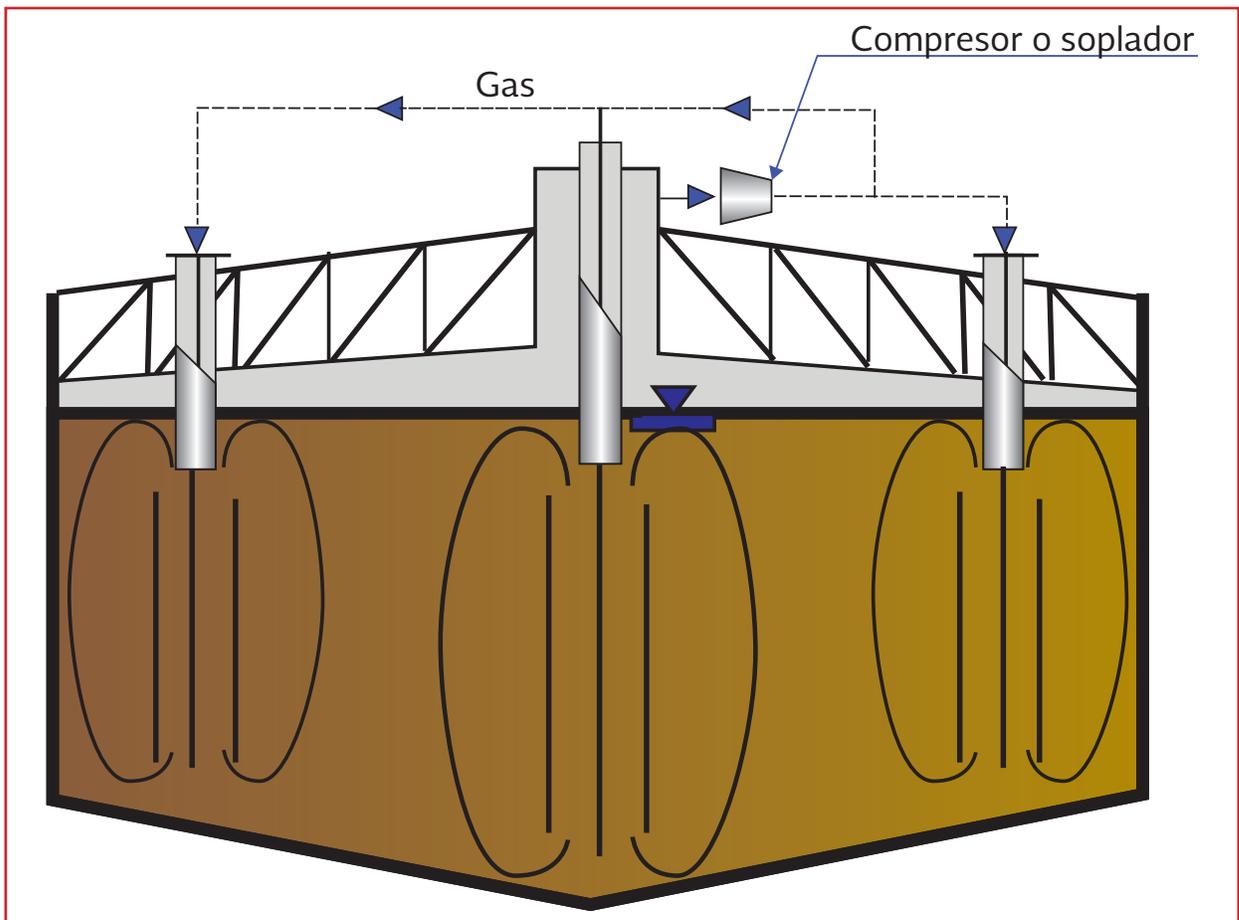


Ilustración 4.13 Sistema de mezclado de pistolas de burbujas



**Sistema con tubos de aspiración.** El sistema con tubos de aspiración trabaja de manera parecida a una bomba de aire (ilustración 4.14). El gas es inyectado dentro del tubo de aspiración mediante lanzas instaladas en un tubo vertical, el cual típicamente descarga el gas abajo del punto medio del tubo de aspiración. Como el gas es liberado, estos sólidos ascienden a través del tubo de aspiración conduciendo a más sólidos a la base del tubo. Los sólidos salen por la parte superior del tubo derramados radialmente. Los tanques grandes se equipan con múltiples tubos de aspiración; los tanques pequeños contienen un único tubo localizado en el centro. Los reactores en forma de huevo pueden usar un sistema de tubos de aspiración para el mezclado.

Ilustración 4.14 Sistema de mezclado con tubos de aspiración (Water Environment Federation, 2008)



**Evaluación del rendimiento del sistema de mezclado.** Debido a que los procesos anaerobios son completamente cerrados, esto complica la observación directa de la efectividad del sistema de mezclado. Por lo que han sido desarrollados varios procedimientos para la medición de la efectividad del mezclado, incluyendo: perfiles de sólidos, perfiles de temperatura y estudios de seguimiento.

El propósito del mezclado en el reactor es la generación de una condición uniforme en el tanque. Un método para la evaluación de la uniformidad de los sólidos consiste en la realización de un análisis del perfil de los sólidos. Este ensayo incluye la colección de muestras de sólidos a intervalos de profundidad de 0.6 m (2 ft), avanzando de la parte superior del reactor a la parte inferior. Las muestras se toman desde la cubierta usando un dispositivo de resorte para el muestreo. En las muestras se analizan los sólidos totales. Una variación en la concentración de más 5 000 mg L<sup>-1</sup> del promedio indica un mal mezclado en el punto de muestreo. El ensayo de perfil de sólidos se efectúa cada 6 meses.

Otro método para la medición de la eficiencia del mezclado es el perfil de temperaturas. Los procedimientos son similares a los usados para el perfil de sólidos con lecturas de temperaturas tomadas a un intervalo de profundidad fija. Si algunas lecturas varían del promedio por más de un valor especificado de 0.5 a 1 °C (1 a 2 °F) la variación indica un mezclado deficiente.

Otro método para la evaluación del sistema de mezclado en el reactor son los estudios con trazadores. Este método consiste en la adición al reactor de una cantidad de material trazador como litio, y la recolección de muestras de

la descarga del reactor a intervalos fijos. Las muestras son analizadas por concentraciones trazas, las cuales son después comparadas con las concentraciones teóricas que resultan de la mezcla completa. A través de estos estudios se producen los resultados más exactos a diferencia de los métodos anteriores, pero las pruebas de mezclado son más complicadas, extensas y costosas.

Si un reactor pasa la prueba de efectividad de mezclado, se descartan problemas mecánicos.

**Cálculo de las velocidades de rotación.** La velocidad de rotación del contenido del reactor, se calcula al dividir el volumen del reactor entre la velocidad de bombeo y se usa como una medida del mezclado proporcionado. El análisis de la velocidad de rotación se efectúa exclusivamente para sistemas de mezclado en los cuales la velocidad de bombeo puede medirse. Las velocidades de rotación se calculan usando la siguiente ecuación:

$$VR = \frac{VD}{VB} \quad \text{Ecuación 4.4}$$

Dónde:

VR= velocidad de rotación (min)

VD= volumen del reactor, basado en la profundidad lateral del agua, diámetro del reactor y volumen cónico inferior, L (gal)

VB= velocidad de bombeo, L min<sup>-1</sup> (gal min<sup>-1</sup>)

Las velocidades de rotación se encuentran en el rango de 2 a 4 horas.

La evaluación de la energía de mezclado se usa también para la medición de la cantidad de

mezclado en un sistema. Se requieren de 7 a 13 kW L<sup>-1</sup> para un buen mezclado.

#### 4.5.5 CALENTAMIENTO DEL REACTOR

Cada grupo de microorganismos formadores de metano tiene una temperatura de crecimiento óptima. Si las fluctuaciones de temperatura son demasiado amplias, los formadores de metano no pueden desarrollarse completamente y se necesitan poblaciones estables para el proceso de estabilización. La estabilización prácticamente cesa a temperaturas debajo de los 10 °C (50 °F). Muchos reactores operan en el rango de temperaturas mesofílicas de 32 a 38 °C (90 a 100 °F), algunos operan en el rango termofílico de 55 a 60 °C (131 a 140 °F). Independientemente de la temperatura de operación seleccionada, la temperatura del contenido del reactor no debe desviarse de esta, más de 0.6 °C (1 °F) por día.

Debido a que los microorganismos formadores de metano son sensibles a la temperatura, el mantenimiento de una temperatura constante en el reactor es una de las funciones de operación más importantes que se controla y para esto, se requiere un sistema de calentamiento que sea exacto, que este en buen estado y de fácil entendimiento. El proceso de estabilización no sobrevive más que unos pocos días sin calor.

El calor total requerido para la estabilización está basado en lo siguiente:

- Calentamiento de los lodos. El calor requerido para el incremento de la temperatura de los lodos crudos de entrada a la temperatura de operación del reactor
- Pérdidas en la transmisión. El calor

requerido para la compensación de pérdidas de calor del reactor a sus alrededores

##### 4.5.5.1 Calentamiento de los sólidos

La temperatura de los lodos de entrada es generalmente baja con respecto a la temperatura de operación del contenido del reactor; por lo tanto, debe adicionarse calor. El calor necesario para el incremento de la temperatura de los lodos de entrada normalmente representa más del 60 por ciento de la demanda total de calor. El calor necesario para el incremento de la temperatura de los lodos del afluente a la temperatura de operación del reactor se expresa por la siguiente ecuación:

$$Q = (S)(C_s)(T_o - T_i) \quad \text{Ecuación 4.5}$$

Dónde:

Q= Requerimiento de calor de los sólidos kJ d<sup>-1</sup> (BTU h<sup>-1</sup>)

S= Flujo másico de los lodos kg d<sup>-1</sup> (lb h<sup>-1</sup>)

C<sub>s</sub>= Calor específico de los lodos 4.2 kJ kg<sup>-1</sup> (1.0BTU lb<sup>-1</sup> °F<sup>-1</sup>)

T<sub>o</sub>= Temperatura de operación del reactor °C (°F)

T<sub>i</sub>= Temperatura de los lodos del afluente °C (°F)

La reducción de la cantidad de agua en el lodo alimentado al reactor reduce directamente la cantidad de calor requerido para llevarlo a su temperatura de operación.

La alimentación del reactor afecta la capacidad requerida del sistema de calentamiento de los lodos. Por ejemplo, si el volumen diario de los sólidos se alimenta cada 3 horas en un sistema diseñado para alimentarse cada 24 horas, este se sobrecarga. Tal sobrecarga resulta en una caída de temperatura en el reactor, además, el restablecimiento de la temperatura de operación adecuada toma el resto del día. Las fluctuaciones en la temperatura son perjudiciales para las bacterias anaerobias.

### Pérdidas en la transmisión

El calor requerido para la compensación de las pérdidas del reactor se expresa por la siguiente ecuación:

$$Q = (U)(A)(T_o - T_s) \quad \text{Ecuación 4.6}$$

Donde:

Q= Pérdidas de calor por transmisión del reactor  
kJ d<sup>-1</sup> (BTU h<sup>-1</sup>)

U= Coeficiente de la transferencia de calor kJ  
d<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup> °C<sup>-1</sup> (BTU h<sup>-1</sup> ft<sup>2</sup> °F<sup>-1</sup>)

A= Área de las pérdidas por transmisión m<sup>2</sup> (ft<sup>2</sup>)

T<sub>o</sub>= Temperatura de operación del reactor °C  
(°F)

T<sub>s</sub>= Temperatura de los alrededores °C (°F)

Diferentes zonas del reactor tienen condiciones de transferencia de calor únicas, tal como el coeficiente de transferencia de calor o la temperatura del área de los alrededores. Las pérdidas de calor se calculan por separado para cada zona y después se suman para la

determinación de las pérdidas totales del reactor. Los coeficientes de transferencia de calor se consultan en las tablas 22.12 y 22.13 del manual Diseño de Plantas De Tratamiento de Aguas Residuales Municipales (Water Environment Federation, WEF, 1998); Manual de cálculo del calentamiento y enfriamiento de carga (McQuiston & Splitter, 1992); y en los catálogos de información del fabricante. Se considera la aplicación de un material aislante si las pérdidas por transferencia en una zona, (como la cubierta del reactor), son particularmente altas.

#### 4.5.5.2 Sistemas de calentamiento interno

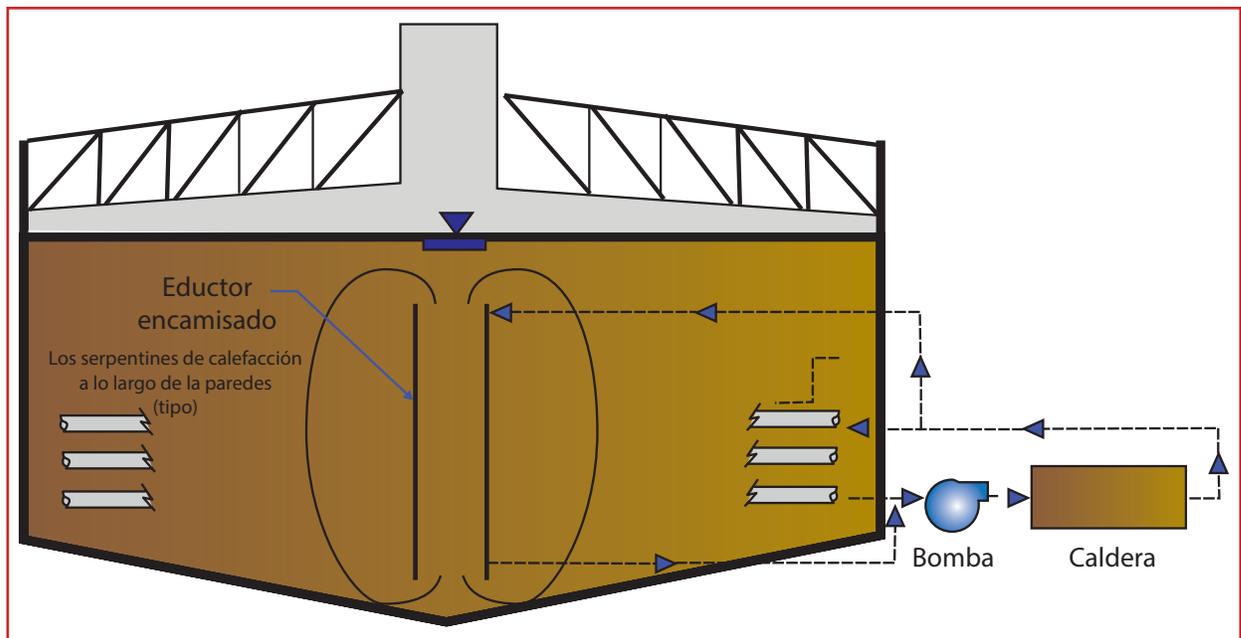
Un dispositivo de calentamiento interno transfiere calor a los lodos en el reactor. Los arreglos de calentamiento interno incluyen tubos montados en la pared interior del reactor y tubos mezcladores equipados con chaquetas de calentamiento de agua (ilustración 4.15). Estos arreglos no son muy utilizados porque los equipos de calentamiento y las tuberías son inaccesibles para la inspección o servicio, a menos que el tanque se descargue. También los trapos y otros desechos colectados en los tubos, reducen la eficiencia de la transferencia de calor y aceleran la frecuencia de la limpieza.

#### 4.5.5.3 Sistemas de calentamiento externo

En los sistemas de calentamiento externo, los lodos se recirculan a través de un intercambiador de calor externo (ilustración 4.16). El bombeo de la recirculación mantiene una velocidad de flujo de 1.2 m s<sup>-1</sup> (4 ft s<sup>-1</sup>), lo cual crea turbulencia a través de la superficie de calentamiento y minimiza las incrustaciones.

La bomba de alimentación de los lodos se conecta con la bomba de recirculación, por lo

Ilustración 4.15 Esquema del sistema de calentamiento interno (Water Environment Federation, 2008)



que esta comienza su operación cada vez que la alimentación de los lodos entra al intercambiador de calor. La alimentación y los lodos activos del reactor son mezclados y precalentados antes de su ingreso al reactor, lo cual previene la formación zonas con menor temperatura y zonas inactivas de lodos en el reactor. Los lodos alimentados también se precalientan por mezclado con el calor generado en la descarga de los lodos del intercambiador de calor.

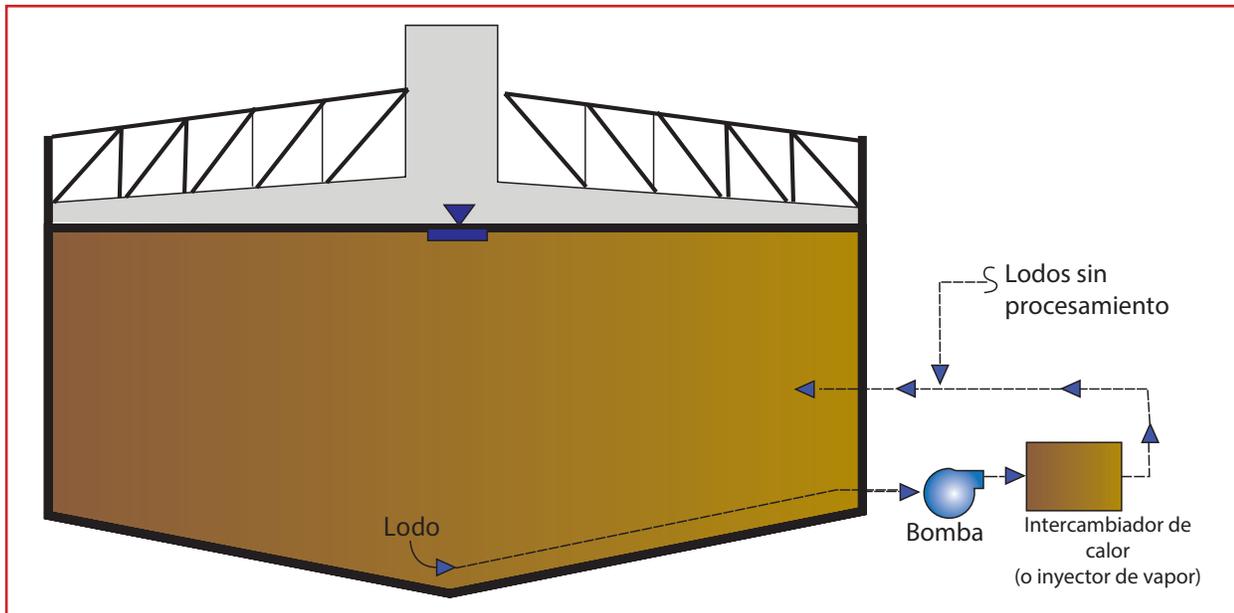
Se controlan las temperaturas de entrada y salida de los lodos en el intercambiador de calor. Una caída significativa del diferencial entre las dos temperaturas indica una reducción en la transferencia de calor, la cual ocasionalmente es causada por un mal funcionamiento de la bomba de los lodos, de la bomba de calentamiento de agua o del suministro de agua caliente. Si estas operan de manera correcta, el intercambiador de calor requiere revisión en busca de taponamientos, acumulación de cal o de incrustaciones en la superficie.

Los tres tipos de intercambiadores para calentamiento externo son: intercambiadores de tubos, tubo en baño y placa de espiral y su operación se describe en la siguiente sección.

**Intercambiador de calor de tubos.** Un intercambiador de calor de tubos consiste en un arreglo en serpentin de tubos concéntricos (ilustración 4.17), los lodos pasan por el tubo interno y el agua caliente circula en el espacio entre los dos tubos. El agua opera a contracorriente del flujo de lodos, lo que maximiza la transferencia de calor.

La temperatura de calentamiento del agua se limita a 66 °C (150 °F), lo que minimiza la acumulación de lodos en la superficie interior de los tubos. La presión a través del intercambiador de calor se revisa periódicamente. Una mayor pérdida de la presión es un indicativo de la acumulación de lodos o incrustaciones y se requiere limpieza de los tubos que conducen los lodos. Para la limpieza en el interior de los tubos se remueven los tubos curvos del final de

Ilustración 4.16 Esquema del sistema de calentamiento externo (Water Environment Federation, 2008)



cada serpentín. Si el taponamiento es excesivo, se instalan desmenuzadores corriente arriba del intercambiador de calor para el rompimiento de las fibras y los trapos que se acumulen en el reactor. Una rejilla también se emplea para la remoción de fibras y trapos de los lodos.

**Intercambiadores de calor de carcasa y tubos en serpentín.** Los intercambiadores de calor de carcasa y tubos y tubos en serpentín consisten en un arreglo de tubos en un baño de agua caliente (ilustración 4.18, ilustración 4.19). En el intercambiador de calor de carcasa y tubos, el

Ilustración 4.17 Intercambiador de calor de tubos



flujo de agua caliente se encuentra directamente en contacto, lo que resulta en una transferencia de calor más eficiente. Una bomba de agua caliente se emplea para la generación de turbulencia en el baño, así como para el incremento de la transferencia de calor. Como con los intercambiadores de calor de tubos, la presión a través de los tubos que conducen el lodo se revisan para la detección de aglomeraciones o incrustaciones.

**Intercambiadores de calor de placa en espiral.** Los intercambiadores de calor de placa en espiral (ilustración 4.20) consisten de un ensamble de dos tiras largas de placas de metal envueltas para la formación de un par de tubos de espirales concéntricas. Los bordes alternos del tubo se encuentran cerrados, formando canales separados para el lodo y el agua caliente. Las unidades generalmente se construyen con puertas con bisagras, lo que permite el paso de los lodos.

Los taponamientos se evitan mediante la inspección del paso por donde circulan

los lodos. Algunos taponamientos pueden removerse separando las placas concéntricas. Las lecturas de presión del manómetro son tomadas diariamente para el control del grado de taponamientos entre las limpiezas. Un incremento significativo en la caída de presión indica el paso por un taponamiento.

**Sistemas de transferencia de calor de lodos a lodos.** Muchos sistemas de estabilización no incluyen dispositivos para la recuperación de calor de los lodos estabilizados, algunos diseños nuevos consideran esta opción para la reducción de uso de combustible. Los sistemas de transferencia de calor lodos a lodos incluyen la recuperación de calor de la descarga de reactores mesofílicos o termofílicos para el precalentamiento de los lodos alimentados.

El sistema de transferencia de calor lodos a lodos, usa intercambiadores de calor tipo cubo (ilustración 4.21), los intercambiadores de tubos e intercambiadores de calor tipo espiral. Los lodos calientes y fríos se introducen en el lado

Ilustración 4.18 Intercambiador de calor de carcasa y tubos



opuesto de la pared de transferencia de calor, a través de la cual el calor es transferido del lodo caliente al lodo frío. Los intercambiadores tipo cubo y espiral incluyen facilidades para el acceso y limpieza de ambos lados de la superficie del intercambiador de calor.

El calor puede también se transfiere a través de un sistema de dos intercambiadores de calor, lodos a agua e interconectados con el circuito de agua caliente, el cual trabaja primero transfiriendo calor del lodo caliente al circuito de agua caliente en un intercambiador de calor de tubos o tipo carcasa y tubos. El agua caliente es después bombeada a otro intercambiador de calor, el cual transfiere calor al lodo frío. La

operación y mantenimiento de estos sistemas son similares a las de los intercambiadores de tubos y los de carcasa y tubos.

Ilustración 4.20 Intercambiador de calor de placas en espiral



Ilustración 4.19 Intercambiador de calor de tubos en baño (Water Environment Federation, 2008)

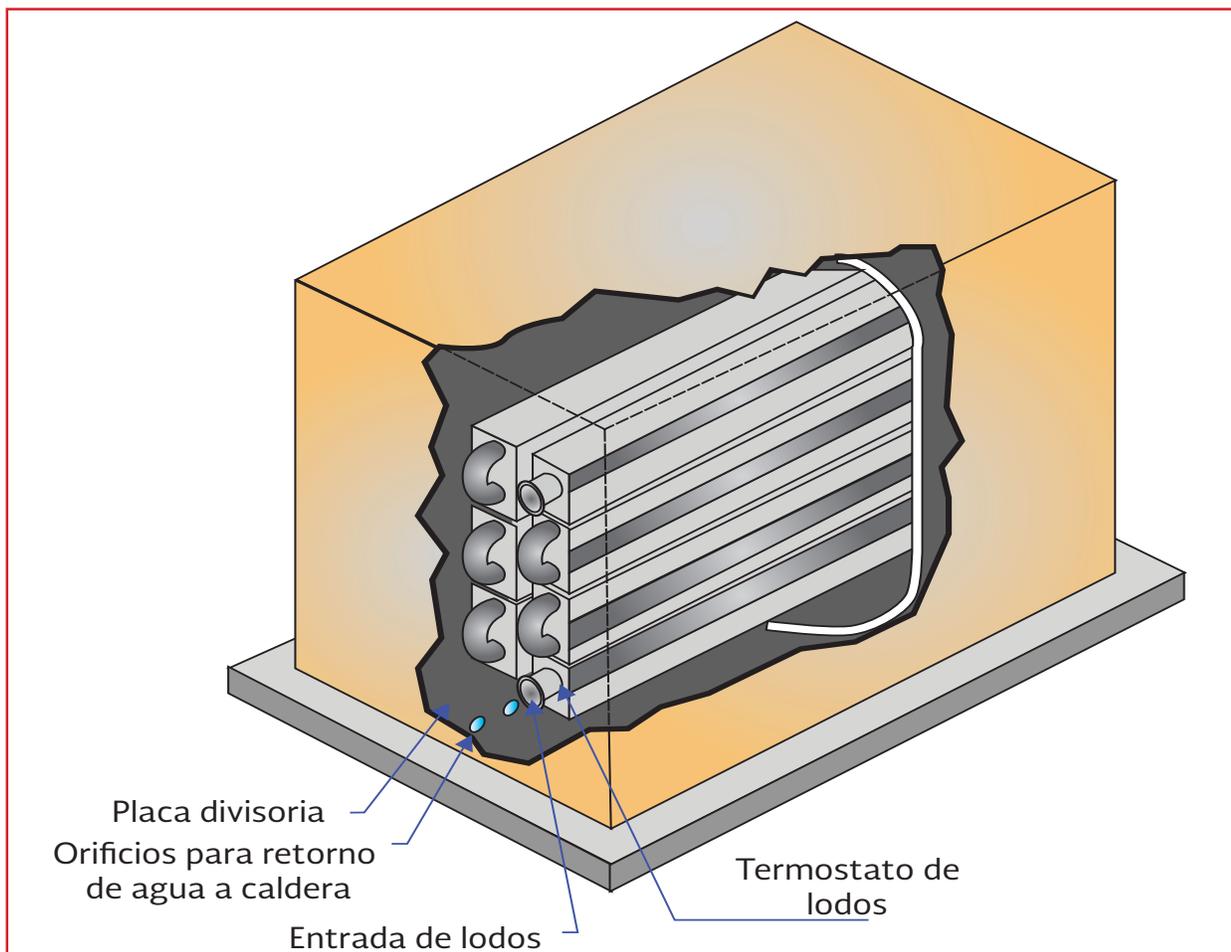


Ilustración 4.21 Intercambiador de calor tipo cubo



**Calentamiento por inyección de vapor.** Los sistemas de calentamiento por inyección de vapor inyectan vapor directamente dentro de los lodos. Los sistemas consisten en la modulación interna de la inyección de calor y la bomba de recirculación de los lodos, los tubos y las válvulas. El vapor se inyecta dentro de la corriente de los lodos mediante inyectores de vapor que son modulados para el control de la temperatura de la mezcla sólido-vapor. Los sistemas se configuran con uno o dos calentadores. En el sistema de dos calentadores, un calentador eleva la temperatura de los lodos de entrada y el otro reemplaza la pérdida de calor del reactor utilizando una línea de recirculación. En un sistema de un sólo calentador, este tiene el tamaño requerido para el cumplimiento de todos los requerimientos de calor.

Los sistemas de inyección de vapor deben cumplir las siguientes condiciones para su trabajo adecuado:

- La presión de vapor del calentador, típicamente 103 kPa, 15 psi, mayor que

la presión de los lodos

- Los tubos de descarga de los lodos deben mantenerse limpios para el mantenimiento de una presión de operación baja
- Las partículas en los lodos alimentados son pequeñas, lo que evita su paso a través del inyector y en consecuencia taponamientos
- Se evita la acumulación de sarro en la caldera y el sistema de vapor mediante la suavización del agua

**Fuentes de calor.** Los reactores anaerobios se calientan con agua caliente o vapor. Las fuentes de calor incluyen calderas y recuperación de calor residual.

**Sistemas de agua caliente.** Los sistemas de agua caliente contienen una fuente de calor, bombas de recirculación y controles de temperatura. Estos sistemas incluyen dos circuitos separados. Un circuito es usado para el intercambiador de calor de los lodos, con una temperatura recomendada de 66 °C (150 °F), lo que minimiza incrustaciones en la superficie del intercambiador de calor. El segundo circuito contiene las calderas, las cuales se mantienen a una temperatura de por lo menos 82 °C (180 °F) lo que evita la formación de ácido sulfúrico, el cual lleva a la corrosión. Una válvula de control de temperatura entre los circuitos, controla la mezcla de agua caliente del circuito de la caldera con recirculación de agua del circuito del intercambiador de calor para el mantenimiento de la temperatura en la parte superior del intercambiador de calor a 66 °C (150 °F).

El agua del circuito de calentamiento recibe un tratamiento químico para la inhibición de la corrosión y las incrustaciones.

**Sistemas de vapor.** Los sistemas de vapor constan de un sistema de distribución de agua tratada, una caldera de vapor, un intercambiador de calor de vapor de agua, un circuito de agua caliente o calor directo con inyección de vapor. El ablandamiento (remoción de dureza) del agua de entrada previene acumulación de incrustaciones en el sistema. El intercambiador de calor de vapor de agua transfiere calor del vapor producido por la caldera al circuito de agua caliente, el cual opera a bajas temperaturas para evitar incrustaciones.

El agua tratada se analiza periódicamente, lo que asegura la calidad requerida. El mantenimiento del sistema de vapor consiste en la revisión y la reparación de las trampas de vapor si es necesario.

**Calderas.** Se utilizan diferentes tipos de calderas para el calentamiento del reactor. Los combustibles comunes para el calentamiento de las calderas incluyen gas del reactor, gas natural y aceite combustible. El gas del reactor se trata para la prevención de la corrosión de la válvula de combustible y la zona de combustión. Las calderas se inspeccionan como lo recomiendan los fabricantes, con particular atención al área de combustión, la cual es susceptible a la corrosión.

**Recuperación de calor.** El gas del reactor se usa frecuentemente como combustible para motores y turbinas que se utilizan en los equipos de la planta, tales como bombas o ventiladores, o para la producción de electricidad. La recuperación del calor residual de los sistemas de enfriamiento de agua o de los sistemas de escape de la turbina se utilizan para el calentamiento de los reactores. El calor puede también ser colectado del escape de motores o turbinas de combustión y del intercambiador de calor de los lodos del

reactor. Generalmente se recupera suficiente calor de motores o turbinas, lo que elimina la necesidad de calor adicional para el reactor. Sin embargo, se recomienda la disponibilidad de una caldera de reserva para su uso durante el mantenimiento del equipo de combustión u otras interrupciones.

## 4.6. OPERACIÓN DEL REACTOR

### 4.6.1 ARRANQUE DEL EQUIPO

**Objetivo:** Lograr un estado estable en la operación y la reducción requerida de sólidos volátiles en el menor tiempo posible.

La puesta en marcha exitosa de un reactor biológico requiere un arranque efectivo de los diferentes sistemas y subsistemas que integran el proceso, incluyendo el sistema de manejo del gas, intercambiadores de calor, bombas de lodos, equipos de mezclado y sistemas auxiliares antes de introducir sólidos volátiles al reactor.

Los tres parámetros que son críticos para el aseguramiento de un proceso de arranque sin problemas son:

- Mantenimiento de una temperatura de operación específica
- Mezclado constante
- Una velocidad de carga específica de sólidos volátiles, con una variación diaria que no exceda  $\pm 10$  por ciento

La inspección y prueba de los equipos del reactor, minimiza las fallas de los equipos o del proceso biológico. Esto se efectúa de la siguiente forma:

1. Remover los desechos del reactor
2. Inspeccionar todas las válvulas para una operación correcta y sin problemas
3. Inspeccionar todo el control del gas, el acondicionamiento y los dispositivos de seguridad, incluyendo, pero no limitado a las trampas de sedimentos, separadores de espuma, manómetros, residuos de la quema de gas, trampas de llamas y válvulas reguladoras de presión
4. Inspeccionar y lubricar las bombas de lodos y verificar (que se encuentren libres de desechos) y que se encuentren alineadas correctamente
5. Limpiar los intercambiadores de calor y ajustar todas las conexiones de los tubos.
6. Ajustar y lubricar el sistema de mezclado del reactor, sea mecánico o de gas
7. Verificar que el sistema de calentadores (calderas) del reactor opere por lo menos 24 horas antes del llenado del reactor

El arranque del reactor puede dividirse en dos fases: preparación y operación.

#### 4.6.1.1 Preparación

Los primeros cuatro días, el reactor se llena al nivel mínimo de operación permitido alcanzando la temperatura de operación y el arranque del mezclado. Inicialmente, el reactor se llena con uno de los siguientes líquidos:

- Desecho de lodos activados sin espesamiento (antes de la adición del polímero)
- Efluente del sedimentador secundario (sin cloro)
- Efluente del sedimentador primario
- Una combinación lodo primario y lodo secundario

Los inóculos anaerobios no son necesarios para una puesta en marcha efectiva. La puesta en marcha del reactor generalmente requiere 45 días; sin embargo, el uso de inóculos reduce este tiempo entre siete y diez días.

#### Inóculo

En todos los reactores, es necesario que el volumen de lodo inoculado sea lo más grande posible, y que tenga suficiente actividad y adaptación a las propiedades específicas del agua residual. Es preferible la realización de una mezcla de diferentes fuentes con biomasa activa que emplear una sola (Weiland & Thomson, 1990), ya que la rapidez de arranque del reactor depende en gran medida de las propiedades de la biomasa microbiana del inóculo.

Los factores microbiológicos que influyen en el arranque de un reactor anaerobio son:

- Grupo de bacterias dominantes (hidrolíticas, acidógenas, acetógenas y metanógenas) y actividad bioquímica
- Velocidad de crecimiento de las especies metanógenas
- Coeficiente de rendimiento de la biomasa
- Velocidad de adaptación de las bacterias sobre las propiedades del agua residual.
- Capacidad para la excreción de polisacáridos (granulación, biopelícula)

Para el logro de un rápido desarrollo de cultivo de bacterias, es necesario el control de los siguientes parámetros ambientales: la temperatura, la cual se ubica idealmente en el intervalo de 35 a 37 °C; el pH, de 7.0 a 7.2; concentración de nutrientes para mantener un balance DQO:N:P (demanda química de oxígeno, nitrógeno y fósforo) en la proporción de

100: (10-1) : (5-1), pero cuidando que los niveles de amonio no excedan a 1000 mg L<sup>-1</sup>. Además se agregan elementos traza como fierro, níquel, cobalto y molibdeno en caso de deficiencia, debido a que son esenciales para el desarrollo de las bacterias metanógenas. En la Tabla 4.2, se muestran los intervalos de concentraciones de los elementos traza adecuados para un sistema de tratamiento anaerobio. Los valores propuestos son variables debido a la influencia que ejercen ciertos contaminantes en el agua residual, como los sulfatos, que al reducirse a sulfuros forman precipitados metálicos. La adición de micronutrientes metálicos en un ligero exceso ocasionalmente es conveniente durante el arranque.

### Inoculación

La selección de una fuente apropiada de inóculo es importante para la obtención de un arranque rápido y la disminución del tiempo requerido para la formación inicial de la biopelícula o el grano. Si es posible, debe utilizarse una flora bacteriana adaptada al agua residual de interés. Si esto no es posible, el reactor puede inocularse con una mezcla de varios inóculos para el crecimiento y homogeneización de la comunidad bacteriana.

La Tabla 4.3 presenta diferentes fuentes de inóculo, así como su actividad metanógena y concentraciones comunes de sólidos suspendidos volátiles.

### Volumen conveniente para el inóculo de reactores anaerobios

No hay reglas claras para la estimación del volumen conveniente para el inóculo de reactores anaerobios. Un intervalo entre un 10 y un 30 por ciento del volumen del reactor se considera aceptable. En general entre más inóculo se utilice, mayor es la carga de arranque.

### Carga del reactor

La velocidad de carga orgánica es inicialmente de aproximadamente 0.16 kg de sólidos volátiles m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup> (0.01lb sólidos volátiles d<sup>-1</sup> ft<sup>-3</sup>) y se incrementa cada tercer día, previendo que los parámetros de control del proceso del reactor se encuentren dentro de los límites. La clave para el proceso de arranque está controlada por la velocidad de carga de los sólidos volátiles. La composición de los lodos de alimentación o proporción no es importante. La alimentación del reactor se efectúa durante un periodo de 24 horas si es posible, lo que reduce la velocidad de carga instantánea en el reactor y minimizar la formación de espuma.

Tabla 4.2 Micronutrientes requeridos para el arranque de un reactor anaerobio (Moreno Rodríguez, Espinoza Fuentes, & Briones Méndez , 2007)

Elemento	Concentración del metal mg L <sup>-1</sup>	
	A 10 g DQO L <sup>-1</sup>	A 50 g DQO L <sup>-1</sup>
Fe	0.5-20	3-100
Ni	0.05-3.0	0.3-15
Co	0.05-2.0	0.3-10
Mo	0.01-0.05	5-0.2

Tabla 4.3 Actividad metanogénica específica y concentración de diversos tipos de lodos (Moreno Rodríguez, Espinoza Fuentes, & Briones Méndez, 2007)

Fuente (tipo)	Actividad metanogénica específica (gCH <sub>4</sub> DQO gSSV <sup>-1</sup> *d <sup>-1</sup> )	Concentración típica de SSV en el lodo (gL <sup>-1</sup> )
Lodo granular	0.5-1.5	70-120
Biopelícula en filtro anaerobio	0.4-1.2	ND
Lodos domésticos estabilizados	0.02-0.2	15-40
Estiércol estabilizado	0.02-0.08	20-80
Lodo de fosa séptica	-0.07	10-50
Laguna anaerobia	0.03	30
Estiércol fresco de puerco	0.001-0.002	30-140
Sedimento laguna	0.002-0.02	20-50

ND: no determinado, debido a la dificultad de hacer un muestreo a la biomasa de este tipo de reactores.

Durante el arranque se analizan diariamente los parámetros que se muestran en la tabla 4.4 y se comparan con el intervalo de control para la detección de cualquier falla en el proceso. Cuando los parámetros de operación indiquen que el reactor se encuentra operando en estado estacionario, se inicia el aumento de carga. Se recomiendan incrementos de 0.6 kg de SV m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup>, hasta que se alcance la carga de diseño.

#### Protocolo de arranque de un reactor anaerobio utilizando inóculo

El arranque puede realizarse de la siguiente manera y de acuerdo con el desarrollo de la biomasa que se encuentra dentro del reactor. Una carga orgánica volumétrica baja, menor a 3 kg DQO m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup> se utiliza para el arranque. La actividad de la biomasa presente en el reactor aumenta cuando avanza su grado de adaptación al sustrato. La fracción de lodo ligero y floculento es arrastrada fuera del reactor. Además existe un aporte adicional como consecuencia de la erosión a la que está sujeta la cama de lodos. Cuando se cuenta con valores de actividad metanogénica del lodo del inóculo, se define con mayor confianza la carga de arranque:

$$M_{max} = V_i X A_{sp} \quad \text{Ecuación 4.7}$$

Donde:

$M_{max}$  = Cantidad de DQO que degrada diariamente el reactor como máximo teórico a 37°C (kg DQO d<sup>-1</sup>)

$V_i$  = Volumen del lodo en inóculo (m<sup>3</sup>)

$X$  = Concentración de sólidos suspendidos volátiles del lodo del inóculo (kg SSV m<sup>-3</sup>)

$A_{sp}$  = Actividad metanogénica específica del inóculo a 37 °C (kg CH<sub>4</sub>-DQO kg SSV<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>)

Este cálculo es sólo un límite teórico máximo, ya que se basa en la actividad metanogénica específica, la cual se realiza a 37 °C y con ácido acético como sustrato. Este valor se ajusta por la temperatura, de acuerdo a la ecuación:

$$A'_{SP} = \frac{A_{sp}}{e^{k(37-T)}} \quad \text{Ecuación 4.8}$$

Dónde:

$A'_{sp}$  = Actividad buscada a la temperatura en °C

$k$  = Entre 0.1 y 0.07 para el intervalo de 10 a 40 °C

Tabla 4.4 Monitoreo del reactor (Water Environment Federation , 2008)

Localización de la muestra						
Parámetro	Unidades	Método de ensayo	Intervalo de control	Frecuencia	Lodos alimentados	Lodos recirculados <sup>3</sup> o lodos estabilizados
Temperatura <sup>1</sup>	°C (°F)	Medidor	32-38°C (90-100°F)	Diario		x
Ácidos volátiles (AV)	mg L <sup>-1</sup>	5560C4	50-330	Diario		x
Alcalinidad (Alc)	mg L <sup>-1</sup>	23204	1500-5000	Diario	x	x
Relación AV:Alc	(ninguna)	Cálculo	0.1 a 0.2	Diario	N/A	N/A
pH	Unidades de pH	Medidor	6.8-7.2	Diario	x	x
Sólidos totales <sup>2</sup>	%	2540B4	(registro)	Diario	x	X
Sólidos volátiles <sup>2</sup>	%	2540E <sup>4</sup>	(registro)	Diario	x	X
Flujo <sup>2</sup>	Litros (galones)	Medidor	(registro)	Diario	x	X
Producción de gas	Ld <sup>-1</sup>	Medidor	749.127 a 998.836 L kg <sup>-1</sup> de sólidos volátiles destruidos	Diario	Sistema de gas	Sistema de gas
Composición del gas (CO <sub>2</sub> )	%	Analizador de gas	CO <sub>2</sub> menos de 35%	Diario	Sistema de gas	Sistema de gas

<sup>1</sup>Temperatura del reactor mesofílico. Las temperaturas a las cuales opera el reactor termofílico varían dependiendo el diseño.

<sup>2</sup>Medir separadamente para todos los lodos alimentados: el flujo, el contenido de sólidos totales y volátiles.

<sup>3</sup>Tomar la muestra antes del punto de entrada del lodo crudo al reactor.

<sup>4</sup> Métodos estándar (APHA et al., 2005)

También se considera que no toda la DQO de entrada es biodegradable, por lo que la fracción orgánica inerte no debe tomarse en cuenta. El seguimiento del arranque se controla midiendo los parámetros de interés.

#### 4.6.2 OPERACIÓN DEL REACTOR

Dos criterios que determinan la capacidad del reactor para el tratamiento de los lodos, son: (1) el TRS y (2) la tasa de carga de los sólidos volátiles. Estos criterios determinan la cantidad de alimento que los microorganismos estabilizan y el tiempo disponible para que los microorganismos consuman este alimento. Para concentraciones de sólidos alimentados abajo

del 3 por ciento, la capacidad del proceso se encuentra limitada por el tiempo de retención de sólidos. A concentraciones arriba del 3 por ciento, la capacidad del proceso se afecta por la tasa de carga de los sólidos volátiles.

Para un reactor de alta tasa con buen mezclado los rangos típicos de TRS son de 15 a 20 días. Con tiempos de retención menores (15 días), los organismos formadores de metano no se reproducen suficientemente rápido y no se alcanza la sustitución de los que se retiran en la purga. Tiempos cortos de retención también reducen la capacidad buffer del sistema (capacidad para neutralizar ácidos volátiles). Los factores que acortan los tiempos de retención

incluyen el bombeo de lodos diluidos y una acumulación excesiva de arena y espuma en el reactor. El envío de lodos al reactor con la concentración de lodos más alta de acuerdo al diseño, incrementa el tiempo de retención disponible y reduce los requerimientos de calor.

La tasa de carga orgánica para un reactor con buen mezclado y calentamiento se encuentran en el rango de 1.6 a 3.2 kg de sólidos volátiles  $m^{-3} d^{-1}$  (0.1 a 0.2 lb de sólidos volátiles  $ft^{-3} d^{-1}$ ). La tasa de carga orgánica típicamente controla el proceso de estabilización anaerobia. Una sobrecarga orgánica es una carga de sólidos volátiles que excede los límites diarios por más del 10 por ciento.

### Retiro o purga de lodos del reactor

Los lodos se retiran del reactor primario de lodos inmediatamente antes de la alimentación de los lodos crudos, lo que previene un corto circuito. En reactores con área de descarga se efectúa para

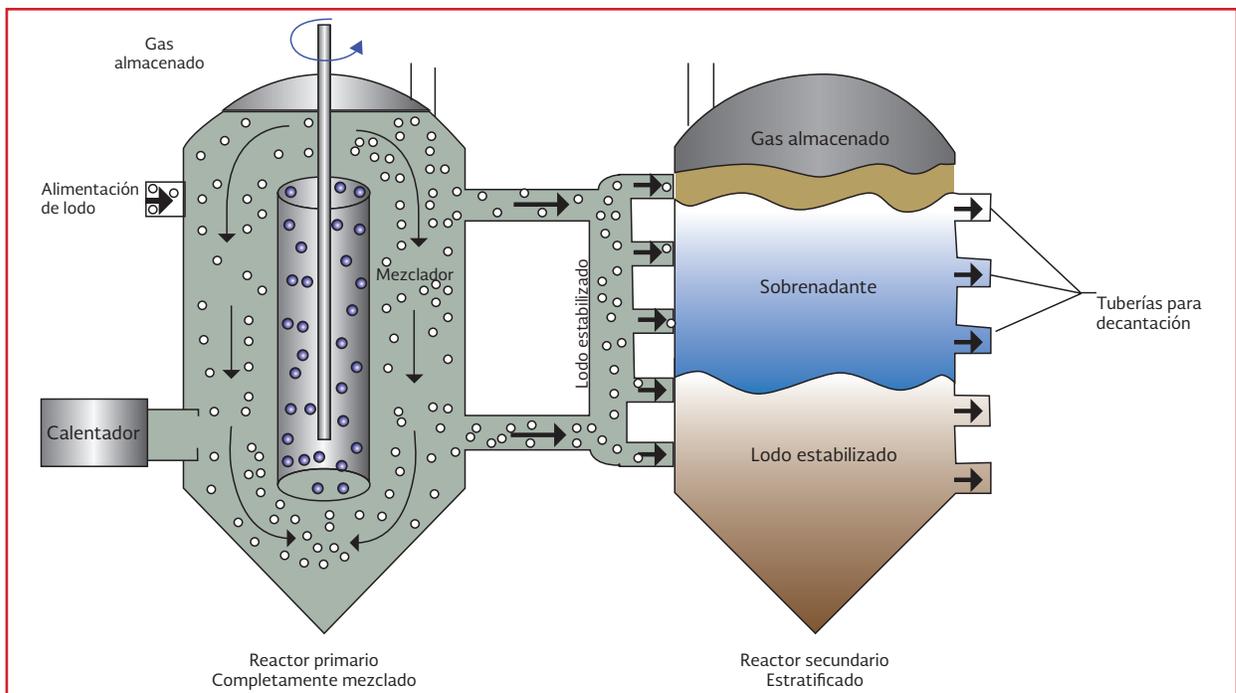
que la alimentación y descarga de los lodos se realice a la misma velocidad y simultáneamente.

Los lodos se purgan o retiran por lo menos una vez al día, lo que evita una caída repentina en la población activa de microorganismos, así como una perturbación en la relación AV : ALC del reactor, lo cual afecta la capacidad buffer del sistema. El reactor primario se encuentra regulado para su descarga al reactor secundario o al tanque de almacenamiento de los lodos estabilizados a medida que se añaden lodos crudos (ilustración 4.22). Los lodos se retiran de los siguientes puntos:

- La parte inferior del reactor
- La estructura de desbordamiento
- Algún punto dentro del reactor bien mezclado

Una ventaja de la remoción de los lodos de la parte inferior del reactor es que se remueve la arena que se acumula en el fondo del reactor.

Ilustración 4.22 Esquema de la estabilización anaerobia en dos etapas



Si es posible, la remoción de los lodos se hace periódicamente.

Es importante la consideración de que, debido a que la estabilización anaerobia destruye los sólidos volátiles, la concentración de los biosólidos removidos del reactor sea menor que la concentración de alimentación.

### **Decantación o retiro del sobrenadante del reactor**

La decantación se usa para el incremento de la concentración de los lodos estabilizados. Debido a que la decantación requiere un nivel del líquido variable, esta solo puede efectuarse si el tanque del reactor se encuentra equipado por bombas para el retiro en lugar de hacerlo por gravedad usando un nivel estático del líquido. La decantación también requiere que el reactor contenga arreglos para la separación de los sólidos pesados del sobrenadante. Debido a que los arreglos incluyen una mezcla discontinua en el reactor, este método no es recomendado para reactores primarios. El reactor secundario generalmente se mezcla o calienta varias horas o días antes del inicio de la decantación.

La decantación se controla dentro de un rango estrecho de niveles de líquido. La clave para que esto suceda es un retiro lento y un llenado lento. Si el reactor secundario no incluye almacenamiento de gas, el tanque se equipa con válvulas de decantación y tubos con al menos cuatro válvulas que están localizadas en el intervalo de 4.72 cm a 7.09 cm por debajo del nivel superior del agua.

La decantación en un reactor anaerobio incluye los siguientes pasos:

1. Determinar el nivel del líquido del reactor secundario y verificar que un volumen adecuado se encuentre disponible para la decantación. El volumen de decantación debe ser siempre el mismo para el aseguramiento de un tiempo de retención uniforme
2. Colectar una muestra para medir la velocidad de sedimentación de lodo estabilizado. Se registran los resultados cada 30, 60 o 90 minutos, dependiendo de las características de sedimentación de los lodos
3. Basado en los resultados de sedimentación, se determina si el reactor secundario puede ser decantado con éxito. Los valores de sedimentación varían en cada planta y se determinan de acuerdo al volumen y la calidad del decantado
4. Permitir que el contenido del reactor secundario sedimente de 6 a 8 horas después de que se apaguen los sistemas de mezclado y calentamiento de lodos
5. Abrir lentamente la válvula de decantación más baja o inferior y colectar una muestra del líquido decantado después de 10 minutos de flujo continuo. Se cierra la válvula y se efectúa un análisis de centrifugado (15 minutos) o una prueba de microondas a la muestra para la determinación de la concentración aproximada de sólidos totales
6. Seguir abriendo, recolectar muestras, y cerrar las válvulas de decantación hasta que se tenga identificada la válvula que descarga el líquido decantado con la menor concentración de sólidos totales
7. Continuar el muestreo del líquido decantado cada 20 minutos para

determinar la calidad y reducir la recirculación de los lodos estabilizados a la planta de tratamiento

8. Cuando se retire todo el sobrenadante, cerrar todas las válvulas de decantación y se reinician los sistemas de calentamiento y mezcla

### Apagado

El apagado del reactor debe planearse cuidadosamente. Previo al apagado se revisa que las válvulas de descarga de presión y vacío operen correctamente lo que evita daños en la cubierta del reactor. Por lo menos 5 semanas antes del apagado, se inicia una reducción gradual en la carga de sólidos volátiles en el reactor, mientras que la tasa de carga de sólidos volátiles para los reactores restantes en línea, se incrementa y su nivel de líquido se mantiene tan alto como sea posible para la obtención del máximo tiempo de retención hidráulico.

El manteniendo del máximo TRH, minimiza los trastornos biológicos causados por la carga alta de sólidos volátiles. La relación ácidos volátiles / alcalinidad (AV: ALC) en los reactores en línea debe ser monitoreada diariamente y los resultados publicados en un formato de gráficos de tendencia para la evaluación de los efectos del incremento de las cargas de sólidos volátiles. Si los cambios en la relación son de más del 30%, el exceso de carga de sólidos volátiles se desvía a un tanque de sólidos, lo que evita una desestabilización del proceso.

Por lo menos una semana antes de que empiece el ciclo de vaciado, el reactor no se alimenta y se modifica el ciclo de operación como se describe a continuación:

- Cerrar la válvula de llenado del reactor
- La válvula para la descarga de los lodos estabilizados permanece cerrada
- Apagar las bombas de agua de calentamiento de los lodos
- Las bombas de recirculación de los lodos permanecen en operación, pero el intercambiador de calor sale de operación
- El mezclado de los sólidos permanece en operación
- Cerrar todas las válvulas del cabezal del gas del reactor para aislarlo del cabezal común de calentamiento

La alimentación discontinua y el calentamiento discontinuo del reactor reducen significativamente la producción de gas. Si es necesario se vacía el reactor, y se incluyen los siguientes pasos adicionales:

- Mezclado discontinuo
- Adicionar gas nitrógeno al espacio que ocupa el gas en el reactor para desplazarlo a través de las válvulas de descarga de presión. El reactor es un espacio confinado y la limpieza para su mantenimiento o actividades de construcción deben ser realizadas de acuerdo con los contratistas o un protocolo utilizado para la seguridad de espacios confinados. La aplicación de un gas inerte es efectivo para el purgado si se requiere una entrada rápida al reactor. La aplicación de gas inerte desplaza gases explosivos, pero no genera una atmósfera segura para la entrada de personal, por lo que es obligatoria la ventilación con aire
- Monitorear el flujo de gas usando un sensor de monitoreo remoto

## 4.7. PARÁMETROS QUE DEBEN CONTROLARSE PARA EVITAR FALLAS EN LA OPERACIÓN DEL REACTOR

Las cuatro causas básicas de fallas del reactor anaerobio son: sobrecargas hidráulicas, sobrecargas orgánicas, estrés térmico y sobrecargas tóxicas. Las sobrecargas hidráulica y orgánica ocurren cuando las tasas de carga hidráulica o de carga orgánica exceden más del 10 por ciento por día. Las condiciones de sobrecarga se controlan por medio del manejo de la alimentación del reactor y del aseguramiento de que el volumen efectivo del reactor no se disminuya por la acumulación de arena o un inadecuado sistema de mezclado. La alimentación del reactor anaerobio se controla mediante una operación adecuada de los flujos o corrientes de los sedimentadores y de los espesadores para el aseguramiento de la concentración de los lodos alimentados.

En el evento de falla en el reactor, una estrategia efectiva de control incluye los siguientes pasos:

1. Paro o reducción de la alimentación de los lodos
2. Determinar la causa del desequilibrio
3. Corregir la causa del desequilibrio
4. Controlar pH hasta que el tratamiento vuelva a la normalidad

Si únicamente un reactor se encuentra afectado, la carga en las unidades restantes se incrementa cuidadosamente para permitir que la unidad alterada se recupere. Si la sobrecarga afecta a varias unidades, se reduce la alimentación de lodo, pero se requiere de una alternativa para el manejo del exceso de lodos, como por ejemplo, su transporte a otra planta de tratamiento, sitio de

almacenamiento temporal o una estabilización química y un método de disposición final.

### 4.7.1 CONTROL DE TOXICIDAD

Los procesos anaerobios son sensibles a ciertos compuestos, tales como sulfuros, ácidos volátiles, metales pesados, calcio, sodio, potasio, oxígeno disuelto, amoníaco y compuestos orgánicos clorados. La concentración inhibitoria de una sustancia depende de muchas variables, incluyendo el pH, la carga orgánica, la temperatura, la carga hidráulica, la presencia de otros materiales y la relación de la concentración de sustancias tóxicas con respecto a la concentración de la biomasa. En la Tabla 4.5, Tabla 4.6 y Tabla 4.7 se muestran las concentraciones de diferentes compuestos que afectan al proceso.

Para la mitigación de la toxicidad de los metales pesados se adiciona sulfuro de sodio o férrico o sulfuro ferroso. Los metales tóxicos precipitan como sulfuros debido a que los sulfuros de metales pesados tóxicos tienen baja solubilidad y son menos solubles que el sulfuro férrico. El cloruro férrico se usa para el control de las concentraciones de sulfuros ya que forma un precipitado de sulfuro férrico. Se presenta una disminución en el pH por el uso excesivo de estos productos.

### 4.7.2 FORMACIÓN DE ESPUMA EN EL REACTOR

La formación de espuma en el reactor consiste en finas burbujas de gas atrapadas en una matriz semilíquida con una gravedad específica de 0.7 a 0.95. Las burbujas de gas se generan por encima de la capa de lodos y son atrapadas una vez formadas. La formación de espuma ocurre con frecuencia, se considera en exceso si bloquea los tubos o escapes del reactor. Una formación

de espuma excesiva causa pérdidas del volumen activo del reactor, daños estructurales, derrames y daños al sistema de manejo del gas, así como mal olor y condiciones antiestéticas.

La causa más común de la formación de espuma en el reactor es la sobrecarga orgánica, que produce ácidos grasos volátiles que se convierten en metano. Los formadores de ácido (los cuáles liberan dióxido de carbón) trabajan mucho más rápidamente que los microorganismos formadores de metano. Como resultado se incrementa el dióxido de carbono que aumenta la formación de espuma.

Los factores que contribuyen a la sobrecarga orgánica son:

- Alimentación discontinua del reactor
- Alimentación separada o mezcla inadecuada de lodos primarios y desecho de lodos activados
- Mezcla del reactor insuficiente o discontinua
- Cantidades excesivas de grasa o espuma en la alimentación del reactor (especialmente problemática si el reactor se alimenta por lotes)

Tabla 4.5 Efecto del nitrógeno amoniacal en la estabilización anaerobia (Environmental Protection Agency (EPA), 1979)

Concentración de amoniaco, N <sup>a</sup> (mgL <sup>-1</sup> )	Efecto
50-200	Benéfico
200-1000	No tiene efectos adversos
1500-3000	Inhibitorio a pH 7.4 a 7.6
>3000	Tóxico

<sup>a</sup>Nitrógeno

Tabla 4.6 Concentración total de metales individuales requeridos para inhibir la estabilización anaerobia (Environmental Protection Agency (EPA), 1979)

Metal	Concentración en el contenido del reactor		
	Sólidos secos (%)	moles del metal Kg de sólidos secos <sup>-1</sup>	metal soluble (mg L <sup>-1</sup> )
Cobre	0.93	150	0.5
Cadmio	1.08	100	----
Zinc	0.97	150	1.0
Fierro	9.56	1710	----
Cromo			
6+	2.20	420	3.0
3+	2.60	500	----
Níquel	----	----	2.0

Tabla 4.7 Concentraciones estimulantes e inhibitorias de cationes metálicos ligeros (Environmental Protection Agency (EPA), 1979)

Cación	Concentración (mg L <sup>-1</sup> )		
	Estimulante	Moderadamente inhibitoria	Fuertemente inhibitoria
Calcio	100-200	2500-4500	8000
Magnesio	75-150	1000-1500	3000
Potasio	200-400	2500-4500	12000
Sodio	100-200	3500-5500	8000

La sobrecarga orgánica se reduce alimentando al reactor continuamente (o lo más frecuentemente posible), mezclando bien los lodos antes de alimentarlos, asegurando un buen mezclado en el reactor y reduciendo la cantidad de grasa o espuma en la alimentación del reactor.

Cuando la mezcla es discontinua o insuficiente resulta en sobrecarga orgánica, esto permite la formación de una capa de espuma en la superficie del líquido. Una mayor concentración de lodos alimentados con respecto al valor de diseño, ocasiona problemas en el sistema de mezclado.

Los bloqueos en las tuberías de gas contribuyen a la formación de espuma. Si se acumula agua en la tubería de gas, esta causa un bloqueo, el cual incrementa la presión en el espacio superior del reactor. Cuando se retira el bloqueo de la tubería se presenta una caída repentina en la presión que causa la formación de espuma en el reactor. Las tuberías se drenan frecuentemente para la prevención de esta situación.

Bacterias filamentosas como Nocardia, contienen una trampa de gas en su estructura y liberan agentes tenso activos que se acumulan en la superficie de las burbujas, causando formación de espuma. La formación de bacterias filamentosas generalmente se controla en el tratamiento del agua residual o en proceso de tratamiento de estabilización anaerobia.

El tipo de sólidos alimentados al reactor causa problemas de formación de espuma. La formación de espuma casi siempre se presenta cuando llegan al reactor solamente lodos activados de desecho, o una relación alta de DLA/lodo primario.

Un sistema de mezclado bien diseñado y operado, mezcla la espuma dentro del tanque. Si el reactor

opera sin mezcla por un tiempo largo (8 horas), la espuma sube y flota en la superficie del líquido. Después de que se reinicia el mezclado, la espuma es resuspendida dentro del líquido. El método básico de control de espuma es el mantenimiento del sistema de mezclado del reactor funcionando adecuadamente durante la operación.

#### 4.7.3 FRECUENCIA DE LA LIMPIEZA DEL REACTOR

La frecuencia de limpieza del reactor depende de factores como el cribado del afluente, la eficiencia de la remoción de arena, el mezclado y la configuración del reactor. La frecuencia normal de limpieza para el reactor cilíndrico es cada 2 a 5 años. Debido a la complejidad del procedimiento de limpieza, muchas empresas públicas operan los sistemas de estabilización anaerobia en modo “de falla” en el cual los reactores se limpian únicamente después de observar por varios años una disminución constante en el rendimiento.

Los procedimientos de limpieza toman en cuenta los peligros físicos conocidos como los gases tóxicos, la entrada a espacios confinados, y el manejo de materiales, sino también los desconocidos en sitios específicos, incluyendo los siguientes:

- Fallas en las válvulas y tuberías internas y externas
- Fallas en los techos del reactor o recubrimientos de las cubiertas
- Deterioro del concreto
- El tiempo de inactividad y costos asociados con reparaciones mecánicas o estructurales
- De una sobrecarga operacional del reactor

Antes de la limpieza se realiza el análisis de fallas de los sistemas mecánicos, eléctricos, de instrumentación y la implementación de reparaciones. El proceso de limpieza incluye también la limpieza química o mecánica del sistema de tuberías del reactor.

La limpieza se efectúa usando los procedimientos correctos de cierre y bloqueo enlistados en OSHA parte 333, 1910, eléctricos. En OSHA parte 146, 1910 se encuentran los procedimientos para el ingreso a espacios confinados. De acuerdo a esto, se toman las siguientes precauciones contra los siguientes peligros:

- Asfixia o sofocación. Deben hacerse pruebas del contenido de oxígeno y sulfuro de hidrógeno en la atmósfera y el monitoreo debe continuar durante la limpieza
- Explosión. Antes de que cualquier persona entre al reactor, este debe ser purgado con un gas no combustible, tal como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) o nitrógeno (N<sub>2</sub>), lo que elimina el riesgo de explosión
- Fugas. Antes de comenzar la limpieza, deben cerrarse, etiquetarse y bloquearse todas las válvulas conectadas al reactor. Se inspecciona la válvula de gas del reactor para la comprobación de la ausencia de fugas. Así mismo, se desconectan y etiquetan los circuitos que controlan el movimiento del equipo en el tanque.

Como el lodo estabilizado se retira del tanque, el aire puede ingresar a este a través de puertos de muestreo defectuosos, aberturas o válvulas de descarga de vacío, creando peligro de explosión. La condición más explosiva es creada

por una mezcla de metano-aire que contiene de 5 a 20 por ciento de metano. El monitoreo de condiciones explosivas se realiza continuamente durante la limpieza.

Después de la limpieza y antes de que el reactor funcione nuevamente, este se llena con una combinación de lo siguiente:

- Efluente del sedimentador primario (de preferencia)
- Efluente del sedimentador secundario (sin cloración)
- DLA sin espesamiento (antes de la adición del polímero)
- Una combinación de lodos crudos y desechos de lodos activados

No se recomienda la transferencia del contenido de un reactor sucio a un reactor limpio que va a reanudar su operación, porque la materia inerte en el material transferido forma depósitos en el reactor limpio.

Después de que el líquido en el reactor limpio alcanza el nivel mínimo de mezclado, se encienden las bombas de calentamiento de agua, las bombas de recirculación de lodos y el sistema de mezclado de los lodos. Cuando el contenido del reactor alcanza la temperatura de operación adecuada, se llena hasta su nivel de operación usando un programa de control de la carga de los sólidos volátiles. Después de 45 días empleando la temperatura de operación, el proceso se estabiliza y opera con la tasa de carga de los sólidos volátiles de diseño. El tiempo total para la limpieza eficiente y efectiva del reactor es aproximadamente de 90 días.

Sí un contratista realiza la limpieza del reactor, este define los alcances del trabajo de limpieza

y solicita a los jefes de la planta la siguiente información:

- Volumen del líquido del reactor
- Resultados analíticos del contenido del reactor con un buen mezclado para la definición de la composición de los lodos en términos de metales, nutrientes, sólidos totales y concentración de sólidos volátiles
- Sitios de disposición disponible (rellenos sanitarios, las lagunas, etc.) y requerimientos de estabilización del lodo del reactor
- Calidad y cantidad de las corrientes laterales del proceso de limpieza que retornan a la planta de tratamiento
- Responsabilidad para la apertura del reactor y la ventilación del gas del reactor, esto se realiza conjuntamente con el personal de la planta y el contratista
- Criterios de limpieza para el tanque y los tubos
- Características de la instalaciones de la planta, incluyendo las dimensiones del área de trabajo, el suministro de agua (caudal y presión) y el suministro de energía eléctrica (voltaje y amperaje)
- Cantidad, tipos y concentración de lodos para procesamiento durante el cierre del reactor
- Coordinación para la realización del bloqueo de válvulas de aislamiento y etiquetado de seguridad

Por parte del contratista el cumplimiento de lo siguiente es indispensable:

- La contratación de un seguro
- Por lo menos 5 años de experiencia en trabajos similares
- Programas de seguridad de la compañía

para este tipo de trabajos

- Documentación que verifique que la compañía y los empleados tienen la capacitación requerida para este tipo de trabajo
- Las referencias correspondientes

### **Formación y control de incrustaciones**

El proceso de estabilización produce precipitaciones cristalinas que afectan el sistema de estabilización y después el proceso de manejo de los sólidos. Los precipitados se acumulan en las tuberías y equipos de deshidratación, causando daños y taponamientos (ilustración 4.23), lo que precisa un mantenimiento costoso y tardado. Precipitados comunes incluyen estruvita, vivianita y carbonato de calcio. Los constituyentes que forman estos precipitados están presentes en lodos no estabilizados y son liberados durante el proceso de estabilización y se convierten a formas solubles que pueden reaccionar y cristalizarse. Su formación varía de sitio a sitio, dependiendo de la química de los lodos estabilizados y de los procesos de tratamiento. Los precipitados preferencialmente forman una superficie desigual o irregular. Las tuberías para lodos con revestimiento de vidrio y codos de radios grandes ayudan a minimizar su acumulación.

La formación de fosfato de amonio y magnesio ( $\text{Mg NH}_4\text{PO}_4 \cdot 6 (\text{H}_2\text{O})$ ), conocido como estruvita depende de la concentración relativa de estos constituyentes, así como del pH de los lodos estabilizados. La turbulencia durante el bombeo y la deshidratación libera dióxido de carbón del líquido incrementando el pH y creando condiciones favorables para la formación de estruvita. La formación de estruvita es controlada mediante la adición de sales de hierro (cloruro férrico o sulfato férrico) o polímeros

como agentes de dispersión. Las sales de hierro, se adicionan a los sedimentadores finales o reactores, reaccionan con el fosfato en la matriz del lodo para formar vivianita,  $Fe_3(PO_4)_2$ . Mientras algunos de los fosfatos disponibles forman vivianita, la relación remanente de fosfato: magnesio y amonio cambian afectando la reacción de estruvita. Los requerimientos de hierro son específicos para cada sitio, pero la acumulación de estruvita puede prevenirse con dosis de hierro de 7 a 14 Kg (15 a 30 lb), por tonelada de sólidos secos. Debido a que el hierro reacciona preferentemente con sulfuro de hidrógeno, lodos con concentraciones altas de sulfuro incrementan los requerimientos de hierro.

Los agentes dispersantes previenen la acumulación de estruvita pues interfieren con la formación de cristales. Un número de polímeros se encuentran disponibles en el mercado. Las dosis requeridas varían ampliamente. El agua que se separa de las centrifugas y de los filtros de banda se utiliza para la dilución del efluente y la reducción en la concentración de los compuestos incrustantes por debajo del umbral de precipitación.

La vivianita es el producto deseado cuando el hierro se adiciona para el control de la estruvita.

Ilustración 4.23 Deposición de estruvita en tubería



La vivianita es un sólido cristalino igual a la estruvita, que permanece principalmente en el lodo y no se acumula en los tubos y los equipos, a menos que el hierro sea adicionado directamente en la parte superior del intercambiador de calor; en este último caso, esta puede acumularse en el intercambiador de calor causando taponamientos e interfiriendo con la transferencia de calor.

Precipitados menos comunes incluyen varios complejos de calcio, tales como carbonato de calcio. Las causas de la incrustación por calcio no están claramente entendidas como los mecanismos de formación de incrustaciones por vivianita o estruvita.

Las precipitaciones que se forman en tuberías o en equipos se remueven mediante una combinación de lavado ácido, rascado y raspado.

#### 4.8. CONTROL Y PRUEBAS

Un muestreo correcto es esencial para el control efectivo de un proceso de estabilización anaerobia. Los gráficos de tendencia son una manera efectiva de rastreo de cambios en las características de alimentación del reactor o en la operación, así como para la predicción de una posible falla en el proceso. Estos se emplean para el control de los sólidos suspendidos volátiles, la alimentación diaria de sólidos totales, la relación AV : ALC, la Vd y la producción del gas. De acuerdo a los gráficos de tendencia, la velocidad de cambio de un constituyente individual es más significativa que un valor absoluto.

El control de la estabilización anaerobia se basa en la recolección de muestras de tres puntos: (1) alimentación del reactor, (2) lodos recirculados, y (3) sólidos estabilizados del proceso. Los puntos de muestreo se fijan en la construcción

del reactor. Cada reactor tiene un punto de muestreo para el afluente y otro para la descarga.

Las muestras para la evaluación del rendimiento, se recolectan de cada reactor que se encuentre en operación. En la Tabla 4.4 se enlistan los puntos de muestreo, la frecuencia y el análisis. Para la obtención de resultados exactos se siguen las siguientes recomendaciones para la toma y el análisis de las muestras:

- Recolección de una muestra representativa
- La realización inmediata del análisis de pH, evita una desviación en el pH debido a pérdidas de dióxido de carbono
- Todos los reactores deben muestrearse rápido y sucesivamente
- Todos los contenedores de las muestras deben lavarse antes y después de su uso
- Se refrigera la muestra en caso que no se analice inmediatamente.

Después de que las muestras se analizan, los resultados se comparan con datos de análisis previos para la verificación de que los datos se ubiquen dentro de rangos razonables. Si no existen datos previos se toman y analizan muestras adicionales para la confirmación de los resultados. Si los datos son razonables, los puntos de los nuevos datos se adicionan al análisis de tendencia existente para la medición del rendimiento total del reactor anaerobio. Si los gráficos de tendencias indican movimientos hacia los límites, se toman acciones correctivas. Una acción temprana previene que los parámetros del proceso se salgan del rango deseado. Sin embargo, un único punto de los datos mayor o menor no constituye una tendencia. La acción correctiva se basa en múltiples puntos de los

datos que indican un cambio continuo en el rendimiento del reactor.

#### 4.8.1 TEMPERATURA

Los microorganismos en el proceso de estabilización anaerobia requieren rangos de temperatura específica para su sobrevivencia y desarrollo. La estabilización prácticamente termina a los 10 °C (50 °F); sin embargo, los microorganismos son más efectivos en el rango mesofílico, de 30 a 38 °C (85 a 100 °F). Los reactores también operan a altas temperaturas en el rango termofílico, de 55 a 60 °C (131 a 140 °F). Independientemente de la temperatura de operación seleccionada, la temperatura del tanque no debe desviarse del valor por más de 0.6 °C (1 °F) por día. Cada grupo de microorganismos formadores de metano tiene una temperatura óptima de crecimiento. Si la temperatura fluctúa, ningún grupo de formadores de metano se desarrolla, no obstante se requiere una población estable para la optimización del proceso.

#### 4.8.2 POTENCIAL DE HIDRÓGENO

Los reactores operan en un rango de pH de 6 a 8, con un rango de operación deseada de 6.8 a 7.2. Si el pH cae debajo de 6, los ácidos volátiles no ionizados son tóxicos para los microorganismos formadores de metano. A valores de pH arriba de 8, el amoníaco acuoso no ionizado (amoníaco disuelto) es tóxico para los microorganismos formadores de metano. Estos valores clave de pH reflejan las constantes de ionización del amoníaco y del ácido acético.

El pH del contenido del reactor se controla por la cantidad de ácidos volátiles y alcalinidad.

### 4.8.3 ALCALINIDAD

La alcalinidad mide la capacidad de resistencia en cambios en el pH, también denominada capacidad buffer. Los bicarbonatos de calcio, magnesio y amonio son ejemplos de sustancias buffer que normalmente se encuentran en un reactor. El proceso de estabilización produce bicarbonato de amonio. Una alcalinidad total en el rango de 1 500 a 5 000 mg L<sup>-1</sup> es adecuada para la operación de un reactor con calentamiento. Como una regla, cuanto mayor es la alcalinidad, más estable es la estabilización. La alcalinidad permite al reactor el soporte de un incremento repentino en la carga orgánica sin alteración en el proceso.

### 4.8.4 ÁCIDOS VOLÁTILES

Los ácidos volátiles son subproductos intermedios de la estabilización. Las concentraciones típicas de ácidos volátiles en un reactor anaerobio se encuentran en el rango de 50 a 300 mg L<sup>-1</sup>, no obstante concentraciones mayores son aceptables si existe suficiente alcalinidad para el amortiguamiento del ácido.

### 4.8.5 RELACIÓN ÁCIDOS VOLÁTILES : ALCALINIDAD

La relación AV : ALC es un indicador del progreso de la estabilización y el balance entre la fermentación ácida y los microorganismos de fermentación de metano. En la ecuación 4.9 se muestra la relación AV: ALC.

$$AV:ALC = \frac{\text{Ácidos volátiles (mg L}^{-1}\text{)}}{\text{Alcalinidad (mg L}^{-1}\text{)}} \approx 0.1 \text{ a } 0.2$$

Ecuación 4.9

Donde:

AV : ALC = Es la relación ácidos volátiles - alcalinidad

Esta relación es un indicador excelente del proceso de estabilización. El control continuo de esta relación indica un problema antes de que ocurra un cambio en el pH. La relación debe mantenerse en el rango de 0.1 a 0.2.

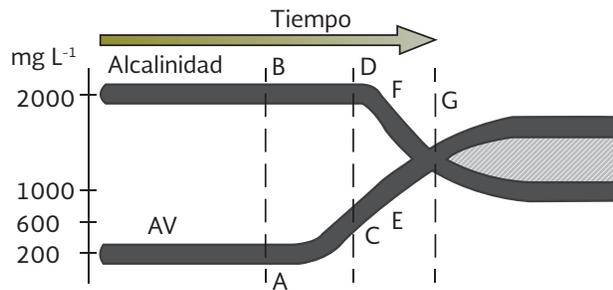
Las relaciones entre 0.3-0.4 indican fallas del sistema y requieren acciones correctivas, como la disminución de la carga de los sólidos volátiles del reactor de un rango de 1.6 kg m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup> a 1.2 kg m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup> (0.10 a 0.075 lb de sólidos volátiles ft<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup>), lo cual disminuye la alimentación de los lodos y la tasa de retiro en un 25 por ciento y se mantiene la temperatura interna de los lodos del reactor a 35 °C (95 °F), ± 1 grado.

Un incremento en la relación AV : ALC hasta 0.5 o más indica una falla en el proceso y el requerimiento de adición de alcalinidad. La dosis de alcalinidad adecuada se calcula usando la concentración de ácidos volátiles. La tasa de carga de los sólidos volátiles se disminuye de 1.6 kg m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup> a 0.8 kg m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup> (0.10 a 0.05 lb de sólidos volátiles ft<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup>), lo cual reduce aproximadamente en un 50 por ciento la alimentación de los lodos y las tasas de retiro.

Un incremento en la relación AV : ALC hasta de 0.8 o más indica una falla en el proceso con una disminución en el pH y una inhibición de los formadores de metano. Para que la relación AV : ALC llegue a 0.2 se requiere la adición de alcalinidad y la reducción de la carga de sólidos volátiles a 0.16 kg m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup> (0.01 lb de sólidos volátiles ft<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup>).

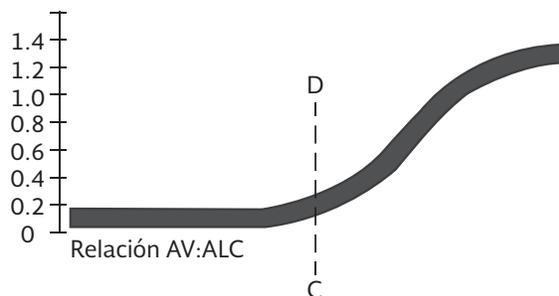
Ilustración 4.24 Secuencia de cambios en el reactor (Water Environment Federation, 2008)

1. Relación de los ácidos volátiles a la alcalinidad



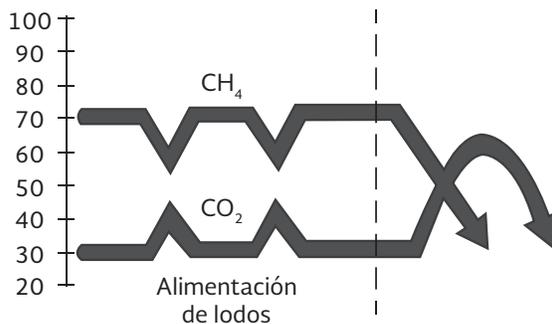
Esta gráfica muestra la operación de un reactor con una buena capacidad buffer (ácidos volátiles de 200 mg L<sup>-1</sup>, son bajos comparados con la alcalinidad de 2 000 mg L<sup>-1</sup>). En el punto A ocurre una falla que causa el incremento en los ácidos volátiles seguido de la disminución de la alcalinidad en el punto D. En el punto G, el reactor se acidifica.

2. Relación de los AV:ALC



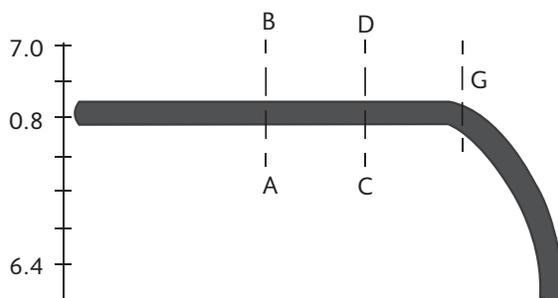
Este gráfico continúa con el mismo funcionamiento del reactor mostrando la relación ácidos volátiles: alcalinidad. El incremento en ácidos volátiles produce un incremento en la relación AV: ALC de 0.1 a 0.3, esto se puede observar en los puntos CD.

3. Relación del cambio en la relación de CO<sub>2</sub> a el metano (CH<sub>4</sub>) como resultado de "1"



La producción de metano inicia su disminución con un correspondiente incremento en el CO<sub>2</sub> cuando la relación AV:ALC llega a 0.5 en la gráfica anterior.

4. Relación del cambio de pH paracambiar en "1"



El pH no cambia en esta gráfica hasta que el reactor inicia la acidificación en el punto G.

En la ilustración 4.24 se muestra la relación entre alcalinidad, ácidos volátiles, producción de metano, producción de dióxido de carbono y el pH durante una falla en el reactor.

## 4.9. GUÍA DE SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

La tGuía de solución de problemas (Water Environment Federation, 2008) presenta los indicadores, las causas y posibles soluciones a los problemas comunes en el reactor.

## 4.10. MANEJO DE BIOGÁS

### 4.10.1 INTRODUCCIÓN

El gas del reactor, también conocido como biogás, se forma durante la última etapa de estabilización, cuando los microorganismos convierten los ácidos orgánicos y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) a metano (CH<sub>4</sub>) y agua. La producción del gas está directamente relacionada

a la cantidad de sólidos volátiles destruidos en la estabilización. El rango de valores típicos es de 0.75 a 1.1 m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup> (12 a 18 ft<sup>3</sup> lb<sup>-1</sup>) de sólidos volátiles destruidos. La cantidad total de sólidos volátiles destruidos se calcula por la diferencia entre la cantidad de sólidos volátiles a la entrada y salida del reactor.

La producción de biogás depende de la destrucción de los sólidos volátiles. La cantidad de gas se mide rutinariamente para la determinación de la producción promedio en función de la destrucción de sólidos volátiles. La producción de biogás es un indicativo del estado y del rendimiento del proceso de estabilización.

### Características del gas del reactor

El biogás generado en el proceso de estabilización anaerobia se compone principalmente de metano (60 a 65 por ciento) y dióxido de carbono (35 a 40 por ciento). En la tabla 4.9 se resumen las características físicas y químicas del metano, que confieren el valor de combustible al biogás.

Tabla 4.8 Guía de solución de problemas (Water Environment Federation, 2008)

Indicadores	Causa probable	Checkar o monitorear	Soluciones
<b>Cubiertas fijas del reactor</b> La presión del gas es superior a la normal, durante climas muy fríos	Las válvulas reguladoras de presión están atascadas o cerradas	La carga en las válvulas reguladoras de presión	Si la congelación es un problema, se aplica una capa de grasa impregnada ligeramente con sal de roca para hacer un efecto de palanca y resorte
La presión del gas es inferior a la normal	La válvula reguladora de presión u otros dispositivos de control de la presión están abiertos y atascados  Fugas en la tubería de gas o en la manguera	Las válvulas reguladoras de la presión y los dispositivos reguladores de presión  La tubería de gas y/o manguera	Operar manualmente los equipos reguladores de presión y de vacío, y remover la corrosión si se presenta e interfiere con la operación  Reparar las tuberías rotas
Fugas alrededor de las cubiertas de metal	Alteración de los tornillos de anclaje o el material de sellado	Los tornillos y el material de sellado	Reparar el concreto con material de reparación de concreto de sellado rápido. Aplicar nuevo material de sellado en el área de fugas utilizando material de plasticidad durable

Guía de solución de problemas (Water Environment Federation, 2008)

Fuga de gas a través de la cubierta del reactor	Fallas en la fijación	Aplicar una solución de jabón en el área donde se sospecha hay fuga y checar la formación de burbujas	Reemplazar los sujetadores defectuosos
---	-----------------------	---	--

Indicadores	Causa probable	Checar o monitorear	Soluciones
<b>Cubiertas flotantes del reactor</b>			
Inclinación de la cubierta; sin espuma o con poca espuma alrededor de los bordes	Distribución del peso de forma desigual	Los pesos	Nivelar la cubierta con un lastre móvil. Ajustar la posición hasta que la cubierta quede nivelada. Si no se tiene, utilizar bolsas de arena
	Almacenamiento de agua condensada o agua de lluvia dentro del domo	Revisar los bordes del alrededor de la cubierta de metal	Usar un recipiente u otros medios para remover el agua. La cubierta en ocasiones requiere reparaciones importantes para eliminar las fugas
	Acumulación de hielo en la superficie	Revisar el hielo en la cubierta	Remover manualmente la acumulación de hielo
<b>Cubiertas porta gas</b>			
Las guías y/o rodillos de la cubierta causan atasco en la cubierta	Acumulación de espuma, desplazamiento restringido	Verificar la cantidad de espuma acumulada	Ver la solución de problemas en cubiertas flotantes, tema 1
Atasco en la cubierta, a pesar de que los rodillos y guías están libres	Daño o atasco interno de las guías o cables de sujeción	Los canchillos inferiores de la cubierta. Abrir la escotilla y ventilar al reactor. Desde el exterior del reactor realizar una inspección interna de los equipos utilizando aparatos de respiración y de iluminación antideflagrante. Si el movimiento en la cubierta es restringido, esta debe asegurarse usando una grúa o por otro método prevenir daños a las paredes laterales de la estructura	Drenar y reparar, sosteniendo la cubierta en una posición fija si es necesario
Inclinación de la tapa, acumulación de espuma gruesa y pesada alrededor de los bordes	La acumulación de espuma en un área causa exceso de fricción	Sondear con un palo para determinar la acumulación de espuma	Usar agentes químicos o desgrasantes, tales como ayudantes de la estabilización o San fax, para ablandar la espuma. Rocíe con agua. Cada 2 o 3 meses o más frecuentemente si es necesario
	Las guías o los rodillos están desajustados	La distancia entre las guías o rodillos y la pared	Suavizar la espuma. Reajustar los rodillos para eliminar atascos en la estructura
La presión de gas es superior a la normal, durante climas muy fríos	La acumulación de agua en la tubería de gas	Encontrar y eliminar los puntos de acumulación de agua; vaciar todas las trampas	Proteger la tubería del clima, cubriendo y aislando las cajas de desbordamiento
	Las válvulas reguladoras de presión están atascadas o congeladas	La carga en las válvulas reguladoras de presión	Si la congelación es un problema, aplicar una capa de grasa impregnada ligeramente con sal de roca

Guía de solución de problemas (Water Environment Federation, 2008)

Indicadores	Causa probable	Checar o monitorear	Soluciones
La presión de gas es inferior a la normal	La válvula reguladora de presión u otros dispositivos de control de la presión se encuentran abiertos y atascados  Fugas en la tubería de gas o en la manguera	Las válvulas reguladoras de presión y otros dispositivos de control de la presión  Las tuberías de gas y/o las mangueras	Operar manualmente los equipos reguladores de presión y de vacío, y remover la corrosión si se presenta e interfiere con la operación  Reparar cuando sea necesario
<b>Mezclado de sólidos - Mezcladores mecánicos</b>			
Corrosión por partes expuestas a la intemperie/ gases corrosivos	Falta de pintura o protección anticorrosiva	Verifique presencia de corrosión, óxido o metal expuesto	Prepare y pinte las superficies  Aplique una capa protectora
El desgaste del engranaje	Una lubricación inadecuada  El equipo se encuentra mal alineado	El amperaje excesivo del motor; el ruido excesivo del motor; las vibraciones y evidencias de desgaste en el eje	Verificar el tipo y la cantidad correcta de lubricación en literatura del fabricante  Corregir los desequilibrios causados por la acumulación de material en las piezas móviles internas
Presencia de fugas en el sello del eje	El embalaje está seco o desgastado	Fugas de gas con la aplicación de una solución de jabón o por el olor a gas	Reacondicionar, siguiendo las instrucciones del fabricante  Reemplazar el empaque, si no es posible cuando la unidad está operando, durante el tiempo que el tanque está vacío
Desgaste en partes internas	Presencia de arena o desalineación	Realizar observación visual cuando el tanque se encuentre vacío. Comparar con los planos de tamaño original del fabricante. El amperaje del motor disminuye a medida que las partes móviles se desgastan	Reemplazar o reconstruir. La experiencia determina la frecuencia de esta operación
Desequilibrio de las partes internas debido a la acumulación de desechos en las partes móviles (los impulsores o turbinas de diámetros grandes, son los más afectados)	La molienda y/o el cribado son deficientes	La vibración del motor, el calentamiento del motor, el amperaje excesivo y el ruido	Invertir la dirección del mezclado  Parar e iniciar alternativamente  Limpiar el tanque y las partes móviles
Interrupción de la fuente de alimentación	Debido a una temperatura ambiente alta	Amperaje excesivo; conexiones de la alimentación corroídas, o sobre calentamiento que causa expulsión de circuitos	Proteger al motor, cubriéndolo con una carcasa de ventilación

Indicadores	Causa probable	Checar o monitorear	Soluciones
<p><b>Mezcladores de gas-mezcla de sólidos.</b></p> <p>Cuando el compresor se encuentra funcionando, se calienta y hace ruido excesivo</p>	<p>El nivel de lubricante es bajo</p> <p>La temperatura ambiente es alta</p> <p>La descarga de presión es alta</p> <p>La succión se encuentra obstruida</p>	<p>Revisar el nivel del lubricante</p> <p>Revisar si hay una temperatura ambiente excesiva</p> <p>Revisar si el compresor tiene un desgaste excesivo</p> <p>Revisar la posición de las válvulas de descarga</p> <p>Revisar la posición de las válvulas de succión</p>	<p>Adicionar lubricante</p> <p>Suministrar ventilación si es necesario</p> <p>Ajustar la posición de las válvulas</p> <p>Retrolavado de las líneas</p>
<p>Taponamiento de las tuberías de alimentación de gas</p>	<p>Falta de flujo a través de la tubería de gas</p> <p>Basura en la tubería de gas</p>	<p>Identificar bajas temperaturas en la tubería de alimentación de gas o bajas presiones en el manómetro o medidores de presión</p>	<p>Enjuagar las tuberías de gas con agua</p> <p>Limpiar las tuberías de alimentación y las válvulas</p>

**Sistema de gas del reactor.**

<p>Fugas de gas en la parte superior de las válvulas reguladoras de presión (PRV)</p>	<p>La válvula no se encuentra sellada correctamente o se encuentra abierta y atascada</p>	<p>Revisar que en el manómetro que la presión del gas del reactor sea normal</p>	<p>Remover las cubiertas de las (PRV) y el soporte de peso hasta que se asiente adecuadamente. Limpiar e instalar un nuevo anillo si es necesario</p>
<p>El manómetro muestra que la presión del gas del reactor se encuentra arriba de la normal</p>	<p>Obstrucción o presencia de agua en las tuberías principales del quemador de gas</p> <p>Las PRV (válvulas de liberación de presión) del reactor están cerradas y atascadas</p> <p>Las válvulas que controlan la presión en las tuberías del quemador del gas residual están cerradas</p>	<p>Revisar el funcionamiento normal de todos los puntos, revisar las restricciones de las tuberías del quemador de gas, revisar que no haya taponamientos o que los dispositivos de seguridad no se encuentren atascados</p> <p>Que el gas no esté escapando</p> <p>Si los medidores de gas indican que se está produciendo gas en exceso, pero este no va a residuos del quemador de gas</p>	<p>Purgar con nitrógeno; drenar las trampas de condensado y checar las zonas bajas</p> <p>Remover la cubierta de las PRV y operar manualmente la válvula; limpiar la válvula.</p> <p>Abrir la válvula</p>
<p>El manómetro muestra que la presión del gas del reactor está por debajo de la normal</p>	<p>El retiro de los lodos fue demasiado rápido, causando un vacío dentro del reactor</p> <p>Demasiada adición de alcalinidad</p>	<p>Revisar que el interruptor de vacío esté funcionando adecuadamente</p> <p>Un repentino incremento de CO<sub>2</sub> en el gas del reactor</p>	<p>Parar la descarga del reactor y cerrar todas las salidas de gas del reactor hasta que la presión regrese a la normal</p> <p>Parar la adición de alcalinidad</p>
<p>El congelamiento de las PRV</p>	<p>Las condiciones de invierno</p>	<p>Remover la cubierta de las válvulas e inspeccionar las PRV</p>	<p>Posibles remedios:</p> <p>Colocar barriles de ventilación sobre las válvulas con una bombilla en el interior con luz antideflagrante</p>

Guía de solución de problemas (Water Environment Federation, 2008)

Indicadores	Causa probable	Checkar o monitorear	Soluciones
Las válvulas reguladoras de presión no abren cuando incrementa la presión	El diafragma es inflexible  b. Ruptura del diafragma	Aislar la válvula y abrir la cubierta	Si no se encuentran fugas (usar solución de jabón), el diafragma se lubrica y amortigua usando aceite La ruptura del diafragma requiere remplazo
La llama del quemador de gas residual es amarilla	El gas tiene calidad deficiente, con alto contenido de CO <sub>2</sub>	Revisar la existencia de un alto contenido de CO <sub>2</sub>	Revisar la concentración de la alimentación de sólidos; si se encuentra diluida, se incrementa
La llama es menor a la usual	Uso elevado de gas.  Fuga de gas de la tubería del reactor o dispositivos de seguridad  Baja producción de gas debido a problemas en el proceso	Revisar la tasa de producción del gas con respecto a su uso  Inspeccionar la colección del gas y los sistemas de distribución, empezando en el punto principal de colección del reactor	Esto puede ser normal  Verificar las fugas de gas; si se encuentran se aíslan y reparan
El quemador de gas residual no enciende	La llama del piloto no enciende  En las tuberías principales del quemador de gas o en las tuberías piloto del gas natural existen obstrucciones o agua  Las válvulas reguladoras de presión se encuentran cerradas debido a un mal funcionamiento	La presión en la línea piloto del quemador del gas residual  Las trampas del condensador  La válvula reguladora de la presión en el quemador de gas	Volver a encender la tubería piloto de gas natural  Drenar las trampas del condensado  Abrir las válvulas y verificar y ajustar para que las válvulas se abran cuando la presión sea de alrededor de 0.06 Kpa (1/4" de columna de agua)
Fallas en el medidor de gas	Desechos en la tubería  Fallas eléctricas	La condición de las tuberías de gas  Suciedad o desgaste de las piezas	Aislar el reactor; enjuagar la tubería de gas con agua, moviendo del reactor al punto de uso  Reemplazar las piezas desgastadas
<b>Intercambiadores de calor externo-control de la temperatura de los lodos.</b> Baja tasa de alimentación de los lodos a través del intercambiador	La supresión de temperaturas altas, provoca que se apague la bomba, evitando que se aglomeren los sólidos en el intercambiador	La presión y la temperatura del agua Revisar la temperatura alta del circuito del calentador de agua caliente y se verifica que el ajuste de temperatura sea el correcto	Abrir las válvulas o bombas cerradas Revisar y remover la obstrucción en la bomba de los sólidos Revisar y remover la obstrucción en el intercambiador de calor Revisar las válvulas de control de temperatura para una operación adecuada

Indicadores	Causa probable	Checar o monitorear	Soluciones
La bomba de recirculación no se encuentra en marcha; los circuitos de potencia están en buen estado	Supresión de temperatura en el circuito, para prevenir el bombeo de agua muy caliente a través de los tubos	Revisar la ausencia de presión en la tubería de los sólidos	Permitir el enfriamiento del sistema Revisar el control de la temperatura en los circuitos
La temperatura de los sólidos no se mantiene a un nivel normal (a la baja)	Taponamientos por sólidos en el intercambiador de calor La tubería de recirculación de los sólidos se encuentra parcial o completamente taponeada	Revisar la presión en la entrada y salida del intercambiador Revisar la presión en la entrada y salida de la bomba	Abrir y limpiar el intercambiador de calor Limpiar la tubería de recirculación
Incremento en la temperatura de los sólidos	El control de temperatura no funciona adecuadamente	Revisar la temperatura del agua y ajustar el controlador	Si se encuentra arriba de 49°C (120°F), reducir la temperatura. Reparar o reemplazar el controlador
Lecturas de la temperatura inexactas	Las sondas tienen un corto circuito eléctrico o separaciones internas	Comparar con el termómetro	Dejar conectadas las sondas a dispositivos de lectura de salida; se sumergen en una cubeta de agua a la temperatura aproximada del reactor
La temperatura no se mantiene en un nivel fijo	Sobrecarga hidráulica	La concentración de los lodos alimentados	Incrementar la concentración de los lodos en el afluente
<b>Calentamiento interno-control de temperatura de los lodos</b> Baja tasa de alimentación de agua al intercambiador de calor	Bloqueo de aire en la tubería Válvula parcialmente cerrada	Que las lecturas de entrada y salida del medidor sean menores que la normal, pero iguales	Purgar la válvula y extraer el aire La válvula corriente arriba se cierra parcialmente
Mínima transferencia de calor entre el agua de entrada y la de salida	Revestimientos de los tubos	Medidores de temperatura en las tuberías de entrada y salida	Remover los revestimientos en los tubos de agua
Lodos apelmazados en la parte exterior del tubo del intercambiador de calor	Temperatura muy alta	El registro de las temperaturas	Remover la capa de sólidos Controlar la temperatura del agua a una temperatura máxima de 54°C (130°F)
Dépósitos en el interior de la tubería del intercambiador de calor	Temperatura muy alta	El registro de las temperaturas	Se controla haciendo un tratamiento químico al agua de repuesto de la caldera
<b>Tuberías y bombeo de los lodos</b> Presión errática en la succión y descarga de la bomba. La bomba hace sonidos inusuales	Taponamiento de la tubería de succión por arena, grasa o desechos	La succión de la bomba y la presión de descarga	Retrolavar la tubería con lodos calientes del reactor Usar limpiadores mecánicos Aplicar agua a presión Precaución: no exceder la presión máxima de trabajo de la tubería Adicionar aproximadamente 3.6 g L <sup>-1</sup> de fosfato de trisodio o un desengrasante comercial al agua

Guía de solución de problemas (Water Environment Federation, 2008)

Indicadores	Causa probable	Checar o monitorear	Soluciones
<b>Lodos estabilizados</b> Los lodos estabilizados son grises	Estabilización inadecuada Corto circuito o mezclado insuficiente	Lodo sin mezclar depositado en el fondo del tanque	Referirse a la guía de soluciones, mezcla de los lodos
Olor agrio	El pH en el reactor es demasiado bajo La segunda etapa de la estabilización no opera correctamente Sobrecarga del reactor	Revisar el pH a diferentes niveles Inspeccionar el contenido de CO <sub>2</sub> del gas Revisar la tasa de carga de los sólidos volátiles	Ajustar el pH usando cal u otro cáustico Dejar reposar al reactor  Reducir la velocidad de carga de los sólidos volátiles
No hay actividad biológica	Residuos altamente tóxicos en la alimentación del reactor, tales como metales o bactericidas	Producción de gas Analizar la muestra por espectrofotómetro o medios químicos	Vaciar el reactor y reiniciar la estabilización
<b>Decantación</b> Se observa espuma en el sobrenadante del reactor o tanque primario	Ruptura de la capa de espuma  Recirculación excesiva de gas	Revisar las condiciones de la capa de espuma  Carga de sólidos volátiles	De ser posible se retira el sobrenadante.  Esta condición puede indicar una sobrecarga orgánica en el reactor, por lo que es necesario reducir la tasa de alimentación
En el reactor o tanque primario se observan grumos y partículas de espuma	Rompimiento de la capa de espuma debido a un mezclado excesivo o producción de gas  Capa de espuma muy delgada	Observación a través de la ventana de la cubierta del reactor (el incremento inusual en la producción de gas es también un indicador)  Profundidad de la capa de espuma, medida a través de un orificio o un hueco entre la cubierta flotante y la pared del reactor	Disminuir el tiempo de mezclado, ajustando la alimentación de los lodos  Referirse a la guía de solución de problemas, capa de espuma
El sobrenadante del digestor o tanque primario es color gris o café	Estratificación inadecuada; lodos crudos en el tanque  El tiempo de estabilización es demasiado corto. La concentración de sólidos es muy baja o la capacidad de reactor se encuentra reducida debido a acumulación de arena y espuma  El balance ecológico del reactor esta trastornado d. Sobrecarga del reactor	Revisar el mezclado Tomar muestras a varias profundidades para detectar los lodos no digeridos. Revisar el gradiente de temperatura en el reactor Sondear el reactor para determinar depósitos de arena  Contenido de CO <sub>2</sub> ; comparar la producción de gas con la cantidad de sólidos volátiles en la alimentación. El promedio de la producción de gas es de 0.7 a 1m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> (12 a 16 ft <sup>3</sup> lb <sup>-1</sup> ) de sólidos volátiles destruidos	Incrementar el mezclado, la frecuencia de alimentación, o la recirculación  Ajustar la concentración de alimentación. Incrementar la mezcla o limpieza fuera del reactor  Reducir la velocidad de alimentación o incrementar el tiempo de retención por algunos otros medios

Indicadores	Causa probable	Checar o monitorear	Soluciones
El sobrenadante tiene un olor agrio	El pH del reactor es demasiado bajo Sobrecarga del reactor (olor a huevo podrido) Carga tóxica (olor a mantequilla rancia)	El pH del sobrenadante debe ser 6.8	Ajustar el pH usando cal u otro material cáustico. Reducir la carga de sólidos volátiles
<b>Capa o manta de espuma</b> El movimiento ondulado es ligero o ausente	El mezclador se encuentra apagado  Mezclado inadecuado  La manta de espuma es demasiado gruesa	Verificar el interruptor del mezclado o temporizador  Medir el grosor de la manta	Es normal si los mezcladores se ajustan con un temporizador. Si esto no ocurre y los mezcladores no se encuentran operando, revisar si hay un mal funcionamiento Considerar el incremento del tiempo de mezclado Referirse al inciso 4 de abajo
La manta de espuma se encuentra demasiado alta	La tubería de desbordamiento del sobrenadante se encuentra tapada	Verificar que la presión del gas se encuentre arriba de lo normal o purgar la válvula reguladora a la atmósfera Revisar el flujo en la tubería del sobrenadante	Reducir los contenidos mediante la purga de fondo, usar una varilla para limpiar los taponamientos de la tubería del sobrenadante Incrementar el tiempo de mezclado o romper la manta por otros medios físicos
La manta de espuma es demasiado espesa	Debido a falta de mezclado; o alto contenido de grasa	Sondear el espesor de la manta a través del espacio o hueco entre la cubierta flotante y la pared del tanque	Romper la manta usando mezcladores Emplear una bomba de recirculación de los lodos y descargar arriba de la manta Usar sanfax o un reactivo químico para suavizar la capa de espuma. Romper la espuma con un palo o barra
Los mezcladores no mueven bien la superficie	La manta de espuma se encuentra demasiado alta, permitiendo que el lodo fino viaje debajo de esta	El movimiento ondulatorio en la superficie de los lodos	Reducir el nivel de sólidos de 7 a 10 cm (3 a 4 in) por encima del tubo, esto permite que el material grueso se extraiga. Debe realizarse continuamente de 24 a 48 horas b. Revertir la dirección de la mezcla (si es posible)

### Impurezas en el gas

El gas del reactor contiene impurezas, tales como espuma, sedimento, sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), siloxanos y se encuentra saturado de humedad a temperaturas de operación del reactor. Varios

contaminantes incluidos en el gas del reactor son los siguientes:

- Dióxido de carbono. El dióxido de carbono en el gas del reactor diluye el contenido de energía y baja el contenido

energético del gas. Sin embargo no es una práctica común la remoción del dióxido de carbono de la mezcla de gas para el enriquecimiento del valor del combustible del gas del reactor

- Humedad. La humedad en el gas del reactor forma condensados en la tubería y se combina con sulfuro de hidrógeno para la formación de ácido sulfúrico, lo cual acelera el deterioro de las válvulas de control, válvulas de descarga, medidores de gas y reguladores. Si el condensado no se drena, este ocasionalmente bloquea el flujo del gas. Si la humedad no se remueve del gas del reactor antes de la combustión, se reduce la energía disponible para el sistema de calentamiento. La producción de gas por estabilización termofílica, asociado a altas temperaturas, contiene más humedad que el generado por estabilización mesofílica
- Sulfuro de hidrógeno. El sulfuro de hidrógeno es un compuesto extremadamente reactivo que cuando se combina con el agua, forma una solución ácida que es altamente corrosiva para la tubería, tanques de almacenamiento de gas y equipo para la utilización

del gas. Si se encuentra presente en el reactor, este reduce la vida útil de muchos componentes del sistema de gas del reactor. El sulfuro de hidrógeno es un compuesto dañino que es letal a concentraciones arriba de 700 partes por millón (ppm)

- Siloxanos. Los siloxanos son químicos orgánicos volátiles que contienen silicón que es usado en muchos productos comerciales, cuidado personal, industrial, médico y algunos productos alimenticios. Los productos de cuidado personal, tales como shampoo, acondicionadores de cabello, cosméticos, desodorantes, detergentes y antitranspirantes son las principales fuentes de siloxanos encontrados en aguas residuales, los cuales son liberados como gas durante el proceso de estabilización anaerobia. Cuando se oxida se forma una arena de dióxido de silicón fino y abrasivo que se acumula en las partes que se encuentran en movimiento o en las superficies del intercambiador de calor, causando un deterioro acelerado y pérdidas en la eficiencia de la transferencia de calor

Tabla 4.9 Propiedades físicas y químicas del metano (Water Environment Federation, 2008)

Parámetro	Propiedades
Características físicas	Incoloro, inodoro
Gravedad específica	0.55 a 21 °C (70 °F)
Densidad	0.042 kg m <sup>-3</sup> a 21 °C (70 °F)
Peligro	Extremadamente inflamable
Límites de inflamabilidad en aire	Forma una mezcla explosiva con aire (volumen de 5 a 15%). Evitar las llamas o producción de chispas cuando hay gas en el aire
Toxicidad	Asfixiante a altas concentraciones (causa deficiencia en la toma de oxígeno)
Valor calorífico típico	37 750 kJ m <sup>-3</sup> (1016 BTU cf <sup>-1</sup> ) (gas natural) El biogás tiene un valor calorífico bajo de 22400 kJ m <sup>-3</sup> (600 BTU cf <sup>-1</sup> ) Debido a que contiene de 60 a 65% de metano.

#### 4.10.2 USOS DEL GAS

El gas del reactor es un combustible valioso que tradicionalmente ha sido utilizado para el calentamiento de calderas, producción de vapor o agua caliente para procesos, calefacción de edificios, operación de turbinas de combustión o generadores, producción de energía eléctrica o para los secadores de lodos (con recuperación de calor para calentamiento del reactor). El gas del reactor y las tecnologías de utilización son constantes a lo largo de los años y la recuperación de la energía del gas del reactor se considera como una de las tecnologías más maduras y exitosas para la obtención energía a partir de residuos.

##### **Energía térmica**

Los reactores típicamente producen más gas que el necesario para el calentamiento del reactor. El exceso de gas puede ser usado para calefacción en edificios o procesos de tratamiento. Si el gas se usa para la generación de vapor en lugar de agua caliente, la energía estaría disponible para la refrigeración de edificios mediante enfriadores de absorción.

Las calderas no requieren alimentarse con un gas de alta calidad; sin embargo, las concentraciones de sulfuro de hidrógeno en el gas deben ser reducidas a por lo menos 1000 ppm para su uso en calderas y el vapor de agua se condensa lo que evita problemas con los inyectores de gas.

El gas del reactor se emplea para la generación calor en muchos procesos como secado térmico o deshidratación de la torta. Los reactores producen suficiente gas para reemplazar el gas natural. El calor recuperado del condensador de

secado y las corrientes de retorno del depurador se emplean para calentar los reactores.

##### **Generadores de potencia**

El gas del reactor se recolecta y se emplea para la generación de electricidad con equipos generadores de potencia. La recuperación de calor de las unidades generadoras de potencia en la forma de agua caliente o vapor (de turbinas de combustión únicamente) se emplea para el calentamiento de reactores o calentamiento o enfriamiento de los edificios. Si todo el calor recuperado se usa, la eficiencia total del uso del gas alcanza el 80 por ciento.

El uso en los generadores de potencia varía dependiendo de la producción de gas del reactor; sin embargo, muchos tratamientos de aguas residuales de medianos a grandes generan menos de 5 MW de potencia. Sistemas generadores de potencia in situ incluyen tradicionalmente generadores de motor, generadores de turbinas de combustión (para instalaciones más grandes), microturbinas y pilas de combustible. Los motores de combustión interna son los equipos de generación más comúnmente usados.

Aproximadamente el 80 por ciento de las instalaciones de los generadores de potencia en las plantas tratadoras de aguas residuales son motores recíprocos. Dependiendo del nivel de operación se utilizan turbinas de combustión y/o turbinas de vapor.

Los requerimientos de calidad del gas para equipos de cogeneración son más rigurosos que el uso para calderas. El gas debe ser enfriado para la remoción de la humedad y requiere lavados para remover el sulfuro de hidrógeno y los siloxanos.

### **Distribución a través de la red de gas natural**

Otra opción para la utilización del gas del reactor es su tratamiento al mismo nivel de calidad del gas natural removiendo todos los contaminantes, incluyendo dióxido de carbono y distribuyendo el gas mejorado supliendo el gas natural. Esto es practico únicamente cuando se dispone de grandes cantidades del gas del reactor.

### **4.10.3 PURIFICACIÓN DEL BIOGÁS**

#### **Remoción de espuma y sedimentos**

Muchos sistemas son equipados con trampas para sedimentos y separadores de espuma para la limpieza del gas del reactor. Estos dispositivos ocupan mucho espacio en el sistema de tuberías del gas, disminuyen la velocidad, recolectan la espuma y las partículas que entran en el gas y remueven el condensado recolectado. El separador de espuma (ilustración 4.25) es un vaso grande con placas internas equipadas con inyectores de agua que proveen un rociado continuo. La espuma y los sedimentos se separan del gas por medio del rociado continuo de una fuerte descarga de los inyectores de agua. La placa deflectora hace que el gas descienda y suba saliendo limpio por la parte superior. El agua y las placas internas reducen la espuma en el gas, lo que previene su arrastre a los equipos.

#### **Reducción de la humedad**

La humedad del gas del reactor se condensa a medida que se enfría. La tubería de gas debe tener una pendiente de por lo menos 1 por ciento hacia el punto donde se colecta el condensado. Para la remoción efectiva de la humedad, el flujo

de gas se mantiene debajo de los  $3.7 \text{ m s}^{-1}$  (12 ft  $\text{s}^{-1}$ ) a contracorriente del flujo condensado.

El condensado es colectado en trampas que están localizadas en puntos bajos a lo largo de la tubería por donde corre el gas y en donde se enfría. Se utilizan grifos de goteo controlados manual o automáticamente para la remoción del condensado acumulado. La operación manual de los grifos de goteo es recomendada para aplicaciones interiores. Para el control del flotador, se encuentran disponibles los grifos automáticos, pero estos requieren de un mantenimiento frecuente de las válvulas en operación. En caso de que se atasque el flotador, el gas puede escapa a los alrededores, lo cual limita su uso en instalaciones al aire libre.

La humedad también se remueve del gas por enfriamiento, a aproximadamente  $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $40 \text{ }^{\circ}\text{F}$ ) en un secador frigorífico (ilustración 4.26). El secador está hecho típicamente de acero inoxidable o de otros materiales resistentes a la corrosión del sulfuro de hidrógeno. La corrosión se minimiza mediante la remoción del sulfuro de hidrógeno del gas antes del secado. El secado remueve hasta 20 a 40 por ciento de siloxanos del gas del reactor.

#### **Remoción de siloxanos**

El calentamiento del reactor a  $35 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $95 \text{ }^{\circ}\text{F}$ ) provoca que los siloxanos del lodo se volatilicen y cuando se queman, se convierte en un material parecido a la arena (dióxido de silicón) el cual es demasiado fino para ser capturado en lavadores ordinarios y se deposita en los equipos de combustión o en cámaras de combustión. Para la protección de los equipos, los siloxanos se remueven del gas del reactor antes de la combustión por medio de secadores de gas o depuradores de carbón activado.

Ilustración 4.25 Separador de espuma (Water Environment Federation, 2008)

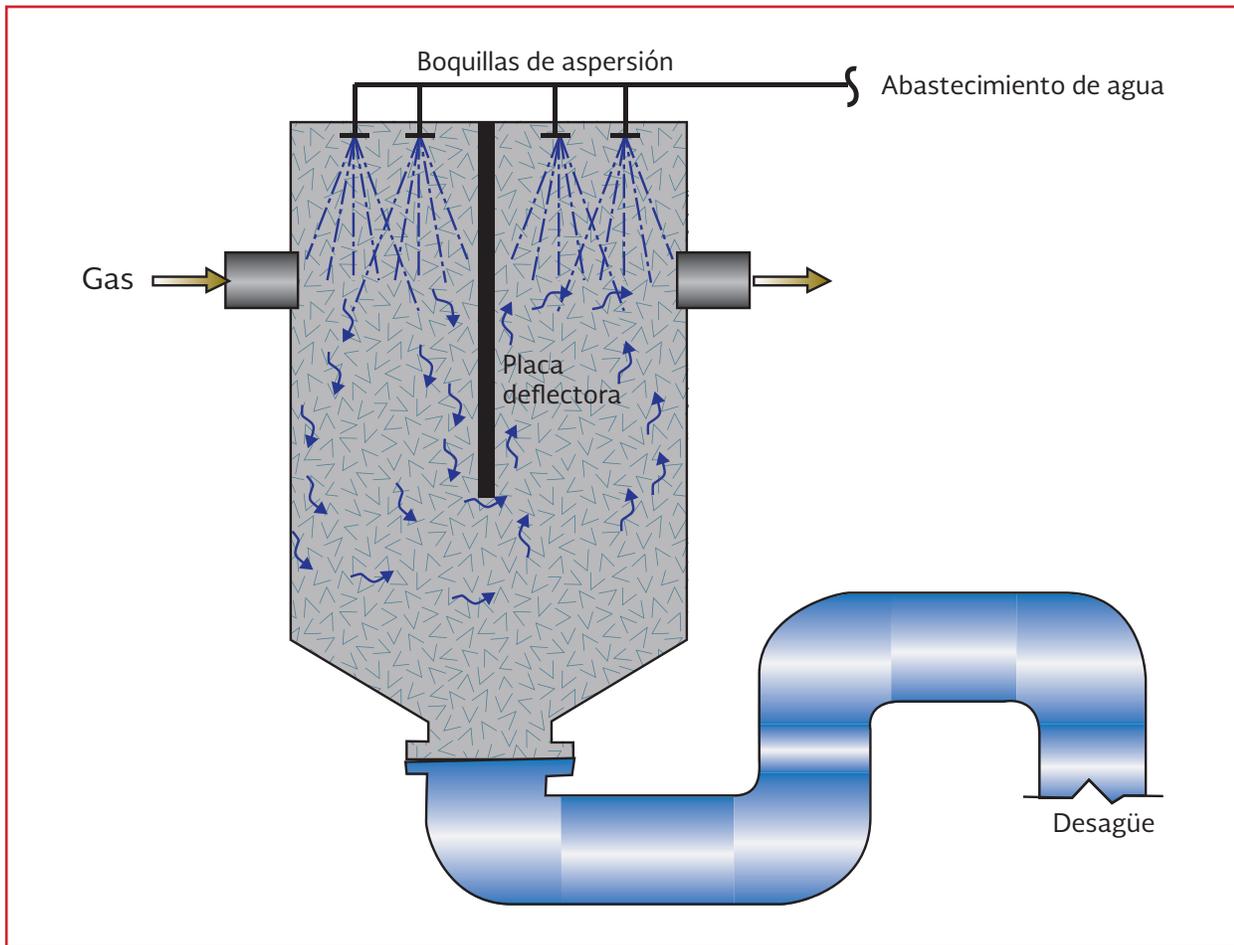


Ilustración 4.26 Secador frigorífico



## Secado del gas

Los siloxanos son compuestos volátiles relativamente pesados que tienden a adherirse al vapor de agua en la corriente del gas del reactor. Una fracción significativa de siloxanos puede ser removida junto con la humedad cuando el gas se seca. Para la remoción de más del 90 por ciento de los siloxanos, el gas se seca a punto de rocío a temperaturas de  $-29$  a  $-23$  °C ( $-20$  a  $-10$  °F) o inferiores. El equipo de secado consta de un secador tipo refrigerante, que enfría el gas del reactor cuando pasa a través del secador. Los secadores están equipados con un sistema de recuperación de calor que usa el calor removido del gas, lo que incrementa la temperatura de salida arriba del punto de rocío.

Los sistemas de secado del gas son relativamente simples. Estos operan a las temperaturas requeridas para la remoción de los siloxanos que son vulnerables a la formación de cantidades significativas de hielo, los cuales son removidos para la protección de los tubos de daños y estallidos de los sistemas de refrigeración.

## Filtros de carbón activado

Los filtros de carbón activado se usan para siloxanos la remoción de siloxanos del gas del reactor operando de acuerdo a los mismos principios que los filtros de carbón usados para el control de olores en plantas de tratamiento de aguas residuales. El gas del reactor pasa a través de un tanque lleno de carbón activado (ilustración 4.27), el cual captura los compuestos orgánicos, incluyendo siloxanos, sulfuro de hidrógeno y otros compuestos del gas del reactor. Con el mantenimiento y reemplazo adecuado del carbón los siloxanos en el gas del reactor son removidos por debajo de los límites

de detección. El carbón activado se regenera o reemplaza frecuentemente si el gas contiene otros compuestos orgánicos. La remoción del sulfuro de hidrógeno antes de que este pase a través de los filtros de carbón genera una mejor remoción de siloxanos y extiende la vida útil del lecho de carbón.

## Remoción de sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ )

Existen varios métodos para la remoción del sulfuro de hidrógeno del gas del reactor. El proceso “esponja de hierro”, trata el gas del reactor pasándolo a través de una cama de esponja de hierro (óxido de fierro hidratado en forma de virutas de hierro humedecidas en agua). Como el gas pasa a través del medio de hierro, este sufre una reacción exotérmica (producción de calor) que convierte el sulfuro de hidrógeno a sulfuro férrico y agua. La esponja

Ilustración 4.27 Tratamiento de carbón activado para siloxanos.



de hierro es regenerada y reusada repetidas veces antes de reemplazarla. La necesidad de regeneración o remplazo se determina midiendo la concentración de sulfuro de hidrógeno en el gas tratado. Una esponja “agotada” típicamente consta de una combinación de sulfuro férrico y virutas, residuos no peligrosos que se colocan en algún relleno sanitario. La regeneración de una esponja de hierro es una reacción altamente exotérmica que usa agua y aire para liberar sulfuro del hierro, permitiendo la regeneración del hidróxido de hierro hidratado. Si las virutas de hierro no son sumergidas en un baño de agua y no se controla el flujo adecuadamente, estas se sobrecalientan y queman espontáneamente.

Varios procesos patentados se encuentran disponibles, como el paso del gas del reactor a través de un medio que reacciona selectivamente con el sulfuro de hidrógeno (ilustración 4.28). El medio usado en estos sistemas es un producto

granular de flujo libre que no se regenera ni quema. El cloruro férrico inyectado dentro del reactor reduce la cantidad de sulfuro de hidrógeno en el gas del reactor reaccionando con el sulfuro para la generación de sulfuro de hierro sólido. Se adicionan sales de hierro en las siguientes unidades en el proceso de tratamiento:

- En el sedimentador primario (ayuda a la sedimentación y provee un control total de olores)
- En el sedimentador primario y/o en la alimentación de los DLA al reactor
- En la succión del reactor, donde se ubica la bomba de recirculación de lodos
- En la succión del mezclado mecánico

Las sales de hierro no se adicionan a la entrada de los intercambiadores de calor porque se forman depósitos en las superficies del intercambiador de calor.

Ilustración 4.28 Tratamiento del sulfuro de hidrógeno



## Remoción de dióxido de carbono

El dióxido de carbono se remueve del gas del reactor por medio de un lavado de agua o un lavado químico, tamices de carbono o membranas; sin embargo, todas estas tecnologías son caras al igual que su uso, por lo que únicamente se aplican cuando se desee que el biogás posea la misma calidad del gas natural para su venta. Información adicional sobre los tratamientos utilizados para la limpieza de biogás se pueden consultar en el MAPAS, el libro "Operación y mantenimiento de PTARM: Procesos anaerobios"

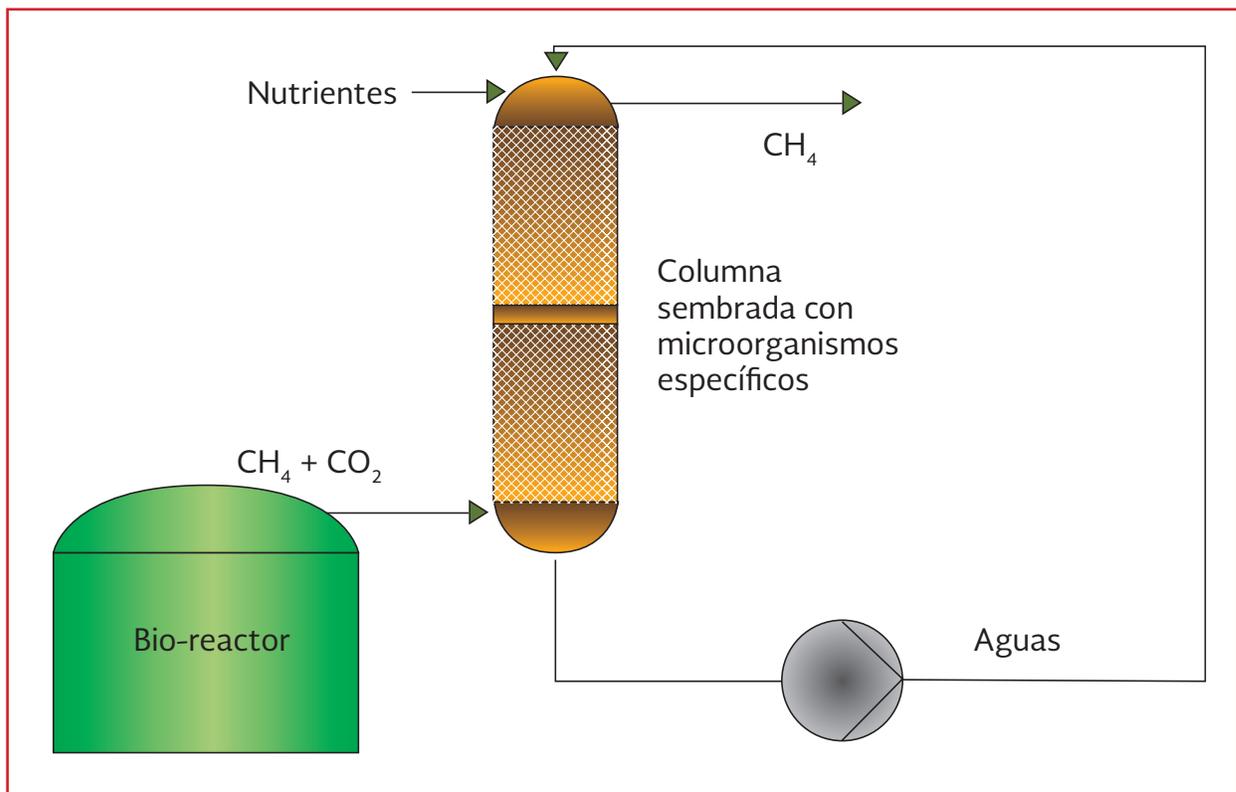
## Incremento de la fracción de metano en el biogás

En ocasiones el biogás se modifica antes de que este sea almacenado en el contenedor de gas. La modificación incluye un tratamiento

microbiológico en un convertidor de gas, así la fracción de metano en el biogás se incrementa de 65 por ciento a alrededor del 90 al 95 por ciento y el contenido de  $\text{CO}_2$  se disminuye alrededor de 5-10 por ciento.

El convertidor de gas está conectado entre el bioreactor y el primer filtro de azufre (ilustración 4.29). Primero un compresor (700 mbar) fuerza el cruce del biogás a través del convertidor de gas. El convertidor de gas es un tanque con un volumen de alrededor de  $6 \text{ m}^3$  relleno de material de empaque (coque marrón, de la industria del carbón, el cual provee una gran área superficial de alrededor de  $220 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ), una solución nutritiva (agua, almidón y glucosa) y una solución especialmente usada para microorganismos fijadores de  $\text{CO}_2$  (filum metanosarcina y una bacteria termoautotrófica). Esta última mantiene las condiciones óptimas con respecto al ambiente químico y físico. Las

Ilustración 4.29 Convertidor de gas (Deublein & Steinhauser, 2011)



turbinas de gas, proveen el calentamiento para el mantenimiento de un nivel de temperatura de 65 °C, que requiere el convertidor de gas.

### **Licuefacción o compresión del biogás**

Dependiendo de la utilización del biogás, el metano se comprime o licuada. Ambos procesos se realizan de manera similar a la compresión o licuefacción del gas natural.

El GNC (gas natural comprimido) o el GNL (gas natural licuado) se usan como combustible para vehículos, siendo este último licuado a muy bajas temperaturas (-162 °C). El GNC y el GNL se reemplazan por el metano purificado del biogás.

### **Licuefacción**

El gas licuado es una ventaja para el abastecimiento de combustible a vehículos, porque de esta reducción drástica de volumen resulta una alta densidad de energía.

Dependiendo de la velocidad de flujo del biogás, se aplican diferentes procedimientos de licuefacción. Para velocidades de flujo muy altas, se seleccionan combinaciones de diferentes procedimientos, por ejemplo, turbina, Joule Thomson y procedimientos magneto calóricos. Todos los procedimientos usan compresión para licuefacción y una posterior expansión irreversible en válvulas de expansión o una expansión parcialmente reversible en máquinas de expansión. El metano se enfría a -162 °C, para la licuefacción. El medio de enfriamiento es nitrógeno líquido (-196 °C). El gas metano sale del enfriador a una temperatura de -162 °C como un líquido claro.

El proceso termodinámico se muestra esquemáticamente en la ilustración 4.30. El metano se comprime (del punto 1 al punto 2 en la ilustración). Después el metano se enfría a contracorriente (del punto 2 al punto 3) en un intercambiador de calor con metano gaseoso frío. En el punto 3 el metano empieza a expandirse isoentálpicamente a presión atmosférica (del punto 3 al punto 4).

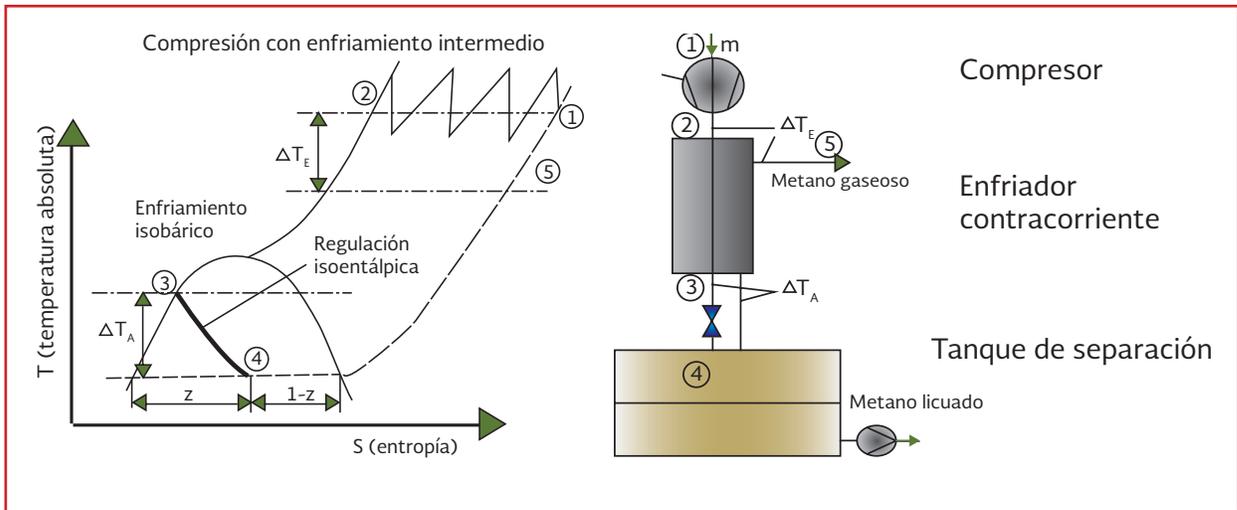
Así se forma una fracción de metano líquido saturado  $z$  y una fracción de metano gaseoso saturado seco  $(1-z)$ , a partir de los cuales se transfiere en frío por medio de un intercambiador de calor a contracorriente. La ilustración 4.30 muestra los diferenciales de temperatura,  $\Delta T_E$  y  $\Delta T_A$ , requeridos para la transferencia de calor en el intercambiador.

### **Compresión, equipos utilizados, operación y mantenimiento**

El gas del reactor se suministra a presiones relativamente bajas de 150 a 300 mm (6 a 12 in) columna de agua, o arriba de 450 mm (18 in) para diseños de reactor a altas presiones, lo cual provoca que se dificulte el uso del gas en algunos tipos de equipos de combustión. Además en reactores equipados con mezcladores de gas, es importante que la presión suministrada a estos equipos supere las pérdidas en las tuberías y el nivel estático del líquido en el reactor. En ambos casos, la compresión del gas o aumento de presión es necesaria.

Para la compresión del metano del biogás, se emplea el mismo compresor utilizado para la compresión del gas natural, la tabla 4.10 muestra los diferentes tipos de compresores utilizados.

Ilustración 4.30 Proceso termodinámico de licuefacción de gas (Deublein, D., y Steinhauser, A., 2011)



En la tabla 4.11, se enlistan las aplicaciones de los compresores, su operación y mantenimiento.

Los compresores de diafragma son en principio técnicamente más complejos y por lo tanto los menos económicos para la compresión del gas metano.

Muchos compresores se lubrican con aceite, excepto los compresores de pistón rotatorio. Por lo tanto se encuentran de 1-5 mg m<sup>-3</sup> de aceite en el biogás comprimido. Los compresores de diseño especial no se lubrican con aceite pero presentan fugas de gas y mayor desgaste. El biogás puede contaminarse con trazas del material del compresor.

#### 4.10.4 EQUIPOS DE UNA PLANTA DE BIOGÁS

En la ilustración 4.31 y 4.32 se muestran diferentes tipos de reactores que se utilizan en las plantas de biogás y que generalmente son de fondo plano.

#### Características de los reactores de la planta de biogás

Para las plantas de aguas residuales, a nivel mundial se presentan tres formas de reactores, las cuales se desarrollan en paralelo. Sus características son:

- Paredes delgadas por razones de costo
- Áreas superficiales pequeñas para ahorro en aislamiento
- Fácil desgasificación
- Mezcla completa para una distribución regular de nutrientes y productos del metabolismo
- Evitan el desarrollo de capas, especialmente de espuma
- Evitan acumulaciones no controladas

En la ilustración 4.33 se muestran los diseños que son aceptados actualmente.

Las plantas pequeñas se construyen con un vertedero de degradación, llamado reactor de lecho de lodos, mientras que plantas con una capacidad arriba de 2500 m<sup>3</sup> son diseñadas con torres de estabilización de forma clásica (ilustración 4.32). Esto significa que los reactores tienen la parte inferior en forma de

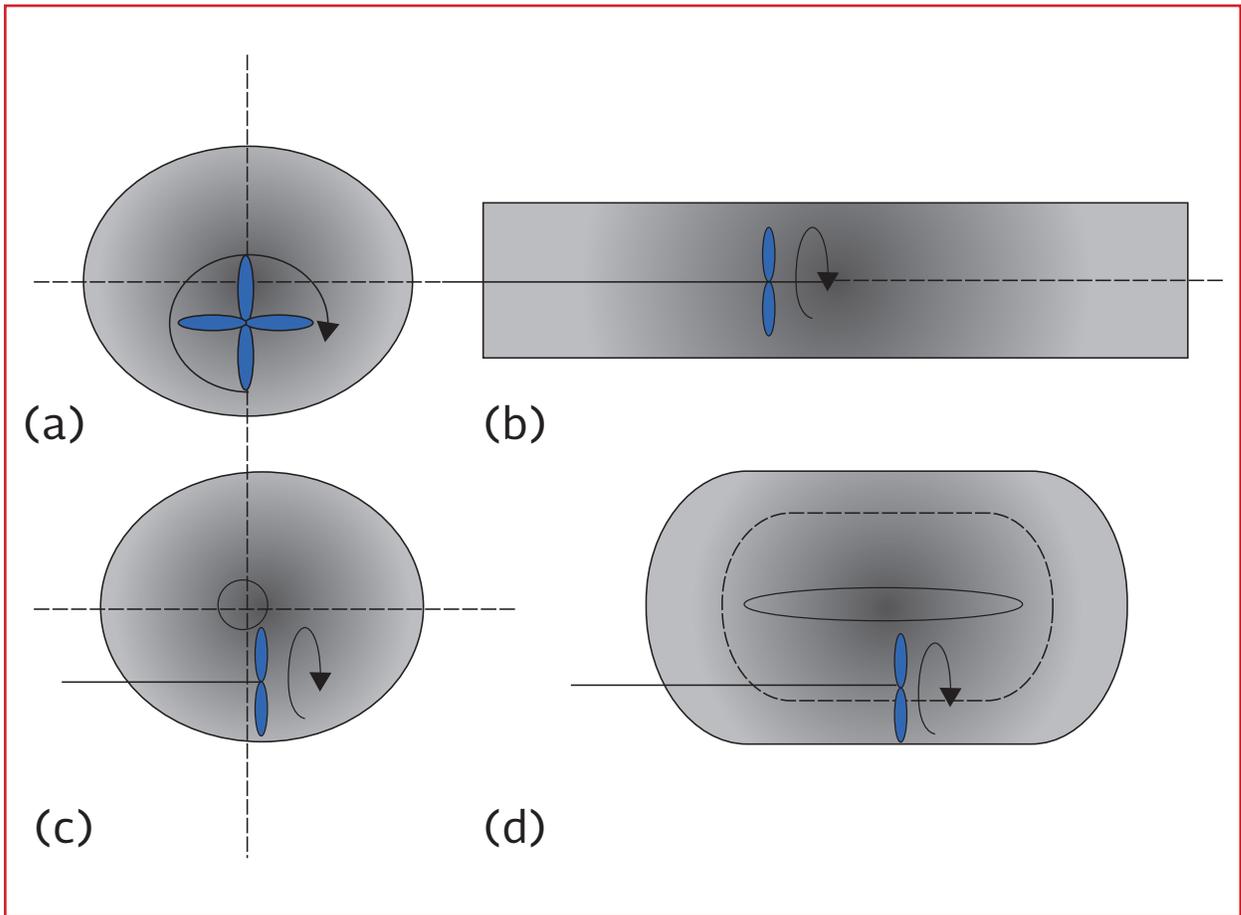
Tabla 4.10 Compresores de biogás (Deublein & Steinhauser, 2011)

Compresor	Rendimiento	Carga de presión	Observaciones
Compresor de pistón alternativo	Bajo a medio	Alta (>10 bar)	Alta eficiencia, económico, sensible a la abrasión
Compresor de pistón rotatorio	Bajo a medio	Alta	Alta confiabilidad, baja abrasión con gases contaminantes
Compresor de aletas deslizantes	Medio	Media a alta (tres etapas)	
Bomba de anillos líquidos	Medio	Pequeña a media (dos etapas)	
Compresor de tornillo rotatorio	Medio	Media a alta (2 etapas)	
Compresor de centrífuga	Medio a alto	Muy alta (300 bar)	Baja abrasión
Compresor de flujo axial	Bajo a medio	Alta	Baja abrasión

Tabla 4.11 Equipos de compresión del gas (Water Environment Federation, 2008)

Tipo	Aplicaciones	Operación y mantenimiento
Compresores de anillo líquido (centrífugos con impulsores sellados y anillo de agua)	Comúnmente se usa para la mezcla del gas a 103 kPa (15 psig) o más, o cuando se requiere suministrar altas presiones al gas, requerido para el almacenamiento, motores o para turbinas. Puede emplearse gas reciclado para el arranque y control de flujo	Capaz de manejar gas sucio. Requiere reparación aproximadamente cada 2 años. Se emplea agua de la planta, o si esto causa depósitos, agua potable. Baja eficiencia a diferencia de otros compresores. Se presenta una menor posibilidad de sobrecalentamiento cuando se usa gas del reactor para controlar el flujo. Requiere atención especial para el control del nivel del agua en los separadores para evitar el escape de gas. Un compresor con sello de agua incrementa la complejidad del sistema, tiene mayor flujo de corrientes secundarias y contaminantes comparado con un compresor de sello normal.
Sopladores de desplazamiento rotatorio positivo	Para el mezclado del gas, limitado alrededor de 103 kPa (15 psig). Flujo controlado por cambios de velocidad	Requiere reparación anual si trabaja con gas sucio. Requiere una carcasa para el ruido. Necesita un sello térmico cuando use gas de recicló
Compresores recíprocos	Generalmente se usan para aplicaciones de bajo flujo y alta presión. Se utilizan para suministrar gas a alta presión a motores y turbinas. Requieren un sistema de agua de enfriamiento para los compresores, inter-enfriadores y post enfriadores	No tolera el gas sucio. La limpieza del gas, requiere eliminación de partículas. Muy eficientes. Requieren ajuste especial de las partes móviles
Sopladores sellados herméticamente	Baja presión es decir, menos de 14kPa (2psig). Típicamente usados como impulsores de calderas donde se requiere un flujo alto y una baja presión. Puede sobrecalentarse	No toleran el gas sucio. Pueden usarse después del secado del gas. El sellado reduce las fugas de gas
Soplador centrífugo de múltiples etapas	Usado para el suministro de gas a equipos de flujos elevados: compresores recíprocos y de presiones altas. Se diseñan con sellos, materiales resistentes a la corrosión y materiales seguros para el uso de gas	No toleran el gas sucio. Se requiere la eliminación de las partículas de gas. Si tiene caja de engranes utiliza aceite para la lubricación y enfriamiento

Ilustración 4.31 Vista superior de diferentes formas de bioreactores (a) cilíndrica vertical, (b) cilíndrica horizontal, (c) toroidal (d) toroidal alargada (Water Environment Federation, 2008)



cono, la parte media cilíndrica y un techo de cono truncado. La parte inferior en forma de cono tiene un ángulo de alrededor de  $60^\circ$ , lo que facilita la descarga de lodos.

La parte superior del cono limita la formación de espuma. Los reactores se construyen con láminas de acero y no requieren una protección contra la corrosión en aquellas áreas que se encuentran en contacto con el lodo.

El compartimento del gas únicamente se pinta con una capa anti corrosiva. El exterior se aísla del calor y se cubre con una capa protectora.

En la ilustración 4.34 c, se muestran las plantas

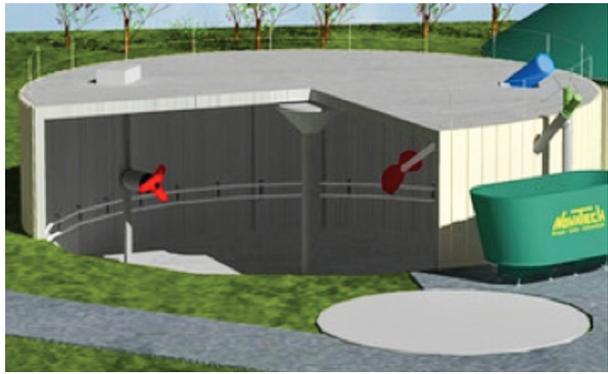
más grandes con reactores de  $2\,000$  a  $15\,000\text{ m}^3$  tienen una forma parabólica, también llamado reactor en forma de huevo.

Estos reactores están usualmente hechos de concreto reforzado, son herméticos al aire y al gas y proveen un buen aislamiento del calor y resistencia a la corrosión. Aproximadamente una décima o una tercera parte de la altura de los reactores se entierra. Para la parte del reactor que no está enterrada se utiliza la lana mineral y placas de espuma con material de aislamiento. El aislamiento exterior se hace con tiras de hoja de aluminio. Se deja un espacio entre las hojas de aluminio y el material de aislamiento, lo que evita que se moje.

Ilustración 4.32 Tanques que sirven como biorreactores en las plantas de biogás: (a) concreto reforzado en Europa; (b) con dispositivos de calentamiento y agitación dentro de un reactor vertical; (c) tanque al descubierto; (d) biorreactor Thoeni Kompostogas en una planta en Austria; (e) biorreactor sencillo en Filipinas



a)



b)



c)

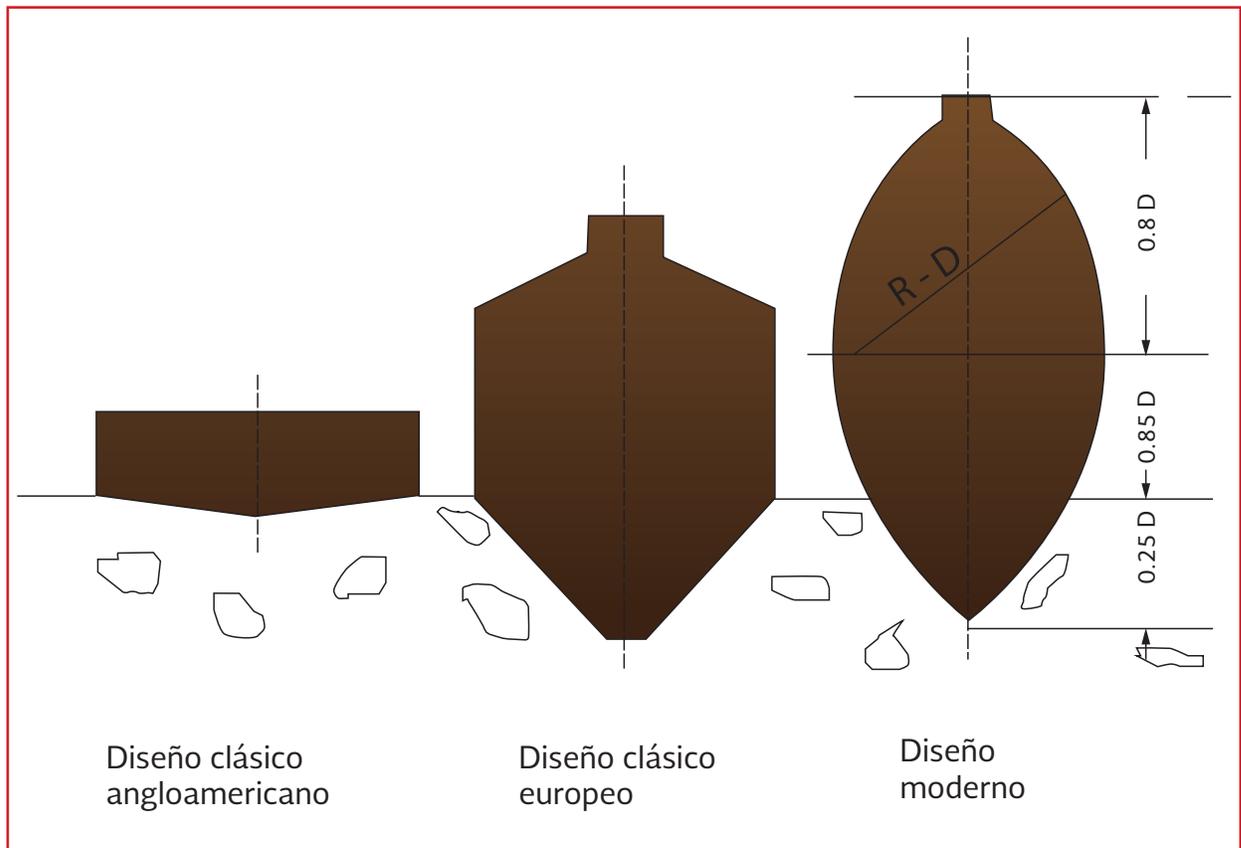


d)



e)

Ilustración 4.33 Diseños de reactores para la degradación de lodos de aguas residuales (Deublein & Steinhauser, 2011)



La parte del reactor que se encuentra enterrada no tiene aislamiento.

#### Dispositivos que se instalan en la cubierta del reactor

Por lo menos los siguientes dispositivos son montados:

- Cúpula para captura del gas con manómetro y medidores de vacío
- Reguladores de presión en línea con trampas de agua
- Mirillas con cubierta protectora
- Boquillas de rociado giratorias con una conexión de agua (acople de manguera), (rompedores de espuma)
- Removedor de espuma
- Registro de inspección

- Protecciones contra explosión
- Filtros de gas
- Trampas de espuma
- Trampas de condensado

El removedor de espuma se construye como una compuerta rectangular o una compuerta deslizante. La apertura mínima permitida es de 400 por 400 mm para puertas y 400 mm para los diámetros de los deslizadores. Debe abrirse rápidamente, por ejemplo a través de un mecanismo de palanca. El desagüe o vertedero debe ser abierto para que la materia flotante voluminosa de los lodos pueda ser removida fácilmente.

Para la supervisión interna de un reactor, se requiere un registro de inspección. El diámetro mínimo de la abertura es de 600 mm. La

Ilustración 4.34 Torres de estabilización: (a, b) bioreactores de formas clásicas para la degradación de lodos de aguas residuales. Hyperion Sewage Treatment Plant, Los Angeles California; y PTAR de León Guanajuato (a y b, respectivamente); (c) biorreactores de formas modernas para la degradación de lodos de aguas residuales; (d) torres de estabilización en Alemania; (e) construcción del armazón del tercio inferior de la torre de estabilización en Austria



a)



b)



c)



d)



e)

cubierta de cierre se monta de manera que permita el giro.

El cumplimiento de requerimientos especiales garantiza la resistencia de los tanques. Especialmente los contenedores, los aparatos y las tuberías que llevan sustratos deben sellarse adecuadamente. Es importante el uso de mecanismos y dispositivos confiables para la detección de fugas.

En los contenedores de gas, la corrosión es inducida por ácido sulfúrico, amoníaco y ácido nítrico, si el pH es menor de 0.6, también la columna central de muchos biorreactores verticales que llevan cubierta, es propensa a la corrosión.

La planta entera o partes de los equipos se construyen de manera subterránea. En tales casos, es importante la selección de los materiales correctos para la construcción así como la facilidad de acceso. En la tabla 4.12 se muestran los materiales usados en la construcción de reactores.

### **Materiales utilizados en los biorreactores y tanques**

Los tanques son hechos a base de materiales como ladrillo, acero, concreto reforzado o acero inoxidable.

#### **Tanques de ladrillo**

Los biorreactores y los tanques construidos de ladrillo son comúnmente usados para plantas

a pequeña escala de 10 m<sup>3</sup> de capacidad (ver ilustración 4.35). Las plantas de tamaño pequeño se encuentran en diferentes países asiáticos y se recomiendan en Latinoamérica. La base para el piso de los tanques debe ser particularmente bien apisonada. La losa base se construye de uno de los siguientes materiales: piedras de cantera relleno con mortero de cemento y contrapiso con enladrillado o concreto.

#### **Ladrillo y mortero**

El ladrillo y el mortero deben tener la misma resistencia. Si los ladrillos son de baja calidad, los muros deben ser de un espesor mayor.

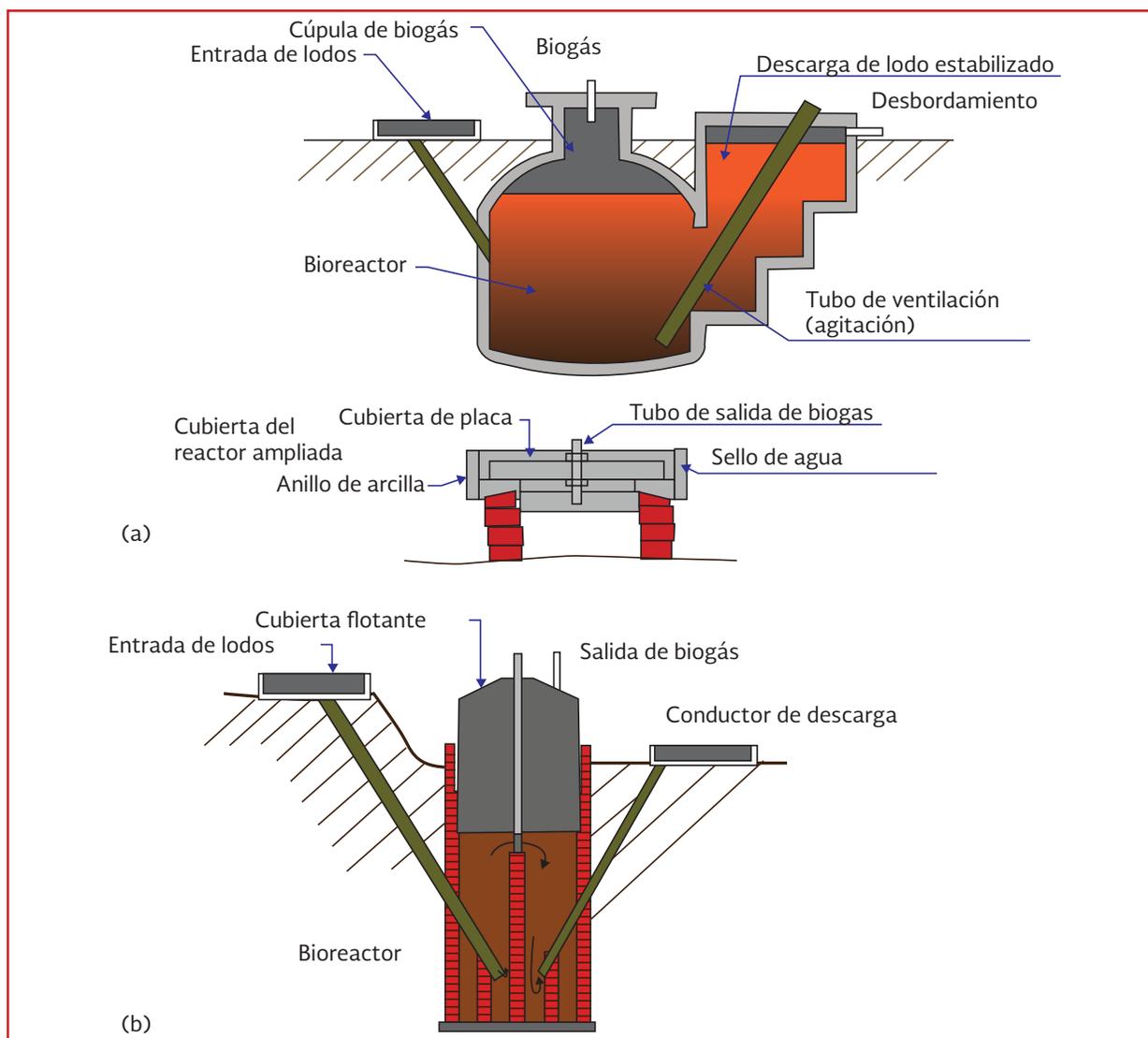
El mortero para enladrillado (tabla 4.13) se compone de arena, agua y aditivos. Con el cemento como agente de unión, el mortero se vuelve estable e impermeable pero ligeramente frágil. La cal como agente de unión hace al mortero suave y elástico. Para el logro de una buena impermeabilidad del enladrillado, los agentes de unión son una mezcla de cemento y cal. La arena usada para el enladrillado de un bioreactor es finamente tamizada (tamaño máximo de grano, 3 mm) y lavada. Si la arena del mortero contiene impurezas como polvo o limo requiere una mayor cantidad de cemento.

Es imprescindible que el aplanado con cemento cumpla los requerimientos de calidad local y reglamentos de elaboración y reciba una protección superficial. Debe consolidarse con fuerza, con frotamiento circular. Todos los bordes se biselan y todas las esquinas se redondean.

Tabla 4.12 Diferentes materiales usados para la construcción de reactores y sus propiedades: resistentes y libres de corrosión ++; resistentes a la corrosión pero no libres de corrosión +; acondicionados para la resistencia a la corrosión pero no libres de esta-; inapropiados -- (Deublein & Steinhauser, 2011)

Material de construcción	Tanque colector	Reactor	Tanque de almacenamiento	Contenedor de gas
Concreto reforzado	++	++	++	--
Bloques prefabricados con revestimiento de concreto	++	++	++	--
Láminas de acero (soldadas en espiral)	+	+	+	+
Madera	-	-	-	-
Fibra de vidrio reforzada	+	+	+	+
Plástico sólido	--(disponible para tanques pequeños)	Disponible para tanques pequeños	Disponible para tanques pequeños	
Recubrimiento plástico	+	+	+	
Láminas de plástico	+(disponible para cavidades)			-- (eventualmente como manguera de plástico)

Ilustración 4.35 Tanque de ladrillo: a) cúpula de gas; b) cubierta flotante (Deublein & Steinhauser, 2011)



## Tanques de concreto reforzado

Es importante que el concreto reforzado se encuentre libre de grietas y sea resistente a las condiciones especiales durante la vida útil del reactor. Los daños generalmente son causados por sustratos ácidos, los cuales penetran el refuerzo y lo corroen. También ocurren daños si el aire permeado contiene dióxido de carbono; ya que este convierte el hidróxido de calcio del concreto a carbonato de calcio resultando en una disminución en el pH <9, lo cual es crítico para el refuerzo.

Para la prevención de estas condiciones las leyes locales, estipulan una supervisión frecuente de la calidad del concreto. El diseñador de la planta estima los daños por ataque químico y erosión dependiendo de la vida útil del reactor.

El concreto se selecciona (relación máxima agua/cemento, mínimo contenido de cemento, resistencia mínima a la compresión, refuerzo, curado, protección de la superficie) de modo que los tanques resistan ataques por 50 años.

Las siguientes reglas se consideran para la construcción de tanques de concreto reforzado:

- En principio, se evitan espacios angulares donde se encuentra el biogás

- La transición de la cubierta arqueada a la pared vertical del reactor debe localizarse en la zona del biogás
- Las aberturas de entrada y descarga no se localizan en el espacio del gas; una excepción es la abertura de entrada
- Juntas y conexiones de segmentos prefabricados (la losa base y los muros verticales del tanque) son duraderos y flexibles, lo cual se garantiza por el fabricante (ilustración 4.36)

La losa base transmite el peso del tanque al terreno. Esta resiste diferencias de flexión y de presión tales como cargas desiguales del interior (ondulaciones) y del exterior (piedras subterráneas). Sin embargo, el piso del reactor es sólido y limpio. La losa base debe resistir la carga total de los muros.

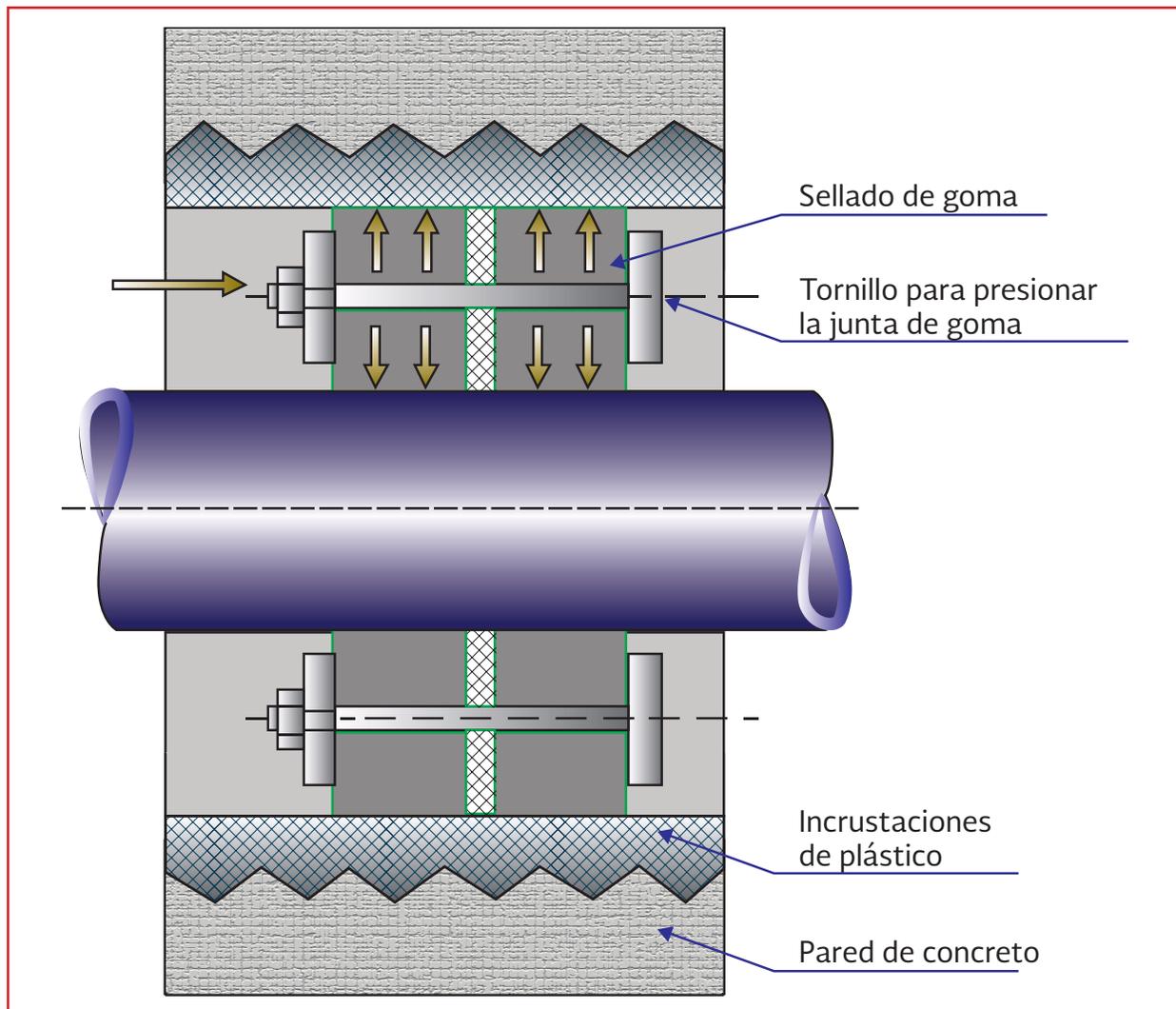
La forma de la losa base y de la cubierta se seleccionan cuidadosamente. Una base con una forma cónica tiene mayor probabilidad de hundirse, por lo tanto en reactores pequeños generalmente la base y la cubierta son planas.

El concreto pretensado o presforzado es usado principalmente para reactores en forma de huevo. Este es hermético al agua y al gas, aislante del calor y resistente a la corrosión. Los reactores son construidos con formas llamativas.

Tabla 4.13 Relación de la mezcla de mortero (Deublein & Steinhauser, 2011)

Mortero	Cemento	Cal	Arena
Muro de mortero	2	1	10
Otra relación	1		6
Mortero de estuco	1		4
Mejor relación	1		3

Ilustración 4.36 Sistema de conductos de pared (Deublein & Steinhauser, 2011)



Los conos llamativos son contruidos con la ayuda de anillos de acero y anillos de presión, los cuales son montados desde el interior de la torre utilizando escaleras móviles. Los reactores modernos utilizan técnicas de construcción que permiten la formación de los muros sin necesidad de cimbra.

Las reglas para el uso de concreto son las siguientes:

- El concreto se vierte y vibra inmediatamente después del mezclado

cuando se mezcla en el sitio, o inmediatamente después de la entrega cuando se usa concreto premezclado

- No puede agregarse agua para el mantenimiento y mejora de la fluidez: el agua de reposición incrementa el valor A/C (relación de peso de agua/cemento), causa una alta porosidad y baja resistencia
- El concreto se vibra y compacta adecuadamente alrededor del refuerzo
- El concreto fragua lentamente; después del colado se cubre alrededor de siete

días con una lámina plástica protectora, sellador o rociado con agua para prevenir la pérdida de agua. De lo contrario, no hay suficiente agua disponible para el fraguado del concreto, lo que disminuye su resistencia

- La estructura entra en servicio cuando el concreto alcance su resistencia de diseño

### **Equipos para el almacenamiento**

Los equipos para almacenamiento de biogás son muy importantes ya que permiten la disminución de las fluctuaciones en el flujo de gas cuando este se utiliza en la planta o en unidades de cogeneración.

Varios tipos de contenedores de gas están disponibles en el mercado. Uno de los más utilizados para el almacenamiento del gas a baja presión es la cubierta flotante portagas. La capacidad de almacenamiento depende de la altura de la cubierta y del diámetro del tanque. El almacenamiento de gas está típicamente limitado de una a dos horas de producción. Las membranas de almacenamiento que operan a bajas presiones, proveen hasta el doble de la capacidad de almacenamiento. La membrana puede instalarse en el reactor y funciona como cubierta y espacio de almacenamiento, o a un lado como una estructura independiente (ilustración 4.37).

La ilustración 4.38 muestra una esfera para el almacenamiento de gas. Son estructuras independientes de diferentes capacidades que almacenan el gas a presiones de 550 a 700 kNm<sup>-2</sup> (80 a 100 psi). Estas almacenan grandes cantidades de gas comparado con otros

sistemas de almacenamiento, pero el gas debe comprimirse antes del almacenamiento.

### **4.10.5 MANTENIMIENTO DE LOS EQUIPOS DE UNA PLANTA GENERADORA DE BIOGÁS**

Cuando la planta de producción y aprovechamiento del biogás se encuentre funcionando en forma estable con una producción constante, se brindan los cuidados necesarios para que se mantenga en correcta operación. Es por ello que se desarrolla y aplica un plan que mantenga las condiciones estables de operación de la planta. Dichos planes de mantenimiento garantizan una producción constante de biogás, verificando diversos puntos como son: revisiones de tuberías, válvulas, fugas, verificación y cambios de filtros, verificación del funcionamiento de la bomba y del generador, limpieza de maleza en los alrededores y remoción de lodos, entre otros puntos.

#### **Dispositivos en una planta de biogás**

- Tuberías de evacuación y conducción
- Uniones
- Líneas de conducción de gas
- Filtro de dióxido de carbono
- Filtro de ácido sulfhídrico
- Válvula de alivio
- Sistemas de desfogue, tanque corta llamas y quemador
- Medidor de flujo tipo turbina
- Válvulas reguladoras de presión y vacío
- Trampas de lodos, espuma, condensados, ácido sulfhídrico
- Manómetros y sensores de presión

Ilustración 4.37 Almacenador de gas de membrana



Ilustración 4.38 Esfera de acero para el almacenamiento del gas



Debe hacerse una inspección periódica (preferiblemente todos los días en el momento de efectuar la carga) de la línea de gas en las uniones, válvulas, coples y demás accesorios para la detección de fugas. Si éstas se presentan, se procede de inmediato a su reparación, reemplazando las piezas o sellando los escapes con cemento comercial para PVC o con resina epóxica. Se purgan periódicamente las trampas de agua y de ácido sulfhídrico, utilizando la válvula de dren de la respectiva caja. Revisar semanalmente el relleno de trampa de ácido sulfhídrico. Si el relleno se encuentra gastado, se reemplaza por material nuevo, lo que garantiza el correcto funcionamiento de la trampa.

## Gasómetros

- Revisión del nivel del agua
- Cambio del agua
- Revisión de mangueras
- Chapeo de los contornos

## Reactor

Periódicamente inspecciona y verifica si existen filtraciones de agua o aire en los reactores de biogás, su reparación. En los reactores de carga continua, por lo menos una vez al año, se vacía completamente el reactor, retirando el lodo del fondo. Esto permite la realización de lo siguiente:

- Tratamiento de roturas: cincelar las roturas en forma de V, raspar la superficie circundante; posteriormente llenar ese agujero en forma de V con cemento (1:1), compactar y aplicar dos o tres veces un enlucido hecho de una pasta de cemento puro
- Cuando no se encuentran filtraciones, la cámara de fermentación se lava y se aplican dos o tres capas de enlucido con una pasta pura de cemento
- Si el enlucido está deteriorado o está deformado, es necesario quitarlo y lavar las paredes; entonces se enlucen de nuevo, aplicando distintas capas de enlucido muy fino con una cuidadosa compactación
- Cuando el agua freática penetra al biodigestor, es precisa una pasta con agua salada; se tapa el hoyo y se aprieta aplicando cemento con una cubierta de cenizas durante 20 minutos. Este proceso se repite tres veces

- Cuando se produce una combinación de filtraciones en tuberías (tubos de entrada y salida) y cúpula, se cincela alrededor de la filtración y se saca la tubería; entonces se coloca cemento o concreto de gravilla, haciendo un fraguado local para que la tubería se fije nuevamente
- Verificación de formación de lodos
- Si el fondo se hunde o la pared se separa, se rellena con una mezcla de concreto con grava fina
- Deben revisarse frecuentemente las juntas o uniones de la manguera. lo que asegura que no se filtre ni el agua ni el aire
- Los depósitos donde se preparan las mezclas de materia primas, se lavan con agua limpia después del trabajo diario
- Si el depósito de descarga permanece sin uso por un período largo, se expone al ambiente evitando su corrosión interna

El reactor debe limpiarse internamente cada dos años. Para realizar esta operación se emplean guantes y botas de caucho y se procede de la siguiente forma:

- Suspender la carga diaria
- A los 15 días aproximadamente se cierra la válvula de gas y se desconecta la línea de conducción
- Permitir el escape del gas abriendo la válvula
- Vaviar el reactor utilizando una bomba. El contenido del reactor se usa como abono
- Lavar las paredes, el fondo y el almacenamiento de gas con un cepillo de cerdas duras (no metálicas) y agua

## Protección de las superficies

Las superficies internas (fondo y paredes) de depósitos y biorreactores hechos de concreto o tabique se corroen debido a sustratos ácidos. Por lo tanto la superficie se protege.

Antes de la aplicación de la capa protectora, es importante asegurarse que la superficie se encuentre mecánicamente estable, seca y sea resistente a cargas mecánicas altas. Si este es el caso, la superficie se limpia con una escoba dura, con pasta y con un cepillo de alambre o con agua a presiones altas para la remoción de los residuos de aceite, la suciedad adherida y las partículas sueltas de concreto. Se recomienda el sanblasteo y una aplicación de ácido diluido (ácido fosfórico al 10 por ciento). Se deben reparar las grietas y las cavidades en la superficie. Únicamente después se aplica la capa protectora.

Si el concreto se pinta (espesor de hasta 0.3 mm) o recubre (espesor hasta de 1 mm), se usan productos hechos de los siguientes materiales:

- Chapopote
- Dispersión de varios plásticos, por ejemplo, cloruro de polivinilo (PVC)
- Poliuretano (PUR)
- Epoxi, particularmente en combinación con chapopote
- Concreto asfáltico, especialmente para recubrimientos del fondo. Muy importante para el concreto asfáltico es que las uniones de las paredes, lleven un sellador de chapopote llamado sellador tok, este se agrega y previene la penetración de líquidos dentro de los cimientos
- Mortero a base de plástico (con epoxi

como agente de unión). Aunque todavía no es generalmente aceptado como una capa resistente al desgaste, tiene ventajas porque puede ser aplicado fácilmente

De las pinturas mencionadas, únicamente la dispersión plástica y el epoxi no contienen solventes. Cuando se pinta con alguna de las otras pinturas, el lugar se ventila, especialmente cuando se pinta el interior o la parte inferior o superior del depósito.

Por lo menos se aplican dos capas de pinturas. La pintura necesita un cierto tiempo para el endurecimiento antes del acceso o carga del tanque. Por ejemplo una superficie que se pinta con poliuretano requiere 8 horas para secarse y 4 días para la carga del tanque.

La durabilidad de la mejor pintura o revestimiento incluso está limitada ver (Tabla 4.14). La pintura es menos durable cuando se expone a radiaciones UV tales como el sol y radiaciones térmicas. Este es el caso especialmente en áreas no cubiertas con techos, tales como silos de losa. El uso de pinturas de acabado brillante minimiza el efecto de la luz.

## Protección a las superficies de tanques con doble pared

El concreto protegido con recubrimientos de polietileno de alta densidad (PEAD) o polipropileno (PP) los cuales son soldados juntos, cuando no se usa un concreto especial que garantiza la calidad. La fibra de vidrio con un grosor total de 2-3 mm protege componentes que son menos susceptibles a la corrosión (Ilustración 4.36).

### Tanques de hojas de acero normal con una capa de barniz o un revestimiento plástico

Una capa de esmalte protege la durabilidad de la superficie de acero. Esta es semejante al vidrio y muy resistente.

Los tanques esmaltados son completamente fabricados de segmentos de hojas de acero. Los segmentos son preparados para el esmaltado, esto es, reciben limpieza por separado en diferentes baños de inmersión, después el polvo de esmalte es soplado hasta la formación de una capa uniforme. En el horno (el corazón de una fábrica de esmalte), las hojas de metal solo con el recubrimiento del polvo se calientan a 860°C, así el polvo del esmalte se derrite y forma una fuerte unión con la superficie del metal. Las hojas de metal únicamente son conectadas por medio de tornillos especiales. Los tanques de acero normal curvos y galvanizados en caliente (capa galvanizado de 80-120 µm) y las hojas de acero pueden también ser previstas con recubrimientos plásticos en ambos lados.

También se aplican pinturas epóxicas (grosor 2 por 40 µm) o una capa de poliuretano libre de solvente.

Estos tanques son fáciles, rápidos y seguros en su construcción, incluso el autoensamblaje con un sistema modular.

### Tanques de acero inoxidable

Los tanques de acero inoxidable usualmente consisten de hojas de acero soldadas de la calidad 1.4301, 1.4404, 1.4436, 1.4435 o 1.4571. Las juntas de las placas se sellan con bandas elásticas de PUR que lo hacen hermético al gas metano. Los tornillos y tuercas se fabrican de acero inoxidable.

### Tanques enterrados o lagunas con recubrimiento plástico

Los tanques enterrados o lagunas con protección de láminas de plástico, son los biorreactores y tanques más baratos. Estos son usualmente de 3.0 m de profundidad, de los cuales alrededor de 1.5 m se encuentra por debajo del nivel del suelo y tienen una altura de 1.5 m de pared de tierra excavada. Las cavidades son recubiertas con un material hermético al gas.

Tabla 4.14 Durabilidad de la protección de concreto aplicada en el fondo y las paredes del depósito con y sin un techo y los costos (Water Environment Federation, 2008)

Materiales usados para proteger el concreto	Durabilidad referida al depósito (años)				Costo de materiales específicos del sitio en \$ m <sup>2</sup>	Gastos de mano de obra específicos del sitio en h m <sup>2</sup>
	Con techo		Sin techo			
	fondo	paredes	fondo	paredes		
Chapopote	1	1-2	1-2	2	0.40-0.65	0.150
Dispersión de la resina sintética	1-2	3	2	3-4	1.25-2.30	0.125
Poliuretano (PUR)	3-4	5	5	6	1.25-3.60	0.075
Epoxi	4	5	5	6	1.90-3.75	0.150
Concreto asfáltico	15-20	15-20	15-20	15-20	25.00-35.00	

Se emplean recubrimientos de polietileno (PE) de 2 mm de espesor. Este material es resistente a la luz UV, heladas y filtraciones.

Cualquier material plástico que se utilice es removido completamente y reemplazado después de un tiempo.

### Equipos del sistema de gas

Medidores de flujo. La producción del gas es una medida del rendimiento del reactor. Un control confiable a los equipos alerta a los operadores de la planta de un mal funcionamiento en el proceso y fugas de gas. En la Tabla 4.15 se muestran los medidores de flujo usados para el monitoreo del gas y que se clasifican como: de desplazamiento positivo, dispersión térmica y presión diferencial.

Se recomienda que cada reactor tenga su medidor de flujo porque la velocidad de producción de gas del reactor varía. También se recomienda un medidor de flujo en cada equipo donde se usó el biogás. El gas contiene humedad e impurezas, las cuales causan problemas en la operación de los dispositivos de medición.

### Frecuencia del mantenimiento:

#### Mantenimiento diario

- Revisión del nivel del agua del gasómetro
- Revisión de mangueras del gasómetro
- Verificación de la formación de lodos

#### Mantenimiento cada tercer día

- Chequeo de fugas y estado de tuberías
- Revisión de uniones de tuberías
- Revisión válvulas de alivio

#### Mantenimiento semanal

- Obra física del reactor
- Revisión y evacuación de la purga de agua
- Revisión del filtro de dióxido de carbono

#### Mantenimiento quincenal

- Revisión del filtro de ácido sulfhídrico
- Revisión general del reactor
- Limpieza de contornos y accesos

Tabla 4.15 Indicadores y medidores del flujo del gas (Water Environment Federation, 2008)

Tipo	Aplicaciones	Operación y mantenimiento
Desplazamiento positivo	Usado en muchas plantas. Dispositivos grandes que requieren una tubería en derivación para darle mantenimiento Si el gas está limpio, no requieren para la precisión la instalación de secciones de tubería recta antes y después del dispositivo	Poco tolerante al gas sucio. Requiere limpieza y reconstrucción periódicamente
Dispersión térmica	Tecnología cada vez más utilizada debido a la tolerancia al gas sucio y a su simple instalación. Exactitud para flujos pequeños. Algunos problemas de precisión con flujo cero, como en los quemadores de gas. Requiere para precisión la instalación de tramos de tubería recta antes y después del dispositivo. Se insertan y remueven a través de válvulas de bola	Son más pequeños que otros dispositivos de medición. Requieren limpieza periódica de la sonda. No requieren tubería en derivación para el mantenimiento
Orificios de presión diferencial y venturis	Comúnmente usado en plantas viejas. Necesita sección de tubos rectos antes y después	Requieren limpieza frecuente cuando se usa para gas sucio. La precisión depende de la limpieza de los instrumentos. Reducen el flujo de gas cuando se ensucia

## Mantenimiento Mensual

- Cambio del agua del gasómetro
- Chapeo de los contornos

### 4.10.6 SISTEMAS DE SEGURIDAD DEL GAS, DISPOSITIVOS DE CONTROL, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO REQUERIDO

**Seguridad del sistema de gas y dispositivos de control.** Los sistemas de gas incluyen equipamiento de seguridad y control, tales como arrestadores de llamas, sistemas para medir y controlar la presión del gas y quemadores para el gas no utilizado. La seguridad del sistema de gas y los dispositivos de control se enlistan en la Tabla 4.16, con la descripción de su uso y mantenimiento requerido.

#### Bengalas de gas

Una bengala de gas (ilustración 4.48) previene el escape a la atmósfera del biogás sin quemarlo y por lo tanto es esencial para la protección del ambiente y es casi siempre solicitada por ley en muchos países. Por supuesto, la bengala de gas se emplea lo menos posible, ya que de otra manera no se aprovecha la energía del biogás. Esto preferible, por ejemplo, el cambio del flujo de biogás a otro consumidor.

Las tuberías de gas que conectan la bengala a la planta de biogás deben contener los siguientes dispositivos: un dispositivo de aislamiento de operación manual, un dispositivo de emergencia con interruptores automáticos

de la alimentación del biogás, una trampa de llamas como un dispositivo de seguridad y en la bengala un mecanismo de encendido de operación automático, equipo de control de llama y pararrayos.

La bengala se instala a una altura tal que la apertura este por lo menos cuatro o cinco metros arriba de los edificios, de vías transitadas y de almacenamientos de materiales explosivos y se ubican lejos de las zonas que requieren protección contra explosión.

#### Dispositivos de seguridad frente al quemador de gas

Las plantas de biogás están frecuentemente equipadas con una bengala de gas, de modo que en caso de emergencia, el  $\text{CH}_4$  se quema y no se escapa a la atmósfera. Sin embargo esto incrementa el riesgo de que la llama del quemador de gas devuelva el golpe dentro de la planta y prenda fuego a toda la planta. Por lo tanto, los dispositivos de seguridad mostrados en la ilustración 4.49, son esenciales.

#### Dispositivos de seguridad que contrarrestan el incremento de presión y la presión negativa

Estos son críticos para la prevención de un incremento en la presión o una presión negativa en el bioreactor, con el fin de no tener algún riesgo.

Por medio de un tubo en U (ilustración 4.50), los incrementos en la presión y las presiones negativas están limitadas simplemente por la longitud de la columna de agua.

Tabla 4.16 Sistemas de seguridad del gas y dispositivos de control (Water Environment Federation, 2008)

Tipo	Aplicaciones	Operación y mantenimiento	Ejemplo
<p>Trampas para llamas (diámetros de tuberías grandes) y válvulas de control de llamas (check, para diámetros de tuberías pequeños), también se denominan arrestadores de llamas</p>	<p>Usadas para detener la propagación de llamas en una tubería. Las trampas para llamas se instalan con válvulas de cierre hermético, en las tuberías de suministros de gas: compresores, calderas, quemadores y otras fuentes de encendido. También se usan en las cubiertas del reactor con válvulas de descarga de presión y vacío</p>	<p>Requieren limpieza periódica, mensual. Así mismo, requieren aislamiento y calentamiento en climas fríos para prevenir la formación de hielo. La espuma obstruye los dispositivos, requiriéndose el cambio de dispositivos, particularmente de válvulas liberadoras o controladores de presión y vacío</p>	 <p>Ilustración 4.39 Trampa para llamas</p>
<p>Válvulas de cierre térmico</p>	<p>Válvulas aislantes con carga de resorte o que operan a presión, se cierran a temperaturas de llama. Se instalan entre la trampa para llamas y la fuente de encendido</p>	<p>Reemplazar elementos periódicamente. Usualmente incluye un indicador que muestra que la válvula ya no funciona. Requieren aislamiento y calentamiento en climas fríos, lo que previene la formación de hielo</p>	 <p>Ilustración 4.40 Válvula de cierre térmico</p>
<p>Válvulas reguladoras de presión y vacío</p>	<p>Se instalan en todas las cubiertas de los reactores lo que evita la sobrepresurización o condiciones de vacío en el reactor. Son ajustables, deben calibrarse para que trabajen por debajo de los límites de operación de la cubierta. Se instalan dos en cada cubierta para que continúe la protección del reactor mientras se da el mantenimiento</p>	<p>Checar su sello periódicamente; reemplazarlos si presentan fugas. Requieren aislamiento y calentamiento en climas fríos para prevenir la formación de hielo. Las válvulas reguladoras son la última medida de seguridad de las cubiertas del reactor, lo que evita sobrepresión o vacío. También se instalan en la cubierta válvulas de contra presión que junto con estas protegen el reactor</p>	 <p>Ilustración 4.41 Válvula reguladora de presión y vacío</p>
<p>Quemadores de flama</p>	<p>Empleado para plantas pequeñas y donde el control riguroso de las emisiones de aire no es necesario. Generalmente la flama es visible</p>	<p>Es necesario un buen suministro de gas piloto (gas natural o propano). El calentamiento y la corrosión hacen necesario un reemplazo periódicamente. Los sistemas piloto requieren mantenimiento frecuentemente</p>	 <p>Ilustración 4.42 Quemador de flama</p>
<p>Bengalas de combustión controlada</p>	<p>Se instalan en plantas donde las emisiones de aire son rigurosamente controladas y no se desean llamas visibles. Control de aire proporcionado para el mantenimiento de una temperatura suficiente para la combustión completa del gas. Estas bengalas se operan a una temperatura específica lo que permite la operación por debajo del límite de emisiones establecido en normas. Si son de gran tamaño requieren de un combustible auxiliar que incrementa los costos de operación</p>	<p>Los sistemas y los ventiladores requieren mantenimiento periódicamente</p>	 <p>Ilustración 4.43 Bengala de combustión controlada</p>

Tabla 4.16 Sistemas de seguridad del gas y dispositivos de control, continuación (Water Environment Federation, 2008)

Tipo	Aplicaciones	Operación y mantenimiento	Imagen
Indicadores de presión	Los manómetros usados para presiones bajas [760 mm columna de agua (30 pulgadas columna de agua) o menores]. En las líneas de manejo de gas, se instalan manómetros de alta presión	Limpieza de los manómetros periódicamente, reemplazo de fluidos y calibración de medidores. Los medidores de presión se proveen con un diafragma aislante para la prevención de la contaminación de gas	 Ilustración 4.44 Indicador de presión
Válvula de contrapresión	Mantiene la presión regulada lo que evita estallamientos por sobre presurización. Generalmente usa peso para el ajuste de la presión de descarga. La línea de lectura debe estar aguas arriba de la tubería de recolección de gas, lejos de la válvula y es de tamaño grande lo que evita obstrucciones	Requiere un mantenimiento frecuente para la prevención de taponamientos. Esta válvula regula la presión en el sistema de tuberías de colección del gas y es el primer nivel de protección de sobre presurizaciones en la cubierta del reactor	 Ilustración 4.45 Válvula de contrapresión
Quemadores de gas residual	Proporcionados para la quema de los excedentes de gas. Provistos con piloto permanente o encendido electrónico	Se instalan en todas las plantas y funcionan como un medio de disposición adecuada de gas	 Ilustración 4.46 Quemador de gas residual
Válvulas de retención de baja presión (check)	Usadas para la prevención del contraflujo de gas. Construidas con aleta flexible, lo que asegura la operación a bajas presiones	Si no funciona revisar la aleta y reemplazarla	 Ilustración 4.47 Válvula de retención de baja presión

Ilustración 4.48 Bengala para altas temperaturas (1050°C) con la llama oculta



El Bioguard<sup>R</sup> es un dispositivo de desplazamiento que se suspende en una cuerda y se fija arriba de la cubierta del gas. El dispositivo de desplazamiento se sumerge más o menos dentro de un sifón, de ese modo cambia el nivel del líquido en el sifón. Con una presión demasiado alta, la cubierta del gas se levanta y el dispositivo de desplazamiento sube. Esto provoca una caída del líquido estancado, de modo que el biogás puede salir del biorreactor. Por la pérdida de presión, el nivel de agua, la cubierta de gas y el dispositivo de desplazamiento se bajan y el sistema del gas es bloqueado de nuevo por

el líquido estancado. En el caso de presiones negativas, el líquido estancado en el sifón se incrementa hasta que el flujo del aire puede bajar del sifón. La presión negativa mínima está limitada a 4 mbar por un orificio perforado de 2 cm por encima del borde superior del sifón.

En lodos de aguas residuales y plantas de fermentación de residuos biológicos, los

dispositivos de seguridad son más complicados (ilustración 4.51). Si se presenta una sobrepresión o presión negativa estos dispositivos de seguridad cierran la salida del gas por medio de un diafragma. El diafragma se encuentra cubierto con una capa de agua. El espacio por encima de la capa de agua sigue perteneciendo al espacio del biorreactor y está lleno con biogás. Al presentarse una presión negativa, el diafragma

Ilustración 4.49 Dispositivos de seguridad frente a la bengala o quemador de gas (Deublein & Steinhauser, 2011)

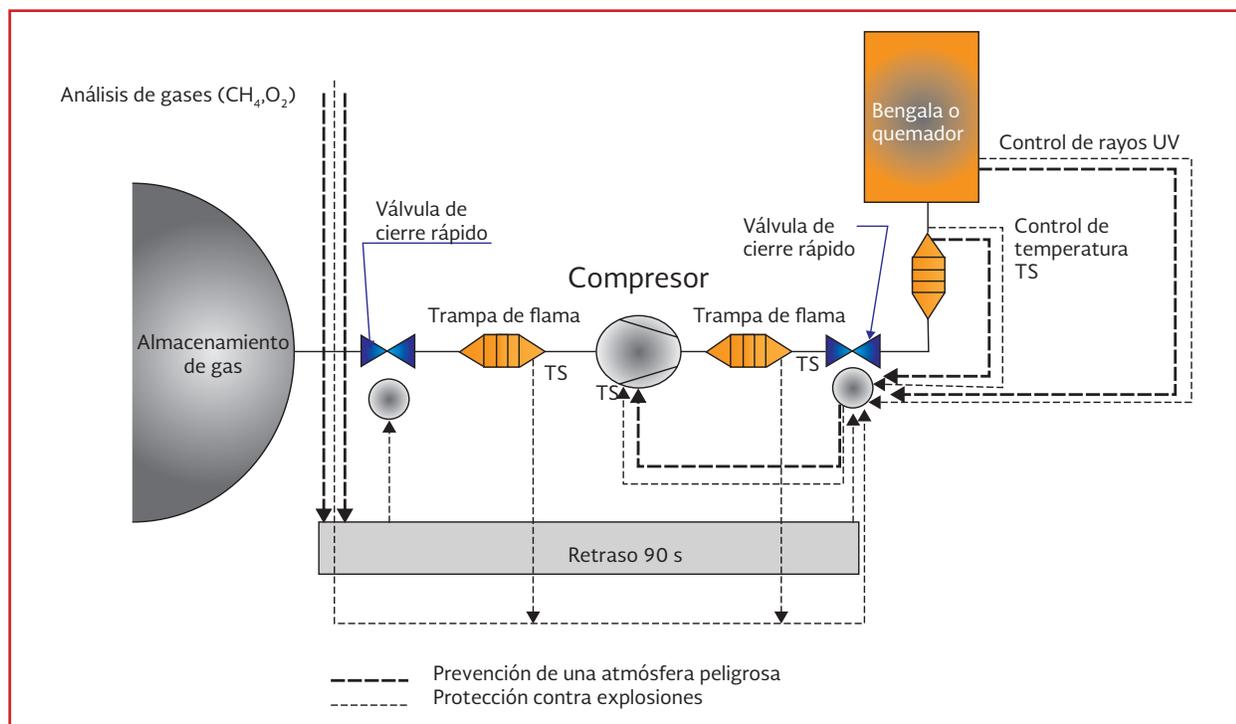
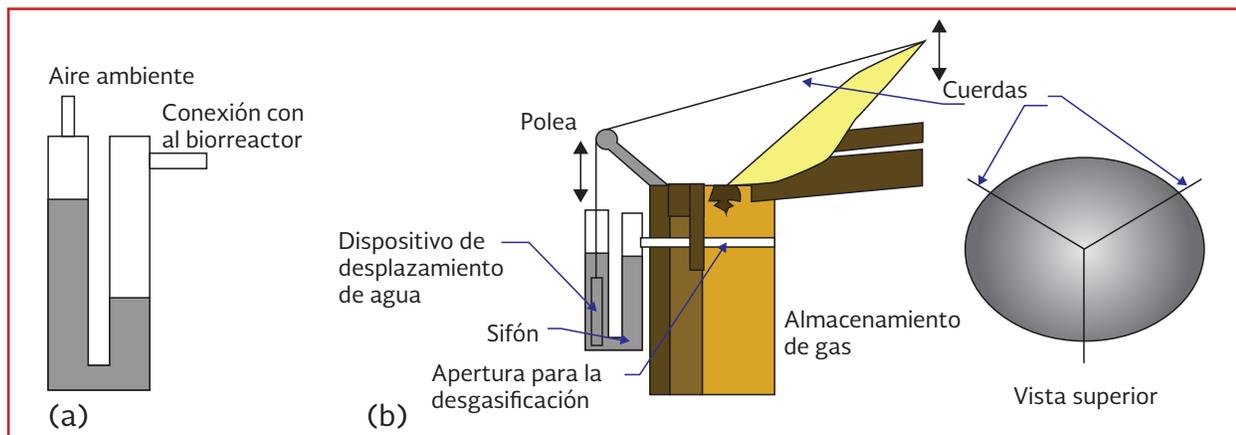


Ilustración 4.50 Dispositivos de seguridad para altas y bajas presiones en una planta de gas: (a) tubo en "U"; (b) Bioguard<sup>®</sup> (Deublein & Steinhauser, 2011).



se eleva y el flujo del aire del ambiente entra al bioreactor debajo del diafragma. A presión positiva, el agua es presionada dentro de una cámara de anillo externo, de modo que el gas burbujea fuera del bioreactor debajo de la pared de la cámara.

#### 4.10.7 REGLAMENTOS Y LINEAMIENTOS

Los reglamentos y legislación pertinentes tienen como objetivo la eliminación o reducción de todos los riesgos que afectan la seguridad de las personas y el ambiente en una planta de biogás.

En una planta de biogás existen los tanques de almacenamiento y tuberías que contienen gases como  $H_2S$ ,  $CH_4$  y  $CO_2$ . Algunos de estos gases son más pesados que el aire y tienden a permanecer en los contenedores. Los siguientes gases por ejemplo, son dañinos incluso a bajas concentraciones:

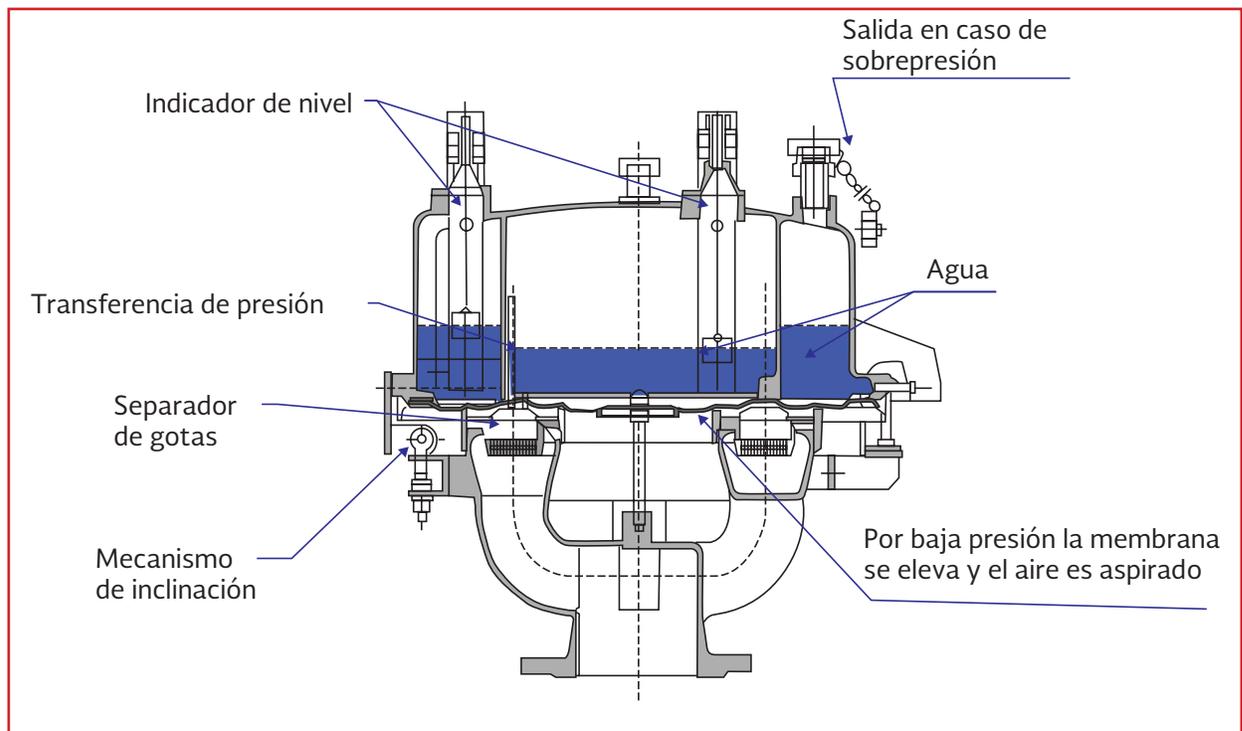
Sulfuro de hidrogeno ( $H_2S$ )	TLV <sup>1)</sup> = 10 ppm
Monóxido de carbón (CO)	TLV= 50 ppm
Cloruro ( $Cl_2$ )	TLV= 0.5 ppm
Dióxido de carbono ( $CO_2$ )	TLV=5000 ppm

<sup>1)</sup> El VLU (el valor límite umbral) es la concentración máxima de gases tóxicos en el lugar de trabajo= LEP (límite de exposición permisible).

#### Reglamentos relacionados a la construcción de la planta

En general todas las partes de la planta se inspeccionan y en su caso, se aprueban por las autoridades. Esto incluye las instalaciones como: bioreactores, contenedores de gas, turbinas de gas, tanques de aceite para encendido y tanques de almacenamiento. La formación de mezclas

Ilustración 4.51 Válvula de membrana para regular presiones altas y bajas en una planta de biogás (Deublein & Steinhauser, 2011)



de gas explosivas puede ocurrir en la planta de biogás, por lo tanto existe un sistema de seguridad de acuerdo a las instalaciones y a la operación de los dispositivos eléctricos en áreas con peligro de explosión. Estas áreas son las siguientes:

- Áreas cerradas las cuales sirven para el almacenamiento de gas o áreas donde se produce el gas u otros espacios cerrados los cuales están conectados a estas áreas
- Canales y tanques de almacenamiento
- Áreas con maquinaria, tanques y tuberías las cuales contienen biogás
- Áreas alrededor de los equipos donde se descarga el gas, por ejemplo, las válvulas de seguridad del bioreactor o los tanques de almacenamiento de gas

### **Riesgos de explosión**

Para prevenir el riesgo de explosión, el reglamento considera la prevención de explosión por gas, además de los riesgos que existen por los sistemas eléctricos. Además se consideran los reglamentos y la asesoría para el manejo de líquidos inflamables y la prevención de accidentes.

Se deben establecer simulacros en áreas con alto riesgo de explosión. Éstos se realizan antes del arranque y posteriormente son de rutina.

La formación de mezclas explosivas gas-aire se espera cerca de los contenedores de gas y bioreactores, por lo que estas zonas se deben declarar como zonas de riesgo.

En el diagrama triangular de la ilustración 4.52, se muestran los límites de explosión a

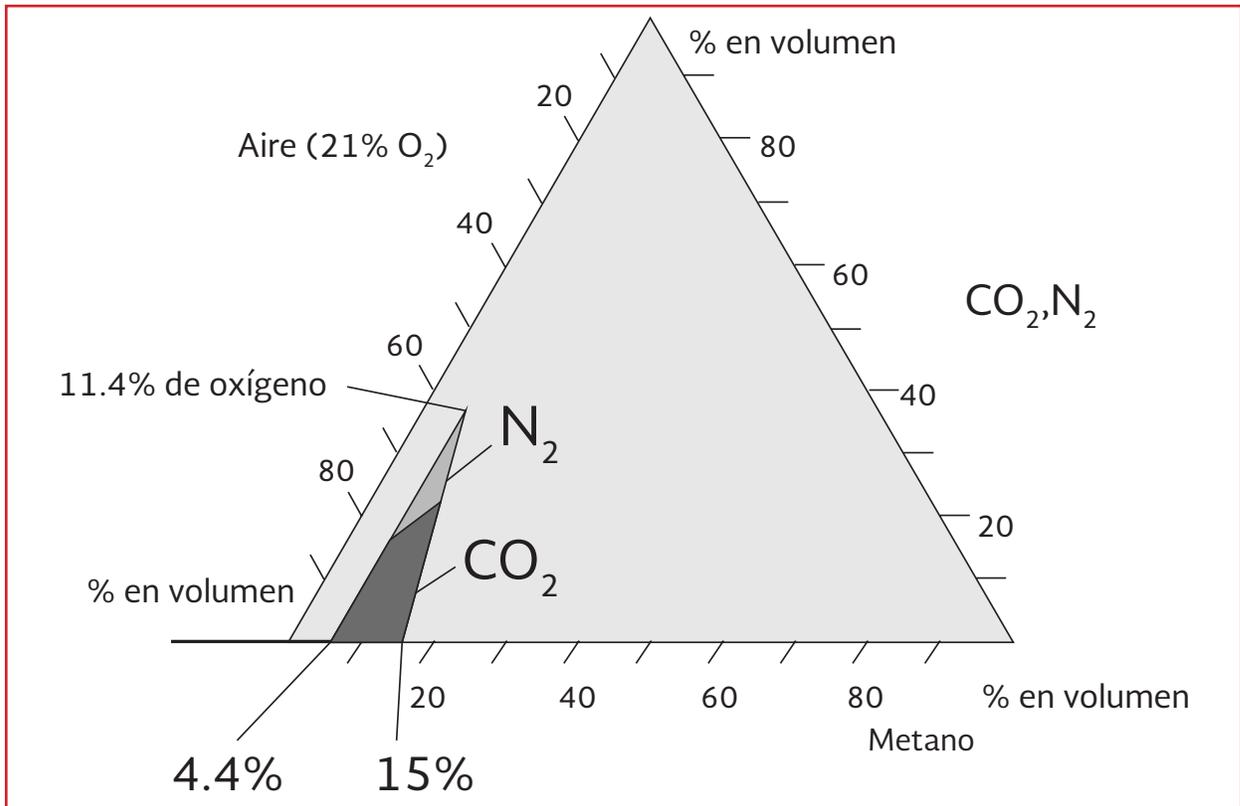
temperatura ambiente. Estos son dependientes de la temperatura. Las áreas con riesgos de explosión se clasifican en zonas de acuerdo a la probabilidad de que ocurra una explosión a la atmósfera. Si una explosión puede ocurrir en una planta (ilustración 4.53), no es necesario que toda la planta se considere altamente explosiva, sino que se determinan zonas de riesgo

Zona 0 (cero). Incluye áreas con constantes daños explosivos a la atmósfera, a largo plazo o frecuentes (la mayor parte del tiempo). Éstos consisten en una mezcla de aire y gases, vapores o nieblas. En las plantas de biogás, pertenecen a la zona 0 los siguientes equipos: los contenedores de gas, la entrada del aire a la cámara de combustión, la cámara de combustión de la antorcha de gas y el biorreactor bajo condiciones especiales. Una condición especial de operación se produce cuando el aire entra al interior del bioreactor. Bajo condiciones normales de operación, una presión positiva pequeña previene la penetración de aire dentro del bioreactor.

Existe constantemente una mezcla explosiva a la entrada del motor de combustión o la entrada a la cámara de combustión del quemador o bengala de gas. El motor y la bengala de gas se encuentran separados del resto de los sistemas de gas por dispositivos de seguridad como una trampa o arrestador de llamas.

Zona 1. Se refiere a áreas en las cuales una atmósfera explosiva consiste en una mezcla de aire y gases, vapores o nieblas que pueden ser generadas ocasionalmente. Con aireación abierta, la zona 1 puede localizarse a un metro alrededor de los componentes de la planta, accesorios, conexiones, visores del líquido,

Ilustración 4.52 Límite de explosión a 25°C (Deublein & Steinhauser, 2011)



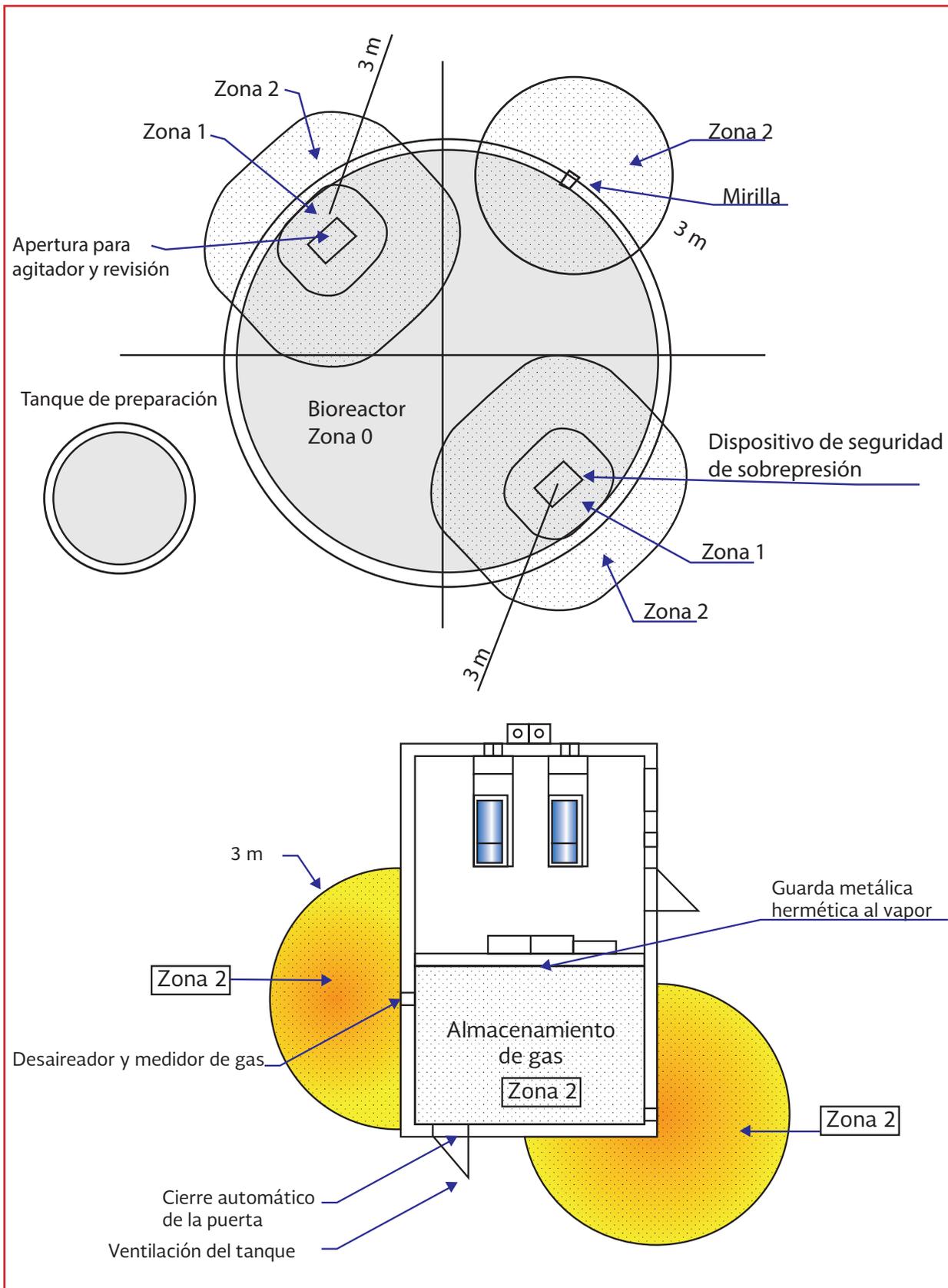
ductos y aberturas de servicio del contenedor de gas y parte del gas de los bioreactores en caso de que el biogás escape durante la operación. También se considera como zona 1, el área alrededor de las bengalas de gas, de las tuberías de descarga y de los dispositivos de control de presión de gas.

Zona 2. Áreas cubiertas para las cuales es difícil la estimación del riesgo por formación de mezclas explosivas. Generalmente el riesgo en estas áreas se considera bajo y si se presenta algún peligro de explosión es por poco tiempo. La zona 2 está en la región de 1-3 m lejos de los componentes de la planta los cuales son clasificados técnicamente como a prueba de fugas, tales equipos, conexiones, registros de

servicio y discos de ruptura. Además cárcamos abiertos (por ejemplo, cárcamo para bombas de lodos anaerobios) y áreas cerradas sin ventilación que tengan instaladas tuberías de gas.

Para muestra, se presenta un ejemplo: una bolsa de plástico con una cubierta de madera a prueba de explosión, se clasifica en zona 2; esto significa que en un radio de 3 m alrededor de la bolsa no se permite la instalación de una turbina de gas (CHP, por sus siglas en inglés) pero si la bolsa de plástico se localiza en una construcción hecha de concreto o acero, la bolsa por si sola pertenece a la zona 2 y el área dentro de un radio de 3 m alrededor de las puertas y otras aperturas. La CHP puede instalarse justo afuera de este espacio.

Ilustración 4.53 Áreas explosivas en las plantas de biogás (Deublein, D., y Steinhauser, A., 2011)



Se considera una radio de 1 a 3 m para el logro de una buena ventilación. Las áreas cerradas en su totalidad se consideran como zona 2. Más detalles acerca de las zonas explosivas en las plantas de biogás se estipulan por las diferentes compañías de seguros.

### Riesgos de incendio

Para la reducción del riesgo de incendio, la planta se divide en sectores, por ejemplo, el bioreactor y contenedor de gas, el equipo de consumo y el compresor de gas. Se deben mantener ciertas distancias en los diferentes sectores. Estas dependen del material con que se construyen o recubren los diferentes edificios o instalaciones que contienen los equipos.

### Distancias de protección alrededor de los tanques de almacenamiento de gas, que se fijan en el suelo

En la Tabla 4.17 se muestran las distancias recomendadas entre los tanques de almacenamiento de gas se encuentran las bolsas de plástico en contenedores simples o en espacios cerrados, por ejemplo, antiguos tanques de ensilado. La distancia de protección es pequeña si se cubren con tierra espacios peligrosos o si se instala una protección metálica o aislante contra incendios.

### Distancias de protección alrededor de los contenedores de gas subterráneos y cubiertos de tierra

Estas se muestran en la Tabla 4.18. Para estos contenedores las distancias de protección se dejan alrededor de las estructuras y aberturas.

Respecto a los tanques cubiertos de tierra, se estipula que no se permite el tránsito por esas áreas. Así mismo se proporciona señalamiento y compuertas de acceso.

### Distancias de protección para tanques esféricos y para el almacenamiento de gas en los bioreactores

Estas distancias se muestran en la Tabla 4.19.

### Gases de escape nocivos

De las plantas de biogás, escapan gases dependiendo de la temperatura del lugar, mismos que son perjudiciales para las personas, tales como amoníaco, metano y óxido nítrico. La cantidad de fugas depende de la tecnología aplicada y del sustrato (Tabla 4.20).

### Emisión de olores

Tabla 4.17 Protecciones metálicas (Deublein & Steinhauser, 2011).

	Volumen de gas por tanque (m <sup>3</sup> )				Material de las paredes
	Arriba de 300	300-1500	1500-5000	Arriba de 500	
Corta fuegos (m)	6	10	15	20	Otros materiales, clase B
Corta fuegos (m)	3	6	10	15	No inflamable, clase A, retardador del fuego (F30) <sub>a)</sub> , hermético al vapor
Corta fuegos (m)	3	3	6	10	No inflamable, clase A, retardador del fuego (F30) <sub>a)</sub> , hermético al vapor

a) Para las clases resistentes al fuego F30 y F90, la resistencia dura un mínimo de 30 y 90 min, respectivamente.

Tabla 4.18 Corta fuegos (contenedores de gas subterráneos, etc.) (Deublein, D., y Steinhauser, A., 2011)

	Volumen de gas por tanque (m <sup>3</sup> )			
	Arriba de 300	300-1500	1500-5000	por encima de 5000
Corta fuegos (m)	3	6	10	15

Tabla 4.19 Corta fuegos (globos contenedores de gas, etc.) (Deublein & Steinhauser, 2011).

	Volumen de gas por tanque (m <sup>3</sup> )			
	Arriba de 300	300-1500	1500-5000	por encima de 5000
Corta fuegos (m)	4.5	10	15	20

Los compuestos que producen olores fuertes en las plantas de biogás son particularmente el amoníaco, los ácidos orgánicos, los fenoles y el sulfuro de hidrógeno. Los olores causan frecuentemente molestias y/o quejas en áreas cercanas a la planta de biogás.

**Amoniaco (NH<sub>3</sub>):** tiene un olor fuerte, induce eutrofia y su emisión depende de la temperatura. Por la degradación de sustancias orgánicas, se produce nitrógeno. Durante la degradación, el valor del pH incrementa alrededor de una unidad debido a la descomposición de ácidos. La temperatura en el tanque de almacenamiento de lodos es alta debido a la alta temperatura del proceso en el bioreactor. De este modo una gran cantidad de amoníaco volátil se libera.

**Óxido nitroso (gas de la risa):** el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) huele ligeramente dulce y causa risas, alucinaciones e intoxicación. El óxido nitroso puede generarse en altas concentraciones, cuando el nitrito y nitrato son descompuestos bajo condiciones anaerobias junto con compuestos orgánicos fácilmente degradables (desnitrificación) o cuando el amoníaco se oxida bajo condiciones anaerobias.

### Protección contra el ruido

El ruido se define como un sonido perturbador. No hay un lugar donde el sonido no cause disturbio. El área en una planta de biogás donde el ruido es más intenso es cerca del motor del gas. Cerca de las plantas CHP, se excede el valor límite de 80 dB establecido para los lugares de trabajo.

También genera ruido el escape de las tuberías y las aberturas de ventilación del área de la planta. La operación de los reactores, las bombas, los compresores y los sistemas de enfriamiento de emergencia.

### Protección contra el agua

El daño al ambiente se incrementa cuando el agua contaminada por ejemplo, de las plantas de deshidratación de lodos o de las precipitaciones penetra en el suelo o, aún peor, alcanza las aguas subterráneas. Esto ocurre principalmente debido a un terreno no impermeabilizado dentro del sitio de la planta, grietas en los tanques y/o en la carcasa del motor o corrosión de las tuberías.

### Limpeza del aire de escape (gases de escape)

En varios lugares de la planta de biogás, emerge aire de escape en grandes cantidades.

La tubería del aire de escape del reactor de

Tabla 4.20 Emisiones de lodos (sin adoptar medidas para la minimización de las emisiones tales como espuma) (Deublein & Steinhauser, 2011)

Emisiones	Posibles fuentes de emisiones	Comparado con lodos no fermentados (%)	Observaciones
Microorganismos patógenos	Tanque de preparación, tanque de almacenamiento		Cuando la planta está bien operada el número de patógenos disminuye (por ejemplo, por desinfección, disminución de valores de pH intermedios, contenido de amoníaco)
Olores	Tanque de preparación, tanque de almacenamiento, tanque de alimentación	-31	Las emisiones de olores tienden a disminuir por la degradación de sustancias que provocan olor en los lodos, sin embargo pueden incrementarse por el uso de tecnología o equipos inapropiados y por las impurezas
Amoníaco	Tanque de preparación, tanque de almacenamiento, tanque de distribución	+21 a +64	Las emisiones de amoníaco incrementan debido a un incremento en el pH y en la temperatura y debido a la conversión de compuestos de nitrógeno a amoníaco
Metano	Tanque de almacenamiento	-67 a +87	
Óxido nitroso (N <sub>2</sub> O)	Tanque de preparación, tanque de almacenamiento, tanque de distribución	-36 a -72	

Tabla 4.21 Toxicidad del sulfuro de hidrógeno (Deublein & Steinhauser, 2011)

Concentración (en aire)	Efecto
0.03-0.15 ppm	Umbral de detección (olor a huevo podrido)
15-75 ppm	Irritación de los ojos y de las vías respiratorias, náuseas, vómito, dolor de cabeza, pérdida del conocimiento
150-300 ppm (0.015-0.03%)	Parálisis del nervio olfatorio
200 ppm	Umbral de tolerancia máximo 1 hora
>375 ppm (0.038%)	Muerte por envenenamiento (después de 30 minutos)
>750 ppm (0.075%)	Pérdida del conocimiento y muerte por apnea de 30-60 min
Arriba de 1000ppm (0.1%)	Muerte por apnea dentro de pocos minutos

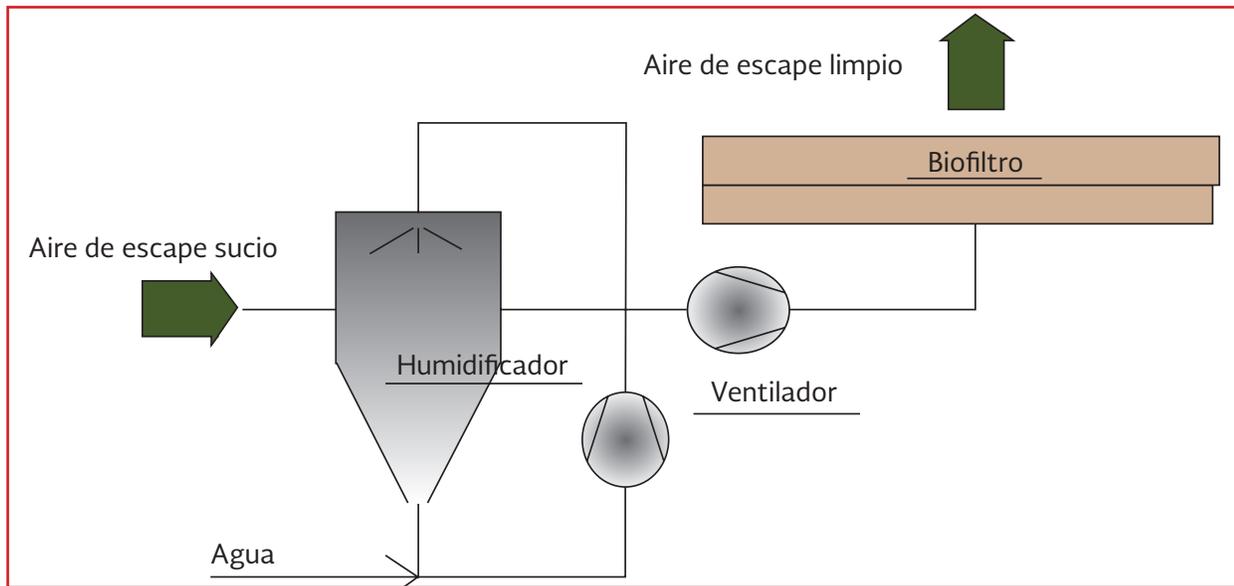
hidrólisis se conecta a la tubería de biogás o por ejemplo, a la tubería de descarga de aire central de la planta. Cuando el aire de escape es adicionado al biogás, la calidad del gas se deteriora y los riesgos de explosión incrementan. Fluctuaciones en el pH durante la hidrólisis resultan en una producción repentina de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>, lo cual en ocasiones apaga el motor del gas. Cada emisión no controlada del gas de escape dentro del ambiente representa una fuente de olor y también de daño, por lo tanto el aire de escape se limpia. Para este propósito, se utilizan biolavadores, depuradores químicos y biofiltros.

agua y se prefieren cuando la concentración de sustancias olorosas es alta y la concentración de H<sub>2</sub>S es menor de 20 mg m<sup>-3</sup>.

Los depuradores químicos son recomendados para altas concentraciones de H<sub>2</sub>S, los cuales son operados con una solución de sosa cáustica a un pH alrededor de 10. Sin embargo un biofiltro tiene que ser instalado en la parte inferior, para la desodorización. Los biofiltros se utilizan para el tratamiento del aire de escape (ilustración 4.54) con concentraciones mayor de 20mg m<sup>-3</sup> de H<sub>2</sub>S.

Los biolavadores trabajan con circulación de

Ilustración 4.54 Purificación biológica del aire de escape (Deublein & Steinhauser, 2011)



#### 4.11. COSAS PARA RECORDAR

- La estabilización anaerobia es un proceso bioquímico que estabiliza diferentes tipos de materiales orgánicos. Esta ocurre en tres etapas: (1) Las enzimas extracelulares, rompen complejos orgánicos sólidos, (2) Los microorganismos (bacterias acetogénicas) convierten los productos de la primera etapa en ácido acético, ácido propiónico, hidrógeno, dióxido de carbono y otros ácidos orgánicos de bajo peso molecular, (3) Trabajan dos grupos de bacterias formadoras de metano. Uno convierte hidrógeno y dióxido de carbono a metano y el otro convierte acetato a metano y bicarbonato, se requiere que los reactores sean cerrados para impedir la entrada del oxígeno debido a que ambos grupos de bacterias son anaerobias
- Existen diferentes tipos de estabilización anaerobia: (1) mesofílica convencional, (2) avanzada, (3) ácido gas, (4) termofílica, (5) multietapas, (6) de alta concentraciones de sólidos. Para mejorar el rendimiento del proceso de estabilización elegido, existen procesos de pretratamiento como el tratamiento de ultrasonido, la hidrólisis térmica, la pasteurización y/o la homogenización
- En el proceso de estabilización anaerobia se emplea una gran variedad de configuraciones de tanques y diferentes tipos de equipos (cubiertas del reactor, mezcladores mecánicos, mezcladores con impulsores mecánicos, los difusores, las lanzas, las pistolas de burbuja y los levantadores de gas)
- El calentamiento del reactor es muy importante para el mantenimiento de los microorganismos formadores de metano a una temperatura óptima de crecimiento (32 °C a 60 °C). La temperatura del contenido del reactor no debe desviarse de la temperatura de operación por más de 0.6 °C por día, para lo que se cuenta con sistemas de calentamiento interno y externo

- Los tres parámetros que son críticos para el aseguramiento de un proceso de arranque sin problemas son: mantenimiento de una temperatura de operación específica; un mezclado constante y una velocidad de carga específica de sólidos volátiles, con una variación diaria que no exceda  $\pm 10$  por ciento
- La tasa de carga orgánica para un reactor con buen mezclado y calentamiento se encuentran en el rango de 1.6 a 3.2 kg de sólidos volátiles  $\text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$ . La tasa de carga orgánica controla el proceso de estabilización anaerobia. Los lodos se retiran del reactor por lo menos una vez al día, lo que evita una caída repentina en la población activa de microorganismos, así como una perturbación en la relación del reactor AV : ALC, la cual afecta la capacidad buffer del sistema
- El control de la estabilización anaerobia se lleva a cabo realizando una serie de pruebas (temperatura, pH, alcalinidad, ácidos volátiles, relación AV/ALC) en muestras colectadas de tres puntos: (1) alimentación del reactor, (2) lodos recirculados, y (3) sólidos estabilizados del proceso
- El gas del reactor (conocido como biogás), se forma durante la última

etapa de estabilización, cuando los microorganismos convierten los ácidos orgánicos y el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) a metano ( $\text{CH}_4$ ) y agua. La producción del gas está directamente relacionada a la cantidad de sólidos volátiles destruidos en la estabilización. El rango de valores típicos es de 0.75 a 1.1  $\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$  de sólidos volátiles destruidos

Así mismo se controlan otros parámetros, lo que evita fallas en la operación del reactor como: el control de toxicidad, la formación de espuma y la suciedad en el reactor.

- La recuperación de la energía del gas del reactor se considera como una de las tecnologías más maduras y exitosas para la obtención de energía a partir de residuos, sin embargo se requiere de una serie de tratamientos para su purificación
- Los equipos utilizados en una planta de biogás dependen del volumen de gas tratado y reciben mantenimiento adecuado lo que evita contaminaciones en el producto final (biogás)
- Si una planta de biogás cuenta con los sistemas de seguridad idóneos, evita daños a la salud de sus trabajadores y al medio ambiente



# 5

## OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE RELLENOS SANITARIOS DE LODOS RESIDUALES

### 5.1. INTRODUCCIÓN

Un relleno sanitario bien ubicado y diseñado, se convierte en un tiradero a cielo abierto, si no se opera adecuadamente. Cada instalación destinada para un relleno sanitario tiene características únicas que solo se aprenden mediante el conocimiento, la experiencia y el continuo entrenamiento.

La operación y el mantenimiento adecuado de un relleno sanitario es porque:

- Evita que el relleno sanitario se convierta en un tiradero a cielo abierto
- Reduce los impactos negativos potenciales en aire, agua y suelo
- Minimiza o elimina los impactos hacia las propiedades o zonas adyacentes
- Reduce los costos de operación (a largo plazo)
- Incrementa la capacidad volumétrica y ampliar al máximo la vida útil
- Establece y mantiene buenas relaciones públicas
- Reduce los conflictos con las instancias reguladoras o normativas
- Reduce accidentes, demandas e indemnizaciones
- Demuestra la capacidad operativa

- Satisface las necesidades de disposición final de residuos sólidos de la región

Los procedimientos de operación para un relleno sanitario varían dependiendo de diferentes factores, entre los que se citan el tipo de relleno, el clima, las cantidades, tipos de residuos a recibirse, la regulación a nivel local, estatal etc. Sin embargo, se pueden establecer ciertas actividades que son muy similares para todos los sitios, como una guía para quienes deben encargarse de su adecuado funcionamiento (GRCDA, 1988).

### 5.2. PRINCIPALES FACTORES DE OPERACIÓN DE LOS RELLENOS SANITARIOS

El propósito de este capítulo es la presentación de esquemas para una operación efectiva del relleno sanitario de lodos. La operación de un relleno sanitario de lodo es vista como un proyecto de construcción en curso. Al igual que con cualquier proyecto de construcción, se procede de acuerdo a esquemas detallados. A diferencia de la construcción convencional, los parámetros de funcionamiento de un relleno sanitario de lodos a menudo cambian y requieren modificaciones innovadoras y planes

de contingencias. Una operación eficaz requiere un detallado plan de operación y una selección de equipos compatibles con las características de los lodos, las condiciones del sitio y el método o tipo de relleno.

En este capítulo, la operación del sitio se observa en dos partes: la primera se refiere a los procedimientos operativos que son específicos para el método de relleno; la segunda parte se refiere a los procedimientos operacionales generales que son independientes del método de relleno.

### **Procedimientos de operación específicos del método o tipo de relleno de lodos**

Los procedimientos dependientes del método de relleno incluyen:

1. Preparación del terreno
2. La descarga de lodos
3. Manejo de lodos y cubierta

Estos procedimientos varían para cada método de relleno de lodo, que se discutirán a continuación:

#### **5.2.1 ÁREA DE RELLENO DE LODOS**

Para el área de relleno de lodos, los lodos se colocan generalmente por encima de la superficie original del terreno. En el área de llenado (ilustración 5.1), el suelo generalmente se mezcla con el lodo como un agente acondicionador. La cubierta coloca en forma temporal y final.

Tres tipos de área de rellenos de lodos, se han definido, incluyendo: (1) Área de llenado en

pilas o montículo, (2) Área de llenado en capas, y (3) con diques de contención. En el llenado del área en pilas o montículos las mezclas de lodo/suelo suelen apilarse en montones de 1.8 m de altura aproximadamente. En las operaciones de relleno del área en capas, las mezclas de lodo/suelo se distribuyen uniformemente en capas de 0.15-0.9 m de espesor. En las operaciones de diques de contención, los lodos (con o sin aumento de volumen de suelo) se vierten a fosas contenidas por diques construidos por encima de la superficie del suelo (EPA, October 1978).

##### **5.2.1.1 Área de relleno en montículos o pilas**

Los rellenos en montículos o pilas pueden usarse en diferentes topografías. Por lo general, este tipo de operaciones se llevan a cabo en un terreno nivelado. Sin embargo, los rellenos sanitarios de montículos también son muy adecuados para la construcción contra una ladera que puede proporcionar la contención en uno o más lados.

#### **Preparación del sitio**

La primera etapa es la preparación del subsuelo. Dependiendo de las especificaciones de diseño que incluyen drenajes y/o revestimientos para la recogida de lixiviados. Debido a la gran cantidad de tierra necesaria para el funcionamiento adecuado del área de relleno en montículos, se hace hincapié en la obtención de suficiente material de suelo. En consecuencia, el relleno se confina a un área pequeña y se procede verticalmente cuando sea posible. Esto reduce la extensión del área del relleno sanitario, la erosión y el escurrimiento cargado de sedimentos de las áreas desforestadas, siempre que la pendiente no sea excesiva.

La realización de la excavación en fases permite el aprovechamiento de ventajas de las diferencias del suelo. Cualquier suelo que se almacena para su uso como un agente acondicionador de lodos se coloca y compacta en pilas inclinadas. Para el mantenimiento de un suelo seco, las pilas se cubren con lonas impermeables y las lonas aseguradas utilizando los neumáticos viejos. No se almacenan los suelos húmedos, ya que no son adecuados para aumento de volumen de lodo. El suelo que se almacena se coloca lo más cerca posible de los puntos de uso final, y con fácil acceso a las pilas que se van utilizando (EPA, October 1978).

### Descarga de lodos

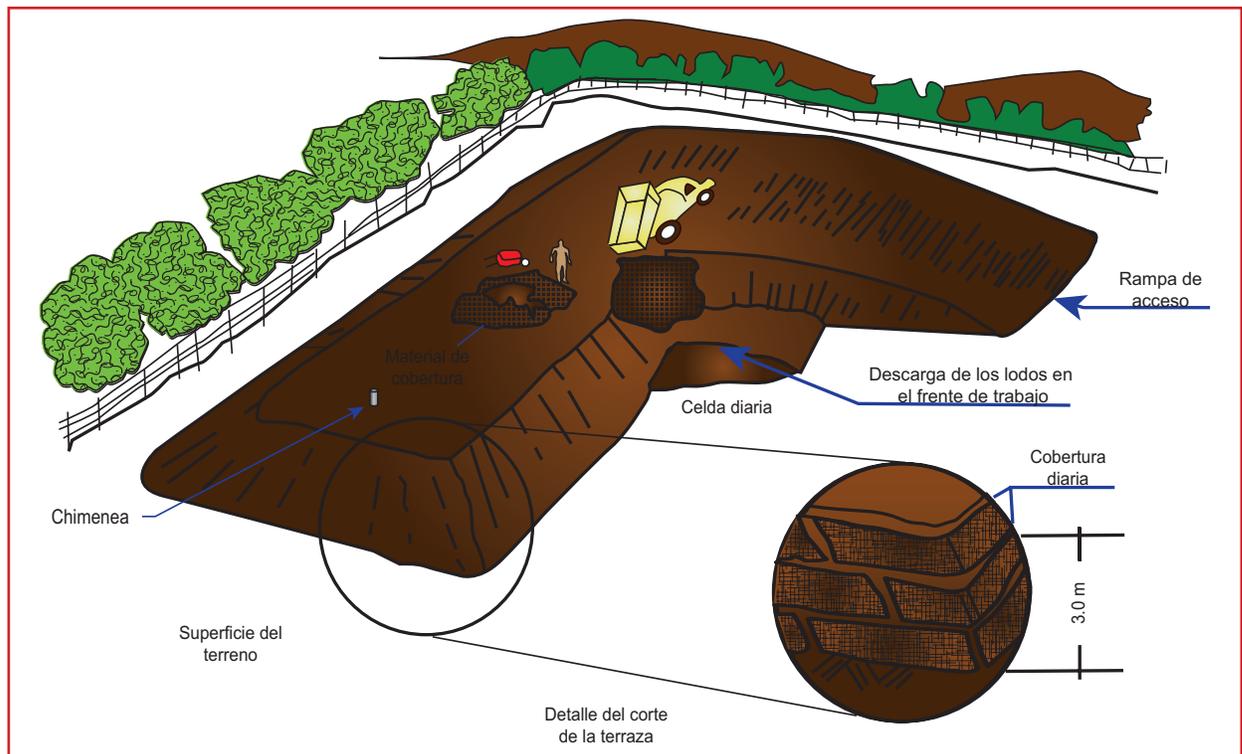
El lodo se descarga ya sea en el área de llenado o en la descarga designada y el área de mezcla se encuentra cerca de la reserva del material

acondicionador. La zona de descarga se encuentra limpia y relativamente nivelada para el paso seguro de los camiones. Los vehículos de carga no pasan por encima de las zonas que ya están con el relleno de lodos completo.

### Manejo de lodos y cubiertas

Los procedimientos operativos especifican cuáles son los suelos que se utilizan para mezclarse con el lodo, donde se obtienen, y cómo se mezclan y colocan sobre el lodo. La cantidad de material requerido para cada función está determinada para el sitio en las especificaciones de diseño que tienen en cuenta las características del suelo y de los lodos. Durante la operación inicial se realizan pruebas de ensayo y error preliminares para la determinación de la relación de lodo / suelo que produzca una mezcla con la consistencia adecuada.

Ilustración 5.1 Método de área para construir un relleno sanitario



La construcción de montículos o pilas en el área del relleno, requiere que la mezcla de lodo / suelo sea relativamente estable. Los montículos de lodos/suelo se aplican generalmente en una serie de niveles, y cada nivel contiene una serie de montículos. Cuando se termina un nivel, se cubre con una capa de tierra que soporte la operación del equipo en el lugar.

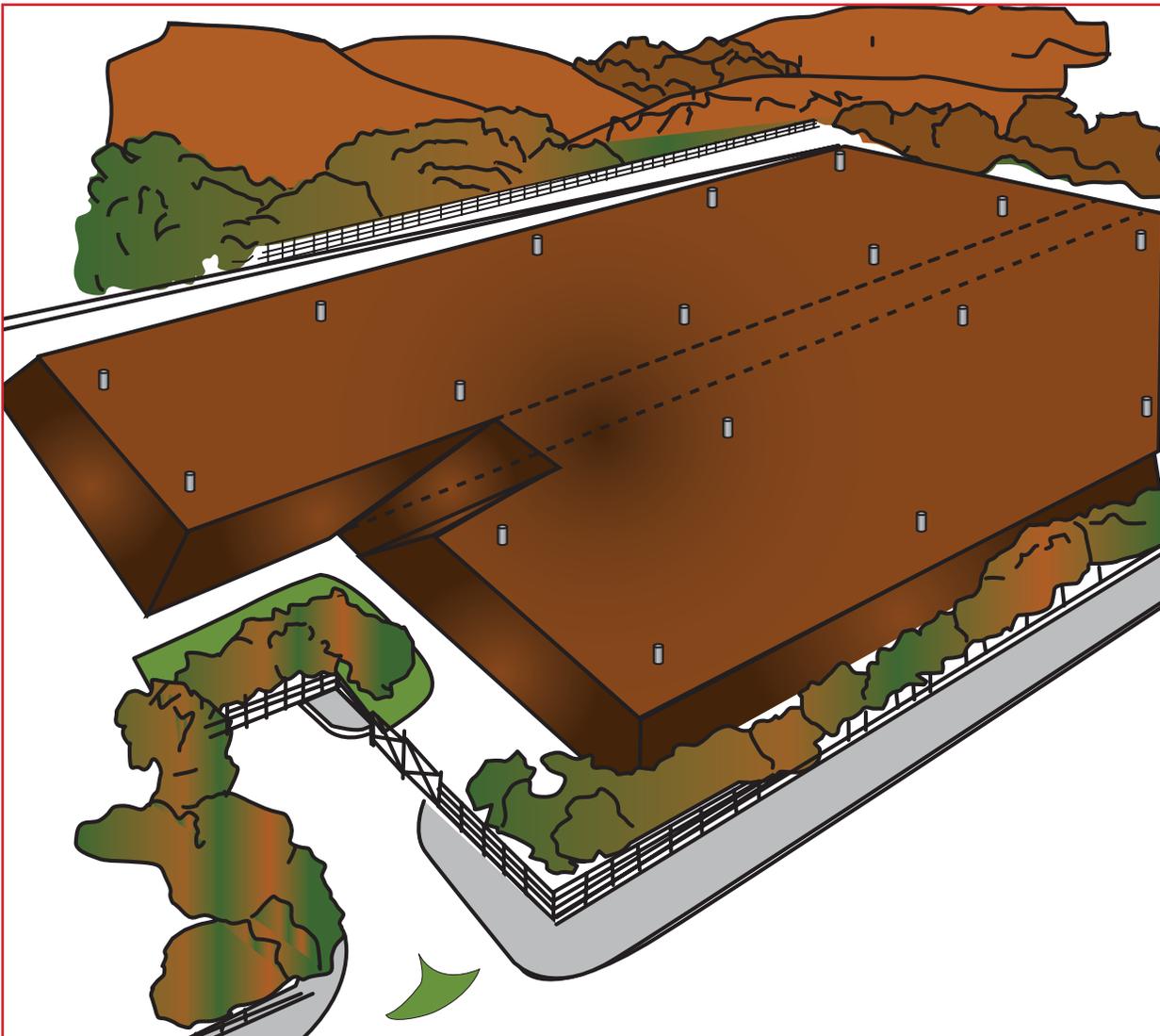
Una vez que el área se llena hasta los contornos designados, toda el área de llenado se cubre de 0.9 a 1.5 m de material del suelo (suelo preferentemente impermeable como arcilla, si

está disponible). El área de llenado se revisa en busca de asentamientos y se propicia el drenaje. Una capa de tierra vegetal hasta de 0.6 m se usa como cubierta final y la superficie sembrada con pasto evita la erosión (EPA, October 1978).

#### 5.2.1.2 Área de relleno en capas

El área de relleno en capas también se emplea en una variedad de topografías. Las operaciones consisten en la construcción de una serie de capas de lodo con la aplicación de una cubierta provisional o definitiva.

Ilustración 5.2 Relleno sanitario terminado y construido mediante la combinación de los métodos de trinchera y área



## **Preparación del sitio**

Al igual que con el área de relleno en montículos, el primer paso es la preparación de la terracería. Una vez más, los revestimientos y/o sistemas de drenaje se utilizan dependiendo de las condiciones hidrogeológicas. Las áreas de relleno en capas se encuentran casi al mismo nivel. Aunque los requerimientos de suelo de este tipo de operaciones son menores que los de relleno en montículos, en ocasiones es necesaria la importación de suelo. En cualquier caso, las reservas de suelo se establecen, tanto para su uso como agentes acondicionadores y para la cubierta. Las áreas se excavan al momento de utilizarse, lo que evita problemas de erosión (EPA, October 1978).

## **Descarga de lodos**

Los lodos se descargan en un área específica o en la zona de mezcla lodo/suelo, o los lodos se colocan directamente en el área de relleno. Contar con una reserva de suelo en el área de relleno es un método eficaz para la operación. Las topadoras, mezclan y colocan la capa de lodo en una sola operación. Una vez más, las áreas de almacenamiento se ubican lejos del tránsito.

## **Manejo de lodos y cubiertas**

En general, las especificaciones de diseño basadas en las características del lodo, darán alguna indicación de las cantidades requeridas de agente de acondicionador. Sin embargo, siempre es recomendable llevar a cabo pruebas de ensayo y error preliminares para determinar la forma de operación, el manejo de los equipos y el material requerido para el mezclado y la cubierta por

cada aplicación diaria. La profundidad de la cubierta intermedia y final también se determina de esta manera. Una vez más, cuando la zona se ha llenado hasta los contornos establecidos en el diseño, se aplica una cubierta final de 0.6 a 1.2 m y el área se siembra con pasto o alguna planta de la región. Es necesaria la nivelación del sitio a los 6 o 12 meses, y posiblemente, cuando se observen asentamientos o compactaciones (EPA, October 1978).

### **5.2.1.3 Diques de contención**

Los diques de contención son esencialmente trincheras anchas por encima del suelo y como tal, utilizan procedimientos y equipos similares. El diseño y la construcción de diques, sin embargo, es más complejo y por lo general no se justifica. Sólo en los casos de que el nivel freático sea muy alto, la roca madre y/o bajo contenido de sólidos, se justifica su costo.

## **Preparación del sitio**

El primer paso en la preparación del sitio para la contención del dique es la formación de un subsuelo adecuado o un revestimiento, si es necesario. A continuación, el suelo se importa de otras áreas si es necesario. Este suelo es relativamente impermeable. La base del dique se construye entonces manteniendo las dimensiones del diseño y pendientes (generalmente de 2H : 1V a 3H : 1V para taludes). Entonces se aplican las capas sucesivas y cada capa se compacta pasando equipo de compactación sobre él. Alternativamente, el área de contención se construye contra uno o más taludes empinados. Se cuenta con una rampa para la descarga de los vehículos.

## Descarga de lodos

El lodo se descarga desde la parte superior del dique o en un área designada para la mezcla de lodo suelo. Las pendientes de los caminos de acceso mantienen las especificaciones de diseño. Deben tomarse precauciones por las inclemencias del tiempo (por ejemplo, el suelo almacenado debe mantenerse seco).

## Manejo de lodos y cubiertas

El área de contención se llena con lodo en capas, por lo general con cubierta provisional de tierra o grava siempre en alturas predeterminadas, las dragas se utilizan con frecuencia para la aplicación de la cubierta intermedia y final. La cubierta final debe ser de 0.9 a 1.5 m de espesor. Idealmente, esto consiste en una capa relativamente impermeable de arcilla de aproximadamente 0.3 a 0.9 m de espesor, seguido de 0.6 m de tierra vegetal, es necesaria la reaplicación de la cobertura final después de producirse el asentamiento inicial. Si aparecen depresiones, el sitio se nivela de nuevo. El área debe sembrarse con una cubierta vegetal adecuada (EPA, October 1978).

### 5.2.2 CODISPOSICIÓN

Las operaciones de co-disposición, se aplican donde los lodos se reciben en un relleno sanitario de basura municipal típica. Dos tipos de operaciones de codisposición se han identificado incluyendo: mezcla de lodo/basura y mezcla de lodo/suelo. Para mezclas de lodo/basura, el lodo se mezcla directamente con los residuos en el frente de trabajo. Para las mezclas de lodo suelo, el lodo se mezcla con tierra y se utiliza como cubierta en las áreas que ya se encuentran llenas de basura.

## Mezcla de lodo/basura

Una vez que la recepción de lodos se ha iniciado, se hace todo lo posible para la obtención del máximo provecho de la capacidad de absorción de la basura. En consecuencia, el lodo es mezclado con la basura para la obtención de una mezcla uniforme. Bajo estas circunstancias, los lodos se manejan de dos formas alternativas. La primera incluye:

1. El volteo de la basura en la parte inferior de la superficie de trabajo
2. Volteo del lodo encima de la pila de basura.
3. Se mezclan bien los lodos y desechos
4. Se empuja, disemina y compacta la mezcla lodo/basura y se lleva al sitio del relleno

El segundo método se lleva a cabo de la siguiente manera:

1. Volteo de la basura en la parte inferior de la superficie de trabajo
2. Se empujar, disemina y compacta la basura hasta la superficie de trabajo
3. Volteo de los lodos en la parte superior de la superficie de trabajo
4. Empuje del lodo hacia abajo de la superficie de trabajo, esparciéndolo uniformemente a través de la basura

Si se reciben pequeñas cantidades de lodos en rellenos sanitarios de basura (es decir, menos de 5 por ciento), es deseable la definición de una ubicación específica para la colocación de los lodos. Este enfoque es útil en rellenos sanitarios que son suficientemente grandes para el aseguramiento de que el vertido de basura

proceda simultáneamente a lo largo del frente de trabajo.

Se toman precauciones para recibir cualquier lodo que se escapa de la superficie de trabajo. Esto puede ser especialmente necesario para un lodo con un bajo contenido de sólidos. La contención se logra ya sea por el vertido de los lodos en una pequeña depresión o la construcción de un terraplén de basura o de suelo en la parte inferior de la superficie de trabajo.

Otras consideraciones para rellenos sanitarios de basura que reciben lodos son el aumento de malos olores y la posibilidad de un pequeño aumento en la generación de lixiviados. Se toman medidas adecuadas para el control de los olores incluyendo la aplicación más frecuente de cubierta y adición de cal, (EPA, October 1978).

### **Mezcla de lodo/suelo**

Otra opción para el manejo de lodos en rellenos sanitarios de basura es el mezclado del lodo con tierra y la aplicación de la mezcla como material de cubierta sobre las áreas llenas de basura. Aunque técnicamente no es un método de vertido, es una alternativa viable, y particularmente útil para la formación de la cubierta vegetal en áreas de relleno que ya se han completado, y se lleva a cabo en numerosos rellenos sanitarios de basura.

La aplicación de esta operación lodos suelo procede del siguiente modo:

1. Se esparce el lodo tal como se recibe, de manera uniforme sobre la superficie del suelo en capas de 8 a 15 cm de espesor

- en un área designada para este propósito
2. Se mezclan los lodos con el suelo
3. Se esparce cal o agente enmascarador sobre la mezcla de lodo suelo para el control del olor, si es necesario
4. Después de un período que oscila entre 1 y 8 semanas de tiempo (dependiendo de las precipitaciones y el clima) se retira la mezcla de lodo/suelo y se extiende sobre áreas de relleno que se hayan completado y el crecimiento vegetativo haya sido escaso

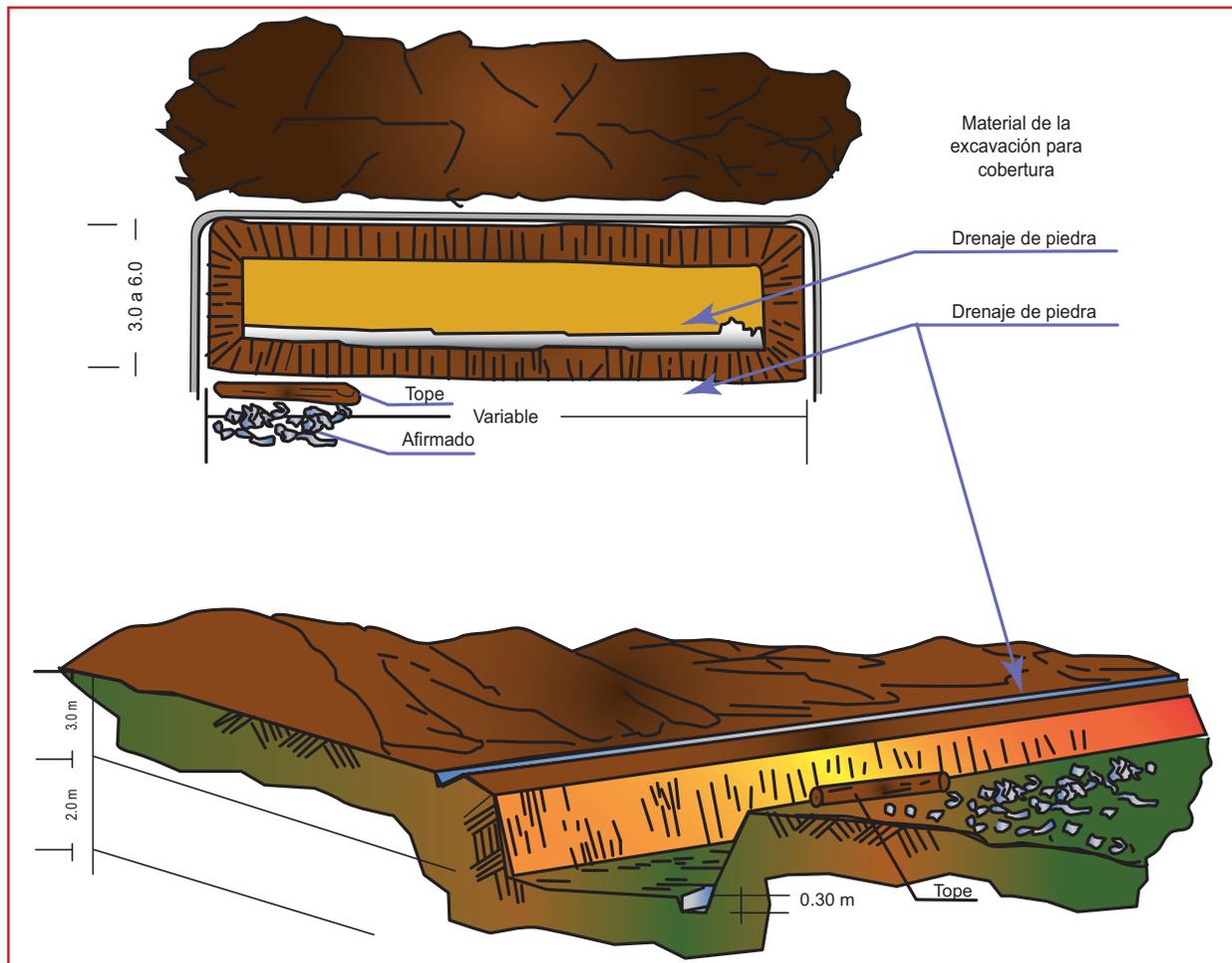
La información anterior se incluye para descripción en general el funcionamiento de sitios para codisposición.

### **5.2.3 TRINCHERAS O ZANJAS**

Para este método de relleno, se requiere la excavación del subsuelo para que los lodos se coloquen en su totalidad por debajo de la superficie original del terreno. En las trincheras, el lodo normalmente se descarga directamente de los vehículos de carga a la trinchera. El suelo no se utiliza como un agente de aumento de volumen de lodos. El suelo se utiliza como cobertura, por lo general en una sola aplicación, al final.

Se utilizan dos tipos de trincheras de lodos, trinchera angosta o estrecha y trinchera ancha. Las trincheras angostas o estrechas tienen anchos de menos de 3.0 m. Las trincheras anchas tienen una amplitud de más de 3.0 m. Ver Capítulo (Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, "Tratamiento y disposición de lodos", Mapas). La Ilustración 5.3 muestra una vista de planta y un corte de una trinchera, (EPA, October 1978).

Ilustración 5.3 Método de trinchera para construir un relleno sanitario



### Preparación del sitio

La preparación del sitio incluye todas las tareas que se requieren antes de la recepción de los lodos. Las tareas incluyen la limpieza y preparación del sitio, nivelación del sitio, la construcción de vías de acceso, y la excavación de trincheras.

La ubicación de las vías de acceso depende de la topografía y la tasa de utilización de la tierra. Las trincheras estrechas utilizan la tierra rápidamente y requieren mayor construcción de vías de acceso. Las trincheras más anchas y/o más largas requieren vías de acceso de vehículos a lo largo de ambos lados de la zanja.

Antes de la nivelación, el área se prepara y limpia. La nivelación se efectúa en el sitio para el control del escurrimiento y para la formación de un área compatible con los equipos a emplearse. Por ejemplo, las dragas y máquinas de excavación de zanjas operan de forma más eficiente en superficies niveladas. Las trincheras estrechas requieren menor nivelación debido a que se construyen en el terreno montañoso.

La construcción de una trinchera progresiva es el procedimiento más eficiente para una operación de trinchera estrecha. La trinchera inicial se construye utilizando el equipo apropiado y el suelo, ya sea apiladas a lo largo de la longitud de la zanja, o almacenado en un área designada o

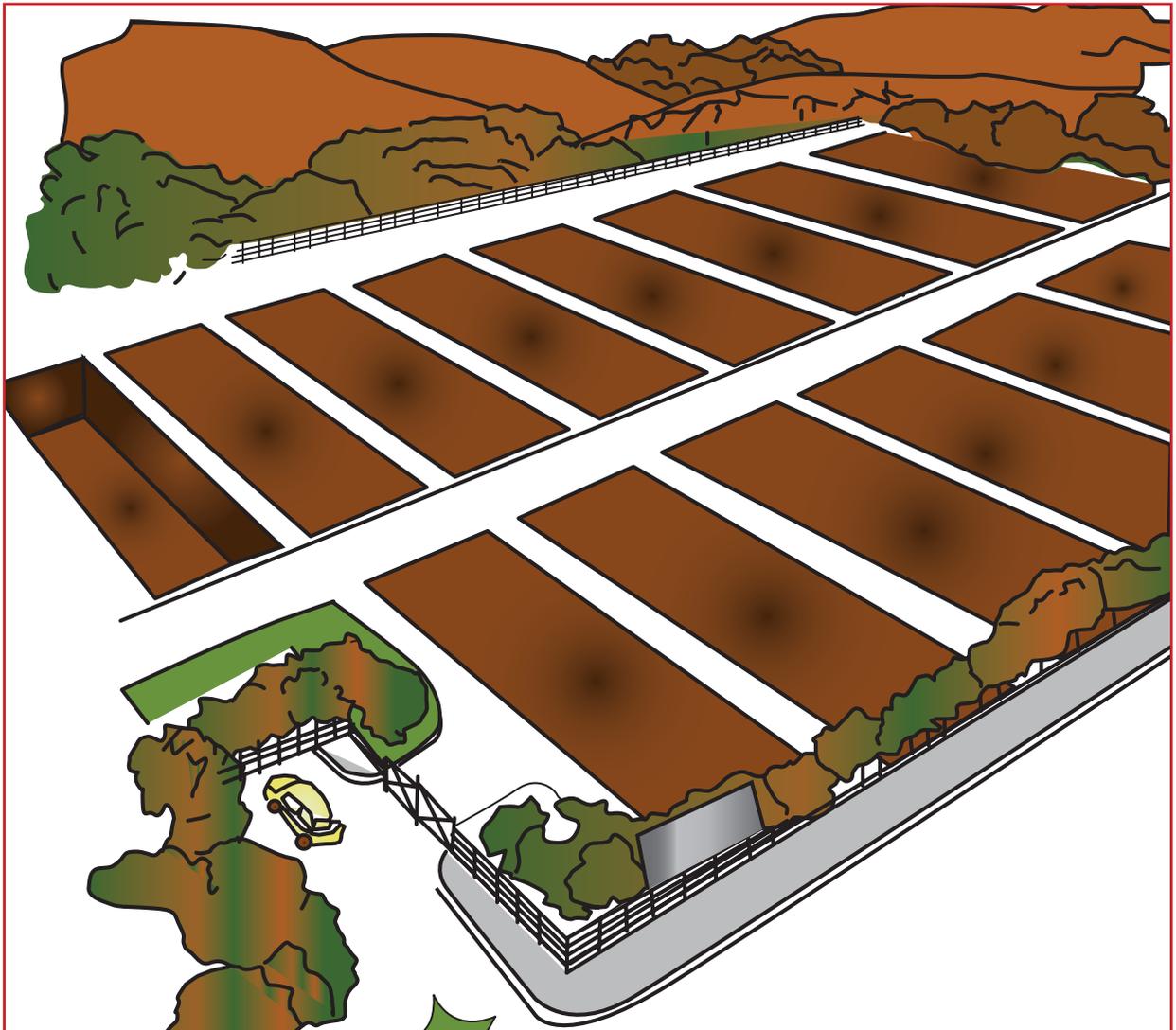
clasificado a nivel del suelo. El suelo es a menudo amontonado en la parte de arriba de la zanja y se utiliza para la prevención del escurrimiento en la trinchera. Las trincheras sucesivas se construyen en paralelo a la trinchera inicial. Las dimensiones de la zanja y la distancia entre las trincheras siguen las especificaciones de diseño.

Las trincheras requieren diques colocados de forma discontinua en el ancho de la zanja, sobre todo si dichas trincheras son largas. Los diques tienen la altura suficiente para la contención de los lodos y líquidos acompañantes y se permite

el llenado y el recubrimiento adecuado de las trincheras. El equipo se utiliza en el interior de trincheras anchas para la construcción de diques.

La preparación anticipada del sitio es fundamental para la correcta operación de la trinchera. Dependiendo de la cantidad de lodo recibido, se tiene el volumen de zanja requerido antes de las operaciones de llenado. Lo ideal es que las trincheras (ilustración 5.4), se preparen al menos una semana antes de la operación de llenado.

Ilustración 5.4 Método de trinchera e inicio del llenado



## Descarga de lodos

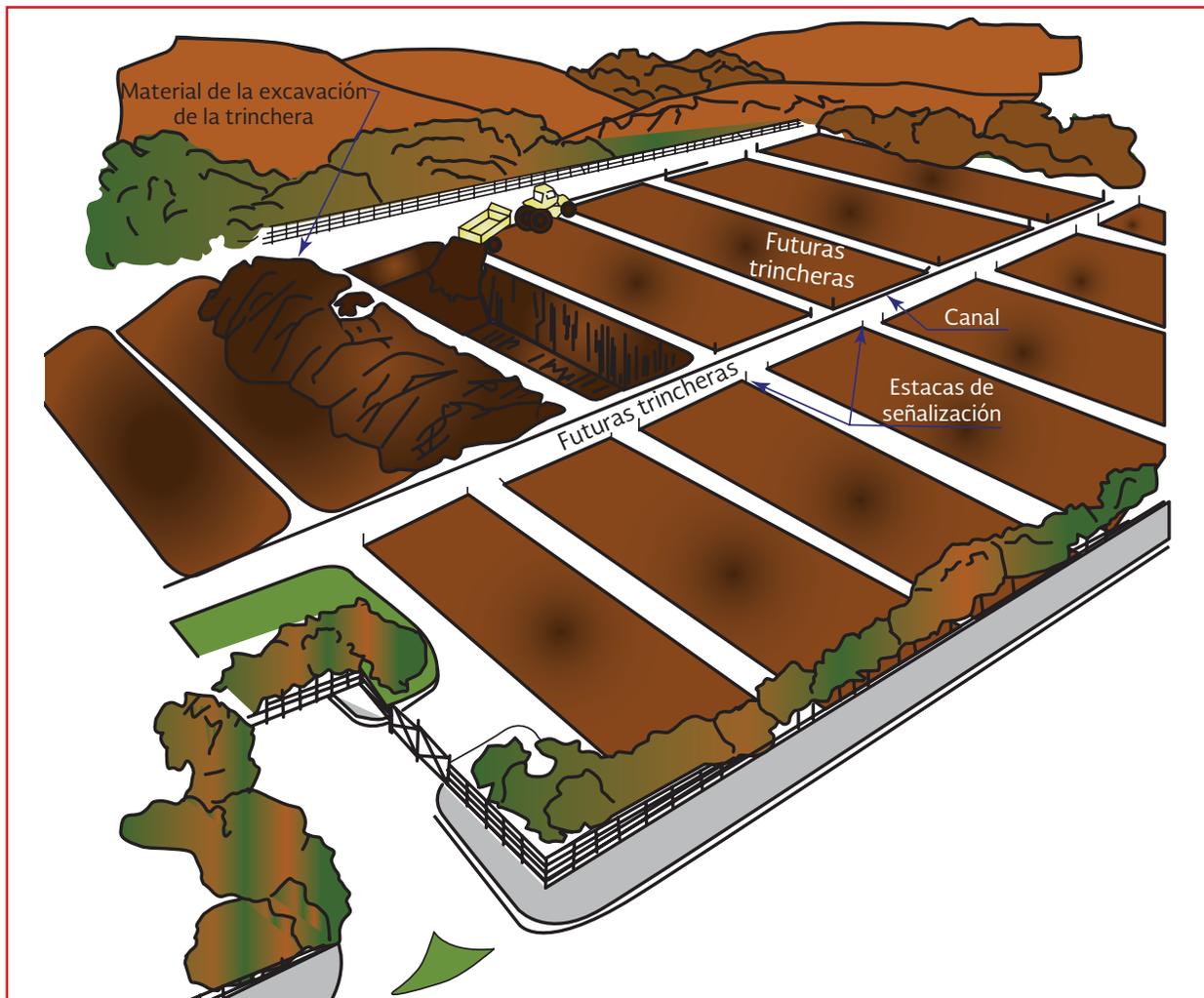
Se colocan señalamientos que indiquen que la trinchera se encuentra en uso. El lodo se descarga normalmente de los vehículos de carga a través de vertido directo. Sin embargo, se emplean tuberías metálicas o bombeo. Si se realiza el vertido directo, un área del tamaño adecuado se prepara en el borde de la trinchera para que los vehículos de transporte lleguen de manera segura a la orilla de la zanja para la descarga. La descarga de lodos se efectúa a lo largo de la trinchera de ambos lados de la zanja si es necesario. Toda la zona de descarga se mantiene

libre de lodos descargados y periódicamente se nivela de nuevo para el facilitamiento de las operaciones de descarga (EPA, October 1978).

## Manejo de lodos y recubrimiento

El lodo se distribuye uniformemente a lo largo de la trinchera o zanja. De lo contrario, se forman depresiones que causan encharcamiento cuando el relleno (lodo) se compacte. Las zanjas estrechas y anchas se llenan hasta un nivel en el que no se produce un desbordamiento de lodo debido al desplazamiento durante la aplicación de

Ilustración 5.5 Trinchera en operación. Se observa la colocación del material de excavación, la descarga del lodo, las estacas de señalización, y la preparación de futuras trincheras



la cubierta. La colocación de marcas en las paredes laterales de la zanja sirve para este propósito. El nivel adecuado para el llenado de lodo se establece a través de la experimentación realizando cargas de prueba.

La excavación, el relleno, y la aplicación de la cubierta de las trincheras es una operación secuencial que requiere una coordinación de esfuerzos. Cuando la trinchera se llena con lodo hasta el nivel designado, se aplica el material de cubierta usando ya sea el suelo recién excavado de una trinchera paralela o suelo almacenado durante la excavación de la trinchera que se llena. Dependiendo del contenido en sólidos de los lodos y del ancho de la trinchera, la aplicación de la cubierta procede de la siguiente manera:

1. Si el lodo tiene un contenido de sólidos del 15 al 20 por ciento, el ancho de la zanja es de 0.6 a 0.9 m. La aplicación de la cubierta es por medio de los equipos colocados en tierra firme adyacente a la trinchera. Se coloca la cubierta mediante una retroexcavadora con cargador, una excavadora o una máquina de excavación de zanjas
2. Si el lodo tiene un contenido de sólidos del 20 al 28 por ciento, la anchura de la zanja es técnicamente ilimitada. Sin embargo, dado que la cubierta se aplica con un equipo colocado en tierra firme en la práctica existe una limitación del ancho.
3. Si el lodo tiene un contenido de sólidos de 28 por ciento o superior, la anchura de la zanja es ilimitada. La aplicación de la cubierta es a través de los equipos colocados dentro de la trinchera y que

extienden la cubierta sobre el lodo. El equipo utilizado por lo general es un bulldozer sobre orugas

En todos los casos, las capas iniciales de la cubierta deben aplicarse cuidadosamente, lo que minimiza el desplazamiento de lodo. La cubierta final se extiende por lo menos 0.3 m por encima de la superficie del suelo y preferiblemente más. Como se produce la compactación, se aplica una cubierta adicional de suelo para la prevención de depresiones y encharcamientos. La experiencia ha demostrado que la mayoría de los asentamientos se producen después de 6 a 9 meses. Después de que se instala, toda la zona atrincherada se nivela. Las áreas de trincheras se ubican en pendiente, lo que minimiza la infiltración y evita el encharcamiento. Si resulta práctico se aplica una cubierta impermeable (arcilla) para la reducción de la infiltración. Las cubiertas finales incluyen de 0.3 a 0.6 m de tierra vegetal y vegetación adecuada tal como pastos. Una mezcla de lodo / suelo de 2 a 10 partes de tierra y 1 parte de lodos se emplea para el enriquecimiento del suelo si es necesario, (EPA, October 1978).

#### 5.2.4 PROCEDIMIENTOS GENERALES DE OPERACIÓN

Los aspectos de operación que se aplican en forma general a todos los métodos de vertido de lodos incluyen:

1. Prácticas de control ambiental
2. Prácticas de las inclemencias del tiempo
3. Horas de operación
4. Residuos especiales

## Prácticas de control ambiental

En muchos casos, los controles ambientales se diseñan y construyen para la reducción de los efectos ambientales de los rellenos sanitarios de lodo. El mantenimiento de estos controles es necesario para la operación del relleno sanitario. Las prácticas de control de sentido común ayudan también al aseguramiento de una operación adecuada considerando los requisitos ambientales. Estas prácticas de

control ambiental se describen en las secciones siguientes y se describen en la Tabla 5.1 (EPA, October 1978).

## Derrames

Tanto en ruta y en sitio, los derrames de los lodos se limpian tan pronto como sea posible. Los vehículos de carga en ruta al sitio de disposición reportan incluso pequeños derrames al supervisor operación, para que las cuadrillas de

Tabla 5.1 Prácticas de control ambiental

Problemas ambientales	Programa de seguridad	Mantenimiento de los baños para el personal	Capacitación de nuevo personal	Uso de abrazaderas de seguridad en puertas traseras de camiones	Mantenimiento de marcas viales y barreras de trinchera	Cerco en linderos de predio	Aplicación de insecticida	Mantenimiento de las zonas de amortiguamiento y de hierba	Mantenimiento adecuado de equipo	Rocío de agua / aceite / líquido asfáltico	Plataforma de lavado de camiones (para su limpieza)	Mantenimiento de canales de hierba, zanjas de desviación, rip rap	Calificación final de las áreas con problemas	Regeneración de áreas con problemas	Agente de enmascaramiento químico	Cal en el sitio	Suministro de aire	Cubierta de lodo diariamente	Desvío del agua del sitio
Derrames			X	X	X				X							X			
Sedimentación y erosión			X					X				X	X	X					X
Barro			X					X		X	X	X		X					X
Polvo			X					X		X	X			X			X		
Vectores			X				X									X		X	
Olores			X					X		X					X	X	X	X	
Ruido			X					X	X										
Estética			X		X		X				X	X	X					X	
Salud		X	X													X	X	X	
Seguridad	X		X	X	X	X			X							X	X	X	

limpieza de emergencia tomen medidas rápidas. Los derrames se controlan en el sitio lo más pronto posible. Es recomendable la disposición de cal en todas las operaciones de disposición de lodos para aplicación sobre los derrames, si no es factible la pronta limpieza. El uso de vehículos de carga, con protecciones ocasionalmente evita los derrames.

### **Sedimentación y la erosión**

La presencia de sedimentos con escurrimiento en el sitio es a menudo el resultado de una nivelación incorrecta. Cuando es posible se mantienen pendientes de 2 a 5 por ciento, lo que propicia el drenaje superficial, y minimiza las velocidades de flujo. Las áreas descubiertas se mantienen a un nivel mínimo durante la operación del sitio. Las obras de construcción y mantenimiento de control de sedimentos en curso (por ejemplo medio acuático, hierba, zanjas de desviación, rip-rap, cuencas de sedimentos) son fundamentales para una operación adecuada. Durante la clausura del sitio, se realiza una nivelación final, se cubre y se siembra para la prevención problemas de erosión y sedimentación a largo plazo.

### **Barro**

El barro es generalmente causado por la obstrucción del drenaje, pero es un problema en cualquier sitio durante las fuertes lluvias o deshielos de primavera. Los caminos de acceso son de grava para minimizar el efecto del barro en las operaciones. Si es posible, se instala una plataforma de lavado cerca de la puerta de salida para la limpieza del barro de los vehículos de transporte.

### **Polvo**

El polvo es causado generalmente por el viento o los movimientos de los vehículos de carga y equipos. Los caminos de acceso construidos con grava, minimizan la generación de polvo. Además, las áreas que se cubren con la cubierta de suelo provisional o final se siembran tan pronto como sea posible después de la clausura. Como alternativa, se esparce agua en los caminos con polvo..

### **Vectores**

Los vectores en los rellenos sanitarios de lodos incluyen moscas y mosquitos. Las moscas se controlan de mejor manera mediante la colocación adecuada de cubiertas del suelo compactado tan frecuentemente como sea posible. Los estudios han demostrado que una cubierta diaria de 1.3 cm de suelo compactado con bajo contenido de arcilla evita la aparición de moscas. Sin embargo, incluso en las mejores condiciones, un vertedero de lodos cuenta con una inspección regular y un programa de control de estos insectos. En algunos casos, las autoridades locales manejan programas detallados de control. El control de mosquitos se logra evitando la formación de pozos de agua estancada en cualquier lugar del sitio. Es esencial la nivelación continua de la zona, lo que evita encharcamientos.

### **Olores**

Ocasionalmente los olores son un problema serio en un vertedero de lodos a menos que se tomen medidas preventivas. El lodo se cubre con la frecuencia necesaria para la reducción

de los problemas de olores. Los agentes de calor o de enmascaramiento químico se aplican para la reducción de los problemas de olor. Un medio eficaz para su reducción, es el establecimiento de límites en el almacenamiento de los lodos. Este es realizado en la planta de tratamiento de aguas residuales.

### **Ruido**

Las fuentes de ruido en los rellenos sanitarios de lodos son los equipos de operación y vehículos de carga. Generalmente el ruido es similar al generado por cualquier actividad de construcción pesada y se limita al sitio y a las calles utilizadas para el transporte de los lodos al sitio. La minimización del efecto, se trazan rutas a través de las zonas menos pobladas. Además, el sitio se aísla para que el ruido no llegue a los vecindarios cercanos. El uso de terraplenes y árboles como barreras acústicas es eficaz. En el sitio, la protección acústica para los empleados se rige por las Normas de Seguridad y de Salud Ocupacional existentes en cada país.

### **Estética**

La compatibilidad del relleno sanitario de lodo con su entorno es un aspecto de trascendencia social. Durante la preparación del terreno, se minimiza la tala de árboles para la formación de una barrera visual. Los terraplenes de tierra se emplean de manera similar. El uso de efectos arquitectónicos en la zona de recepción, la plantación de árboles a lo largo de los linderos, y el confinamiento de los vertidos a las áreas correspondientes coadyuva en la creación de un lugar ordenado y agradable. Además, se minimiza el área de trabajo.

### **Salud**

Por su contenido de patógenos, los lodos representan un foco de enfermedades, en particular lo que se encuentran sin estabilización. Por lo tanto, el personal debe tener precaución durante el transporte, la manipulación y el manejo del lodo. Se deben tener regaderas cerca del sitio de disposición para su uso en caso de contacto corporal con lodo.

### **Seguridad**

Como con cualquier actividad de la construcción, los métodos de seguridad se aplican de conformidad con los lineamientos de seguridad e higiene de cada país o de instituciones internacionales. Las zonas de trabajo y vías de acceso se encuentran apropiadamente señalizadas, lo que evita percances con vehículos en el lugar.

### **Prácticas de las inclemencias del tiempo**

Los períodos prolongados de tiempo lluvioso o temperaturas bajo cero impiden el funcionamiento rutinario de un relleno sanitario de lodos. En el plan de operación de la planta se anticipan los problemas operativos y se consideran las operaciones de contingencia. En la tabla 5.2 se muestra una lista de posibles problemas y soluciones causados por las inclemencias del tiempo.

### **Horas de operación**

Las horas de operación son las posteriores a la recepción de lodos. De esta manera, el personal y el equipo están disponibles para su apoyo en la guía de camiones hacia la ubicación de la

descarga correcta; como apoyo en caso de que los camiones se atasquen en el lodo o barro; y / o en la cobertura rápida del lodo para la minimización de olores. Si el plan de la operación exige la colocación de una cubierta diaria de los lodos, las horas de operación continúan por lo menos media hora después de las horas de la recepción de lodos, lo que permite las actividades de limpieza. Se prohíbe la recepción de lodo después de las horas de trabajo en el relleno sanitario.

### **Residuos especiales**

Los rellenos sanitarios de lodos municipales reciben arena, espumas, sólidos gruesos y cenizas. En la mayoría de los casos, los procedimientos de manipulación y vertido son similares a los empleados para el lodo, pero existen algunas excepciones importantes. Debido a su alto contenido de materia orgánica las arenas, sólidos gruesos, y espumas, son con frecuencia fuentes de olor. En consecuencia, los rellenos sanitarios generalmente cobran una tarifa más alta y por lo general no almacenan estos residuos. La entrega de arenilla, sólidos gruesos y espumas se coordina con las horas de funcionamiento activas lo que permite su procesamiento. Por otro lado, la cenizas se almacenan y se mantienen secas. Si la ceniza es una parte significativa de los residuos eliminados, las tasas de aplicación se reducen debido a la relativamente mayor concentración de metales pesados (EPA, Octubre 1978).

Otro factor que se considera son las fluctuaciones en las operaciones de la planta de tratamiento y la consecuente variación en las características de los lodos entregados. De vez en cuando,

se reciben cargas excesivamente húmedas o malolientes. Se establecen procedimientos para estas cargas. Por lo general, estos van desde la negativa de recepción de cargas de lodos que no cumplan con los requisitos exigidos en el relleno, su manejo en áreas especiales o el empleo de reservas de suelo para su gestión.

### **Equipo y personal**

Una amplia variedad de equipos se utiliza en rellenos sanitarios de lodo. El equipo seleccionado depende en gran medida de las dimensiones empleadas, del método y diseño de un relleno y de la cantidad de lodos recibida.

Puesto que el equipo representa una gran inversión de capital y una gran parte de los costos de operación, su selección se basa en una cuidadosa evaluación de las funciones a realizarse, el costo y la capacidad de diversas máquinas para el cumplimiento de estas necesidades. En los rellenos muy grandes se requieren equipos adicionales en caso de contingencias o mantenimiento. Estos se rentan o consiguen en préstamo de otras entidades municipales.

La Tabla 5.3 proporciona orientación sobre la idoneidad del equipo para la ejecución de las diferentes tareas de vertido de lodos. La tabla 5.4 ofrece selecciones de equipos típicos para siete esquemas operacionales. Estas matrices brindan una orientación general sobre la selección del equipo del relleno sanitario de lodos. Sin embargo, las recomendaciones generales sobre la selección del equipo ocasionalmente son engañosas. En todos los casos, la selección final se basa en consideraciones específicas del sitio.

Tabla 5.2 Inclemencias meteorológicas problemas y soluciones (Environmental Protection Agency, Octubre 1978)

Inclemencias del tiempo	Carga y transporte de lodos	Preparación del sitio	Descarga de lodos	Manejo de lodos y cubierta
Humedad elevada	<p>Problema: Si se transportan grandes distancias, las condiciones climáticas húmedas incrementan el contenido de líquido de los lodos</p> <p>Solución: Se cubre el material en el vehículo de transporte</p>	<p>Problema: El agua contenida en el lodo dificulta el manejo del equipo</p> <p>Solución: Planifique el cambio de operación a un área de trabajo accesible</p> <p>Problema: Las depresiones acumulan agua, y atraen moscas, mosquitos</p> <p>Solución: Se nivela el área, lo que propicia el escurrimiento superficial. Se emplean insecticidas sólo cuando sea necesario</p>	<p>Problema: El lodo húmedo dificulta la operación del equipo</p> <p>Solución: Se coloca arena o grava en las áreas para el mejoramiento de la tracción. Se incrementa el espesador del material del camino</p> <p>Problema: La inestabilidad de las paredes de la zanja causa el colapso durante la descarga</p> <p>Solución: Se cuenta con un vehículo de transporte en el área de la zanja y se empujan los lodos en la zanja con el equipo</p> <p>Problema: El barro y los lodos se acumulan en los vehículos de carga y equipos</p> <p>Solución: Se dispone de equipos para la limpieza de los vehículos en la zona de recepción</p>	<p>Problema: La mezcla de los lodos con la basura o el suelo, necesita más material de mezcla</p> <p>Solución: Se asegura el suficiente suministro de material de basura o suelo</p> <p>Problema: Recolección de agua estancada en las trincheras</p> <p>Solución: Se emplea una bomba para la eliminación del exceso de agua</p>
Frío	<p>Problema: El lodo se congela en vehículos de carga</p> <p>Solución: Línea de camiones con agua salada, paja, arena o aceite. No permita la prolongada exposición al frío (Use estacionamiento cubierto). Utilice el escape para el calentamiento del remolque</p>	<p>Problema: Penetración profunda en las zonas de trincheras</p> <p>Solución: Construcción de zanjas durante meses cálidos</p> <p>Se evita el retiro de nieve (actúa como aislante) ni se permite que los vehículos se monten en las zonas de excavación de trincheras (provoca que el hielo penetre más profundamente en el suelo)</p> <p>Se emplean desbrozadoras hidráulicas o martillos neumáticos como último recurso</p>	<p>Problema: Congelación de portones</p> <p>Solución: Aplicación de etilén glicol pulverizado en las partes congeladas. Calentamiento de las partes congeladas</p> <p>Problema: En temporada de lluvia, los caminos fangosos forman surcos graves y agujeros</p> <p>Solución: Nivelación y reconstrucción antes de la temporada gélida</p>	<p>Problema: Congelación de las zonas de abastecimiento de material de cubierta</p> <p>Solución: Se acumulan reservas en buen tiempo. Se asegura el suministro de material de la cubierta; se aísla pilas con lona o heno</p> <p>Problema: Congelamiento del equipo</p> <p>Solución: Se cuenta con equipos libre de lodo y tierra</p>

El personal calificado y bien capacitado a menudo hace la diferencia entre una operación eficiente bien organizada y una operación deficiente.

El personal que generalmente se requiere para la operación de los rellenos sanitarios de lodo es el siguiente:

1. Operador de Equipo. En muchos rellenos sanitarios de lodos, estos son el único personal requerido. Las tareas realizadas

son en su mayoría las de la operación del equipo. Sin embargo, otras tareas incluyen el mantenimiento rutinario del equipo y la dirección de las operaciones de descarga de lodos

2. Superintendente / capataz / supervisor. Esta posición implica la supervisión de todos los aspectos de la operación del relleno sanitario, incluyendo el registro de gastos de mantenimiento, atención a los problemas del personal y la gestión

Tabla 5.3 Clasificación del equipo de acuerdo a las funciones que realiza (Environmental Protection Agency, Octubre 1978)

Nombre del Equipo	Trinchera				Área de llenado										Codisposición									
	Trinchera estrecha		Trinchera ancha		Montículo				Capa				Diques de contención		Lodos / basura		Lodos / suelo							
	Construcción de la trinchera	Cubierta	Construcción de la trinchera	Cubierta	Acarreo del suelo	Mezcla	Acarreo de lodos	Montaje	Cubierta	Acarreo del suelo	Mezcla	Acarreo de lodos	Capas	Cubierta	Acarreo del suelo	Construcción de diques	Cubierta	Esparcimiento	Cubierta	Esparcimiento de lodos	Mezcla	Acarreo	Cubierta	
Máquina zanjadora	I	I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Retroexcavadora con cargador	I	I	-	-	A	A	A	I	A	A	A	A	-	-	A	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Excavador	I	A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cargador de oruga	-	I	I	A	A	I	A	I	I	A	I	A	A	A	A	A	-	A	A	A	-	I	A	A
Pala cargadora de ruedas	-	I	A	-	I	A	I	J	A	I	I	I	-	-	I	A	-	-	-	-	-	-	A	A
Bulldozer sobre orugas <sup>a</sup>	-	I	I	I	-	I	-	A	I	-	I	-	I	I	-	I	I	I	I	I	I	A	-	I
Raspador	-	-	I	-	I	-	A	-	-	I	-	A	I	I	I	I	-	-	A	-	-	A	A	A
Red de arrastre	I	I	I	I	-	-	-	-	I	-	-	-	-	-	-	-	I	-	-	-	-	-	-	-
Motoniveladora	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	I	I	-	-	-	-	-	-	A	-	-	-
Tractor con disco	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	I	-	-

Leyenda

I - Ideal. Completamente capaz de la realización de la función enumerada. El equipo se selecciona únicamente con base en la función de la lista

A - Adecuado. Marginalmente capaz de la realización la función de la lista. El equipo se selecciona con base en las capacidades completas en otra función.

(-) No aplicable. El equipo no se emplea para la función mencionada

<sup>a</sup> El Caterpillar D-6 generalmente es el tractor más grande sobre orugas apropiado para un relleno sanitario de lodos.

Tabla 5.4 Esquemas para la selección de equipo (Environmental Protection Agency, Octubre 1978)

Equipamiento	Método de trinchera					Método de área de llenado					Método de codisposición <sup>f</sup>										
	Trinchera estrecha		Trinchera ancha			Montículo	Capa			Diques de contención		Lodos basura	Lodos suelo								
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
Máquina zanjadora		1	2																		
Retroexcavadora con cargador	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1											
Excavador	1																				
Cargador de oruga		1	1	1	1	1	1	1	1	1						1				1	1
Pala cargadora de ruedas						1	1				1										
Bulldozer sobre orugas	1	1	1	2		1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	2			1	1	1
Raspador						1	1	1	1	1	1	1	1	1	1						
Draga													1	1	1	1					
Motoniveladora																					1
Tractor con disco																				1	1
Total	1	2	2	3	5	1	2	2	2	4	1	2	3	4	1	2	3	4	-	1	1

a Esquema 1 – 10 Toneladas húmedas /día  
 b Esquema 2 – 50 Toneladas húmedas /día  
 c Esquema 3 – 100 Toneladas húmedas /día

d Esquema 4 – 250 toneladas húmedas /día  
 e Esquema 5 – 500 toneladas húmedas/día  
 f Equipo adicional

\* No puede utilizarse al 100%

de la operación. Además, esta persona a menudo tiene otras funciones, tales como la operación de los equipos

3. Mecánico. El mantenimiento de los equipos principales y la reparación se lleva a cabo por mecánicos calificados. Un grupo de mecánicos o de personal de mantenimiento rara vez son necesarios a tiempo completo en el sitio y solo acuden al sitio cuando se requieren reparaciones
4. Obrero. Los sitios más grandes necesitan personal para el mantenimiento de los dispositivos de control para la recolección de lixiviados y su tratamiento, control de olores, y control de barro y polvo. También debe darle mantenimiento a las cercas y vías de acceso

### 5.3. EQUIPAMIENTO

La construcción y operación del relleno sanitario requiere de equipo especializado cuya selección se realiza tomando en cuenta el método de operación y las condiciones de trabajo para el adecuado movimiento, compactación de los residuos sólidos y material de cubierta. Cualquier relleno sanitario con operación mecánica, necesita máquinas para la preparación de terreno, incluyendo desmonte y despalme; la compactación y manejo de los residuos; la excavación, transporte y aplicación de cubierta diaria; el esparcimiento y compactación de la cubierta final; y, los trabajos de limpieza general y mantenimiento de los caminos interiores.

Adicionalmente, hay ciertos indicadores que se toman en cuenta, tales como:

- Toneladas de material para disposición y su proyección
- Cantidad y tipo de material de cobertura
- Distancia de acarreo del material de cobertura
- Método de operación del relleno
- Necesidades de compactación
- Tareas complementarias
- Recursos económicos

Lo anterior implica que es esencial el conocimiento de la amplia variedad de diseños y de capacidades de rendimiento de las máquinas especializadas en rellenos sanitarios. La versatilidad es otro factor importante en la selección de maquinaria. Mientras más trabajos realice la máquina, menos necesidad de adquisición de otros equipos, (SEDESOL, 2010).

#### Excavadora

Su función principal consiste en la excavación del, así como para la aplicación de la cobertura diaria o primaria de los residuos sólidos (en el método de trinchera). Este equipo también se utiliza bajo ciertas premisas en el movimiento de tierras. La excavadora se encuentra equipada con una máquina diésel y un sistema hidráulico para el control de los brazos de carga y del cucharón. El tiempo del ciclo de excavación depende del tamaño del equipo y de las condiciones del sitio. Así, cuando la excavación es más difícil o la trinchera más profunda, el procedimiento de excavación se desarrolla con lentitud. La literatura comercial disponible en el mercado de los diferentes fabricantes indica el cálculo o la estimación del tiempo para el ciclo, de acuerdo con el modelo y las condiciones particulares de cada sitio (tipo de suelo y profundidad de excavación), (SEDESOL, 2010).

Ilustración 5.6 Excavadora



La profundidad de excavación (medida desde el nivel del suelo) depende del alcance de los brazos de carga. En la tabla 5.5 se presentan algunos valores típicos de estos equipos.

#### **Cargador frontal con neumáticos y/o de cadena**

Su función principal es la excavación de suelo suave (por ejemplo, suelos que presentan poca resistencia), la carga de el material excavado a los camiones y su transporte a distancias

no mayores a 50 ó 60 m, para una eficiencia óptima, (SEDESOL, 2010).

Los cargadores con neumáticos generalmente se encuentran equipados con máquinas diésel y dirección en las cuatro ruedas. El eje frontal es fijo y el trasero oscila. Los modelos varían en potencia, en un intervalo entre los 65 HP y los 375 HP. El cucharón varía de 0.8 m<sup>3</sup> a 6 m<sup>3</sup> de capacidad. Los modelos más comúnmente utilizados son de alrededor de 100 HP a 150 HP. En la tabla 5.6 se presentan algunas características de estos modelos.

Tabla 5.5 Características de la excavadora de orugas (SEDESOL, 2010)

Potencia (HP)	Peso (kg)	Longitud del brazo de carga (m)	Capacidad de cucharón (m <sup>3</sup> )	Profundidad máxima de excavación (m)
135	22,680	2.44	0.75	6.4
195	34,020	2.90	1.18	7.3
325	56,200	3.20	1.94	8.5

Ilustración 5.7 Cargador frontal de neumáticos y/o de cadena



Tabla 5.6 Características de los cargadores con neumáticos (SEDESOL, 2010)

Potencia (HP)	Peso (kg)	Capacidad de cucharón (m <sup>3</sup> )
100	9,280	1.34 – 1.72
130	11,550	1.72 – 2.68

### Cargadores de orugas

Sobre suelo suave, una máquina de 130 HP con una capacidad de cucharón para 1.91 m<sup>3</sup> maneja un rendimiento de excavación y carga de alrededor de 160 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> de trabajo. En suelo duro, la producción disminuye y esta máquina generalmente se reemplaza por una más adecuada para la realización de la actividad. Los cargadores de neumáticos también son aptos para la realización eficiente de trabajos relacionados con las operaciones del relleno sanitario, (SEDESOL, 2010).

Estas máquinas desarrollan funciones similares a las de los cargadores de neumáticos. Los cargadores de orugas también son recomendables para la excavación en suelo macizo o duro. Su distancia óptima para transporte de materiales no excede de los 30 metros. En casos de emergencia, los cargadores de orugas se emplean para el manejo de residuos sólidos (extendido y compactación). También se usan para la conformación y nivelación de la cubierta de las celdas.

Ilustración 5.8 Cargadores de orugas



Los cargadores de orugas se encuentran equipados con máquinas diésel, con intervalos de potencia entre los 65 y 275 HP. En la tabla 5.7 se presentan algunos valores típicos de estos equipos.

El cucharón de este tipo de cargadores, se opera fácil y rápidamente mediante un mecanismo hidráulico. Se obtiene una mejor eficiencia y flexibilidad en este equipo, cuando cuenta con un cucharón multiusos. Este tipo de cucharón se adapta a diferentes operaciones conforme a la posición en la que se opera.

El cucharón tiene una sección estacionaria y otra móvil. El movimiento se controla por el operador con el mismo sistema de control. El cucharón actúa como cargador, empujador, excavadora o

dragadora. La versatilidad de este tipo de equipos se requiere en el relleno sanitario especialmente cuando la disponibilidad de equipo es limitada. La mayoría de la excavación la hace el cargador con la parte inferior del cucharón horizontal o inclinado ligeramente hacia abajo. Esta posición da la máxima penetración en los bancos y en los lugares altos y abre un sendero uniforme sobre el cual se desplazan las orugas.

La cantidad recogida en el cucharón varía con la naturaleza del material, la pendiente del banco, la superficie sobre la cual se camina y la pericia del operador. El mantenimiento de un ciclo rápido es usualmente más importante que la obtención de cargas máximas en cada pasada. A medida que la distancia del punto de la descarga aumenta, la capacidad de las cargas se vuelve más importante

Tabla 5.7 Características de los cargadores de orugas (SEDESOL, 2010)

Potencia (HP)	Peso (Kg)	Área de contacto con los residuos (m <sup>2</sup> )	Capacidad de cucharón (m <sup>3</sup> )
95	12,340	1.54	1.34
130	13,700	1.79	1.34 – 1.74
190	21,300	2.48	1.90 – 2.48

que el tiempo utilizado para obtenerlas. La carga es más rápida si el camión se encuentra tan cerca de la excavación que la máquina tenga espacio cómodo para virar (SEDESOL, 2010).

### Tractor de oruga o cadenas

Tractor de cadenas modelo D6 R de 2.38 metros de altura y 5.11 metros de longitud total, modelo de motor 3306 t de 165 hp de fuerza y transmisión tipo manual.

Su función principal es la distribución y compactación de los residuos, así como la realización de la preparación del sitio, suministro de la cubierta diaria y final y trabajos generales de movimiento de tierras.

Las orugas son lo suficientemente altas como y permiten una buena reducción de tamaño de los residuos y además evitan posibles deslizamientos. La presión descargada sobre los residuos se obtiene distribuyendo el peso de la máquina sobre la superficie de contacto. En la tabla 5.8 se presentan algunos valores típicos para estas máquinas.

Ilustración 5.9 Tractor de oruga o cadena



Tabla 5.8 Características del tractor de oruga o cadenas (SEDESOL, 2010)

Potencia (HP)	Peso (kg)	Área de contacto con los residuos (m <sup>2</sup> )	Presión (kg cm <sup>-2</sup> )
140	11,750	2.16	0.54
200	16,100	2.76	0.53
300	24,770	3.19	0.78

El grado de compactación de los residuos depende de la presión ejercida. A menor espesor de capa de residuos, mayor compactación. Las máquinas con orugas no son muy eficientes en la compactación de los residuos sólidos, debido a su baja presión sobre el suelo.

Para la obtención de la máxima eficiencia de las máquinas con orugas, es muy importante que estas se encuentren equipadas con hojas topadoras adecuadas. La densidad de los residuos sólidos es aproximadamente tres veces menor que la del suelo; por lo tanto es posible el incremento de la capacidad de la hoja. La capacidad de la hoja se aumenta mediante el incremento de su altura, utilizando una malla de acero. Esta evita la interferencia con la visibilidad del operador. Las dimensiones de la hoja varían con cada modelo. Por ejemplo una máquina típica de 140 HP, sobre superficies planas, tiene un rendimiento de 50 toneladas de residuos sólidos por hora. Ahora bien, sobre superficies inclinadas el rendimiento de este equipo disminuye a 30 toneladas por hora, en una pendiente del 30 por ciento.

Los tractores de tipo bulldozer son los equipos más versátiles para aplicación en rellenos sanitarios. Las máquinas bandean, compactan, y cubren los residuos sólidos y también se utilizan en la preparación de sitios, excavación de material de cubierta, construcción caminos y limpieza de terrenos. Son apropiados para cualquier tamaño y método de relleno.

Para la obtención de una operación eficiente, el tractor de cadenas empuja el mayor volumen posible, sin que se afecte su funcionalidad y desempeño. El tractor de cadenas, excava y transporta con mayor eficacia hacia abajo que en

terreno a nivel o cuesta arriba y en consecuencia se procura que el trabajo se realice cuesta abajo. Cuando se acarrea material que se sale a los lados de la hoja, debe detenerse o reemplazarse para mantener una carga completa.

Se puede reducir el material que cae por los lados haciendo la excavación con dos tractores de cadenas colocados uno al lado del otro, con las hojas en contacto, de manera que no se pierda material por el espacio que queda entre ellos.

Para la extensión de materiales o residuos, la hoja se mantiene un poco elevada de la superficie original, para que la tierra se deslice debajo de ella en una capa pareja sobre la que se desplaza el tractor. Se extiende una capa delgada hasta el cumplimiento del grado deseado de compactación. Si no hay material o residuos suficientes enfrente de la hoja para que alcance hasta el extremo de la superficie que se cubre, se ahorra tiempo suspendiendo el empuje tan pronto como la carga aligere y se regresa por más. La siguiente carga de la hoja se empuja por el mismo lugar y se toma fácilmente el resto de la carga anterior. Conviene la variación del recorrido usado para la distribución, porque es más fácil la conservación de la rasante si no se forman los camellones altos.

La mayor parte de las excavaciones con el tractor de cadenas se hacen con movimientos de vaivén, con la máquina puesta en una dirección a través de la excavación, dividiendo el ciclo de excavación, acarreo y extendido del material. Es así porque las distancias cubiertas son generalmente muy cortas y las vueltas, especialmente en tierra blanda, toman tiempo y destruyen la conformación, por lo que resulta más rápido y fácil el regreso al corte a

comparación de dos virajes para el uso de una velocidad mayor. En los acarrees de 30 metros o mayores resulta mejor las vueltas a menos que la máquina cuente con una reversa muy rápida.

Los tractores de cadenas se emplean en laderas con taludes moderados y los modelos con orugas anchas, hasta en las inclinadas a 20° o más. Sin embargo, corren mucho riesgo de volcarse, a menos que se tenga cuidado. Las máquinas suben y bajan pendientes pronunciadas con seguridad. Las pendientes muy fuertes de 25° o más, se suben de frente y no de reversa, debido al mejor equilibrio y tracción (SEDESOL, 2010).

### Compactador con ruedas metálicas

Su función principal consiste en el extendido y compactado de los residuos. Los compactadores

(ilustración 5.10), están equipados con máquinas diésel tanto turbo como estándar.

Las ruedas metálicas tienen generalmente dientes en forma de “V” invertida y alternados que le permiten concentrar el peso sobre una superficie de contacto más pequeña (comparada con una máquina de orugas) y ejerciendo una mayor presión sobre los residuos sólidos. La tabla 5.9 presenta algunos valores de presiones promedio para dos distintas potencias de esta máquina.

Los compactadores son más versátiles y rápidos que los bulldozers. Un modelo típico de 150 HP tiene una productividad de aproximadamente 75 toneladas por hora en superficies planas. La productividad disminuye alrededor de 50 toneladas por hora para superficies con 30 por ciento de pendiente.

Ilustración 5.10 Compactador con ruedas metálicas



Tabla 5.9 Características del compactador con ruedas metálicas (SEDESOL, 2010)

Potencia (HP)	Peso (kg)	Presión (kg cm <sup>-2</sup> )
150	16,000	75
175	26,000	120

Los compactadores con ruedas de acero se equipan con hojas controladas por un sistema hidráulico. La hoja tiene una rejilla metálica adicional para el aumento de su capacidad (SEDESOL, 2010).

Las dimensiones de la hoja son las siguientes:

- Ancho: 3.04 m
- Altura (con rejilla): 1.88 m

### 5.4. HERRAMIENTAS DE TRABAJO

El equipo para la operación de un relleno sanitario manual (ilustración 5.11), se reduce a una serie de herramientas o utensilios de albañilería,

tales como: carretillas de llanta neumática, palas, picos, azadones, barras, tijeras, pisones de madera, rastrillos y un rodillo compactador. La cantidad de estas herramientas se encuentra en función del número de trabajadores y de la cantidad de residuos sólidos que se disponen en el relleno.

### 5.5. IMPLEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL

Debido al tipo de actividades que se llevan a cabo en el relleno sanitario y al contacto directo con los residuos sólidos, los trabajadores se exponen a accidentes y enfermedades infecto contagiosas. Por lo tanto, es importante la

Ilustración 5.11 Herramientas de trabajo

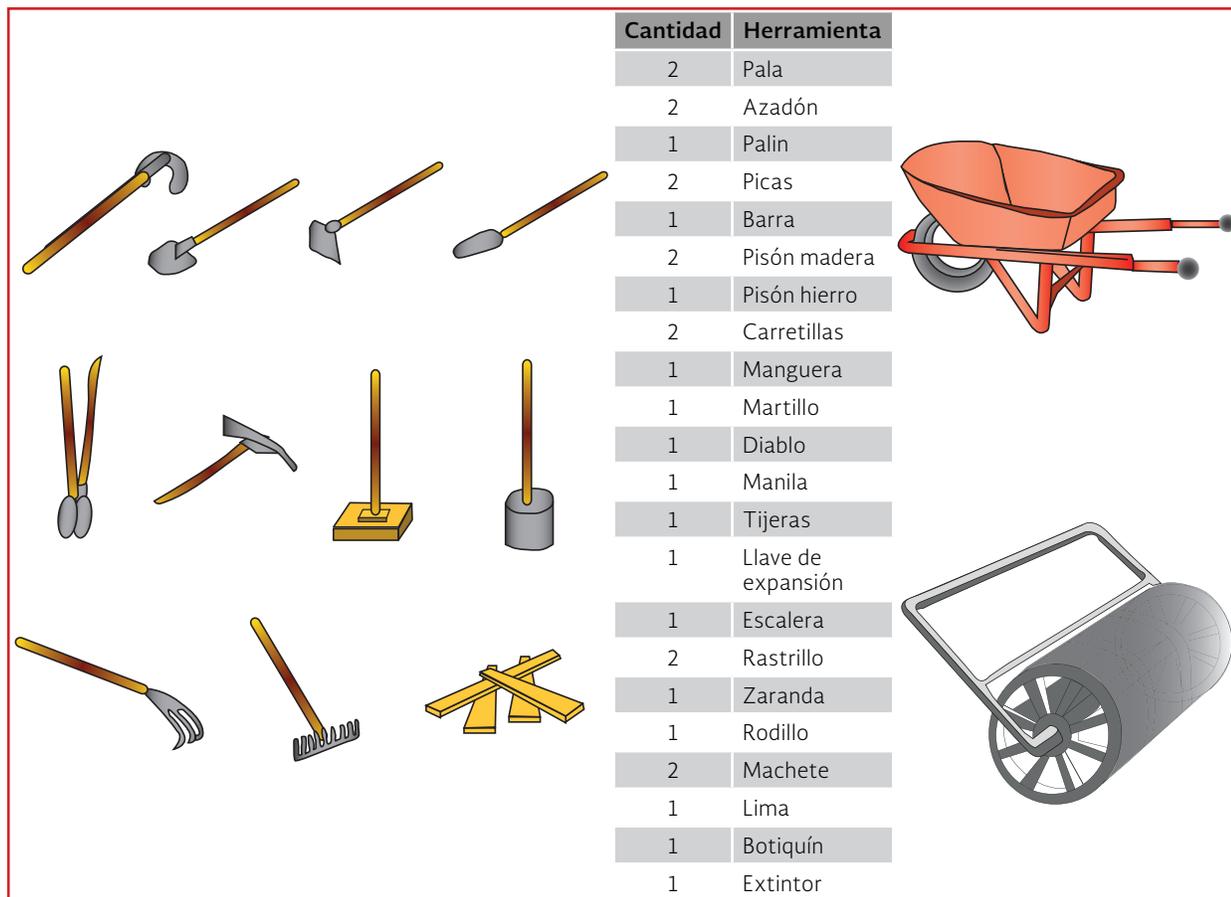


Ilustración 5.12 Implementos de protección personal



protección de la seguridad y la salud de los trabajadores dotándolos como mínimo de guantes, botas, gorras o sombreros, mascarillas contra el polvo y, por lo menos, de dos uniformes al año (ilustración 5.12) (Secretaría de servicios públicos alcaldía de Jericó, 2008).

## 5.6. SISTEMA DE SEGURIDAD E HIGIENE

Al igual que todo proceso constructivo o productivo, un relleno sanitario no se encuentra libre de riesgos de lesión para los trabajadores o visitantes del lugar y se dice que casi 9 de cada 10 de esos casos prevenirse (Grimaldi, 1980). Existe una relación similar donde se aprecia que la presencia de gases en alguna forma produce daños a menos que se empleen controles adecuados.

Un buen diseño reduce los riesgos en la construcción y operación de cualquier sistema, así mismo disminuye el mantenimiento, el cual es estrictamente necesario para una operación segura.

No se debe olvidar que en un relleno sanitario se trabaja con maquinaria de grandes dimensiones, lo cual es factor de riesgo, pues cualquier movimiento, por inofensivo que parezca potencialmente trae consecuencias fatales. Por ello es conveniente la implementación de prácticas que hagan más segura la operación del equipo.

Antes del inicio, se inspecciona el equipo. Muchos accidentes se evitan simplemente asegurándose de que el equipo se encuentra en condiciones adecuadas de operación. Esto se hace mejor con la ayuda de listas de verificación que son llenadas justo antes del término de la jornada de trabajo. así como antes del inicio de la siguiente se debe olvidar.

Antes que todo se debe tener la seguridad de no encender y operar el equipo si está en malas condiciones.

El operador del equipo debe cerciorarse de tener visibilidad suficiente mientras opera el equipo. El frente de trabajo de un relleno es un lugar con mucha gente. Hay obreros, camiones

recolectores y otros operadores trabajando al mismo tiempo en la misma área.

Se tiene especial cuidado con los residuos voluminosos tales como electrodomésticos o troncos los cuales ocasionalmente causan volteo del vehículo en casos extremos (SEDESOL, 2010).

Los accidente causados por poca visibilidad se reducen o eliminan si se toman las siguientes medidas:

- Inspección del suelo y equipo por los cuatro lados antes de encenderlo
- Se llevan las hojas empujadoras y otros implementos similares de los tractores abajo para una mejor visibilidad y estabilidad
- Se conduce a una velocidad segura conforme al terreno y el clima
- El conductor se asegura de que el área ocupada con pequeñas montañas de residuos se encuentre libre de personas y equipos antes del inicio del empuje de los residuos
- Siempre se revisa el área de trabajo en busca de otras personas y equipos, pues aunque la pepena está prohibida en los rellenos, muchos de los usuarios del sitio no están familiarizados con el peligro lo que en ocasiones genera accidentes
- Si el conductor no se encuentra seguro de las condiciones de trabajo baja del vehículo y camina alrededor del área para asegurarse que la maquina proceda en forma segura
- Se obedecen las señales y se mantienen a la vista los otros vehículos. Debido a que el tráfico frecuentemente se encuentra congestionado en un relleno sanitario,

se propician condiciones que generan accidentes

- Cuando es necesario se trabaja con torretas u otros señalamientos, lo que asegura que los otros vehículos lo vean. Se considera si los otros conductores cuentan con alguien a pie que les apoye durante la maniobra de retroceso de sus vehículos para su colocación en la posición adecuada

De esta manera, se propicia un plan de seguridad e higiene que reduzca principalmente los riesgos mecánicos y físicos dentro de un relleno sanitario, es indispensable la prevención en las siguientes etapas:

- Diseño y distribución de los diferentes elementos del relleno sanitario
- Tipo, circulación, mantenimiento y encierro de maquinaria y equipo mecánico
- Protección de las áreas de operación
- Equipo e instalaciones de servicio
- Herramientas de mano
- Manejo de residuos sólidos y materiales de cobertura
- Tránsito vehicular interior
- Mantenimiento de caminos interiores y áreas de relleno terminadas
- Manejo de biogás
- Manejo de lixiviados
- Mantenimiento de la infraestructura de apoyo

Adicionalmente se encuentran riesgos no observados a simple vista y que en general son los causantes de lesiones orgánicas que al producirse tanto durante el trabajo como fuera de este se denominan comúnmente como enfermedades laborales u ocupacionales.

Para los planes de seguridad e higiene de un relleno, en el campo de las enfermedades laborales es necesaria la consideración de los siguientes aspectos:

- Sustancias tóxicas
- Polvos
- Gases
- Vapores
- Mezclas químicas
- Ruido
- Vibraciones
- Microorganismos
- Radiaciones ionizantes

Para el mantenimiento de la seguridad e higiene en el relleno sanitario, se recomienda lo siguiente:

- Utilización de overoles, guantes de carnaza y botas para todo el personal que tenga que ver con las operaciones en el frente de trabajo
- Implementación de un programa de capacitación para el conocimiento de los posibles riesgos dentro del relleno sanitario
- Implementación de un programa de vacunación y chequeo médico para los operarios del sistema
- Colocación de sitio visible del señalamiento de seguridad e higiene

Para el caso de un relleno sanitario, la exposición de los operarios con los residuos sólidos, gases y olores, es más evidente y por lo tanto se toman las precauciones necesarias para la minimización de los riesgos a la salud o accidentes.

Una menor cantidad de accidentes significa menos problemas, menores costos y mayor eficiencia en

la operación, por lo que resulta conveniente la consideración de diversas recomendaciones que se vierten en esta sección (SEDESOL, 2010).

### **Lineamientos generales**

A continuación se enlistan lineamientos generales de higiene y seguridad en el relleno sanitario:

1. Lavarse al menos las manos y la cara, al término la jornada de trabajo y antes de la ingesta de alimentos
2. Tener a la vista y en lugar seguro, teléfonos de policía, bomberos y servicios médicos
3. Mantener siempre disponible un arnés y cuerda de vida
4. Reportar y analizar todos los accidentes.
5. Contar con equipo completo de primeros auxilios
6. Colocar extintores en el área administrativa, el taller y las áreas generales de servicio, conforme a los requerimientos generales de seguridad en instalaciones industriales
7. Evitar permanentemente el contacto con residuos prohibidos. No cubrir éste tipo de residuos. Aplicar los procedimientos ya establecidos y notificar al supervisor
8. Estar alerta respecto a residuos sospechosos o de origen desconocido, tales como polvos, líquidos o lodos
9. Prohibir sin excepción, que el personal labore bajo la influencia de alcohol o drogas
10. No aceptar contenedores vacíos que previamente hayan contenido sustancias tóxicas o peligrosas, a menos que cuenten con un certificado de seguridad, que garantice su inocuidad

11. Durante la descarga, mantener a los vehículos automáticos a una distancia mínima de 4.5 m del vehículo contiguo más cercano
12. No permitir el tránsito de personal ajeno, en el frente de trabajo
13. Se prohíbe fumar en el frente de trabajo o en superficies de residuos descubiertos
14. Se prohíbe el abandono de vehículos en el interior del relleno
15. Debe requerirse a todo el personal que registre la entrada y salida para cada jornada de trabajo. Los registros deben ser verificados al finalizar el cambio de turno, para asegurar que todas las personas se encuentran en buen estado
16. Todos los vehículos deben ser registrados al entrar y al salir y se verifica el registro al cambio de turno
17. Garantizar la presencia en todas las jornadas laborales, de una persona entrenada en primeros auxilios
18. Establecer reglas para los conductores de los recolectores y sus ayudantes
19. Establecer reglas para los visitantes
20. Se instala una cámara de vigilancia para el monitoreo del área de trabajo

### **Ropa y equipo de seguridad**

Tanto el personal que trabaja en el relleno como las visitas visten ropa y equipo de protección personal adecuado en todo momento, en las áreas a cielo abierto.

En cuanto a los trabajadores, es su responsabilidad, asegurarse de que su ropa y equipo de seguridad se encuentre en buenas condiciones y en el lugar adecuado.

El equipo y ropa de seguridad va acorde a la la función específica de cada trabajador. (SEDESOL, 2010).

## **5.7. MANTENIMIENTO**

### **5.7.1 INTRODUCCIÓN**

El mantenimiento de una obra civil permite la conservación y la funcionalidad de sus equipos e instalaciones. En el caso de un relleno sanitario es muy importante realizarlo adecuadamente, lo que evita:

- Graves daños al medio ambiente y con ello rechazo a la obra por parte de la población
- Incumplimiento de los planes y programas de trabajo
- Fallas en el equipo o en las instalaciones y con ello encarecimiento de la obra

#### **5.7.1.1 Mantenimiento del frente de trabajo**

La zona de maniobras y tránsito hacia el frente de trabajo se riega tantas veces como sea necesario, para el control de tolvaneras, esta actividad se realiza durante el tiempo que las condiciones climáticas en la zona favorezcan la dispersión de polvo.

Para el mantenimiento de una imagen adecuada, el área de maniobras del frente de trabajo se limpia de basura que se deposite por efecto del viento, circulación de los vehículos de transporte o la maquinaria del relleno, y haya quedada esparcida y fuera de la celda correspondiente (SEDESOL, 2010).

### 5.7.1.2 Depresiones

Las depresiones (ilustración 5.13), son comunes debido a la compactación natural que sufren los residuos sólidos con el paso del tiempo, por lo que tienden a formarse en la cubierta final.

Para su reparación, es necesario llevar a cabo el siguiente procedimiento:

Escarificación con pala, rastrillo o zapapico del área afectada a una profundidad de 10 cm. En caso de que el área sea muy extensa, se usa la escarificadora de la motoniveladora.

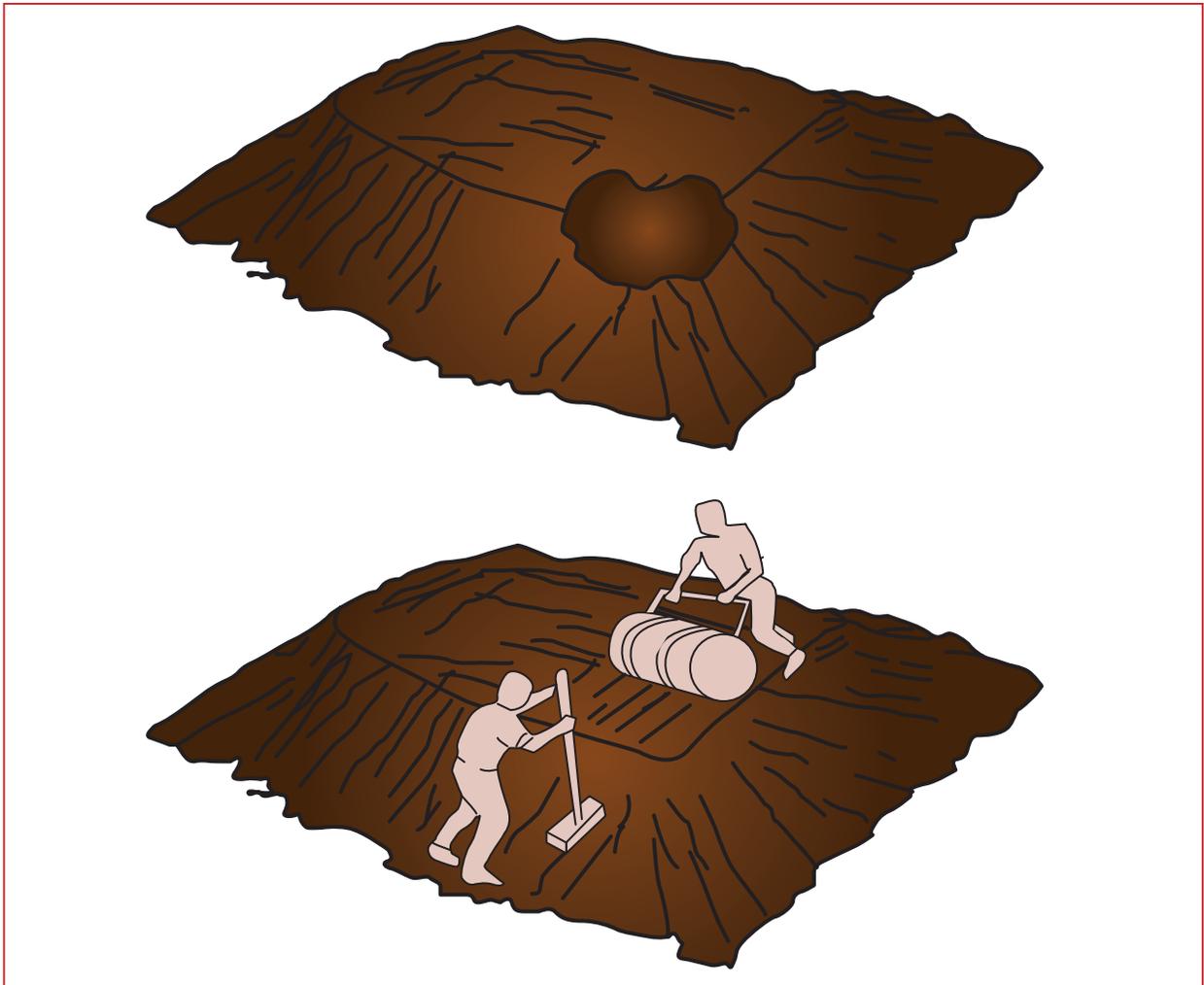
Se coloca material de cubierta en capas de 40 cm como máximo y se compacta cada capa con material húmedo hasta el nivel de la superficie original.

### 5.7.1.3 Grietas

Las grietas (ilustración 5.14) se originan por efecto de los cambios de temperatura o por la mala calidad del material de cobertura. La forma de reparación es la siguiente:

- Se descubre a cada lado de la grieta 0.20 m, a la profundidad que tenga la misma. Posteriormente se humedece

Ilustración 5.13 Reparación de depresiones



- Se coloca material de cubierta húmedo y se procede a la compactación con pisón de mano hasta el nivel de superficie

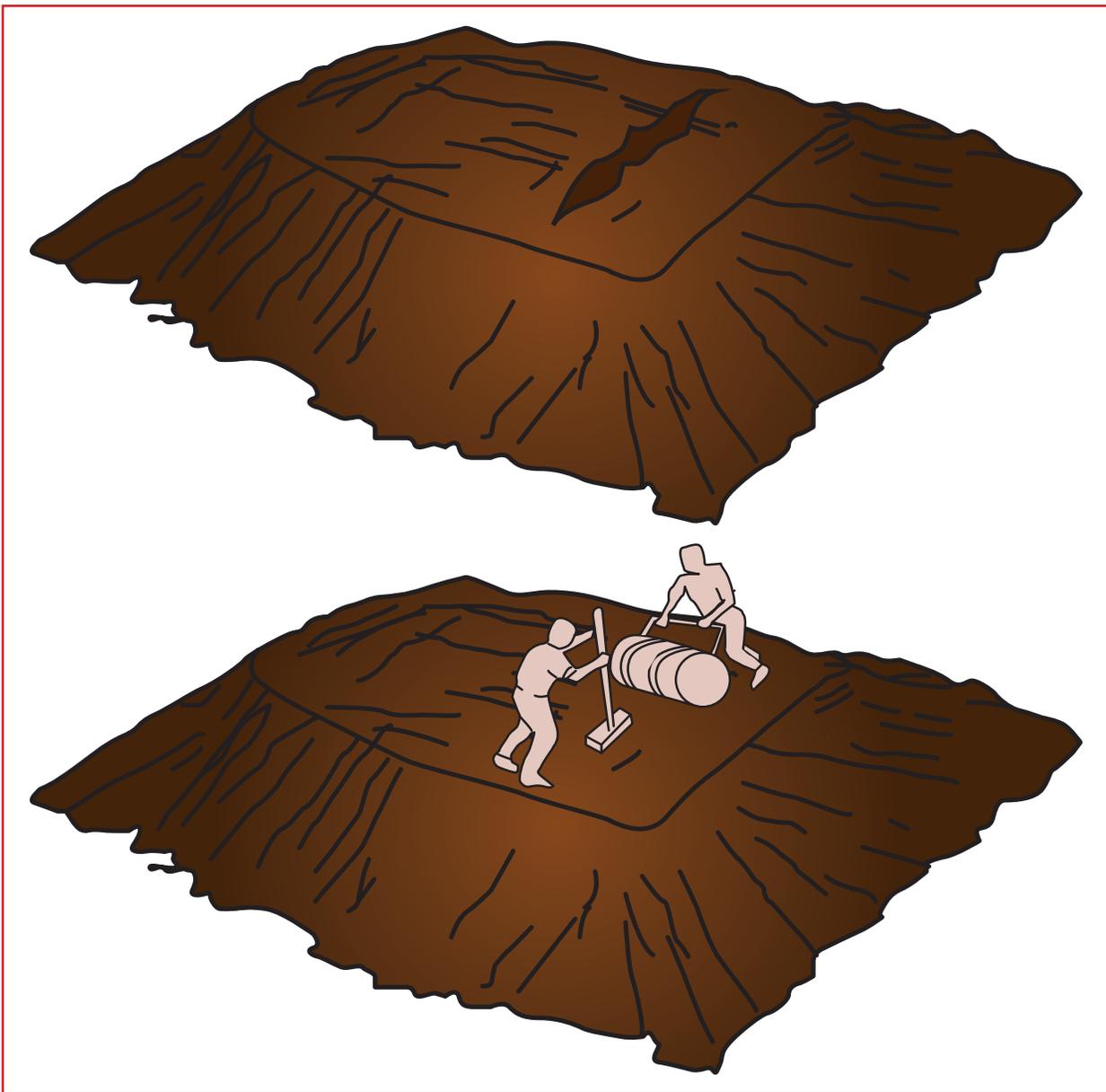
#### 5.7.1.4 Erosiones

Los efectos erosivos se deben a la acción generada por la lluvia y el viento sobre la superficie, esto provoca que en taludes y terraplenes del sitio,

queden al descubierto los residuos sólidos. El procedimiento de reparación es el siguiente:

- Se escarifican 10 cm de la zona erosionada, ya sea con maquinaria o con herramienta manual
- Se humedece el área erosionada
- Se efectúa la preparación con material de cubierta hasta la superficie original

Ilustración 5.14 Reparación de grietas



#### 5.7.1.5 Caminos interiores

Los caminos interiores son las arterias vitales para un eficiente mantenimiento del sitio, por lo que se mantienen en buenas condiciones de tránsito. Para el logro de una buena vialidad se realiza un mantenimiento constante basado principalmente en las consideraciones siguientes.

- Se rellenan los baches para su posterior compactación con pisón de mano
- Se efectúa periódicamente el riego de los caminos con agua tratada, lo que evita la generación de polvos
- Las cunetas de los caminos se encuentran siempre libres de rocas, arena o residuos, lo que evita su azolvamiento
- Mantenimiento de las condiciones de rodamiento de los caminos, preferentemente en horas inhábiles, para el aprovechamiento equipo pesado con el que se dispone

#### **Asentamientos diferenciales y condiciones de la cubierta final**

La revisión periódica de la cobertura final, permite la identificación de grietas y áreas descubiertas debido a estos asentamientos y por la erosión, respectivamente.

El deterioro de la cubierta también representa un problema de infiltración de agua y generación de lixiviados. Además se propicia la migración vertical del biogás.

Para el conocimiento del comportamiento y evolución de los asentamientos diferenciales, se toman en cuenta las siguientes consideraciones (SEDESOL, 2010)

- Se construyen mojoneras de concreto a cada 100 metros y se asigna un número de identificación
- Se efectúa la nivelación inicial y se registra, esta información con la fecha y niveles obtenidos
- Las nivelaciones se efectúan cada 15 días durante los primeros tres meses y posteriormente cada mes y medio dependiendo de la variación de las lecturas, se realizan las mediciones en períodos más largos

#### 5.7.1.6 Cubierta vegetal

El mantenimiento de la cubierta vegetal se encuentra en función del uso final del sitio, del sistema de control que se tenga del biogás, de los lixiviados y del control de la erosión. El procedimiento de mantenimiento es el siguiente.

- Siembra de vegetación con raíces poco profundas, de rápido crecimiento resistente al biogás, a la falta de agua y que se extiendan horizontalmente sobre el área
- La frecuencia de inspección es cuatro veces al año
- Se utilizan los tipos de pastos mostrados en la (tabla 5.10)

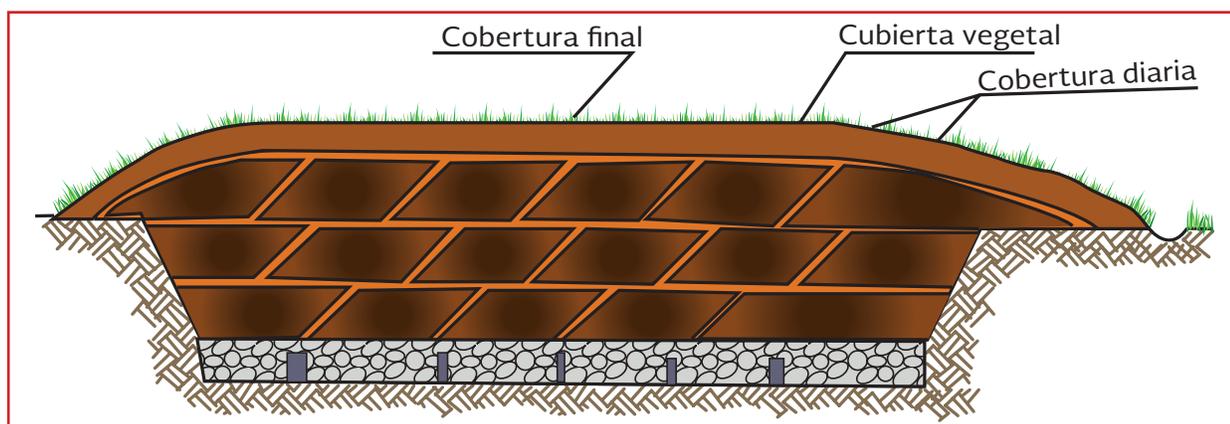
#### 5.7.1.7 Estabilidad de taludes

Los taludes tienden a moverse hacia abajo. Este movimiento encuentra resistencia por la presión pasiva del suelo, la fricción, así como los elementos superficiales, la vegetación y los muros. Cuando las fuerzas cohesión que causan el movimiento exceden a las que lo resisten, ocurre un deslizamiento, (SEDESOL, 2010).

Tabla 5.10 Pastos recomendados para ser utilizados como cubierta vegetal (SEDESOL, 2010)

Nombre común	Nombre científico	Características	Germinación en días	No. Aproximado en kg.	Semilla necesaria (g/m <sup>2</sup> )
Agostide	Agostis stolinifera	Forma césped denso, soporta suelos ácidos	90	12000	2.5-3
Popotillo azul	Andropogon scoparius	Apropiada para fijar taludes, funciona como soporte	60	600	40-50
Bromo sauve	Bromus inermis	Perenne de desarrollo aéreo y radicular	90	400	40
Rodas	Chloris gayana	De talla elevada, fuerte, excelente colonizadora	75	4500	7-10
Bermudas	Cynodon dactylon	Perenne de talla pequeña, muy agresiva	90	4000	7-10
Pata de gallo o gramínea de huerto	Dactylis glomerata	Planta rústica	85	1500	15-20
Cañuela de oveja	Festuca ovina	Soporta frío y cualquier tipo de suelo	80	1400	15-20
Festuca roja	Festuca rubra	Céspedes densos, para suelos calizos	85	1300	15-20

Ilustración 5.15 Cubierta vegetal



Si bien es cierto que cuando se construye un talud se efectúa un análisis de estabilidad, resulta que las condiciones en un tiradero rehabilitado son muy variables y heterogéneas, tales como los cambios de peso de los desechos de lodos y la cubierta, la humedad, los cambios en la cohesión de los residuos sólidos por la biodegradación y,

el cambio del ángulo de reposo de los taludes por los asentamientos diferenciales, citando sólo a los más importantes.

Los deslizamientos de los terraplenes o plataformas, por causa de una falla en su estabilidad, provocan los siguientes problemas:

- Afloramiento de los residuos sólidos, lo que propicia problemas de imagen y contaminación por olores desagradables, así como la entrada de agua a los estratos de residuos sólidos y proliferación de fauna nociva
- Accidentes a los operarios o a los choferes de los vehículos recolectores, además de los costos asociados con pérdidas humanas y materiales, así como la restauración de los mismos

Se recomienda el siguiente sistema de monitoreo para la identificación de deslizamientos potenciales:

- El sistema se integra por tres mojoneras distribuidas en la superficie de la posible falla
- Los sistemas de monitoreo se ubican a cada 50 metros y se lleva la nivelación por trimestre en los primeros dos años; posteriormente se efectúa cada semestre

#### 5.7.1.8 Drenaje superficial

El control del sistema de drenaje del vertedero comprende la entrada y salida de las aguas superficiales. Este tipo de estructuras sufren asentamientos a largo plazo que provocan problemas sobre la conservación de los sistemas de conducción por gravedad que descargan en instalaciones transportadoras alejadas. Puede ser necesaria la instalación y operación de bombas para aguas pluviales después de muchos años de asentamiento del vertedero. La frecuencia de inspección de la red de drenaje es cuatro veces al año y después de cada lluvia sustancial, (SEDESOL, 2010).

#### 5.7.1.9 Báscula

La báscula (ilustración 5.16) es un elemento de radical importancia dentro del relleno sanitario, debido a que con ella se registra el peso de los residuos que ingresan al relleno sanitario, lo que, ayuda al control tanto de las rutas de recolección, como el operativo de la cuadrilla de los vehículos. Por ello resulta muy importante la actualización de la base de datos con el listado de vehículos autorizados para su ingreso, su mantenimiento en buenas condiciones, lo que evita la pérdida del control sobre estas cantidades. Para el caso de este dispositivo, se tienen los siguientes cuidados:

- Calibración constante de la báscula (al menos una vez al mes)
- Se le otorga un servicio regular de engrasado
- Se mantiene limpia de polvo, residuos y lodo el área circundante a la báscula, así mismo se verifica que en su interior no se introduzcan residuos y si es así, se retiran
- Aplicación de pintura cuando menos una o dos veces al año, para su mantenimiento en buenas condiciones

#### 5.7.1.10 Cerca perimetral

La cerca perimetral (ilustración 5.17), delimita el área predial que corresponde al relleno sanitario, y normalmente se compone de una cerca de malla ciclónica, la cual es revisada frecuentemente y reparada, en caso que se encuentren desperfectos, para que cumpla cabalmente su función de control del tránsito de animales domésticos y de personas ajenas al sitio de disposición final.

Ilustración 5.16 Báscula



Habitualmente los problemas que se reparan son: agujeros hechos por las personas cuando cortan los alambres de la malla y en este caso se sustituye ese tramo de malla, enderezado de los postes y tramos de malla que puedan ser removidos o deformados, dado que personas o animales se recargan en estos. Así mismo se rellenan los hoyos que hechos por los animales en el terreno para su cruce por debajo de la malla (SEDESOL, 2010).

#### 5.7.1.11 Drenaje perimetral

Se conservan en buen estado los canales de drenaje periféricos (cunetas, disipadores de energía y las cunetas de la vía de acceso) y la superficie del relleno. Con el tiempo, estos canales se obstruyen por la erosión de los taludes de tierra, por el material que se arrastra

en las épocas de lluvia o el disperso por el viento (papeles, plástico, etc.) (Secretaría de servicios públicos alcaldía de Jericó, 2008).

#### 5.7.1.12 Drenaje del lixiviado

Debido a la gran cantidad de material fino arrastrado por las aguas que percolan en el interior del relleno, los drenajes y zanjas de almacenamiento internas y externas, se colmatan poco a poco y se obstruyen con el tiempo. La remoción de este material, es impráctica, dentro del relleno, pero las zanjas externas sí son objeto de limpieza.

El tanque de almacenamiento de los lixiviados se revisa periódicamente y se observa el nivel de colmatación o la cantidad de sedimentos que contenga el tanque y así se recirculan los lixivios.

Ilustración 5.17 Cerca perimetral



dos y se retira el material sedimentado (Secretaría de servicios públicos alcaldía de Jericó, 2008).

#### 5.7.1.13 Drenaje de gases

Debido a los asentamientos del relleno, las chimeneas de gases se deforman e inclinan; de ahí que sea necesario mantenerlas verticales a medida que se eleva el nivel del relleno, lo que evita su obstrucción y total deterioro (Secretaría de servicios públicos alcaldía de Jericó, 2008)

#### 5.7.1.14 Oficinas generales y áreas de servicio

Para el incremento de la aceptación del relleno sanitario por parte de la opinión pública, se mantiene un buen aspecto general en estas áreas.

El mantenimiento para dichas áreas consiste en labores diarias de limpieza general, pintado de fachadas y muros de estos edificios al menos de forma anual, y que tanto las instalaciones hidráulicas, como eléctricas y sanitarias de que se encuentren dotados, funcionen correctamente (SEDESOL, 2010).

#### Áreas verdes

Las áreas verdes tienen gran importancia dentro del sistema de relleno sanitario porque brindan una buena imagen del acceso y de las oficinas, y constituyen un elemento esencial en la estética del lugar y del paisaje, tal como lo es la barrera de amortiguamiento que se encuentra en la periferia del lugar. Su mantenimiento consiste en los siguientes aspectos (SEDESOL, 2010):

- Poda periódica de las especies arbóreas (una vez por año)
- Riego (por lo menos tres veces por semana)
- Aplicación de herbicidas y plaguicidas (por lo menos cada trimestre)
- Poda, limpieza y riego de áreas verdes (con la mayor frecuencia que se requiera)

#### 5.7.1.15 Revisión y reparación de equipo

El equipo mecánico es indispensable en la operación del relleno sanitario. Por ello, se revisa constantemente, se cambian piezas que así lo requieran y se elige a un operador que además de tener experiencia en la operación del equipo sea capaz de la realización de reparaciones pequeñas a las máquinas, (SEDESOL, 2010).

A continuación se mencionan algunas recomendaciones generales sobre mantenimiento y cuidados en la operación de la maquinaria, las cuales se consideran normalmente durante las horas activas de la misma, pero es primordial referirse a los manuales o guías entregadas por los fabricantes.

#### **Lubricación**

La lubricación es de gran importancia para el correcto funcionamiento y tiempo de vida útil de los elementos móviles del equipo. La frecuencia de lubricación nunca debe ser inferior a la indicada por los fabricantes y se condiciona además al tipo de trabajo que se realice, la carga, el terreno y condiciones atmosféricas, (SEDESOL, 2010).

Es importante que el indicador de presión de aceite marque correctamente, en caso contrario

se verifica el nivel de aceite en el cárter o bien si la viscosidad es la adecuada para la temperatura ambiente. Se recomienda además lo siguiente:

- Usar siempre lubricadores y envases limpios
- Bajo condiciones de funcionamiento demasiado severas deben reducirse los períodos de lubricación
- Antes del arranque de la máquina el operador debe prestar atención en el cumplimiento del programa de lubricación

#### **Purgado**

Se comprueba la presión de aire en el sistema de freno y se purgan cada mañana los productos de la condensación. Se evita que el depósito de combustible se mantenga con poca carga y se limpia frecuentemente.

Luego de largos períodos de inactividad del tractor, durante el desarme de los filtros y cañerías de alimentación o cuando se agota el combustible del tanque, permanece aire en las tuberías de combustible, se elimina mediante la purga del sistema.

#### **Sistema de alimentación**

Es importante para el correcto funcionamiento de equipo y la economía de consumo, el control de la regulación de los inyectores; esta anomalía comúnmente se manifiesta con humo excesivo en el escape. El ajuste de la bomba inyectora se efectúa por personal especializado.

Para el mantenimiento del filtro de aire se verifica el nivel de aceite y el nivel de posición de polvo en

el recipiente del prefiltro y se sopletea la cámara interna del prefiltro.

En ambientes muy polvorientos es necesario el incremento de la frecuencia de control y limpieza.

### **Sistema de enfriamiento**

El termostato regula la temperatura y su velocidad de elevación en el motor. Este se halla en la tubería de retorno del agua desde la cabeza de cilindros al radiador.

### **Sistema eléctrico**

El sistema eléctrico se atiende por personal especializado. En general el operario remueve el óxido de las terminales de los acumuladores y los cables.

Así mismo se reemplazan los alambres desgastados y se colocan limpios y firmes. Es necesario que las baterías se encuentren aseguradas al bastidor y no se aprieten demasiado fuerte y mantenerse el nivel correcto del líquido.

Cuando el líquido electrolítico se encuentra por debajo del nivel adecuado se agrega agua destilada pura. No se use agua de hidrante o que haya sido almacenada en un recipiente metálico. En ocasiones se emplea agua de lluvia. Los bornes se aprietan y untan con vaselina pura y no grasa común.

En el tablero de la máquina se vigila la luz indicadora de insuficiente tensión en el dínamo. Cuando el motor se acelera esta se encuentra apagada, de lo contrario se revisa el dínamo o el regulador de tensión y su fusible. Cuando el

motor se encuentre en ralentí, es necesaria la regulación a un número de rpm. tal que la luz indicadora se encuentre encendida o apagada pero nunca parpadeando pues se daña el regulador de tensión.

Los equipos empleados en los rellenos sanitarios generalmente son montados sobre orugas, por esta razón a continuación se mencionan las características más importantes de este tipo de maquinaria, en cuanto a su funcionamiento y mantenimiento (SEDESOL, 2010).

### **Maquinaria sobre orugas**

Los tractores sobre orugas, logran un funcionamiento más suave y uniforme, sin tiradas bruscas ni ondulaciones.

Existen diversos diseños para las zapatas de los carriles de una topadora, que cumplen funciones de tracción primordialmente, a través de las uñas de apoyo. Además la fuerza impulsora se ejerce sobre los pasadores y no sobre las zapatas del carril en forma directa.

Con una distancia entre ejes suficientemente amplia y con tejas de ancho adecuado, se logra en la máquina excelente flotación (baja presión específica sobre el suelo) y estabilidad lo que posibilita el trabajo en terreno poco consistente y sobre pendientes pronunciadas.

Si bien la distancia corta entre ejes, favorece la maniobrabilidad, el carro largo aumenta la flotación del tractor y mejora la adherencia. Este tipo es más conveniente pues si se aumenta el número de rodillos de apoyo, la fuerza de empuje es mayor y la estabilidad longitudinal y transversal de la máquina es muy buena.

Los rodillos y pasadores se distribuyen sobre las zapatas, de modo tal que los soportes y armazón de los carriles distribuyan los esfuerzos uniformemente (SEDESOL, 2010).

### **Tensión del carril**

Se vigila la tensión del carril que se extiende por el desgaste de las placas, ejes, casquillos, guías o ruedas dentadas, el carril cuenta con una holgura de entre 31.75 y 30.1 mm.

### **Alineación y ajuste del tren rodante**

Las ruedas dentadas y de apoyo se hallan en línea. Cada 500 horas es necesario el ajuste de los pernos y tuercas de los mecanismos sobre orugas. Algunos indicios de que estos no se encuentran bien ajustados son:

- Desgaste rápido de una pestaña de la rueda, originado por mala alineación de la misma
- Calentamiento de una rueda, aunque otra causa posible es la falta de lubricación
- Gran consumo de lubricante. Si no va acompañado de calentamiento generalmente el sellado es defectuoso
- Es conveniente no exigir a la máquina recorrido de trayectorias largas en retroceso pues es una operación forzada que afecta el sistema de dirección y el tren rodante, más aun si se hace a alta velocidad

La velocidad de desplazamiento de la máquina debe adaptarse al terreno.

En el descenso de pendientes pronunciadas, se utilizan únicamente los frenos, lo que evita sobrecalentamiento en el motor y transmisión.

Los cucharones cargados se mantienen a la menor altura posible, lo que permite estabilidad y visibilidad.

La zona de trabajo debe encontrarse despejada y nivelada. Además se presta especial atención en el equilibrio de la máquina cuando trabaje cerca de desniveles bruscos de terreno (SEDESOL, 2010).

### **Transmisión**

Muchas ventajas se obtienen mediante la transmisión hidráulica compuesta por una unidad compacta con “convertidor de par” y “caja de cambios”. Este sistema de transmisión permite el aumento del par motor en forma continua a medida que aumenta la resistencia lográndose una penetración eficaz y llenado efectivo de la cuchara.

El cambio de velocidad se realiza sin pedal de embrague, mientras la máquina está en movimiento y desarrollando el par máximo.

En la Tabla 5.11, se menciona el mantenimiento preventivo realizado a cada tipo de maquinaria destinada para la operación del relleno sanitario, así como de algunos equipos utilizados.

### **Medidas de seguridad**

A continuación se mencionan algunas de las medidas de seguridad tanto para el maquinista, la máquina y los trabajadores o personas que pudieran estar cerca.

Si el operador desciende de la máquina, aunque sea momentáneamente, cuida que: la hoja topadora o el cucharón se hallen lo más bajo posible o en su defecto sobre el suelo, que

Tabla 5.11 Mantenimiento preventivo. Gobierno de Antioquía, "Guía para el diseño, Construcción y operación de un relleno sanitario manual", Medellín, Colombia, Abril, 1988

Mantenimiento preventivo					
Tipos de maquinaria	Cambio de filtros	Cambio de aceite	Afinación	Engrasado	Ajuste de partes móviles.
Trascavo de orugas	Cada 250 h	Cada 250 h		Diario	Semanal
Tractor de orugas	Cada 280 h.	Cada 280 h		Diario	Semanal
Rodillo de compactación				Diario	Semanal
Motoconformadora	Cada 300 h	Cada 300 h		Diario	Semanal
Pipa de agua	Cada 3000 km	Cada 3000 km	Cada 5000 km	Cada 3000 km	Cada 3000 km

la máquina permanezca inmóvil y el motor apagado en lo posible.

Mientras el motor se mantenga en operación, no cargue combustible ni realice ajustes.

No se acelera a gran velocidad un motor turbo alimentado antes de apagarlo; es necesario regularlo en vacío por algunos minutos para que baje su temperatura.

No se repara la hoja y ningún otro equipo suspendido sin la colocación de las cuñas necesarias; es más seguro dejarlos apoyados en el suelo.

Se traba la transmisión y los frenos al estacionarse. En caso de paro por varios días se apaga el encendido, se quitan las llaves y se cierra el paso de combustible.

Si se deja la máquina sobre una pendiente, se ubica transversalmente y se asegura atrás y adelante con tacos o bloques.

Se evita el transporte de acompañantes sobre la máquina ni el uso de elementos de distracción. Los pedales de frenos, las palancas y otros elementos no se utilizan como descanso de pies y manos.

Se mantiene limpia la máquina sobre todo el tren rodante pues la basura se solidifica y posteriormente se hace muy difícil su retiro. El operador maniobra, descansada y cómodamente.

La seguridad y rendimiento de los equipos destinados a un relleno sanitario depende íntegramente del personal que se encuentra a cargo de su manejo. Muchos desperfectos y anomalías se evitan cuando el operario es plenamente responsable de su trabajo.

Es importante también, la colaboración y apoyo de técnicos e ingenieros que controlan la obra, quienes protegen al operador, proporcionándole el equipo de seguridad necesario para realizar su trabajo, (SEDESOL, 2010).

### Habilitación de espacios de trabajo

Es muy conveniente que dentro de las instalaciones del relleno sanitario se cuente con un cobertizo donde se realicen las labores de un taller de mantenimiento de las máquinas utilizadas en la operación del sitio, que a la vez sirva para resguardo de las mismas contra la intemperie, y cuando termine su jornada de trabajo.

El tamaño de estas instalaciones dependerá del número de máquinas con que cuente el sitio, para que se desarrollen las siguientes actividades:

- Mantenimiento preventivo al equipo de confinamiento
- Reparaciones menores de emergencia al equipo de confinamiento y vehículos
- Almacenamiento de combustibles, lubricantes, refacciones y herramientas en general

La ubicación de este cobertizo podrá definirse en alguna zona cercana al frente de trabajo, y de preferencia se construye con elementos que faciliten y agilicen su montaje y que sean reutilizables, ya que se cambian de lugar de acuerdo al avance.

### **Transporte interno**

Para el transporte interno del residente y sus colaboradores o auxiliares, se cuenta con un vehículo para su desplazamiento dentro del sitio, ya que por la extensión de los predios requeridos para los sitios de disposición final, las distancias desde las oficinas administrativas hasta los frentes de trabajo o algunos otros lugares dentro del mismo sitio donde requieran desplazarse por distintas causas (paro de la descarga de residuos no aceptados en ese sitio, abordaje de visitantes no autorizados, o alguna otra situación de emergencia), son considerables. Con un vehículo se cuenta con un acceso más rápido a los lugares donde sean solicitados, y así se cumpla con las labores de control más eficientemente.

### **Limpieza general**

Para la minimización del impacto ocasionado por los elementos ligeros de la basura arrastrados

por el viento hacia las zonas circundantes del relleno, se cuenta con un sistema de mallas móviles colocadas en el sentido en que sopla el viento.

Se requiere un mantenimiento permanente de este sistema, ya que se deteriora la calidad de la operación del relleno, además de invalidarse su función.

El encargado de las operaciones en el frente de trabajo, planea diariamente la ubicación correcta de la malla móvil, lo que minimiza la fuga y dispersión de los materiales ligeros.

Además del uso de malla, se realiza la recolección de estos materiales ligeros, en las áreas aledañas al frente de trabajo, así como de los caminos y si es necesario en la zona de la barda perimetral hacia donde sopla la corriente de aire, pues generalmente es ahí donde se detienen y acumulan los materiales que arrastra el viento (SEDESOL, 2010).

### **5.7.2 SISTEMA DE MONITOREO**

Los sistemas de monitoreo se emplean para la identificación de los posibles impactos del relleno sanitario hacia el ambiente. Por ello, se cuida estrictamente su mantenimiento.

El mantenimiento en los pozos de monitoreo consiste en la inspección y limpieza continua, lo que evita que se azolve y con ello la obstrucción del flujo de biogás o lixiviados.

Se cuida también que no se inunden. Los asentamientos en las celdas se monitorean con los postes de referencia. Su mantenimiento consiste en su renivelación cuando así se requiera.

### 5.7.2.1 Sistema de control y vigilancia

Se toman en cuenta los siguientes aspectos para el control y vigilancia de todas las actividades que se realicen en el relleno sanitario:

#### **Caseta de control y vigilancia**

El equipo de registro y medición se alojará en una caseta de control, cuyas dimensiones y especificaciones se recomiendan por el mismo fabricante.

Si se pretende el establecimiento de un sistema tarifario por la prestación de éste servicio de disposición final a la comunidad, el registro en peso de la recepción de los residuos proporciona las bases para la determinación de su costo.

#### **Recepción**

El horario de operación del relleno sanitario se establece de acuerdo con el horario del sistema de recolección de los residuos sólidos; generalmente un relleno sanitario se encuentra en servicio de cinco a seis días por semana y de ocho a diez horas por día.

El horario muestra a la entrada del relleno y en un lugar visible; indicándose también el tipo de residuos permitidos para su disposición.

Una vez autorizada la entrada al vehículo y después de su pesaje, se le asigna el frente de operación en el cual descarga, así como la ruta a seguir, tomando en cuenta los señalamientos del camino.

El chofer llega al frente de trabajo asignado, deposita los residuos e inmediatamente sale de la zona de operaciones, regresando nuevamente a la báscula para su pesaje.

### **Vigilancia**

La vigilancia general en el relleno sanitario, considera los siguientes aspectos:

- Se vigilan y controlan las entradas y salidas de los vehículos y personas que lleguen al relleno sanitario, permitiendo únicamente el acceso al personal designado
- Se vigila al máximo la calidad de los residuos sólidos, lo que evita el ingreso de residuos industriales o peligrosos
- Se vigila con especial cuidado el sistema de pesaje de los vehículos recolectores, ya que de ello depende el logro de la vida útil de diseño del relleno sanitario
- Se revisa que las celdas por construirse cada día, sean identificadas por medio de estacas que fijen los límites de las mismas, estos límites se indican a los operadores de los tractores
- Se vigila constantemente que no existan incendios en el relleno sanitario, en caso de que se presenten, la zona se considera de emergencia y el incendio se controla y abate inmediatamente por medio de la utilización de arena o material de cobertura
- Se supervisa el buen estado de los caminos interiores y de acceso al relleno sanitario

En el caso de las instalaciones que tienen interacción directa con el exterior del relleno sanitario, como ocurre con el cercado perimetral, la caseta y pluma de acceso y los sistemas de monitoreo de aguas subterráneas, requieren vigilancia suficiente, lo que evita actos vandálicos. Se recomienda se provea iluminación en las áreas de acceso.

Además, resulta común la práctica del depósito clandestino de residuos sólidos en las inmediaciones del sitio de disposición final en horas inhábiles.

### Cercas

Se colocan cercas móviles para el control de los materiales ligeros sensibles de arrastrarse por efecto del viento. Estas se colocan en dirección transversal al sentido de incidencia del viento y se construyen con malla de gallinero o alguna similar. De esta forma los materiales susceptibles a arrastrarse por el viento se retienen.

Asimismo, se coloca o construye una cerca perimetral en todo el terreno, lo que evita la entrada de animales y personas ajenas al relleno sanitario (SEDESOL, 2010).

### 5.7.3 CLAUSURA DE UN RELLENO DE LODOS

La clausura es el procedimiento por el cual el relleno se cierra y ya no se dispone más lodo dentro del mismo (EPA, 1978).

Las acciones realizadas durante la clausura son:

- Colocación de una cubierta sobre el lodo para el control de olor y vectores (insectos, animales, etc.). Implementación de un sistema para el manejo de lixiviado para la prevención de la contaminación del agua subterránea y superficial
- Prevención de acumulación de gas metano
- Se mantiene el sitio estable y seguro, considerando un período de preclausura
- Se selecciona y prepara el sitio para su uso después del cierre definitivo

### Planeación para la clausura del relleno

El plan de clausura es un documento que especifica los criterios y procedimientos que deben seguirse durante el período de clausura y postclausura. Este plan se desarrolla durante el período de diseño y de selección del sitio para la visualización desde el principio del proyecto de las implicaciones técnicas y económicas que conlleva esta parte final del proyecto (EPA, 1978).

Este plan se revisa durante la operación del relleno. Los objetivos del plan son:

- Definir los criterios de diseño y el procedimiento de operación para la clausura
- Identificar los requerimientos de operación y mantenimiento para la post-clausura del sitio

El contenido del plan de clausura incluye:

- Diseño de la cubierta de lodo
- Diseño de la cubierta vegetativa
- Control para el manejo de aguas de tormentas
- Procedimientos de inspección y mantenimiento
- Manejo de lixiviados
- Manejo de gas
- Otros controles ambientales
- Restricciones de acceso al sitio y seguridad
- Manejo y requerimientos financieros

#### 5.7.3.1 Cubierta final para el relleno de lodo

La cubierta (ilustración 5.18) es una barrera física que se coloca sobre el relleno de lodo y

consiste en capas de suelo y geo-membranas que separen al lodo. Los criterios para el diseño de la cubierta consideran:

- La minimización de la infiltración de agua en el relleno
- La formación de una buena superficie de drenaje
- Resistencia a la erosión
- Restricción de la migración de gases
- Aislamiento de vectores
- Aspecto agradable
- Reducción del tiempo de mantenimiento

Cada elemento de la cubierta consiste de una capa de suelo u otro material seleccionado para el logro de los requerimientos específicos del diseño. Cada elemento debe seleccionarse de acuerdo a las características del sitio. Los elementos de la cubierta son la capa de erosión, la capa de drenaje, la capa de infiltración y la capa para venteo de gases.

### Capa de infiltración

La capa de infiltración es de baja permeabilidad y de suelo o geomembrana.

La capa de infiltración tiene por lo menos 50 cm de espesor y una permeabilidad menor o igual que cualquier capa de suelo o recubrimiento utilizado para el fondo. La ilustración 5.19, muestra una capa de infiltración con una permeabilidad igual a las cubiertas del fondo, (EPA, Octubre 1978).

El material utilizado como cubierta de infiltración se encuentra libre de rocas, escombros, basura, raíces y cualquier material que incremente la conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad creando trayectorias para el flujo de agua. La pendiente del suelo después de compactación es de entre 3 y 5 por ciento. Si la pendiente es mayor debe evaluarse su potencial de erosión.

Ilustración 5.18 Ejemplo de una cubierta final EPA (1995)

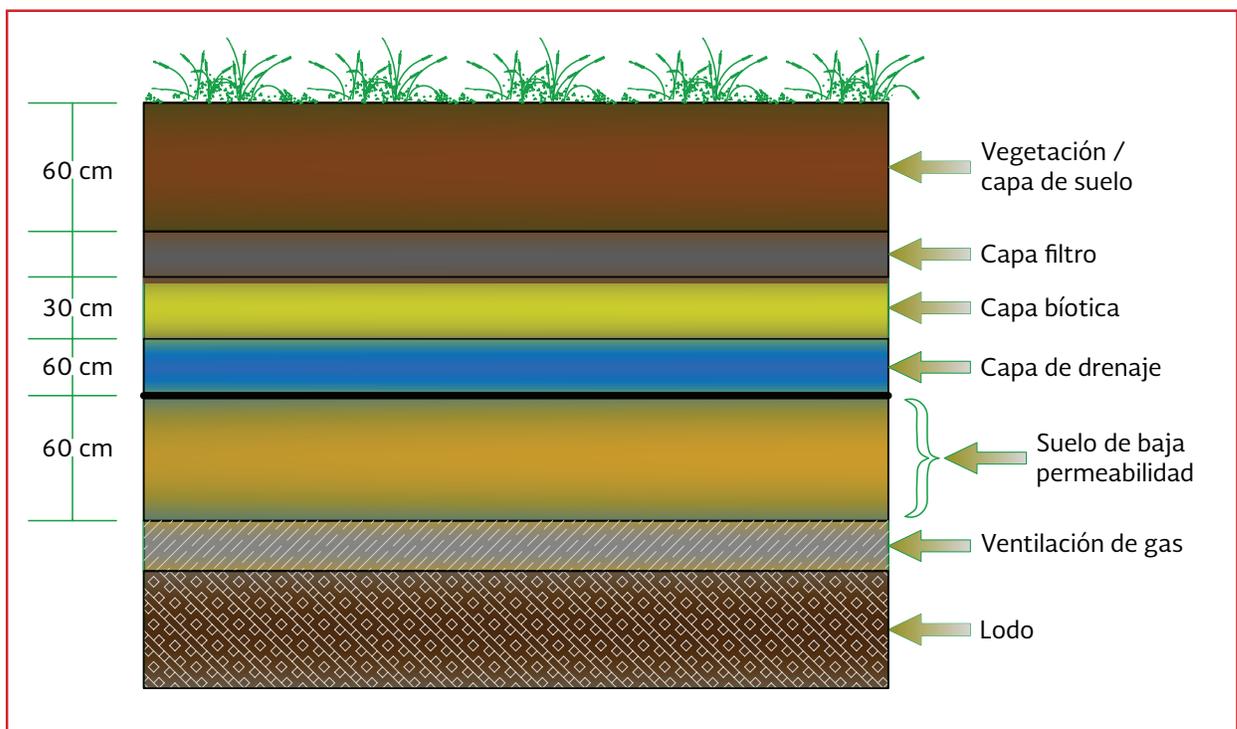
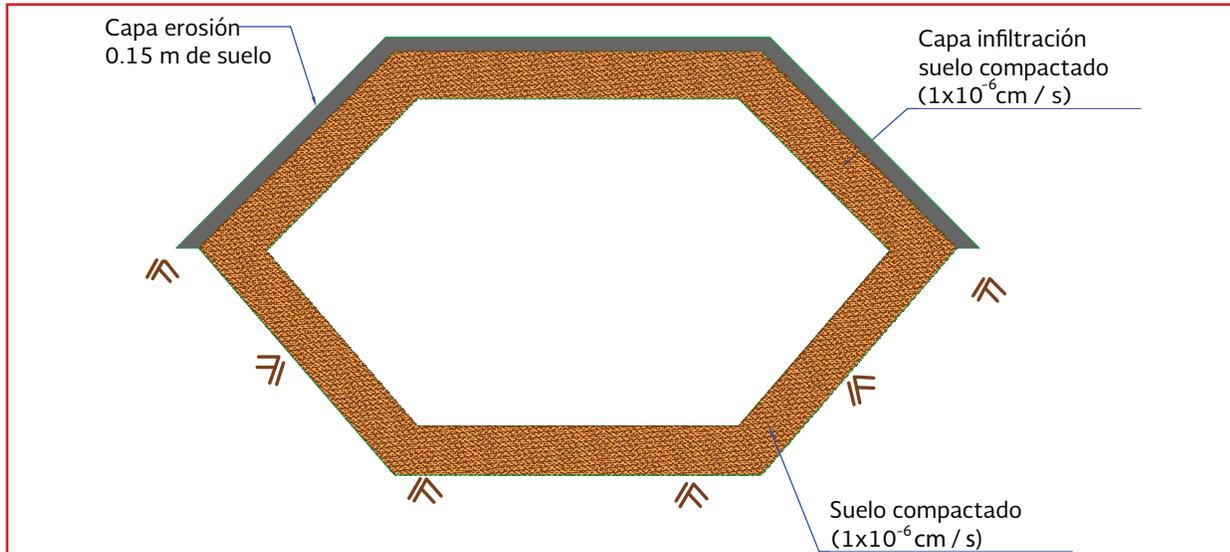


Ilustración 5.19 Ejemplo de una cubierta final con conductividad hidráulica ( $k$ ) <  $k$  del fondo (EPA, 1995)



Si se utiliza una geomembrana como capa de infiltración el espesor mínimo es de 0.5 mm.

### Capa de erosión

Esta capa protege a la cubierta de la erosión ocasionada por el agua y el viento. Y también funciona como medio de crecimiento de la capa vegetal (EPA, 1978).

### Cubierta vegetativa

La cubierta vegetativa protege a la capa exterior de suelo del viento, agua y erosión mecánica. Remueve el exceso de agua del suelo por medio de la evapotranspiración.

Para la selección de la cubierta vegetativa se consideran los siguientes criterios:

- Plantas perennes y resistentes a la sequía y temperaturas extremas del lugar
- Sin raíces que ocasionen daños al drenaje y a las capas de infiltración
- Que aproveche los nutrientes que existan

en el suelo y que no se requiera adición de los mismos

- Sea lo suficientemente densa para reducción de la erosión de la cubierta de suelo
- Requiera un mantenimiento mínimo
- Con variedad de especies, para el mantenimiento de las características de la cubierta vegetal durante todo el año

### Elección de la cobertura vegetal

Los factores que condicionan la elección de especies para la cobertura continua del suelo con pasto o césped son muy diversos: climatología, latitud, suelo, etc. Por lo tanto, es muy difícil la acertada determinación de la especie o especies adecuadas en cada ocasión (SEDESOL, 2010).

A continuación se citan varias especies de pastos con sus características más importantes:

#### Agróstide, rastrero o fiorín

Agrostis stolonífera. Son especies que forman un césped muy denso. Soporta fácilmente casi todos

los suelos, incluso los ácidos. Son muy agresivas, pues se extienden con facilidad por estolones subterráneos y superficiales. No soporta el corte continuo. Se propagan fácilmente por semilla y por multiplicación vegetativa al comienzo y al final de la estación cálida. Son notables las variedades “Penncross”, “Toronto”, “Seaside” y “DLAington”.

### **Popotillo azul**

*Andropogon scoparius* y *A. Virginicus*. Comúnmente llamada anaróspura. Especies perennes que alcanzan tallo alto, si se abandona la siega. De consistencia basta, es apropiada para la fijación de taludes. Soporta bien los suelos áridos y secos. Se cortan siempre por encima de 10 cm y se multiplica por plantación vegetativa.

### **Pasto bromo suave**

*Bromus inermis*. Especie perenne de gran desarrollo aéreo y radicular. Es estolonífera, con hojas planas algo toscas y gran cantidad de renuevos; forma praderas aceptables en suelos de cualquier tipo, con tal que sean fértiles y estén bien drenados. Soporta los climas extremos y la salinidad. Se multiplica por semilla.

### **Pasto rodas**

*Chloris gayana*. Especie perenne de talla elevada, que se desarrolla por tallos rastreros. Es muy fuerte y se adapta esencialmente a climas templados y cálidos, soportando bien todo tipo de suelos. Constituye una excelente colonizadora de taludes. Se siembra al comienzo de la estación cálida.

### **Pasto bermuda**

*Cynodon dactylon*. Es el pasto o grama de las Bermudas, especie perenne de talla pequeña y muy agresiva.

Tiene gran capacidad estolonífera y se desarrolla bien en todo tipo de suelos, aunque sean semiáridos o se encuentren al borde del mar, Se multiplica fácilmente por semillas, por estolones y por esqueje, durante la estación cálida. Existen infinidad de variedades: “Bayshore”, “Oimond”, “Sunturf”, “Fifgreen”, “Uganda”, etc.

### **Pata de gallo o gramínea de huerto**

*Dactylis glomerata*. Especie perenne de talla alta, con hojas anchas y plegadas. Es una planta muy rústica que soporta cualquier suelo aunque resulte seco y poco fértil. Se utiliza para céspedes fuertes y poco cuidados, multiplicándose fácilmente por semilla.

### **Cañuela de oveja**

*Festuca ovina*. Especie perenne de talla baja y con numerosas hojas basales. Es muy rústica en cuanto al frío y para cualquier tipo de suelo, incluso salino y árido. Se propaga fácilmente por semilla. Se utiliza en praderas de montaña. Son notables sus variedades “Tenvifolia” y “Duriuscula”.

### **Festuca roja**

*Festuca rubra*. Especie perenne de talla mediana, provista de abundantes hojas lisas con la base rojiza. Es la festuca más utilizada en las praderas

de jardín. Forma céspedes muy densos y tiene cierta tendencia estolonífera.

Es rústica en casi todos los suelos, aunque se desarrolla mejor en los calizos. Es excelente en la montaña. Se multiplica fácilmente por semillas. La variedad principal es la “Stolonífera”.

### **Suelo conveniente**

Antes de la colocación de las plantas, es de gran importancia la consideración de la conveniencia del suelo para que propicie el crecimiento de éstas.

Esto se obtiene a través del análisis de los siguientes parámetros:

- pH
- Fósforo
- Potasio
- Conductancia
- Sales minerales
- Materia orgánica

Para efectuar este análisis, se obtienen muestras de la capa superficial de suelo, se toma una porción de dicho suelo, se mezcla y se prueba. Para dicho muestreo, se efectúan los siguientes pasos:

- Se hace un corte en el suelo
- Remoción de la vegetación de la superficie
- Se eliminan los montículos que se encuentren
- Se evita la toma de muestras en los caminos, ni lugares cercados

### **Requerimientos para la siembra de vegetación**

El pH fluctúa en un rango de 5 a 8, si se encuentra arriba de 8, los elementos necesarios para el cultivo no son solubles. Si el pH es menor que 5 se favorece que dichos elementos sean tóxicos. En general el pH aceptable es de 6.5. Los suelos ácidos (abajo de 7), se equilibran, agregándoles cal.

Los tres nutrientes principales para que se desarrolle la planta son: nitrógeno, fósforo y potasio.

El desarrollo de la vegetación, depende de los resultados de las muestras del suelo, así como del tipo de cultivo.

El nitrógeno se encuentra en la materia orgánica y ocasionalmente se presenta en forma amoniacal. El nitrógeno orgánico se encuentra combinado en la materia orgánica. El nitrógeno amoniacal es comúnmente utilizado, es altamente inestable y se volatiliza al contacto con el aire. Es muy importante que se utilice este fertilizante con mayor frecuencia, ya que proporciona a la planta una buena apariencia en cuanto a su color, además de ayudarle en su crecimiento.

La mayoría de los pastos necesitan entre 89 y 110 kilogramos de nitrógeno por hectárea por año para mantenerse en buenas condiciones. Sin embargo con una cantidad de 45 a 55 kilogramos por año, es suficiente para que se mantenga el pasto.

Si el suelo contiene una gran cantidad de materia orgánica, normalmente requiere más nitrógeno.

El fósforo es el segundo elemento de los fertilizantes que se considera adecuado para el crecimiento de las plantas. Normalmente son necesarios de 89 a 110 kilogramos / hectárea.

De manera adicional se agrega al suelo una base con pH. En la Tabla 5.12 se presenta un promedio de la cantidad de pH necesario.

El potasio es el tercer elemento de los fertilizantes, necesario para el desarrollo de la planta. Es más estable que el nitrógeno y rápidamente absorbido por el suelo.

Aproximadamente se requiere entre 89 a 110 kilogramos / hectárea de potasio para la estabilización de la vegetación.

Para que la planta se mantenga en buenas condiciones, se aplica de entre 10 a 15 kilogramos de potasio y fósforo, dos a tres veces al año.

Para determinar la cantidad de fertilizante que se requiere para un cultivo, se aplica la siguiente fórmula:

$$\frac{a}{b} = c \quad \text{Ecuación 5.1}$$

a = Necesidades de cultivo

b = % de nutrientes en el fertilizante

c = kg ha<sup>-1</sup>, por aplicar

Ejemplo: Para cultivo de un pasto, se necesitan

80 kg ha<sup>-1</sup> de nitrógeno. El fertilizante contiene 20 por ciento de nitrógeno.

$$\frac{80}{0.20} = 400 \frac{kg}{ha} \text{ de fertilizante}$$

### Sembrado y protección de las semillas

Enseguida se presentan las recomendaciones para el manejo y sembrado de las semillas de pasto.

- Se hace un surco en el terreno y se coloca la semilla para que no se dañe con el agua
- Se siembra alrededor de un arroyo o riachuelo, para la reducción de la erosión
- Se usa suficiente cantidad de semillas (650 a 800 semillas por metro cuadrado)
- Se cubre con paja o fibras la semilla para que se sostengan al suelo

### Paja

La paja o fibra orgánica se coloca en la pendiente de los taludes para la reducción de la erosión del suelo, además conserva la humedad y disminuye la posibilidad de que crezca la maleza. Esta fibra orgánica es de hierba seca, vainas secas de cereales, etc.

### Colocación de la fibra orgánica

Se coloca uniformemente después de 48 h de haberse sembrado la semilla. Antes, se ancla la malla sintética o asfalto, colocando entre 3 300 a 4 500 kg ha<sup>-1</sup> (SEDESOL, 2010).

Tabla 5.12 Requerimiento de pH

pH	Kg ha <sup>-1</sup>
6.2 a 6.8	56
6.9 a 7.5	90
7.5 o mas	112

## Otros componentes de la cubierta final

Otros componentes que tiene la cubierta final son: una capa para drenaje, una cubierta para venteo de gases y una barrera biótica, en la Ilustración 5.18 se observan dichos componentes.

También se considera la hidrología, la sedimentación del terreno y la estabilidad de la pendiente.

## Programa de postclausura

Se requiere de un programa para el mantenimiento del sitio en condiciones adecuadas durante el periodo de postclausura. En la tabla 5.13 aparecen todas las actividades de inspección en la postclausura.

En los rellenos de lodo se restringe el acceso público durante un período de tres años posterior a la clausura. Además se toman medidas de seguridad adicionales dependiendo de las condiciones específicas del lugar.

## Mantenimiento de largo plazo (postclausura)

El mantenimiento de largo plazo de un relleno sanitario clausurado esta en función del uso final del sitio. Además la mayoría de estos sitios tienen algunos sistemas de control y monitoreo de biogás y lixiviados que requieren una continua atención después de la clausura del sitio.

El monitoreo de agua subterránea también se considera dentro del diseño para la revisión del funcionamiento de los sistemas de control de lixiviados. Otros factores que requieren un grado de atención continua son las instalaciones de control del drenaje y de la erosión.

Es importante señalar que los cuidados en la etapa de postclausura de un sitio de disposición final, se encuentra sujeta a una regulación y en la etapa de planeación (diseño y financiamiento) se incluye el aspecto de la postclausura. El periodo de la postclausura abarca como mínimo un periodo de 30 años (SEDESOL, 2010).

Tabla 5.13 Inspección de rellenos de lodos en post-clausura

<b>Sistema de cubierta</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Buscar formación de arroyos u otros daños en la capa de erosión</li> <li>Buscar indicadores de asentamientos tales como depresiones en la superficie o formación de encharcamientos por agua de lluvias</li> <li>Buscar indicaciones de pendientes inestables</li> <li>Revisar la capa vegetativa para buscar problemas subsuperficiales</li> <li>Notar la presencia de plantas invasoras</li> <li>Buscar animales roedores</li> </ul>
<b>Sistema de manejo de agua de lluvia o tormentas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verificar que el drenaje superficial se encuentre limpio y sin daños</li> <li>Verificar que todos los dispositivos tales como estanques, registros y tuberías se encuentren limpios y sin obstrucciones</li> </ul>
<b>Sistema de recolección de lixiviados</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verificar que las tuberías no estén obstruidas y que no haya daños por asentamientos</li> </ul>
<b>Venteo de gases</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verificar que las tuberías no estén bloqueadas por movimientos de suelo</li> <li>Verificar que la capa de infiltración se encuentre intacta y sellada adecuadamente en las tuberías de venteo</li> </ul>
<b>Sistema de monitoreo de gas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Probar el equipo de monitoreo de gas</li> </ul>
<b>Otros</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Revisar vías de acceso, edificios, barreras de aislamiento, etc. buscando daños o vandalismo</li> </ul>

## **Sistema de control de biogás**

Los sistemas de control del biogás son activos o pasivos, los sistemas pasivos facilitan el escape del gas hacia la atmósfera por medios naturales, mientras que los activos utilizan un sistema de succión para la extracción del biogás, requiriéndose para ello de instalaciones más complejas, tales como el uso de una red de tuberías, sopladores, bombas, quemadores, entre otros, y cuyos elementos requieren de un mantenimiento periódico. En la red de captación se requiere la remoción de condensados y la reparación de daños provocados por los asentamientos diferenciales. La disposición de los condensados se encuentra sujeta a un control especial, (SEDESOL, 2010).

## **Sistemas de colección de lixiviados**

Los sistemas de colección de lixiviados de un relleno sanitario requiere una atención continua cuando éste se clausura. Este tipo de sistemas reciben un mantenimiento efectivo lo que asegura su adecuado funcionamiento. Este mantenimiento contempla la limpieza anual de la tubería de conducción de lixiviados, la limpieza de los tanques de almacenamiento y la inspección, limpieza y reparación de bombas. El lixiviado colectado se dispone adecuadamente ya sea en el mismo relleno sanitario, a través de su recirculación, o de otra forma trasladarlo a una planta de tratamiento, para su posterior incorporación a una descarga. Se mantiene un registro de la cantidad de lixiviados removidos. La cantidad de lixiviados varía con las estaciones del año y se monitorea, lo que asegura que efectivamente se ha removido.

El tiempo requerido para la realización de esta actividad es incierta y depende de las

condiciones particulares de cada sitio. El éxito de un sistema de colección de lixiviados o de la efectividad de atenuación natural de un suelo en lo relativo al manejo de los lixiviados se evalúa solamente con un sistema de monitoreo de agua subterránea. Por el contrario, en la construcción de futuros rellenos sanitarios, se espera que los sistemas de monitoreo de aguas subterráneas sean incorporados originalmente en sus propios diseños. El propósito de estos sistemas es la evaluación del funcionamiento y capacidad de las instalaciones, lo que evita la contaminación de los cuerpos de agua subterránea (SEDESOL, 2010).

## **Sistemas de monitoreo de biogás y lixiviados**

Los sistemas de monitoreo de biogás y lixiviados proveen información valiosa acerca del relleno sanitario. En primer lugar, sirven para la detección de problemas y la implantación de acciones correctivas. En este sentido, el daño para el ambiente minimiza así como los costos asociados al mismo. Los datos del monitoreo también se utilizan para el mejoramiento del diseño de futuros rellenos sanitarios.

## **Aguas superficiales y asentamientos**

Frecuentemente los problemas de control del drenaje repercuten en una erosión acelerada de un área en particular dentro del relleno sanitario. Los asentamientos diferenciales de las estructuras de control de drenaje limitan su utilidad y ocasionalmente fallan con fuertes tormentas.

En los casos en donde los problemas de erosión son identificados o el sistema de drenaje necesita reparación, el mantenimiento se lleva a cabo inmediatamente, lo que previene daños severos.

Las fallas en el mantenimiento de la cubierta del relleno, contribuyen en el incremento de las infiltraciones de agua pluvial dentro del relleno y eventualmente propician la generación de cantidades considerables de lixiviados. Esto también agudiza los problemas asociados con la colección y disposición final de lixiviados.

### Usos finales del sitio de relleno sanitario

Los sitios utilizados como relleno sanitario, una vez clausurados se acondicionan y utilizan como parques y recreación, jardines botánicos y áreas de estacionamiento, principalmente. Sin embargo el uso final de estos sitios como áreas verdes es lo más común. Para la construcción de cualquiera de las obras antes mencionadas se estabiliza el sitio por un periodo de 6 a 10 años, lo que minimiza posibles efectos sobre la salud humana.

## 5.8. CAPTURA DE BIOGÁS

En los rellenos sanitarios comienza la liberación de biogás en unas pocas semanas del inicio de operaciones y continúa durante varias décadas. Se ha estimado que hasta un 12 por ciento del total de emisiones mundiales de metano es una contribución de los rellenos sanitarios. Hasta hace poco los rellenos sanitarios estaban situados principalmente en los países desarrollados, actualmente también empiezan a construirse en los países en desarrollo, y se espera que las emisiones de metano por rellenos sanitarios aumenten.

En esta sección se describe la manera en que los rellenos sanitarios se presentan y la forma en que el biogás se genera en el mismo. A continuación se describen los métodos con los que el gas del relleno sanitario se captura y purifica para su

uso como fuente de energía. También se han abordado las cuestiones medioambientales y de seguridad relacionados con la captura y generación de biogás (Abbasi *et al.*, 2012).

### 5.8.1 INTRODUCCIÓN

En la disposición a cielo abierto de residuos sólidos urbanos o lodos (situación común en la mayoría de los países en desarrollo) las condiciones anaerobias se desarrollan fácilmente si el residuo es rico en materia orgánica biodegradable. Incluso cuando enormes pilas de desechos se vierten en tierra firme, las condiciones anaerobias se desarrollan si cualquier fuga de aguas residuales desemboca cerca de la descarga de residuos sólidos, o cuando llueve. De ahí que la disposición no planificada e insalubre de los desechos sólidos urbanos o lodos residuales en el suelo o en el agua es una fuente potencial de metano a pesar de que no siempre genera cantidades significativas. Por otro lado en rellenos sanitarios, en el que los residuos se colocan sistemáticamente en capas intercaladas con capas de tierra, con eventual “sellado” del relleno sanitario con una gruesa capa de tierra compactada, las condiciones anaerobias se desarrollan pronto y la emisión de metano persiste por décadas.

La captura de biogás de los vertederos proporciona un medio para reducir el aporte de los residuos sólidos biodegradables al calentamiento global.

### 5.8.2 CAPTURA Y LIMPIEZA DEL BIOGÁS

Para la captura de biogás del relleno, se instalan tubos de plástico perforados de unos 15 cm de diámetro en el relleno sanitario. Se colocan en la grava y la tubería y la grava son contenidos

en tubos más grandes (ilustración 5.20 e ilustración 5.21). Esto evita que la basura cause taponamiento de las perforaciones. Una red de este tipo de pozos de extracción se instala en todo el relleno sanitario. En un sistema de recolección de gas pasivo (ilustración 5.20) no se utilizan bombas, pero en un sistema de recolección de gas activo sí. La extracción de gas también se hace mediante la perforación de pozos de sondeo en el vertedero y la instalación de tuberías de extracción.

Los pozos de gas individuales se conectan por una serie de tubos que conducen a tuberías más grandes (ilustración 5.21) que entregan el gas a las estaciones de procesamiento y conversión. El sistema completo de tuberías se encuentra bajo un vacío parcial creado por sopladores o ventiladores en la estación de procesamiento, haciendo que el gas del relleno sanitario migre hacia los pozos, (Abbasi *et al.*, 2012).

Una vez que los sopladores o ventiladores suministran el gas a un punto central, este se procesa o convierte en otra forma de energía.

Antes de su uso, el gas se eliminan las partículas y condensados que se encuentran suspendidos en la corriente de gas. Después de la eliminación de la humedad, se hace un tratamiento adicional, incluyendo el uso de refrigerantes o adsorbentes, tales como filtros de carbón activado, para la eliminación de trazas de contaminantes por condensación y adsorción, respectivamente. Los pasos involucrados en el tratamiento del gas de relleno sanitario consisten en lo siguiente:

#### 5.8.2.1 Eliminación del dióxido de carbono

La eliminación de CO<sub>2</sub> aumenta la energía del biogás. También proporciona una calidad de gas constante con respecto al valor energético. Cuando el gas se utiliza como combustible para el transporte, la consistencia de la calidad del gas es de particular importancia para el logro de bajas emisiones de óxido de nitrógeno.

En la actualidad, cuatro métodos diferentes se utilizan comercialmente para eliminar el CO<sub>2</sub> del biogás o bien para que sea utilizable como combustible para vehículos o que sea adecuado

Ilustración 5.20 Un sistema pasivo de recolección de gas en un relleno sanitario (adoptado de USEPA 1996)

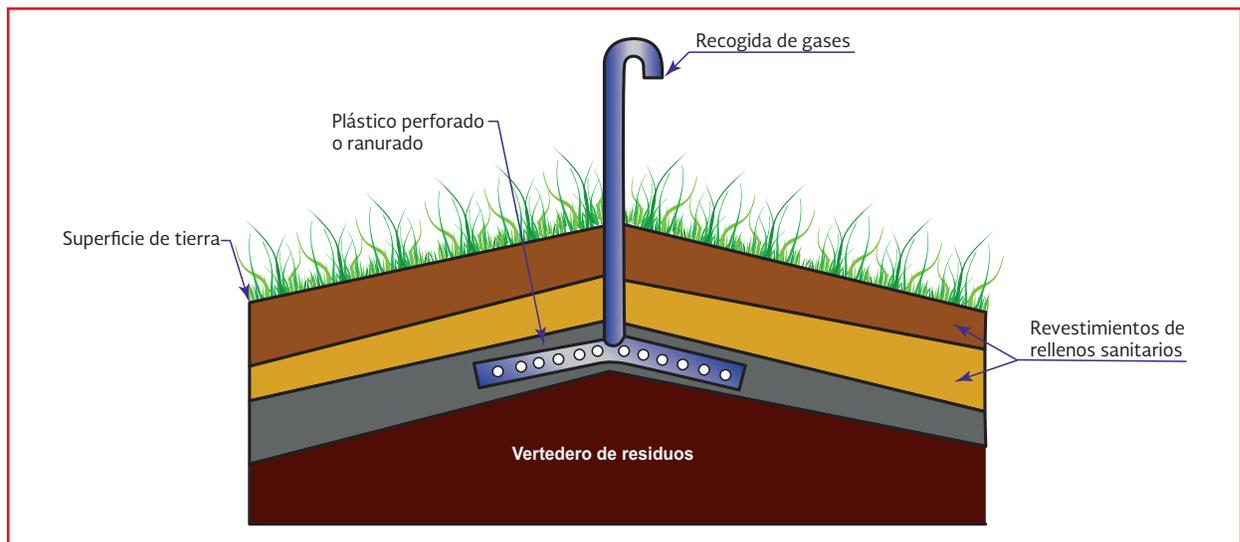
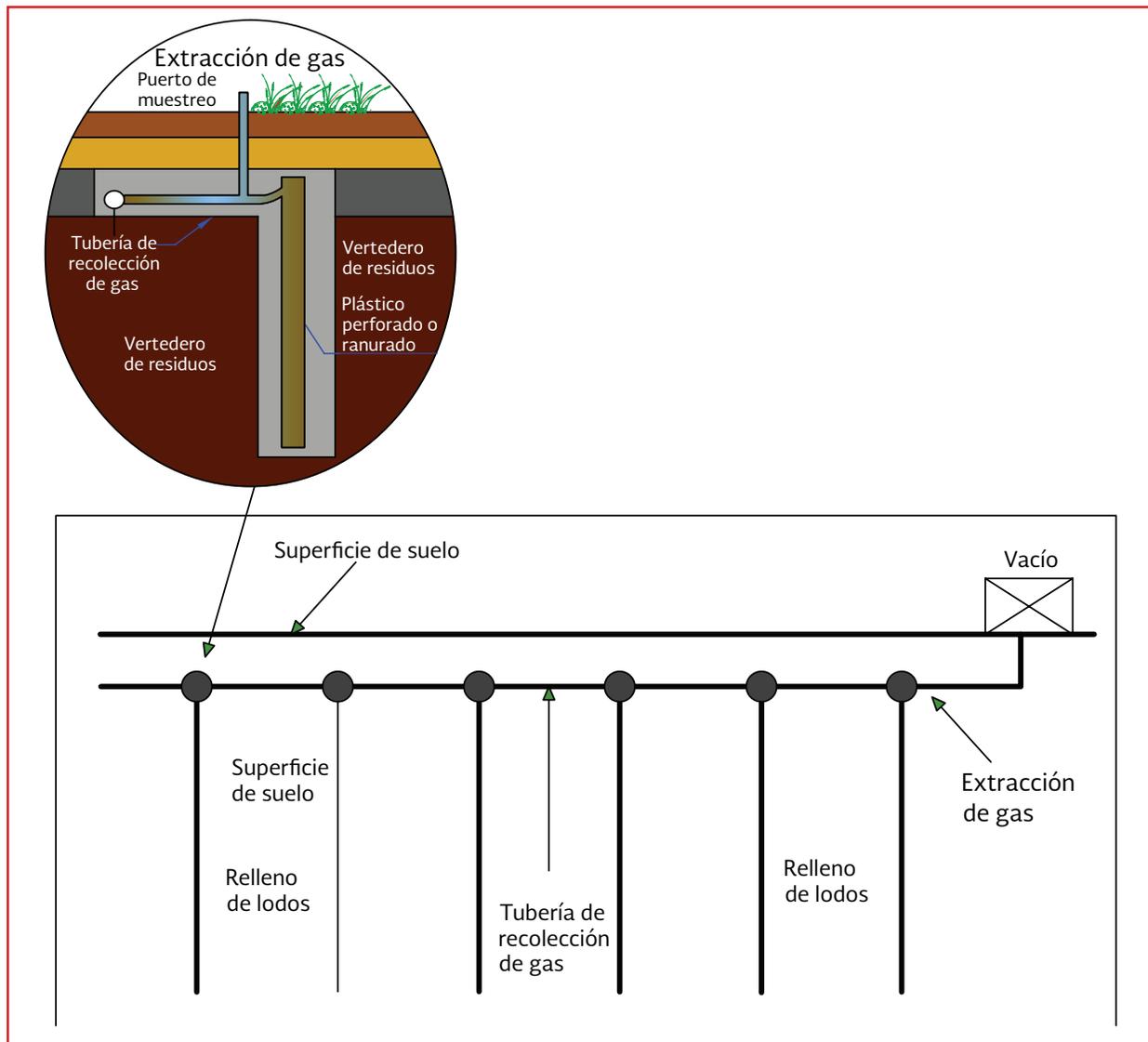


Ilustración 5.21 Recuperación de biogás de un relleno sanitario por un sistema de recolección de gas "activo" (adoptado de USEPA 2011)



para la inyección a la red de gas natural. Estos métodos son los siguientes:

- Absorción en agua
- Absorción por disolventes tales como Selexol (una formulación de polietilenglicol)
- Tamices moleculares
- Separación por membranas

El lavado con agua se utiliza para la eliminación del biogás  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  ya que estos gases son más

solubles en agua que el metano. Normalmente, el biogás es presurizado y alimentado por la parte inferior de una columna empacada, mientras que el agua se envía hacia abajo desde la parte superior. Por lo tanto el proceso de absorción es operado en contracorriente (ilustración 5.22). El agua de lavado también se utiliza para la eliminación selectiva de  $\text{H}_2\text{S}$ , ya que el  $\text{H}_2\text{S}$  es más soluble en agua que el dióxido de carbono.

El agua de baja calidad, como la que proviene de las plantas de tratamiento de aguas residuales,

se utiliza para el lavado de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$ . Si se utiliza agua más limpia, se regenera y recircula de nuevo a la columna de absorción.

El lavado con polietilenglicol se basa en el mismo mecanismo del lavado con agua, como un proceso de absorción física porque tanto  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  son más solubles que el metano en el disolvente. La principal diferencia entre el agua y los disolventes es que el  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  son más solubles en el segundo, lo que resulta en una menor demanda de disolvente y la reducción de bombeo. Además, el agua y los hidrocarburos halogenados (contaminantes en biogás de rellenos sanitarios) también se eliminan durante el desplazamiento de biogás con disolventes como Selexol. Dicho lavado se diseña con recirculación.

En procesos basados en tamices moleculares se utilizan materiales adsorbentes especiales, tales como zeolitas y carbón activado que preferentemente adsorben las especies contaminantes del gas a alta presión.

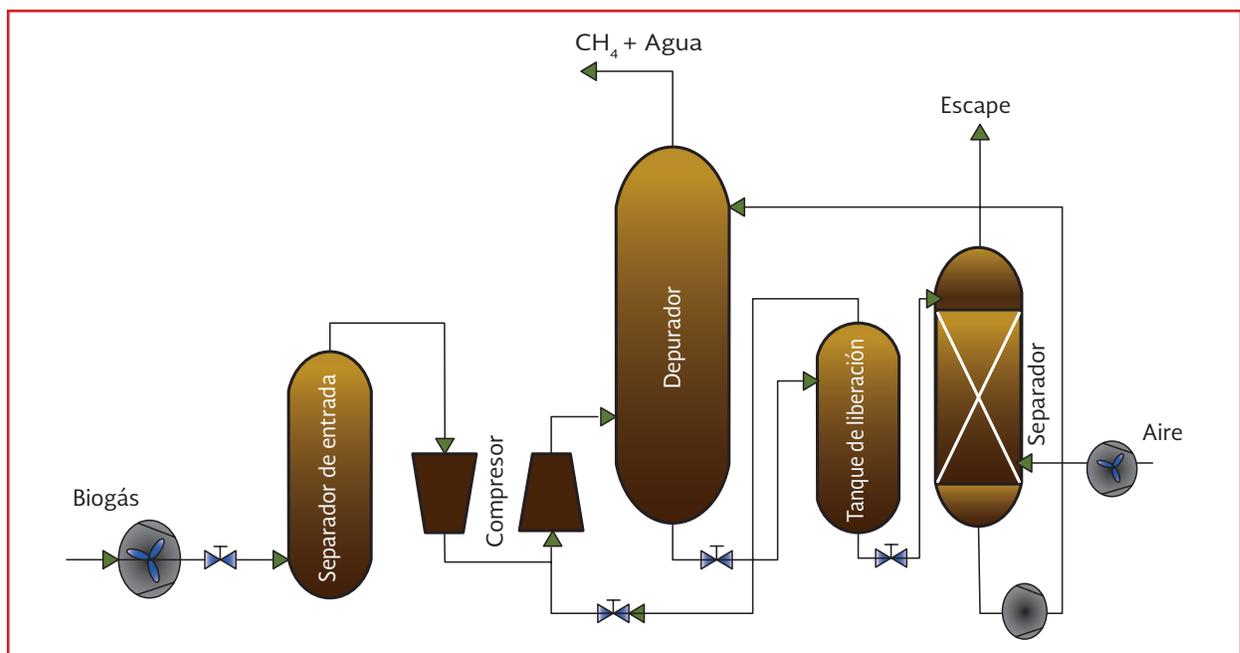
Posteriormente sigue un proceso de baja presión para la recuperación del material adsorbente, ilustración 5.23 (Abbasi *et al.*, 2012).

La separación con membrana se basa en el hecho de que cuando el gas crudo se transporta a través de una membrana delgada algunos componentes pasan a través de la membrana mientras que otros se conservan o retienen. El grado de separación es una función directa de la solubilidad química del componente de destino en la membrana. Las membranas sólidas se construyen como módulos de fibra hueca u otras estructuras que brindan una gran superficie por unidad de volumen y por lo tanto son unidades muy compactas (ilustración 5.24). Presiones de operación típicas se encuentran en el intervalo de 25-40 bares.

#### 5.8.2.2 Eliminación de oxígeno y nitrógeno

El aire se atrapa por el biogás, incrementando su contenido de  $\text{O}_2$  y  $\text{N}_2$ . Esto ocurre muy a menudo en los rellenos sanitarios donde el gas es recogido a través de tubos permeables mediante

Ilustración 5.22 Diagrama de flujo de un sistema de lavado con agua para remoción de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  (adoptado de Kruger *et al.* 2010)



la aplicación de una ligera presión. Muy bajas concentraciones de oxígeno no representan un problema, pero las concentraciones más altas conllevan riesgos de explosión.

El oxígeno y el nitrógeno se eliminan mediante membranas o baja temperatura, pero es caro. La prevención de la introducción de aire, mediante el control cuidadoso de la concentración de oxígeno es la ruta más económica y confiable para mantener estos gases alejados de la contaminación postlimpieza (Abbasi *et al.*, 2012).

### 5.8.2.3 Eliminación de sulfuro de hidrógeno

Dependiendo de la naturaleza de la alimentación, concentraciones variables de sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) están presentes en el biogás. El  $H_2S$  se elimina lo que evita la corrosión en los compresores, tanques de almacenamiento de gas y motores. El  $H_2S$  reacciona con la mayoría de los metales; la reactividad se refuerza por la concentración y la presión, la presencia de agua y temperaturas elevadas. Debido a los problemas potenciales que causa el sulfuro de hidrógeno, lo mejor es eliminarlo de manera temprana en el proceso de tratamiento del biogás. Dos de los métodos más utilizados para la eliminación de  $H_2S$  son internos, durante el proceso de la digestión: (1) la dosificación de aire / oxígeno al digestor de biogás y (2) dosificación de una lechada de cloruro de hierro al digestor. Los métodos comerciales más comunes para la eliminación de sulfuro de hidrógeno son los siguientes:

- Aire / dosificación de oxígeno para digestores de biogás
- Dosificación de cloruro de hierro a la mezcla del digestor

- Esponja de hierro
- Gránulos de óxido de hierro
- Carbón activado
- Depuración con agua
- Depuración con NaOH
- Recuperación y extracción de aire
- Eliminación biológica sobre un lecho de filtración: (biofiltro)

Estos procesos, excepto el último, son similares a los descritos en las secciones anteriores. En cuanto a los biofiltros, estos se emplean para la eliminación del  $H_2S$  del biogás, debido a que en estos sistemas el uso de químicos es limitado (ilustración 5.25). Esto los hace más económicos y amigables con el medio ambiente, a comparación de otras opciones.

El uso de especies bacterianas quimiotróficas de género *Thiobacillus* se encuentra bien establecido en los biofiltros. Estas bacterias purifican el  $H_2S$  aerobia, así como anaerobia. La mayoría de thiobacterias son autótrofas, consumen el  $CO_2$  y toman energía química de la oxidación de compuestos inorgánicos reducidos tales como sulfuro de hidrógeno. Estos procesos generan  $SO_4^{-2}$  y  $S^0$  como productos de desecho. Por otro lado, algunas thiobacteria (es decir, *Thiobacillus Novellus*, *Thiothrix nivea*) que crece ya sea heterótrofa o autotróficamente, tienen la capacidad de utilización de material orgánico disponible como fuente de carbono. El biogás, que contiene más de 30 por ciento de  $CO_2$ , es una buena fuente de carbono inorgánico, haciéndolo adecuado para bacterias autótrofas. Bacterias fototróficas anaerobias (*Cholorobium Limicola*) se han explorado para la oxidación de  $H_2S$  en presencia de luz y  $CO_2$ , pero no existe todavía ninguna aplicación comercial conocida basada en su uso (Abbasi *et al.*, 2012).

Ilustración 5.23 Diagrama de flujo de un sistema basado en tamices moleculares (adaptados de Kruger et al. 2010)

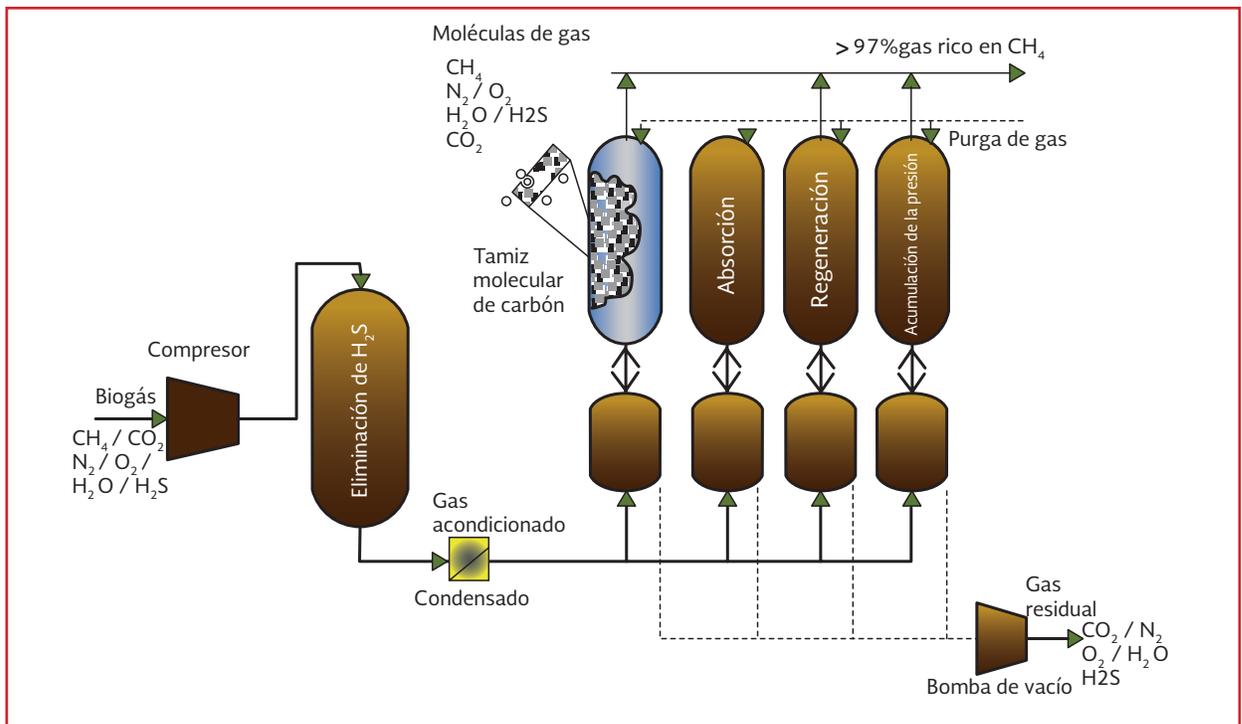
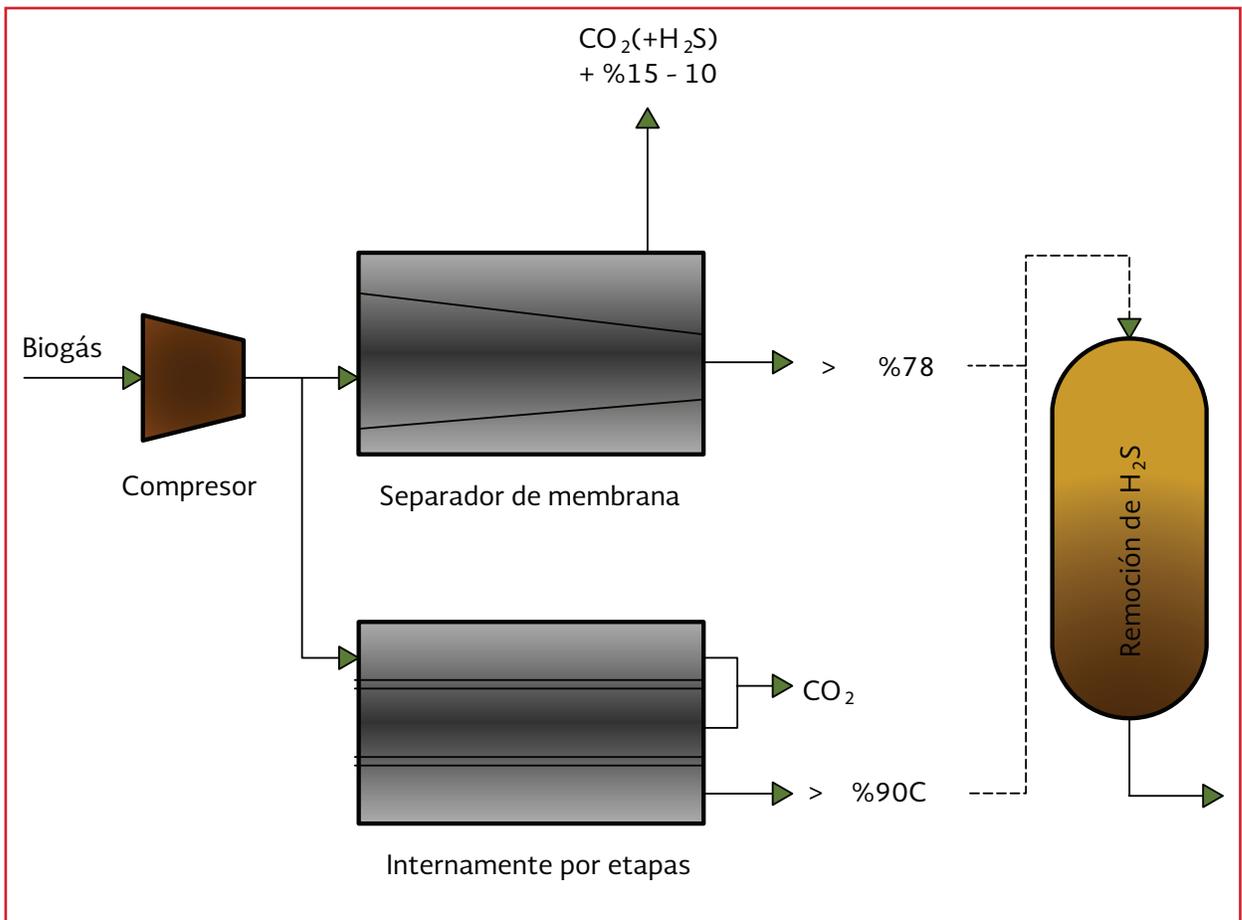


Ilustración 5.24 Un proceso típico de purificación de biogás con membranas (adoptado de Kruger et al. 2010)



#### 5.8.2.4 Eliminación de hidrocarburos halogenados

Hidrocarburos superiores, así como hidrocarburos halogenados, particularmente clorofilas y compuestos fluorados, se producen en biogás. Estos causan corrosión en los motores de cogeneración, en la cámara de combustión, en bujías de encendido, válvulas, culatas, etc. Por lo tanto su eliminación se convierte en una parte esencial del tratamiento del biogás.

Se eliminan mediante intercambiadores de tubos presurizados llenos de carbón activado. Las moléculas pequeñas como  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  y  $\text{O}_2$  atraviesan el empaque, mientras que las moléculas más grandes son adsorbidas. El tamaño de los intercambiadores se diseña para la purificación del gas durante un período de más de 10 horas. Por lo general hay dos unidades

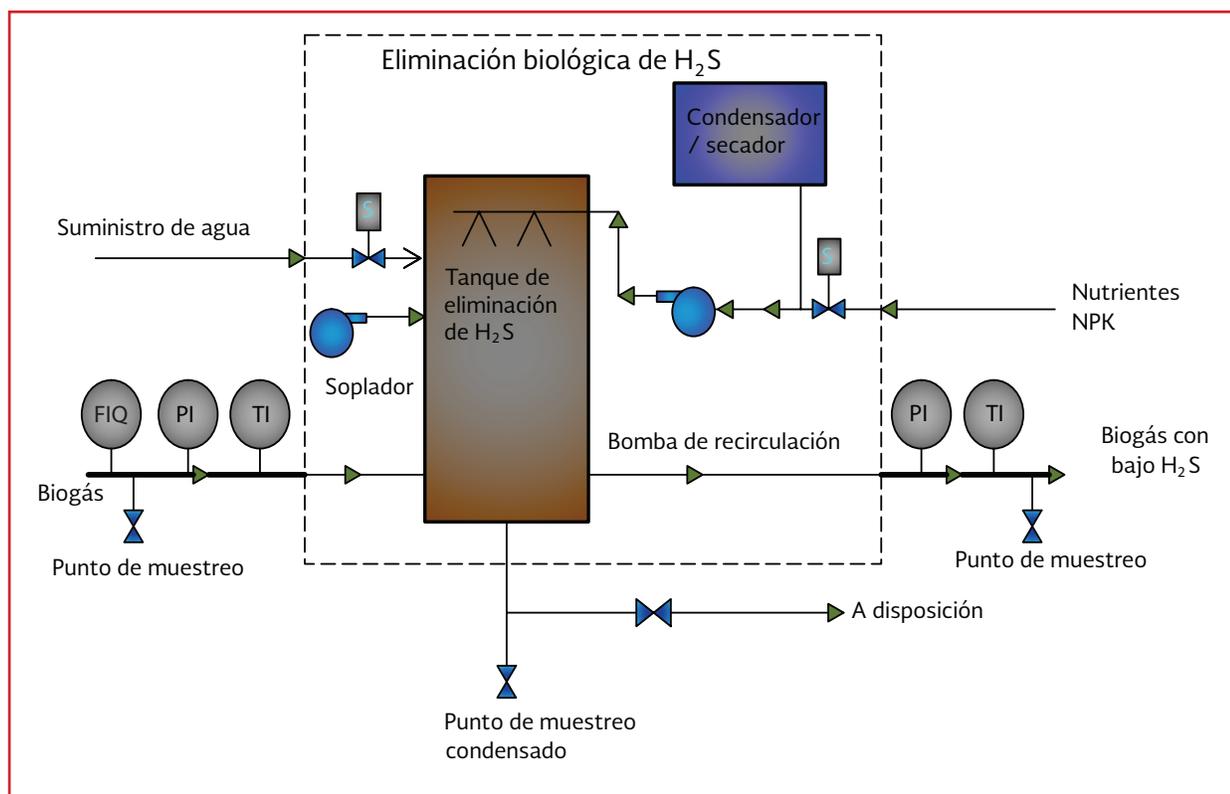
paralelas: una trata el gas mientras que la otra se utiliza en la desorción. La regeneración se lleva a cabo calentando el carbón activado a  $200\text{ }^\circ\text{C}$ , una temperatura a la que todos los compuestos adsorbidos se evaporan y se eliminan mediante un flujo de gas inerte (Abbasi, et al., 2012).

#### 5.8.2.5 Eliminación de siloxanos

Los compuestos orgánicos de silicio se encuentran ocasionalmente presente en el biogás y causan graves daños a los motores de cogeneración. Durante la incineración se oxidan a óxido de silicio que se deposita en las bujías, válvulas y culatas causando abrasión en las superficies y graves daños.

Los siloxanos se separan del gas por medio de absorción en una mezcla líquida de hidrocarburos o por adsorción sobre carbón activado.

Ilustración 5.25 Un sistema típico de biofiltro para la eliminación de  $\text{H}_2\text{S}$  (adoptado de Soroushian et al. 2006)



## Riesgos asociados con rellenos sanitarios

Poco después de que un relleno sanitario se clausura, la digestión anaerobia continua en su interior. Dentro de pocos meses el biogás comienza a formarse y el metano se desplaza dentro de los residuos del relleno, junto con el CO<sub>2</sub>, el H<sub>2</sub>S, mercaptanos y otros compuestos orgánicos volátiles (COV). En la ilustración 5.26 se muestran las vías por las que se mueve el biogás.

Los gases de relleno sanitario representan un peligro de inflamabilidad y toxicidad. Los rellenos sanitarios también plantean el riesgo de estallidos repentinos y la contaminación debido a los lixiviados.

### Inflamabilidad

El biogás es muy inflamable; por lo tanto, los rellenos sanitarios suponen un riesgo de incendio y explosión a las personas que los supervisan, así como otras personas que habitan cerca.

### Toxicidad

El biogás contiene compuestos orgánicos volátiles (COV), de los cuales varios son tóxicos (Tabla 5.14). También contiene otros compuestos orgánicos volátiles, que también son tóxicos, pero sólo en dosis muy altas (tabla 5.15).

En grandes concentraciones (es decir, por encima de un nivel sin efecto adverso y con la exposición persistente, los COV son muy perjudiciales para la salud de los seres humanos expuestos y otros animales. El grado de toxicidad depende de la concentración que se adsorbe en

el cuerpo y la duración de la exposición.

El biogás también da lugar a malos olores que se experimentan hasta cientos de metros de distancia del sitio. Causa sensaciones desagradables y pueden desencadenar reflejos perjudiciales en el cuerpo tales como:

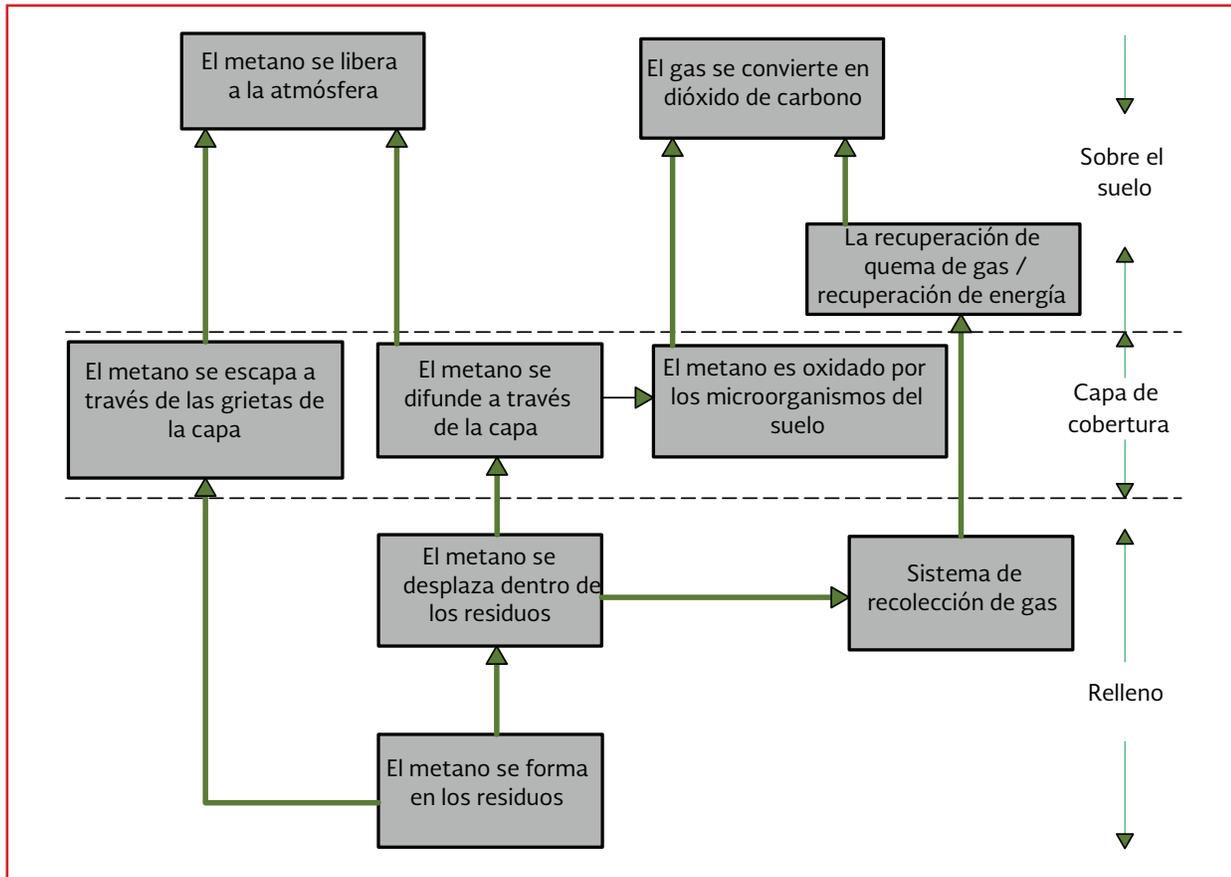
- Náuseas
- Vómitos
- Dolor de cabeza
- Perturbación de estómago o el apetito
- Perturbación de sueño
- Respiración superficial y tos
- Ritmo cardíaco disminuido y constricción de los vasos sanguíneos en la piel y los músculos
- Alteración de las células de los bulbos olfativos del cerebro
- Irritación de ojos, nariz y garganta
- Molestia, enojo y depresión
- Disminución general en el bienestar y el disfrute

Aunque los olores no causen incomodidad, indican que gases inodoros nocivos pueden estar presentes. Los ataques de asma se generan por condiciones olorosas, como el asma bronquial. Los olores también son responsables de la exacerbación de una serie de problemas médicos preexistentes (Abbasi *et al.*, 2012).

#### 5.8.2.6 Reducción de los efectos a la salud por gases de relleno sanitario

La quema de gas de relleno es forma para la destrucción de compuestos orgánicos volátiles, pero conduce a la formación de dioxinas, que son más tóxicas que cualquiera de los COV enumerados en la Tabla 5.14 y la Tabla 5.15, en la llamarada o flama. Los condensados de gas de relleno sanitario también están altamente

Ilustración 5.26 Vías por las que el metano se libera de rellenos sanitarios



contaminados (Tabla 5.16) y plantean problemas de eliminación.

De lo anterior se puede observar que los rellenos sanitarios quizás son menos nocivos para el medio ambiente que los tiraderos de desechos sólidos a cielo abierto. Pero ellos no son en absoluto una solución ideal para la eliminación de los desechos sólidos. Por otra parte, hasta un 60% del metano generado por cualquier vertido puede ser capturado, el resto 40-50 por ciento se escapa a la atmósfera. Por lo tanto los rellenos sanitarios contribuyen al calentamiento global antropogénico. (Abbasi et al., 2012)

### 5.8.2.7 Riesgo de contaminación de lixiviados

El lixiviado se forma cuando el agua pasa a través de los residuos en las celdas del relleno sanitario. El agua proviene de la lluvia, el escurrimiento, o de los propios residuos. Como el agua se desplaza a través del relleno sanitario, muchos compuestos orgánicos e inorgánicos forman el lixiviado, que finalmente llega a la base del vertedero y se acumula.

Los rellenos sanitarios que hayan sido recubiertos adecuadamente con membranas, los lixiviados no se filtran a menos que el recubrimiento se rasgue.

Los siguientes factores afectan a la composición de los lixiviados del relleno sanitario:

Tabla 5.14 COV potencialmente tóxicos en el biogás (adoptados de Sullivan *et al.* 2001)

Compuesto	Nivel sin efecto adverso observado (NOAEL)	Posibles efectos tóxicos
Benceno	32 mg m <sup>-3</sup>	Reducción del peso fetal; formación de huesos retardada
Tetracloroetileno	2 000 mg m <sup>-3</sup>	Embrioletalidad; fetotoxicidad
Tricloroetileno	0.2 mg kg <sup>-1</sup>	Defectos cardíacos; osificación retardada; efectos testiculares masculinos; reducción de la fertilidad masculina
Cloruro de vinilo	130 mg m <sup>-3</sup>	
1,3-butadieno	88 mg m <sup>-3</sup>	Reducción del peso fetal
Disulfuro de carbono	-	Malformaciones
Cloroformo	147 mg m <sup>-3a</sup>	Reducción del peso fetal; osificación retardada
1,2 dicloroetileno	0.025 mg kg <sup>-1a</sup>	Defectos cardíacos
Etilbenceno	430 mg m <sup>-3a</sup>	Embrioletales; fetotóxicos; teratogénico
Formaldehído	12 mg m <sup>-3</sup>	Reducción del peso fetal
Cloruro de metilo	525 mg m <sup>-3</sup>	Defectos cardíacos
Alfa-terpineno	30 mg kg <sup>-1</sup>	Osificación retardada; anomalías esqueléticas
Diclorobencenos	1 200 mg m <sup>-3</sup>	Reducción del peso fetal; variantes esqueléticas
2-etil-1-hexanol	130 mg kg <sup>-1</sup>	Embrioletales; fetotóxicos
Sulfuro de hidrógeno	140 mg m <sup>-3</sup>	Náuseas; dolores de cabeza
Metil etil cetona	1 500 mg m <sup>-3</sup>	Fetotóxicos; teratogénico
Tolueno	375 mg m <sup>-3</sup>	Reducción del peso fetal; osificación retardada; costillas adicionales
Xilenos	150 mg m <sup>-3a</sup>	Osificación retardada

<sup>a</sup> Nivel más bajo observando efectos adversos (LOAEL)

Tabla 5.15 Otros compuestos orgánicos volátiles en el biogás, tóxicos, pero en dosis mucho más altas (adoptados de Sullivan *et al.* 2001)

Compuesto	Nivel sin efecto adverso observado (NOAEL)	Posibles efectos tóxicos
Acetona	5 200 mg m <sup>-3</sup>	Reducción del peso fetal
2-Butanol	10 000 mg m <sup>-3</sup>	Reducción del peso fetal
Tetracloruro de carbono	1 923 mg m <sup>-3</sup>	Reducción del peso fetal
Etanol	40 mg kg <sup>-1</sup>	Adversos efectos sobre la reproducción humana
Limoneno	1 000 mg kg <sup>-1a</sup>	fetotóxicos; anomalías de las costillas
1-propanol	17 500 mg m <sup>-3</sup>	Reducción del peso fetal; defectos esqueléticos; reducción de la fertilidad masculina
Estireno	1 147 mg kg <sup>-1</sup>	Efectos maternos, pero sin efectos embriofetal
Acetato de vinilo	700 mg m <sup>-3</sup>	Reducción del peso fetal; osificación retardada

<sup>a</sup> Nivel más bajo observando efectos adversos (LOAEL)

Tabla 5.16 Las características típicas de condensados de gas de relleno sanitario (adoptados de Knox 1990)

Componente (parámetro)	Planta / Flama		Gas en drenajes de campo	
	Típico valores superiores	Típico valores más bajos	Típico valores superiores	Típico valores más bajos
pH	7.6	4.0	3.9	3.1
Conductividad	5700	76	340	200
Cloruro	73	1	4	<1
N amoniacal	850	<1	15	3
COT	4 400	222	9 300	720
DQO	14 000	804	4 600	4 600
DBO	8 800	446	2 900	2 900
Fenoles	33	3	17	4
Ácidos volátiles totales	4 021	141	4 360	730

Todos los valores en mg L<sup>-1</sup>, excepto pH (sin dimensiones) y conductividad (µS cm<sup>-1</sup>)

- El tipo de material de desecho puesto en el relleno sanitario
- Condiciones del relleno sanitario, incluyendo el pH, la temperatura, la humedad y edad
- Calidad de la escorrentía que ingresa en el relleno sanitario

Dependiendo de las características del relleno y los residuos contenidos, el lixiviado es relativamente inofensivo o extremadamente tóxico. Generalmente, los lixiviados tienen una alta demanda de bioquímica de oxígeno (DBO) y altas concentraciones de carbono orgánico, nitrógeno, cloruro, hierro, manganeso, y fenoles. Muchos otros productos químicos se encuentran presentes, incluyendo los pesticidas, disolventes, y otros metales pesados.

Cuanto mayor sea la concentración de contaminantes en el lixiviado mayor es su potencial de contaminación de las aguas subterráneas.

Si el nivel freático es profundo, el lixiviado queda parcialmente filtrado en el curso de percolación

a través del suelo y la contaminación es menor. Si el nivel freático es alto (cerca de la superficie del suelo), los contaminantes entran en el agua subterránea directamente, sin filtración por el suelo, causando una grave contaminación.

La permeabilidad de la tierra debajo del relleno afecta a la velocidad de escape de los lixiviados. La arena tiene grandes espacios de poros, lo que permite un mayor flujo de agua subterránea. La arcilla se aglomera y evita el movimiento de las aguas subterráneas; también es más eficaz en el filtrado de contaminantes (Abbasi et al., 2012).

### 5.8.3 MÉTODOS DE ELIMINACIÓN DE LIXIVIADOS

#### 5.8.3.1 Recolección de lixiviados

En los rellenos sanitarios modernos los lixiviados se recolectan por una serie de tuberías instaladas en la base del relleno. El lixiviado se filtra a través de los residuos y en las tuberías donde se recoge. El lixiviado se recircula o bombea fuera del relleno sanitario y se coloca en las zonas de almacenamiento o directamente en la planta de

tratamiento de lixiviados.

La recirculación mejora la estabilización del relleno sanitario ya que la tasa de producción de gas se incrementa debido a la creciente humedad de los residuos. También proporciona un medio de eliminación de lixiviados y reduce la tasa de contaminación de las aguas subterráneas si se utiliza un vertedero como el único método de eliminación. También aumenta la toxicidad de los lixiviados.

El riesgo de contaminación de las aguas subterráneas es bajo, si el relleno tiene un doble material de revestimiento, por lo que la recirculación se practica cada vez más en algunos rellenos sanitarios.

#### 5.8.3.2 Los rellenos sanitarios como bioreactores

Los esfuerzos para mejorar el desempeño de los rellenos sanitarios han llevado a la exploración de los rellenos sanitarios como bioreactores. En este enfoque se buscan que los rellenos sanitarios sean operados como si fueran bioreactores totalmente controlables. La degradación microbiana se promueve por la adición de ciertos elementos (nutrientes, oxígeno o humedad) y el control de otros elementos (tales como la temperatura o el pH). Existe una disposición para la recirculación de los lixiviados (ilustración 5.27), de modo que los microorganismos, nutrientes y agua se recirculan. Esto aumenta el contenido de humedad en los residuos del relleno y promueve la degradación microbiana debido a una mejor disponibilidad de nutrientes y de una acción microbiana más rápida. Si la recirculación de lixiviados por sí sola no eleva el contenido de humedad hasta niveles en los que se mejora el

crecimiento microbiano (40 por ciento en peso, como mínimo) se agrega agua a los residuos.

Las disposiciones y controles aumentan el costo de la gestión de residuos y no siempre son asequibles (Abbasi *et al.*, 2012). No obstante los rellenos sanitarios utilizados como bioreactores pueden tener las siguientes ventajas:

1. En un relleno sanitario con recirculación de lixiviados (ilustración 5.27), existe una degradación de los desechos mucho más rápida, debido al flujo continuo de los lixiviados través de los mismos. La mayor velocidad y grado de degradación microbiana en el relleno sanitario como bioreactor, produce una mayor transformación de la materia orgánica en agua y gases (incluyendo metano y dióxido de carbono). Una vez que no se produce una mayor degradación de los residuos, se dice que el desecho ha estabilizado. En un relleno sanitario, la estabilización puede llegar a demorarse hasta 100 años, según algunas estimaciones. En un relleno sanitario como bioreactor, la estabilización ocurre en 10 años. Debido a que la liberación del gas y la reducción y asentamiento de los residuos ocurre rápidamente, existe espacio disponible dentro del relleno para llenarse con más residuos sólidos. La oportunidad de añadir más desechos extiende la vida útil del relleno sanitario y retrasa la necesidad de construcción nuevos rellenos
2. El mayor nivel de degradación en un relleno sanitario como bioreactor también acelera la producción de gas y aumenta la cantidad producida. Esto hace que sea económicamente factible el uso

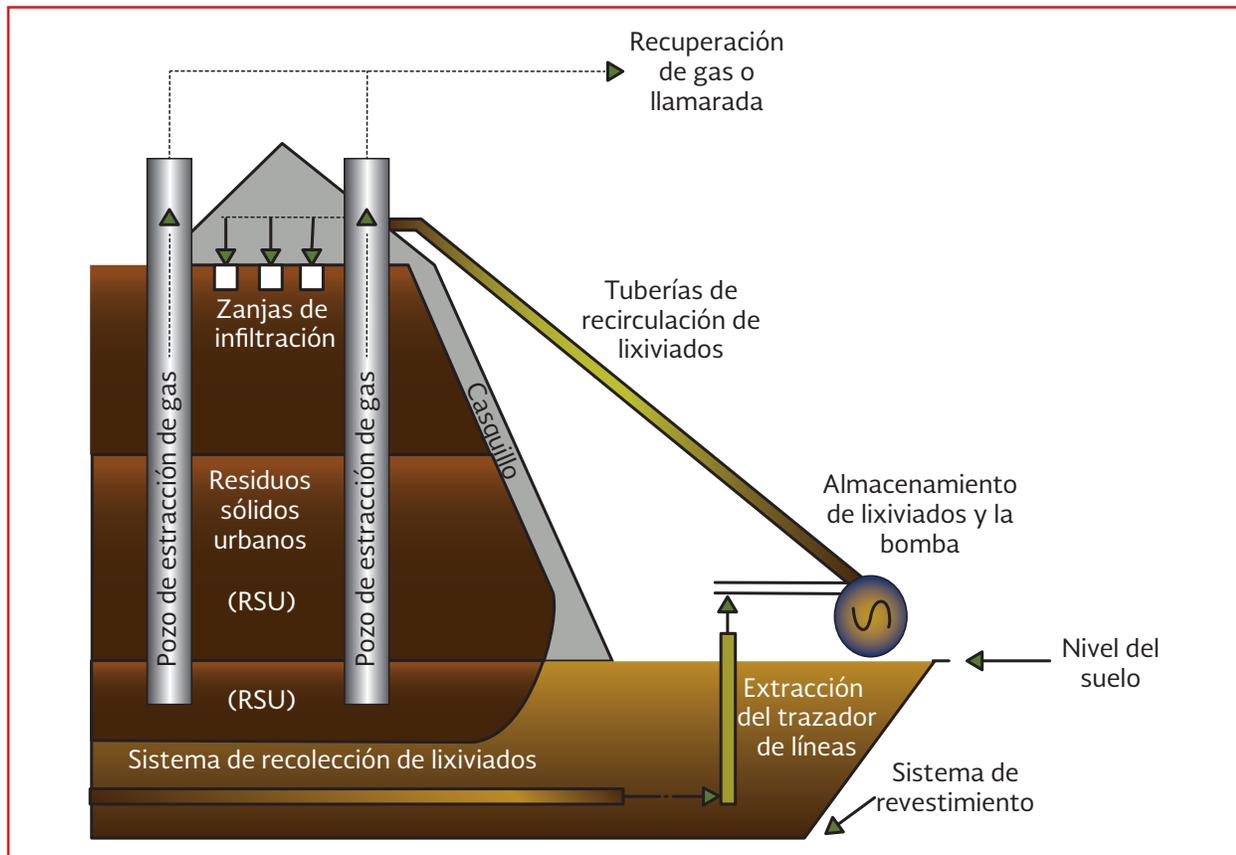
del metano generado dentro del relleno para la calefacción o la generación de electricidad. La captura y uso del metano reduce el impacto negativo que ocurre debido a la emisión

3. La recirculación de lixiviados a través de los desechos, remedia parcialmente o reduce la toxicidad del lixiviado. Cada vez que el lixiviado pasa a través de los residuos, los compuestos son transformados por los microorganismos dentro del relleno, y su toxicidad se reduce. Una vez estabilizado, el relleno sanitario representa menor riesgo para el medio ambiente y la comunidad

- Un relleno sanitario bien localizado y diseñado, puede convertirse en un tiradero a cielo abierto, si no se opera adecuadamente. Los procedimientos de operación para un relleno sanitario varían dependiendo de diferentes factores, entre los que se citan el tipo de relleno, el clima, las cantidades, tipos de residuos por recibir, la regulación a nivel local, estatal etc
- Los principales tipos de rellenos sanitarios de lodos son: área de relleno de los lodos, codisposición y las trincheras o zanjas
- La construcción y operación del relleno sanitario requiere de equipo especializado cuya selección se realiza tomando en cuenta el método de operación y las

#### 5.8.4 COSAS PARA RECORDAR

Ilustración 5.27 Esquema de un relleno sanitario como biorreactor y con la recirculación de lixiviados (adoptado de USEPA 1995)



- condiciones de trabajo para el adecuado movimiento, compactación de los residuos sólidos y material de cubierta. Un relleno sanitario con operación mecánica, necesita máquinas para la preparación de terreno (desmonte y despalme); la compactación y manejo de los residuos; la excavación, el transporte y la aplicación de cubierta diaria; el esparcimiento y la compactación de la cubierta final; y los trabajos de limpieza general y mantenimiento de los caminos interiores
- El equipo para la operación de un relleno sanitario manual se reduce a una serie de herramientas o utensilios de albañilería. Debido al tipo de actividades que se llevan a cabo en el relleno sanitario y al contacto directo con los residuos sólidos, los trabajadores se exponen a accidentes y enfermedades infectocontagiosas. Por lo tanto, es importante proteger la seguridad y la salud de los trabajadores dotándolos como mínimo de guantes, botas, gorra o sombrero, mascarillas contra el polvo y por lo menos de dos uniformes al año
  - Para el mantenimiento de la seguridad e higiene en el relleno sanitario, se recomienda: la utilización de overoles, guantes de carnaza y botas para todo el personal involucrado con las operaciones en el frente de trabajo; la implementación de un programa de capacitación para el conocimiento de los posibles riesgos dentro del relleno sanitario; el establecimiento de un programa de vacunación y chequeo médico para los operarios del sistema e instalar el señalamiento de seguridad e higiene
  - Un mantenimiento adecuado del relleno sanitario es importante para evitar daños graves al medio ambiente y con ello el rechazo a la obra por parte de la población. Incumplimiento de los planes y programas de trabajo, fallas en el equipo o en las instalaciones y con ello el encarecimiento de la obra
  - Los sistemas de control son empleados para la identificación de los posibles impactos del relleno sanitario hacia el ambiente
  - La clausura es el procedimiento por el cual el relleno se cierra y ya no se dispone más lodo dentro del mismo
  - En los rellenos sanitarios la liberación de biogás comienza a unas pocas semanas del inicio de su operación y continua haciéndolo durante varias décadas. Se ha estimado que hasta un 12 por ciento del total de emisiones mundiales de metano es una contribución de los rellenos sanitarios
  - Los lixiviados se recogen de la parte inferior de los rellenos sanitarios modernos por una serie de tuberías instaladas en la base del relleno. El lixiviado se filtra a través de los residuos y en las tuberías donde se recoge. El lixiviado recircula o se bombea fuera del relleno sanitario y se coloca en las zonas de almacenamiento o directamente en la planta de tratamiento de lixiviados
  - La conversión del relleno en un bioreactor es una forma adecuada y segura de operar un relleno de lodos



## CONCLUSIONES

Este manual es una guía general para la operación y mantenimiento de los principales sistemas de tratamiento de lodos residuales generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales con énfasis en los sistemas utilizados en las plantas de tratamiento en México.

Se presentan recomendaciones para la operación y el mantenimiento de los sistemas. Estas se adaptan a las necesidades de cada planta en particular.

El manual centra su atención en el conocimiento básico que deben tener los encargados de la operación y mantenimiento de un sistema de tratamiento de lodos considerando los aspectos generales, el acondicionamiento, el espesamiento y la deshidratación de lodos, que son operaciones utilizadas para la disminución de la cantidad de agua en el lodo.

Presenta los aspectos más importantes en la operación y mantenimiento de los sistemas de estabilización aerobia y anaerobia de lodos. Se muestra la opción de uso del biogás producido en la estabilización anaerobia como fuente de energía.

Como sistema de disposición final de lodos se describe la operación y el mantenimiento de los rellenos de lodos. Estos sistemas pueden convertirse en fuente de energía cuando se aprovecha el biogás generado.

En conclusión, un sistema de tratamiento y disposición de lodos con buena operación y mantenimiento contribuye a un mejor desempeño del sistema del tratamiento de aguas residuales y genera biosólidos con características adecuadas para su aprovechamiento o disposición final en cumplimiento con la normatividad y especificaciones aplicables en el país.



# ANEXO

## ANEXO I

### ACONDICIONAMIENTO DE LODOS

#### 1.-OBJETIVO

Seleccionar el acondicionador ya sea una sal inorgánica o polímero que permita desestabilizar y flocular las partículas del lodo con el fin de disminuir su resistencia a la entrega del agua ya sea en la etapa de espesamiento o de deshidratación.

#### 2.-EQUIPO

Aparato para la prueba de Jarras

#### 3.-MATERIALES

- 6 vasos de precipitado de 1 L
- Probetas graduadas o vaso de precipitado de 50, 100 mL.
- Vasos de precipitado de 200 mL.
- Guantes de plástico.
- Cubre bocas

#### 4.-PROCEDIMIENTO

Para seleccionar la dosis de un reactivo químico se realiza el siguiente procedimiento.

##### 4.1.-Determinación de la dosis de coagulante

-Coloque 500 mL de lodo en cada uno de los vasos de precipitado para la prueba de jarras. (6 vasos)

-Prepare en los vasos de precipitado una cantidad variable de coagulante. Se van a usar diferentes dosis por ejemplo entre 100 y 20 mg/L de los diferentes coagulantes. La preparación del reactivo químico se realiza de acuerdo a las indicaciones del fabricante.

- Adicione el coagulante (diferentes dosis) a cada uno de los vasos que contienen el lodo y mezcle rápidamente (100 - 200 rpm) durante 1-2 min.

-Después deje que flocule lentamente (10 - 20 rpm) durante 10 min.

-Observe la formación visual del flóculos

-Cese la agitación y deje que la muestra sedimente durante 5 min.

Continúe con la prueba de filtración al vacío para determinar el coagulante y la dosis que mejore las condiciones de filtración del lodo y también se puede realizar el cálculo de la resistencia específica de lodos.

De esta forma se pueden probar diferentes productos químicos hasta obtener el que proporcione un sobrenadante claro y la mayor concentración de sólidos totales en la torta de lodo, con la menor dosis. También permite seleccionar el reactivo más adecuado para cada caso en particular y comparar el costo de los diferentes reactivos seleccionados.

Para mayores detalles de la prueba se puede consultar el libro "Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. Tratamiento y disposición de lodos" del MAPAS o las referencias que se muestran a continuación.

## **BIBLIOGRAFIA**

Adams, C.E., Ford, D.L., Eckenfelder, W.W. Development of Design and Operational Criteria for Wastewater Treatment. Water Pollution Control. 1980.

Eckenfelder, W.W., Ford, D.L. Experimental Procedure for Process Design. Water Pollution Control. 1970. Cap.6.

ASTM-D2035. "Standard Practice for Coagulation-Flocculation Jar Test of Water", Annual Book of ASTM Standards, Section 11.02. Philadelphia 1991, pp. 705-708.

Benefield, L.D., Jukins, J.F., Weand, B.L. Process Chemistry for Water and Wastewater Treatment. Prentice-Hall Inc. 1982. Cap. 7.

# ANEXO 2

## ESTABILIZACIÓN ANAEROBIA

### Determinación de ácidos orgánicos volátiles en lodos residuales

Las siguientes secciones son una versión del método 5560 C-01 de Standard Methods (APHA et al., 2006).

#### Descripción general

Este método se puede aplicar para controlar la digestión anaerobia y la eliminación biológica de nutrientes. Debido a que el método es empírico, debe llevarse a cabo exactamente como se describe. Se asume que aproximadamente el 70 por ciento de los ácidos volátiles se encontrará en el destilado. La asunción se corrige en el cálculo. Este factor se ha encontrado que varía desde 68 hasta 85 por ciento, dependiendo de la naturaleza de los ácidos y velocidad de destilación.

Este método se puede utilizar para recuperar los ácidos que contienen hasta seis átomos de carbono en el sobrenadante de una muestra de lodos. En este método, se destila una muestra acidificada, y se titula el destilado hasta un punto final con hidróxido de sodio (NaOH).

#### Aplicación

En los digestores anaerobios, el aumento de los ácidos volátiles es uno de los primeros signos de mal rendimiento del digestor. Las causas incluyen:

- La inhibición de las bacterias formadoras de metano (toxicidad o cambio de temperatura)
- Tiempos de retención insuficientes que reducen la capacidad de amortiguamiento del digestor (su capacidad para neutralizar los ácidos volátiles)
- Excesiva carga de sólidos

La concentración de ácidos volátiles suelen compararse con la alcalinidad en la relación entre ácido volátil y la alcalinidad (AV : ALC). La relación AV : ALC es un indicador del progreso de la digestión y el equilibrio entre la fermentación ácida y microorganismos de fermentación de metano. Debido a la necesidad de un equilibrio entre los ácidos volátiles y la alcalinidad; la AV : ALC es un excelente indicador del buen funcionamiento del digestor. Debe realizarse el monitoreo cuidadoso de la tasa de cambio en esta relación ya que indica un problema de operación antes de que ocurra un cambio de pH. La AV : ALC debe estar entre 0,1 y 0,2 para asegurar una adecuada capacidad amortiguadora. Adicionalmente, los ácidos volátiles deben ser inferiores a 500 mg/L en un reactor que opere adecuadamente. Concentraciones alrededor de 100 mg/L son comunes en este tipo de reactores. La caída o disminución de pH del digestor y la inhibición de la producción de metano se producen si la relación excede de 0,8. Proporciones de 0,3 a 0,4 indican condiciones irregulares y la necesidad de

medidas correctivas.

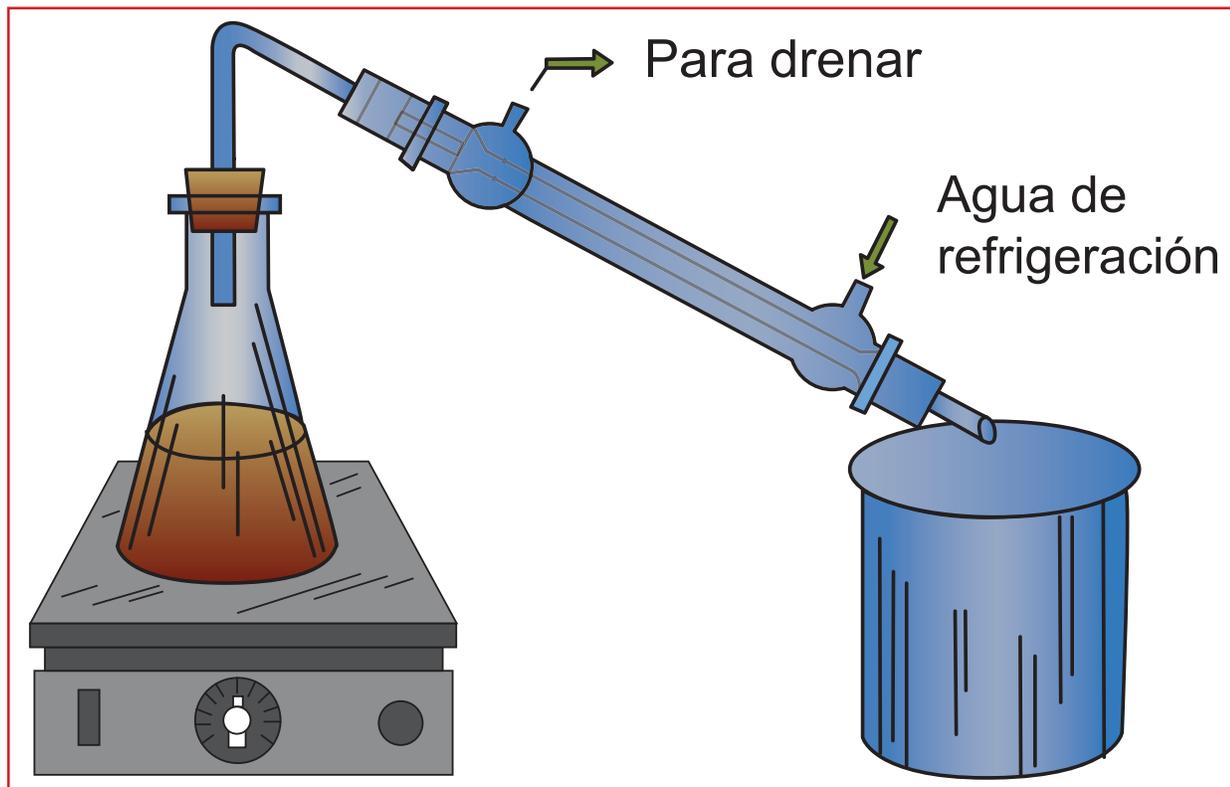
## Interferencias

La recuperación de cada ácido aumenta al aumentar el peso molecular y se relaciona con la velocidad de calentamiento, la presencia de sólidos en los lodos, y el volumen final del destilado. El sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono se liberan durante la destilación y se titulan como un error positivo. Es por esto que se descartan los primeros 15 mL de destilado.

## Aparatos y materiales

- Centrífuga y tubos
- Matraz de destilación, de 1000 mL de capacidad
- Montaje de destilación, que se muestra en la Ilustración 6.1, consta de un tubo adaptador, una columna o condensador, y un elemento de calefacción eléctrico
- Medidor de pH
- Bureta de titulación, mínimo de 10 mL de capacidad
- Vasos de precipitados, capacidad de 250 mL
- Cilindros graduados
- Pipeta, clase A, clase B con punta ancha y serológica
- Perlas de ebullición

Ilustración 6.1 Sistema de destilación. Destilar la muestra una velocidad de aproximadamente  $5 \text{ mL min}^{-1}$ .



## Reactivos

- Ácido sulfúrico (1:1) - Poner aproximadamente 200 mL, de agua desionizada en un matraz aforado de 500 mL. Cuidadosamente añadir 250 mL de ácido sulfúrico concentrado. Agitar y enfriar la solución. Diluir al volumen con agua desionizada. Es importante señalar que se genera mucho calor por esta adición y el ácido se tiene que añadir en pequeñas cantidades
- Solución stock de hidróxido de sodio 1 N. Agregar 4,0 g de hidróxido de sodio en un matraz aforado de 100 mL y diluir al volumen con agua desionizada. Preparar fresca cada 6 meses
- Solución para titulación de hidróxido de sodio, 0,02N estandarizado. Diluir 4.0 mL de solución stock de hidróxido de sodio 1N a 200 mL en un matraz aforado con agua desionizada. Titular 100 mL a un pH de 7.0 con una solución estándar 0.50N de ácido sulfúrico o siga los procedimientos en el Método 2310B (3c) de los métodos estándar (ALPHA *et al.*, 2005). Calcular la normalidad real y utilizarla en el cálculo. Preparar fresca cada semana
- Solución stock de ácido acético ( $2.000 \text{ mg L}^{-1}$ )- Agregar aproximadamente 400 mL de agua desionizada en un matraz volumétrico de 500 mL. Añadir 0.95 mL de ácido acético glacial concentrado. Diluir al volumen con agua desionizada. Preparar fresca al menos cada 6 meses
- Estándar de ácido acético ( $50 \text{ mg L}^{-1}$ ) - Poner 2.5 mL de solución stock de ácido acético en un matraz volumétrico de 100 mL. Diluir al volumen con agua desionizada. Preparar fresca diariamente

## Recolección, preservación y manejo de la muestra.

La muestra se recolecta en un frasco de polietileno de alta densidad de 500 mL sin conservantes. Debe almacenarse a  $<6 \text{ }^{\circ}\text{C}$  y analizarse tan pronto como sea posible.

## Garantía y control de calidad.

Para cada conjunto de 20 muestras o para cada conjunto de análisis diario, se analizará una muestra por duplicado. La diferencia porcentual relativa (DPR) de las dos muestras no deberá ser mayor de 20%. Si DPR es mayor de 20%, se determina la causa de la discrepancia y se vuelve a repetir el análisis de las muestras. La diferencia porcentual relativa se calcula tomando la diferencia entre dos mediciones y dividiendo por el promedio de las dos mediciones.

## Procedimiento

Paso 1 - Centrifugue de 200 mL de cada muestra durante 5 minutos o el volumen que resulte en 100 mL de sobrenadante. (Esto también se puede hacer mientras se destilan algunas muestras, si todas las muestras no se pueden destilar al mismo tiempo)

Paso 2 - Prepare dos estándares de ácido acético. (Un estándar se analiza sin destilar, y el otro se analizará después de destilado. Los resultados serán utilizados en los cálculos finales)

Paso 3 - Encienda el sistema de calentamiento

Paso 4 – Empiece a recircular el agua del condensador

Paso 5 – Coloque 100 mL de blanco, estándar que se va destilar en un matraz de destilación

Paso 6 - Añada 100 mL de agua desionizada y tres perlas de ebullición

Paso 7 - Añada 5 mL de la solución de ácido sulfúrico 1+1, y mezcle bien

Paso 8 - Conecte el matraz al aparato de destilación y destilar a una velocidad de aproximadamente 5 mL/min

Paso 9 - Deseche los primeros 15 mL de destilado y recoga 150 mL de destilado en una probeta graduada de vidrio de 250 mL. No destilar a sequedad

Paso 10 - Transferir el destilado a un vaso de precipitado y se titula a un pH de 8.3 con 0.1N de hidróxido de sodio

### Cálculos

Encontrar la concentración de ácido acético de la siguiente manera:

$$\left( \frac{A * B * 60\,000 \text{ g/equivalente}}{C} \right) = \text{Ácido acético, mg/L} \quad \text{Ecuación 6.1}$$

Dónde:

- A = mL de NaOH
- B = Normalidad del NaOH
- 60 000 = peso equivalente de CH<sub>3</sub>COOH, g / equivalente
- C = Volumen de la muestra original, mL

Calcular el factor de recuperación de la siguiente manera:

$$\left( \frac{A}{B} \right) = \text{Factor de recuperación} = F \quad \text{Ecuación 6.2}$$

Donde:

- A = ácido acético destilado, mg L<sup>-1</sup>  
B = ácido acético no destilado, mg L<sup>-1</sup>

Encontrar la concentración de ácidos volátiles orgánicos (AVO) de la muestra de la siguiente manera:

$$\left(\frac{A * B * 60\ 000}{C * F}\right) = \text{Ácido acético, mg/L} \quad \text{Ecuación 6.3}$$

Donde:

- A = mL de NaOH  
B = Normalidad del NaOH  
C = 100 mL de muestra original  
F = Factor de recuperación

Por ejemplo, dado lo siguiente:

- Volumen del titulante = 12 mL  
La normalidad del titulante = 0.02 N (equiv/L)  
El peso equivalente de CH<sub>3</sub>COOH = 60 000 mg/equiv  
Recuperación aproximada = 0.7 (70%)  
Volumen de la muestra = 100 mL

$$\text{Ácidos volátiles como CH}_3\text{COOH} = \frac{(12\ \text{mL})\left(0.02\frac{\text{equiv}}{\text{L}}\right)\left(60\ 000\frac{\text{mg}}{\text{equiv}}\right)}{(100\ \text{mL})(0.7)}$$

Los ácidos volátiles como CH<sub>3</sub>COOH = 206 mg L<sup>-1</sup>

## Hoja de trabajo

A continuación se muestra la hoja de trabajo para determinación de ácidos volátiles.

## Determinación de Biogás

Para la determinación de la producción específica del biogás en un reactor anaerobio se puede consultar el MAPAS. Libro “Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: procesos anaerobios”.



# ANEXO 3

## ESTABILIZACIÓN AEROBIA

### TASA DE CONSUMO DE OXÍGENO (OUR por sus siglas en inglés)

La siguiente sección comprende y amplía la versión del método 2710B de métodos estándar (APHA et al., 1992).

### DESCRIPCIÓN GENERAL

La prueba de la tasa de consumo de oxígeno (OUR) da como resultado una medida de la tasa de respiración y muestra la actividad de los microorganismos en el proceso de estabilización aerobia. La actividad de los microorganismos está relacionada a la cantidad de oxígeno que consumen. La prueba (OUR) mide cuanto oxígeno consume una muestra de lodos activados en un periodo de tiempo específico. La tasa de respiración relaciona la prueba (OUR) resultado de la concentración de microorganismos en la muestra de lodo activado. Los resultados de la prueba OUR se usan para calcular la tasa de respiración. Otra determinación de la tasa de respiración es la tasa específica de consumo de oxígeno (SOUR, por sus siglas en inglés).

### APLICACIÓN

La prueba OUR se utiliza para detectar los efectos tóxicos en el afluente del agua residual o del lodo residual y demuestra el grado de estabilización del lodo durante el proceso de estabilización aerobia.

### Aparatos y materiales

- Medidor de oxígeno disuelto debidamente calibrado
- Sistema de agitación para la muestra. Para la agitación se usa una sonda en el frasco de la demanda bioquímica de oxígeno que lleva integrado un agitador o para una agitación externa utilizar un agitador magnético
- Cronómetro u otro dispositivo para medir el tiempo

Si se quiere calcular la tasa específica de consumo de oxígeno (SOUR), a la muestra que se toma para medir la tasa de consumo específica se le determina los sólidos suspendidos volátiles. (Forma de estimar la biomasa).

### PROCEDIMIENTO

Paso 1. Recolectar una muestra fresca de lodos del reactor de lodos

Paso 2. Transferir aproximadamente 750 mL de lodos bien mezclados, a una botella o recipiente de 1L inmediatamente después de la recolección de la muestra

Paso 3. Tapar el recipiente y agitar vigorosamente o aerar la muestra para llevar el nivel de oxígeno disuelto arriba de  $5\text{mg L}^{-1}$

Paso 4. Verter una porción de la muestra aerada y bien mezclada dentro de una botella de BOD y llenarlo hasta rebosar. Destruir las burbujas de gas si se forman en la parte superior de la botella. Inclinar la botella y desprender todas las burbujas de los lados de la botella hasta que desaparezcan

Paso 5. Usar una espátula para sacar las burbujas fuera de la muestra. Es importante considerar que la muestra de lodos que queda después de llenar la botella BOD puede usarse para realizar el ensayo de SSV (paso 12)

Paso 6. Insertar la sonda para medir el oxígeno disuelto en la botella BOD e iniciar la agitación. Encender el medidor de oxígeno disuelto en una escala de 0 a 10

Paso 7. Esperar aproximadamente de 30 a 60 segundos para que la lectura del medidor de oxígeno disuelto se estabilice. Es importante observar que la aguja del indicador o la lectura deben ir descendiendo constantemente durante este procedimiento

Paso 8. Comenzar en un momento dado el registro del nivel de oxígeno disuelto de la muestra en intervalos de 30 o 60 segundos. No se registren los niveles de oxígeno disueltos menores de  $1.0\text{ mg L}^{-1}$

Paso 9. Graficar los resultados trazando el oxígeno disuelto en ( $\text{mg L}^{-1}$ ) en el eje vertical y el tiempo en (min) en el eje horizontal

Paso 10. Dibujar una línea recta que conecte la mayoría de los puntos. Continúe la línea de modo que cruce el eje horizontal y vertical. Es importante que el operador observe que la línea no es recta al principio y al final de la prueba. Las primeros y últimas lecturas, que se desvían de la línea recta no se consideran ya que son valores falsos

Paso 11. Determinar la pendiente de la línea: oxígeno disuelto( $\text{mg L}^{-1}\text{ min}^{-1}$ ). La pendiente es la tasa de consumo de oxígeno (OUR) o tasa de respiración

Paso 12. Determinar el contenido de SSV en la muestra de lodos activados. Expresar la concentración de SSV en ( $\text{g L}^{-1}$ ). Esto se hace dividiendo los ( $\text{mg L}^{-1}$ ) de SSV entre 1000

Paso 13. Escribir los valores en la ecuación y calcular la tasa de consumo de oxígeno. La tasa específica de consumo de oxígeno se expresa como  $\text{mg O}_2 (\text{g SSV h})^{-1}$

## CÁLCULOS

Se usan frecuentemente dos métodos para calcular la OUR. Ambos métodos llegan al mismo resultado numérico, en ambos casos se usa la hoja de trabajo y la gráfica de la tasa de respiración.

El primer método requiere que se trace la línea recta a través del número de puntos graficados. La línea debe cruzar ambos ejes de la gráfica, el horizontal (tiempo) y el vertical ( $\text{mg L}^{-1}$ ). Los valores de estos dos puntos se usan en el cálculo de OUR. El valor de oxígeno en  $\text{mg L}^{-1}$  se divide entre el valor de los minutos y se multiplica por  $60\text{minh}^{-1}$  para obtener  $\text{mg (L h)}^{-1}$ .

El segundo método se aplica para determinar OUR en un reactor aeróbico o tanque de aeración extendida. En este caso el analista u operador elige un punto de la línea como el tiempo cero y registra el valor de oxígeno disuelto ( $\text{mg L}^{-1}$ ) en el cuadro de cálculo de la gráfica. Después de un determinado tiempo, por ejemplo 5 minutos, toma otra lectura y registra este valor. Después con las dos lecturas de oxígeno disuelto y el lapso de tiempo entre las dos lecturas, se calcula la tasa de respiración (OUR), como se muestra a continuación:

$$OUR \frac{\text{mg}}{\text{L} \cdot \text{h}} = \left( \frac{O_2 t_o + O_2 t_x \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right)}{t_o - t_x (\text{min})} \right) \times 60 \frac{\text{min}}{\text{h}} \quad \text{Ecuación 6.1}$$

OUR ,  $\text{mg L}^{-1} \text{ h}^{-1}$  = Tasa de consumo de oxígeno

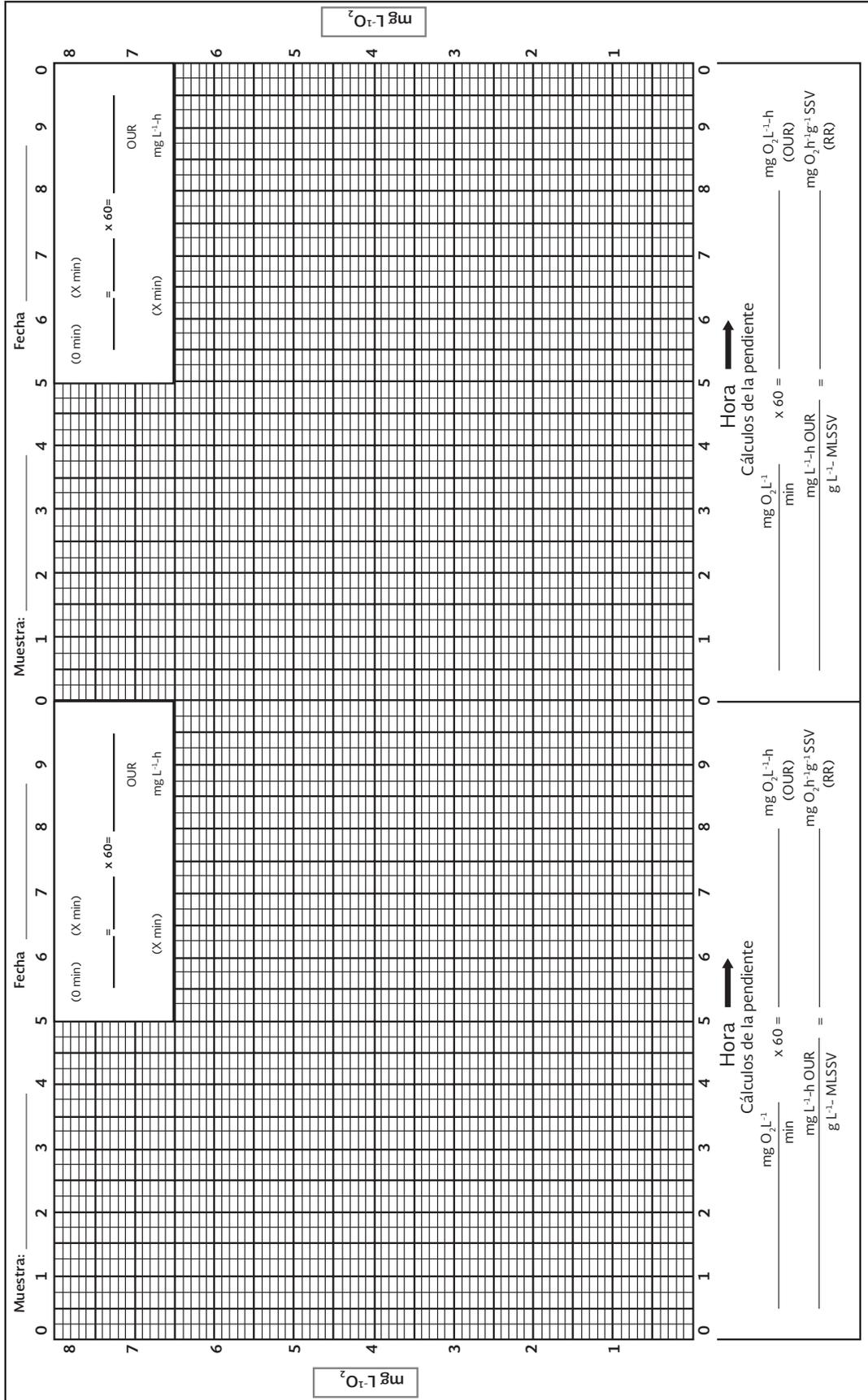
$O_2$  ,  $\text{mg L}^{-1}$  = Oxígeno disuelto

t , h= Tiempo

## HOJA DE TRABAJO

La Ilustración muestra una hoja de trabajo para graficar los resultados obtenidos en la determinación de la tasa de consumo de oxígeno

Ilustración 1. Gráfico de respirometría (Water Environment Federation, 2012)



# ANEXO 4

## FORMATOS Y REPORTES

**REFERENCIAS:**  
**WEF, 1995**

**WEF, 2008**

**Proporcionados por SAPAL. PTAR de León, Guanajuato**

**SEDEDOL, 2010**

### *Orden de trabajo 1*

Orden de trabajo No. \_\_\_\_\_ Fecha \_\_\_\_\_

Localización		Solicitado por (Teléfono)	Prioridad:	
Nombre del equipo	No.	Inspeccionar Reparación	Reemplazar Revisión	Servicio Pintar
		Descripción del trabajo:		
		Trabajo realizado / comentarios :		
Estimación del trabajo		Operador de turno		
Trabajo	\$ _____	Superintendente de mantenimiento		
Material	\$ _____			

### *Orden de trabajo 2*

Personal asignado	Horas-hombre	Fecha	Trabajo realizado	Partes & Materiales
Total				

Trabajo realizado por: \_\_\_\_\_ Fecha \_\_\_\_\_

Trabajo aceptado por: \_\_\_\_\_ Fecha \_\_\_\_\_

**Orden de servicio para un motor. Forma 1. (WEF,2008)**

Planta No. \_\_\_\_\_ Maquina No. \_\_\_\_\_ Inventario No. \_\_\_\_\_ Motor No. \_\_\_\_\_  
 H.P. \_\_\_\_\_ Fabricado por \_\_\_\_\_

Serie	Motor de excitación en paralelo	Motor compuesto	Motor sincrónico	Motor de inducción
Tipo	Armazón	Velocidad	Volts	Amperes
Fase	Ciclos	Aumento de temperatura	Amperes de excitación	Brazo o rotor, No. De serie
No. modelo	No. forma	Número de Estilo	No. de serial	
No. Orden	No. Orden			

Diagrama de conexiones-Rotor o armadura

Especificación	Cojinetes	Extensión del eje	Polea	Engranajes	Propulsión por correa
Abierto Prueba de explosión Prueba de goteo totalmente encerrado vertical _____	Manguito Bolas Rodillos	Diámetro _____ Longitud _____ Chavetero _____	Diámetro_ _____ Cara _____	Dientes ____ Paso _____ Cara _____	Sección de la correa A-1/2 x 11/32 B-21/32 x 7/16 C-7/8 x 17/32 D- 1-1/4 x 3/4 No. Ranuras _____ Diámetro de paso _____

Hoja de servicio del motor

Fecha de instalación		Localización	Aplicación		
Fecha de reparación	Reparaciones o piezas sustituidas	Causa	Reparado por	Costo total	

Formato de registro típico para las operaciones del espesador

Datos de operación para el mes de _____, 20____										
Datos de lodos										
Día del mes	Velocidad de banda o tambor, rpm	Flujo de alimentación, L·h <sup>-1</sup>	Sólidos en la Alimentación <sup>a</sup> , (%) SST	Cantidad de sólidos <sup>b</sup> , kg·hr <sup>-1</sup>	Datos de floculante		Datos de lodos espesados.		Datos de lavado de la banda	
					Polímero, L·h <sup>-1</sup>	Dosificación <sup>c</sup> , Kg ·ton <sup>-1</sup>	Caudal de agua recuperada, L·h <sup>-1</sup>	ST, (%)	Flujo de lavado, L·h <sup>-1</sup>	SST en el filtrado, (%)
1										
2										
3										
4										
.										
.										
.										
.										
.										
.										
.										
29										
30										
Total										
media										
mínimo										
máximo										

<sup>a</sup> Porcentaje de SST, Por ejemplo: ST registra como 4% = 40 000 mg · L<sup>-1</sup>.

<sup>b</sup> Recuperación de sólidos: kg/hr = Flujo de alimentación (L/h) x % SST x o volumen total alimentado x % SST = kg alimentado.

<sup>c</sup> Dosificación de floculante: kg de floculante / tonelada de sólidos de lodo = tasa de alimentación floculante x concentración x 500/rendimiento toneladas / hr o floculante volumen alimentado x concentración / (rendimiento toneladas x 1000).

<sup>d</sup> Recuperación de sólidos: 100 x (lodos espesados ST) (alimentación de lodos SST retorno de flujo SST) / (alimentación de lodos SST) (lodo espesado ST retorno de flujo SST).

Formato de reporte para un reactor en una planta de tratamiento anaerobio y datos de los lodos

Fecha	Lodos cerca del fondo										Temp. (°F)	Operador		Observaciones (Incluir la cama de lodos, L)				
Datos	Sobrenadante					Lodos cerca del fondo					Gas	Producido (L)	Desperdiciado (L)					
	Volumen (L)	Carga (kg 1x106 L <sup>-1</sup> )	pH	Sólidos Totales (%)	Sólidos Volátiles (%)	Sólidos Totales (%)	pH	Sólidos Totales (%)	Sólidos Volátiles (%)	DQO 5 día (mg <sup>-1</sup> )	Sólidos Totales (%)	Ácidos volátiles (mgL <sup>-1</sup> )	pH	Alcalinidad				
Promedio de 1 a 31																		

**Formato de registro típico para las operaciones de espesador**  
**Formato de reporte para un reactor en una planta de tratamiento anaerobio y datos de los lodos**

Fecha: \_\_\_\_\_ Formato de reporte para la estabilización aerobia      Operador \_\_\_\_\_

en una planta de tratamiento y datos de los lodos.

Datos	Lodo crudo				Lodo de digestión							Lodo digerido			Sobrenadante			
	Volumen (L)	(carga kg 1.0 x 10 <sup>6</sup> L <sup>-1</sup> )	pH	ST (%)	SV (%)	COD (mgL <sup>-1</sup> )	N (mgL <sup>-1</sup> )	pH	ST (%)	SV (%)	COD (mgL <sup>-1</sup> )	N (mgL <sup>-1</sup> )	DO (mgL <sup>-1</sup> )	TS (%)	Reducción de SV (%)	N (mgL <sup>-1</sup> )	ST (%)	N (mgL <sup>-1</sup> )
Promedio de 1 a 31																		

### CONTROL DE ALIMENTACIÓN AL REACTOR ANAEROBIO (SAPAL)

1	Fecha	Hora de arranque de la bomba	Volumen de lodos (m <sup>3</sup> )	Flujo (Ls <sup>-1</sup> )	Tiempo (min)
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					

SAPAL. Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de León Guanajuato.

EJEMPLOS DE FORMATOS DE CONTROL DEL ÁREA DE ESTABILIZACIÓN ANAEROBIA Y DE LA PLANTA DE BIOGÁS

Fecha: \_\_\_\_\_

Supervisor. Turno 1 \_\_\_\_\_ Supervisor. Turno 2 \_\_\_\_\_ Supervisor. Turno 3 \_\_\_\_\_

CÁRCAMO DE LODO CRUDO

Bomba desmenuzadora o criba	Opera	Horómetro	Mntto	Bomba desmenuzadora o criba	Opera	Horómetro	Mntto	Bomba desmenuzadora o criba	Opera	Horómetro	Mntto
Bomba 1				Bomba 1				Bomba 1			
Bomba 2				Bomba 2				Bomba 2			
Bomba 3				Bomba 3				Bomba 3			
Medidor de flujo de lodo	Opera	Acumulado	Mntto	Medidor de flujo de lodo	Opera	Acumulado	Mntto	Medidor de flujo de lodo	Opera	Acumulado	Mntto
Medidor 1				Medidor 1				Medidor 1			
Medidor 2				Medidor 2				Medidor 2			

ÁREA DE CALDERAS, SUAVIZADORES Y BOMBAS

Caldera	1	2	3	Caldera	1	2	3	Caldera	1	2	3
Opera				Opera				Opera			
Horómetro				Horómetro				Horómetro			
Tipo de combustible				Tipo de combustible				Tipo de combustible			
Mntto				Mntto				Mntto			
Suavizador	Opera	Acumulado	Mntto	Suavizador	Opera	Acumulado	Mntto	Suavizador	Opera	Acumulado	Mntto
Suavizador 1				Suavizador 1				Suavizador 1			
Suavizador 2				Suavizador 2				Suavizador 2			
<b>Bombas de alimentación al intercambiador</b>			<b>Bombas de alimentación al intercambiador</b>			<b>Bombas de alimentación al intercambiador</b>			<b>Bombas de alimentación al intercambiador</b>		
Opera	Horas de operación	Mntto	Opera	Horas de operación	Mntto	Opera	Horas de operación	Mntto	Opera	Horas de operación	Mntto
Bomba 1			Bomba 1			Bomba 1			Bomba 1		
Bomba 2			Bomba 2			Bomba 2			Bomba 2		

Nota: El Horómetro mide el tiempo de operación equipo, para control del mantenimiento. El Acumulado es el tiempo para el control de la regeneración de resina de suavizadores.

<b>Bomba de retorno de agua a calderas</b>			<b>Bomba de retorno de agua a calderas</b>			<b>Bomba de retorno de agua a calderas</b>		
Opera	Horas de operación	Mntto	Opera	Horas de operación	Mntto	Opera	Horas de operación	Mntto
Bomba 1			Bomba 1			Bomba 1		
Bomba 2			Bomba 2			Bomba 2		
Bomba 3			Bomba 3			Bomba 3		
<b>Bomba de recirculación de lodos</b>			<b>Bomba de recirculación de lodos</b>			<b>Bomba de recirculación de lodos</b>		
1	2	3	1	2	3	1	2	3
Opera			Opera			Opera		
Horómetro			Horómetro			Horómetro		
Presión de entrada (kgcm <sup>-2</sup> )			Presión de entrada (kgcm <sup>-2</sup> )	f)		Presión de entrada (kgcm <sup>-2</sup> )		
Presión de salida (kgcm <sup>-2</sup> )			Presión de salida (kgcm <sup>-2</sup> )			Presión de salida (kgcm <sup>-2</sup> )		

**COMPRESORES DE BIOGÁS, FILTROS DE GRAVA Y FILTROS DE CERÁMICA**

Compresor de biogás				Compresor de biogás				Compresor de biogás			
1	2	3		1	2	3		1	2	3	
Opera				Opera				Opera			
Horómetro				Horómetro				Horómetro			
Nivel de aceite				Nivel de aceite				Nivel de aceite			
Mntto				Mntto				Mntto			
<b>Filtro de Grava</b>				<b>Filtro de Grava</b>				<b>Filtro de Grava</b>			
Opera	1	2	3	Opera	1	2	3	Opera	1	2	3
Presión de entrada (mbar)				Presión de entrada (mbar)				Presión de entrada (mbar)			
Presión de salida (mbar)				Presión de salida (mbar)				Presión de salida (mbar)			

Filtro de cerámica				Filtro de cerámica				Filtro de cerámica			
1	2	3		1	2	3		1	2	3	
Opera				Opera				Opera			
Presión de entrada (mbar)				Presión de entrada (mbar)				Presión de entrada (mbar)			
Presión de salida (mbar)				Presión de salida (mbar)				Presión de salida (mbar)			

**REGISTROS DEL CENTRO DE CONTROL DE INSTRUMENTOS**

Reactor anaerobio				Reactor anaerobio				Reactor anaerobio			
	1	2	3		1	2	3		1	2	3
Biogás acumulado				Biogás acumulado				Biogás acumulado			
Temperatura superior (°C)				Temperatura superior (°C)				Temperatura superior (°C)			
Temperatura inferior (°C)				Temperatura inferior (°C)				Temperatura inferior (°C)			
Nivel (m)				Nivel (m)				Nivel (m)			
<b>Biogás a calderas</b>				<b>Biogás a calderas</b>				<b>Biogás a calderas</b>			
Caudal instantáneo	Biogás acumulado	Temperatura (°C)		Caudal instantáneo	Biogás acumulado	Temperatura (°C)		Caudal instantáneo	Biogás acumulado	Temperatura (°C)	

LISTA DE VERIFICACIÓN DEL ÁREA DE SERVICIOS

Compresores de aire				Compresores de aire				Compresores de aire			
Opera	Presión (kgcm <sup>-2</sup> )	Mntto		Opera	Presión (kgcm <sup>-2</sup> )	Mntto		Opera	Presión (kgcm <sup>-2</sup> )	Mntto	
Compresor vertical			Compresor vertical	Compresor vertical			Compresor vertical				Compresor vertical
Compresor horizontal			Compresor horizontal	Compresor horizontal			Compresor horizontal				Compresor horizontal
<b>Cisternas de agua</b>				<b>Cisternas de agua</b>				<b>Cisternas de agua</b>			
Nivel	En llenado	Mntto	Agua de calderas	Nivel	En llenado	Mntto	Agua de calderas	Nivel	En llenado	Mntto	Agua de calderas
Agua del chiller			Agua del chiller	Agua del chiller			Agua del chiller	Agua del chiller			Agua del chiller
Agua de los reactores			Agua de los reactores	Agua de los reactores			Agua de los reactores	Agua de los reactores			Agua de los reactores
<b>Chiller</b>				<b>Chiller</b>				<b>Chiller</b>			
Opera	Horas de operación	Temperatura del agua	Mntto	Opera	Horas de operación	Temperatura del agua	Mntto	Opera	Horas de operación	Temperatura del agua	Mntto
<b>Hidroneumático</b>				<b>Hidroneumático</b>				<b>Hidroneumático</b>			
Opera	Presión (kgcm <sup>-2</sup> )	Mntto		Opera	Presión (kgcm <sup>-2</sup> )	Mntto		Opera	Presión (kgcm <sup>-2</sup> )	Mntto	
Para calderas			Para calderas	Para calderas			Para calderas	Para calderas			Para calderas
Para reactores			Para reactores	Para reactores			Para reactores	Para reactores			Para reactores

Nota. Chiller: Equipo de enfriamiento de biogás. CCI: centro de control de instrumentos

Bomba de agua de enfriamiento de compresores de biogás				Bomba de agua de enfriamiento de compresores de biogás				Bomba de agua de enfriamiento de compresores de biogás			
Opera	Horas de operación	Presión (kgcm <sup>-2</sup> )		Opera	Horas de operación	Presión (kgcm <sup>-2</sup> )		Opera	Horas de operación	Presión (kgcm <sup>-2</sup> )	
	Proceso 1				Proceso 1				Proceso 1		
	Proceso 2				Proceso 2				Proceso 2		
	Chiller 1				Chiller 1				Chiller 1		
	Chiller 2				Chiller 2				Chiller 2		

#### TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE BIOGÁS

Presión de salida (mbar)	Sello de agua (%)	No. De tanque	Mntto	Presión de salida (mbar)	Sello de agua (%)	No. De tanque	Mntto	Presión de salida (mbar)	Sello de agua (%)	No. De tanque	Mntto
% de apertura de la válvula reguladora	Válvula	Presión en la línea (mbar)	Mntto	% de apertura de la válvula reguladora	Válvula	Presión en la línea (mbar)	Mntto	% de apertura de la válvula reguladora	Válvula	Presión en la línea (mbar)	Mntto

Observaciones

---



---



---

CONTROL DE DRENADO DE LODO ESTABILIZADO

No.	Fecha	Hora	Volumen (m3)	Enviado a
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				

**REGISTRO DE CICLOS DE MEZCLADO CON BIOGÁS**

Fecha: \_\_\_\_\_

No.	Hora de inicio	Compresor de biogás No.						Reactor No. Durante el tiempo de mezclado				
		Presión de agua fría (kgcm <sup>-2</sup> )	Presión de descarga (kgcm <sup>-2</sup> )	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura Intermedia (°C)	Temperatura de salida (°C)	Presión de aceite (kgcm <sup>-2</sup> )	Tiempo de mezclado	Máxima producción de biogás (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	Presión interna máxima (mbar)	Temperatura de biogás (°C)	
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
16												

**REGISTRO DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN LOS REACTORES**

Hora	Reactor anaerobio No.1			Tanque de almacenamiento de biogás		PC	Hora	Reactor anaerobio No.2			Tanque de almacenamiento de biogás		PC
	Bomba de recirculación	Biogás m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (medidor)	Biogás m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (PC)	Apertura manual de la válvula	Volumen en tanque (m <sup>3</sup> )			Volumen acumulado (m <sup>3</sup> )	Bomba de recirculación	Biogás m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (medidor)	Biogás m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (PC)	Apertura manual de la válvula	
00:00							01:00						
02:00							03:00						
22:00							23:00						

Hora	Reactor anaerobio No.3			Tanque de almacenamiento de biogás		PC	Observaciones
	Bomba de recirculación	Biogás m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (medidor)	Biogás m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (PC)	Apertura manual de la válvula	Volumen en tanque (m <sup>3</sup> )		
00:00							
02:00							
04:00							
06:00							

**REGISTROS DEL SISTEMA DE COGENERACIÓN**

Maquina No. \_\_\_\_\_

Fecha: \_\_\_\_\_

Hora	Consumo de biogás (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	Presión de succión de sopladores (mbar)	Velocidad del soplador (rpm)	Presión de llegada a la maquina (mbar)	Potencia generada (Kw)	Horas totales	Energía generada (Kwh)	% Vol. de CH <sub>4</sub>	% Vol. de CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S (ppm)	Vol. de condensado (L)
00:00											
02:00											
04:00											
06:00											
08:00											
10:00											
12:00											
14:00											
16:00											
18:00											
20:00											
22:00											
00:00											

Formatos y reportes para la operación y mantenimiento de un Relleno Sanitario

Resumen mensual de control de material de cubierta en el relleno sanitario.

DÍAS	VIAJES	VOLUMEN SUMINISTRADO m <sup>3</sup>	VOLUMEN ACUMULADO	VOLUMEN UTILIZADO	EXISTENCIA EN BANCO
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					
26					
27					
28					
29					
30					
31					
	TOTAL				

Nombre y firma del supervisor

Residente de Obra

### Registro de lodos recibidos en el sitio de disposición final

Mes: \_\_\_\_\_ Año: \_\_\_\_\_ Hoja \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

Días	Desechos de lodos recibidos en el relleno sanitario		Desechos de lodos confinados		Desechos de lodos recuperados para reciclarlos	
	Tonelaje parcial	Tonelaje acumulado	Tonelaje parcial	Tonelaje acumulado	Tonelaje parcial	Tonelaje acumulado
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						
26						
27						
28						
29						
30						
31						

Elaborado \_\_\_\_\_

Aprobado \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Nombre y firma

Nombre y firma

## FORMATO PARA EL ANÁLISIS DEL COSTO DIRECTO: HORA-MÁQUINA

Frente de trabajo _____	Equipo: _____	Hoja No. _____
_____	Modelo: _____	Calculó: _____
_____	Tipo: _____	Revisó: _____
Etapa: _____	Datos adic: _____	Fecha: _____
Datos generales		
Precio adquisición	\$ _____	Fecha de cotización _____

Datos generales		
Precio adquisición	\$ _____	Fecha cotización _____
Equipo adicional:		Vida económica (VE) _____ Años
		Horas por año (HA) _____ hr/años
		Motor _____ de _____ h.p.
Valor inicial	\$ _____	Factor de operación: _____ h.p. Op
Valor de rescate (VR) _____ %	\$ _____	Potencia de operación: _____
Tasa de interés (i) _____ %		Coefficiente de almacenaje (K): _____
Prima seguros (s) _____ %		Factor de mantenimiento (Q): _____

Cargos fijos			
Depreciación:	D=	=	_____ = \$
Inversión:	I=	=	_____ = \$
Seguros:	S=	=	_____ = \$
Almacenaje:	A=	KD =	_____ = \$
Mantenimiento:	M=	QD =	_____ = \$
	Suma cargos fijos por hora		\$ _____

Consumos			
-Combustible:	E=C' * PC		
Diesel:	E= 0.20 x _____	HP. OP * \$ _____	/LT = \$
Gasolina:	E= 0.24 x _____	HP. OP * \$ _____	/LT = \$
-Otras fuentes de energía:	_____		
-Lubricantes			
Capacidad del cárter:	C= _____	Litros	
Cambios de aceite:	T= _____	Horas	
A= C/T +	= _____	HP. OP. =	_____ LT/HR
L= _____	LT/HR X \$ _____	/LT _____	
	_____ \$		
-Llantas:	LI=		
	Vida económica: NV=	_____ Horas	
	LI = \$ _____	/Hora _____ = \$	
	_____		
Suma consumos por hora	\$ _____		

Operación

Salarios: (s)

Operador: \$ \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ \$ \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ \$ \_\_\_\_\_

Salario promedio (s)

H = 8 Horas x \_\_\_\_\_ (Factor de rendimiento) = \_\_\_\_\_ Horas

Operación = \_\_\_\_\_ / Hora = \$ \_\_\_\_\_

Suma operación por hora \$ \_\_\_\_\_

COSTO DIRECTO HORA – MAQUINA (HMD) \$ \_\_\_\_\_

### REPORTE MENSUAL DE COSTOS DE OPERACIÓN DEL RELLENO SANITARIO

Periodo de reporte: de \_\_\_\_\_ a \_\_\_\_\_ Preparado por: \_\_\_\_\_

Parámetro evaluado	Mensual	Mensual del año anterior	Promedio de los 12 meses anteriores
Total de toneladas recibidas en el sitio de disposición final			
Total de toneladas recicladas			
Total de toneladas confinadas en el sitio de disposición final			
Costo de mano de obra			
Costo de operación de equipo			
Costo de inversión			
Costo total			
Costo unitario de mano de obra			
Costo unitario de equipo			
Costo unitario de inversión			
Costo unitario total			

Nota: Este reporte deberá ser preparado para un mes o cuatro semanas, según sea lo que se considere más conveniente.



## Concentrado diario de maquinaria

Zona de trabajo:

Fecha:

-----

-----

(1) Clave de la maquina	(2) Horario de operación	Actividad / Tiempo efectivo						(9) Tiempo efectivo	(10) Tiempo inactivo
		(3) ECL	(4) PS	(5) EBC	(6) CC	(7) T	(8) O		

### Nomenclatura

- ECL      Empuje y compactación de lodos
- PS        Reparación de superficie
- EBC      Extendido y bandeo de cobertura
- CC        Compactación y cobertura
- T         Tránsito
- O         Otros

## Resumen mensual de adquisición de materiales en el relleno sanitario

Proveedor: \_\_\_\_\_

Mes de: \_\_\_\_\_

Material suministrado: \_\_\_\_\_

Procedencia del material: \_\_\_\_\_

Periodo No.: \_\_\_\_\_

Volumen a suministrar: \_\_\_\_\_

Periodo de entrega: \_\_\_\_\_

(1) Días	(2) N° de viajes	(3) Volumen suministrado	(4) Volumen suministrado acumulado	(5) Volumen restante a suministrar	(6) Volumen suministrado a la fecha
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					
26					
27					
28					
29					
30					
31					
Total					

Nombre y firma del supervisor

Residente de obra



Resumen mensual de control de maquinaria en el relleno sanitario

Obra:	Tipo de maquinaria:
Mes de :	N° de serie:

Días	(1) Horas efectivas	(2) Horas acumuladas	(3) Observaciones
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			
29			
30			
31			
Total			

---

Nombre y firma del supervisor	Residente de obra
-------------------------------	-------------------

Equipo No.: \_\_\_\_\_ Tipo: \_\_\_\_\_ Modelo: \_\_\_\_\_

Periodo considerado en el análisis de: \_\_\_\_\_ a \_\_\_\_\_

(1) Categoría	(2) No. De emp.	Horas trabajadas			(7) Precio unitario	(8) Costo total por ítem
		Parciales		Acumuladas		
		(3) Ordinarias	(4) Extras			
Encargado del control del relleno sanitario						
Operador del equipo						
Auxiliares del operador						
Otros						
Suma						
<u>Costo total de mano de obra</u>						

### Análisis semanal de costos de operación por equipo empleado

<b>Costo de equipo</b>										
(1) Tipo	Combustibles		Lubricantes		Otros costos		(10) H o r a s trabajadas	(11) Costo total por ítem.		
	(2) Litros	(3) /Litro	(4) Costo total	(5) Litros	(6) /Litro	(7) Costo total			(8) Mayores	(9) Menores
Unidad completa										
Unidad sin equipo de sustentación										
Equipo de sustentación (orugas o carriles)										
Otro										
Suma										
Costo unitario de operación										Costo total del equipo
										\$ _____ /Ton
										\$ _____ /Ton
										\$ _____ /Ton

Preparado por \_\_\_\_\_  
Residente del relleno sanitario







# BIBLIOGRAFÍA

- Al-Gushain, I., Hamoda, M., & El-Ghany, M. (2004). Performance Characteristics of Aerobic/Anoxic Sludge Digestion at Elevated Temperatures.
- California State University. (1991). Operating of Wastewater Treatment Plants. Sacramento, California.
- Daigger, G. T., Graef, S., & Eike, S. (1997). Operational modifications of a Conventional Aerobic Digestion to the Aerobic/Anoxic Digestion Process. 70th Annual Water Environment Federation Technical Exposition and Conference. Chicago: Water Environment Federation.
- Daigger, G. T., Novak, J., Malina, J., Stover, E., Scisson, J., & Bailey, E. (1998). Aerobic Digestion Workshop. Panel of Experts. Austin.
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2011). Biogas from Waste and Renewable Resources. Weinheim, Alemania: WILEY-VCH.
- Environmental Protection Agency (EPA). (1979). Process Design Manual- Sludge Treatment and Disposal. Washington, D.C.
- Environmental Protection Agency (EPA). (1999b). Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge. U.S: Code of Federal Regulations.
- Environmental Protection Agency (EPA). (October 1978). Process Design Manual Municipal Sludge Landfills. , U.S.: Environmental research information center technology transfer.
- EPA. (1978). Field Manual for Performance Evaluation and Troubleshooting at Municipal Wastewater Treatment Facilities. Washington.
- Grady, C. J., Daigger, G., & Lim, H. (1999). Biological Wastewater Treatment. New York.
- Hao, O. J., & Kim, M. (1990). Continuous Pre-Anoxic and Aerobic Digestion of Waste Activated Sludge. Environ. Eng.
- Hao, O. J., Kim, M., & Al-Ghusain, I. (1991). Alternating Aerobic and Anoxic Digestion of Waste Activated Sludge. Technol. Biotechnol.
- Matzuda, A., Ide, T., & Fujii, S. (1988). Behavior of Nitrogen and Phosphorus During Batch Aerobic Digestion of Waste Activated Sludge-Continuous Aeration and Intermittent Aeration by Control of DO. Water Res.
- McQuiston, F. C., & Splitter, J. (1992). Cooling and Heating Load Calculation Manual. Atlanta, Georgia: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Metcalf, & Eddy. (2003). Wastewater Engineering: Treatment and reuse. New York: McGraw- Hill.
- Moreno Rodríguez, G., Espinoza Fuentes, A., & Briones Méndez , R. (2007). Curso Tratamiento Anaerobio De Aguas Residuales. Morelos, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- SAPAL, Planta de tratamiento de aguas residuales de León, Guanajuato. Comunicación personal. Diciembre de 2014, León, Guanajuato.
- Schafer, P., Farrell, J., Newman, G., &

- Vandenburgh, G. (2002). Advanced Anaerobic Digestion Performance Comparisons. 75th Annual Water Environment Federation Technical Exposition and Conference. Chicago: Water Environment Federation.
- Secretaría de desarrollo social (SEDESOL). (2010). Manual de Operación de Rellenos Sanitarios. México: (SEDESOL).
- Secretaría de servicios públicos alcaldía de Jericó. (Abril 2008). Manual de operaciones y mantenimiento de relleno sanitario mariposas amarillas. Jericó, Antioquia, Colombia: Consultoria civil y ambiental.
- Stege, K., & Bailey, E. (2003). Aerobic Digestion Operation of Stockbridge Wastewater Treatment plant. Georgia: Water Pollution Control Association.
- Stensel, H. D., & Bailey, E. (2000). Preliminary Report Evaluation of Paris Sludge Production Due to Aerobic/Anoxic Operation. Austin, Texas: Enviroquip.
- Tasneem Abbasi, S.M. Tauseef, & S.A. Abbasi. (2012). Biogas Energy. New York 10013, USA: Springer Science + Business Media.
- Water Environment Federation (WEF). (2008). Operation of municipal wastewater treatment plants. Manual of practice No. 11 (Sixth Edition ed., Vol. I, II and III). Alexandria, VA 22314, USA: Mc Graw Hill.
- Water Environment Federation (WEF). (1995). Wastewater Residuals Stabilization, Manual of Practice. Alexandria, Virginia.
- Water Environment Federation (WEF). (1998). Design of Municipal Wastewater Treatment Plants. Alexandria.
- Water Environment Federation (WEF). (2010). Design of Municipal Wastewater Treatment Plants. (Vol I, II and III, Fifth Edition.) Alexandria: McGraw Hill.
- Water Environment Federation (WEF). (2012). Basic Laboratory Procedures for the Operator- Analyst. Alexandria.
- Water Environment Federation. (2001). Solids Handling Training Manual. Alexandria, VA 22314, USA: Library of Congress cataloging-in-Publication Data.
- Weiland, P., & Thomson, H. (1990). Operational behavior for an industrial fixed bed reactor for biomethanation of alcohol slops from different crops. *Wat. Sci. Tech*, 385-394.
- Zehnder, A. J. (1978). Ecology of Methane Formation. *Water Pollution Microbiology*. Wiley Interscience.
- <http://www.chopperpumps.com/products/rotamix/>
- <http://www.degremont-technologies.com/dgtech.php?article464>
- <http://globalaquasolutions.com/products/industrial-products/ef-071-struvite-remover/>
- <http://www.uniqueair.co.in/Default.aspx?ID=6>
- <http://www.plantas-purificadoras-de-aguas.com.mx/productos/filtros-de-carbon-activado/>
- <http://www.chemvironcarbon.com/en/applications/air-treatment/odour>
- <http://www.waterworld.com/articles/iww/print/volume-12/issue-6/feature-editorial/storage-system-helps-capture-brewery-digester-gas.html>
- [http://www.maraldi.it/reference.asp?pr0\\_cod=19](http://www.maraldi.it/reference.asp?pr0_cod=19)
- <http://www.itas-spa.com/eng/petrochemical/bio-gas-flares>
- <http://asaprental.net/servicios/desarenador-sandzapper>. (2014).
- <http://avenrut.com/politica-interna/normas-para-la-entrega-de-equipos-de-proteccion-personal/>. (2014).
- <http://grvc.us.es/utiles/vistapro.php?tab=tnacional&idr=54>. (2014).

<http://serecogestion.com/>. (2014).  
[http://www.bvsde.paho.org/curso\\_rsm/e/unidad3.html](http://www.bvsde.paho.org/curso_rsm/e/unidad3.html). (2014).  
[http://www.bvsde.paho.org/curso\\_rsm/e/unidad7.html](http://www.bvsde.paho.org/curso_rsm/e/unidad7.html). (2014).  
<http://www.directindustry.es>. (2014).  
<http://www.ecopreneur.cl/>. (2014).  
<http://www.iqdinvesquia.com>. (2014).  
<http://www.labequim.com.mx/html/AGITADORESENGENERAL.htm>. (2014).  
<http://www.sodimateiberica.com>. (2014).  
<http://www.tecnium.es/en/storage-plastic-tanks-for-chemicals/storage-tanks-for-chemicals>. (2014).  
[https://www.pasa.mx/industrial/disposicion\\_final\\_industrial\\_comercios.html](https://www.pasa.mx/industrial/disposicion_final_industrial_comercios.html). (2014).  
<http://www.tsurumipump.com/prods/Aeration/TRN-Submersible-Aerator.aspx>  
<http://www.tsurumipump.com/prods/Aeration/TRN-Submersible-Aerator.aspx>  
<http://www.materialesdefontaneria.com/valvula-de-equilibrado-termico-civ-de-standard-hidraulica/>  
<http://www.chopperpumps.com/products/rotamix/>  
<http://wp.cwea.org/?p=1170>  
[http://www.esi.info/detail.cfm/Evoqua-Water-Technologies/DYSTOR-gas-holder-systems/\\_/R-98324\\_TN131BT](http://www.esi.info/detail.cfm/Evoqua-Water-Technologies/DYSTOR-gas-holder-systems/_/R-98324_TN131BT)  
<http://www.pumpindustry.com.au/pump-systems-ltd-solids-pumping-mixing-specialists/1942/>  
<http://www.wateronline.com/doc/cannon-mixer-anaerobic-digestion-system-0001>  
<http://italianfoodmaterialsandmachinery.com/exchangers-tube-in-tube-heat/>  
<http://www.transfecalor.com.ar/>  
<http://www.mxmach.com/spiral-plate-heat-exchangers/>  
<http://ddi-heatexchangers.com/blog/>  
<http://globalaquasolutions.com/products/industrial-products/ef-071-struvite-remover/>  
<http://www.uniqueair.co.in/Default.aspx?ID=6>  
<http://www.plantas-purificadoras-de-aguas.com.mx/productos/filtros-de-carbon-activado/>  
<http://www.chemvironcarbon.com/en/applications/air-treatment/odour>  
[http://www.bioetlogic.com/bio/article.php3?id\\_article=26](http://www.bioetlogic.com/bio/article.php3?id_article=26)  
[http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalalom/tamop425/0032\\_kornyezettechnologia\\_en/ch03.html](http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalalom/tamop425/0032_kornyezettechnologia_en/ch03.html)  
<http://kap-man.de/e-kl-anl.htm>  
<http://www.maasprofile.de/en/maas-profile/news/article/article/2009/12/ein-neues-kleid-fuer-den-faulturm-uhldingen.html>  
<http://www.vbt-systems.eu/Seiten/Referenzen/Berichte/New/FaultAmstetten/FaultAmstettenEng.html>  
<http://www.waterworld.com/articles/iww/print/volume-12/issue-6/feature-editorial/storage-system-helps-capture-brewery-digester-gas.html>  
<http://tectonicablog.com/?p=66313>  
<http://www.biogasmart.com>  
<http://www.directindustry.com/prod/g-beegmbh/shut-off-valves-gas-61976-549150.html>  
[http://www.cmctechnologies.net.au/?page\\_id=354](http://www.cmctechnologies.net.au/?page_id=354)  
<http://www.biogemex.net/productos-de-biogemexquemadores/>  
[http://www.zeeco.com/flares/flares\\_ground\\_enclosed.php](http://www.zeeco.com/flares/flares_ground_enclosed.php)  
<http://www.instrumentationtechnology.co.uk/63mm-Back-1/4-BSP-Glycerine-Filled-Gauges>  
[http://valves.pentair.com/valves/products/control\\_valves/regulators](http://valves.pentair.com/valves/products/control_valves/regulators)

[/?id=tcm:106-7180](#)  
[http://www.mrw-tech.com/pia\\_enclosed\\_flares.html](http://www.mrw-tech.com/pia_enclosed_flares.html)  
<http://www.grothcorp.com/en/product/markets/Chemical/GasControlEquipment/8110.html>  
[http://www.varec-biogas.com/es/products?category\\_id=1](http://www.varec-biogas.com/es/products?category_id=1)  
<http://www.waste-managementworld.com/articles/2014/07/contract-to-expand-doncaster-food-waste-to-biogas-plant-to-160-000-tpa.html>  
[http://www.brightwaterfli.com/applications\\_and\\_technologies.htm](http://www.brightwaterfli.com/applications_and_technologies.htm)

<http://www.azomining.com/equipment-details.aspx?EquipID=39>  
<http://www.tsurumipump.com/prods/Aeration/TRN-Submersible-Aerator.asp>  
<http://lima-distr.all.biz/sopladores-centrifugos-g12776#.VBykwLCI600>  
[http://www.tecnivac.com/blowers\\_sopladores.html](http://www.tecnivac.com/blowers_sopladores.html)  
<http://www.mastermedioambiente.com/2012/06/microorganismos-filamentososdel-fango.html>  
[http://www.environmental leverage.com/Algae\\_Problems\\_%20and\\_%20Solutions.htm](http://www.environmental leverage.com/Algae_Problems_%20and_%20Solutions.htm)  
<http://sapaza.gob.mx/index.php>  
<http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=1055815&page=103>

# TABLA DE CONVERSIONES DE UNIDADES DE MEDIDA

Sigla	Significado	Sigla	Significado
mg	miligramo	kg/m <sup>3</sup>	kilogramo por metro cúbico
g	gramo	l/s	litros por segundo
kg	kilogramo	m <sup>3</sup> /d	metros cúbicos por día
mm	milímetro	Sm <sup>3</sup> /h	condiciones estándar de metro cúbico por hora
cm	centímetro	Scfm	condiciones estándar de pies cúbicos por minuto
m	metro	°C	grados Celsius
ml	mililitro	psia	libra-fuerza por pulgada cuadrada absoluta
l	litro	cm/s	centímetro por segundo
m <sup>3</sup>	metro cúbico	m/s	metro por segundo
s	segundo	HP	caballo de fuerza (medida de energía)
h	hora	kW	kilowatt
d	día	UNT	unidades nefelométricas de turbiedad
mg/l	miligramo por litro		

## Longitud

Sistema métrico	Sistema Inglés	Siglas
1 milímetro (mm)	0.03	in
1 centímetro (cm) = 10 mm	0.39	in
1 metro (m) = 100 cm	1.09	yd
1 kilómetro (km) = 1 000 m	0.62	mi
<b>Sistema Inglés</b>	<b>Sistema métrico</b>	
1 pulgada (in)	2.54	cm
1 pie (ft) = 12 pulgadas	0.30	m
1 yarda (yd) = 3 pies	0.91	m
1 milla (mi) = 1 760 yardas	1.60	km
1 milla náutica (nmi) = 2 025.4 yardas	1.85	km

## Superficie

Sistema métrico	Sistema inglés	Siglas
1 cm <sup>2</sup> = 100 mm <sup>2</sup>	0.15	in <sup>2</sup>
1 m <sup>2</sup> = 10 000 cm <sup>2</sup>	1.19	yd <sup>2</sup>
1 hectárea (ha) = 10 000 m <sup>2</sup>	2.47	acres
1 km <sup>2</sup> = 100 ha	0.38	mi <sup>2</sup>
Sistema Inglés	Sistema métrico	
1 in <sup>2</sup>	6.45	cm <sup>2</sup>
1 ft <sup>2</sup> = 144 in <sup>2</sup>	0.09	m <sup>2</sup>
1 yd <sup>2</sup> = 9 ft <sup>2</sup>	0.83	m <sup>2</sup>
1 acre = 4 840 yd <sup>2</sup>	4 046.90	m <sup>2</sup>
1 milla <sup>2</sup> = 640 acres	2.59	km <sup>2</sup>

## Volumen/capacidad

Sistema métrico	Sistema inglés	Siglas
1 cm <sup>3</sup>	0.06	in <sup>3</sup>
1 dm <sup>3</sup> = 1 000 cm <sup>3</sup>	0.03	ft <sup>3</sup>
1 m <sup>3</sup> = 1 000 dm <sup>3</sup>	1.30	yd <sup>3</sup>
1 litro (L) = 1 dm <sup>3</sup>	1.76	pintas
1 hectolitro (hL) = 100 L	21.99	galones
Sistema Inglés	Sistema métrico	
1 in <sup>3</sup>	16.38	cm <sup>3</sup>
1 ft <sup>3</sup> = 1 728 in <sup>3</sup>	0.02	m <sup>3</sup>
1 onza fluida EUA = 1.0408 onzas fluidas RU	29.57	mL
1 pinta (16 onzas fluidas) = 0.8327 pintas RU	0.47	L
1 galón EUA = 0.8327 galones RU	3.78	L

## Masa/peso

Sistema métrico	Sistema inglés	
1 miligramo (mg)	0.0154	grano
1 gramo (g) = 1 000 mg	0.0353	onza
1 kilogramo (kg) = 1 000 g	2.2046	libras
1 tonelada (t) = 1000 kg	0.9842	toneladas larga
Sistema Inglés	Sistema métrico	
1 onza (oz) = 437.5 granos	28.35	g
1 libra (lb) = 16 oz	0.4536	kg
1 stone = 14 lb	6.3503	kg
1 hundredweight (cwt) = 112 lb	50.802	kg
1 tonelada larga = 20 cwt	1.016	t

## Temperatura

$$^{\circ}C = \frac{5}{9}(^{\circ}F - 32)$$

$$^{\circ}F = \frac{9}{5}(^{\circ}C) + 32$$

Otros sistemas de unidades		Multiplicado por	Sistema Internacional de Unidades (SI)	
Unidad	Símbolo	Factor de conversión	Se convierte a	
<b>Longitud</b>				
Pie	pie, ft.,'	0.30	metro	m
Pulgada	plg, in,"	25.40	milímetro	mm
<b>Presión/esfuerzo</b>				
Kilogramo fuerza/cm <sup>2</sup>	kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>	98 066.50	pascal	Pa
Libra/pulgada <sup>2</sup>	lb/ plg <sup>2</sup> , PSI	6 894.76	pascal	Pa
atmósfera técnica	at	98 066.50	pascal	Pa
metro de agua	m H <sub>2</sub> O (mca)	9 806.65	pascal	Pa
mm de mercurio	mm Hg	133.32	pascal	Pa
bar	bar	100 000.00	pascal	Pa
<b>Fuerza/ peso</b>				
kilogramo fuerza	kg <sub>f</sub>	9.80	newton	N
<b>Masa</b>				
libra	lb	0.45	kilogramo	kg
onza	oz	28.30	gramo	g
<b>Peso volumétrico</b>				
kilogramo fuerza/m <sup>3</sup>	kg <sub>f</sub> /m <sup>3</sup>	9.80	N/m <sup>3</sup>	N/m <sup>3</sup>
libra /ft <sup>3</sup>	lb/ft <sup>3</sup>	157.08	N/m <sup>3</sup>	N/m <sup>3</sup>
<b>Potencia</b>				
caballo de potencia	CP, HP	745.69	watt	W
caballo de vapor	CV	735.00	watt	W
<b>Viscosidad dinámica</b>				
poise	μ	0.01	pascal segundo	Pa s
<b>Viscosidad cinemática</b>				
viscosidad cinemática	v	1	stoke	m <sup>2</sup> /s (St)
<b>Energía/ Cantidad de calor</b>				
caloría	cal	4.18	joule	J
unidad térmica británica	BTU	1 055.06	joule	J
<b>Temperatura</b>				
grado Celsius	°C	tk=tc + 273.15	grado Kelvin	K

Nota: El valor de la aceleración de la gravedad aceptado internacionalmente es de 9.80665 m/s<sup>2</sup>

Longitud								
de / a	mm	cm	m	km	mi	milla náutica (nmi)	ft	in
mm	1.000	0.100	0.001					
cm	10000	1.000	0.010				0.033	0.394
m	1 000.000	100.000	1.000	0.001			3.281	39.370
km			0.001	1.000	0.621	0.540	3 280.83	0.039
mi			1 609.347	1.609	1.000	0.869	5 280.000	
nmi			1 852.000	1.852	1.151	1.000	6 076.115	
ft		30.480	0.305				1.000	12.000
in	25.400	2.540	0.025				0.083	1.000

Superficie								
de / a	cm <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	km <sup>2</sup>	ha	mi <sup>2</sup>	acre	ft <sup>2</sup>	in <sup>2</sup>
cm <sup>2</sup>	1.00						0.001	0.155
m <sup>2</sup>	10 000.00	1.00					10.764	1 550.003
km <sup>2</sup>			1.000	100.000	0.386	247.097		
ha		10 000.00	0.010	1.000	0.004	2.471		
mi <sup>2</sup>			2.590	259.000	1.000	640.000		
acre		4 047.00	0.004	0.405	0.002	1.000		
ft <sup>2</sup>	929.03	0.09					1.000	0.007
in <sup>2</sup>	6.45						144.000	1.000

Volumen								
de / a	cm <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	L	ft <sup>3</sup>	gal. EUA	acre-ft	in <sup>3</sup>	yd <sup>3</sup>
cm <sup>3</sup>	1.000		0.001				0.061	
m <sup>3</sup>		1.000	1 000.000	35.314	264.200			1.307
L	1 000.000	0.001	1.000	0.035	0.264		61.023	
ft <sup>3</sup>		0.028	28.317	1.000	7.481			0.037
gal. EUA		0.004	3.785	0.134	1.000		230.974	
acre-ft		1 233.490				1.000		
in <sup>3</sup>	16.387		0.016		0.004		1.000	
Yd <sup>3</sup>		0.765		27.000				1.000

Gasto								
de / a	l/s	cm <sup>3</sup> /s	gal/día	gal/min	l/min	m <sup>3</sup> /día	m <sup>3</sup> /h	ft <sup>3</sup> /s
l/s	1.000	1 000.000		15.851	60.000	86.400	3.600	0.035
cm <sup>3</sup> /s	0.001	1.000	22.825	0.016	0.060	0.083		
gal/día		0.044	1.000			0.004		
gal/min	0.063	63.089	1 440.000	1.000	0.000	5.451	0.227	0.002
l/min	0.017	16.667	0.000	0.264	1.000	1.440	0.060	
m <sup>3</sup> /día	0.012	11.570	264.550	0.183	0.694	1.000	0.042	
m <sup>3</sup> /h	0.278		6 340.152	4.403	16.667	24.000	1.000	0.010
ft <sup>3</sup> /s	28.316			448.831	1 698.960	2 446.590	101.941	1.000

Eficiencia de pozo			
de	a	gal/min/pie	l/s/m
gal/min/pie		1.000	0.206
l/s/m		4.840	1.000

Permeabilidad							
de	a	cm/s	gal/día/Pie <sup>2</sup>	millones gal/día/acre	m/día	pie/s	Darcy
cm/s		1.000	21 204.78		864.000	0.033	
gal/día/pie <sup>2</sup>			1.000		0.041		0.055
millón gal/día/acre				1.000	0.935		
m/día		0.001	24.543	1.069	1.000		1.351
pie/s		30.480			26 334.72	1.000	
Darcy			18.200		0.740		1.000

Peso									
de	a	grano	gramo	kilogramo	libra	onza	tonelada corta	tonelada larga	tonelada métrica
Grano (gr)		1.000	0.065						
Gramo (g)		15.432	1.000	0.001	0.002				
Kilogramo (kg)			1 000.000	1.000	2.205	35.273			0.001
Libra (lb)			453.592	0.454	1.000	16.000			
Onza (oz)		437.500	28.350			1.000			
t corta				907.180	2 000.000		1.000		0.907
t larga				1 016.000	2 240.000		1.119	1.000	1.016
t métrica				1 000.000	2 205.000		1.101	0.986	1.000

Potencia									
de	a	CV	HP	kW	W	ft lb/s	kg m/s	BTU/s	kcal/s
CV		1.000	0.986	0.736	735.500	542.500	75.000	0.697	0.176
HP		1.014	1.000	0.746	745.700	550.000	76.040	0.706	0.178
kW		1.360	1.341	1.000	1 000.000	737.600	101.980	0.948	0.239
W				0.001	1.000	0.738	0.102		
ft lb/s					1.356	1.000	0.138	0.001	
kg m/s		0.013	0.013	0.009	9.806	7.233	1.000	0.009	0.002
BTU/s		1.434	1.415	1.055	1 055.000	778.100	107.580	1.000	0.252
kcal/s		5.692	5.614	4.186	4 186.000	3 088.000	426.900	3.968	1.000

Presión								
de	a	atmósfera	Kg/cm <sup>2</sup>	lb/in <sup>2</sup>	mm de Hg	in de Hg	m de H <sub>2</sub> O	ft de H <sub>2</sub> O
atmósfera		1.000	1.033	14.696	760.000	29.921	10.330	33.899
kg/cm <sup>2</sup>		0.968	1.000	14.220	735.560	28.970	10.000	32.810
lb/in <sup>2</sup>		0.068	0.070	1.000	51.816	2.036	0.710	2.307
mm de Hg		0.001	0.001	0.019	1.000	0.039	0.013	0.044
in de Hg		0.033	0.035	0.491	25.400	1.000	0.345	1.133
m de agua		0.096	0.100	1.422	73.560	2.896	1.000	3.281
ft de agua		0.029	0.030	0.433	22.430	0.883	0.304	1.000

Energía									
de	a	CV hora	HP hora	kW hora	J	ft.lb	kgm	BTU	kcal
CV hora		1.000	0.986	0.736				2 510.000	632.500
HP hora		1.014	1.000	0.746				2 545.000	641.200
kW hora		1.360	1.341	1.000				3 413.000	860.000
J					1.000	0.738	0.102		
ft.lb					1.356	1.000	0.138		
kgm					9.806	7.233	1.000		
BTU					1 054.900	778.100	107.580	1.000	0.252
kcal					4 186.000	3 087.000	426.900	426.900	1.000

Transmisividad				
de	a	cm <sup>2</sup> /s	gal/día/pie	m <sup>2</sup> /día
cm <sup>2</sup> /s		1.000	695.694	8.640
gal/día/ft		0.001	1.000	0.012
m <sup>2</sup> /día		0.116	80.520	1.000

Conversión de pies y pulgadas, a metros												
ft, in/m	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0.000	0.025	0.051	0.076	0.102	0.127	0.152	0.178	0.203	0.229	0.254	0.279
1	0.305	0.330	0.356	0.381	0.406	0.432	0.457	0.483	0.508	0.533	0.559	0.584
2	0.610	0.635	0.660	0.686	0.711	0.737	0.762	0.787	0.813	0.838	0.864	0.889
3	0.914	0.940	0.965	0.991	1.016	1.041	1.067	1.092	1.117	1.143	1.168	1.194
4	1.219	1.245	1.270	1.295	1.321	1.346	1.372	1.397	1.422	1.448	1.473	1.499
5	1.524	1.549	1.575	1.600	1.626	1.651	1.676	1.702	1.727	1.753	1.778	1.803
6	1.829	1.854	1.880	1.905	1.930	1.956	1.981	2.007	2.032	2.057	2.083	2.108
7	2.134	2.159	2.184	2.210	2.235	2.261	2.286	2.311	2.337	2.362	2.388	2.413
8	2.438	2.464	2.489	2.515	2.540	2.565	2.591	2.616	2.642	2.667	2.692	2.718
9	2.743	2.769	2.794	2.819	2.845	2.870	2.896	2.921	2.946	2.972	2.997	3.023
10	3.048	3.073	3.099	3.124	3.150	3.175	3.200	3.226	3.251	3.277	3.302	3.327
11	3.353	3.378	3.404	3.429	3.454	3.480	3.505	3.531	3.556	3.581	3.607	3.632
12	3.658	3.683	3.708	3.734	3.759	3.785	3.810	3.835	3.861	3.886	3.912	3.937
13	3.962	3.988	4.013	4.039	4.064	4.089	4.115	4.140	4.166	4.191	4.216	4.242
14	4.267	4.293	4.318	4.343	4.369	4.394	4.420	4.445	4.470	4.496	4.521	4.547
15	4.572	4.597	4.623	4.648	4.674	4.699	4.724	4.750	4.775	4.801	4.826	4.851
16	4.877	4.902	4.928	4.953	4.978	5.004	5.029	5.055	5.080	5.105	5.131	5.156
17	5.182	5.207	5.232	5.258	5.283	5.309	5.334	5.359	5.385	5.410	5.436	5.461
18	5.486	5.512	5.537	5.563	5.588	5.613	5.639	5.664	5.690	5.715	5.740	5.766
19	5.791	5.817	5.842	5.867	5.893	5.918	5.944	5.969	5.994	6.020	6.045	6.071
20	6.096	6.121	6.147	6.172	6.198	6.223	6.248	6.274	6.299	6.325	6.350	6.375
21	6.401	6.426	6.452	6.477	6.502	6.528	6.553	6.579	6.604	6.629	6.655	6.680
22	6.706	6.731	6.756	6.782	6.807	6.833	6.858	6.883	6.909	6.934	6.960	6.985
23	7.010	7.036	7.061	7.087	7.112	7.137	7.163	7.188	7.214	7.239	7.264	7.290
24	7.315	7.341	7.366	7.391	7.417	7.442	7.468	7.493	7.518	7.544	7.569	7.595
25	7.620	7.645	7.671	7.696	7.722	7.747	7.772	7.798	7.823	7.849	7.874	7.899
26	7.925	7.950	7.976	8.001	8.026	8.052	8.077	8.103	8.128	8.153	8.179	8.204
27	8.230	8.255	8.280	8.306	8.331	8.357	8.382	8.407	8.433	8.458	8.484	8.509
28	8.534	8.560	8.585	8.611	8.636	8.661	8.687	8.712	8.738	8.763	8.788	8.814
29	8.839	8.865	8.890	8.915	8.941	8.966	8.992	9.017	9.042	9.068	9.093	9.119
30	9.144	9.169	9.195	9.220	9.246	9.271	9.296	9.322	9.347	9.373	9.398	9.423
31	9.449	9.474	9.500	9.525	9.550	9.576	9.601	9.627	9.652	9.677	9.703	9.728
32	9.754	9.779	9.804	9.830	9.855	9.881	9.906	9.931	9.957	9.982	10.008	10.033
33	10.058	10.084	10.109	10.135	10.160	10.185	10.211	10.236	10.262	10.287	10.312	10.338
34	10.363	10.389	10.414	10.439	10.465	10.490	10.516	10.541	10.566	10.592	10.617	10.643
35	10.668	10.693	10.719	10.744	10.770	10.795	10.820	10.846	10.871	10.897	10.922	10.947

La segunda columna es la conversión de pies a metros; las siguientes columnas son la conversión de pulgadas a metros que se suman a la anterior conversión.

Tabla de conversión de pulgadas a milímetros								
Pulgadas	0	1/8	1/4	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8
0	0	3.175	6.35	9.525	12.7	15.875	19.05	22.225
1	25.4	28.575	31.75	34.925	38.1	41.275	44.45	47.625
2	50.8	53.975	57.15	60.325	63.5	66.675	69.85	73.025
3	76.2	79.375	82.55	85.725	88.9	92.075	95.25	98.425
4	101.6	104.775	107.95	111.125	114.3	117.475	120.65	123.825
5	127.0	130.175	133.35	136.525	139.7	142.875	146.05	149.225
6	152.4	155.575	158.75	161.925	165.1	168.275	171.45	174.625
7	177.8	180.975	184.15	187.325	190.5	193.675	196.85	200.025
8	203.2	206.375	209.55	212.725	215.9	219.075	222.25	225.425
9	228.6	231.775	234.95	238.125	241.3	244.475	247.65	250.825
10	254.0	257.175	260.35	263.525	266.7	269.875	273.05	276.225
11	279.4	282.575	285.75	288.925	292.1	295.275	298.45	301.625
12	304.8	307.975	311.15	314.325	317.5	320.675	323.85	327.025
13	330.2	333.375	336.55	339.725	342.9	346.075	349.25	352.425
14	355.6	358.775	361.95	365.125	368.3	371.475	374.65	377.825
15	381.0	384.175	387.35	390.525	393.7	396.875	400.05	403.225
16	406.4	409.575	412.75	415.925	419.1	422.275	425.45	428.625
17	431.8	434.975	438.15	441.325	444.5	447.675	450.85	454.025
18	457.2	460.375	463.55	466.725	469.9	473.075	476.25	479.425
19	482.6	485.775	488.95	492.125	495.3	498.475	501.65	504.825
20	508.0	511.175	514.35	517.525	520.7	523.875	527.05	530.225
21	533.4	536.575	539.75	542.925	546.1	549.275	552.45	555.625
22	558.8	561.975	565.15	568.325	571.5	574.675	577.85	581.025
23	584.2	587.375	590.55	593.725	596.9	600.075	603.25	606.425
24	609.6	612.775	615.95	619.125	622.3	625.475	628.65	631.825
25	635.0	638.175	641.35	644.525	647.7	650.875	654.05	657.225
26	660.4	663.575	666.75	669.925	673.1	676.275	679.45	682.625
27	685.8	688.975	692.15	695.325	698.5	701.675	704.85	708.025
28	711.2	714.375	717.55	720.725	723.9	727.075	730.25	733.425
29	736.6	739.775	742.95	746.125	749.3	752.475	755.65	758.825
30	762.0	765.175	768.35	771.525	774.7	777.875	781.05	784.225

Fórmulas generales para la conversión de los diferentes sistemas

Centígrados a Fahrenheit	$^{\circ}\text{F}=9/5^{\circ}\text{C}+32$
Fahrenheit a Centígrados	$^{\circ}\text{C}=5/9 (^{\circ}\text{F}-32)$
Réaumur a Centígrados	$^{\circ}\text{C}=5/4 ^{\circ}\text{R}$
Fahrenheit a Réaumur	$^{\circ}\text{R}=4/9 (^{\circ}\text{F}-32)$
Réaumur a Fahrenheit	$^{\circ}\text{F}=(9/4^{\circ}\text{R})+32$
Celsius a Kelvin	$^{\circ}\text{K}=273.15+^{\circ}\text{C}$
Fahrenheit a Rankine	$^{\circ}\text{Ra}=459.67+^{\circ}\text{F}$
Rankine a Kelvin	$^{\circ}\text{K}=5/9^{\circ}\text{Ra}$

Factores químicos de conversión					
	A	B	C	D	E
Constituyentes	epm a ppm	ppm a epm	epm a gpg	gpg a epm	ppm a ppm CaCO <sub>3</sub>
calcio Ca <sup>+2</sup>	20.04	0.04991	1.1719	0.8533	2.4970
hierro Fe <sup>+2</sup>	27.92	0.03582	1.6327	0.6125	1.7923
magnesio Mg <sup>+2</sup>	12.16	0.08224	0.7111	1.4063	4.1151
potasio K <sup>+1</sup>	39.10	0.02558	2.2865	0.4373	1.2798
sodio Na <sup>+1</sup>	23.00	0.04348	1.3450	0.7435	2.1756
bicarbonato (HCO <sub>3</sub> ) <sup>-1</sup>	61.01	0.01639	3.5678	0.2803	0.8202
carbonato (CO <sub>3</sub> ) <sup>-2</sup>	30.00	0.03333	1.7544	0.5700	1.6680
cloro (Cl) <sup>-1</sup>	35.46	0.02820	2.0737	0.4822	1.4112
hidróxido (OH) <sup>-1</sup>	17.07	0.05879	0.9947	1.0053	2.9263
nitrato (NO <sub>3</sub> ) <sup>-1</sup>	62.01	0.01613	3.6263	0.2758	0.8070
fosfato (PO <sub>4</sub> ) <sup>-3</sup>	31.67	0.03158	1.8520	0.5400	1.5800
sulfato (SO <sub>4</sub> ) <sup>-2</sup>	48.04	0.02082	2.8094	0.3559	1.0416
bicarbonato de calcio Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	805.00	0.01234	4.7398	0.2120	0.6174
carbonato de calcio (CaCO <sub>3</sub> )	50.04	0.01998	2.9263	0.3417	1.0000
cloruro de calcio (CaCl <sub>2</sub> )	55.50	0.01802	3.2456	0.3081	0.9016
hidróxido de calcio Ca(OH) <sub>2</sub>	37.05	0.02699	2.1667	0.4615	1.3506
sulfato de calcio (CaSO <sub>4</sub> )	68.07	0.01469	3.9807	0.2512	0.7351
bicarbonato férrico Fe(HCO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	88.93	0.01124	5.2006	0.1923	0.5627
carbonato férrico Fe <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	57.92	0.01727	3.3871	0.2951	0.8640
sulfato férrico Fe <sub>2</sub> (CO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	75.96	0.01316	4.4421	0.2251	0.6588
bicarbonato magnésico Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	73.17	0.01367	4.2789	0.2337	0.6839
carbonato magnésico (MgCO <sub>3</sub> )	42.16	1.02372	2.4655	0.4056	1.1869
cloruro de magnesio (MgCl <sub>2</sub> )	47.62	0.02100	2.7848	0.3591	1.0508
hidróxido de magnesio Mg(OH) <sub>2</sub>	29.17	0.03428	1.7058	0.5862	1.7155
sulfato de magnesio (MgSO <sub>4</sub> )	60.20	0.01661	3.5202	0.2841	0.6312

epm = equivalentes por millón

ppm = partes por millón

gpg = granos por galón

p.p.m. CaCO<sub>3</sub> = partes por millón de carbonato de calcio



# ILUSTRACIONES

Ilustración 1.1 Ejemplos de acondicionamiento (parte superior izquierda), espesamiento (parte superior derecha), y equipo de deshidratación (parte inferior)	2
Ilustración 1.2 Lodos deshidratados (torta) y biosólidos	3
Ilustración 1.3 Desarenador de vórtice (ciclón)	3
Ilustración 1.4 Equipo y material de laboratorio para la medición de sólidos totales y volátiles	5
Ilustración 2.1 Acondicionamiento de Lodos - coagulación y floculación (Water Environment Federation, 2001)	8
Ilustración 2.2 Ejemplo de la utilización de polímeros de carga diferente en el acondicionamiento de lodos (Water Environment Federation, 2001)	9
Ilustración 2.3 Aparato de prueba de jarras.	11
Ilustración 2.4 Aparato utilizado para la prueba de tiempo de filtración	12
Ilustración 2.5 Almacenamiento de cal	15
Ilustración 2.6 Equipos de apagado – Cal (Water Environment Federation, 2001)	15
Ilustración 2.7 Tanque de almacenamiento de cloruro férrico	17
Ilustración 2.8 Equipos para el espesamiento y deshidratación. (a) Unidad de flotación por aire disuelto, (b) centrifuga, (c) filtro prensa de banda, (d) filtro de presión	18
Ilustración 2.9 Representación visual de la molécula de polímero	19
Ilustración 2.10 Sistema de alimentación de polímero seco. (Water Environment Federation, 2001)	21
Ilustración 2.11 Tubería diseñada con múltiples puntos de aplicación de polímero (Water Environment Federation, 2001)	22
Ilustración 2.12 Equipo para romper la emulsión y unidad de alimentación de polímero	22
Ilustración 2.13 Bombas para la transferencia y alimentación de polímeros	23
Ilustración 2.14 Equipo de protección del operador	24
Ilustración 2.15 Componentes del espesador por gravedad (Water Environment Federation, 2001)	27
Ilustración 2.16 Partes que conforman un espesador por gravedad. (Water Environment Federation, 1998)	27
Ilustración 2.17 Problemas que presentan los espesadores, (a) formación de algas y (b) formación de espuma y grasa	34
Ilustración 2.18 Espesador de bandas por gravedad	38
Ilustración 2.19 Esquema de un espesador de bandas por gravedad	39
Ilustración 2.20 Espesador de bandas en funcionamiento se observan los arados y la capa de lodo sobre la banda	39
Ilustración 2.21 Zonas de procesamiento de filtro prensa de banda	49
Ilustración 2.22 Filtro prensa de banda (rasquetas)	50

Ilustración 2.23 Sistema de lavado de rociado de filtro prensa de banda	50
Ilustración 2.24 Sistemas de control del filtro prensa de bandas	50
Ilustración 2.25 Sistema de lavado de los filtros prensa de banda. (Water Environment Federation, 2001)	51
Ilustración 2.26 Trituradoras en línea para sólidos	52
Ilustración 2.27 Bomba de cavidad progresiva	52
Ilustración 2.28 Puntos para controlar el desempeño del filtro prensa de bandas. (WEF,2001)	56
Ilustración 2.29 Lecho de secado de arena típico, (WEF, et al., 2012)	64
Ilustración 3.1 Sistemas de aeración con difusores	72
Ilustración 3.2 Instalación típica de un tubo de aspiración en Paris, Illinois	73
Ilustración 3.3 Vistas de planta y secciones del reactor aerobio en Paris, Illinois. El reactor aerobio es de 14 m (45 ft) de diámetro por 9.4 m (31 ft) de profundidad (Daigger, Graef, & Eike, 1997)	73
Ilustración 3.4 Aerador mecánico superficial	74
Ilustración 3.5 Aerador mecánico sumergible	74
Ilustración 3.6 Soplador centrífugo	75
Ilustración 3.7 Soplador rotatorio de desplazamiento positivo	75
Ilustración 3.8 Distribución del flujo de aire para un sistema de estabilización aerobia con previo espesamiento (Daigger G. , et al, 1999)	75
Ilustración 3.9 Opción de desaguado, tratamiento de lodos en dos etapas (Daigger G. , et al 1999)	76
Ilustración 3.10 Opción de manejo del lodo, estabilización aerobia en tres etapas (Daigger G. , et al, 1999)	77
Ilustración 3.11 Efecto de la duración del ciclo anóxico en la concentración de nitrógeno total en el sobrenadante (WEF, 2008)	80
Ilustración 3.12 Efecto del pH en un reactor aerobio (O.D. = oxígeno disuelto) (Daigger G. , et al 1999)	81
Ilustración 3.13 Conclusiones del estudio del efecto de la temperatura en el desempeño de reactores aerobios (Daigger G. , et al., 1999)	83
Ilustración 3.14 Diagrama de flujo del proceso de tratamiento de lodos, Plum Creek, Colorado (EBG= espesador de bandas por gravedad) (Daigger, Graef, & Eike, 1997)	84
Ilustración 3.15 Reducción de sólidos volátiles contra la concentración de sólidos y temperatura de Plum Creek , Colorado (Daigger, Graef, & Eike, 1997)	85
Ilustración 3.16 Reducción de los sólidos volátiles (RSV) por mes de cada reactor en serie, Plum Creek, Colorado (Daigger, Graef, & Eike, 1997)	85
Ilustración 3.17 Efecto de la temperatura en la remoción de los SSV con un ciclo anóxico de 8 horas y un tiempo de retención de sólidos (TRS) de 10 días) (Al-Gushain, Hamoda, & El-Ghany, 2004)	86
Ilustración 3.18 Selección del producto del TRS por la temperatura (días °C) para una alimentación con alto contenido de sólidos degradables (Daigger G. , et al., 1999)	91
Ilustración 3.19 Selección del producto del TRS por la temperatura (días °C) para una alimentación con bajo contenido de sólidos degradables (Daigger G. , et al., 1999)	91

Ilustración 3.20 Flexibilidad en la operación de la estabilización aerobia, (Daigger G., et al., 1999)	93
Ilustración 3.21 Esquema del diagrama de flujo de Paris, Illinois (psi = 55 KPa) (Daigger, Graef, & Eike, 1997)	93
Ilustración 3.22 Esquema del sistema pre y post espesamiento. Estabilización durante 28 días a 20°C (DLA. = desecho de lodos activados, EBG= espesador de bandas de gravedad)	94
Ilustración 3.23 a) Formación de espuma en un reactor aerobio de lodos; b) espuma	99
Ilustración 3.24 Operación de un reactor con alta concentración de sólidos. PTAR los Lunas, Nuevo México, en cuatro etapas, sistema de pre-espesamiento, reactores cerrados y con aislamiento (Daigger, Graef, & Eike, 1997)	100
Ilustración 4.1 Proceso bioquímico en la estabilización anaerobia (WEF., 1998)	106
Ilustración 4.2 Proceso de hidrólisis térmica (Water Environment Federation, 2008)	110
Ilustración 4.3 Reactores anaerobios	111
Ilustración 4.4 Reactor en forma de huevo	112
Ilustración 4.5 Cubiertas del reactor (Water Environment Federation, 2008)	113
Ilustración 4.6 Cubierta de membrana	115
Ilustración 4.7 Esquema de un reactor mezclado por bombeo (Water Environment Federation, 2008)	118
Ilustración 4.8 Sistema de bombeo para el mezclado del reactor	118
Ilustración 4.9 Boquilla del sistema de mezclado por bombeo	119
Ilustración 4.10 Sistema de mezclado con impulsores (Water Environment Federation, 2008)	119
Ilustración 4.11 Esquema de mezclado con lanzas. (Water Environment Federation, 2008)	121
Ilustración 4.12 Sistema de mezclado de pistolas de burbujas (Water Environment Federation, 2008)	122
Ilustración 4.13 Sistema de mezclado de pistolas de burbujas	123
Ilustración 4.14 Sistema de mezclado con tubos de aspiración (Water Environment Federation, 2008)	123
Ilustración 4.15 Esquema del sistema de calentamiento interno (Water Environment Federation, 2008)	127
Ilustración 4.16 Esquema del sistema de calentamiento externo (Water Environment Federation, 2008)	128
Ilustración 4.17 Intercambiador de calor de tubos	128
Ilustración 4.18 Intercambiador de calor de carcasa y tubos	129
Ilustración 4.19 Intercambiador de calor de tubos en baño (Water Environment Federation, 2008)	130
Ilustración 4.20 Intercambiador de calor de placas en espiral	130
Ilustración 4.21 Intercambiador de calor tipo cubo	131
Ilustración 4.22 Esquema de la estabilización anaerobia en dos etapas	137
Ilustración 4.23 Deposición de estruvita en tubería	145
Ilustración 4.24 Secuencia de cambios en el reactor (Water Environment Federation, 2008)	148
Ilustración 4.25 Separador de espuma (Water Environment Federation, 2008)	160
Ilustración 4.26 Secador frigorífico	160
Ilustración 4.27 Tratamiento de carbón activado para siloxanos.	161
Ilustración 4.28 Tratamiento del sulfuro de hidrógeno	162
Ilustración 4.29 Convertidor de gas (Deublein & Steinhauser, 2011)	163

Ilustración 4.30	Proceso termodinámico de licuefacción de gas (Deublein, D., y Steinhauser, A., 2011)	165
Ilustración 4.31	Vista superior de diferentes formas de bioreactores (a) cilíndrica vertical, (b) cilíndrica horizontal, (c) toroidal (d) toroidal alargada (Water Environment Federation, 2008)	167
Ilustración 4.32	Tanques que sirven como biorreactores en las plantas de biogás: (a) concreto reforzado en Europa; (b) con dispositivos de calentamiento y agitación dentro de un reactor vertical; (c) tanque al descubierto; (d) biorreactor Thoeni Kompogas en una planta en Austria; (e) biorreactor sencillo en Filipinas	168
Ilustración 4.33	Diseños de reactores para la degradación de lodos de aguas residuales (Deublein & Steinhauser, 2011)	169
Ilustración 4.34	Torres de estabilización: (a, b) bioreactores de formas clásicas para la degradación de lodos de aguas residuales. Hyperion Sewage Treatment Plant, Los Angeles California; y PTAR de León Guanajuato (a y b, respectivamente); (c) biorreactores de formas modernas para la degradación de lodos de aguas residuales; (d) torres de estabilización en Alemania; (e) construcción del armazón del tercio inferior de la torre de estabilización en Austria	170
Ilustración 4.35	Tanque de ladrillo: a) cúpula de gas; b) cubierta flotante (Deublein & Steinhauser, 2011)	172
Ilustración 4.36	Sistema de conductos de pared (Deublein & Steinhauser, 2011)	174
Ilustración 4.37	Almacenador de gas de membrana	176
Ilustración 4.38	Esfera de acero para el almacenamiento del gas	176
Ilustración 4.39	Trampa para llamas	182
Ilustración 4.40	Válvula de cierre térmico	182
Ilustración 4.41	Válvula reguladora de presión y vacío	182
Ilustración 4.42	Quemador de flama	182
Ilustración 4.43	Bengala de combustión controlada	182
Ilustración 4.44	Indicador de presión	183
Ilustración 4.45	Válvula de contrapresión	183
Ilustración 4.46	Quemador de gas residual	183
Ilustración 4.47	Válvula de retención de baja presión	183
Ilustración 4.48	Bengala para altas temperaturas (1050°C) con la llama oculta	183
Ilustración 4.49	Dispositivos de seguridad frente a la bengala o quemador de gas (Deublein & Steinhauser, 2011)	184
Ilustración 4.50	Dispositivos de seguridad para altas y bajas presiones en una planta de gas: (a) tubo en "U"; (b) Bioguard <sup>®</sup> (Deublein & Steinhauser, 2011).	184
Ilustración 4.51	Válvula de membrana para regular presiones altas y bajas en una planta de biogás (Deublein & Steinhauser, 2011)	185
Ilustración 4.52	Límite de explosión a 25°C (Deublein & Steinhauser, 2011)	187
Ilustración 4.53	Áreas explosivas en las plantas de biogás (Deublein, D., y Steinhauser, A., 2011)	188
Ilustración 4.54	Purificación biológica del aire de escape (Deublein & Steinhauser, 2011)	192
Ilustración 5.1	Método de área para construir un relleno sanitario	197

Ilustración 5.2 Relleno sanitario terminado y construido mediante la combinación de los métodos de trinchera y área	198
Ilustración 5.3 Método de trinchera para construir un relleno sanitario	202
Ilustración 5.4 Método de trinchera e inicio del llenado	203
Ilustración 5.5 Trinchera en operación. Se observa la colocación del material de excavación, la descarga del lodo, las estacas de señalización, y la preparación de futuras trincheras	204
Ilustración 5.6 Excavadora	214
Ilustración 5.7 Cargador frontal de neumáticos y/o de cadena	215
Ilustración 5.8 Cargadores de orugas	216
Ilustración 5.9 Tractor de oruga o cadena	217
Ilustración 5.10 Compactador con ruedas metálicas	219
Ilustración 5.11 Herramientas de trabajo	220
Ilustración 5.12 Implementos de protección personal	221
Ilustración 5.13 Reparación de depresiones	225
Ilustración 5.14 Reparación de grietas	226
Ilustración 5.15 Cubierta vegetal	228
Ilustración 5.16 Báscula	230
Ilustración 5.17 Cerca perimetral	231
Ilustración 5.18 Ejemplo de una cubierta final EPA (1995)	239
Ilustración 5.19 Ejemplo de una cubierta final con conductividad hidráulica ( $k$ ) < $k$ del fondo (EPA, 1995)	240
Ilustración 5.20 Un sistema pasivo de recolección de gas en un relleno sanitario (adoptado de USEPA 1996)	247
Ilustración 5.21 Recuperación de biogás de un relleno sanitario por un sistema de recolección de gas "activo" (adoptado de USEPA 2011)	248
Ilustración 5.22 Diagrama de flujo de un sistema de lavado con agua para remoción de $\text{CO}_2$ y $\text{H}_2\text{S}$ (adoptado de Kruger et al. 2010)	249
Ilustración 5.23 Diagrama de flujo de un sistema basado en tamices moleculares (adaptados de Kruger et al. 2010)	251
Ilustración 5.24 Un proceso típico de purificación de biogás con membranas (adoptado de Kruger et al. 2010)	251
Ilustración 5.25 Un sistema típico de biofiltro para la eliminación de $\text{H}_2\text{S}$ (adoptado de Soroushian et al. 2006)	252
Ilustración 5.26 Vías por las que el metano se libera de rellenos sanitarios	254
Ilustración 5.27 Esquema de un relleno sanitario como biorreactor y con la recirculación de lixiviados (adoptado de USEPA 1995)	258



# TABLAS

Tabla 1.1 Ejemplos de los resultados de deshidratación obtenidos con diversos tipos de lodos. (WEF, 2001)	4
Tabla 2.1 Opciones de almacenamiento para los acondicionadores (Water Environment Federation, 2001)	9
Tabla 2.2 Pruebas que se utilizan para optimizar el funcionamiento de los diversos tipos de equipos de manejo de lodos	12
Tabla 2.3 Comparación de tipos de polímeros	20
Tabla 2.4 Concentración típica de sólidos a la salida del espesador por gravedad. (Water Environment Federation, 2001)	26
Tabla 2.5 Parámetros de operación recomendados para los espesadores por gravedad	28
Tabla 2.6 Características de la fuente de lodos y sólidos totales (Water Environment Federation, 2001)	30
Tabla 2.7 Rendimiento a gran escala del espesador por gravedad	30
Tabla 2.8 Espesador por gravedad guía de solución de problemas	35
Tabla 2.9 Variables que afectan el rendimiento del espesador por gravedad	41
Tabla 2.10 Rangos típicos de desempeño de los espesadores por gravedad	45
Tabla 2.11 Rangos de carga hidráulica típica para el espesador por gravedad	45
Tabla 2.12 Características de los espesadores en operación que trabajan con una mezcla de lodos	45
Tabla 2.13 Guía de solución de problemas para el filtro de bandas por gravedad	46
Tabla 2.14 Desempeño esperado del filtro prensa de bandas con varios tipos de lodos	56
Tabla 2.15 Causas y prevención de los problemas de funcionamiento de los filtros prensa de banda	61
Tabla 2.16 Ventajas y desventajas de lechos de secado de lodos	63
Tabla 2.17 Guía de solución de problemas para lechos de arena	67
Tabla 3.1 Resumen de las ecuaciones que describen los procesos de nitrificación y desnitrificación (Daigger, Graef, & Eike, 1997)	79
Tabla 3.2 Datos de operación de reactores aerobios de lodos que tratan mezclas de lodo primario y lodos activados (EPA, 1978)	87
Tabla 3.3 Características aceptables del sobrenadante de un sistema de estabilización aerobia (Metcalf & Eddy, 2002)	88
Tabla 3.4 Dosis de polímeros adicionados al filtro prensa de bandas y a la centrifuga de taza sólida para el desaguado de lodos (Water Environment Federation, 2008)	89
Tabla 3.5 Valores recomendados para el monitoreo parámetros primarios y secundarios (Stegge & Bailey, 2003)	96
Tabla 3.6 Guía para la solución de problemas en los reactores aerobios de lodos (EPA, 1978)	98
Tabla 4.1 Características de las cubiertas del reactor (Water Environment Federation, 2008)	115

Tabla 4.2	Micronutrientes requeridos para el arranque de un reactor anaerobio (Moreno Rodríguez, Espinoza Fuentes, & Briones Méndez , 2007)	134
Tabla 4.3	Actividad metanógena específica y concentración de diversos tipos de lodos (Moreno Rodríguez, Espinoza Fuentes, & Briones Méndez , 2007)	135
Tabla 4.4	Monitoreo del reactor (Water Environment Federation , 2008)	136
Tabla 4.5	Efecto del nitrógeno amoniacal en la estabilización anaerobia (Environmental Protection Agency (EPA), 1979)	141
Tabla 4.6	Concentración total de metales individuales requeridos para inhibir la estabilización anaerobia (Environmental Protection Agency (EPA), 1979)	141
Tabla 4.7	Concentraciones estimulantes e inhibitorias de cationes metálicos ligeros (Environmental Protection Agency (EPA), 1979)	141
Tabla 4.8	Guía de solución de problemas (Water Environment Federation, 2008)	149
Tabla 4.9	Propiedades físicas y químicas del metano (Water Environment Federation, 2008)	157
Tabla 4.10	Compresores de biogás (Deublein & Steinhauser, 2011)	166
Tabla 4.11	Equipos de compresión del gas (Water Environment Federation, 2008)	166
Tabla 4.12	Diferentes materiales usados para la construcción de reactores y sus propiedades: resistentes y libres de corrosión ++; resistentes a la corrosión pero no libres de corrosión +; acondicionados para la resistencia a la corrosión pero no libres de esta-; inapropiados -- (Deublein & Steinhauser, 2011)	172
Tabla 4.13	Relación de la mezcla de mortero (Deublein & Steinhauser, 2011)	173
Tabla 4.14	Durabilidad de la protección de concreto aplicada en el fondo y las paredes del depósito con y sin un techo y los costos (Water Environment Federation, 2008)	179
Tabla 4.15	Indicadores y medidores del flujo del gas (Water Environment Federation, 2008)	180
Tabla 4.16	Sistemas de seguridad del gas y dispositivos de control (Water Environment Federation, 2008)	182
Tabla 4.17	Protecciones metálicas (Deublein & Steinhauser, 2011).	189
Tabla 4.18	Corta fuegos (contenedores de gas subterráneos, etc.) ( Deublein, D., y Steinhauser, A., 2011)	190
Tabla 4.19	Corta fuegos (globos contenedores de gas, etc.) (Deublein & Steinhauser, 2011).	190
Tabla 4.20	Emisiones de lodos (sin adoptar medidas para la minimización de las emisiones tales como espuma) (Deublein & Steinhauser, 2011)	191
Tabla 4.21	Toxicidad del sulfuro de hidrógeno (Deublein & Steinhauser, 2011)	191
Tabla 5.1	Prácticas de control ambiental	206
Tabla 5.2	Inclencias meteorológicas problemas y soluciones (Environmental Protection Agency, Octubre 1978)	210
Tabla 5.3	Clasificación del equipo de acuerdo a las funciones que realiza (Environmental Protection Agency, Octubre 1978)	211
Tabla 5.4	Esquemas para la selección de equipo (Environmental Protection Agency, Octubre 1978)	212
Tabla 5.5	Características de la excavadora de orugas (SEDESOL, 2010)	214
Tabla 5.6	Características de los cargadores con neumáticos (SEDESOL, 2010)	215
Tabla 5.7	Características de los cargadores de orugas (SEDESOL, 2010)	216

Tabla 5.8 Características del tractor de oruga o cadenas (SEDESOL, 2010)	217
Tabla 5.9 Características del compactador con ruedas metálicas (SEDESOL, 2010)	219
Tabla 5.10 Pastos recomendados para ser utilizados como cubierta vegetal (SEDESOL, 2010)	228
Tabla 5.11 Mantenimiento preventivo. Gobierno de Antioquía, "Guía para el diseño, Construcción y operación de un relleno sanitario manual", Medellín, Colombia, Abril, 1988	235
Tabla 5.12 Requerimiento de pH	243
Tabla 5.13 Inspección de rellenos de lodos en post-clausura	244
Tabla 5.14 COV potencialmente tóxicos en el biogás (adoptados de Sullivan <i>et al.</i> 2001)	255
Tabla 5.15 Otros compuestos orgánicos volátiles en el biogás, tóxicos, pero en dosis mucho más altas (adoptados de Sullivan <i>et al.</i> 2001)	255
Tabla 5.16 Las características típicas de condensados de gas de relleno sanitario (adoptados de Knox 1990)	256



