

**SISTEMAS DE TRATAMIENTOS PARA LIXIVIADOS GENERADOS EN
RELLENOS SANITARIOS**

MIRONEL DE JESUS CORENA LUNA

**UNIVERSIDAD DE SUCRE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
SINCELEJO
2008**

**SISTEMAS DE TRATAMIENTOS PARA LIXIVIADOS GENERADOS EN
RELLENOS SANITARIOS**

MIRONEL DE JESUS CORENA LUNA

**TRABAJO DE GRADO MODALIDAD MONOGRAFÍA, PRESENTADO
COMO REQUISITO PARA OPTAR EL TITULO DE INGENIERO CIVIL.**

DIRECTOR

DOMINGO GUERRA ZAPA

Ing. CIVIL

Docente Facultad de Ingeniería – UNISUCRE

**LINEA DE PROFUNDIZACIÓN
GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS**

**UNIVERSIDAD DE SUCRE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
SINCELEJO**

2008

NOTA DE ACEPTACIÓN

DIRECTOR

JURADO

JURADO

JURADO

Sincelejo, _____, 2008.

**Únicamente los autores son responsables de las ideas expuestas en este
trabajo Artículo 12, Resolución 023 del 2000**

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por brindarme la sabiduría y ser la luz que ilumina mi vida, la fuerza que me ayuda a salir adelante en todos los momentos difíciles y haberme permitido llegar al lugar en el que en estos momentos estoy.

A mis padres, Mironel Corena Mercado y Vivian Luna Campo, por todo el esfuerzo que realizaron por darme todos mis estudios, por el apoyo que me han brindado durante toda mi vida, ellos son pieza fundamental para poder lograr todo lo que he conseguido.

A mi familia en general, por todo el apoyo y colaboración brindada durante el transcurso de toda mi carrera.

A la Universidad de Sucre, por haberme dado la oportunidad de ingresar a esta bellísima institución y así poder crecer como persona y formarme como profesional.

Al Ingeniero Domingo Guerra, docente y director de este trabajo, por todo el esfuerzo y dedicación que tuvo durante todo el desarrollo del mismo y por toda la asesoría brindada para poder culminar este trabajo.

A mis compañeros, por toda la colaboración brindada en todo el transcurso de la carrera.

A LOS JURADOS, Ing. María José Mogollón, Ing. Guillermo Gutiérrez y al Ing. Tulio Ruiz, por su valioso aporte al evaluar este proyecto.

A todas las personas, que han sido fuente de inspiración y apoyo en los momentos más difíciles de mi vida.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	12
CAPITULO I	
MARCO LEGAL	15
1. GENERALIDADES	17
1.1. RELLENO SANITARIO	17
1.2. PARÁMETROS DE DISEÑO DE UN RELLENO SANITARIO (Manejo de lixiviados) Ras 2000	17
1.3. LIXIVIADOS, COMPOSICIÓN Y GENERACIÓN	19
1.3.1. Composición de Lixiviados	19
1.3.2. Generación de Lixiviados	20
1.4. CAMBIOS EN EL LIXIVIADO DURANTE EL PROCESO DE FORMACIÓN	21
1.5. PROBLEMAS ASOCIADOS EN LA GENERACIÓN DE LIXIVIADOS	23
1.6. CANTIDAD DE LIXIVIADOS	26
2. NECESIDADES NUTRICIONALES PARA EL CRECIMIENTO MICROBIANO	28
2.1. FUENTES DE CARBONO Y ENERGÍA	29
2.2. NECESIDADES DE NUTRIENTES Y FACTORES DE CRECIMIENTO	29
2.3. NUTRICIÓN MICROBIANA Y PROCESOS DE CONVERSIÓN BIOLÓGICA	30
2.4. REQUISITOS AMBIENTALES	31
3. ETAPAS EN LA BIODEGRABILIDAD DE RESIDUOS SÓLIDOS	31
3.1. ETAPA HIDROLÍTICA	32
3.2. ETAPA FERMENTATIVA	32

3.3. FASE ACETOGÉNICA	33
3.4. FASE METANOGENICA	33
4. FACTORES QUE AFECTAN LA PRODUCCIÓN Y CALIDAD DE LIXIVIADOS	36
5. TRATAMIENTOS CONOCIDOS EN LA REDUCCIÓN DE LIXIVIADOS	37
5.1. RECIRCULACIÓN DE LIXIVIADOS	38
5.2. EVAPORACIÓN DE LIXIVIADOS	40
5.3. TRATAMIENTO CONJUNTO CON LAS AGUAS RESIDUALES	43
5.4. TRATAMIENTO BIOLÓGICO AERÓBICO	45
5.5. TRATAMIENTO BIOLÓGICO ANAERÓBICO	46
5.6. SISTEMAS DE MEMBRANAS	48
5.6.1. Biorreactores con Membrana, MBR	48
5.6.2. Osmosis Inversa	50
5.7. PROCESO BIOLÓGICO BIOMEMBRAT	51
5.7.1. Operación Bajo Presión	52
5.7.2. Ultrafiltración	53
5.7.3. Reactores Biológicos	54
5.8. TRATAMIENTOS FÍSICO-QUÍMICOS	55
5.8.1. Precipitación química	55
5.8.2. Oxidación química	56
5.8.3. Adsorción con carbono activo	56
5.8.4. Osmosis inversa	56
5.8.5. Stripping de NH ₃	57
5.9. SISTEMAS NATURALES	57
6. SELECCIÓN A LA ALTERNATIVA AL TRATAMIENTO DE LIXIVIADO	61
7. MÉTODOS CONOCIDOS EN LA ESTIMACIÓN DE LIXIVIADOS	63
7.1. MÉTODO DEL BALANCE HÍDRICO POR TCHOBANOGLOUS	63
7.2. MÉTODO SUIZO	67
7.3. MÉTODO DEL BALANCE HÍDRICO DESARROLLADO POR THOMTHWAITE	70

7.4. MÉTODO DEL BALANCE DE AGUAS	71
8. DISEÑO Y ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DE LAS ESTRUCTURAS DEL SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE LIXIVIADOS	72
8.1. SISTEMAS PARA LA RECOGIDA DE LIXIVIADOS	72
8.1.1. Selección del Sistema de Aislamiento	73
8.1.2. Diseño de instalaciones para la Recogida de Lixiviado	73
8.1.2.1. Terrazas inclinadas	74
8.1.2.2. Fondo con tuberías	76
8.1.2.3. Instalaciones para Separar, Recoger y Almacenar Lixiviados	80
CAPITULO II	
SISTEMAS DE TRATAMIENTOS Y MANEJO DE LIXIVIADOS GENERADOS EN EL RELLENO SANITARIO EL OASIS DE LA CIUDAD SINCELEJO	83
CONCLUSIONES	96
RECOMENDACIONES	97
GLOSARIO	98
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

LISTA DE FIGURAS

PAG

FIGURA 1. Ejemplo de las precipitaciones semanales y de la curva de lixiviados del relleno de Sanne.	28
FIGURA 2. Etapas del proceso de biodegradación de los residuos sólidos.	35
FIGURA 3. Evaporación de lixiviados	41
FIGURA 4. <i>Proceso Biomembrat</i>	51
FIGURA 5. Balance hídrico para la estimación de lixiviados. Metodología de Tchobanoglous.	64
FIGURA 6. Balance hídrico en la cobertura vegetal. Metodología de Tchobanoglous.	66
FIGURA 7. Metodología de Tchobanoglous para estimar la producción de lixiviados.	67
FIGURA 8. Balance de agua en un relleno sanitario	71
FIGURA 9. Esquema del sistema con terrazas inclinadas para la recogida de Lixiviados.	74
FIGURA 10. Detalles del tubo para la recogida de lixiviados	75
FIGURA 11. Sistema típico para la recogida de lixiviado utilizando una tubetia multiple: (a) vista panoramica y (b) detalle de tubos tipicos para la recogida de lixiviados.	77
FIGURA 12. Gestión de aguas pluviales en un vertedero tipo área	78
FIGURA 13. Sistemas utilizados para separar el lixiviado de los vertederos: (a) Tubo para la recogida de lixiviado llevado a través del lateral de un vertedero y (b) Tubo inclinado para la recogida del lixiviado localizado dentro un vertedero. El lixiviado se separa con una bomba.	80
FIGURA 14. Ejemplos de instalaciones para la recogida del lixiviado: (a) Bóveda para la recogida y transmisión de lixiviado y (b) Deposito para la retención de lixiviados.	81
FIGURA 15. Movimientos de tierra realizados con maquinaria pesada.	86
FIGURA 16. Vista de las zanjas para los filtros.	87
FIGURA 17. Impermeabilización del área de influencia de los residuos sólidos.	87
FIGURA 18. Filtros elaborados con gravilla	88
FIGURA 19. Empalme de los filtros con los colectores	88
FIGURA 20. Colocación de las geomembranas	89
FIGURA 21. Geotextil para la impermeabilización de las piscinas de lixiviados	89
FIGURA 22. Proceso de recirculación de lixiviados	90

FIGURA 23. Estación de bombeo, para la recirculación de lixiviados	91
FIGURA 24 Y 25. Mantenimiento a las piscinas de lixiviados y lodos extraídos de las piscinas de lixiviados	92
FIGURA 26. Comportamiento DBO5 en los sitios de muestreo	93
FIGURA 27. Comportamiento DQO en los sitios de muestreo	94
FIGURA 28. Comportamiento de grasas y aceites en los sitios de muestreo.	94
FIGURA 29. Comportamiento de sólidos suspendidos en los sitios de muestreo.	95
FIGURA 30. Comportamiento del PH en los sitios de muestreo.	95

LISTA DE TABLAS

PAG

TABLA 1. Parámetros diseño de un relleno sanitario (manejo de lixiviados)	17
TABLA 2. Composición de líquidos percolados de un relleno sanitario con desechos orgánico.	20
TABLA 3. Parámetros de muestreo de los lixiviados	22
TABLA 4. Efecto negativo en la salud humana de metales existentes en los lixiviados liberados por la descomposición de los residuos sólidos orgánicos en un relleno sanitario húmedo.	24
TABLA 5. Efecto sobre la salud humana de alcoholes lixiviados durante la descomposición de residuos sólidos orgánicos en un relleno sanitario húmedo.	25
TABLA 6. Efecto sobre la salud humana de compuestos orgánicos sintéticos en líquidos lixiviados formados en rellenos sanitarios húmedos.	25
TABLA 7. Cantidad y contenidos de lixiviados de rellenos de desechos domésticos.	27
TABLA 8 Comparación entre tecnologías para el tratamiento de lixiviados. (Complejidad tecnológica)	59
TABLA 9. Comparación entre tecnologías para el tratamiento de lixiviados. (Rendimiento de remoción)	60
TABLA 10. Comparación entre tecnologías para el tratamiento de lixiviados. (Manejo de características problemáticas de lixiviados)	60
TABLA 11. Comparativo de resultados por muestreo (Ene-Abr-2008)	93

INTRODUCCIÓN

La disposición definitiva de los residuos sólidos es, hoy en día, uno de los problemas más importantes que afectan a las sociedades del mundo en términos ambientales¹. En la gran mayoría de las grandes ciudades el acelerado crecimiento demográfico ocasiona un incremento en la demanda de servicios de limpieza, así como la generación de elevadas cantidades de residuos sólidos. Para la disposición final de éstos actualmente se utiliza lo que se llama un relleno sanitario, que es un sitio seleccionado adecuadamente para depositar todos los residuos generados, evitando así su dispersión y ocasionando focos de infección².

Sin embargo a menudo se presentan algunos problemas producto de la degradación de la materia orgánica presente en los residuos sólidos originados por la generación de gases que son formados a partir de la descomposición de los ácidos orgánicos (biogás) y líquidos con altas concentraciones de ácidos orgánicos y materia disuelta en forma de sólidos (lixiviados).

Los lixiviados son líquidos oscuros que se producen por la descomposición de la materia orgánica y el agua que entra al relleno por la precipitación, los cuales al fluir, disuelven sustancias y arrastran partículas contenidas en los residuos.

La composición de los lixiviados varía mucho de acuerdo con el tipo de residuos, las precipitaciones en el área, las velocidades de descomposición química y otras condiciones del lugar, pero todos coinciden en poseer una alta carga orgánica.

¹ COLMENARES MAYANGA. Wagner; SANTOS NONILLA. Krin. Generación y manejo de lixiviados en sitios de disposición final.

² http://www.ingenieriaquimica.org/articulos/relleno_sanitario

La degradación de los residuos para la producción de lixiviados ocurre en dos etapas biológicas: aeróbica y anaeróbica.

El lixiviado producido durante la fase aeróbica es formado por la humedad de la basura durante la compactación y construcción de celdas, está constituido principalmente por partículas, sales disueltas inicialmente presentes en el relleno y la presencia de cantidades relativamente pequeñas de especies orgánicas.

Durante la degradación anaerobia inicial, prevalece la fermentación ácida, obteniéndose un lixiviado de bajo pH (debido a la producción de ácidos grasos volátiles y la alta presión parcial de CO_2), alta concentración de ácidos volátiles y considerables concentraciones de iones inorgánicos que son resultado de la solubilización de materiales disponibles en la basura.

Existen varios antecedentes de tratamiento aerobio y anaerobio de lixiviados, que van desde experiencias a escala laboratorio hasta experiencias a escala real. El tipo de tratamiento aerobio más extendido es Lodos Activados o Lagunas Aireadas. Otro Sistema Aerobio utilizado para el tratamiento de los lixiviados es el Reactor de Biodiscos o RBC (Contactador Biológico Rotante). En cuanto al tratamiento anaerobio de lixiviado, el sistema de mayor difusión es el Reactor UASB, el cual ha reportado muy buenos resultados³.

El presente trabajo tiene por objetivo conocer y describir cada unas de las alternativas de tratamiento para los lixiviados generados en los rellenos sanitarios, con el propósito de resaltar los sistemas mas adecuados, para la preservación y conservación del medio ambiente.

³ GIRALDO, Eugenio. Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios. Universidad de los Andes.2002.

Capitulo I

MARCO LEGAL

- Ley 23 del 12 de diciembre de 1973. por la cual se conceden facultades extraordinarias al Presidente de la República para expedir el código de recursos naturales y de protección al medio ambiente y se dictan otras disposiciones.
- Decreto 2811 de Diciembre 18 de 1974, Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.
- LEY 9 de Enero 24 de 1979. por la cual se dictan Medidas Sanitarias.
- Decreto 1594 de Junio 26 de 1984. Por el cual se reglamenta parcialmente el título I de la Ley 9 de 1979, así como el capítulo II del título VI - parte III - libro II y el título III de la parte III - libro I - del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y vertimientos de residuos líquidos.
- Ley 99 de Diciembre 22 de 1993. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones.

- Ministerio del Medio Ambiente. Resolución 0058. (enero 21 de 2002). por la cual se establecen normas y límites máximos permisibles de emisión para incineradores y hornos crematorios de residuos sólidos y líquidos.
- DECRETO 1220 DE 2005(abril 21), por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales.
- Que mediante Decreto N° 1713 de 6 de agosto de 2002, el Gobierno Nacional reglamento la Ley 142 de 1994, Ley 632 de 2000 y la Ley 689 de 2001, en relación con la prestación del Servicio Público de Aseo, y el Decreto Ley 2811 de 1994 y la Ley 99 de 1993 en relación con la Gestión Integral de Residuos Sólidos.
- Que mediante Resolución N° 1045 del 26 septiembre de 2003, el Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial adopto la metodología para la elaboración de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos PGIRS, establece los plazos para iniciar la implementación de los PGISR y para la clausura y restauración ambiental de los botaderos a cielo abierto y de los sitios de disposición final de Residuos Sólidos que no cumplan con la Normatividad Vigente a su adecuación a Rellenos Sanitarios.

1. GENERALIDADES

2.1. RELLENO SANITARIO

Lugar técnicamente diseñado para la disposición final controlada de los residuos sólidos, sin causar peligro, daño o riesgo a la salud pública, minimizando los impactos ambientales y utilizando principios de ingeniería. Confinación y aislamiento de los residuos sólidos en un área mínima, con compactación de residuos, cobertura diaria de los mismos, control de gases y lixiviados, y cobertura final.

2.2. PARAMETROS DE DISEÑO DE UN RELLENO SANITARIO (MANEJO DE LIXIVIADOS)

A continuación en la tabla N° 1 se muestran los parámetros de diseño de un relleno sanitario en cuanto al manejo de líquidos lixiviados, según el Reglamento Técnico del Sector Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000.

TABLA 1. PARAMETROS DE DISEÑO DE UN RELLENO SANITARIO.

ITEM	Aspecto Técnico	Especificación	Referencia
1	Generación de lixiviados	<p>Debe aplicarse un modelo matemático para conocer de manera confiable la cantidad de lixiviados a generarse en el relleno sanitario, tanto en la operación como en el cerramiento a 20 años.</p> <p>Para determinar la generación de lixiviados, debe tomarse en cuenta los factores climatológicos, así como las características de los residuos, las características del material de cobertura, las características de la operación, las características del cerramiento final y el mantenimiento a largo plazo de éste. Debe hacerse un análisis de escenarios de trabajo para las diferentes características mencionadas, incluyendo operaciones adecuadas e inadecuadas del sistema.</p> <p>De manera específica debe tenerse en cuenta las infiltraciones de aguas lluvias, de escorrentía y de nivel freático al relleno. El modelo a utilizar para la generación de lixiviados debe igualmente considerar la generación de éstos por efectos de la descomposición de la fracción orgánica de los residuos en el relleno. Deben igualmente verificarse</p>	F.6.3.6

		las capacidades de drenaje del sistema para garantizar que el lixiviado producido se pueda evacuar.	
2	Impermeabilización	<p>Capa de arcilla y geomembrana.</p> <p>Especificaciones capa de arcilla: Construidas de materiales de suelos naturales, aunque la capa puede contener materiales procesados como bentonita o materiales sintéticos. Esta capa debe tener un espesor mínimo de 1 m. Debe lograrse una masa homogénea con una conductividad hidráulica menor o igual a 1×10^{-7} cm/s, compactando el suelo con un contenido de humedad de 2% a 3% por encima de la humedad óptima y con un alto nivel de energía de compactación. El material a utilizar debe tener como mínimo las siguientes características:</p> <ul style="list-style-type: none"> • % finos $\geq 20\%$ - 30% • Índice de plasticidad $\geq 20\%$ • Porcentaje de suelo grueso $\leq 30\%$ • Tamaño máximo de partícula = 25 mm a 50 mm <p>Especificaciones geomembrana: Compatibilidad química con los lixiviados del rellenos, se deben diseñar teniendo en cuenta los siguientes factores y criterios de seguridad:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Espesor $F_s = t \text{ act.} / t_{req.}$ • Esfuerzo de subsidencia $F_s = \alpha \text{ act.} / \alpha_{req.}$ • Esfuerzo de Tensión. $F_s = T_{act} / T_{req.}$ • Anclaje 	F.6.4.3
3	Drenaje de lixiviado	<p>El sistema de recolección de Lixiviados debe calcularse con el caudal máximo de lixiviado y el de agua de escorrentía.</p> <p>1. Drenaje de lixiviados para los niveles bajo y medio de complejidad. Después de realizar la impermeabilización del fondo y de las paredes laterales, debe construirse un sistema de drenaje en el terreno, Construcción del sistema de drenaje. El sistema de drenaje debe ser una red horizontal de zanjas en grava gruesa.</p> <p>Para la construcción de los drenes, debe realizarse el trazado donde se ubica el drenaje en el terreno, similar al de un sistema de alcantarillado. La pendiente del fondo es del 2%. Deben llenarse las zanjas con piedra de 10 cm a 15 cm, que permitan más espacios libres, y eviten su rápida colmatación. Se recomienda colocar a continuación un material que permita infiltrar los líquidos y retener las partículas finas que lo puedan colmatar.</p> <p>2. El sistema de drenaje de lixiviados para los niveles alto y medio alto de complejidad debe considerar los siguientes componentes:</p> <ol style="list-style-type: none"> a) Área recolectora. El área recolectora cubre la superficie del área impermeabilizada y recoge el lixiviado. Debe consistir de un estrato de arena de 0.30 m de espesor con una permeabilidad mínima de 10^{-2} cm/s, localizado en el fondo del relleno. b) Recolectores laterales. Se requieren para mantener la cabeza de 0.30 m; para lo cual los recolectores laterales deben ser tubos perforados, de manera que el lixiviado sea c) conducido a los sumideros para ser removido del relleno sanitario. La pendiente de los recolectores laterales debe ser mayor de 2%. 	F.6.4.4.2

Fuente: RAS. 2000

2.3. LIXIVIADOS, COMPOSICIÓN Y GENERACIÓN

Los lixiviados son líquidos que se generan por la liberación del exceso de agua de los residuos sólidos y por la percolación de agua pluvial a través de los estratos de residuos sólidos que se encuentran en las fases de composición. El lixiviado es considerado como el principal y gran contaminante generado en un relleno.

1.3.1. Composición de Lixiviados

Los lixiviados en el relleno arrastran a su paso material disuelto, en suspensión, fijo o volátil, lo que provoca que tengan elevadas cargas orgánicas y un color que varía desde café-pardo-grisáceo cuando están frescos hasta un color negro viscoso cuando envejecen. Se reportan concentraciones tan elevadas como 60,000 mg/l de DQO. Los lixiviados también poseen elevadas concentraciones de sales inorgánicas (cloruro de sodio y carbonatos) y de metales pesados. Varios estudios indican que el carbono orgánico en forma coloidal tiene el potencial de adsorber altas concentraciones de metales en su superficie, por lo que actúan como transporte de metales traza en los lixiviados⁴.

⁴Méndez R Artículo de Investigación *et. al.* / Ingeniería 6-2 (2002) 7-12

TABLA 2. Composición de líquidos percolados de un relleno sanitario con desechos Orgánicos.

Componentes	Rango (mg/l)
Cloruros	100 - 400
Cobre	0 - 9
Fierro	50 - 600
Flúor	0 - 1
Cadmio	0 - 17
Cromo (VI)	2
Plomo	2
Sodio	200 - 2000
Sulfatos	100 - 1500
Nitratos	5 - 40
Dureza (CaCO ₃)	300 - 10000
DBO	2000 - 30000
DQO	3000 - 45000
pH	5.3 - 8.5

Fuente: <http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/residuos.html>

1.3.2. Generación de Lixiviados:

Al depositarse los residuos en los rellenos, éstos comienzan a descomponerse mediante una serie de procesos químicos complejos. Los productos principales de la descomposición son los líquidos lixiviados. Los líquidos pueden afectar la salud de las poblaciones de los alrededores. Los líquidos lixiviados se forman mediante el percolado de líquidos (como por ejemplo, agua de lluvia) a través de sustancias en proceso de descomposición. El líquido, al fluir, disuelve algunas sustancias y arrastra partículas con otros compuestos químicos. Los ácidos orgánicos formados en ciertas etapas de la descomposición contenidos en el lixiviado (como ácido

acético, láctico o fórmico) disuelven los metales contenidos en los residuos, transportándolos con el lixiviado⁵.

Para determinar la generación de lixiviados, debe tomarse en cuenta los factores climatológicos, así como las características de los residuos, las características del material de cobertura, las características del cerramiento final y el mantenimiento a largo plazo del relleno. Debe hacerse un análisis de escenarios de trabajo para las diferentes características mencionadas, incluyendo operaciones adecuadas e inadecuadas del sistema.

De manera específica debe tenerse en cuenta las infiltraciones de aguas lluvias, de escorrentía y de nivel freático al relleno. El modelo a utilizar para la generación de lixiviados debe igualmente considerar la generación de éstos por efectos de la descomposición de la fracción orgánica de los residuos en el relleno.

Deben igualmente verificarse las capacidades de drenaje del sistema para garantizar que el lixiviado producido se pueda evacuar⁶.

2.4. CAMBIOS EN EL LIXIVIADO DURANTE EL PROCESO DE FORMACIÓN

Los cambios que se producen en la calidad del lixiviado durante el proceso de estabilización son usados para interpretaciones didácticas y operacionales de la descripción de las fases de estabilización. La fase de ajuste inicial, transición, formación de ácidos, fermentación metánica y

⁵Fuente: Friends of the Earth (1996)

⁶RAS 2000

maduración final es identificada y descrita en términos de parámetros físicos, químicos y biológicos que se reportan comúnmente en la literatura.

La composición química de los lixiviados variará mucho según la antigüedad del relleno sanitario y la historia previa al momento del muestreo. Por ejemplo, si se recoge una muestra de los lixiviados durante la fase acida de la descomposición, el pH será bajo y las concentraciones de DBO₅, COT, DQO, nutrientes y metales pesados serán altos. Por otro lado si se recoge una muestra durante la fase de fermentación del metano el pH estará en el rango de 6.5 a 7.5 y los valores de concentración de DBO₅, COT, DQO y de los nutrientes serán significativamente más bajos.⁷

TABLA 3. Parámetros de muestreo de los lixiviados

FISICOS	CONSTITUYENTES ORGANICOS	CONSTITUYENTES INORGANICOS	BIOLOGICOS
Aspecto	Químicos Orgánicos	Sólidos en suspensión (SS), sólidos totales disueltos (STD)	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)
pH	Fenoles	Sólidos Volátiles en Suspensión (SVS), Sólidos Volátiles Disueltos (SVD)	Bacterias coniformes (total, fecal, fecal estreptococo)
Potencial de reducción oxidación	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Cloruros	Recuento sobre placas estándar
Conductividad	Carbono orgánico total	Sulfatos	
Color	Ácidos volátiles	Fosfatos	
Turbiedad	Taninos, Ligninas	Alcalinidad y acidez	
Temperatura	N-Orgánico	N-Nitrato	
Olor	Solubles en éter	N-Nitrito	
	Sustancias activas al azul de metileno	N-Amoniaco	
	Grupos funcionales orgánicos según seas requeridos	Sodio	

⁷ PINEDA, Samuel. Manejo y disposición de residuos sólidos urbanos. Panamericana formas e impresos. 1998. pp. 237-238

	Hidrocarburos clorados	Potasio, Calcio, Magnesio, Dureza	
		Metales pesados (Pb, Ni, Cr, Zn, Cd, Fe, Mn, Hg, Ba, Ag)	
		Arsénico, Cianuro, Fluor, Selenio.	

Fuente: Tchobanoglous et al "Gestión integral de residuos sólidos", 1995

2.5. PROBLEMAS ASOCIADOS EN LA GENERACIÓN DE LIXIVIADOS

Uno de los principales problemas en los rellenos sanitarios es la descarga de lixiviados. El movimiento que realiza el lixiviado en los límites del terreno en el nivel freático o en las fuentes de aguas superficiales, causa considerables problemas de contaminación.

Un aspecto previsor de contaminación por lixiviados es la prevención de su producción. Aunque es la calidad del lixiviado la que causa la contaminación, su cantidad es más controlable. Lo deseable es la no existencia de este, pero en la práctica el agua emigra del relleno sanitario y se forma algo de lixiviado incluso en lugares cuidadosamente elegidos, por lo que las medidas de control y previsión deben ser efectuadas antes y durante el vertido⁸. A continuación se muestran algunos efectos que producen los lixiviados en la salud humana⁹.

⁸PINEDA, Samuel. Manejo y disposición de residuos sólidos urbanos. Panamericana formas e impresos. 1998. pp. 239

⁹www.monografias.com/trabajos31/rellenos-sanitarios/rellenos-sanitarios.shtml

TABLA 4. Efecto negativo en la salud humana de metales existentes en los lixiviados liberados por la descomposición de los residuos sólidos orgánicos en un relleno sanitario húmedo.

Metal	Efecto negativo en:
Arsénico	Sistema cardiovascular, respiratorio, nervioso periférico, reproductivo, daños en el hígado, riñón, cancerígeno; potencialmente teratogénico.
Cadmio	Sistema nervioso central, reproductivo y respiratorio, riñón, probable cancerígeno, teratogénico; embriotóxico.
Cromo	Sistema respiratorio, alergias, irritación en ojos, cancerígeno, probable mutagénico.
Plomo	Sistema nervioso central y reproductivo, en células de la sangre, probable teratogénico.
Mercurio	Sistema nervioso central, cardiovascular y respiratorio, riñón y ojos, teratogénico.
Níquel	Sistema respiratorio, alergias, irritación ojos, piel, hígado, riñón, probables cancerígeno y teratogénico.

TABLA 5. Efecto sobre la salud humana de alcoholes lixiviados durante la descomposición de residuos sólidos orgánicos en un relleno sanitario húmedo.

Alcohol	Efecto negativo en:
1 - Propanol	Causa malformaciones congénitas, mutagénico, cancerígeno.
2 - Propanol	Sistema nervioso central, irritación en piel, ojos y en respiratorio, probable cancerígeno.
3 - Nitrofenol	Sistema respiratorio, nervioso central, células de la sangre, irritación en piel, probable cancerígeno.

TABLA 6. Efecto sobre la salud humana de compuestos orgánicos sintéticos en líquidos lixiviados formados en rellenos sanitarios húmedos.

Pesticida	Efecto negativo en:
2,4-D	<u>Sistema respiratorio</u> , reproductor, hígado, riñón, nervios, pulmones, irritación en piel, ojos, posible cancerígeno y teratogénico.
Lindano	Sistema reproductor y nervioso, probable cancerígeno.
Pentaclorofenol	Sistema respiratorio, irritación en ojos, piel, hígado, riñón, teratogénico

2.6. CANTIDAD DE LIXIVIADOS

De acuerdo con los conocimientos actuales, las cantidades de lixiviados pueden determinarse según el grado de compactación del relleno:

- Rellenos compactados con compactadores: 25% de la tasa de precipitación anual (aproximadamente 5 m³/ha/d para el caso de 750 mm de precipitación anual).
- Rellenos compactados con orugas: 40% de la tasa de precipitación anual (aproximadamente 9 m³/ha/d para el caso de 750 mm de precipitación anual).

Las cantidades para rellenos con producción de compostaje se ubican aproximadamente entre estos valores. Estos valores representan un resumen de los análisis de lixiviados de rellenos ubicados en las zonas con 500 a 1050 mm de precipitación anual.

En la práctica pueden darse desviaciones de estos valores, condicionadas por particularidades locales, por ejemplo mayores cantidades de lixiviados en las laderas; compactado natural causado por el agua del subsuelo que penetra en el relleno; disminución por retención en el relleno, en el caso de rellenos que estén ubicados en depresiones o cuando hay recubrimientos con material aglutinante. En este tipo de rellenos pueden retenerse cantidades considerables de lixiviados, que pueden conducir a problemas en la operación y en la estabilidad.

TABLA 7. Cantidad y contenidos de lixiviados de rellenos de desechos domésticos.

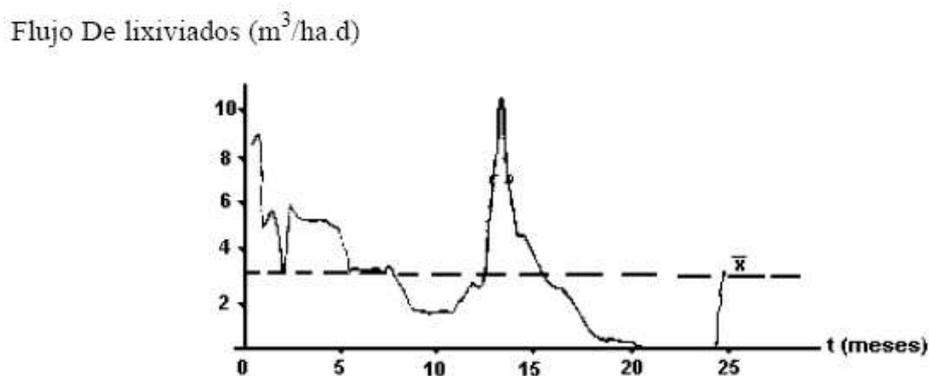
Relleno	Precipitación (mm/a)	Lixiviados (% de N)	(m ³ /ha/d)	Observaciones
(a) Compactación con oruga				
1	571	31.3	4.9	
1	571	4.4	0.4	Recubierto con material aglutinante
2	501-729	25-48.2	5.3-8.3	Parcialmente
3	662	58.2	10.6	
4	632	32.3	5.9	Recubierto y recultivado
5	565-655	39.2-42.0	6.1-7.5	
6	636	19.9-21.4	3.5-3.7	
(b) Relleno con producción de compost				
7	716-936	3.9-21.3	0.8-5.2	En los tres últimos años valores altos
8	-	28.9-31.8	4.4-4.8	
(c) Compactación con compactadores				
9	652	15.1	2.7	
10	651-998	12.2-29.8	3.2-8.1	Recubierto y recultivado, en los últimos 1.5 años en aumento
11	651-998	16.9-21.6	3.0-5.9	
12	632	16.3-18.3	2.8-3.2	
13	509	16.8	2.3	
14	556-1057	15.6-19.6	2.6-5.1	
15	770	3.3-7.2	0.7-1.1	Relleno muy joven
16	-	22	3.8	Ciclo de lixiviados (recubierto con material aglutinante)
17	-	38	6.7	Ciclo de lixiviados

Fuente: EHRIG, Hans-Jurgen.

Al calcular las cantidades de lixiviados hay que tomar en cuenta que, por lo general, su producción no está distribuida en forma equitativa a lo largo del año, con excepción de la retención débil a media en el relleno. En la figura 1 se presentan como ejemplo las precipitaciones semanales y las cantidades de lixiviados de un relleno, que muestran el posible gran margen de variación de estos valores. En la representación se puede reconocer que los valores

extremos de la salida de lixiviados pueden ser hasta 300-400% mayores que los valores medios.

FIGURA 1. Ejemplo de las precipitaciones semanales y de la curva de lixiviados del relleno de Sanne¹⁰.



3. NECESIDADES NUTRICIONALES PARA EL CRECIMIENTO MICROBIANO

Cuando se siembran microorganismos en un medio de cultivo apropiado, los mismos comienzan a dividirse activamente empleando los nutrientes que le aporta el medio de cultivo para "fabricar" nuevos microorganismos. Este proceso continúa hasta que algún nutriente del medio de cultivo se agota (sustrato limitante) y el crecimiento se detiene.

El crecimiento microbiano es un incremento en el número de células o aumento de la masa microbiana. El crecimiento es un componente esencial de la función microbiana, ya que una célula individual tiene un periodo de

¹⁰www.ingenieria.uady.mx/revista/volumen6/tratamiento.pdf

vida determinado en la naturaleza y la especie se mantiene solamente como resultado del crecimiento continuo de la población celular¹¹.

3.3. FUENTES DE CARBONO Y ENERGÍA

Dos de las fuentes más comunes de carbono para el tejido celular son el carbono orgánico y el dióxido de carbono. La conversión de dióxido de carbono en tejido celular orgánico es un proceso reductor que requiere una energía neta. Los organismos autotróficos que obtienen carbono a partir de dióxido de carbono, deben gastar más de su energía para su síntesis, lo que provoca tasas de crecimiento más bajas en comparación con los organismos heterótrofos que utilizan carbono orgánico para la formación de tejido celular.

La energía necesaria para la síntesis celular puede suministrarse con la luz o con reacción química de oxidación. Los quimioautótrofos pueden ser heterótrofos (protozoos, hongos y la mayoría de las bacterias) o autótrofo (bacterias nitrificantes). Los quimioautótrofos son organismos que obtienen la energía a partir de reacciones químicas, es decir obtiene energía de la oxidación de compuestos inorgánicos reducidos, como amoníaco, nitrito y sulfuro. Los quimioheterótrofos normalmente obtienen su energía de compuestos orgánicos.

3.4. NECESIDADES DE NUTRIENTES Y FACTORES DE CRECIMIENTO

Los nutrientes, en sustitución de carbono o de una fuente de energía, puede ser el material limitante para síntesis y el crecimiento celular microbiano. Los principales nutrientes inorgánicos requeridos por los microorganismos son

¹¹ www.bvsde.paho.org/bvsars/fulltext/cantidad.pdf

nitrógeno, potasio, calcio, fósforo, azufre, magnesio, hierro, sodio y cloro. Los nutrientes inorgánicos menos requeridos por los microorganismos es decir nutrientes menores son el zinc, selenio, cobre, manganeso, molibdeno, níquel y wolframio.

Algunos organismos también pueden necesitar nutrientes orgánicos. Los nutrientes orgánicos necesarios, conocido como factores de crecimiento, son compuestos necesitados por un organismo como precursores o constituyentes del material celular orgánico que no puede sintetizar a partir de otra fuente de carbono.

3.5. NUTRICIÓN MICROBIANA Y PROCESOS DE CONVERSIÓN BIOLÓGICA

El objetivo principal en la mayoría de los procesos de conversión biológica es la conversión de la materia orgánica de los residuos de un producto final estable. Para llevar a cabo esta clase de tratamiento de conversión biológica, los organismos quimioheterótrofos son los que tienen una importancia primordial por necesitar compuesto orgánico como fuente de carbono y energía. La fracción orgánica de los residuos sólidos contiene normalmente cantidades adecuadas de nutrientes para sustentar la conversión biológica de los residuos.

3.6. REQUISITOS AMBIENTALES¹²

Las condiciones ambientales de temperatura tienen un importante efecto sobre la supervivencia y sobre el crecimiento de los microorganismos. Las temperaturas por debajo de las óptimas normalmente tienen un efecto más significativo sobre las tasas de crecimiento bacteriano.

El pH no es un factor significativo en el crecimiento de microorganismos dentro de la gama de 6 a 9. Generalmente, el pH óptimo para el crecimiento bacteriano queda entre 6.5 y 7.5. Sin embargo, cuando el pH sube de 9 o baja de 4.5, las moléculas sin disociar de los ácidos débiles o bases pueden entrar en las células con mayor facilidad que los iones de hidrógeno alterando el pH interno sin alterar la célula.

El contenido de humedad es otro requisito ambiental esencial para el crecimiento de microorganismos, debido a que el proceso de transformación de la materia orgánica.

4. ETAPAS EN LA BIODEGRABILIDAD DE RESIDUOS SÓLIDOS

El proceso de degradación biológica de la materia orgánica se realiza principalmente por vía anaeróbica el cual se divide en dos etapas que constituyen el proceso general de degradación: etapa hidrolítica y etapa fermentativa (fase acetogénica y fase metanogénica)

¹²PINEDA, Samuel. Manejo y disposición de residuos sólidos urbanos. Panamericana formas e impresos. 1998. pp. 239

4.1. ETAPA HIDROLÍTICA

Esta se inicia con la solubilización de la materia orgánica contenida en los residuos sólidos en presencia de agua, por medio de encimas que desdoblan a las largas y complejas cadena de compuestos orgánicos tales como, proteínas carbohidratos y grasas, a compuestos solubles como aminoácidos, azúcares simples, glicerol y ácidos grasos de cadena larga.

La etapa hidrolítica resulta indispensable para lograr la ruptura de los polímeros complejos a polímeros solubles o monómeros debido a que los microorganismos de las próximas etapas solamente pueden asimilar materia orgánica disuelta.

4.2. ETAPA FERMENTATIVA

Las moléculas simples producidas en la etapa anterior experimentan ahora procesos de fermentación ácida; en el caso de los azúcares y aminoácidos sufren oxidación anaerobia como ocurre con los ácidos grasos de la cadena larga. Los productos de esta etapa son ácidos volátiles como el acético, butírico, valérico, propiónico y ciertos ácidos orgánicos como la lactosa y succinato, alcoholes CO₂ y H₂.

Las bacterias envueltas en este proceso obtienen la energía para el crecimiento de esas reacciones químicas y una porción de la materia orgánica es convertida en materia celular.

La etapa fermentativa es generalmente la más rápida de todo el proceso, desarrollando la degradación de los compuestos solubles o hidrolizables en dos fases a saber.

3.3. FASE ACETOGÉNICA

Aquí actúan dos tipos de diferentes de microorganismos que producen acetato: bacterias homoacetogénicas y bacterias acetogénicas. Durante esta fase se produce bioóxido de carbono e hidrógeno y el nitrógeno disminuye considerablemente.

Las bacterias homoacetogénicas se caracterizan por la formación de azúcares que a partir de la fermentación de estos compuestos como el formiato y la mezcla gaseosa de H_2CO_2 . Las bacterias acetogénicas metabolizan los productos terminales de la etapa acidogénica, es decir alcoholes, ácidos grasos volátiles y algunos componentes aromáticos que son convertidos en acetato, CO_2 e hidrógeno.

De esta forma, el metabolismo acetogénico se caracteriza por la dependencia a la eliminación de hidrógeno por lo que es necesario una asociación con las bacterias consumidoras de hidrógeno, función que desarrollan las bacterias metanogénicas o sulfurreductoras en presencia de sulfato.

3.4. FASE METANOGÉNICA

Esta etapa se realiza por un tipo de bacterias estrictamente anaerobia, responsable de la formación del metano a partir de acetato, H_2 más CO_2 y marginalmente de ácido fórmico.

Existen bacterias productoras de metano y se les puede clasificar de acuerdo al componente que utilizan para producirlo:

1. **Bacterias Metanogénicas Hidrogenofílicas:** estas bacterias ejecutan una tarea doble: primero producen metano y segundo, eliminan el hidrogeno gaseoso producido, por lo que se mantiene baja la presión de este elemento, lo que permite la existencia de condiciones termodinámica favorable para las bacterias productoras de hidrógeno.

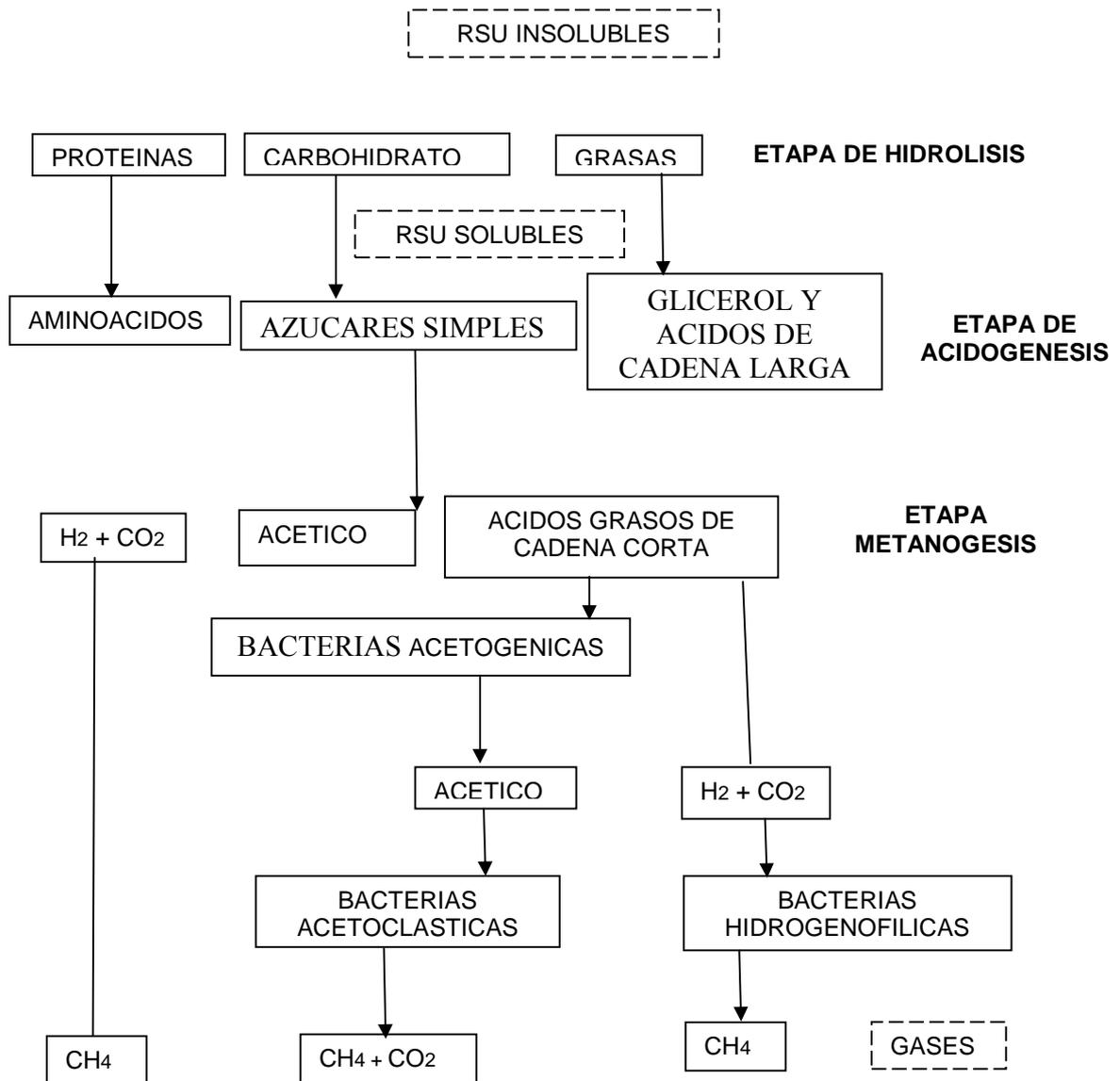
Producen el metano de acuerdo a la siguiente reacción:



2. **Bacterias Metanogénicas Metanofílicas:** Estas bacterias utilizan metanol y metilaminas para producir metano. Su importancia en la producción de metano no es considerable en comparación con los dos anteriores tipos.

La actividad microbiana se realiza con la liberación de calor por lo que la temperatura en el interior del relleno sanitario durante los procesos de biodegradación, oscila entre 25 y 40 °C

FIGURA 2. ETAPAS DEL PROCESO DE BIODEGRADACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS



FUENTE: PINEDA, Samuel. Manejo y disposición de residuos sólidos urbanos. Panamericana formas e impresos. 1998. pp. 234

4. FACTORES QUE AFECTAN LA PRODUCCIÓN Y CALIDAD DE LIXIVIADOS

Un relleno sanitario se define como un método para almacenar permanentemente los residuos sólidos y proveer unas condiciones controladas para que ocurra su degradación sin causar perjuicio al medio ambiente, sin molestias o peligros a la salud y seguridad pública.

Como producto del escurrimiento del agua que hace parte de la humedad con que vienen los residuos sólidos desde su fuente, y en combinación con la humedad generada por la infiltración del agua lluvia hacia el interior del relleno sanitario, durante la etapa de degradación, se genera un líquido conocido como lixiviado, el cual se caracteriza generalmente por contener una alta concentración de materia orgánica, así como otros contaminantes los cuales pueden ser tóxicos, por lo cual presentan un gran potencial para causar efectos adversos al medio ambiente, especialmente a los cuerpos de agua.

Para un relleno sanitario los factores que inciden en la producción de lixiviados comprende los siguientes:

- Factores climáticos
- Propiedades de los residuos dispuestos, tales como la composición físico-química.
- Materiales y espesores utilizados como sistema de impermeabilización externo (impermeabilización de fondo y superficial)
- Tipo de material de cobertura intermedia o final
- Pendientes de drenaje de la superficie del relleno
- Tipo de cobertura vegetal del relleno

Las características de lixiviados son variables, dependiendo de la composición de los residuos sólidos, la tasa de filtración del agua lluvia y la edad del relleno.

5. TRATAMIENTOS CONOCIDOS EN LA REDUCCIÓN DE LIXIVIADOS

Todo el líquido contaminante generado en el relleno sanitario debe tratarse antes de ser vertido en un cuerpo de agua, superficial o subterráneo, utilizando procesos de reconocida viabilidad técnica.

En el proceso de tratamiento deben tenerse en cuenta explícitamente los siguientes aspectos:

- Toxicidad a microorganismos en caso de usarse procesos biológicos de tratamiento.
- Formación de precipitados en tuberías, canales, válvulas, bombas, tanques, y en general en toda la obra. Debe preverse la operación considerando que se van a formar dichas incrustaciones. Debe considerarse la posibilidad de remover los iones incrustantes.
- Formación de espumas. Se debe prever la forma de operación y el rendimiento para que aun en el caso de que se formen se garantice el cumplimiento de calidad en el efluente.
- Variabilidad de las características del lixiviado en el tiempo. Deben preverse que las características físico-químicas y biológicas del lixiviado cambian extremadamente durante la vida útil de la planta. Se debe prever la flexibilidad de operación y rendimiento para todo el período de diseño y cerramiento del relleno sanitario.
- El proceso debe cumplir con las calidades del agua al verter de tal forma que se garanticen los usos del agua, en el cuerpo receptor, que han sido

asignados para éste. Las normas de calidad para el cuerpo receptor de acuerdo a los usos, serán las estipuladas por el Decreto 1594 de 1984 reglamentario de la Ley 9ª en cuanto a usos del agua y vertimiento de residuos líquidos o aquel que lo modifique o sustituya¹³.

5.1. RECIRCULACIÓN DE LIXIVIADOS

La recirculación de los lixiviados se ha propuesto desde hace varios años como una alternativa para su tratamiento.

Más recientemente se conoce su uso como la tecnología del relleno biorreactor, que en la actualidad se está estudiando en detalle en los Estados Unidos con apoyo de la EPA para elucidar varias preguntas que aun persisten sobre el proceso. Se pretende utilizar el relleno sanitario como un gran reactor anaerobio de tal manera que dentro del mismo relleno se logre la conversión a metano de los ácidos grasos que están presentes en el lixiviado. Al recircular los lixiviados se logra un aumento en la humedad de los residuos dispuestos, que a su vez genera un aumento de la tasa de producción de gas metano en el relleno. Una vez los ácidos grasos han sido metanizados, el pH del lixiviado aumenta, y al aumentar el pH la solubilidad de los metales disminuye de tal forma que se logra una disminución de los metales en solución que son transportados por el lixiviado. De esta manera se logra una reducción significativa tanto de la DBO como de los metales que finalmente arrastra el lixiviado. Usualmente se considera que el nivel de tratamiento alcanzado es el de pretratamiento, siendo necesario algún tipo de tratamiento posterior que dependerá de los requisitos de los permisos de vertimiento en cada caso

¹³RAS 2000

A la recirculación del lixiviado con frecuencia se le imputan otros beneficios adicionales a su efecto en el pretratamiento de los lixiviados como son: aumento en las tasas de producción de biogás en el relleno sanitario, maximización de la producción de gas por tonelada de residuo dispuesta, aumento de las tasas de estabilización y asentamientos en el relleno. Esta última a su vez genera ventajas como son el aumento de la capacidad del relleno por la ganancia asociada de volumen, y la disminución en las actividades de post-clausura del relleno. En el caso de los residuos sólidos municipales de los países en desarrollo, en donde la humedad intrínseca de los residuos es superior a la de los países desarrollados, usualmente las tasas de producción de gas son superiores a las que se reportan en los rellenos sanitarios de países desarrollados. Dentro de esta lógica, es de esperarse que los beneficios adicionales de la recirculación en los rellenos sanitarios no sean tan notorios en países en vías de desarrollo como si lo son en los países desarrollados en donde las tasas de producción de gas se ven severamente limitadas por la humedad.

Adicionalmente, por el aumento de la humedad y la tasa de generación de gas, la recirculación de los lixiviados en el relleno sanitario puede generar aumentos significativos de las presiones internas de los fluidos, gases y líquidos, que comprometan la estabilidad estructural de los taludes. Este efecto puede ser más notorio en los residuos húmedos de países en desarrollo que en los secos de los países desarrollados. Los efectos de la humedad en las conductividades hidráulicas de los gases y los líquidos en un medio no saturado como un relleno sanitario, obedecen a relaciones altamente no lineales, en donde pequeñas variaciones de la humedad pueden generar grandes variaciones en la conductividad.

Estas variaciones en la conductividad de los gases y líquidos dentro de la matriz del relleno, se reflejan en aumentos de las presiones internas en el relleno.

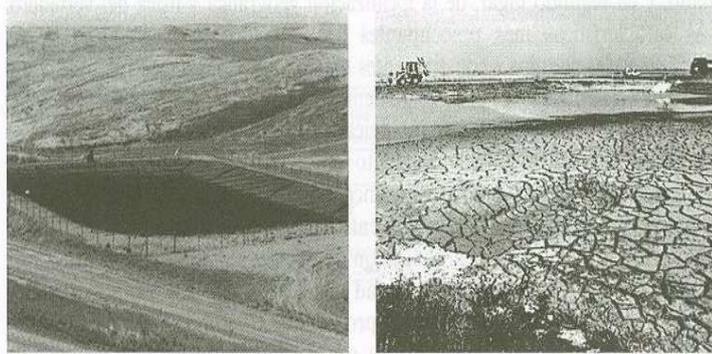
Es necesario mirar con cuidado los aspectos de seguridad geotécnica en los rellenos sanitarios cuando se considere el uso de la recirculación de los lixiviados como un método de pre-tratamiento. Esto implica cuidados especiales en términos de la instrumentación geotécnica del relleno, y en los sistemas de drenaje y evacuación de líquidos y gases. Con frecuencia esta instrumentación adicional, al igual que los requisitos adicionales de drenaje tanto de lixiviados como de gases aumentan significativamente el costo de los sistemas¹⁴.

5.2. EVAPORACIÓN DE LIXIVIADOS

La utilización de la evaporación como sistema de tratamiento de lixiviados es una aplicación nueva, al igual que los humedales. En ella se utiliza la energía que se tiene en el biogás del relleno sanitario en evaporar el lixiviado por calentamiento. Existen varios tipos de tecnologías ya desarrolladas para lograr el objetivo. Las tecnologías existentes permiten lograr el control del total de emisiones de lixiviados del relleno sanitario, quedando un lodo que se dispone nuevamente en el relleno.

¹⁴GIRALDO, Eugenio. Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios.2002

Figura 3. Evaporación de lixiviados



Piscinas antes y después del proceso de evaporación de lixiviados

La experiencia y los cálculos de producciones de gas y lixiviados en los rellenos sanitarios indican que se tiene gas en exceso para suplir las necesidades energéticas de evaporación del lixiviado. Dependiendo del tipo de lixiviado en algunos casos existe la necesidad de hacer un post-quemado de la mezcla gas-vapor de agua que sale del evaporador para lograr la destrucción de emisiones de COVs que se arrastran durante el proceso de evaporación, de tal manera que la cantidad requerida de biogás se aumenta con respecto a los cálculos termodinámicos normales. Sin embargo, una vez quemados los COVs las emisiones del proceso se limitan a vapor de agua y a un lodo espesado.

Algunas de las tecnologías utilizan de manera directa la energía que se genera al quemar el gas con el objetivo central de evaporar el lixiviado, lo que se denomina vaporización del gas, mientras que otras tecnologías pueden utilizar el calor residual que generan motores de combustión o turbinas, que utilizan el biogás para generar potencia mecánica, que a su vez se puede usar para la generación eléctrica. De esta manera, se están logrando llevar a cabo no solamente el aprovechamiento del gas para la conversión a energía eléctrica, sino el tratamiento de los lixiviados, solucionando los dos principales problemas que tienen los rellenos

sanitarios: emisiones de gases y de lixiviados. Esta es tal vez la principal ventaja que se tiene con la tecnología de la evaporación y que no se logra con ninguno de las otras alternativas de una manera simultánea como en este caso.

Con la importancia mundial que están tomando el fenómeno de los gases invernadero y el cambio climático, la destrucción térmica del metano de los rellenos sanitarios se ha identificado como una de las maneras mas efectivas en costos para obtener reducciones en las emisiones globales de metano. Vale la pena mencionar que el metano es aproximadamente 15 veces mas activo que el dióxido de carbono en la retención de las radiaciones infrarrojas causantes del fenómeno del calentamiento global. Por esta razón y por la necesidad de controlar las emisiones de COVs en los rellenos sanitarios el quemar el metano es cada vez más una práctica común en los países desarrollados. Una vez se ha quemado el metano, la energía para la evaporación se encuentra entonces disponible.

Otras de las ventajas que con frecuencia se mencionan en favor de la tecnología de la evaporación son la simplicidad tecnológica de los equipos, y los bajos costos comparativos con otras tecnologías similares.

La tecnología de la evaporación también ha reportado problemas operativos, que en algunos casos ya se sabe como solucionarlos, pero que sin embargo vale la pena mencionar. En general son problemas similares a los reportados para otras de las tecnologías citadas anteriormente, como es el caso de la formación de espumas por la turbulencia generada en el proceso de evaporación, el incrustamiento de precipitados en el sistema, y el arrastre de COVs. Igualmente cuando los lixiviados son jóvenes y existen altas concentraciones de ácidos grasos volátiles y amoníaco, y dependiendo del pH al cual se realice la evaporación, estos compuestos se pueden arrastrar

junto con el vapor de agua. En algunos casos se ha propuesto realizar ajustes de pH para minimizar el arrastre de los ácidos y/o del amoníaco. En otros casos se han propuestos sistemas de evaporación múltiple que en una etapa se controlan las emisiones del amoníaco, mientras que en la otra las emisiones de ácidos grasos. De hecho varias de las tecnologías existentes permiten hacer ajustes de pH durante el proceso de evaporación¹⁵.

5.3. TRATAMIENTO CONJUNTO CON LAS AGUAS RESIDUALES

El tratamiento de lixiviados es muy similar a la depuración de aguas residuales, aunque con algunas diferencias debido a su alta carga orgánica. Los aspectos económicos y técnicos marcan el tipo de tratamiento más adecuado para cada caso concreto, combinándose en muchas ocasiones varios de ellos.

El tratamiento consiste en evacuar el lixiviado por la red de alcantarillado o transportarlo en camiones hasta la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR).

Una de las ventajas de este tratamiento conjunto consiste en que al contener los lixiviados normalmente un exceso de nitrógeno, y las aguas residuales un exceso de fósforo, del que generalmente son deficitarios los primeros, ninguno de estos dos elementos necesita ser suministrado en la planta de tratamiento.

Una de las dificultades que puede esperarse son las altas concentraciones de componentes orgánicos e inorgánicos aportados por el lixiviado.

¹⁵ GIRALDO, Eugenio. Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios.2002

Solamente cuando los lixiviados constituyen menos de 5 % del total de agua residual a tratar en la planta y el contenido de DQO es menor que 1000 mg/l el tratamiento conjunto es aceptable.

De cualquier manera, el lixiviado podría ser diluido antes de ser descargado para el proceso en la planta de tratamiento y el tiempo de retención del agua residual podría aumentarse.

Otros problemas que pueden presentar consisten en la corrosión, reducción de la sedimentabilidad del lodo y los problemas operacionales en la planta debido a la precipitación de óxidos de hierros. Además, la alta concentración de metales puede inhibir la actividad biológica del lodo y reducir o eliminar la posibilidad de su posterior aplicación como fertilizante.

La consecuencia general de la adición de las altas cantidades de lixiviados al agua residual, es la descarga final de un efluente poco clarificado y con altas concentraciones de NH_3 .

En el reactor UASB. Con ello proponen dos alternativas para el tratamiento de lixiviados con reactores de lecho fijo:

- un reactor de lecho fijo de baja carga, y operación en flujo descendente, con soporte de residuos sólidos urbanos.
- Un filtro anaeróbico ascendente con material soporte plástico y con un pre-tratamiento físico- químico para eliminar el Ca y Fe.

5.4. TRATAMIENTO BIOLÓGICO AERÓBICO

Los procesos aerobios al igual que los anaerobios han sido ampliamente estudiados para el tratamiento de los lixiviados de rellenos sanitarios. Existe experiencia con una gran variedad de tipos de sistemas, desde las tradicionales Lagunas Aireadas, hasta sofisticados sistemas que acoplan Reactores Biológicos con Procesos de Ultrafiltración con Membranas. Su rango de aplicación es conocido al igual que los problemas y limitaciones que pueden surgir en su aplicación. Se utilizan cuando se requiere obtener una baja concentración de DBO en los efluentes. Vale la pena aclarar que como usualmente las concentraciones de DBO en los lixiviados son muy altas es relativamente fácil tener remociones porcentuales superiores al 90% en este parámetro. Sin embargo la DBO remanente puede ser todavía alta. Los costos de inversión y de operación y mantenimiento son significativamente superiores a los de los procesos anaerobios cuando los lixiviados son concentrados, como es el caso de un lixiviado joven, por lo que se logran mejores relaciones beneficio / costo cuando se utilizan para tratar lixiviados con concentraciones medias o bajas de DBO. Por esta razón, y dependiendo de las exigencias del vertimiento, se usan preferencialmente como postratamiento a los sistemas anaerobios, o para lixiviados viejos con bajos niveles de DBO.

En los reportes operativos se mencionan problemas con la generación de espumas, con la precipitación de hierro, y en el caso de los lodos activados, problemas para aceptar altas variaciones en las cargas hidráulicas y orgánicas que caracterizan a los lixiviados, como ya se ha mencionado anteriormente. Esto último puede implicar que los sistemas requieran tanques de ecualización de caudales como parte del tratamiento. Igualmente, y dependiendo de la forma de operación del proceso, se tiene una alta generación de lodos residuales, en mayor cantidad que los procesos

anaerobios, que es necesario procesar aumentando los costos de inversión y de operación y mantenimiento. Por otra parte, en casos en donde los lixiviados traigan cantidades importantes de COVs, el aire que se usa en el proceso de la aireación del tanque biológico debe ser tratado a su vez para remover los COV que se arrastran. Esto igualmente hace más compleja la operación de los sistemas de tratamiento y aumenta los costos.

Por la naturaleza misma del proceso que se tiene, la operación de un proceso aerobio requiere mayor capacidad técnica por parte del operador, al igual que mayor necesidad de mantenimiento de equipos.

5.5. TRATAMIENTO BIOLÓGICO ANAERÓBICO

Las tecnologías clásicas para la remoción de materia orgánica, que como en el caso de los lixiviados es predominantemente materia orgánica disuelta, son los procesos biológicos de tratamiento. Para el caso de un lixiviado joven, en especial lixiviados de rellenos con altos contenidos de MOFBD (materia orgánica fácilmente biodegradable), los consecuentemente altos contenidos de materia orgánica parecieran idealmente apropiados para la aplicación de los procesos anaerobios de tratamiento. De hecho existen numerosos reportes de trabajo de todo tipo de tecnologías anaerobias, desde las más simples lagunas anaerobias, hasta complicados sistemas de lecho fluidizado, pasando por filtros anaerobios y reactores UASB. En términos de las reducciones de DBO se reportan muy altas eficiencias a cargas razonables. Usualmente se usan para llegar a niveles de tratamiento secundario, pero cuando se requieren eficiencias superiores se utilizan como pretratamiento, precediendo a sistemas aerobios como los lodos activados.

Las principales ventajas que tienen los procesos anaerobios en este contexto son la mayor simplicidad en el sistema de tratamiento y la menor producción de lodos.

Esto se refleja en menores costos de inversión de capital y de operación y mantenimiento, y en menores requisitos técnicos en el personal que opera el sistema. Sin embargo, existen varias precauciones que hay que tener en cuenta al aplicar este tipo de procesos. Los altos contenidos de amoníaco y de minerales disueltos pueden generar problemas de toxicidad para los microorganismos.

Esto implicaría una remoción previa del amoníaco en caso de que este fuera el problema, o la aplicación de cargas de trabajo reducidas debido a las limitaciones en la actividad microbiana por motivo de la toxicidad. Por otra parte los investigadores que han trabajado con los sistemas de tratamiento anaerobio para lixiviados en rellenos sanitarios coinciden en indicar una acumulación muy significativa de material inorgánico precipitado dentro del reactor y en los lodos mismos del sistema anaerobio. Como se mencionó anteriormente este es un problema práctico de gran significancia para la operatividad de los sistemas. La acumulación de material precipitado dentro del reactor termina por formar incrustaciones que limitan el volumen activo del reactor, limitan la actividad de los lodos, y taponan los sistemas de conducciones de los reactores acabando finalmente en un colapso del sistema de tratamiento, o alternativamente, en costos y complicaciones muy grandes en la operación y mantenimiento de las plantas.¹⁶

¹⁶ GIRALDO, Eugenio. Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios.2002

5.6. SISTEMAS DE MEMBRANAS¹⁷

La tecnología del tratamiento de aguas utilizando membranas es una tecnología de rápido desarrollo en la última década. Con mayor frecuencia se observan más aplicaciones de las membranas en el tratamiento de todo tipo de efluentes, incluyendo obviamente los lixiviados de rellenos sanitarios. Se encuentra en la literatura aplicaciones de la Microfiltración, la Ultrafiltración, la Nanofiltración, la Ósmosis Inversa, la Ósmosis Directa e inclusive la pervaporación al tratamiento de los lixiviados, bien sea de manera directa, o acoplada a otro tipo de proceso de tratamiento. Por ejemplo, se observa que tanto la Microfiltración como la Ultrafiltración se han acoplado a procesos biológicos de tratamiento aerobio, en reemplazo de los Sedimentadores, tanto para la remoción de DBO, como para la Nitrificación del Amoníaco.

Igualmente se encuentran reportes de la aplicación en serie de procesos de Ósmosis Inversa con procesos de Precipitación-Cristalización y Nanofiltración para la remoción de sustancias precipitables de lixiviados con alto contenido de Sólidos Disueltos Inorgánicos. De la misma manera se tienen reportes de la aplicación directa de la Ósmosis Inversa, y la Ósmosis Directa en el tratamiento de lixiviados. A continuación se hará una breve reseña de estos procesos.

5.6.1. Biorreactores con Membrana, MBR

Los Biorreactores con Membrana se utilizan de la misma manera como se utilizan los sistemas biológicos de tratamiento, siendo la principal diferencia la sustitución del Sedimentador como sistema de separación sólido líquido

¹⁷ GIRALDO, Eugenio. Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios.2002

por un sistema de Micro o Ultrafiltración. Esto puede tener ventajas en términos de la disminución del volumen de tanque del Reactor Biológico, mas sin embargo, introduce complicaciones adicionales en la operación de los sistemas ya que los módulos de membranas son más complicados de operar y mantener que un Sedimentador. Igualmente se logran aumentos significativos en la cantidad de biomasa que se tiene dentro de los reactores, pero al mismo tiempo se puede perder eficiencia en la transferencia de masa en la aireación, de tal manera que se aumentan los costos de energía por este sentido. Análisis recientes indican que, de hecho, lo que se gana en costos por la reducción del tamaño de los tanques de aireación, se pierde por el aumento en costos asociados a los equipos de aireación, al igual que el aumento de costos de operación.

Igualmente se reportan disminuciones en el flujo a través de la membrana por procesos de taponamiento. Es necesario considerar dentro de la selección de la tecnología la garantía de un suministro adecuado de reemplazo de membranas, al igual que incluir estos costos dentro de los cálculos financieros de operación y mantenimiento de este tipo de sistemas.

Las eficiencias que se han reportado tanto para las aplicaciones en las cuales se utiliza el proceso biológico para la oxidación del amoníaco, como en aquellas en las cuales se busca remover la DBO, son excelente siendo esta su principal ventaja¹⁸.

¹⁸ GIRALDO, Eugenio. Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios.2002

5.6.2. Osmosis Inversa

En general se reportan unos excelentes rendimientos de esta tecnología para la remoción de la mayoría de los contaminantes.

Igualmente se observa que las aplicaciones han sido para lixiviados con concentraciones de DBO relativamente bajas, menores a 1000 mg/l, es decir, lixiviados viejos, o lixiviados a los cuales se les ha realizado un pretratamiento previo. Se habla de concentraciones relativamente bajas, porque dentro de los rangos de DBO de los lixiviados de rellenos sanitarios de países en desarrollo se tienen concentraciones en los lixiviados jóvenes del orden de las decenas de miles de miligramos por litro, es decir, entre 10 y 40 veces mas concentrados que los que se reportan en la literatura técnica. Se debe entonces tener cautela en la aplicación de la tecnología de manera directa a lixiviados jóvenes, especialmente de aquellos que se encuentran en los países en desarrollo. Otra ventaja que se reporta con frecuencia en el caso de la ósmosis inversa son los bajos consumos energéticos que requiere la tecnología cuando se compara con otras tecnologías como la oxidación biológica o la evaporación¹⁹.

Se han reportado problemas de colmatación asociados a la precipitación del calcio y el hierro en las membranas, obligando a la incorporación de sistemas de pre-tratamiento que minimicen estos efectos. Esto se ha logrado de diversas maneras, desde la aplicación de sustancias químicas que modifiquen las condiciones bajo las cuales ocurre la precipitación, hasta la incorporación de nuevos procesos tales como la osmosis directa o la precipitación-cristalización. Igualmente se ha reportado una disminución significativa del flux a través de la membrana con el aumento de la

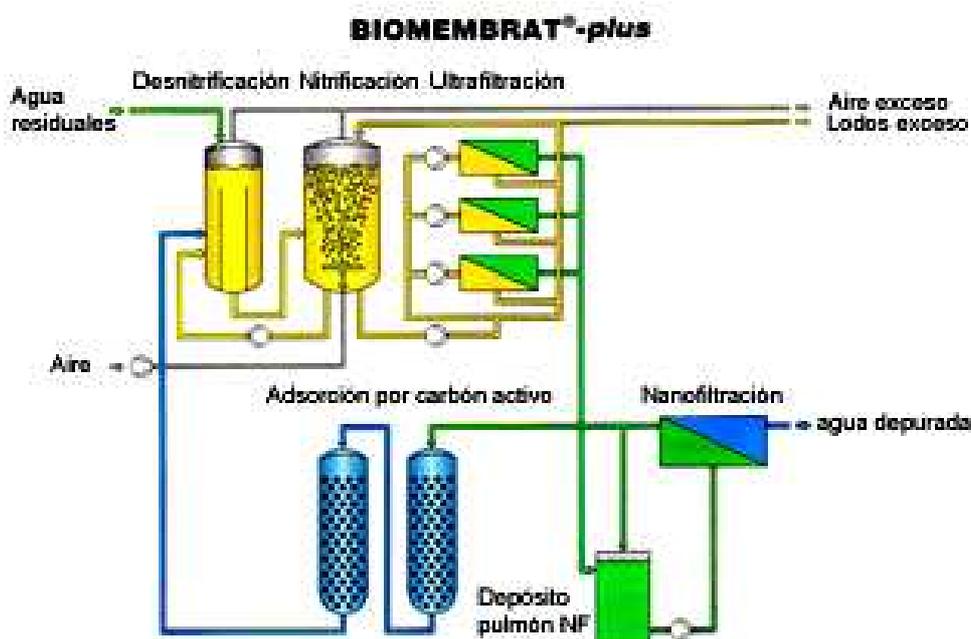
¹⁹ GIRALDO, Eugenio. Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios.2002

concentración de DBO en el concentrado, lo que conlleva la necesidad de tener varios sistemas trabajando en serie para optimizar el proceso. En la terminología de las membranas se denomina el permeado lo que pasa la membrana y el concentrado lo que queda retenido.

La tecnología es intensiva en cuanto a la operación y mantenimiento necesario, por la necesidad de hacer lavados, limpiezas y reemplazos de las membranas, consideración que debe tenerse en cuenta en el momento de seleccionar la tecnología.

5.7. PROCESO BIOLÓGICO BIOMEMBRAT

FIGURA 4. PROCESO BIOMEMBRAT



Fuente: www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/peru/mextar040.pdf

Este proceso se caracteriza por la activación biológica bajo presión con retención total de la biomasa en el sistema; combina tres características

esenciales que dan cuenta de su alta eficiencia en el tratamiento de lixiviados y aguas altamente contaminadas²⁰:

- La activación biológica ocurre bajo presión.
- Existe retención total de la biomasa mediante ultrafiltración.
- Utiliza reactores anóxicos y aerobios (desnitrificación/nitrificación).

5.7.1. Operación Bajo Presión:

En el proceso Biomembrat se realiza la digestión de la materia orgánica en reactores anóxicos y aerobios bajo presión. El oxígeno necesario en el reactor aerobio de nitrificación se aporta mediante aire comprimido. La misión del compresor es doble: suprimir las necesidades de oxígeno y mantener una presión de operación constante en el proceso.

Una operación bajo presión aporta ventajas adicionales tales como el aumento de solubilidad del oxígeno, por lo que disminuye el aporte de aire consiguiéndose una reducción de los productos volátiles nocivos y un ahorro energético y de espacio. Además, se obtiene una mayor activación biológica que consigue menor producción de lodos, aumento del rendimiento de filtración, facilita la manipulación de los lodos en exceso, así como un aumento de la vida del lodo.

²⁰ www.biohidrica.cl/biohidrica_npublicacion03.htm

5.7.2. Ultrafiltración:

La separación entre biomasa y líquido depurado se realiza por filtración con membranas, en un equipo de ultrafiltración consiguiéndose así una retención total de la biomasa y una retención casi total de las impurezas no solubles hasta tamaños de partículas del orden de 0,01 μm lográndose edades del lodo superiores a 30 días, triplicando al menos el tiempo de actuación de los microorganismos respecto a procesos de lodos activados.

Los lodos se bombean desde los reactores biológicos a los módulos de ultrafiltración a una velocidad tal que se evita la formación de capa sucia sobre la superficie de los módulos.

Los lodos concentrados retenidos se recirculan continuamente al reactor, disponiéndose en él de toda la biomasa.

Además la velocidad del retenido sirve para agitar el contenido del reactor complementando la agitación producida por la circulación de lodos entre los propios reactores y la inyección de aire en el reactor aerobio. Esto hace que el proceso Biomembrat aproveche por completo el potencial de degradación de materias nocivas por los microorganismos ya adaptados al medio, con lo que se consigue un rendimiento muy superior al de los tratamientos aerobios y anaerobios convencionales, en los que el rendimiento está limitado por el contenido de la biomasa.

El permeado se recoge en un depósito desde el que puede ser recirculado al proceso y evacuado al exterior.

Se optimiza la actividad de las bacterias de tal forma que se dirige el sustrato de aporte y, una vez agotado el sustrato disponible, los microorganismos comienzan a consumir su propio protoplasma. Sólo los compuestos orgánicos y los inertes no biodegradables constituirán los lodos en exceso.

Los volúmenes de fango en exceso son 10 veces menores a los que produce un sistema de lodos activados, siendo estos lodos de características inocuas y pueden ser fácilmente eliminados. Posee también excelentes características de deshidratación.

5.7.3. Reactores Biológicos:

Los lixiviados son alimentados al reactor anóxico de desnitrificación en el cual el nitrato aportado por el reactor aerobio de nitrificación se transforma bacteriológicamente en nitrógeno molecular.

La desnitrificación tiene lugar cuando desaparecen las últimas trazas de oxígeno disuelto, y las bacterias heterótrofas anaerobias respiran el oxígeno combinado en nitritos y nitratos liberando moléculas de nitrógeno.

Gracias a la concentración de biomasa en el proceso Biomembrat -unas 10 veces la concentrada en sistemas biológicos tradicionales- se activa la respiración de los nitratos obteniendo rendimientos muy superiores a los conseguidos por métodos de activación convencional. La reducción del nitrógeno amoniacal se realiza prácticamente al 100%.

La nitrificación tiene lugar en el reactor aerobio. El nitrógeno orgánico y amoniacal se oxida transformándose en nitrito por acción de bacterias Nitrosomonas y, posteriormente, el nitrito se transforma en nitrato por acción de bacterias Nitrobacter. Ambas son bacterias autótrofas muy especializadas con una tasa de crecimiento menor que las bacterias heterótrofas (responsables de la degradación de la materia orgánica) y, por lo tanto, necesitan más tiempo para desarrollarse.

Frente a tiempo de retención celular o edad de lodo de 3 a 10 días en sistemas tradicionales, la total retención de la biomasa y su activación permite que el proceso Biomembrat se dimensione con edades de lodo de 30 días o superiores, si fuese necesario.

5.8. TRATAMIENTOS FÍSICO-QUÍMICOS

El tratamiento físico químico, consiste en la eliminación de las partículas denominadas coagulantes (sales metálicas y /o polielectrolitos). Involucra proceso de coagulación, floculación y sedimentación y el elemento fundamental para el éxito de este proceso es determinar el coagulante o la combinación de coagulante más eficiente que se relacionan necesariamente con las características físico químicas del liquido

Los tratamientos físicos químico se clasifican en²¹: Precipitación química, Oxidación química, Absorción con carbono activo, Osmosis inversa. Stripping de NH₃.

5.8.1. Precipitación Química

Mediante el tratamiento de lixiviados por precipitación química se obtienen mejoras en la eliminación del color, contenidos en sólidos en suspensión, amonio y eliminación de algunos cationes pesados. Para este tipo de tratamiento la cal es el reactivo más usado; a veces se utiliza la alúmina, el cloruro férrico y el sulfato ferroso. No se obtienen buenos resultados en la eliminación de materia orgánica (<40% de la DQO).

²¹PINEDA, Samuel. Manejo y disposición de residuos sólidos urbanos. Panamericana formas e impresos. 1998. pp. 246,248,249

5.8.2. Oxidación Química

El tratamiento de lixiviados por oxidación química con Cl_2 , CaClO_2 , KMnO_4 u O_3 , obtienen mejores resultados con la disminución del color, que la propia precipitación química, en donde la reducción de DQO es insuficiente (<48 %). El uso de oxidantes halogenados presenta además el inconveniente de generar compuestos órgano halogenados altamente peligrosos, como se han detectado en algunos casos de cloración de lixiviados.

5.8.3. Adsorción con Carbono Activo

Este método solo debe usarse para el tratamiento de lixiviados procedentes de rellenos sanitarios viejos o con tratamientos terciarios de efluentes biológicos en este último caso se pueden obtener reducciones de DQO hasta un 91%.

5.8.4. Osmosis Inversa

La osmosis inversa presenta una alta eficacia en la eliminación de sales inorgánicas, teniendo además la ventaja adicional de eliminar la materia orgánica disuelta mediante el paso del lixiviado a través de una membrana semipermeable, que actúa como filtro de los guiones y la materia orgánica. Este tratamiento reduce la turbidez del lixiviado hasta un 89%.

5.8.5. Stripping de NH₃

Consiste en burbujear aire a través de los lixiviados de tal forma que se reduce la concentración de NH₃, que pasa desde la fase líquida (el lixiviado) a la fase (gas) el aire. Para poder realizar este tratamiento es necesario elevar el pH hasta 11, lo que se consigue normalmente con adición de cal. En combinación con la precipitación química y un tratamiento biológico por lodos activos y el Stripping de NH₃ se ha conseguido reducciones de NH₃ de hasta un 96%.

5.9. SISTEMAS NATURALES

Los sistemas naturales, lagunas y humedales artificiales, también se han propuesto como alternativas para el tratamiento de lixiviados. Tienen la ventaja de la simplicidad en su operación, y la posibilidad de lograr diferentes niveles de tratamiento, desde un pretratamiento, hasta un tratamiento terciario en caso de necesitarse.

La combinación de las lagunas y los humedales puede manejar adecuadamente muchos de los problemas que en otras tecnologías aparecen como son la acumulación de precipitados, la formación de espumas, la toxicidad a los microorganismos, y las variaciones en cargas hidráulicas y orgánicas. Esto se logra al tener tiempos de retención hidráulica muy altos y volúmenes de procesos igualmente grandes, que permiten acomodar variaciones en caudal, acumulaciones de precipitados, junto con una baja producción de gases y por lo tanto de espumas. Desde el punto de vista de costos en valor presente, la tecnología ha probado ser muy competitiva al compararse con otras alternativas. Es importante mencionar que los análisis financieros deben tener en cuenta el valor presente de los

costos de capital y de operación y mantenimiento de los sistemas. De otra forma se puede llegar a conclusiones erradas con respecto al costo real por volumen de lixiviado tratado en un relleno sanitario. Si bien es cierto que los costos de capital pueden llegar a ser similares en sitios donde el costo del terreno es alto, los bajos costos de operación y mantenimiento son una de las principales razones de los bajos costos en valor presente. En aplicaciones en donde el costo de la tierra no es muy alto, o donde las zonas de amortiguamiento del relleno sanitario se pueden usar en el proceso, la tecnología presenta costos de inversión inicial sustancialmente menores que otras alternativas.

La principal desventaja que se tiene con estos sistemas es la cantidad de terreno que requiere para localizar los procesos. Sin embargo, por la naturaleza misma de los diseños de los rellenos sanitarios, en donde hay necesidad de tener áreas de amortiguamiento visual, de ruido, y de olores, estas áreas que usualmente están localizadas en los alrededores del relleno, podrían utilizarse como parte de los sistemas naturales de tratamiento; en especial en el caso de los humedales²².

Se puede observar igualmente en las Tabla 9 y 10 que tecnologías como la evaporación pueden lograr reducciones similares y/o superiores a los sistemas combinados.

²² GIRALDO, Eugenio. Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios.2002

En la Tabla 8 y 9, se observa un resumen de las principales características y consideraciones que se deben tener en cuenta en la comparación de las tecnologías que se presentaron anteriormente.

TABLA 8. Comparación entre tecnologías para el tratamiento de lixiviados. (Complejidad tecnológica)

ÍTEM	PROBLEMAS CON	COMPLEJIDAD TECNOLÓGICA						
		AEROBIO	ANAEROBIO	EVAPORACIÓN	RECIRCULACIÓN	MEMBRANAS	SISTEMAS NATURALES	TRATAMIENTO EN PTAR
1	Necesidad de insumos químicos	+++ (1)	+++ (1)	++ (2)	-	+++ (1)	-	-
2	Necesidad de insumos operacionales (v. gr. membranas)	++	+	+	+	+++	-	-
3	Necesidad de suministro de partes	++	-	+	+	+++	-	+
4	Suministro de Energía Eléctrica	+++	+(4)	-(5)	+	+++	+(3)	+
5	Complejidad Operacional	+++	+	++	+	+++	-	-

(1) Requiere un extenso pretratamiento

(2) Puede requerir pretratamiento, algunos sistemas usan sustancias para control de pH, espumas.

(3) Puede requerir si hay necesidad de bombear el lixiviado. Usualmente no requiere.

(4) Puede requerir en el sistema de pretratamiento

(5) Puede llegar a ser autosuficiente. Algunas tecnologías así están diseñadas.

Fuente: Giraldo E., "Manejo Integrado de Residuos Sólidos Urbanos", 1997.

TABLA 9. Comparación entre tecnologías para el tratamiento de lixiviados. (Rendimiento de remoción)

ÍTEM	PROBLEMAS CON	RENDIMIENTOS						
		AEROBIO	ANAEROBIO	EVAPORACIÓN	RECIRCULACIÓN	MÉMBRANAS	SISTEMAS NATURALES	TRATAMIENTO EN PTAR
1	Demanda Bioquímica de Oxígeno	Muy altos	Altos	Muy altos	Intermedios	Muy altos	Muy altos	Muy altos
2	Nutrientes	Altos ⁽¹⁾	Muy bajos	Muy altos	Bajos	No ⁽¹⁾	No	Variables ⁽⁴⁾
3	Metales	Intermedios ⁽²⁾	Altos	Muy altos	Intermedios	Altos	Altos	Altos
4	Compuestos Orgánicos Volátiles (COV)	Altos ⁽³⁾	+	Muy altos	+	No ⁽¹⁾	+	Variables ⁽⁵⁾
5	Patógenos	Bajos	Bajos	Muy altos	Bajos	Muy altos	Variables ⁽⁴⁾	Variables ⁽⁴⁾

(1) Pueden ser altos o bajos dependiendo del diseño

(2) Cuando hay pretratamiento pueden tener remociones muy altas

(3) La remoción se hace por arrastre en el tanque de aireación. Este genera problemas d impacto ambiental

(4) Puede ser muy altos si así se requiere

(5) Puede generar problemas en las conducciones

Fuente: Giraldo E., "Manejo Integrado de Residuos Sólidos Urbanos", 1997.

TABLA 10. Comparación entre tecnologías para el tratamiento de lixiviados. (Manejo de características problemáticas de lixiviados)

ÍTEM	PROBLEMAS CON	TECNOLOGÍA						
		AEROBIO	ANAEROBIO	EVAPORACIÓN	RECIRCULACIÓN	MÉMBRANAS	SISTEMAS NATURALES	TRATAMIENTO EN PTAR
1	Formación de Precipitados	++	+++	+	++	+++	+	No
2	Toxicidad a los microorganismos	++	++	No	No	No (1)	+	Potencial
3	Formación de espumas	+++	+	++	+ (1)	Variable (2)	No	Baja
4	Emisión de COV	+++	+	++	+	Variable (2)	+	Baja
5	Sensibilidad a variaciones de caudal	++	++	+	+	+	No	No
6	Producción y manejo de lodos	+++	+	+	No	+		No
7	Requerimientos de área	Baja	Baja	Muy baja	Baja	Baja	Alta	No

(1) Pueden formarse en los tanques de almacenamiento

(2) Si los sistemas son aerobios, la problemática puede ser alta.

(3) Una cruz significa como afecta negativamente la característica al proceso en cuestión. Entre más cruces más negativamente lo afecta.

Fuente: Giraldo E., "Manejo Integrado de Residuos Sólidos Urbanos", 1997.

6. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS AL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS

El tratamiento por recirculación no es un tratamiento aconsejable cuando la pluviometría de la zona es muy elevada.

Existen serios cuestionamientos en sus efectos sobre la estabilidad geotécnica del relleno, lo que limita su aplicación a situaciones donde se pueda comprobar la estabilidad, y adicionalmente sobre la necesidad posterior de pulir finalmente el lixiviado recirculado y pretratado.

El tratamiento conjunto con aguas residuales domesticas, tampoco parece aconsejable debido a la gran distancia existente entre el relleno sanitario y una planta de tratamiento convencional de aguas residuales.

Por otra parte los tratamientos físicos-químicos son poco eficaces en la eliminación de DQO, además de presentar el problema de los altos costos debido a la utilización de reactivos químicos.

En cuanto a la aplicación de tratamientos biológicos, la viabilidad de los mismos está condicionada por una serie de elementos y compuestos tóxicos para los microorganismos y que pueden inhibir las reacciones, por lo que se hace necesario un estudio detallado de las características de los lixiviados.

Con la aplicación del sistema aerobio se obtienen buenos rendimientos en la eliminación de DQO, sin embargo este sistema está limitado por varios motivos: los problemas de toxicidad, el enorme espacio que ocupan, sensibilidad a los cambios de temperatura, necesidad de adición de nutrientes en el caso de lixiviados la adición de fosfatos, enorme gasto energético que conlleva la aireación y por último la gran producción de lodos.

Las ventajas que presenta el sistema anaerobio son: no es necesario el aporte de oxígeno, la transformación de 85-90% de la carga orgánica en biogás de elevado poder energético, minimización de la producción de lodos, mayor resistencia a la concentración de elementos tóxicos, reducción de los malos olores, y el hecho de que se puedan tratar directamente aguas de elevada carga contaminante. Una ventaja adicional del sistema anaerobio es que completa el proceso de degradación anaerobia iniciado en el relleno sanitario, ya que este se comporta como un gran filtro anaerobio²³.

No se puede llegar a generalizaciones sobre la existencia de una tecnología óptima en todos los casos pues las condiciones de cada sitio pueden variar e influenciar significativamente la selección. Se puede citar por ejemplo, la disponibilidad de terrenos, de energía eléctrica, de suministros de químicos, de partes de repuesto, o de personal calificado para la operación. Si los terrenos son costosos, o no se encuentran disponibles en los alrededores del relleno sanitario, muy probablemente la tecnología de los humedales artificiales no es la más conveniente. Si no existe suministro de energía eléctrica, sistemas que requieran de equipos mecánicos como aireadores, bombas, mezcladores, compresores, prensas, centrifugas etc. seguramente entraran en desventaja con tecnologías más sencillas o autosuficientes como la evaporación o los sistemas naturales. La complejidad tecnológica de la operación debe igualmente considerarse.

Una gran ciudad probablemente pueda contar con el personal capacitado para la operación de sistemas que requieran dosificaciones precisas de químicos, mantenimiento de partes móviles, reemplazo de partes claves, limpieza de equipos, etc. Más este no puede ser el caso de una población

²³ PINEDA, Samuel. Manejo y disposición de residuos sólidos urbanos. Panamericana formas e impresos. 1998. pp. 249-250

intermedia; lo que afectaría necesariamente la sostenibilidad tecnológica del sistema de tratamiento en el mediano y largo plazo.

Finalmente una variable decisiva son los costos. La información disponible indica que en general las tecnologías alternativas como la evaporación y los sistemas de humedales son significativamente más económicos que los otros sistemas²⁴.

7. MÉTODOS CONOCIDOS EN LA ESTIMACIÓN DE LIXIVIADOS

Varias técnicas se han desarrollado, usando métodos de balance de aguas para estimar el conjunto de agua libre en un relleno sanitario. Estos métodos consideran un balance entre la precipitación, evapotranspiración, escorrentía superficial y el depósito de mezcla de los residuos.

Existen actualmente varios métodos tanto simplificados como más complejos que satisfacen parcialmente estas necesidades. Veit et al (1983), desarrollaron una expresión simple para la producción de lixiviados, basándose en la precipitación, la superficie receptiva del terreno y un coeficiente determinados por el grado de compactación de los residuos y el tipo de diseño del relleno sanitario.

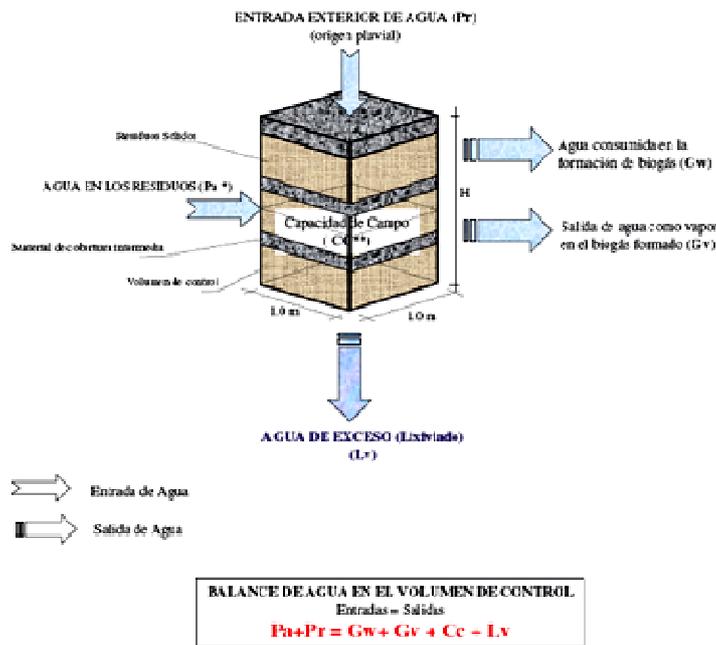
7.1. MÉTODO DEL BALANCE HÍDRICO POR TCHOBANOGLIOUS

La producción de lixiviados en un relleno sanitario puede realizarse con base en un balance hídrico dentro del relleno sanitario. Tchobanoglous en su libro propone una metodología para estimar la producción de lixiviados a partir de

²⁴ Giraldo E., "Manejo Integrado de Residuos Sólidos Urbanos", 1997

un balance hídrico de un volumen de control (área unitaria x altura del relleno) del relleno sanitario. El balance se basa en la siguiente expresión.

Figura 5: Balance hídrico para la estimación de lixiviados. Metodología de Tchobanoglous



* P_a = Humedad cuando se disponen los residuos
 ** C_c = Capacidad de retención de humedad de los residuos sólidos
 H = Altura total del relleno

Fuente: Adaptado de TCHOBANOGLIOUS, George, THEISEN, Hilary and VIGL, Samuel. Gestión Integral de Residuos Sólidos. Primera Edición en Español. Editorial McGraw Hill/ Interamericana de España, S.A. Madrid, 1994.

Entrada de agua = Salidas de Agua + Agua almacenada

$$Pa + Pr = Gw + Gv + CC + \text{producción de lixiviados}$$

Donde:

P_a : Agua presente en el interior de los residuos, P_a (inicialmente corresponde al contenido de humedad de los residuos dispuestos, Kg/m^2).

P_r : Percolación de agua lluvia hacia el interior del relleno, Kg/m^2 .

G_w : Agua consumida en la generación de gas, Kg/m^2 .

Gv: Agua perdida como vapor de agua en el gas, Kg/m².

CC: Capacidad de retención de agua del relleno (Capacidad de campo), Kg/m².

La cantidad de agua que se infiltra al interior del relleno (Pr) depende de las condiciones climáticas, las características del material de cobertura (tipo de material y espesor), pendiente final del relleno y presencia de vegetación. De acuerdo con la metodología de Tchobanoglous se puede estimar mediante un balance de agua en la cobertura final, para lo cual se emplea la siguiente expresión:

$$Slc = P - R - ET - Pr \text{ ó}$$

$$\mathbf{Pr = P - R - ET - Slc}$$

Donde:

Slc: Cambio en la cantidad de agua almacenada por unidad de área, mm/m².

P: Precipitación atmosférica por unidad de área, mm/m².

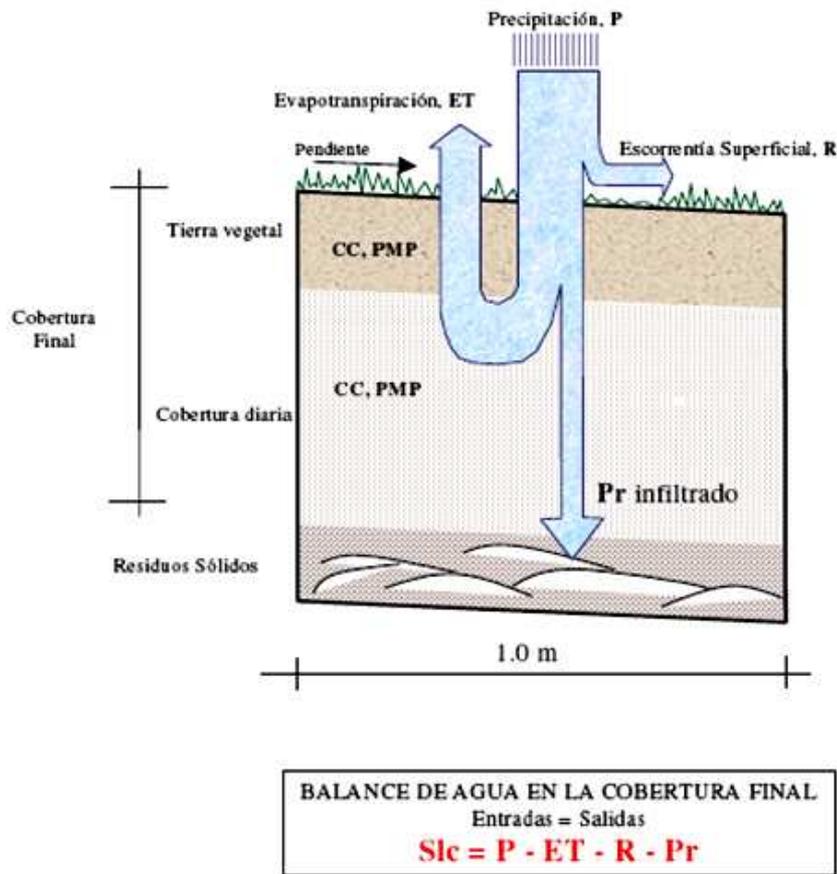
R: Cantidad de agua que se pierde por escorrentía superficial, por unidad de área, mm/m².

ET: Cantidad de agua que se pierde por evapotranspiración por unidad de área, mm/m².

Pr: Cantidad de agua que se infiltra a través del materia de cobertura y entra hasta los residuos sólidos, por unidad de área, mm/m².

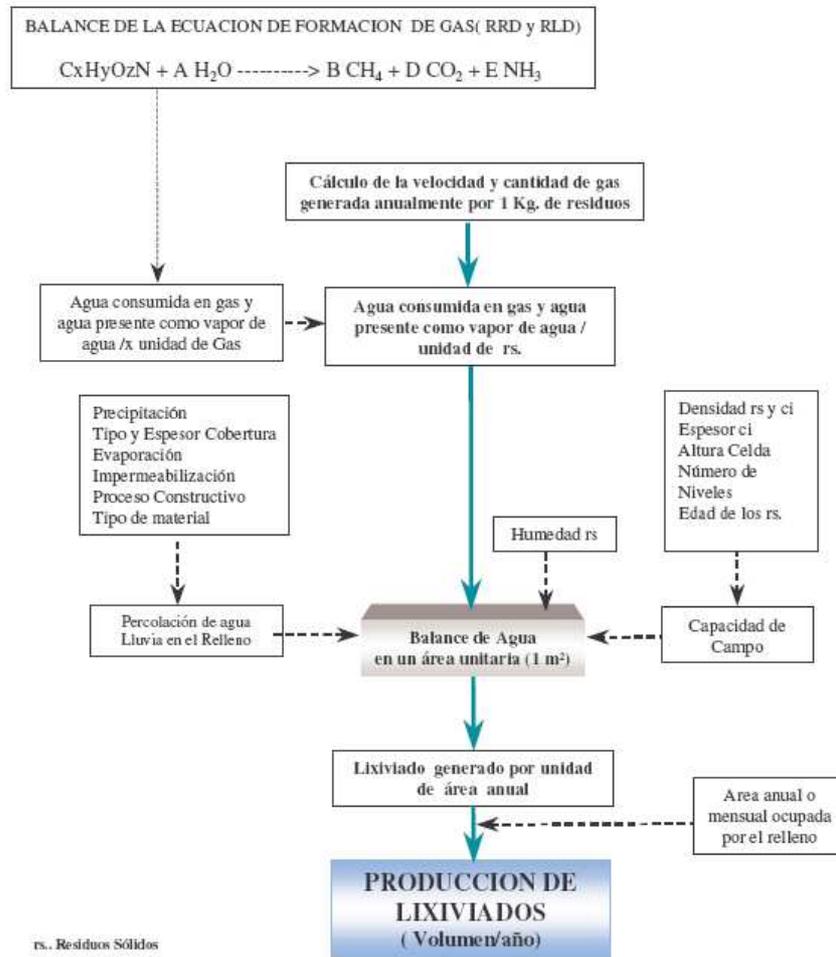
En la Figura 6, se muestra el balance hídrico en la cobertura vegetal, Metodología de Tchobanoglous.

Figura 6: Balance hídrico en la cobertura vegetal. Metodología de Tchobanoglous



La cantidad de agua que se puede almacenar en el material de cobertura depende de su capacidad de campo (CC = máxima cantidad de agua que el suelo puede retener en contra de la gravedad) y del punto de marchitez permanente (PMP). La diferencia entre la CC y la PMP es la cantidad de agua que puede almacenarse en el suelo.

Figura 7. Metodología de Tchobanoglous para estimar la producción de lixiviados.



7.2. MÉTODO SUIZO

El volumen de lixiviado en un relleno sanitario o en botadero de residuos sólidos, depende de los siguientes factores:

- Precipitación pluvial en el área del relleno.
- Escorrentía superficial y/o infiltración subterránea.
- Evapotranspiración.
- Humedad natural de los RSM.

- Grado de compactación
- Capacidad de campo (capacidad del suelo y de los RSM para retener humedad).

El volumen de lixiviado está fundamentalmente en función de la precipitación pluvial. No solo la escorrentía puede generarlo, también las lluvias que caen en el área del relleno hacen que su cantidad aumente, ya sea por la precipitación directa sobre los residuos depositados o por el aumento de infiltración a través de las grietas en el terreno. Debido a las diferentes condiciones de operación y localización de cada relleno, las tasas esperadas pueden variar; de ahí que deban ser calculadas para cada caso en particular. Dado que resulta difícil obtener información local sobre los datos climatológicos, se suelen utilizar coeficientes que correlacionan los factores antes mencionados con el fin de precisar el volumen de lixiviado producido.

El método suizo, por ejemplo, permite estimar de manera rápida y sencilla el caudal de lixiviado o líquido percolado mediante la ecuación:

$$Q = \frac{1}{t} (P.A.k)$$

Q = Caudal medio de lixiviado o líquido percolado (L/seg.)

P = Precipitación media anual (mm/año)

A = Área superficial del relleno (m²)

t = Número de segundos en un año (31.536.000 seg/año)

K = Coeficiente que depende del grado de compactación de la basura, cuyos valores recomendados son los siguientes:

- Para rellenos débilmente compactados con peso específico de 0,4 a 0,7 t/m³, se estima una producción de lixiviado entre 25 y 50% (k = 0,25 a 0,50) de precipitación media anual correspondiente al área del relleno.

- Para rellenos fuertemente compactados con peso específico $> 0,7 \text{ t/m}^3$, se estima una generación de lixiviado entre 15 y 25% ($k = 0,15$ a $0,25$) de la precipitación media anual correspondiente al área del relleno.

Sobre la base de las observaciones realizadas en varios rellenos pequeños, se puede afirmar que la generación de lixiviado se presenta fundamentalmente durante los periodos de lluvias y unos cuantos días después, y se interrumpe durante los periodos secos. Por tal razón, sería conveniente una adaptación de este método de cálculo para calcular la generación del lixiviado en función de la precipitación de los meses de lluvias y no de todo el año. Este criterio es importante a la hora de estimar la red de drenaje o almacenamiento de lixiviado para los rellenos sanitarios manuales.

Por lo tanto, se sugiere que partiendo de la ecuación del caudal, los registros de precipitación sean los del mes de máxima lluvia, expresados en mm/mes, con lo cual se consigue una buena aproximación al caudal generado:

$$Q_{lm} = P \times A \times K$$

Donde:

Q_{lm} = Caudal medio de lixiviado generado (m^3/mes)

P_m = Precipitación máxima mensual (mm/mes)

A = Área superficial del relleno (m^2)

K = Coeficiente que depende del grado de compactación de la basura

$1 \text{ m} = 10^3 \text{ mm}$

7.3. MÉTODO DEL BALANCE HÍDRICO DESARROLLADO POR THORMTHWAITE

El balance hídrico contabiliza las ganancias de agua por lluvia o riego y las pérdidas por evaporación, escorrentía, drenaje profundo y la variación del almacenamiento de aguas en el suelo. Conocer el balance hídrico de una localidad permite determinar la duración y la magnitud a nivel macroclimático de los periodos con exceso o deficiencia de agua²⁵.

Este método está basado en la relación entre la precipitación, evapotranspiración, escorrentía superficial y almacenamiento de la humedad. La precipitación representa la cantidad de agua añadida, la evapotranspiración entendida como evaporación combinada de las plantas y la superficie del suelo junto con la transpiración de las plantas, lo que supone una pérdida de agua del suelo, la escorrentía superficial representa el agua que fluye directamente por sobre el área de estudio, la capacidad de almacenamiento de la humedad en el suelo representa la capacidad de agua que puede ser almacenada por el mismo.

El agua incorporada por la precipitación puede evaporarse directamente de la superficie del suelo, puede ser utilizada por las plantas a través de la respiración, o servir para recargar un campo seco hasta la capacidad de campo.

El método se centra en la cantidad de agua que está presente en el suelo, hasta que se alcanza la capacidad de campo; la humedad del suelo se considera como un balance entre lo que entra debido a la precipitación y lo que se sale a través de la evapotranspiración.

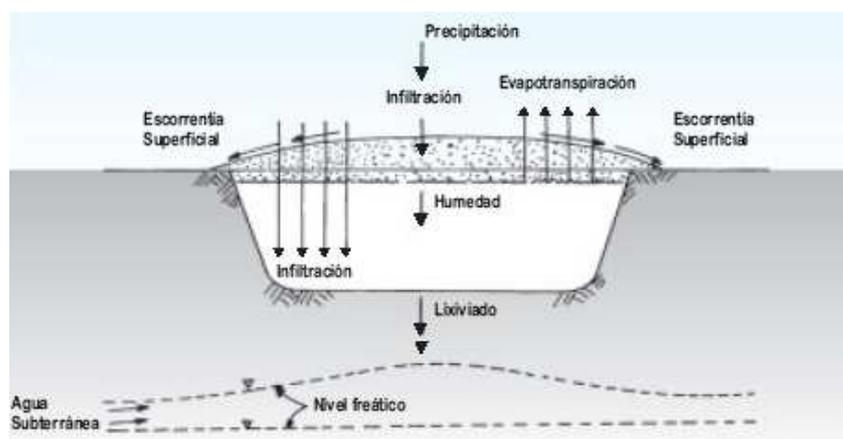
²⁵ www10.brinkster.com/ceaufres/bh/ - 7k

7.4. MÉTODO DEL BALANCE DE AGUAS

La cantidad de lixiviado depende fundamentalmente de las precipitaciones registradas. Las tasas de generación de lixiviado varían según el tipo del relleno sanitario, en pre o postclausura en donde las fuentes principales incluyen: el agua que entra en la celda desde arriba, la humedad de los residuos sólidos, la humedad del material de cobertura. Las principales salidas son: el agua extraída por evaporación o evapotranspiración y el lixiviado.

Existe una parte del total que se forma como un subproducto de la descomposición del material orgánico por actividad bacteriana; pero esta cantidad es sensiblemente pequeña, la cual se desprecia cuando se hace un balance de agua del relleno sanitario.²⁶

FIGURA 8. Balance de agua en un relleno sanitario



Fuente: ministerio del medio ambiente, guía ambiental para relleno sanitario.2002

²⁶ PINEDA, Samuel. Manejo y disposición de residuos sólidos urbanos. Panamericana formas e impresos. 1998. pp. 231

- Precipitación (P): es la cantidad de lluvia que cae sobre el terreno del relleno, siendo (RO) la fracción de esta que ocurre superficialmente (escorrentía).
- Infiltración (I): es la fracción de (P) que se infiltra entre las capas de los residuos dispuestos. La tasa de infiltración depende del tipo de superficie con que se cuente, material de cobertura final, cobertura vegetal, material de cobertura diaria e intermedia o residuos descubiertos.
- Evapotranspiración (ETP): corresponde a la parte del líquido que se evapora de la superficie y/o se transpira (T) por acción de la cobertura vegetal.
- Saturación (S): es la deficiencia en el almacenamiento de humedad en el terreno, es la diferencia de la capacidad del campo (FC) y el volumen de humedad existente (MC).
- Percolación (PERC): es el porcentaje de precipitación (P) que no se infiltra, ni escurre, y que tampoco es sometido a la evapotranspiración, la cual se convierte luego en lixiviado (L)²⁷.

8. DISEÑO Y ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DE LAS ESTRUCTURAS DEL SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE LIXIVIADOS

8.1. SISTEMAS PARA LA RECOLECCIÓN DE LIXIVIADOS

El diseño de un sistema para la recogida de lixiviados implica²⁸:

1. La selección del sistema que se va utilizar,

²⁷ Ministerio del Medio Ambiente, Guía Ambiental para Relleno Sanitario.2002

²⁸ TCHOBANOGLOUS, George. Gestión Integral de Residuos Sólidos. McGraw-Hill.España. 1994

2. El desarrollo de un plan gradual que incluya la puesta en obra de los canales para el drenaje y para la recogida del lixiviado y tuberías para canalizar el lixiviado,
3. El trazado y diseño de instalaciones para canalizar recoger y almacenar el lixiviado.

8.1.1. Selección del Sistema de Aislamiento

El sistema seleccionado dependerá en gran parte de la geología local y de los requisitos ambientales de la zona del vertedero. Por ejemplo, en localizaciones donde no hay aguas subterráneas, quizás sea suficiente un aislamiento sencillo con arcilla compactada. En lugares donde se debe controlar la liberación del lixiviado y del gas, será necesario un aislamiento mixto de arcilla y geomembrana con una capa apropiada de drenaje y de protección del suelo²⁹.

8.1.2. Diseño de Instalaciones para la Recogida de Lixiviado

Se han utilizado varios diseños para separar el lixiviado de los vertederos. A continuación se hace una exposición sobre los diseños de terrazas inclinadas y fondos con tubos³⁰.

²⁹ TCHOBANOGLOUS, George. Gestión Integral de Residuos Sólidos. McGraw-Hill.España. 1994

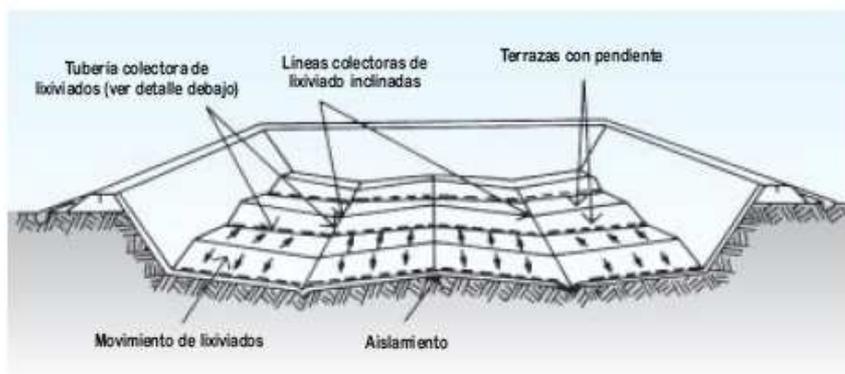
³⁰ TCHOBANOGLOUS, George. Gestión Integral de Residuos Sólidos. McGraw-Hill.España. 1994

8.1.2.1. Terrazas Inclinadas

Para evitar la acumulación del lixiviado en el fondo de un vertedero, la zona del fondo se gradúa en una serie de terrazas inclinadas. Como se muestra en la figura 9, las terrazas están construidas para que el lixiviado que se acumula en la superficie de las terrazas drene hasta los canales de recogida de lixiviados. Se utiliza una tubería perforada colocada en cada canal (ver figura 9). Para transportar el lixiviado recogido hasta una localización central, a partir de la cual se separa para su tratamiento o para su reaplicación sobre la superficie del vertedero .

La pendiente transversal de las terrazas es normalmente del 1 al 5%, y la pendiente de los canales de drenaje es del 0.5 al 1%³¹.

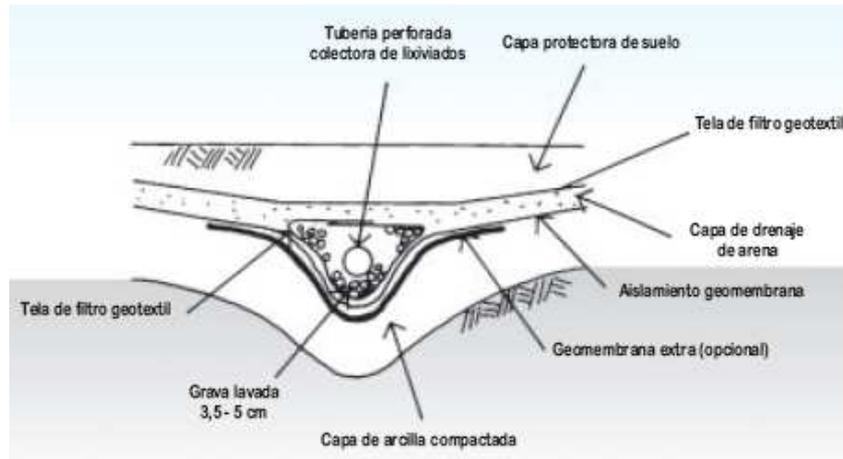
FIGURA 9. Esquema del sistema con terrazas inclinadas para la recogida de Lixiviados



Fuente: ministerio del medio ambiente, guía ambiental para relleno sanitario. 2002

³¹ TCHOBANOGLOUS, George. Gestión Integral de Residuos Sólidos. McGraw-Hill.España. 1994

FIGURA 10. Detalles del tubo para la recogida de lixiviados.



Fuente: ministerio del medio ambiente, guía ambiental para relleno sanitario. 2002

La pendiente y la longitud máxima del canal del drenaje se seleccionan en base a la capacidad de las instalaciones de drenaje. La capacidad de la taza de flujo de las instalaciones se estima utilizando la Ecuación de Manning. El objetivo del diseño es no permitir que el lixiviado se estanque en el fondo del vertedero, creando así una importante carga hidráulica sobre el aislamiento del vertedero (menos de 0.3 m en el punto más alto, como se especifican en las nuevas normativas federales para vertederos), la profundidad de flujo en el tubo perforado de drenaje se incrementa continuamente desde los tramos altos del canal del drenaje hasta los tramos bajos. En vertederos muy grandes se conectarán los canales de drenaje a un sistema más grande de recogida transversal³².

³² TCHOBANOGLIOUS, George. Gestión Integral de Residuos Sólidos. McGraw-Hill. España. 1994

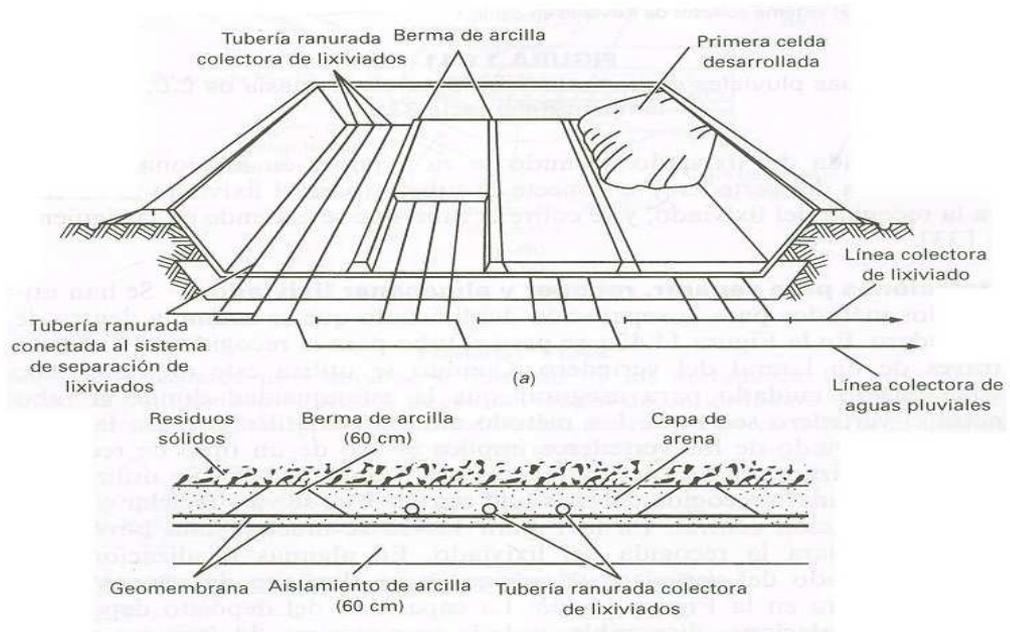
8.1.2.2. Fondo con Tuberías

Un plan alternativo para la recogida de lixiviados se muestra en la figura 11 como se puede observar la zona del fondo se divide en una serie de pilas rectangulares con barreras de arcilla colocadas a distancias apropiadas (ver fig. 11a) el espaciamiento de la barrera se corresponde con una celda del vertedero. Se procede a colocar la tubería, para la recogida del lixiviado, longitudinalmente encima de la geomembrana. Los tubos para la recogida del lixiviado son de 10 cm y tienen perforaciones cortadas con laser, similares a un colador, sobre la mitad de la circunferencia. Los cortes de laser están espaciados en 0.6 cm y el tamaño del corte es 0.00025 cm, que corresponden al tamaño más pequeño de la arena. Para proporcionar un drenaje efectivo, se inclina el fondo desde el 1.2 hasta el 1.8%. Los tubos para la recogida del lixiviado, espaciados cada 6 m, se cubren con una capa de arena que mide 60 cm (ver fig 11b) antes de comenzar el vertido. El uso de un sistema con tubería múltiple para la recogida de lixiviados asegura la rápida separación del lixiviado del fondo del vertedero. Además, el uso de una capa de arena de 60 cm sirve para filtrar los lixiviados antes de recogerlos para su tratamiento. La primera capa de 1 m de residuos sólidos, que se coloca directamente encima de la capa de arena, no se compacta.

Un rasgo único del diseño que se muestra en la fig. 10 es el método utilizado para separar las aguas pluviales de la porción no utilizada del vertedero. El método se detalla en la fig. 11 en la porción no utilizada del vertedero, se recogen las aguas pluviales en las líneas que al final se utilizarán³³.

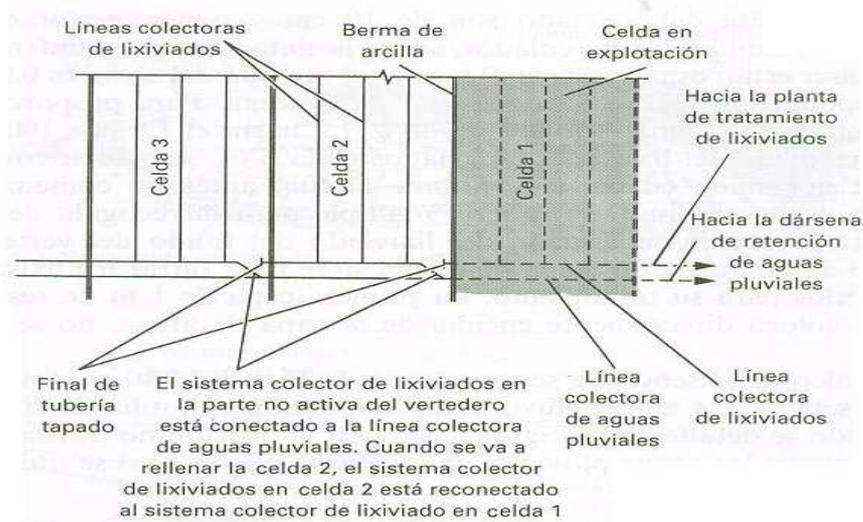
³³ TCHOBANOGLOUS, George. Gestión Integral de Residuos Sólidos. McGraw-Hill.España. 1994

**Figura 11. Sistema típico para la recogida de lixiviado utilizando una tubetia multiple:
 (a) vista panoramica y (b) detalle de tubos tipicos para la recogida de lixiviados.**



Fuente: TCHOBANOGLIOUS, George. Gestión Integral de Residuos Sólidos. McGraw-Hill.España. 1994

Figura 12. Gestión de aguas pluviales en un vertedero tipo área



Fuente: TCHOBANOGLIOUS, George. Gestión Integral de Residuos Sólidos. McGraw-Hill.España. 1994

Para la recogida del lixiviado cuando se va a poner en funcionamiento la siguiente celda del vertedero, se conecta la tubería para el lixiviado al sistema para la recogida del lixiviado, y se cubre el tubo que se extiende en la siguiente tira.

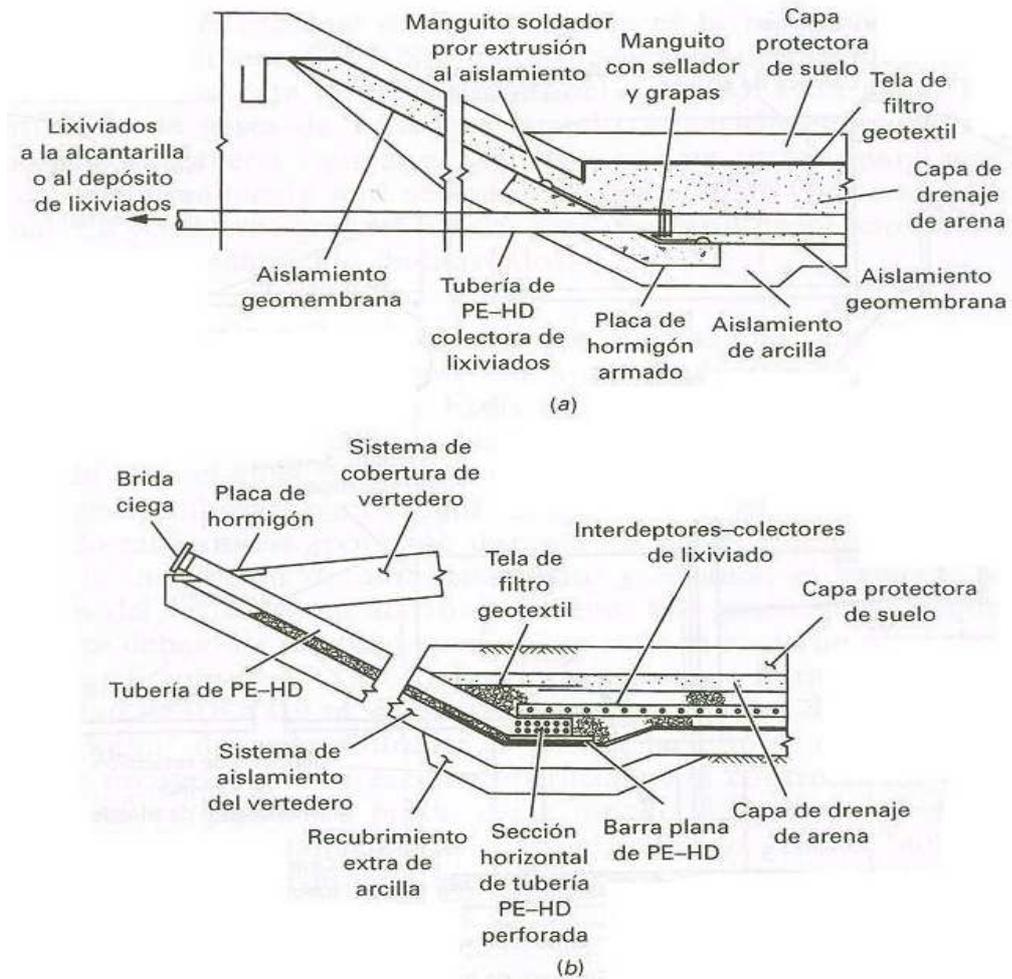
8.1.2.3. Instalaciones para Separar, Recoger y Almacenar Lixiviados

Se han utilizado dos métodos para la separación del lixiviado que se acumulan dentro de un vertedero en la fig. 11a se pasa el tubo para la recogida del lixiviado a través de un lateral del vertedero. Cuando se utiliza este método debe tenerse mucho cuidado para asegurar que la estanqueidad donde el tubo penetra el vertedero sea total. Un método alternativo utilizado para la separación del lixiviado de los vertederos implica el uso de un tubo de recogida inclinado localizado dentro del vertedero (ver

fig. 11b). Se utilizan las instalaciones para la recogida del lixiviado cuando este se va a reciclar o tratar en una localización central. En la fig. 13a se muestra una bóveda de acceso típica para la recogida del lixiviado. En algunas localizaciones, el lixiviado separado del vertedero se recoge en un depósito de retención, tal como se muestra en la fig. 13b. La capacidad del depósito dependerá del tipo de instalación disponible y de la tasa máxima de descarga permisible en la instalación de tratamiento. Normalmente los depósitos para la retención del lixiviado se diseñan para retener la producción de 1 a 3 días, durante el periodo de máxima producción del lixiviado. Se han utilizado depósitos con pared sencilla y doble, pero los depósitos con doble pared son preferibles frente a los de pared sencilla por la seguridad extra que proporcionan. Aunque se han utilizado depósitos de plástico y de metal, los de plásticos son más resistentes a la corrosión³⁴.

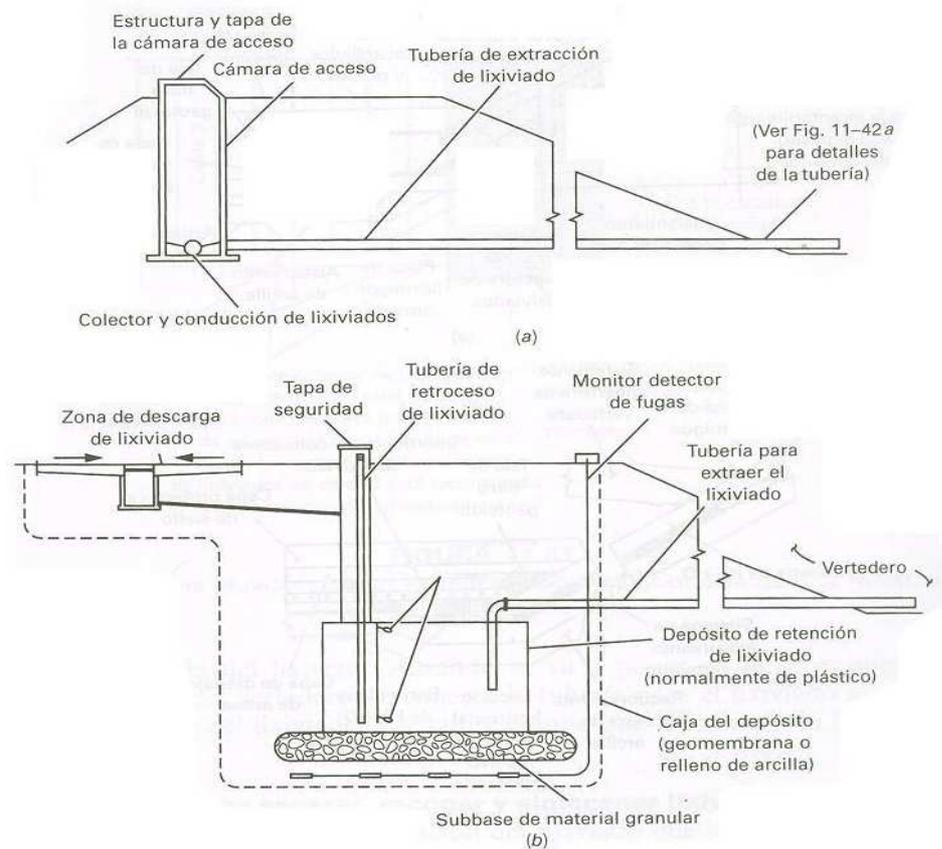
³⁴ TCHOBANOGLOUS, George. Gestión Integral de Residuos Sólidos. McGraw-Hill.España. 1994

Figura 13. Sistemas utilizados para separar el lixiviado de los vertederos: (a) Tubo para la recogida de lixiviado llevado a través del lateral de un vertedero y (b) Tubo inclinado para la recogida del lixiviado localizado dentro un vertedero. El lixiviado se separa con una bomba.



Fuente: TCHOBANOGLOUS, George. Gestión Integral de Residuos Sólidos. McGraw-Hill.España. 1994

Figura 14. Ejemplos de instalaciones para la recogida del lixiviado: (a) Bóveda para la recogida y transmisión de lixiviado y (b) Deposito para la retención de lixiviados.



Fuente: TCHOBANOGLOUS, George. Gestión Integral de Residuos Sólidos. McGraw-Hill.España. 1994

Capitulo II

**SISTEMAS DE TRATAMIENTOS Y MANEJO DE LIXIVIADOS
GENERADOS EN EL RELLENO SANITARIO EL OASIS DE LA CIUDAD
SINCELEJO**



Piscinas de lixiviados del Relleno Sanitario El Oasis del Municipio de Sincelejo

RELLENO SANITARIO EL OASIS DE LA CIUDAD DE SINCELEJO

En el año 1997 se inician los trabajos para conformar y acondicionar lo que es hoy el relleno sanitario de la ciudad de Sincelejo, “El Oasis”. El sitio se encuentra ubicado en el kilómetro 2 vía que conduce al corregimiento de Chocho, municipalidad de Sincelejo.

La decisión de seleccionar y acondicionar este, estuvo sustentada por una serie de estudios topográficos, geotécnicos, geofísicos, climatológicos y geohidrológicos, en las 29.86 Ha que lo conforman.

De estos últimos cabe destacar la perforación de pozos profundos a fin de conocer la estratigrafía de la zona y asegurarse que la posible migración de lixiviados no presentara un riesgo serio para los acuíferos subyacentes.

En 1997 se inicia el depósito de residuos sólidos municipales en El Oasis, involucrando la cobertura del servicio al Municipio de Sincelejo inicialmente, con un área de operación de 9 Ha.

La operación del sitio se realizó por el método de área y trinchera, conformando celdas con un promedio de tres metros de altura. En el fondo del relleno fue instalado un tendido de 17.000m². De geomembrana de polietileno de alta densidad que limita la migración de lixiviado, con un sistema de canales colectores que descargan a cárcamos de concreto de donde se puede extraer el lixiviado.

Se colocaron, además, 3 piezómetros en diferentes sectores del relleno para el monitoreo posterior de las aguas superficiales.

La cobertura de los residuos sólidos se realizó con material de excavación extraído del propio sitio. El control de llenado de relleno contó con el levantamiento periódico de secciones topográficas.

Paralelamente a la operación del sitio se construyeron pozo de venteo pasivo de biogás general (chimeneas) de 1 m de diámetro. Estos se construyeron en piedra, con diámetros entre 4 y 8 pulgadas, que se extendían verticalmente de manera paulatina de acuerdo a la variación del nivel del relleno y que estaban conectadas en cada de terrazas con drenajes contruidos también en piedras de diámetros entre 5 y 8 pulgadas, las cuales son aisladas mediante un geotextil con el fin de evitar que se percole el material de relleno impidiendo la circulación del lixiviado a través de estos.

Finalmente se realizó la clausura de esta primera etapa que estuvo en funcionamiento durante 7 años, teniendo en cuenta los requerimientos pertinentes para este proceso.

MANEJO DE LIXIVIADOS EN EL RELLENO SANITARIO EL OASIS EN EL MUNICIPIO DE SINCELEJO

Después de realizar varias visitas en el Relleno Sanitario El Oasis del Municipio de Sincelejo y de tener diálogos directos con el personal que labora en este, pude observar y analizar el proceso que le brindan a los lixiviados producidos en este lugar.

En este informe se muestra de forma detallada todo el proceso constructivo utilizado para tratar el lixiviado producto de los residuos sólidos depositados diariamente en el relleno sanitario. El cual empieza con el movimiento de tierras teniendo en cuenta las pendientes adecuadas ya que toda la circulación del lixiviado se da por gravedad, la construcción de los filtros, la impermeabilización del sitio, la construcción del sistema de drenajes, de los colectores, de las piscinas.

También se hará énfasis en el tratamiento que le brindan a los lixiviados, el mantenimiento de las piscinas, filtros y tuberías; de las características físicas y químicas encontradas en los lixiviados en el último análisis realizado por el laboratorio AMBIELAB LTDA en el mes de Abril del 2008. A petición de INTERASEO S.A, empresa encargada de la administración del relleno.

PROCESO CONSTRUCTIVO DE LAS ESTRUCTURAS ENCARGADAS DE TRANSPORTAR Y EVACUAR LOS LIXIVIADOS.

Este proceso constructivo se efectuó llevando a cabo los siguientes pasos:

- Este proceso inicia con la selección del sitio adecuado con un área de servicio de 10 Hectáreas dentro de las 29.68 Ha que existen actualmente para depositar los residuos sólidos.
- Después de la selección del sitio comienzan los movimientos de tierra teniendo en cuenta las pendientes con las cuales se diseño el relleno. Ver figura N° 15.



Figura N° 15. Movimientos de tierra realizados con maquinaria pesada

- Continuando con la excavación de las zanjas en donde van a descansar los filtros encargados de recoger los lixiviados y transportarlos a los colectores. Estos filtros tienen una longitud aproximada de 150 metros, 0.60 metros de ancho y la profundidad varia de acuerdo a la pendiente en este caso del 5%. El diseño de los filtros por el método Espina de

Pescado se modifico a criterio del diseñador, eliminando los filtros transversales. Ver figura N° 16.



Figura N° 16. Vista de las zanjas para los filtros encargados de recolección y transporte de lixiviados

- Después de realizar las zanjas se procedió a impermeabilizar el terreno con el fin de evitar la infiltración del lixiviado al suelo lo cual podría contaminar los cuerpos de agua (superficiales y subterráneos) ubicados en el área de influencia del relleno sanitario. ver figura N° 17.

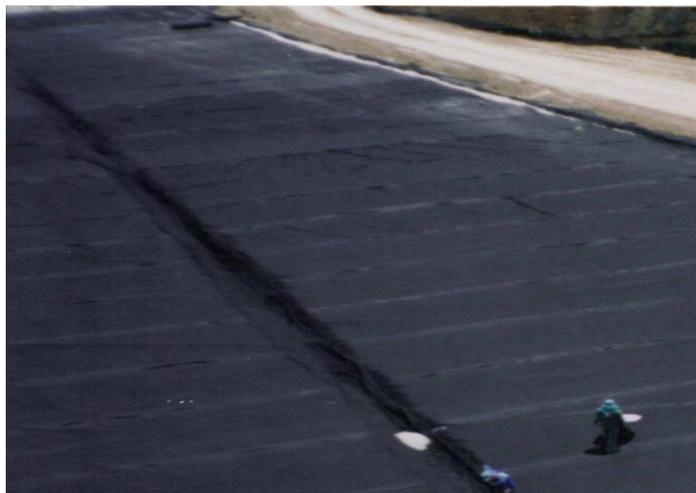


Figura N° 17. Impermeabilización del área de influencia de los residuos sólidos.

- Después se procede a colocar los filtros en las zanjas impermeabilizadas, elaborados con grava de $\frac{3}{4}$ ". Como lo refleja la figura N° 18.



Figura N° 18. Colocación de los Filtros elaborados con gravilla

- Después se procede con la construcción de los colectores encargados de recibir el lixiviado transportado por los filtros, cabe resaltar que el colector se comunica con el filtro a través de un tubo perforado de 4" con una longitud de 20 metros recubierto con la grava que conforman el filtro como se observa en la figura N° 19. de este colector se transporta el lixiviado a las piscinas mediante un tubo de 6"



Figura N° 19. Empalme de los filtros con los colectores

- Después se procede con la construcción de dos piscinas donde se almacena el lixiviado para luego darle su respectivo tratamiento.

Estas piscinas se construyen teniendo en cuenta ciertos parámetros, los cuales mencionaremos a continuación:

1. La preparación del suelo para el soporte de los lixiviados almacenados en la piscina se realizó con una arcilla compactada de 0.60, las dimensiones del fondo de las piscinas son de 15x18 metros con una capacidad de 1500 M³ cada una.
2. Después se procedió a la impermeabilización del fondo de las piscinas con una capa de concreto impermeabilizado con producto SIKA con un espesor de 5 cm. Instalando posteriormente un geotextil de referencia NT 1600 y una geomembrana de 40 MIL, como se observa en las figuras N° 21 y 22.



Figuras N° 20 y 21. Colocación de la geomembrana y geotextil para la impermeabilización de las piscinas de lixiviado.

TRATAMIENTO DE LOS DE LOS LIXIVIADOS EN EL RELLENO EL OASIS DEL MUNICIPIO DE SINCELEJO

En el capítulo uno se mencionaron diferentes tipos de tratamientos para los lixiviados generados en los rellenos sanitarios producto de la descomposición de los residuos sólidos almacenados. De todos estos tipos de tratamientos en el Relleno Sanitario El OASIS del Municipio de Sincelejo se aplican uno, la recirculación, puesto que son los tratamientos más económicos y fácil de aplicar en nuestro medio debido a las elevadas temperaturas.

El lixiviado generado en el relleno sanitario es de 0.03 l/s, y este aumenta a 0.15 l/s en época de lluvias. La recirculación se realiza diariamente cuando el brillo solar es alto y la temperatura se encuentra entre valores de 30 y 40 °C, esta se realiza de 10:00 a.m. a 4:00 p.m. 6 horas aproximadamente. El tiempo de retención hidráulica en las piscinas varía de acuerdo a la época, es decir, en épocas de lluvia y cuando el brillo solar es casi nulo este dura entre 15 y 20 días. Durante este tiempo el lixiviado es tratado en las piscinas con antioxidantes para mantener el pH neutro, para lo cual se utiliza cal, puesto que es una de los antioxidantes más económicos del mercado.



Figura N° 22. Proceso de recirculación de lixiviados.

Para la recirculación de los lixiviados se utiliza una electrobomba de 5 HP cuya función principal es recircular un volumen de lixiviado de 50 gal/min cada vez que se realice la recirculación. El lixiviado es transportado hacia las celdas mediante una manguera de polietileno de 2" de diámetro, donde esta se conecta a un sistema de 10 aspersores cuya función es expandir el lixiviado hasta saturar el sitio; estos aspersores cubren un radio de 20 m a la redonda.



Figura Nº 23. Estación de bombeo, para la recirculación de lixiviados

La recirculación se realiza con el objetivo de disminuir la cantidad de lixiviados almacenados en las piscinas a través de la evotranspiración y también para acelerar la descomposición de los residuos sólidos almacenados en el relleno sanitario.

El mantenimiento de las piscinas se realiza cada año en los meses de enero y febrero por ser los de mayor sequía en el municipio, cuando se le realiza el mantenimiento a una la otra queda en servicio.

Si los lodos productos de la sedimentación de los lixiviados no se secan totalmente se les adiciona cal para que estos se solidifiquen rápidamente,

estos lodos son usados para compostaje interno en el relleno y si son altamente contaminantes son devueltos alas celdas del relleno los cuales son expandidos por un buldózer para nuevamente integrarlos al medio natural, como lo muestra la figura N° 24.

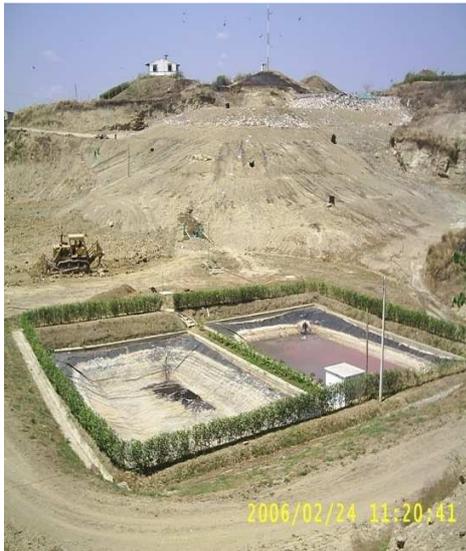


Figura N° 24 y 25. Mantenimiento a las piscinas de lixiviados y lodos extraídos de las piscinas de lixiviados.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS ENCONTRADAS EN LOS LIXIVIADOS

Tabla N° 11. Comparativo de resultados por muestreo (Ene-Abr-2008)

Punto N°	Descripción SITIO	DBO ₅ (mg O ₂ /L)		DQO (mg O ₂ /L)		GRASAS Y ACEITES (mg/L)		SÓLIDOS SUSPENDIDOS (mg/L)		pH	
		Ene	Abr	Ene	Abr	Ene	Abr	Ene	Abr	Ene	Abr
1	Arroyo caimán entrada	183	258	472	575	59	64	187	412	7.35	7.35
3	Pondaje N° 2	525	630	4928	5814	26	41	293	273	8.04	8.05
4	Piezómetro N° 1	2	2	44	21	2	2	178	283	6.63	6.71
5	Piezómetro N° 2	2	2	31	73	2	2	35	43	6.04	6.73
6	Arroyo caimán salida	231	318	408	641	53	51	253	462	7.33	7.34

Fuente: Informe de Caracterización de Aguas Residuales (AMBIELAB LTDA.)

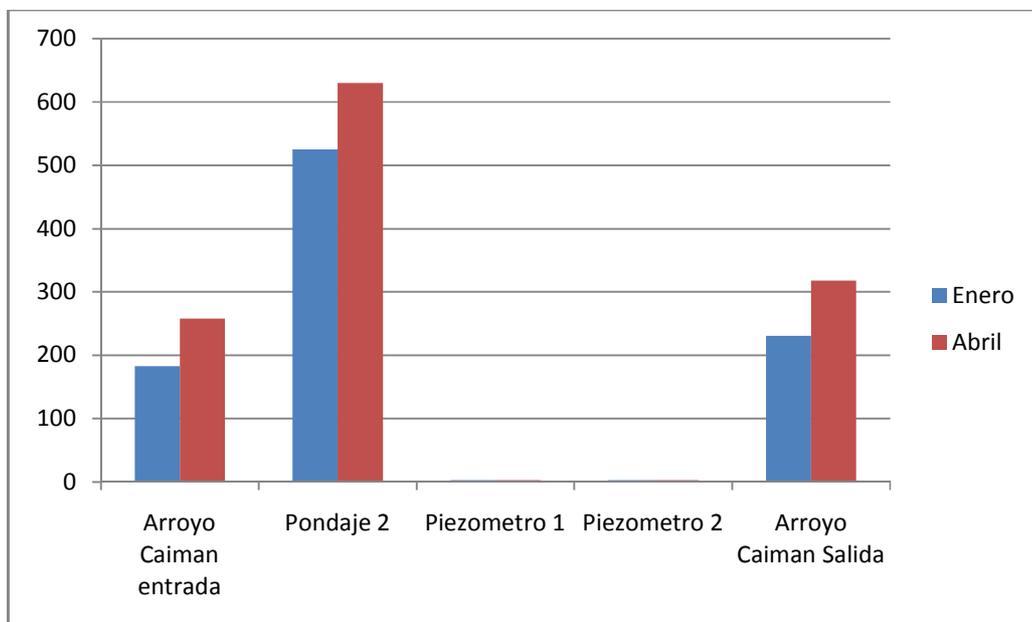


Figura N° 26 Comportamiento DBO₅ en los sitios de muestreo

DQO: Presenta variaciones sustanciales en el comportamiento de la concentración, asociados con la época de la toma de muestra, enero época seca, abril época de las primeras lluvias (transición), debido, posiblemente a los procesos de infiltración y lavado de las columnas de basuras en cada celda del relleno.

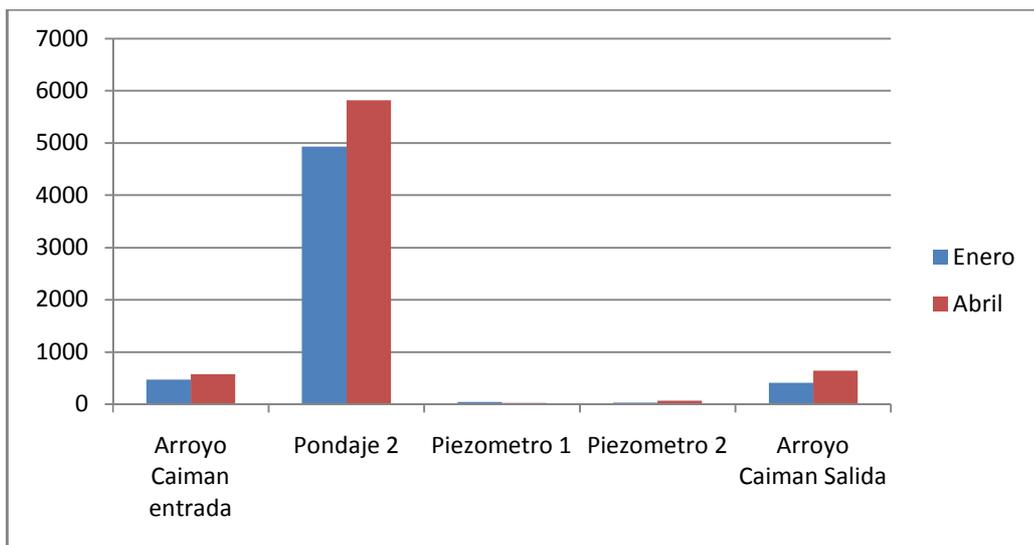


Figura N° 27 Comportamiento DQO en los sitios de muestreo

GRASAS Y ACEITES: presenta variaciones leves en el comportamiento de la concentración, asociados a la época de la toma de muestras (transición)

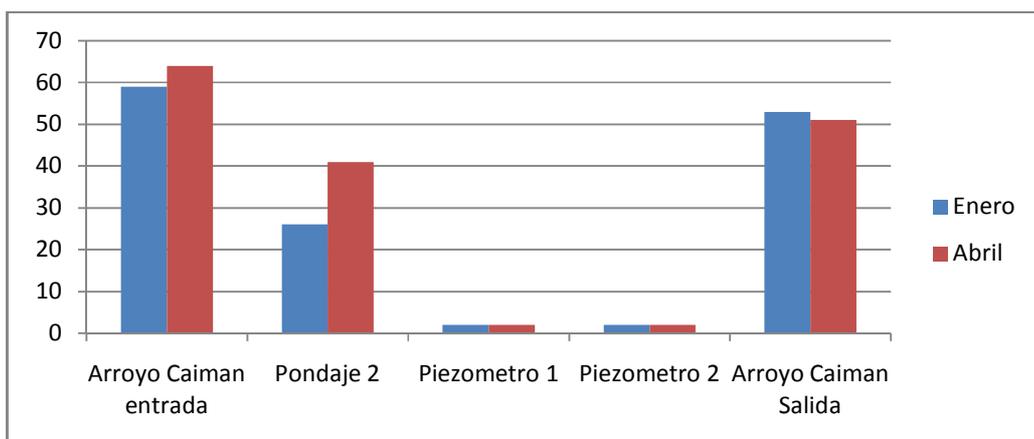


Figura N° 28 Comportamiento de grasas y aceites en los sitios de muestreo.

SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES: presenta variaciones marcadas en la entrada y salida al relleno, en los puntos de muestreo sobre el arroyo caimán, asociados con la época de la toma de las muestras, enero época seca, abril época de las primeras lluvias (transición)

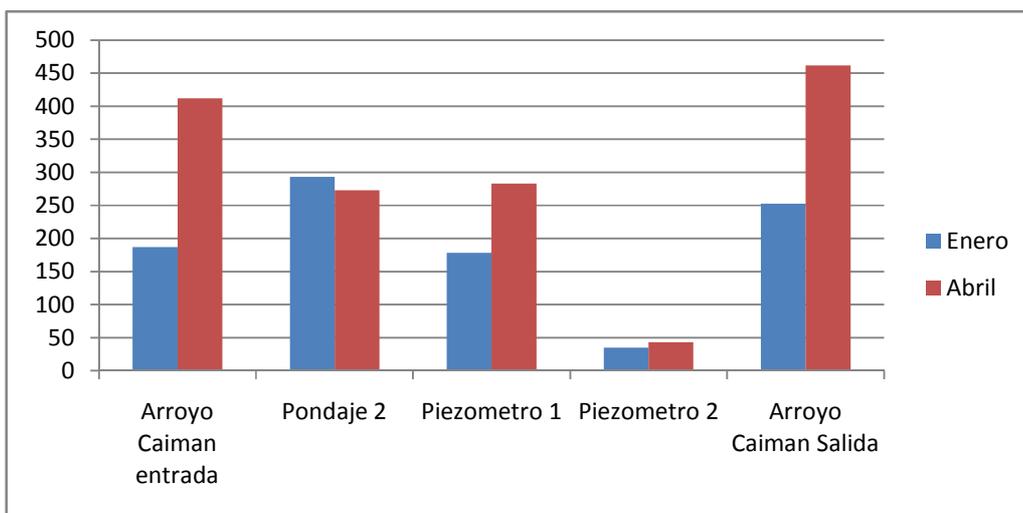


Figura N° 29 Comportamiento de sólidos suspendidos en los sitios de muestreo.

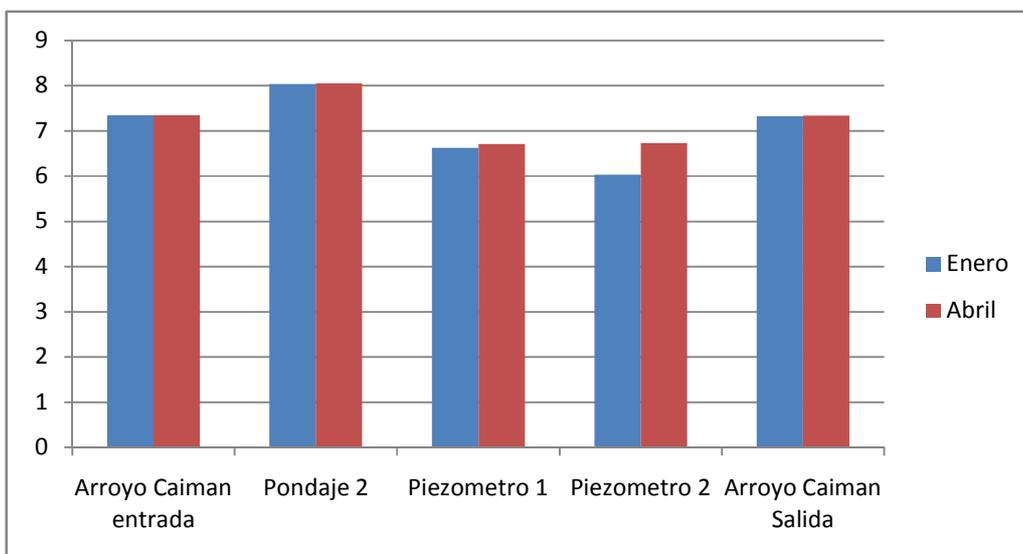


Figura N° 30 Comportamiento del PH en los sitios de muestreo.

CONCLUSIONES

En un relleno sanitario los lixiviados producen efectos que contaminan al medio ambiente, además de esto perjudican a la salud de los habitantes que se encuentran ubicados cerca de este, por lo tanto es necesario tratar de una forma adecuada y segura estos líquidos, con el fin de preservar un medio ambiente seguro y agradable, garantizándole condiciones óptimas de salubridad a las comunidades del área de influencia del relleno.

Todo el líquido contaminante generado en el relleno sanitario debe tratarse antes de ser vertido a un cuerpo de agua, superficial o subterráneo, utilizando procesos de reconocida viabilidad técnica, como los descritos en esta monografía.

El sistema de tratamiento por recirculación es uno de los más usados en nuestro medio por ser significativamente más económicos que los otros sistemas. Este además de ser viable y económico, es aprobado por la legislación ambiental Colombiana.

Los parámetros físicos y químicos de interés evaluados en el monitoreo de los lixiviados en el Relleno Sanitario El OASIS del Municipio de Sincelejo, como metales pesados, presentan una variación moderadamente leve, no representativa hasta el momento. Para el caso de los parámetros de DBO₅ y DQO, se observa que el lixiviado incrementa sus valores en estos parámetros debido a la época climatológica actual (época de sequía).

Hasta el momento el complejo de aguas lixiviadas, aguas superficiales y aguas subterráneas se encuentra trabajando dentro de los parámetros normales para este tipo de sistema.

RECOMENDACIONES

- Cubrir los residuos depositados en las celdas con material de cobertura o un geotextil, con el objetivo de evitar la infiltración de escorrentías producto de las lluvias e impedir la salida de lixiviados de forma descontrolada.
- Capacitar a todas las personas encargadas de la manipulación de los lixiviados en temas como: Seguridad Industrial en la operación de rellenos sanitarios, Normas de Bioseguridad y Legislación Ambiental Colombiana entre otros.
- En el sistema de tratamiento de recirculación de lixiviado se debe recircular por zonas para evitar la saturación de estas, con el fin de controlar la posible erosión o movimiento de masa generada por la escorrentía.
- Con el propósito de evitar infiltraciones en las zonas de almacenamiento de residuos (celdas) que produzcan la contaminación de fuentes de agua cercanas al relleno, estas zonas se deben reforzar e impermeabilizar con geomembranas teniendo en cuenta las especificaciones sugeridas en el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS - 2000, título F tabla f.6.3 normas ASTM para geomembranas.
- Se recomienda un seguimiento semestral a las aguas superficiales y subterráneas, con el fin de tener el control de sistema de tanque de almacenamiento de lixiviados en invierno y en verano.

GLOSARIO

Área de aislamiento: corresponde al área perimetral de un relleno sanitario, ubicada en su entorno, en donde se establecerán plantaciones que permitan la reducción de impactos sobre este. Es decir, corresponde al área de transición entre el área en donde se realizara la disposición final de residuos sólidos, mediante la tecnología de relleno sanitario, y su entorno..

Capacidad de carga: potencialidad que tiene un recurso o sistema para ser usado sin sufrir deterioro alguno y poder recuperarse o renovarse en plazos y condiciones normales, sin ver afectada su población o la estabilidad futura del recurso o sistema.

Contaminación: Es la alteración del medio ambiente por sustancias o formas de energía puestas allí por la actividad humana o de la naturaleza en cantidades, concentraciones o niveles capaces de interferir con el bienestar y la salud de las personas, atentar contra la flora y/o la fauna, degradar la calidad del medio ambiente o afectar los recursos de la Nación o de los particulares.

DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno): es un parámetro muy empleado para medir la contaminación orgánica en las aguas. Determina la capacidad del medio para descomponer la materia orgánica en un promedio de cinco días, de ahí que se hable de DBO-5: cantidad en mg / Litro de oxígeno que precisan las bacterias para descomponer las sustancias orgánicas en cinco días y a 20 grados centígrados.

Demanda biológica de oxígeno (DBO): oxígeno consumido en la degradación de sustancias oxidables del agua por la acción microbiológica, medido en condiciones estandarizadas. Se expresa en miligramos (mg) de

oxígeno por litro (Lt) de agua; un valor DBO elevado indica un agua con mucha materia orgánica (contaminación de la fuente). El subíndice cinco indica el número de días en los que se ha realizado la medida (DBO).

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅): Es un parámetro muy empleado para medir la contaminación orgánica en las aguas. Determina la capacidad del medio para descomponer la materia orgánica en un promedio de cinco días, de ahí que se hable de DBO₅: cantidad en mg / Litro de oxígeno que precisan las bacterias para descomponer las sustancias orgánicas en cinco días y a 20 grados centígrados.

Demanda química de oxígeno (DQO): cantidad de oxidante enérgico (dicromato o permanganato) consumido en la oxidación de todas las sustancias reducidas presentes en una muestra de agua, medido en condiciones estandarizadas. Se expresa en mg por litro de oxígeno equivalente a la cantidad de oxidante empleado; un valor DQO elevado indica un agua con muchas sustancias oxidables (contaminación de la fuente).

Depuración: acción de eliminar o limpiar una sustancia de los elementos que la perjudican o contaminan. Existen procedimientos muy variados, dependiendo de los contaminantes y de la sustancia (agua o aire): fisicoquímicos, mecánicos, biológicos, precipitación, intercambio iónico, químico, etc. Depuración de aguas residuales: eliminación de contaminantes de las aguas residuales. Los materiales sólidos y las partículas en suspensión pueden separarse por medios mecánicos y sedimentación; la materia orgánica es metabolizada por microorganismos en un tratamiento biológico, y otras sustancias pueden eliminarse por tratamientos físico-químicos.

Disposición final de residuos: Es el proceso de aislar y confinar los residuos sólidos, en especial los no aprovechables, en forma definitiva, en lugares especialmente seleccionados y diseñados para evitar la contaminación y los daños o riesgos a la salud humana y al medio ambiente.

Disposición final controlada: Es el proceso mediante el cual se convierte el residuo en formas definitivas y estables, mediante técnicas seguras.
Efluente: fluido líquido o gaseoso que se vierte sobre un cuerpo receptor.

Eliminación: Es cualquiera de las operaciones que pueden conducir a la disposición final o a la recuperación de recursos, al reciclaje, a la regeneración, al compostaje, la reutilización directa y a otros usos.

Impacto ambiental: es la alteración favorable o desfavorable que experimenta el conjunto de elementos naturales del hábitat, artificiales o inducidos por el hombre, ya sean físicos, químicos o ecológicos; como el resultado de efectos positivos o negativos de la actividad humana o de la naturaleza en sí.

Lixiviados: es el fluido proveniente de la descomposición de los residuos, bien sea por su propia humedad, reacción, arrastre o disolución de un solvente o agua al estar en contacto con ellos. En suelos agrícolas se refiere al "lavado" de nutrientes hacia capas inferiores.

Manejo integral de los residuos sólidos: Selección y aplicación de las técnicas, tecnología y programas que, puestos en marcha en forma jerarquizada, conducen a la reducción.

Minimización: Forma preventiva de la contaminación. Se refiere a la puesta en práctica de medidas organizativas, operativas y tecnológicas, necesarias para disminuir (hasta niveles económica y técnicamente factibles) la cantidad y toxicidad de los subproductos generados que implican un tratamiento o eliminación final. La primera fase es la reducción en el origen y, cuando ésta no es posible, debe reciclarse o recuperarse la energía de los componentes.

Monitoreo: Es el seguimiento y observación de los fenómenos contaminantes del ambiente, comparados con normas de calidad preestablecidas.

Persona o entidad prestadora del servicio público de aseo: Es aquella encargada de todas, una o varias actividades de la prestación del servicio público de aseo, en los términos del Artículo 15, de la Ley 142 de 1994. Igualmente denominada empresa de servicio publico de aseo, ESP de Aseo.

Norma de vertimiento: es el contenido máximo permisible en los residuos liquidas de un elemento, sustancia, compuesto o factor ambiental, solo, en combinación o sus productos de metabolismo, con el propósito de no ocasionar modificaciones en los patrones de calidad del cuerpo de agua receptor.

No biodegradable: son compuestos o sustancias que no se degradan o descomponen por la acción de ningún organismo vivo.

Norma de vertimiento: es el contenido máximo permisible en los residuos liquidas de un elemento, sustancia, compuesto o factor ambiental, solo, en combinación o sus productos de metabolismo, con el propósito de no ocasionar modificaciones en los patrones de calidad del cuerpo de agua receptor.

Organismos aeróbicos: son los organismos que necesitan oxígeno para vivir.

Organismos anaeróbicos: son los organismos que son capaces de vivir y desarrollarse en ausencia de oxígeno.

Parte por millón (PPM): es la representación de la concentración de una sustancia en el agua y es igual a miligramos por litro (Mg. / litro).

Pirólisis: descomposición físico-química del material degradable de los residuos sólidos, debido a la acción de la temperatura en una atmósfera deficiente en oxígeno.

Recuperación: Extracción de las sustancias o recursos valiosos contenidos en los subproductos. Suele realizarse mediante tratamiento previo y se utiliza posteriormente con una finalidad diferente a la original.

Relleno sanitario: Método para evacuar residuos sobre la tierra, sin crear peligros o molestias en la salud y la seguridad pública. Para asegurar un vertido correcto es necesaria una preparación cuidadosa de la zona de relleno y un buen control del drenaje del agua. Los rellenos modernos correctamente diseñados, tienen un recubrimiento de arcilla compactada o de plástico; poseen sistemas de recolección de los lixiviados, con el fin de separarlos para su tratamiento y evacuación, y cuentan con sistemas para recolectar y separar el gas metano generado.

Residuo líquido: elemento, sustancia o compuesto en estado líquido proveniente de cualquier actividad que pueda afectar al recurso agua, al suelo o al subsuelo en condiciones naturales.

Residuo peligroso: aquel que por sus características infecciosas, tóxicas, explosivas, corrosivas, inflamables, volátiles, combustibles, radioactivas o

reactivas, pueda causar daño directo a la salud humana o deteriorar la calidad ambiental hasta niveles que causen riesgo al hombre. También son residuos peligrosos aquellos que sin serlo en su forma original se transforman por procesos naturales en residuos peligrosos. Así mismo los lixiviados se consideran residuos peligrosos los envases, empaques y embalajes que hayan estado en contacto con ellos.

Sustancia peligrosa: compuesto que de acuerdo con su composición química, su estado físico y su nivel de concentración, puede limitar la posibilidad de aprovechar un recurso natural, o representar alto riesgo poro la salud humana y el medio ambiente.

Tecnologías ambientalmente apropiadas: conjunto de técnicas y aplicaciones científicas, que permite la realización de actividades productivas con la utilización racional de recursos, sin afectar el ambiente de manera negativa.

Vertedero: Lugar donde se depositan residuos de origen urbano o industrial. Puede tratarse únicamente de una acumulación incontrolada, con los consiguientes riesgos de incendio, sanitarios y ambientales, o de una instalación o vertedero controlado donde los residuos reciben algún tipo de tratamiento o almacenamiento.

Vertimiento: en su afección ambiental se utiliza para designar la corriente de desperdicios, ya sean líquidos, sólidos o gaseosos, que se introduce en el medio.

FUENTE: <http://www.corpocaldas.gov.co/secciones/infogeneral.php?ele=152>

REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

- Decreto ley 2811 de 1974, Código De Los Recursos Naturales
- Gobernación de Antioquia, Guía Para El Diseño, Construcción Y Operación De Un Relleno Sanitario Manual. Medellín-Colombia. abril de 1998.
- Ley 99 de 1993 Sistema Nacional Ambiental
- Reglamento Técnico Del Sector Agua Potable Y Saneamiento Básico RAS 2000.
- JARAMILLO, Jorge A. Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales. Washington D.C., Septiembre De 1991.
- Organización Panamericana de la Salud - Organización Mundial de la Salud, Repidisca, “RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES”, 1994.
- Collazos P. Héctor, “RESIDUOS SÓLIDOS”, Universidad Nacional de Colombia, 1998.
- Centro Panamericano De Ingeniería Sanitaria y Ciencias Del Ambiente (CEPIS), Rellenos Sanitarios Manuales.
- Sena – Min desarrollo, “MANEJO Y DISPOSICIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES”, 1999.

- MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE, Guía ambiental para rellenos sanitarios. Tomo I, II. 2002.
- PINEDA, Samuel. Manejo y disposición de residuos sólidos urbanos. Panamericana formas e impresos. 1998.
- TCHOBANOGLIOUS, George. Gestión Integral de Residuos Sólidos. McGraw-Hill.España. 1994
- Giraldo E., "Manejo Integrado de Residuos Sólidos Urbanos", 1997
- WWW. Cepis.oms/ops.org.
- WWW. Ideam.gov.co.
- WWW. Ingenieriambiental.com
- WWW. Ingenieriasanitaria.com
- WWW. Minambiente.gov.co