

Manejo y Tratamiento de Lixiviados en Rellenos Sanitarios: Revisión bibliográfica y Experiencia en Planta de Tratamiento de Lixiviados de Navarro

Paula Fernanda Garcia¹

1. Universidad Santiago de Cali, Facultad de Ingeniería, Programa de Especialización en Gerencia Ambiental y Desarrollo Sostenible Empresarial

RESUMEN

Los rellenos sanitarios son actualmente el método más utilizado de disposición final de residuos sólidos municipales en todo el mundo. Sin embargo, esta forma de disposición final genera como resultado los lixiviados de vertederos municipales, los cuales son altamente contaminantes con concentraciones elevadas de compuestos orgánicos e inorgánicos y con su concentración ocasional de metales pesados, lo cual hace necesaria su caracterización fisicoquímica con el fin de determinar la manera más óptima de tratarlos. Esta revisión bibliográfica muestra las maneras convencionales de tratar los lixiviados producidos en rellenos sanitarios, presenta varias plantas a nivel mundial, local y sus sistemas de tratamiento. Por último, muestra la experiencia de la Planta de Tratamiento de Lixiviado de Navarro Ubicada en la Ciudad de Santiago de Cali, su sistema de tratamiento y sus subsistemas de recolección, conducción y distribución.

Palabras Clave: Relleno sanitario, lixiviados, Planta de Tratamiento de lixiviado de Navarro.

ABSTRACT

Sanitary landfills are currently the most widely used method of final disposal of municipal solid waste throughout the world. However, this form of final disposal results in leachates from municipal landfills, which are highly polluting with high concentrations of organic and inorganic compounds and with their occasional concentration of heavy metals, which makes their physicochemical characterization necessary in order to determine the most optimal way to treat them. This bibliographic review shows the conventional ways of treating leachates produced in landfills, presents several plants worldwide, local and their treatment systems. Finally, it shows the experience of the Navarro Leachate Treatment Plant Located in the City of Santiago de Cali, its treatment system and its collection, conduction and distribution subsystems.

Keywords: document formatting; submit-ready manuscript

1. INTRODUCCIÓN

Un residuo sólido es cualquier objeto, material, sustancia o elemento resultante del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales o de servicios, que el generador presenta para su recolección por parte de la persona prestadora del servicio público de aseo. Igualmente, se considera como residuo sólido, aquel proveniente del barrido y limpieza de áreas y vías públicas, corte de césped y poda de árboles. Los residuos sólidos que no tienen características de peligrosidad se dividen en aprovechables y no aprovechables. (Decreto 2981. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 20 de diciembre de 2013).

En 1998 el Ministerio del Medio Ambiente, formuló la Política Nacional en residuos sólidos, que esboza los lineamientos, para la Gestión integral de Residuos Sólidos (GIRS), cuyo fin fue reducir los impactos negativos sobre la salud humana y medio ambiente. Estos lineamientos plantearon una serie de estrategias jerárquicas, las cuales buscan cumplir los objetivos planteados de reducción en el origen, promover el aprovechamiento y valoración de los residuos, el tratamiento y transformación de los residuos y por último su disposición final. La disposición final de los residuos sólidos se puede realizar en rellenos sanitarios o en botaderos a cielo abierto, los cuales a pesar de estar prohibidos en Colombia en algunos municipios aún existen.

El CONPES 3874 de 2016 desarrolló la Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos como política nacional de interés social, económico, ambiental y sanitario. Esta política se compone de cuatro ejes estratégicos. El primer eje busca adoptar medidas encaminadas hacia (i) la prevención en la generación de residuos; (ii) la minimización de aquellos que van a sitios de disposición final; (iii) la promoción de la reutilización, aprovechamiento y tratamiento de residuos sólidos; y (iv) evitar la generación de gases de efecto invernadero.

Los rellenos sanitarios son actualmente el método más utilizado de disposición final de residuos sólidos municipales en todo el mundo. Infortunadamente, como resultado de la percolación del agua a través de los desechos sólidos se producen los lixiviados de vertederos municipales, los cuales son altamente contaminantes por su alta concentración de materia orgánica, amonio y metales (Di Iaconi et al., 2011).

El lixiviado es generalmente un líquido de color oscuro, con fuerte olor, el cual posee alta carga orgánica e inorgánica. Es una solución en la cual se presentan altos contaminantes los cuales se pueden dividir en (Kjeldsen et al., 2002): I) Materia orgánica disuelta: Demanda Química de Oxígeno (DQO), Carbono Orgánico Total (COT), Ácidos Grasos Volátiles (AGV) y compuestos húmicos y fúlvicos. II) Compuestos inorgánicos: Electrolitos calcio (Ca^{2+}), Electrolitos Magnesio (Mg^{2+}), Electrolitos Sodio (Na^{+}), Electrolitos Hierro (Fe^{2+}), Electrolitos Potasio (K^{+}), Ion Amonio (NH_4^{+}), Ion Manganeseo (Mn^{2+}), Anión Bicarbonato (HCO_3^{-}). III) Metales pesados: Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Plomo (Pb), Níquel (Ni) y Zinc (Zn). IV) compuestos orgánicos xenobióticos (Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), Hidrocarburos aromáticos, pesticidas, organoclorados) (Kjeldsen et al., 2002). V) Microorganismos: Coliformes totales y termotolerantes (Moravia et al., 2013).

Al ser un residuo altamente contaminante se han diseñado tecnologías de tratamiento entre las cuales se destacan procesos biológicos (Di Iaconi et al., 2011), procesos de oxidación avanzada (Cortez et al., 2011), procesos foto catalíticos heterogéneos y homogéneos (Rocha et al. 2011), combinación de varios procesos (Yilmaz et al., 2010), aplicación de varios procesos biológicos, fisicoquímicos o combinación de estos (Halil Hasar et al., 2009), sistemas de ósmosis inversa (Renou et al., 2008a), aplicación de varias tecnologías (Peng Yao, 2017), entre otras.

En el presente artículo se realiza una revisión bibliográfica en torno a las características fisicoquímicas de los lixiviados, las tecnologías de tratamiento disponibles a nivel mundial, además de presentar algunas experiencias de plantas de tratamiento existentes en la actualidad, particularizando la experiencia de la ciudad de Cali, en el Vertedero de Navarro. El artículo se encuentra conformado por 6 secciones las cuales serán Sección 1. Generalidades de la Gestión Integral de Residuos Sólidos Municipales. Sección 1.1. Generalidades y Características de los Lixiviados, Sección 1.2 Alternativas para el tratamiento de lixiviado, Sección 1.3 Experiencia Reportadas de Tratamiento de lixiviados, Sección 2. Generalidades del Vertedero de Navarro, Sección 3. Sistema de Tratamiento de Lixiviados del Vertedero de Navarro, Sección 4. Operación Planta De Tratamiento De Lixiviados De Navarro En La Actualidad. Sección 5. Conclusiones.

1. GENERALIDADES DE LA GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES.

Según el Decreto 1077 de 2015 del Ministerios de Vivienda, Ciudad y Territorio, por medio del cual se expidió el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio, el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) “Es el instrumento de planeación municipal o regional que contiene un conjunto ordenado de objetivos, metas, programas, proyectos, actividades y recursos definidos por uno o más entes territoriales para el manejo de los residuos sólidos, basado en la política de gestión integral de los mismos, el cual se ejecutará durante un período determinado, basándose en un diagnóstico inicial, en su proyección hacia el futuro y en un plan financiero viable que permita garantizar el mejoramiento continuo del manejo de residuos y la prestación del servicio de aseo a nivel municipal o regional, evaluado a través de la medición de resultados”. Por otro lado, la política Nacional para GIRS de 1998 del Ministerio del Medio Ambiente, estableció las etapas jerárquicas que se definen a continuación:

Reducción en el origen: está en el primer lugar de la jerarquía de la GIRS por ser la forma más eficaz de reducir la

cantidad y toxicidad de residuos, el costo asociado a su manipulación y los impactos ambientales.

Aprovechamiento y valorización: el aprovechamiento implica la separación y recogida de materiales residuales en el lugar de su origen; la preparación de estos materiales para la reutilización, la reprocesamiento, la transformación en nuevos productos, y la recuperación de productos de conversión.

Tratamiento y transformación: implica la alteración física, química o biológica de los residuos. Típicamente, las transformaciones físicas, químicas y biológicas que pueden ser aplicadas a los residuos sólidos urbanos son utilizadas para mejorar la eficacia de las operaciones y sistemas de gestión de residuos.

La disposición final controlada: es necesario hacer algo con los residuos que no tienen ningún uso adicional, la materia residual que queda después de la separación de residuos sólidos en las actividades de recuperación de materiales, la materia residual restante después de la recuperación de productos de conversión o energía del tratamiento y transformación para lo cual se debe garantizar una disposición final controlada; además, es necesario contar con una capacidad adecuada en los sitios de disposición final y planes para su clausura.

La disposición final de los residuos sólidos se puede realizar en rellenos sanitarios o en botaderos a cielo abierto, los cuales a pesar de estar prohibidos en Colombia en algunos municipios aún existen. Los rellenos sanitarios es un 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. (Corena,, 2008).

1.1 Características de los lixiviados

Se entiende por lixiviado el líquido residual que es generado en la descomposición bioquímica de los residuos o como resultado de la percolación de agua a través de los residuos en proceso de degradación; este líquido tiende a salir, por gravedad a través de la parte inferior del Relleno Sanitario, percolando hasta que una capa impermeable lo impida (Ministerio del medio ambiente, 2002).

De acuerdo con la composición fisicoquímica de los lixiviados, se pueden clasificar como lixiviados jóvenes, intermedios o viejos, como se describe en la Tabla 1

Tabla 1. Comparación de Características Típicas de Lixiviados de Rellenos Sanitarios

CARACTERÍSTICA	LIXIVIADO JOVEN	LIXIVIADO INTERMEDIO	LIXIVIADO VIEJO
Edad (años)	<1	1- 5	>5
pH	<6.5	6.5-7,5	>7.5
DQO (mg/ L)	>15	3 – 15	<3
DBO/DQO	0.5 – 1	0.1 – 0.5	< 0.1
TOC/DQO	<0.3	0.3 – 0.5	>0,5
NH ₃ – N (mg/L)	<400	400	>400
Metales pesados (mg/L)	>2	<2	<2
Compuestos orgánicos	80%AGV	5 -30% AGV+AH+AF	ΔH+AF
Tipo	S/D	P	E
VFA= Ácidos Grasos Volátiles; AH= Ácidos Húmicos; AF=Ácidos Fúlvicos; SD= Sin Degradar; P= parcialmente Degradados o estabilizados; E=Estabilizados			

Fuente: Renou et al (2008a)

Como puede observarse en la tabla 1, un lixiviado viejo tendrá una concentración de DQO menor a 3 mg/L, lo cual presentará un vertedero viejo con una relación DBO₅/DQO entre 0,05 y 0,2, debido a la abundancia de ácidos húmicos y fúlvicos. En un lixiviado de 3 – 5 años la DQO y la DBO₅ alcanzan valores muy altos y el pH bajo por la gran cantidad

de ácidos grasos volátiles producidos en esta fase (Renou et al, 2008a). Por lo tanto, la relación DBO_5/DQO alcanza valores más altos que 0,7, debido que el lixiviado se va haciendo más viejo a la alta biodegradabilidad de los compuestos orgánicos presentes en el lixiviado. A medida, la concentración de los componentes fácilmente biodegradables y la relación DBO_5/DQO va bajando. Cuando los residuos se han estabilizado la relación DBO_5/DQO alcanza un valor de 0,1 (Sancha M., 2013). Por lo tanto, un lixiviado joven por sus características fisicoquímicas se hace mucho más fácil de tratar en comparación con los lixiviados viejos.

1.2 Alternativas para el Tratamiento de Lixiviados

Los procesos convencionales y tecnológicos para tratar el lixiviado pueden clasificarse en cuatro grandes grupos, transferencia de lixiviados, biodegradación, procesos fisicoquímicos y procesos tecnológicos (Renou et al, 2008b):

- I. Transferencia de lixiviados - recirculación y tratamiento combinado con aguas residuales domésticas: Técnica que consiste en tratar los lixiviados en conjunto con las aguas residuales en una PTAR (Planta de Tratamiento de Aguas Residuales). Esta técnica es utilizada por su facilidad de operación y por sus bajos costos de mantenimiento, sin embargo, por la alta presencia de compuestos inhibidores orgánicos con baja biodegradabilidad y por la presencia de altos metales pesados en el lixiviado los cuales reducen la eficiencia del tratamiento, y aumenta las concentraciones del efluente (Renou et al, 2008b).
- II. Biodegradación: procesos anaerobios y aerobios
 - Procesos anaerobios: los procesos fermentativos de las bacterias anaerobias comprenden una serie de procesos, que interactúan entre sí, en una serie de reacciones metabólicas complejas en ausencia de oxígeno (Corrales et al, 2015). Al contrario de los procesos aerobios, la digestión anaerobia conserva energía y produce muy pocos sólidos. Como producto de esta reacción se forma biogás, compuesto principalmente de metano y dióxido de carbón. El biogás se puede aprovechar como fuente de energía
 - Procesos aeróbicos: son los procesos biológicos que requieren oxígeno. Son basados en biomasa de crecimiento suspendido, como las lagunas aireadas, los procesos convencionales de lodos activados, la secuencia de reactores discontinuos (SBR) y los reactores de biomasa de lecho móvil (MBBR). Estos permiten una reducción parcial de los contaminantes orgánicos biodegradables y logran una nitrificación del nitrógeno amoniacal (Renou et al, 2008b).
- III. Procesos fisicoquímicos: oxidación química, adsorción, precipitación química, coagulación/floculación, flotación con aire disuelto.
 - Oxidación química: los procesos de oxidación química avanzada basada en ozono son utilizadas como pretratamiento con el fin de mejorar la biodegradabilidad de su materia orgánica para un posterior tratamiento biológico (Cortez et al., 2011).
 - Adsorción: la adsorción de contaminantes de lixiviado a través de columnas de carbón activado proporciona una mayor reducción en los niveles de DQO, a comparación de otros métodos químicos. La adsorción se utiliza en conjunto con el tratamiento biológico para hacer más efectivo el tratamiento del lixiviado (Cortez et al., 2011).
 - Precipitación química: es ampliamente utilizada como pretratamiento en el tratamiento de lixiviado para eliminar la alta concentración de nitrógeno amoniacal (Renou et al, 2008b).
 - Coagulación / floculación: la coagulación-floculación es un método, el cual es utilizado como pretratamiento para tratar lixiviados jóvenes como una técnica de post-tratamiento para los lixiviados estables (Yilmaz et al. 2010).
 - Flotación con aire disuelto: Es el método más común para eliminar la alta concentración del nitrógeno amoniacal, el cual se encuentra generalmente en los lixiviados (Renou et al, 2008b).
- IV: Procesos tecnológicos (a través de membranas): los métodos más utilizados para el tratamiento de lixiviado a través de membranas son los descritos a continuación: Microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa (Renou et al., 2008a).
 - Microfiltración: es un método utilizado para eliminar los coloides y el material suspendido. Se utiliza como etapa de prefiltración, por su baja retención (Peng Yao, 2017).

- Ultrafiltración: es utilizado para eliminar las macromoléculas y las partículas, pero depende del material del cual este construido la membrana. Es una técnica utilizada como pretratamiento para la osmosis inversa (Peng Yao, 2017).
- Osmosis inversa: es el método más eficiente por su alto rendimiento en la separación de contaminantes para el proceso del tratamiento de lixiviado (Peng Yao, 2017).

Así mismo existen configuraciones de las tecnologías anteriormente descritas la cuales al ser combinadas optimizan el tratamiento de lixiviados, dichas configuraciones se describen a continuación:

- Procesos foto catalíticos heterogéneos y homogéneos los cuales se llevan a cabo bajo luz solar. Este consiste en un sistema foto catalítico constituido por colectores parabólicos compuestos, dos tanques de almacenamiento, dos bombas de recirculación, un sedimentador y un reactor biológico operado en modo batch. (Rocha et al., 2011).
- Proceso alternativo que consiste en una unidad de pretratamiento en un clarifloculador, seguido de una unidad de tratamiento biológico químicamente mejorado, este consistió en un sistema biológico basado en un sistema en un reactor granular con biofiltros operados por cargas secuenciales (SBBGR) y un sistema químico basado en dosificación de ozono (Di Iaconi et al., 2011).
- Combinación de tratamientos biológicos como coagulación y eliminación de amoniaco, tratamiento con biorreactor con membranas y por último un post-tratamiento en una unidad de osmosis inversa (Halil et al., 2009).
- Existen configuraciones en el los cuales se emplean un conjunto de tecnologías con el fin de obtener un tratamiento eficiente del lixiviado, en algunos casos el lixiviado del vertedero se recoge en una laguna de estabilización y es transferida a un sedimentador, seguido de filtros de arena, filtros de micras y 2 etapas de Osmosis inversa. El permeado de la 1 etapa es enviado a la segunda, con el fin de que este sea pulido; el permeado de la segunda etapa se neutraliza para ser descargado en su receptor final (rio). El concentrado de la primera etapa se envía a un tanque de cristalización, para luego ser alimentado a una unidad de nanofiltración y el permeado es enviado a un módulo de osmosis inversa el cual disminuye el volumen del concentrado para luego ser secado y empacado (Kenichi et al, 2002).

1.3 Experiencias Reportadas de Tratamiento de Lixiviados

La mayoría de las plantas de tratamiento de lixiviados en el mundo presenta una configuración de tratamiento fisicoquímico acompañado de una o varias variaciones de osmosis inversa como se sintetiza en la Tabla 2.

Tabla 2. Plantas de Tratamiento de Lixiviado Existentes a Nivel Mundial.

NOMBRE DEL VERTEDERO	UBICACIÓN	TRATAMIENTO/CAPACIDAD	DESCRIPCIÓN/DETALLE	REFERENCIA
El vertedero "Clean Park KINU",	Yachiyo, Distrito de Kanto de Japón	Capacidad: 70 m ³ /d	<ul style="list-style-type: none"> - El lixiviado del vertedero se recoge en la laguna de estabilización y es transferida a un sedimentador, seguida por filtros de arena y filtros de micras. - Unidades de módulo DT de primera etapa. - Unidades de Módulo DT de 2da etapa para pulir el permeado de la segunda etapa, esta se neutraliza y se esteriliza antes de su eliminación en el Río KINU. - El concentrado de las unidades de modulo DT primera etapa, se envían al tanque de cristalización, donde se depositan minerales incrustados sobresaturados. 	(Peng Yao. 2017)
El vertedero de XinFeng	Guangzhou, China.	Capacidad:1600 toneladas/día	<ul style="list-style-type: none"> - Un biorreactor de membrana (MBR) - Unidad de microfiltración continua (CMF) - Un proceso de ósmosis inversa (RO) 	(Kenichi Ushikoshi et al, 2002)
PTL - Vertedero de COGERSA	Asturias (España)	Proceso por membranas Capacidad: 700 m ³ /día.	<ul style="list-style-type: none"> - Balsas de almacenamiento de lixiviados - Tratamiento fisicoquímico de lixiviado - Reactores a presión para la depuración biológica - Sistema de ultrafiltración para la retención de los lodos biológicos y sólidos - Compresores para el aporte de oxígeno y la instrumentación neumática - Intercambiadores de calor para disipar la energía de las reacciones exotérmicas de depuración 	(Mingjun Deng et al, 2018) (COGERSA (s.f.))

NOMBRE DEL VERTEDERO	UBICACIÓN	TRATAMIENTO/ CAPACIDAD	DESCRIPCIÓN/DETALLE	REFERENCIA
			<ul style="list-style-type: none"> - Sistemas de dosificación de aditivos - Automata, panel de control y PC de control de la planta - Analizadores - Centrífuga de lodos biológicos - Tratamiento terciario con carbón activo - Balsas de almacenamiento de agua tratada 	
Depuradora de Lixiviados en Areosa	Coruña, España	Capacidad de tratamiento unitario por máquina de 198 m ³ /día.	<ul style="list-style-type: none"> - Bombeo inicial desde balsa de agua bruta - Tanque de homogeneización - Bombeo alimentación 01 (ósmosis inversa) - Bombas de recirculación - Máquinas 01 doble etapa módulo CD, que incluye: <ul style="list-style-type: none"> - Control y ajuste de pH, Prefiltración. - Etapa de Lixiviado, Etapa de Permeado. - Evacuación del concentrado. - Sistema de limpieza de membranas. - Control e instrumentación. 	(Sancha M. 2013).
Planta de tratamiento de lixiviados de Málaga	Málaga, España	Capacidad de tratamiento de 100 m ³ /día,	<ul style="list-style-type: none"> - Bombeo desde las lagunas - Proceso biológico de nitrificación- desnitrificación - Sistema de membranas de ultrafiltración - Sistema de Ósmosis Inversa para el tratamiento terciario del permeado de ultrafiltración 	PESAMA
Relleno Sanitario de Bordo Poniente	México	Capacidad 3 L/s	Proceso fisicoquímico -coagulación - floculación	LIMASA
Vertedero "II Fossetto",	Toscana, Italia	Capacidad de 1.000.000 m ³	<ul style="list-style-type: none"> - Tratamiento fisicoquímico - Tratamiento por membranas de ultrafiltración - Sistema de ósmosis inversa (dos módulos) - Cloración y filtración de carbón activado 	(Najera (s.f))
	Vertedero Sanitario Intermunicipal, portugués	Capacidad: 175 m ³ /día	<ul style="list-style-type: none"> - Sistemas de ósmosis inversa seguidos por una columna de separación. 	(Calabrò et al, 2018)

A nivel nacional, existen varias plantas de tratamiento de lixiviados que emplean por lo general tecnologías de Osmosis inversa y en algunos casos incluyen modificaciones como osmosis inversa con vibración. Estas se describen en la tabla 3.

Tabla 3. Plantas de Tratamiento de Lixiviados a Nivel Nacional.

NOMBRE DEL VERTEDERO	UBICACIÓN	TRATAMIENTO/ CAPACIDAD	DESCRIPCIÓN/DETALLE	REFERENCIA
Parque Ambiental La Pradera,	Municipio de Don Matías, a 57 kilómetros de Medellín.	Capacidad: 12 L/s	Sistema de tratamiento de lixiviados que posee tres etapas: <ul style="list-style-type: none"> - Tratamiento físico - Tratamiento fisicoquímico - Biorreactores con membrana – MBR. 	(Empresas Publicas De Medellín E.S.P., 2014)
Planta de lixiviados del Carrasco	Bucaramanga.	Capacidad: 4.6 m ³	<ul style="list-style-type: none"> - Plantas de membrana de separación - Sistema de osmosis inversa con vibración mecánica - Sistema de osmosis inversa con espirales estáticos 	(Alcaldía de Bucaramanga, 2014)
Relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo	Bojacá.	Capacidad: 14 m ³ /mes	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema biológico - Sistema de tratamiento de Osmosis y nano filtración 	(Empresa de Aseo de Bucaramanga EMAB S.A E.S.P, 2013)
Relleno Sanitario Colombo – El Guabal,	Yotoco, Valle del Cauca.	Capacidad: 8 L/s	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema de tratamiento de Osmosis Inversa 	(CVC, 2018)
Relleno Sanitario Regional Presidente	Buga.	Capacidad:0,5 L/s	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema de tratamiento de Osmosis Inversa con sistema de vibración (VSEP) 	El País (s.f)
Relleno Sanitario de Navarro	Santiago de Cali.	Capacidad: 4 L/s	<ul style="list-style-type: none"> - Pretratamiento fisicoquímico - Sistema de tratamiento de Osmosis Inversa 	UT CDM SMITH-INGESAM, 2015.

2. ANTECEDENTES DEL VERTEDERO DE NAVARRO

El vertedero de Navarro inició su operación en el año 1968 cuando la Empresa de Servicios Varios EMSIRVA ESP, utilizó una excavación ya existente en el antiguo cauce (Madre vieja) del Río Cauca. se encuentra ubicado a una altura de 990 m.s.n.m en el corregimiento de Navarro a 3.5 Km de la ciudad Santiago de Cali, departamento Valle del y en la rivera izquierda del Río Cauca. El predio limita al norte con la comuna No. 7 del área urbana de la ciudad, al Oriente con el río Cauca, al sureste con el canal Cincuenta, al noroeste-este con callejones del ingenio Meléndez y al suroeste con un predio de CVC contiguo al canal interceptor (SERVIAMBIENTALES, 2000).

Inicialmente operó como “Relleno Sanitario”, sin ningún tipo de protección o diseño técnico apropiado hasta el año 1976 (Collazos, 2001) , tiempo durante el cual se continuaron depositando residuos en una zona aledañas no excavadas (EMSIRVA, 2002). Es así como, durante el tiempo de operación se logró ocupar aproximadamente un área ocupada de 26 ha, distribuidas en un botadero antiguo, transitorios y nuevo (Márquez J., 2011).

La zona antigua está compuesta por el antiguo cerro de los domiciliarios y el antiguo cerro de residuos hospitalarios, ocupando un área aproximada de 17 hectáreas. Esta zona fue denominada como cerro antiguo.

La zona transitoria fue conformada por los vasos No. 1, 2, 3, 4, 5, 6, A, C, D, F, llamado relleno transitorio, con un área aproximada de 13 hectáreas.

La zona nueva también llamada como vaso 7 o nueva celda, con un área aproximada de 2 hectáreas. Fue el último vaso que se construyó antes de su cierre definitivo.

El vertedero de Navarro operó hasta el año 2008. Durante todo su periodo de actividad y después de su cierre, las basuras acumuladas han generado un importante volumen de lixiviados que ha sido almacenado en lagunas al interior del vertedero, constituyendo un riesgo permanente para el entorno. Particularmente en el vertedero de Navarro, los lixiviados fueron inicialmente tratados mediante ocho lagunas de evaporación técnicamente impermeabilizadas con geomembranas, cuyas dimensiones aproximadas se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Lagunas de almacenamiento de lixiviado– Vertedero de Navarro

LAGUNA	AREA m ²	ALTURA m	VOLUMEN m ³
Gran Laguna 1	14.314	8,00	114.512
Gran Laguna 2	13.800	8,00	110.400
Gran Laguna 3	12.247	8,00	98.000
Laguna de Pulimento	3.828	5,00	19.000
Laguna Vaso C			600
Laguna N°5	4.662	4,00	18.600
Laguna N°6	5.000	4,60	23.000
Laguna N°7	6.555	7,30	47.854
Laguna N°8	5.269	4,90	25.818,1
Volumen total de almacenamiento de lixiviados			457.784,1

Fuente: Alcaldía de Santiago de Cali, 2013a

Dicho volumen debía ser tratado con el fin de dar solución al pasivo ambiental representado por los lixiviados existentes en el antiguo vertedero, debido a estos son uno de los principales entes de contaminación del Río Cauca. El cerro antiguo se encuentra ubicado aguas arriba de las bocatomas de captación sobre el río Cauca para las plantas de tratamiento de agua potable de puerto mallarino y río cauca, las cuales abastecen el 80% de la demanda del servicio de acueducto de la ciudad. cabe anotar que el antiguo botadero a cielo abierto al no cumplir con ninguna norma y control

para los lixiviados acabo con la madre vieja del rio cauca. (Conpes, 2009)

La composición fisicoquímica de los lixiviados del vertedero de navarro, en sus diferentes puntos de muestreo, corresponde a un lixiviado viejo. Como puede observarse en la tabla 5.

Tabla 5. Caracterización de Vertimientos líquidos de Navarro.

Parámetro	Unidad	Sitio de Muestreo					
		Estación de bombeo Vaso 6	Lagunas 1 y 2	Estación de Bombeo Vaso 7	Laguna 7	Estación de Bombeo Vaso D	Madrevieja
		Muestra 389	Muestra 390	Muestra 391	Muestra 392	Muestra 393	Muestra 394
DQO	mg O ₂ /L	3444	3642	3905	2917	4695	109,7
DBO ₅	mg O ₂ /L	198	235	159	75	172	13
Sólidos Susp. Totales	mg/L	31	356	18,3	99	37	55,3
Sólidos Susp. Volátiles	mg/L	16	196	8	40	16,4	28
Alcalinidad Total	mg CaCO ₃ /L	8997	7538	11275	2450	12708	333
Acidez	mg CaCO ₃ /L	0	0	412	0	608	50
Cloruros	mg Cl/L	2542	3196	2144	1705	2665	103
Sulfatos	mg SO ₄ ²⁻ /L	314	228	291	264	70	250
Nitritos	mg NO ₂ -N/L	0,658	0,636	0,415	0,291	5,439	0,071
Nitratos	mg NO ₃ -N/L	148,53	82,5	59,5	42,01	0,415	7.121
Nitrógeno Total	mg N/L	937,30	107,75	888,43	42,12	939,22	39,7
Nitrógeno Amoniacal	mg NH ₃ -N/L	217,33	44,94	669,46	21,0	792,50	26,85
Oxígeno Disuelto	mg O ₂ /L	0	0	0	0	0	0
Grasas y/o Aceites	mg/L	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0
Turbiedad	UNT	13	153	70,5	81,6	18,4	5,40
Conductividad	µSiemens/cm	19210	15140	24000	12010	26700	887
pH	Unidades	8,46	9,32	8,18	9,16	8,07	7,72

Fuente: Alcaldía de Santiago de Cali, 2013b

Identificación de la muestra	Fecha de análisis	CONCENTRACIÓN DE METALES TOTALES (mg/L) ¹							
		Cu	Ag	Ni	Pb	Cd	Zn	Cr	Fe
389 – Vaso 6	Octubre 12/2012	0.1530	0.0135	0.4068	0.1701	0.0326	<0,005	<0,043	0.5877
390 – Lagunas 1 y 2	Octubre 12/2012	0.0333	0.0134	0.3073	0.1615	0.0294	0.0404	0.6573	2.0318
391 –Vaso 7	Octubre 12/2012	0.0237	0.0123	0.2806	0.1449	0.0240	0.0634	0.7591	0.9672
392 – Laguna 7	Octubre 12/2012	0.0448	0.0134	0.4001	0.1426	0.0213	0.0296	0.7445	0.4647
393 – Vaso D	Octubre 12/2012	<0,010	<0,012	0.0408	<0,110	<0,006	<0,005	0.1747	1.9607
394 - Madrevieja	Octubre 12/2012	0.0319	0.0160	0.2457	0.1353	0.0123	<0,005	0.4817	1.8648
Límite de Detección del Método (mg/L)		0.010	0.012	0.032	0.110	0.006	0.005	0.043	0.043
1. Resultados obtenidos con EMCALI –Laboratorio De Aguas Residuales EMCALI 2. Ver Límites Máximos Permisibles en la Tabla 2. Decreto 3930 de 2010 Revisión V 4.0: Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a sistemas de alcantarillado público, y se dictan otras disposiciones									

Fuente: Alcaldía de Santiago de Cali, 2013b

3. SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DEL VERTEDERO DE NAVARRO

Con el fin de mitigar el pasivo ambiental generado en el Vertedero de Navarro, La Alcaldía de Santiago de Cali, construyo un Sistema de tratamiento de lixiviados el cual consta de varios subsistemas; esto con el fin de no solo tratar el lixiviado existente en las lagunas de tratamiento, si no también tratar el acumulado en el fondo de los vasos del vertedero.

El sistema de tratamiento de lixiviados consta de varios subsistemas los cuales se describen a continuación (UT CDM

SMITH- INGESAM, 2015), ver figura 1:

1. Sistema de Tratamiento de Lixiviados.
2. Recolección y Conducción de Lixiviados.
3. Manejo de Lodos y Concentrado.
4. Manejo y Disposición de Permeado.

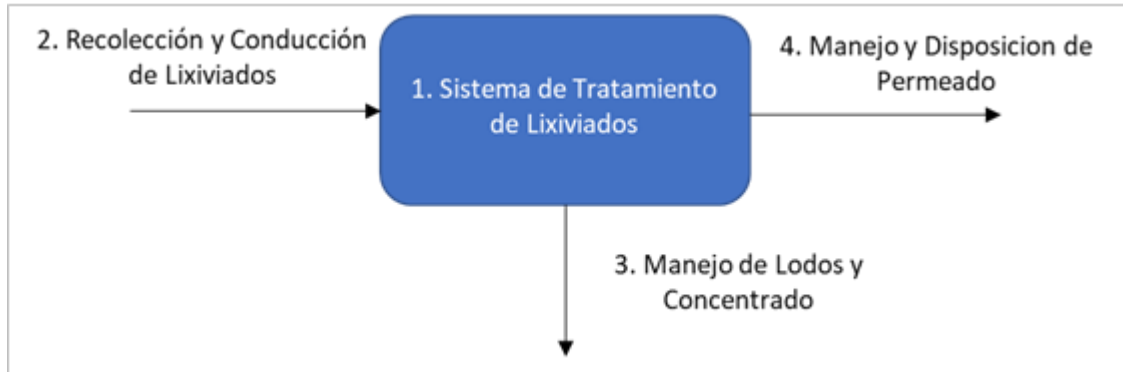


Figura No. 1. Subsistemas de la Planta de Tratamiento de Navarro
Elaboración propia

Como puede observarse en la figura No. 1 cada subsistema complementa el sistema de tratamiento de lixiviados, con el fin de tratar todo el lixiviado existente del vertedero. A continuación, se presenta una descripción general de cada una de las actividades indicadas anteriormente.

3.1 Sistema de Tratamiento de Lixiviados.

El sistema de tratamiento de lixiviados opera para un caudal de 4 L/s, generando en promedio 3 L/s de agua tratada y 1 L/s de concentrados. El proceso de depuración se llevará a cabo a través de las siguientes etapas (UT CDM SMITH-INGESAM, 2015), (ver Figura 2):

- **Pretratamiento Físicoquímico:** efectúa la remoción de sólidos en suspensión contenidos en el lixiviado mediante la aplicación de químicos. Inicialmente se adiciona en línea ácido sulfúrico para ajustar el pH del lixiviado a las condiciones adecuadas requeridas para el proceso de floculación-coagulación. Este proceso se lleva a cabo en un mezclador estático, donde el lixiviado acidificado es dosificado en línea con cloruro férrico (coagulante) y con polielectrolito aniónico (floculante). La separación de sólidos suspendidos se lleva a cabo en una unidad de flotación por aire disuelto, conocida como DAF. Esta unidad produce dos corrientes: una representada por el lixiviado pretratado, que se lleva a un tanque de agua clarificada para continuar hacia el proceso de ósmosis. La otra corriente se encuentra conformada por los sólidos removidos en el DAF (lodos), los cuales se conducirán a lechos de secado.
- **Tratamiento Mediante Ósmosis Inversa.** El agua pretratada contenida en el tanque de agua clarificada contiene aún un remanente de material suspendido y un alto contenido en sólidos disueltos (sales). Dicha agua se alimenta a dos líneas de proceso exactamente iguales, dentro de las cuales se realiza la siguiente secuencia de remoción de sólidos:
 - Filtración a través de un filtro de arena.
 - Microfiltración mediante una unidad de siete cartuchos para retención de partículas con tamaño igual o superior a 10 micras
 - Primera etapa de ósmosis inversa compuesta por 44 módulos verticales de membranas, en la cual se obtienen dos corrientes, una de concentrado que se envía a la laguna de evaporación; la otra corriente es el permeado

que se lleva a un tanque intermedio para alimentar las unidades de tratamiento subsiguientes. Hasta aquí se realiza la primera etapa de ósmosis inversa. El tratamiento continúa hacia la segunda etapa de ósmosis, a través de la siguiente secuencia:

- Microfiltración mediante retención de partículas con tamaño igual o superior a 5 micras.
- Segunda etapa de ósmosis, conformada por dos módulos horizontales de membranas en espiral. Esta etapa de tratamiento generará dos corrientes, una de concentrado que se retornará al tanque de agua clarificada y otra de permeado que constituirá el efluente de tratamiento, el cual es conducido por bombeo hasta una cámara de la red pública de alcantarillado y de allí a la Estación de Bombeo de Aguas Residuales de Las Vegas, operada por EMCALI.

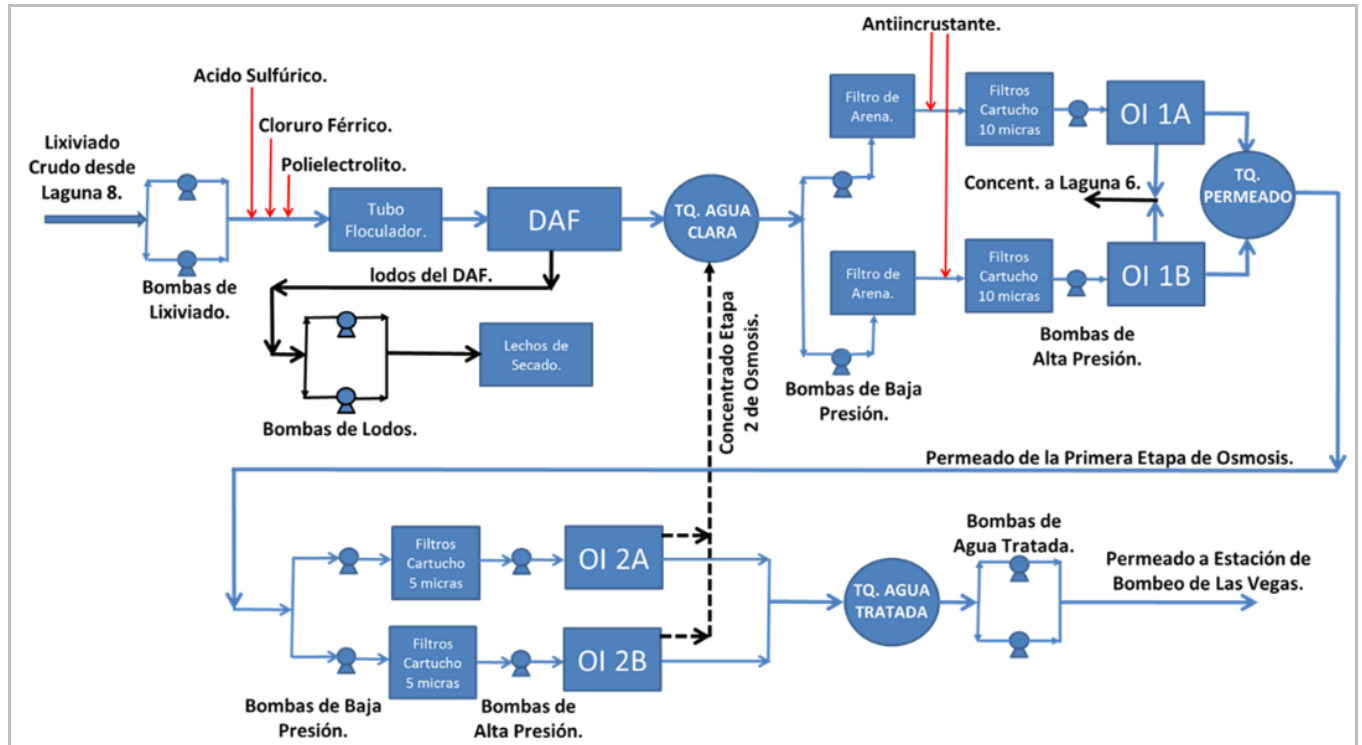


Figura 2. Etapas del Tratamiento de Lixiviados, Recolección y Conducción de Lixiviados.

Elaboración propia

3.2 Recolección y Conducción de Lixiviados

Para la recolección y conducción del lixiviado hacia el sitio de tratamiento se cuenta con dos redes de captación. La red principal de conducción de lixiviados se encuentra constituida por dos ramales que bordean el vertedero por sus costados norte y sur, denominados ramal A y Ramal B, respectivamente (UT CDM SMITH- INGESAM, 2015), (ver Figura 3).



Figura No. 3. Red de Captación de Lixiviados.

Cada ramal, está conformado por una zanja impermeabilizada con geotextil que contiene un lecho de material pétreo (triturado de 2 pulgadas) y un tubo de fondo fabricado en polietileno de alta densidad, con diámetro de 6 pulgadas y perforaciones en su semidiámetro superior a través de las cuales se captará el lixiviado drenado, para ser conducido a través de la red. Adicionalmente, cada ramal posee estaciones de bombeo intermedias para permitir el avance del residuo líquido hasta entregarlo finalmente a la piscina de almacenamiento No. 8, que alimentará el sistema de tratamiento de lixiviados. El ramal A posee 3 estaciones de bombeo y el ramal B cuenta con otras dos.

Pozos Duales: estas unidades captan los lixiviados atrapados en el fondo de las basuras, los cuales son extraídos por bombeo y se conectan hacia la red principal de conducción de lixiviados indicada anteriormente.

3.3 Manejo de Lodos y Concentrado.

Los lodos de Pretratamiento son sometidos a deshidratación en lechos de secado. La corriente de concentrados es conducida a un sistema de evaporación mediante radiación solar, conformado por dos lagunas provistas con cubierta tipo invernadero que favorece la pérdida de humedad. La primera laguna es de evaporación (piscina No. 6) y la segunda de cristalización o deshidratación final (piscina No. 4) (UT CDM SMITH- INGESAM, 2015).

3.4 Manejo y Disposición de Permeado.

El efluente de tratamiento de la planta de lixiviados es conducido a través de una línea a presión de 3 pulgadas de diámetro, en tubería de polietileno de alta densidad - PEAD. El efluente de tratamiento se desplaza en su primer tramo por predios del vertedero, cruzará el canal Interceptor Sur; luego es dirigido por el margen derecho de este Canal hasta el río Lili y finalmente llega a la estación de bombeo de aguas residuales de Las Vegas, operada por EMCALI.



Figura No. 5. Trazado de la Red de Conducción del Efluente de Tratamiento.

4. OPERACIÓN PLANTA DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE NAVARRO EN LA ACTUALIDAD

Actualmente la planta de tratamiento de lixiviados de Navarro a operado durante 5 años interrumpidamente, tiempo durante el cual la planta ha tratado el siguiente volumen de lixiviado, ver Tabla 5:

Tabla 5. Lixiviado tratado en la Planta de Tratamiento de Navarro.

PROCESO	Tiempo de Operación (meses)	Cantidad de Lixiviado tratado (m ³) 2014	Cantidad de Lixiviado tratado (m ³) 2015	Cantidad de Lixiviado tratado (m ³) 2016	Cantidad de Lixiviado tratado (m ³) 2017	Cantidad de Lixiviado tratado (m ³) 2018
Contrato de Obra No. 4133.0.32.281-2013	3	24.177				
Convenio Interadministrativo entre DAGMA y EMSIRVA ESP en Liquidación	5		35.623			
Contrato de Obra No. 4133.0.26.1.829-2015	1,43		10.999			
Contrato de Obra No. 4133.0.26.1.488-2016	7			37.677		
Contrato de Selección No. 4182.010.32.1.004-2017	0,13				2.915	
Contrato de Selección No. 4182.010.32.1.003-2017	3				24.390	
Contrato de Servicios No. 4182.0.10.26.1.127-2018	5,5					45.500
Total de lixiviado tratado por año		24.177	46.622	37.677	27.305	45.500
Total de lixiviado tratado en la PTL *hasta 2018	25,06	181.281				

Fuente: Estudios y Estudios Previos – Alcaldía de Santiago de Cali (2019)

Como puede observarse en la tabla anterior, La Planta de Tratamiento de Lixiviado de Navarro no ha tenido una operación continua durante los cuatro años de operación, esta solo ha operado 25 meses en total. Durante este tiempo ha tratado 181,281 m³ de lixiviado. Cabe anotar que la planta esta diseñada para tratar 4 L/S, en un periodo de un mes se esperaría que trate 10.368 m³/mes y para un periodo de 12 meses, se espera que esta trate 124.416 m³ lixiviado. Puede

que la planta ha sido desaprovechada y que no cumplido la función para lo cual fue construida, el tratamiento continuo de lixiviado.

Se espera que para el año 2019 la Planta de Tratamiento de Navarro trate 57.321 m³ de lixiviados (Alcaldía de Santiago de Cali – Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos Municipales; 2019). Si se logra una operación continua de la planta se espera que en un periodo de 3 años se trate todo el lixiviado existente en las lagunas de tratamiento, esto con el fin de ir mitigando poco a poco el pasivo ambiental que han generado los lixiviados de Navarro a la Ciudad de Cali.

5. CONCLUSIONES

Los lixiviados se generan por la descomposición bioquímica de los residuos por la percolación de agua a través de estos en el proceso de degradación de los rellenos sanitarios. Este percolado es de especial interés ya que, presentan altos contaminantes como Materia orgánica disuelta, compuestos húmicos y fúlvicos, Metales pesados: compuestos orgánicos xenobióticos, Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), Hidrocarburos aromáticos, pesticidas, organoclorados, los cuales pueden alterar la calidad del recurso hídrico ya sea por infiltración de los acuíferos subterráneos o por descargas a corrientes superficiales.

Los lixiviados se clasifican según su periodo de almacenamiento, el lixiviado viejo es el que presenta un periodo de almacenamiento mayor a cinco años con una concentración en DQO menor a 3 mg/L y una relación DBO/DQO entre 0,05 y 0,2, los cuales son complejos de degradar por medio de un proceso biológico, ya que, la cantidad de materia orgánica biodegradable es muy baja. En el caso de los lixiviados intermedios (rango de 1 a 5 años), mantienen valores considerables de DQO y DBO5, así como pH en rangos ácidos por la cantidad de ácidos grasos presentes en el lixiviado. Por último, se encuentran los lixiviados jóvenes los cuales presentan un periodo de almacenamiento menor a un año los cuales no se encuentran estabilizados por lo que su tratamiento se hace más sencillo que tratar lixiviados intermedios y viejos.

Para el tratamiento de lixiviados existen cuatro grandes grupos, los cuales se clasifican de la siguiente manera: transferencia de lixiviados, biodegradación, procesos fisicoquímicos y procesos tecnológicos. En el caso de la transferencia de lixiviado este es combinado con aguas residuales domésticas, para ser tratados en una PTAR. A pesar de que es una alternativa de bajo costo es poco empleada por la presencia de compuestos inhibidores orgánicos, los cuales reducen la eficiencia de tratamiento deteriorando la calidad del efluente final tratado. Por otro lado, se encuentra los tratamientos biológicos, los cuales mediante el desarrollo de biomasa degradan el contenido orgánico presente en el lixiviado, para el caso de la digestión anaerobia se obtienen su producto como el biogás el cual puede ser aprovechado. En el caso de los procesos fisicoquímicos tiene como objetivo la desestabilización de la materia orgánica con la adición de productos químicos con el fin de favorecer los procesos de oxidación, adsorción y precipitación. Por último, se encuentran los procesos tecnológicos en los cuales se emplean procesos de Microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa, los cuales son los métodos más utilizados por la alta eficiencia de eliminación de los contaminantes presentes en los lixiviados.

Con el fin de minimizar los pasivos ambientales generados por el antiguo vertedero de Navarro el Municipio de Santiago de Cali en el año 2013, implemento la planta de tratamiento de lixiviados la cual está diseñada para tratar un caudal de 4 L/s, generando en promedio 3 L/s de agua tratada y 1 L/s de concentrados. El proceso de depuración se lleva a través de un proceso inicial de Pretratamiento Fisicoquímico en el cual efectúa la remoción de sólidos en suspensión contenidos en el lixiviado, mediante la aplicación de químicos para favorecer los procesos de floculación y coagulación posteriormente el lixiviado pretratado es conducido a un sistema de flotación aire disuelto para la separación de sólidos suspendidos totales. Finalmente, el clarificado es tratado en el proceso de osmosis inversa con el fin de alcanzar los estándares normativos. Para el año 2019 se espera que para la Planta de Tratamiento de Navarro trate 57.321 m³ de lixiviados.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcaldía de Bucaramanga (2014). Proyecto de Acuerdo No. 065 de 2014. "Por Medio del Cual se Autoriza Alcalde de Bucaramanga para Comprometer Vigencias Futuras Excepcionales para Financiar la Operación y Mantenimiento de la Planta de Tratamiento de Lixiviados en el Sitio de Disposición Final El Carrasco Ubicado en Jurisdicción de Bucaramanga, Conforme a Declaratoria de Importancia Estratégica".
- Alcaldía de Santiago de Cali – Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente DAGMA. (2013a). Estudios Previos y Documentos Previos Proceso Selección Abreviada de Menor Cuantía Para "Realizar el Diseño Final, Construcción y Operación de Prueba de una Planta de Tratamiento de Lixiviados y Obras Complementarias en el Sitio de Disposición Final de Navarro en el Municipio de Santiago de Cali, Departamento del Valle del Cauca".
- Alcaldía de Santiago de Cali – Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente DAGMA. (2013b). Pliego de Condiciones Definitivo Selección Abreviada de Menor Cuantía No. 4133.032.007-2013.
- Alcaldía de Santiago de Cali – Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos Municipales (2019). Pliego de Condiciones Licitación Publica No. 4182.010.32.1.01-2019.
- Collazos, H. P (2001). Historia de la Gestion de la Basura en Cali. Santiago de Cali. El Autor, Pp. 33-59.
- Consejo Nacional de Política Económica y Social - Conpes 3624 (2009) PROGRAMA PARA EL SANEAMIENTO, MANEJO Y RECUPERACIÓN AMBIENTAL DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO CAUCA.
- Consejo Nacional de Política Económica y Social - Conpes 3874 (2016) POLITICA NACIONAL PARA LA GESTION INTEGRAL DE RESIDUOS SOLIDOS.
- Corena, L. M (2008). Sistemas de Tratamientos para Lixiviados Generados en Rellenos Sanitarios.
- Cortez S., Teixeira P., Oliveira R. and Mota M, (2011). Evaluation of Fenton and ozone-based advanced oxidation processes as mature Effective treatment of stabilized municipal landfill leachates landfill leachate pre-treatments». Journal of Environmental Management, vol. 92, pp. 749-755. Amsterdam. Holland.
- Di Iaconi C., Rossetti S., Lopez A. and Ried A, (2011).Effective treatment of stabilized municipal landfill leachates . Chemical Engineering Journal, vol. 168, pp. 1085-1092. Amsterdam. Holland.
- Empresa de Aseo de Bucaramanga EMAB S.A E.S.P (2013). Actualización Plan de Manejo Ambiental Sitio de Disposición Final El Carrasco (2013).
- Empresas Públicas De Medellín E.S.P. (2014) Proceso de Contratación por Solicitud Publica de Oferta No. 05-2014. Pliego De Condiciones y Especificaciones Técnicas Para La Conceptualización, Diseño, Construcción de Obras Complementarias. Entrega e Instalación de Equipos, Puesta en Marcha, y Operación de un Sistema de Tratamiento de Lixiviados en el Relleno Sanitarios la Pradera, Ubicado en el Municipio de Donmatias, Antioquia.
- EMSIRVA (2002). Relleno Sanitario Transitorio Navarro: Obras de Cierre. Santiago de Cali, Colombia, Pp. 1-16 (Subgerencia de disposición final).
- Hasar H., Unsal S. A., Ipek U., Karatas S., Cınarc O., Yaman C., Kınacı C. (2009). Stripping/flocculation/membrane bioreactor/reverse osmosis treatment of municipal landfill leachate. Journal of Hazardous Materials, Volume 171, Issues 1–3, 15 November 2009, Pages 309-317.
- Ushikoshi K., Kobayashi T., Uematsu K., Toji A., Kojima Dai., Matsumoto K. (2002). Leachate treatment by the reverse osmosis system. Desalination, Volume 150, Issue 2, 1 November 2002, Pages 121-129.
- Kjeldsen, P., Barlaz, M. A., Rooker, A. P., Baun, A., Ledin, A. & Christensen, T. H. 2002. Present and long-term composition of MSW landfill leachate: a review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 32, 297-336.
- Corrales, D. M. Antolínez, J. A. Bohórquez, A. M. Corredor. (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. Artículo de revisión. NOVA. 2015; 13 (23): 55-81
- Márquez, J.J, (2011). Analisis del Funcionamiento del Sistema Hídrico Subterráneo en el Área del Antiguo Relleno Sanitario de Navarro. Tesis de Maestría. Universidad Nacional del Litoral.
- Deng M., Kuo D.T.F, Wu Q., Zhang Y., Liu X., Liu S., Hu X., Mai B., Liu Z., Zhang H. (2018). Organophosphorus flame retardants and heavy metals in municipal landfill leachate treatment system in Guangzhou, China. Environmental Pollution 236 (2018) 137 – 145.

- Ministerio del Medio Ambiente (1998). Política para la Gestión Integral de Residuos Sólidos. República de Colombia.
- Ministerio del Medio Ambiente (2002). Guía Ambiental Para Rellenos Sanitarios.
- Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio (2015). Decreto 1077 de 2015, 2015, p. 542. <http://www.minvivienda.gov.co/NormativaInstitucional/1077-2015.pdf>.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2013). Decreto 2981 de 2013, p. 5. <http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Decretos/2013/Documents/DICIEMBRE/20/DECRETO%202981%20DEL%2020%20DE%20DICIEMBRE%20DE%202013.pdf>
- Moravia, W.G., Amaral, M.C.S., Lange, L.C., (2013) Evaluation of landfill leachate treatment by advanced oxidative process by Fenton's reagent combined with membrane separation system. Waste Manage 33, 89–101.
- Najera (s.f). Un Panorama General Sobre el Manejo de Lixiviados en Rellenos Sanitarios del Centro del País. https://www.unicach.mx/_/ambiental/descargar/Gaceta6/Art3.pdf
- Peng Yao. (2017). Perspectives on technology for landfill leachate treatment. Arabian Journal of Chemistry 10, S2567–S2574.
- Limasa – Servicios de limpieza Integral de Málaga III, S.A. Planta de Tratamiento de Lixiviados. [Se encuentra la descripción de la planta de tratamiento de lixiviados de Málaga]. <http://www.limasa3.es/tratamiento/planta-de-tratamiento-de-lixiviados>.
- El País (s.f), Planta de Tratamiento mejorará Tratamiento de lixiviados en relleno sanitario de Yotoco. Sala de Prensa. Universidad del Valle <https://www.elpais.com.co/valle/planta-de-tratamiento-mejorara-tratamiento-de-lixiviados-en-relleno-sanitario-de-yotoco.html>
- Calabrò P.S., Gentili E., Meoni C., Orsi S., Komilis D. (2018). Effect of the recirculation of a reverse osmosis concentrate on leachate generation: A case study in an Italian landfill. Waste Management 76, 643- 651.
- CVC (2018). Relleno Sanitario de Colombia el Guabal Optimiza Planta para Tratar Lixiviados. <https://www.cvc.gov.co/carousel/3102-relleno-sanitario-de-colomba-el-guabal-optimiza-planta-para-tratar-lixiviados>.
- Renou S., Poulain S., Givaudan, J. G., Molin P. (2008a). Treatment process adapted to stabilized leachates: Lime precipitation-prefiltration-reserve osmosis. Journal of Membrane Science 313(1-2), 9-22.
- Rocha E., Vilar V., Fonseca A., Saraiva I. and Boaventura R. (2011). Landfill leachate treatment by solar-driven AOPs. Solar Energy, vol. 85, no.1, pp. 46-56. Germany.
- Sancha M. (2013). Caracterización Físicoquímica y Microbiológica de un proceso de tratamiento de lixiviado de vertedero. Proyecto de Investigación. Universidad de Oviedo.
- Serviambientales (2000). Estudio de la localización del nuevo relleno sanitario dentro del área rural del Municipio Santiago de Cali.
- Renou S., Givaudan J. G., Poulain S., Dirassouyan F, Moulin P. (2008b). Landfill leachate treatment: Review and opportunity. Journal of Hazardous Materials 150, 468-493.
- Pesama – Tratamiento de Aguas Rentable. [Se encuentra la descripción de la instalación la planta de tratamiento de lixiviados producidos en el vertedero de Areosa] <http://pesama.com/index.php/es/component/jvportfolio/item/71?Itemid=838>
- COGERSA – Gobierno del Principado de Asturias. Tratamiento de Lixiviados. [Se encuentra la descripción de la planta de depuradora de COGERSA]. <http://www.cogersa.es/metaspaces/portal/14498/19173>.
- UT CDM SMITH- INGESAM (2015). Informe Final. Interventoría Técnica, Administrativa y Financiera al Proyecto de Construcción del Sistema de Tratamiento de Lixiviados y Obras Complementarias del sitio de Disposición.
- Yilmaz T., Apaydin S. and Ali B. (2010). Coagulation-flocculation and air stripping as a pretreatment of young landfill leachate. The Open Environmental Engineering Journal, vol. 3, pp. 42-48. Canadá.