

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA



**CARACTERIZACIÓN QUÍMICA INORGÁNICA Y ORGÁNICA DE LOS LIXIVIADOS
DEL RELLENO SANITARIO “LA BONANZA”**

Trabajo Especial de Grado
presentado ante la ilustre
Universidad Central de
Venezuela, por la Br. Vanessa
Carolina Reina, para optar por
el título de Licenciado en
Química.

Caracas, Abril de 2011

ACTA

Los abajo firmantes, designados por la Universidad Central de Venezuela, como integrantes del jurado examinador del Trabajo Especial de Grado titulado: “Caracterización química inorgánica y orgánica de los lixiviados del relleno sanitario La Bonanza” presentado por la Br. Vanessa Carolina Reina, certificamos que este trabajo cumple con los requisitos exigidos por nuestra Magna Casa de Estudios para optar por el título de Licenciado en Química.

Dr. Ramón Luis Montero
(Asesor académico)

Dr. Williams Meléndez
(Jurado)

MSc. Ing. Maria Virginia Najul
(Jurado)

Dedicado a quienes siempre han cuidado y creído en mí,
especialmente a ti madre; por ser la inspiración de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor, el profesor Ramón Luis Montero por haberme brindado la oportunidad de desarrollar este proyecto y por su orientación a lo largo del mismo.

De igual manera al profesor Paulino Betancourt, por su colaboración durante la etapa de análisis de los compuestos orgánicos volátiles.

Gracias a Fernando Ramos por su ayuda durante la etapa de muestreo de este proyecto y por su apoyo en todo momento; de igual manera a, Luis Vílchez, Ángel Rivas, Franco Palmiotto y Fernanda Oduber.

Igualmente, a la empresa COTECNICA C.A y al instituto de ciencias de la tierra (ICT) de la Universidad Central de Venezuela, por prestar sus instalaciones para la elaboración de este proyecto.

RESUMEN

En este estudio se realizó la caracterización química de 8 muestras de lixiviados, además de 2 muestras de agua superficiales pertenecientes al relleno sanitario La Bonanza, ubicado en el Estado Miranda. La caracterización fue realizada mediante la determinación de los parámetros fisicoquímicos pH, conductividad, temperatura, alcalinidad y contenido de materia orgánica. Asimismo, se determinaron las concentraciones de las especies mayoritarias Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- y NO_2^- mediante el empleo de las técnicas de absorción y emisión atómica de llamas y cromatografía iónica. Seguidamente, los resultados fueron validados a través de un balance iónico.

Igualmente, se llevó a cabo la determinación de Si y de los elementos traza As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Se, Ti, V, Zn, Co, Sr y Sb; mediante la técnica de emisión atómica con fuente de plasma inductivamente acoplado (ICP-OES). Para el Si expresado como SiO_2 se obtuvo un intervalo de concentración entre 4,0 y 30,0 mg/L; mientras que, los elementos As, Se, Cd y Pb se encontraron por debajo del límite de detección; a su vez el resto de los elementos presentaron concentraciones que oscilaron entre 0,08 y 6,0 mg/L. En general, las mayores concentraciones de los elementos traza fueron detectados en el lixiviado que es sometido a evaporación y en el lixiviado con mayor edad del relleno.

Los resultados indican que los lixiviados del relleno sanitario “La Bonanza” que son sometidos a evaporación resultan con altas concentraciones de Na^+ y K^+ , así como en de Cl^- y NO_3^- , que superan los valores permitidos según el Decreto 883 del MARN (Gaceta oficial N° E-5021).

Igualmente, se llevó a cabo la identificación de los compuestos orgánicos volátiles presentes en los lixiviados, mediante la aplicación de la técnica de cromatografía gaseosa (GC-MS). Esto permitió identificar 32 compuestos, además, de los llamados BTEX, compuestos comúnmente encontrados en rellenos sanitarios.

Los compuestos orgánicos volátiles identificados comprenden: p.cresol, alcanfor, terpineol, fenol, 3-metilindol, difenileter, DEET, difenilsulfona, 7-Acetil-2-hidroxi-2-metil-5-iso-propilbiclononano, bisfenol A, DEHP, heptacosano, trietilfosfato, pirazina, tiofenol, nicotina, propílfenazona, n-pentano, ácido hexanoico, ácido dihidroxibutírico, ácido ciclohexano dicarboxílico, ácido valérico, ácido palmítico, ácido fenílbutírico, ácido heptanoico, ácido octanoico, ácido linoleíco, ácido ftálico, ácido butírico, ácido adípico, ácido 2-metil-4-clorofenoxipropiónico (MCP), ibuprofeno y el 2,4-diclorobenceno.

Se concluye que es prioritario utilizar un método adecuado para el tratamiento de los lixiviados, con la finalidad de disminuir las concentraciones de los metales alcalinos, Cl^- , NO_3^- . Esto debido a que durante la evaporación de los lixiviados se genera un residuo con una mayor concentración de especies contaminantes que los lixiviados originales.

i.ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Residuos sólidos.....	4
2.1.1 Clasificación de los residuos sólidos.....	4
2.1.2 Residuos sólidos urbanos (RSU)	6
2.2 Rellenos sanitarios	9
2.3 Procesos del relleno sanitario	12
2.3 Lixiviados	18
2.3.1 Composición de los lixiviados	19
2.3.2 Calidad de los lixiviados	20
2.3.3 Clasificación de los lixiviados	22
2.3.4 Tratamiento de los lixiviados	23
2.4 ÁREA DE ESTUDIO	25
2.4.1 Ubicación y superficie	25
2.4.2 Clima	26
2.4.3 Datos técnicos.....	27
2.5 ANTECEDENTES.....	30
3. OBJETIVOS	35
4. METODOLOGÍA	36
4.1 Etapa de pre-campo.....	36
4.2 Etapa de campo	37
4.3 Etapa post-campo	42

5.	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	47
5.1	Características generales de los lixiviados.....	50
5.1.1	El pH	52
5.1.2	Conductividad	55
5.1.3	Especies catiónicas mayoritarias Na^+ , K^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+}	57
5.1.4	Especies aniónicas mayoritarias: Cl^- , NO_3^- , NO_2^-	63
5.1.5	Sílice disuelta (SiO_2)	67
5.2	Elementos traza As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Se, Ti, V, Zn, Co, Sr y Sb. .	67
5.3	Compuestos orgánicos.....	76
5.3.1	BTEX	76
5.3.2	COV's.....	80
6.	CONCLUSIONES	85
7.	RECOMENDACIONES	87
8.	BIBLIOGRAFÍA	88
9.	APÉNDICES	94
9.1	Apéndice A Condiciones experimentales de los análisis.	94
9.2	Apéndice B.....	96
9.3	Apéndice C	102
9.4	Apéndice D	105

ii. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de un relleno sanitario típico. 1) Terraplenes 2) sistema de gases 3)sistema de lixiviados 4) cobertura de los desechos 5)sistema de revestimiento natural 6)Pozos de monitoreo 7)sistema de revestimiento sintético(Caruso, 2008).....	11
Figura 2. Fases de la degradación anaeróbica en rellenos sanitarios (Calrecovery, 1997).....	17
Figura 3. Ubicación nacional y regional del relleno sanitario “La Bonanza”.	25
Figura 4.- Celda 1 durante el proceso de colocación del geosintético y la capa gravosa en el año de 1999 del relleno sanitario “La Bonanza” (Cotecnica, 2010).	27
Figura 5.- Celda 2 durante el proceso constructivo inicial del relleno sanitario “La Bonanza” (Cotecnica, 2010).....	28
Figura 6.-Esquema del relleno sanitario “La Bonanza”.	29
Figura 7.- Esquema de la metodología experimental de la etapa de pre-campo.	37
Figura 8.- Ubicación puntos de muestreo en el relleno sanitario “La Bonanza”, Charallave, Estado Miranda.	38
Figura 9.- Esquema de metodología experimental de la parte de campo.	42
Figura 10.- Esquema experimental de la metodología empleada en post-campo.....	46
Figura 11.- Celdas de recolección de lixiviados del relleno sanitario "La Bonanza" (Google earth, 2010).	47
Figura 12.- (a)Error porcentual del balance iónico de las muestras de lixiviados del relleno sanitario "La Bonanza" (b) Porcentaje de materia orgánica de los lixiviados del relleno sanitario “La Bonanza”.....	49
Figura 13. Distribución del pH en las muestras de lixiviados del relleno sanitario “La Bonanza”.....	54
Figura 14. Distribución de la conductividad en las muestras de lixiviados del relleno sanitario La Bonanza.....	56
Figura 15.- Correlación de Na^+ y K^+ con la conductividad.....	59
Figura 16.- Distribución espacial de sodio y potasio.	59
Figura 17.-Correlación de las concentraciones de Ca^{2+} y Mg^{2+} con el pH.	61

<i>Figura 18.</i> Distribución espacial de calcio y magnesio.	62
<i>Figura 19.-</i> Correlación de las concentraciones de Cl^- , NO_3^- y NO_2^- con la conductividad.	63
<i>Figura 20.-</i> Distribución espacial de cloruro, nitrato y nitrito.	66
<i>Figura 21.-</i> Correlación de las concentraciones de Fe y Mn con el pH.	70
<i>Figura 22.-</i> Concentraciones de Cr, Cu, Ni y Zn en las muestras.	71
<i>Figura 23.-</i> Concentraciones de Sr, Sb y Mo en las muestras.	73
<i>Figura 24.-</i> Concentraciones Ti Co y V en las muestras.	75
<i>Figura 25.-</i> Cromatograma de los patrones de BTEX.	78
<i>Figura 26.-</i> Concentraciones de las mezcla BTX en las muestras.	79

iii. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.-Datos recopilados de las muestras generados en la zona de estudio.....	39
Tabla 2. Características generales de los lixiviados.....	52
Tabla 3. Concentraciones de los elementos trazas en los lixiviados.....	68
Tabla 4. Resultados del método de normalización aplicado a los BTEX.....	78
Tabla 5. Compuestos orgánicos volátiles identificados en los lixiviados.	82
Tabla 6.- Condiciones experimentales del análisis de Absorción y Emisión Atómica. ...	94
Tabla 7.- Condiciones experimentales de Cromatografía Iónica.	94
Tabla 8.- Condiciones experimentales de Emisión atómica ICP-OES.	95
Tabla 9.- Condiciones experimentales del análisis de HPLC.	95
Tabla 10.- Condiciones experimentales del análisis de cromatografía de gases GC-MS.	95
Tabla 11.- Concentración de las especies mayoritarias catiónicas y aniónicas.	96
Tabla 12.- Concentraciones de SiO ₂ , alcalinidad y Materia Orgánica.	96
Tabla 13.- Concentración de los elementos traza.	97
Tabla 14.-Parámetros y límites dispuestos por el MARN en su decreto 883 para efluentes líquidos.	98

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento demográfico y acelerado de las actividades cotidianas de nuestra sociedad, sumado al avance tecnológico, conlleva a un aumento descontrolado de las tasas de generación de residuos, cuya disposición final contempla los rellenos sanitarios.

El relleno sanitario es una estructura bien planeada, cuyo diseño está sustentado en una serie de estudios geológicos e hidrológicos, que emplea una estructura de captación de gases y de control de lixiviados. Dichos sistemas son espacios destinados para contener la basura en los suelos, sin afectar el ambiente y sin causar molestias o peligros a la salud (Bernache, 2006).

En las últimas décadas, los rellenos sanitarios han sido reconocidos como un método económico y efectivo para la disposición final de desechos sólidos municipales e industriales. Sin embargo, a pesar del desarrollo tecnológico aplicado en los rellenos destinados para eliminar o minimizar el impacto potencialmente negativo de los residuos sobre el medio ambiente, la generación de lixiviados sigue siendo una consecuencia inevitable en la práctica de eliminación de los residuos sólidos urbanos conllevando en algunos casos, a la contaminación no solo de los cuerpos de agua subterráneas y superficiales, sino al ecosistema en general (Tchobanoglous, 1994).

El lixiviado se origina por el lavado de los residuos sólidos, propiciando la extracción de especies químicas orgánicas e inorgánicas consideradas contaminantes. Estos líquidos se infiltran al subsuelo pudiendo en algunos casos, alcanzar los mantos acuíferos; asimismo, pueden fluir por la superficie del terreno alcanzando los cauces de arroyos y embalses cercanos. La infiltración de los mismos y su escurrimiento en la

superficie es una de las causas de la contaminación de las aguas subterráneas y superficiales y de la subsecuente pérdida de calidad de estos cuerpos de agua.

En el mismo orden de ideas, hacia la atmósfera pueden ocurrir las emisiones de gases provenientes de los residuos sólidos que se generan durante la descomposición de la materia orgánica presente en los mismos. Estos compuestos orgánicos denominados volátiles, incluyen hidrocarburos insaturados y saturados, hidrocarburos ácidos y alcoholes orgánicos, compuestos halogenados y compuestos de azufre. Dichos compuestos generan preocupación por su impacto como contaminantes considerados además como contribuyentes del efecto invernadero, del agotamiento del ozono estratosférico; asimismo pueden causar importantes efectos sobre la salud pública (Zou et al, 1998).

Atendiendo a lo anteriormente expuesto, es importante señalar que contar con un relleno sanitario que contemple el manejo adecuado de los desechos sólidos y el tratamiento del lixiviado producto de los mismos, permite reducir el impacto negativo sobre el medio ambiente y con ello, a la salud de los seres humanos. Por ello, la aplicación y eficiencia de un determinado tratamiento de lixiviados a fin de disminuir sus cargas contaminantes, se realiza tomando en cuenta sus características de tipo químico, además de aspectos técnicos del relleno sanitario; por consiguiente, es necesario conocer la composición química de los lixiviados, que varía con la edad del relleno sanitario y con la naturaleza de los residuos sólidos que en él se manejan.

Considerando la pertinencia que como receptor de desechos sólidos y del lixiviado generado, tienen los sitios escogidos para la construcción de los rellenos sanitarios, surge el presente trabajo de investigación, el cual resulta la importancia de estudiar y caracterizar químicamente los lixiviados, con el propósito de obtener información de la composición y el tipo de lixiviado generado a partir de los residuos sólidos provenientes del relleno sanitario. En general, la caracterización se llevará a cabo mediante la

medición de parámetros fisicoquímicos como pH, conductividad y alcalinidad, así como a través de la determinación de la concentración de las especies químicas Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , HCO_3^- y NO_3^- y de los metales pesados (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Se, Ti, V, Zn, Co, Sr y Sb). Asimismo, este estudio incluyó, la identificación de compuestos orgánicos volátiles, así como la presencia de los llamados BTEX (benceno, tolueno, etílbenceno y xileno).

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Residuos sólidos

Se entiende por residuo, todo material que es destinado al abandono por su productor o poseedor, pudiendo resultar de un proceso de fabricación, transformación, utilización, consumo o limpieza.

Los residuos pueden ser clasificados en sólidos, líquidos y gaseosos, de acuerdo a su estado físico. Agregándose los residuos pastosos, que comúnmente aparecen como producto de las actividades humanas (Barradas, 2009).

2.1.1 Clasificación de los residuos sólidos.

Los residuos sólidos han sido clasificados de diversas maneras. Estructuralmente mantienen ciertas características desde su origen hasta su disposición final. Los diferentes usos de los materiales, su biodegradabilidad, combustibilidad, reciclabilidad, entre otros juegan un papel importante en la percepción de quien los clasifica, presentándose algunas discrepancias entre una u otra clasificación (Barradas, 2009).

Atendiendo el origen y destino final potencial de los residuos sólidos, Barradas (2009) los clasifica en residuos sólidos orgánicos y residuos sólidos inertes, a continuación son presentados en detalle.

2.1.1.1 Residuos sólidos orgánicos

Son los materiales residuales que en algún momento tuvieron vida, formaron parte de un ser vivo o derivan de los procesos de transformación de combustibles fósiles. Estos a su vez se clasifican en putrescibles y no putrescibles.

Los llamados putrescibles, son los residuos que provienen de la producción o utilización de materiales naturales sin transformación estructural significativa. Por ello y por su grado de humedad, mantienen un índice alto de biodegradabilidad; entre ellos están los residuos forestales y de jardín, residuos animales, residuos de comida, heces animales, residuos agropecuarios y agroindustriales, entre otros.

Por otra parte, los no putrescibles, se trata de aquellos residuos cuyas características biológicas han sido modificadas al grado que en determinadas condiciones, pierden su biodegradabilidad. Estos comúnmente son combustibles, pudiéndose clasificar en naturales y sintéticos. En este sentido, los naturales se caracterizan por su condición determinante de la pérdida de biodegradabilidad debido a la falta de humedad; entre los que se encuentran el papel, el cartón, los textiles de fibras naturales y la madera, entre otros.

Por su parte, los sintéticos son residuos no biodegradables altamente combustibles, provenientes de procesos de síntesis petroquímica: plásticos, fibras sintéticas, entre otros.

2.1.1.2 Residuos sólidos inertes, son los residuos no biodegradables ni combustibles que provienen generalmente de la extracción, procesamiento o utilización de los recursos minerales; vidrio, los metales, los residuos de construcción y demolición de edificios, las tierras y los escombros, entre otros.

2.1.1.3 Los dos tipos de residuos anteriores pueden ser peligrosos o no peligrosos.

En este sentido, quedan definidos por una o más de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad y biológico infeccioso. Por sus características físicas, químicas o biológicas pueden o no ser acoplados a procesos de recuperación o transformación, por lo que en casos extremos son tratados para su incineración o confinamiento controlado.

Independientemente de su origen o estructura, los residuos sólidos son factibles de reutilizarse, recuperarse o reciclarse. La tecnología disponible, el nivel de concientización y los recursos legales son factores decisivos para llevar a cabo algún método de gestión sobre estos materiales. La disponibilidad de recursos económicos juega un papel importante, pero estos no deben ser determinantes para lograr la gestión de los residuos sólidos de una forma que armonice con el medio ambiente y con la salud pública (Barradas, 2009).

De acuerdo a la fuente generadora, los residuos sólidos pueden ser de tipo urbanos, de construcción que incluyen residuos sólidos inertes, agropecuarios, clínicos o sanitarios, de depuradoras de aguas, de incineración e industriales.

2.1.2 Residuos sólidos urbanos (RSU)

Los residuos sólidos urbanos (RSU), conocidos comúnmente como “basuras”, las cuales producidas en los núcleos de las poblaciones, constituyen un problema para el hombre desde el momento en que su generación alcanza importantes volúmenes y como consecuencia, empiezan a invadir su espacio vital o de esparcimiento (Barradas, 2009).

Se incluyen dentro de los residuos sólidos urbanos todos los que se generan en la actividad doméstica, comercial y de servicios, así como los procedentes de la limpieza de calles, parques y jardines. Según la procedencia y la naturaleza de estos residuos se pueden clasificar en domiciliarios, voluminosos, comerciales y de limpieza de vías y áreas públicas.

Los residuos domiciliarios son residuos sólidos procedentes de la actividad doméstica, tales como los residuos derivados de la cocina, los restos de comida, los desperdicios de la calefacción, los papeles, vidrios, material de embalaje y demás bienes de consumo, adecuados por su tamaño para ser recogidos por los servicios municipales normales. Se incluyen además los residuos de domicilios colectivos, tales como cuarteles, residencias y asilos, entre otros.

Los residuos comerciales y de servicios son los residuos generados en las distintas actividades comerciales como tiendas, mercados, almacenes y centros comerciales, entre otros; así como del sector de servicios que incluye bancos, oficinas y centros de enseñanza.

Los residuos de limpieza de vías y áreas públicas son los procedentes de las actividades de limpieza de calles y paseos y de los arreglos de parques y jardines como los referidos a la hierba cortada, hojarasca, troncos y ramas de hasta un metro de longitud.

La naturaleza de los residuos sólidos urbanos es enormemente variada, por lo que debe estudiarse en cada momento y en cada localidad, ya que, en efecto, los RSU varían según su origen, lugar de procedencia, variación climática, el nivel de vida y las variaciones estacionales.

Según su *origen*, es referida a que estos pueden ser domésticos, procedentes de industrias o de establecimientos comerciales, de la limpieza de las calles o de los edificios públicos, entre otros.

Según el *lugar de procedencia*, ya que las zonas urbanas producen más papel, plásticos y residuos de manufactura, enlatados, entre otros; mientras que las zonas rurales tienen una producción de residuos más orgánica.

Según la *variación climática*, puesto que en verano se suelen consumir más verduras y frutas y en invierno se producen más cenizas. El encrudecimiento de un invierno puede repercutir considerablemente en la producción de los residuos.

Según el *nivel de vida*, porque la población con mayor poder adquisitivo suele producir más residuos; mientras que en zonas deprimidas se consume menos. Puede señalarse que el nivel de vida influye también en la cantidad de basura, siendo más abundante en las zonas residenciales que en los barrios pobres. En estos últimos, además de consumirse menos, se aprovechan los bienes al máximo, usándose los envases después de vaciados y así reciclando.

Según las *variaciones estacionales*, esto debido a que en verano, con las vacaciones, se producen menos residuos en fábricas y comercios, aunado a que la composición es más variable en los residuos domésticos. Por otra parte, la salida de vacaciones de los ciudadanos, tiene como resultado una disminución considerable de los residuos en las ciudades. Este fenómeno ocurre asimismo los fines de semana, con el traslado de una gran cantidad de población desde sus residencias habituales a las segundas residencias de descanso en el campo; en ese sentido los residuos que quedan en las ciudades frecuentemente son muy distintos a los generados durante los días laborables.

De todas estas variaciones, el aumento del nivel de vida tiene gran influencia sobre la composición total de los residuos, en vista de que dicha composición puede ir evolucionando en una ciudad de forma considerable, en función del cambio de vida de sus habitantes.

2.2 Rellenos sanitarios

Históricamente, los rellenos sanitarios han sido el método más económico y ambientalmente más aceptable para la evacuación de residuos sólidos en todo el mundo. Incluso con la implantación de la reducción de residuos, del reciclaje y de las tecnologías de transformación, la evacuación en rellenos sanitarios de los rechazos provenientes de los residuos sólidos sigue siendo un componente importante dentro de la estrategia para la gestión integral de estos materiales (Tchobanoglous, 1994).

El relleno sanitario es una técnica de disposición final de los residuos sólidos en el suelo que no causa molestia ni peligro para la salud o la seguridad pública; tampoco perjudica el ambiente durante su operación ni después de su clausura. Esta técnica utiliza principios de ingeniería para confinar la basura en un área lo más estrecha posible, cubriéndola con capas de tierra diariamente con la subsiguiente compactación para reducir su volumen. Además, prevé los problemas que puedan causar los líquidos y gases producidos por efecto de la descomposición de la materia orgánica.

Los métodos utilizados para la construcción y manejo de los rellenos sanitarios, están lo suficientemente desarrollados como para asegurar que los grandes volúmenes de estos desechos puedan ser manejados y dispuestos de manera que sea resguardada la salud y la seguridad pública. Los rellenos sanitarios tienen como finalidad darle un destino cierto y seguro a los residuos sólidos que se generan en los núcleos urbanos (Robinson et al., 1982).

El método de almacenaje de los residuos sólidos en los rellenos sanitarios conlleva a diversos problemas ambientales, tales como la contaminación del suelo y de las aguas subterráneas y superficiales, debido a la capacidad que tienen los lixiviados de escurrir hacia la superficie de los suelos con su posterior infiltración hacia el suelo, así como a la migración de los mismos hacia áreas adyacentes.

Los rellenos sanitarios deben ser diseñados de tal manera que no afecten los sistemas naturales que lo rodean, por lo que deben cumplir con una serie de requerimientos básicos que permiten su ejecución. En este sentido, seguidamente son descritos algunos de estos requisitos que se comprenden de un sistema de revestimiento, un sistema de drenaje, un sistema de manejo de gases y por una cobertura final. La figura 1 muestra un esquema general de un relleno sanitario.

El Sistema de revestimiento, consiste en una base conformada por materiales sintéticos de baja permeabilidad, para evitar la migración de los lixiviados generados dentro del relleno sanitario hacia los acuíferos.

Los sistemas de revestimiento pueden ser únicos, dobles o compuestos. Como su nombre lo indica, un sistema de revestimiento único consta de un solo componente impermeable o de baja permeabilidad. El revestimiento puede ser tierra natural o sintético, colocándose encima un sistema de recolección de lixiviado. Por su parte el sistema de revestimiento doble consta de dos componentes que pueden ser de materiales iguales o distintos. Sobre la parte superior o primaria del revestimiento, se instala el sistema de recolección de lixiviado y entre el revestimiento primario y secundario se coloca un sistema de detección de fugas (CalRecovery, 1997).

Por su parte, el sistema de drenaje está ubicado en el fondo de las celdas y tiene como finalidad conducir los lixiviados hacia los sitios de almacenamiento, donde son recolectados en las bases de las celdas por medio de una capa de grava. Estos luego

son drenados por gravedad, a través de una red de tuberías perforadas de polietileno de alta densidad, las cuales son captados en el punto más bajo de las celdas, seguidamente conducidos a las lagunas de tratamiento (Padrón, 2005).

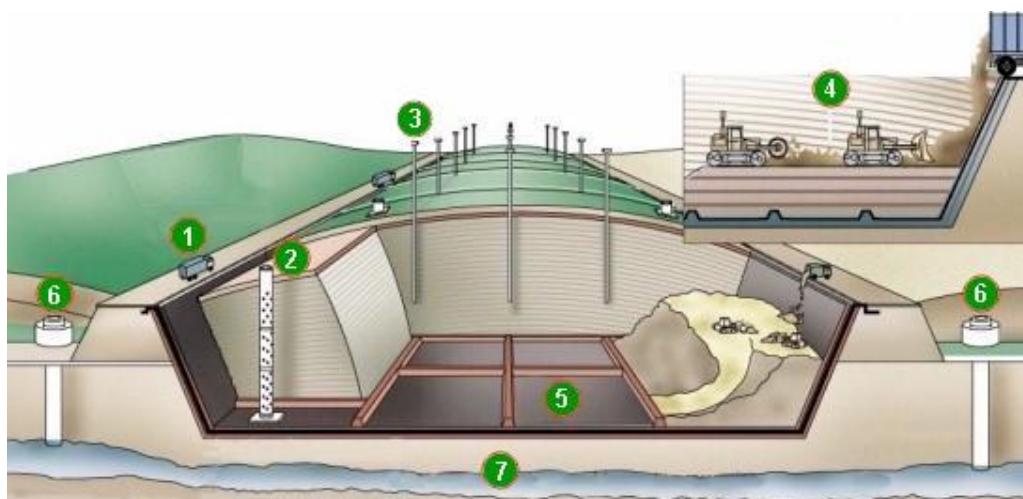


Figura 1. Esquema de un relleno sanitario típico. 1) Terraplenes 2) sistema de gases 3) sistema de lixiviados 4) cobertura de los desechos 5) sistema de revestimiento natural 6) Pozos de monitoreo 7) sistema de revestimiento sintético (Caruso, 2008).

Asimismo, el sistema de manejo de gases consiste en la instalación de una serie de chimeneas verticales que permiten captar estos gases, para seguidamente ser incinerados, antes de entrar en contacto con la atmósfera.

El gas de vertedero, debido a su alto contenido de gas metano es altamente explosivo, por lo tanto, es necesario someter a control la extracción de este gas para que este no llegue a la atmosfera (Keily, 1999).

Por otro lado, la cobertura final es el único método para limitar la generación de lixiviado, lo que permite evitar la contaminación potencial de las aguas subterráneas.

Este dispositivo se usa para limitar el flujo de agua dentro del relleno sanitario, proveniente de las fuentes externas tales como la precipitación atmosférica. Un buen sistema de cobertura sirve para reducir el tiempo y el gasto relacionado con el cuidado a largo plazo; así como para reducir los impactos ambientales negativos; mientras que al mismo tiempo, promueve tanto el uso productivo del relleno sanitario clausurado como de su entorno.

La cobertura final del relleno sanitario, también llamada capa final, tiene varios propósitos, a saber: proporciona una barrera física sobre los residuos sólidos enterrados, lo que permite prevenir el contacto humano; asimismo minimiza los problemas relacionados tanto con vectores, como para controlar los malos olores; controla la erosión que podría exponer a los residuos sólidos; reduce la cantidad de infiltración que contribuye a la generación de lixiviado y proporciona una base para la posible reutilización del área donde está ubicado el relleno sanitario (Padrón, 2005).

El relleno sanitario es completado, al colocar una capa de vegetación sobre la cobertura final. Debe resaltarse que la superficie es inclinada para restringir la infiltración y proveer de humedad a la vegetación, mientras se limita la percolación a través del suelo. La vegetación usada debe ser seleccionada para facilitar su establecimiento en el área, de tal manera que promueva la evapotranspiración y proteja al suelo de la erosión; asimismo las raíces no deben penetrar en el sistema de drenaje. Generalmente, las hierbas son la mejor vegetación para este propósito (Padrón, 2005).

2.3 Procesos del relleno sanitario

Existen procesos claves que se llevan a cabo en el relleno sanitario. Estos procesos producidos se caracterizan por tres aspectos generales; a saber 1) la cantidad, la composición y las características de los residuos sólidos dispuestos; 2) el diseño y la

operación del relleno sanitario; y 3) los fenómenos asociados con los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren dentro de los residuos sólidos durante el proceso de compactación. (CalRecovery, 1997).

En efecto, después que los residuos sólidos se incorporan al relleno sanitario, ocurren una diversidad de procesos que de una manera u otra forma, están influenciados por ciertas condiciones externas a lo largo del límite del relleno sanitario. Estas condiciones incluyen, aunque no se limitan, a factores como la cantidad y la tasa de precipitación, y la permeabilidad de la interfase cobertura/residuos sólidos a la penetración del agua. No obstante, se consideran tres procesos dominantes dentro del relleno sanitario, que de manera general pueden ser descritos como físicos, químicos y biológicos. Estos procesos no actúan independientemente uno del otro, por lo que durante la vida útil de un relleno sanitario, la dominación relativa de cada uno puede variar en función del tiempo y de la posición del relleno. En este orden de ideas, los citados procesos se describen a continuación, a fin de dar una idea de los cambios internos que ocurren cuando los residuos son confinados (CalRecovery, 1997).

Procesos físicos

En general, los procesos físicos más importantes están asociados con la compactación de los residuos sólidos (compresión), la disolución, la absorción y la reducción del tamaño de las partículas; además de los asentamientos causados por la consolidación y descomposición de la materia orgánica depositada (Jaramillo, 2002).

Puede señalarse que los cambios en la composición química no ocurren durante los procesos estrictamente químicos, sino que en ellos tiene una importante influencia los procesos físicos; en este sentido la compresión y los asentamientos del relleno sanitario son procesos que se relacionan estrechamente; por lo tanto, se describen

conjuntamente. De manera similar, la dilución y el transporte están asociados, pero no en el mismo grado (CalRecovery, 1997).

La compresión de los residuos sólidos en el sitio de disposición final es un proceso continuo que se inicia con la compactación y reducción del tamaño de los residuos por la maquinaria usada para compactar los que ya están dispuestos. La compresión continua conlleva a la degradación de los residuos sólidos, como consecuencia y de la fuerza ejercida por el peso de la carga sobrepuesta de los mismos y por la cobertura de tierra (CalRecovery, 1997).

La pérdida de fuerza mecánica de algunos de los materiales en el relleno sanitario, como producto de las reacciones químicas y biológicas, conlleva a reducir el tamaño de estos materiales por la fuerza de compresión interna. Además, el asentamiento de las partículas del suelo y otras partículas finas entre las más grandes de los residuos sólidos debido a la fuerza gravitatoria, también son responsables de parte de la consolidación. Los asentamientos, definidos como la disminución del volumen que contiene una masa determinada, del relleno sanitario terminado, son el resultado final de la compresión (CalRecovery, 1997).

En el mismo orden de ideas, la reducción del tamaño de las partículas ocurre como consecuencia de algunos procesos propios del relleno sanitario. Por ejemplo, el equipo de compactación reduce el tamaño de las partículas de los residuos sólidos, una vez que estos están dentro del relleno, el ataque microbiano modifica las fuerzas de compresión y de tensión de muchos de los componentes orgánicos, lo que permite su degradación. Al mismo tiempo, el cambio de la distribución del tamaño de las partículas a tamaños más finos, promueve las reacciones químicas y biológicas, que dependen del área superficial disponible del sustrato, en este caso, de los materiales residuales en el relleno sanitario y en consecuencia, del tamaño de las partículas (CalRecovery, 1997).

Procesos químicos

Las reacciones químicas que ocurren dentro del relleno sanitario involucran procesos de disolución, así como la generación de material suspendido y los productos de conversión biológica en los líquidos que se adsorben en los residuos sólidos; incluye además, la evaporación de compuestos químicos y agua, la adsorción de compuestos orgánicos volátiles, la deshalogenación y la descomposición de compuestos orgánicos y las reacciones de óxido-reducción que afectan la disolución de metales y sales metálicas (Jaramillo, 2002).

En un relleno sanitario, ocurren dos tipos de reacciones químicas importantes; a saber: reacciones de oxidación/reducción y las que son dependientes del pH. Las reacciones que dependen del pH involucran a los ácidos orgánicos y del dióxido de carbono (CO_2) producido o sintetizado por los procesos biológicos, así como el disuelto en agua. Las reacciones que dependen del pH incluyen las que afectan las características microscópicas de la superficie de los materiales, tales como la adsorción, y las que afectan la solubilidad de los complejos químicos. El grado de las reacciones de oxidación/reducción en un relleno sanitario, está controlado por el nivel de oxígeno en el relleno; Inicialmente, el oxígeno es incorporado en él durante su construcción. Los metales ferrosos son particularmente sensibles a las reacciones oxidación/reducción (CalRecovery, 1997).

Las reacciones químicas, así como las características químicas de algunos de los materiales en el relleno sanitario, pueden tener un efecto negativo sobre el ambiente. Algunos compuestos importantes que pueden emplearse como indicadores de la migración potencial de los contaminantes del relleno son los nitratos (NO_3^-), los ácidos orgánicos volátiles y la presencia de iones de amonio (NH_4^+). Los dos últimos indicadores son los mejores y los preferidos para controlar los nitratos. En ese sentido, el amoníaco se encuentra en niveles relativamente altos durante la descomposición de

los productos orgánicos. Los iones de amoníaco son particularmente problemáticos porque generalmente son muy móviles en un sistema subterráneo húmedo. Otros indicadores de la migración de elementos químicos y contaminantes son los niveles elevados de concentración de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , así como de conductividad específica, el contenido de carbono orgánico total, DBO y DQO (CalRecovery, 1997).

Procesos biológicos

Las reacciones biológicas en un relleno sanitario son importantes por dos razones: primero, debido a que los materiales orgánicos biodegradables presentes en los residuos sólidos, se tornan biológicamente estables, por lo que ya no constituyen una fuente potencial de contaminación. Los principales residuos sólidos orgánicos biodegradables incluyen los residuos alimenticios, los residuos vegetales, el papel y sus derivados y las fibras naturales, de origen animal o vegetal, entre otros.

La segunda razón importante es la conversión de una porción considerable de sólidos carbonosos y proteínicos a gas; de ese modo, se reduce sustancialmente la masa y, en consecuencia, el volumen de los residuos sólidos orgánicos biodegradables (CalRecovery, 1997)..

En general, la descomposición biológica puede producirse bajo condiciones aerobias o anaerobias; no obstante debido a que los residuos sólidos se colocan y yacen en el relleno sanitario durante un largo periodo, el ambiente dentro del relleno sanitario es dinámico. En una ubicación específica dentro del relleno, es decir, con referencia al volumen inicial que contiene una masa específica de residuos sólidos, las reacciones aerobias preceden a las anaerobias. Aunque ambas fases son importantes, la descomposición anaerobia ejerce la mayor y más duradera influencia, por las características asociadas al relleno sanitario. En la figura 2 se ilustra un período típico de los procesos aerobios y anaerobios de un relleno sanitario (CalRecovery, 1997).

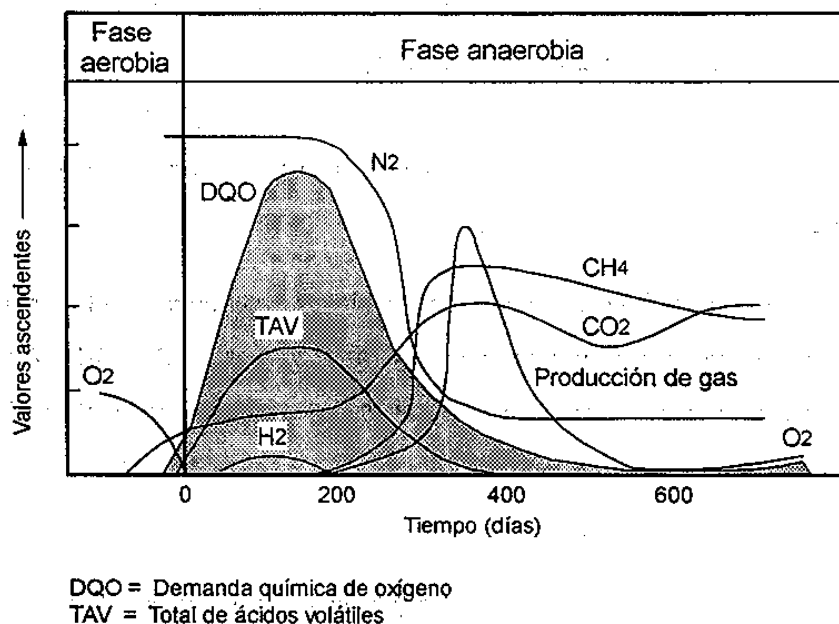


Figura 2. Fases de la degradación anaeróbica en rellenos sanitarios (Calrecovery, 1997).

La principal forma de descomposición, inmediatamente después que los residuos se entierran es la aerobia y se denomina la “fase aerobia”. La descomposición continúa siendo aerobia hasta que se agota todo el oxígeno (O₂) del aire atrapado en el relleno sanitario y cuando todo el oxígeno disuelto en la precipitación que penetró el relleno sanitario ha sido utilizado. Los productos de las reacciones aerobias son calor, CO₂, H₂O y material inorgánico, siempre y cuando haya suficiente oxígeno para que la reacción proceda hasta el final. En ese sentido, puede señalarse que el impacto ambiental adverso durante la fase aerobia es mínimo.

Los productos derivados de la descomposición anaerobia pueden ejercer un efecto considerablemente adverso en el ambiente, a menos que se controlen adecuadamente. Pueden definirse dos grupos de productos derivados: 1) los ácidos orgánicos volátiles y

2) los gases. La mayoría de los ácidos orgánicos son ácidos grasos de cadena corta y de olor apreciable. Ellos conforman una porción de los productos intermedios (otros son H_2O y CO_2), producidos durante la primera fase, generalmente conocida como la fase de formación de ácidos. Ejemplo de ellos son los ácidos fórmicos, acéticos, propiónicos e isovaléricos (CalRecovery, 1997).

2.3 Lixiviados

La lixiviación, es todo proceso de lavado que realiza el agua que se infiltra en el suelo. Aplicada a los residuos urbanos, puede definirse como el proceso de separación natural de los líquidos contenidos de los mismos. A estos líquidos y a sus componentes disueltos y en suspensión se les denomina lixiviados, acotando además que en el caso de los residuos urbanos estos se generan habitualmente en procesos naturales, sin que se utilice ningún tipo de disolvente. Así, los materiales más finos migran hacia niveles más profundos, por la simple acción del agua (Rigola, 1999).

Los lixiviados producidos en los rellenos sanitarios, son colectados a través de drenajes subterráneos y bombas de extracción, posteriormente son evacuados hacia un sistema colector en la planta de tratamiento, o para su tratamiento “in situ” (Rigola, 1999).

Los lixiviados proceden principalmente de la degradación de la materia orgánica contenida en los residuos. Estos líquidos se caracterizan por olor penetrante, coloración oscura a casi negro. Su composición generalmente está conformada por la abundancia en hidrocarburos solubles, así como de nitrógeno orgánico y amoniacal, también por la presencia de metales pesados como Cd, Ni, Zn y Pb, entre otros.

Es pertinente señalar que los lixiviados, de acuerdo a la normativa ambiental, no pueden ser vertidos sin una previa adecuación, ya que todos los efluentes están sujetos a unas calidades mínimas de vertido, establecidas según el cauce receptor, si no las

cumplen deben someterse a tratamientos que le confieran la calidad de vertido necesario o que permitan la recuperación interna del agua (Custodio y Llamas, 1976).

Durante la degradación de la materia orgánica presente en los residuos, se generan naturalmente los llamados gases de vertedero, los cuales se componen de metano, dióxido de carbono y de los denominados compuestos orgánicos volátiles (COVs). Estas emisiones de COVs incluyen hidrocarburos insaturados y saturados, hidrocarburos de tipo ácidos, alcoholes orgánicos, hidrocarburos aromáticos, compuestos halogenados y compuestos de azufre (Zou et al., 2003).

2.3.1 Composición de los lixiviados

El lixiviado comprende componentes orgánicos originados por procesos de hidrólisis y fermentación, por lo que contiene una alta concentración de materia orgánica e iones inorgánicos, incluyendo metales pasados (Robinson et al., 1982). La composición media de los lixiviados varía considerablemente según las áreas geográficas y la edad de los rellenos sanitarios (Kulikowska y Klimiuk, 2008).

La composición del lixiviado producido en un relleno sanitario puede ser muy compleja, aunque existen características químicas comunes tales como la presencia de altas concentraciones de hidrocarburos solubles, de nitrógeno orgánico y amoniacal, metales pesados como Cd, Ni, Zn y Pb, así como una elevada salinidad.

Asimismo, es importante señalar que la presencia de sustancias húmicas en el lixiviado podría aumentar el transporte de metales pesados. Aunado a ello, también el aumento del contenido de cenizas en los vertederos, puede aumentar los metales pesados y sales en las concentraciones de lixiviados (Keller, 1988).

2.3.2 Calidad de los lixiviados

La calidad química de un lixiviado varía en función de un número de factores que incluye la cantidad producida, la naturaleza de los materiales que conforman los residuos sólidos y la variedad de reacciones químicas y bioquímicas que pueden ocurrir; en ese sentido, puede ser mencionada la descomposición de la materia orgánica de los residuos sólidos. La cantidad del lixiviado producido, es afectado por algunas reacciones de descomposición y del contenido inicial de humedad; sin embargo, esto está controlado por la cantidad de agua externa que entra al relleno sanitario. En este sentido, un primer paso clave en el control de la migración de los lixiviados, es limitar en la medida de lo posible, la entrada de agua en las celdas contenedoras de los residuos sólidos.

La calidad del lixiviado se puede estimar a través de variables como la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO); tomando en cuenta además parámetros como pH, temperatura, concentración de sólidos disueltos totales (SDT) y en suspensión, dureza, concentración de fosfatos y nitratos, así como la concentración de metales pesados, entre otros (Padrón, 2005). Algunos de estos parámetros son explicados a continuación.

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅): es la cantidad de oxígeno requerido por los microorganismos para estabilizar la materia orgánica biodegradable en 5 días, a una temperatura de 20°C (Padrón, 2005).

Demanda química de oxígeno (DQO): Mide la cantidad de oxígeno equivalente a los agentes químicos, dicromato o permanganato de potasio, necesarios para la oxidación de la materia orgánica de un agua, bio y no biodegradable. Se mide en mg O₂/L (Rigola, 1999).

pH: es una medida de la concentración de protones de una solución acuosa. La mayoría de las aguas naturales tienen un pH entre 6 y 8. Es muy importante controlar este parámetro, pues si el lixiviado presenta un pH muy ácido o muy básico puede desencadenar problemas de corrosión, lo que supone un peligro potencial para el ambiente (Rigola, 1999).

Temperatura: este es un parámetro muy importante a tener en cuenta, ya que de este dependen los valores de la solubilidad de las sales y de los gases contenidos en los lixiviados (Rigola, 1999).

Turbidez: este parámetro es ocasionado por la presencia de partículas sólidas en suspensión o coloides, con un diámetro muy pequeño de aproximadamente 0,1µm, que impiden la transmisión de la luz tal y como lo haría a través del agua pura. La determinación de la turbidez del lixiviado, puede arrojar información sobre el grado de contaminación general, y no de los elementos contaminantes específicos presentes (Rigola, 1999).

Carbono orgánico total (COT): es un indicador de los compuestos orgánicos, fijos o volátiles, naturales o sintéticos, presentes en las aguas residuales y lixiviados. Para su determinación, el carbono orgánico se oxida a CO₂ en presencia de un catalizador, su medición puede ser realizado en un analizador infrarrojo (Rigola, 1999).

Nitrógeno amoniacal: constituye un parámetro adicional para determinar la contaminación producida en el agua. El nitrógeno amoniacal se encuentra en solución acuosa, en un equilibrio que está controlado por el pH de la solución, mediante la siguiente ecuación:



A pH básico tenderá a desplazarse el equilibrio hacia la formación del amoníaco (NH_3), mientras que la formación del ion amonio (NH_4^+) se favorece a pH ácido (Tchobanoglous et al., 2004).

Metales pesados: estos se encuentran en concentraciones a nivel de traza. Los más importantes son el níquel (Ni), manganeso (Mn), plomo (Pb), zinc (Zn), cadmio (Cd), cromo (Cr), hierro (Fe) y mercurio (Hg). La presencia de cualquiera de ellos por encima de su nivel de toxicidad, interferirá con gran número de los usos del agua (Padrón, 2005).

2.3.3 Clasificación de los lixiviados

La edad del relleno sanitario y por ende del grado de estabilización de los residuos, tiene un efecto sobre la composición de los lixiviados. Estos se pueden clasificar en lixiviados jóvenes, intermedios y estabilizados.

Los lixiviados jóvenes se caracterizan por presentar una carga orgánica alta con una $\text{DQO} > 20 \text{ gO}_2/\text{L}$, una concentración de ácidos carboxílicos aproximada del 80% de la carga orgánica, materia orgánica biodegradable cuya relación $\text{DBO}/\text{DQO} > 0,3$, una relación de $\text{COT}/\text{DQO} \approx 0,3$, pH alrededor de 6,5, concentración de metales de 2 g/L , y la preponderancia de ácidos grasos volátiles y compuestos de alto peso molecular (Ozzane, 1990).

Por su parte, los lixiviados intermedios muestran una carga orgánica entre $3 \text{ a } 15 \text{ gO}_2/\text{L}$, concentración de ácidos carboxílicos que representan del 20 al 30% de la carga orgánica, una relación $\text{DBO}/\text{DQO} \approx 0,2$, un pH casi neutro, compuestos de peso molecular superior a 500 g/mol (Ozzane, 1990).

Mientras que los lixiviados estabilizados tienen una carga orgánica $< 2 \text{ gO}_2/\text{L}$, ausencia de ácidos carboxílicos, baja biodegradabilidad con relación de $\text{DBO}/\text{DQO} \approx 0,1$, $\text{COT}/\text{DQO} = 0,4$ indicando la presencia de compuestos difícilmente oxidables, presencia de compuestos de elevado peso molecular superiores a 5000 g/mol , pH superior a 8 y concentración de metales menor de 50 mg/L (Ehrig, 1983; Ozzane, 1990).

Seoanez (1999) señala que los lixiviados pueden ser clasificados como de clase I, II o III. Los de Clase I presentan un pH menor a 6,6, una carga orgánica elevada que varía entre 70 y 90% y una relación DBO/DQO mayor a 0,3; los de Clase II poseen un pH entre 6,5 y 7,5, una carga orgánica media que oscila entre 10 y 30%, debida a los ácidos grasos volátiles y una relación DBO/DQO entre 0,1 y 0,3; y por último los de clase III presentan un pH mayor a 7,5, una carga orgánica baja y una relación DBO/DQO menor a 0,1.

2.3.4 Tratamiento de los lixiviados

Las manifestaciones de los lixiviados en los alrededores del lugar escogido para realizar la depositación y acumulación de los desechos sólidos y su probable impacto, señala que la solución medioambiental correcta, es el tratamiento de los lixiviados antes de su eliminación; sin embargo, la aplicación de un determinado tratamiento depende de la composición, características y naturaleza de la materia orgánica presente, así como la edad y la estructura del relleno sanitario (Padrón, 2005). Han sido desarrollados tecnologías que involucran los tratamientos biológicos, fisicoquímicos, procesos de oxidación avanzada, así como sistemas naturales y recirculación de lixiviados, no solo para minimizar la generación de contaminantes tóxicos del lixiviado, sino también para cumplir con las normas de aprobación ambientales, cada vez más estrictas en diferentes países (Zhao y Li, 2001).

Los sistemas más simples, están basados en la evaporación natural o forzada. Ambos son posibles de aplicar en zonas calurosas, con baja tasa de precipitación anual. La primera, simplemente por la actuación de la radiación solar sobre las celdas de almacenamiento, apoyado con sistemas de riego por aspersión o pulverización sobre los taludes y superficie del vertedero o sobre las mismas celdas. La evaporación se produce durante la aspersión, posteriormente se recoge el líquido no evaporado ni filtrado hacia el vertedero (Padrón, 2005).

En el segundo caso, la evaporación se logra mediante la inyección del lixiviado pulverizado en el interior de túneles o naves cerradas bajo la acción si es posible, de un caudal de aire caliente. Si la temperatura es elevada, la capacidad de saturación de este es elevada, por lo que la fase líquida pasará a fase gaseosa, mientras que la fase sólida decantará en el suelo de la nave (Padrón, 2005).

También, los lixiviados pueden ser biológicamente tratados, mediante el empleo de microorganismos, que llevan a cabo la degradación de las sustancias contaminantes, normalmente mediante procesos oxidativos; estos pueden ser aerobios, anaerobios y lagunajes profundos (Seoanez, 1998).

Por su parte, los métodos usados aplicando tratamientos fisicoquímicos, han demostrado ser válidos no solo para la eliminación de sustancias refractarias en lixiviados estabilizados, sino también como una etapa de refinación del lixiviado tratado biológicamente. Estos comprenden el uso de técnicas como la precipitación y oxidación química, la adsorción y la ósmosis inversa, pero ningún intento hasta ahora se ha hecho para obtener una completa visión general de todos los tratamientos fisicoquímicos, en términos de las condiciones óptimas para la remoción de DQO y $\text{NH}_3\text{-H}$ de los lixiviados de los rellenos sanitarios. Sin embargo, son métodos con menor sensibilidad a las variaciones de las condiciones del medio (Kurniawan et al., 2006).

2.4 ÁREA DE ESTUDIO

2.4.1 Ubicación y superficie

El relleno sanitario “La Bonanza”, es uno de los principales rellenos sanitarios del país; es el lugar de disposición final de la basura que se produce en Caracas y en una buena parte del Estado Miranda. Este relleno se encuentra ubicado al noroeste de Charallave en los Valles del Tuy Medio, Municipio Guaicaipuro, Estado Miranda. Su extensión es de 186 hectáreas (1860 000 m²).

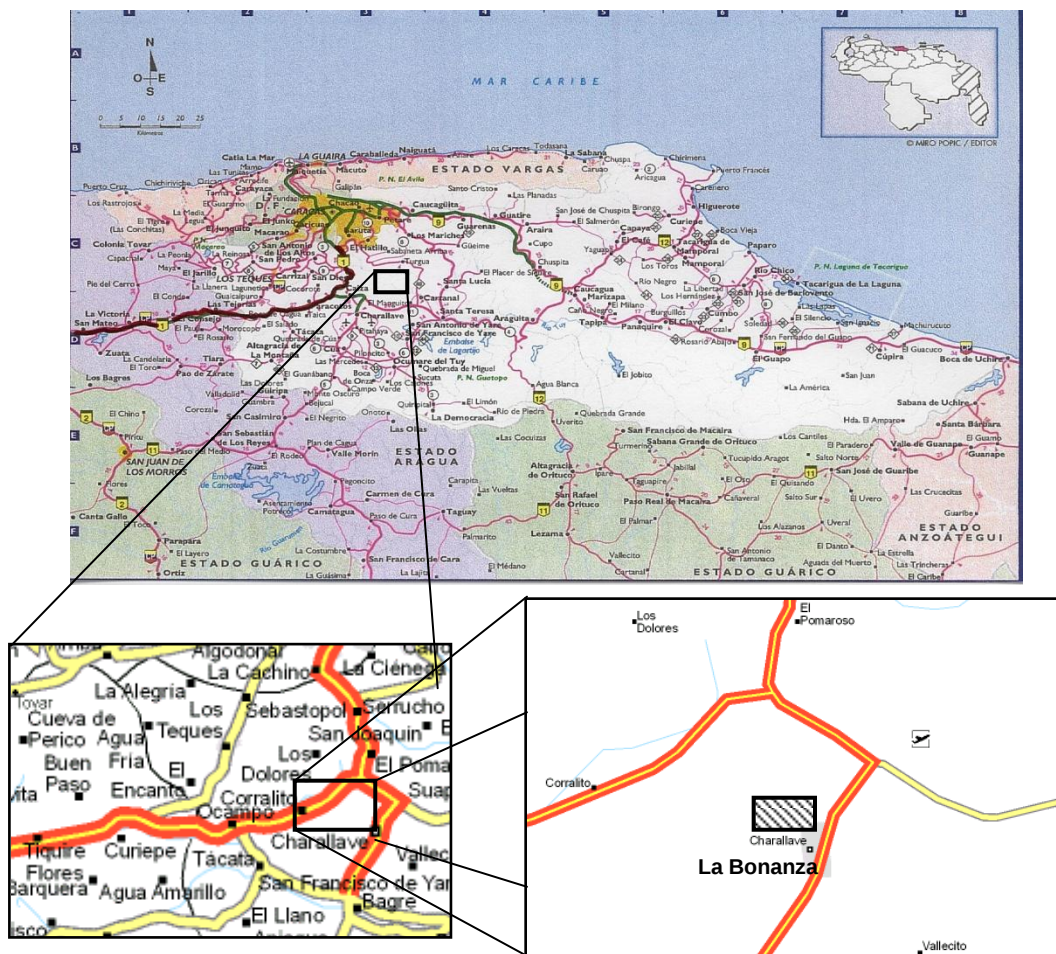


Figura 3. Ubicación nacional y regional del relleno sanitario “La Bonanza”.

2.4.2 Clima

Según las estaciones climatológicas de Paracotos, Charallave y Cua-Tovar, se registran las siguientes condiciones (CONNATURA, 1984) en los niveles latitudinales de la Cuenca del Río Tuy, caracterizada por dos pisos climáticos, a saber: lluvia y sequía.

Las precipitaciones son intensas en los meses de junio, julio y agosto; mientras que la de menor intensidad se producen en los meses de febrero y marzo. La precipitación promedio anual, según el periodo de registro de las estaciones Paracotos, Charallave y Cua-tovar es de 998,5 mm (1961-1996), 810,9 mm (1946-1996) y 1033,8 mm (1951-1995) respectivamente.

Por su parte, la evaporación registra máximos en los meses de febrero a mayo y de septiembre a octubre, donde el mes de marzo presenta el mayor valor con 224,4 mm, los cuales coinciden con los meses de mayor temperatura.

En cuanto a la temperatura anual, esta oscila entre 15 y 21 °C en la cuenca Alta del Río Tuy, mientras que en la cuenca Media oscilan desde 24 Y 26 °C. La temperatura presenta los máximos en los meses de abril, con 34,6 °C y 33 °C en el mes de octubre. Con relación a la cuenca Baja, esta se encuentra rodeada por altas montañas que se abren al este hacia el mar, por donde penetran en forma constante los vientos alisios cargados de humedad provocando en el centro y extremo oeste de la planicie aluvial de Barlovento, un núcleo de altas precipitaciones.

2.4.3 Datos técnicos

Los datos e información técnica seguidamente señalada para el relleno sanitario “La Bonanza”, fueron suministradas por Cotecnica, 2010. En ese sentido puede señalarse que el relleno está conformado por 5 grandes celdas. Estos cuerpos contenedores de basura poseen una capacidad de almacenamiento de aproximadamente 432.000 m³ cada uno. En la base de las celdas, es utilizada una protección compuesta de una geomembrana de polietileno de alta densidad (PAD) de 600 g/m² y otra, también de tipo PAD de 1,5 mm de espesor.



Figura 4.- Celda 1 durante el proceso de colocación del geosintético y la capa gravosa en el año de 1999 del relleno sanitario “La Bonanza” (Cotecnica, 2010).

En la figura 4 se aprecia el proceso de colocación de la capa gravosa encargada de captar los lixiviados al fondo de la celda. Puede indicarse que según experiencias de

campo en el relleno sanitario, el uso de materiales calcáreos es bastante susceptible a precipitación química, en el pasado eran utilizadas capas de gravas de piedra caliza que sufrieron disolución al estar en contacto con lixiviados, por lo que fueron descartadas y sustituidas por gravas de sílice.



Figura 5.- Celda 2 durante el proceso constructivo inicial del relleno sanitario “La Bonanza” (Cotecnica, 2010).

Por su parte, en la figura 5 se aprecia el canal de recolección de lixiviados de la celda No. 2, con cierta periodicidad, estos fluidos son bombeados hasta la laguna de tratamiento.

En la figura 6 se muestra un esquema del relleno sanitario “La Bonanza” donde se muestra la distribución de las celdas de recolección de lixiviados, asimismo las lagunas de aguas superficiales ubicadas dentro del relleno.

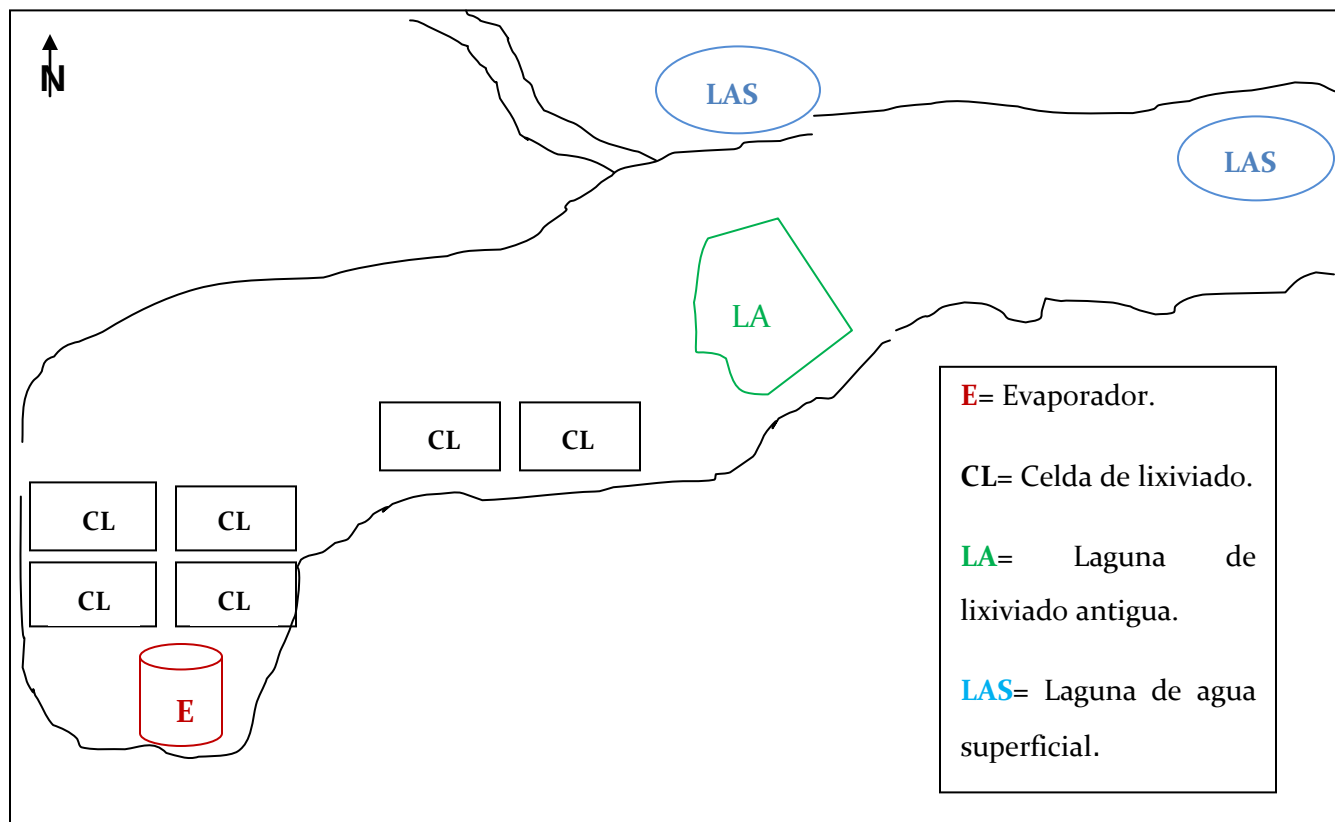


Figura 6.-Esquema del relleno sanitario “La Bonanza”.

2.5 ANTECEDENTES

Nacionales

Briceño (1992) realizó la caracterización fisicoquímica de dos lixiviados generados en el relleno sanitario “La Bonanza”. Dichos lixiviados fueron “afluente” y “efluente” de una laguna donde los lixiviados eran acumulados. La caracterización se llevo a cabo mediante la determinación de parámetros como materia orgánica y concentraciones de las especies químicas sodio (Na^+), potasio (K^+), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), hierro (Fe), zinc (Zn) y amonio (NH_4^+). Por su parte, Briceño (1992), identificó la presencia de lixiviados alcalinos en el relleno sanitario estudiado, constituidos por altas concentraciones de materia orgánica, de metales como Na^+ y K^+ , amonio (NH_4^+) y cloruros (Cl^-) en los lixiviados que superan los límites permisibles para descarga de efluentes líquidos según las “Normas para efluentes líquidos” del MARN, capaz de afectar los suelos de las áreas circundantes y contaminar las aguas subterráneas y superficiales.

Padrón (2005) realizó un estudio químico tanto de lixiviados provenientes del relleno sanitario La Bonanza como del producto de la incineración de los mismos, , mediante la determinación de carbono orgánico total (COT), nitrógeno orgánico y amoniacal y metales pesados como Cd, Cu, Cr, Mn, Pb y Zn antes y después de ser sometidos a una evaporación a 100°C . Dicha investigadora determinó que la técnica de evapo-incineración no es apropiada para el tratamiento de los lixiviados provenientes del Relleno Sanitario La Bonanza; asimismo, identificó además, los compuestos orgánicos volátiles (COVs) que se desprenden durante la evaporación. Padrón (2005) trabajó con 2 tipos de lixiviados, denominados maduros, ambos provenientes de las celdas donde se almacenaron los desechos durante los primeros 20 años de funcionamiento del relleno sanitario y nuevos provenientes de las celdas donde se han almacenado los desechos durante los últimos 20 años. Esta autora concluyó que existe una

concentración menor de contaminantes en los lixiviados maduros, debido a la degradación bacteriana de la materia orgánica.

Internacionales

Zou et al. (1998) realizaron una caracterización de los compuestos orgánicos volátiles (COVs), provenientes del relleno sanitario Datianshan, Guangzhou al sur de China, con el propósito de visualizar las variaciones de concentraciones de traza de COVs en diferentes épocas de año, tomando 12 puntos de muestreo y recolectando muestras simultáneas, mediante la utilización de tubos de adsorción Carbontrap™. Estos autores determinaron que los COVs del relleno sanitario están compuestos por alcanos, aromáticos, especies cloradas, terpenos y especies de carbonilo, así como naftaleno y sus derivados. Los resultados mostraron que los niveles de concentración de los COVs obtenidas en verano, fueron mayores que los niveles de concentración para la estación de invierno. Asimismo, concluyeron que los compuestos orgánicos volátiles de tipo aromáticos, fueron los predominantes en las estaciones de verano e invierno.

Rapti-Caputo y Vaccaro (2006) realizaron un seguimiento hidrogeológico y geoquímico de los sistemas acuíferos principales desarrollados por debajo de un relleno sanitario San Agustin ubicado al norte de Italia, con el objetivo de evaluar los riesgos ambientales asociados con los lixiviados que desembocan en las aguas subterráneas. Dichos investigadores para ello utilizaron columnas estratigráficas para simular en detalle un modelo litológico e hidrogeológico del subsuelo. La información obtenida Rapti-Caputo y Vaccaro (2006) les permitió a estos investigadores hacer inferencias en cuanto a i) la influencia del relleno sobre la contaminación del subsuelo, esto a través de la determinación de las concentraciones de las especies Cl^- , Al, Zn, Pb, Cr y Ni; ii) la contribución de la litología de la zona, pudiendo influir en el proceso de propagación de los elementos determinados hacia el sistema acuífero; iii) la

importancia de la posición de la red de monitoreo en la identificación de la contaminación y la protección de los recursos hídricos. Rapti-Caputo y Vaccaro (2006) encontraron que una ineficiente impermeabilización en las bases de los rellenos sanitarios, permite la infiltración de los lixiviados al acuífero. En este sentido, es fundamental la implementación de estudios hidrogeológicos y geoquímicos, así como de la elaboración de una red de monitoreo para la protección y la salvaguardia de los recursos hídricos subterráneos.

Olivero et al. (2007) planteándose como objetivo el de establecer las relaciones entre composición y toxicidad de los lixiviados del relleno sanitario de la ciudad de Cartagena, Colombia, realizaron la caracterización fisicoquímica de los lixiviados, a través de la determinación de las concentraciones de metales pesados como Cd, Ni, Hg, Mn, Cu y Pb y de la medición de los parámetros pH, conductividad y de la demanda química de oxígeno (DQO). Estos autores concluyeron que la toxicidad de los lixiviados depende de las concentraciones de Cd asociadas a materia orgánica, siendo este efecto modulado por Ni.

Kulikowska y Klimiuk (2008) realizaron un monitoreo del relleno sanitario de Wysieka, Polonia, con el fin de determinar la calidad de los lixiviados. Dicho estudio fue llevado a cabo durante un periodo de evaluación de 4 años. Para alcanzar el objetivo propuesto, estos investigadores estudiaron las variaciones en las concentraciones en los lixiviados de compuestos orgánicos, así como las especies N, P, metales pesados y la concentración de benceno, tolueno y xilenos, estos expresados como BTEX. Estos autores concluyeron que los principales contaminantes son los compuestos orgánicos y el N proveniente del NH_3 . Asimismo, observaron fluctuaciones en las concentraciones de las especies y parámetros determinados como: Ca^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- , sólidos disueltos, metales pesados y BTEX, tendiendo a variar con la época del año.

Por otra parte, **Oman y Junestedt (2008)** estudiaron los lixiviados provenientes de 12 sitios de rellenos sanitarios en Suecia con el objetivo de caracterizarlos fisicoquímicamente. Por ello determinaron 400 parámetros y compuestos. Los resultados obtenidos les permitió a estos autores identificar más de 90 compuestos orgánicos y metales, asimismo detectaron 50 especies químicas. Entre las especies químicas identificadas están los compuestos halogenados alifáticos, el benceno y benceno alquilados, fenoles, compuestos aromáticos policíclicos, ésteres y dioxinas.

Lou et al (2009), tomaron muestras de lixiviados de diferentes edades, de un relleno sanitario ubicado en Shanghai, China, distribuidos de la siguiente manera: lixiviados maduros de 11 años; lixiviados semimaduros de 5 años y lixiviado fresco, obtenido en plena producción del mismo; esto con el propósito de visualizar la distribución de material suspendido de tamaño coloidal, así como las variaciones de los lixiviados.

Los lixiviados fueron separados mediante microfiltración y ultrafiltración en fracciones de tamaño específico, es decir, partículas en suspensión (SP) > 1,2 mm, coloides secundarios (CC) cuyo tamaño está entre 1,2 a 0,45 micras, coloides multa (FC) de 0,45 m, 5 kDa / 1 kDa de peso molecular (MW), y materia orgánica disuelta (DM <5 kDa / 1 MW kDa). Los coloides específicos de cada fracción de tamaño fueron cuantificados y caracterizados a través de parámetros como demanda química de oxígeno (DQO), sólidos totales (ST), pH, concentración de NH_4^+ , carbono orgánico total (COT) y sólidos fijos (SF). Lou et al. (2009) encontraron que la DQO, concentración de NH_4^+ y los sólidos disueltos totales (SDT) en el lixiviado se redujo significativamente durante el paso del tiempo, mientras que el pH del mismo aumentó. En cuanto a las fracciones de coloides la de tamaño (<5 kDa/1 kDa) dominó en más del 50%,;mientras en términos de DQO en los tres tipos de lixiviados y el contenido de materia orgánica disuelta en los lixiviados decrece y la materia inorgánica aumenta con el tiempo.

Finalmente, **Matejczyk et al. (2011)** estudiaron los lixiviados de 22 rellenos sanitarios, ubicados en el sur del Polonia. Dichos investigadores evaluaron parámetros ecotoxicológicos y centraron su estudio en la identificación de sustancias peligrosas en los lixiviados, consideradas prioritarias por la comisión ambiental de Europa y Australia. Matejczyk et al. (2011), señalan que sólo fueron detectados el Cd, Hg, Hexaclorobutadieno, pentaclorobenceno y los llamados PAHs (hidrocarburos aromáticos policíclicos). Los denominados PAHs se encontraron en todas las muestras en el rango de 0,057 a 77,2 mg/L. Estos autores concluyeron además, el estudio ecotoxicológico permite señalar que los lixiviados de los rellenos sanitarios muestran peligros sanitarios y epidemiológicos. Las muestras de lixiviados fueron clasificados como tóxicos en 13,6%, altamente tóxicos en el 54,6% y muy altamente tóxicos en el 31,8%, considerándolos como muestras definitivamente peligrosos y tóxicos para la flora y la fauna.

Sin embargo, Matejczyk et al. (2011) indican que no se encontraron correlación entre los valores de toxicidad y los parámetros químicos. Agregan que la toxicidad de las muestras de lixiviados no se puede explicar por los bajos niveles de los contaminantes prioritarios, pudiéndose explicar por la presencia de otros tipos de xenobióticos no identificados en las muestras que dió como consecuencia el efecto tóxico agregado.

3. OBJETIVOS

General

Realizar la caracterización fisicoquímica, inorgánica y orgánica de los lixiviados provenientes del relleno sanitario “La Bonanza”.

Específicos

1. Identificar el ó los tipo de lixiviados presentes, mediante el análisis de los parámetros fisicoquímicos pH, conductividad, alcalinidad, así como el contenido de materia orgánica.
2. Visualizar la distribución espacial de las especies químicas Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- y sílice disuelta, así como de los elementos traza As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Se, Ti, V, Zn, Co, Sr, Sb presentes en los lixiviados y en las lagunas ubicadas dentro del relleno sanitario.
3. Identificar los tipos de compuestos orgánicos volátiles que se producen en los lixiviados del relleno sanitario, incluyendo los denominados BTEX.

4. METODOLOGÍA

El desarrollo de este proyecto contempló tres etapas, a saber: la primera que involucra la etapa de pre-campo previa a la captación de muestras, la cual incluyó la selección de variables y la preparación del material de campo; la segunda, correspondió a la etapa de campo, que consistió en el traslado a la zona de estudio para la toma de muestras y la medición de algunos parámetros in situ; y finalmente una tercera etapa, que consistió en el tratamiento de las muestras y análisis químico para la determinación de las distintas especies químicas de interés. Los resultados obtenidos fueron usados para realizar las interpretaciones correspondientes.

4.1 Etapa de pre-campo

Esta etapa consistió en la recopilación de datos descriptivos de la zona, que incluyó fisiografía, geología, hidrología y las características generales del relleno, entre otros, con el fin de obtener la información necesaria que permitió realizar la planificación del muestreo de la zona de estudio.

Igualmente, en la etapa de pre-campo se realizó la preparación previa del material de campo a utilizar. Esto incluyó el tratamiento de los envases de polietileno de 1000 mL de capacidad a ser usadas en la captación de muestras para la determinación de cationes mayoritarios y compuestos orgánicos volátiles; para ello, los envases fueron lavados con agua destilada y desionizada, por un periodo de 24 horas, y luego fueron tratados con una solución de HNO_3 al 10% v/v, para evitar la adsorción de los cationes y de los metales trazas en las paredes del envase; mientras que los envases de 500mL empleados para la determinación de aniones y alcalinidad, fueron tratados con

abundante agua destilada y desionizada. La figura 7, muestra el esquema de metodología empleada en la etapa de pre-campo.

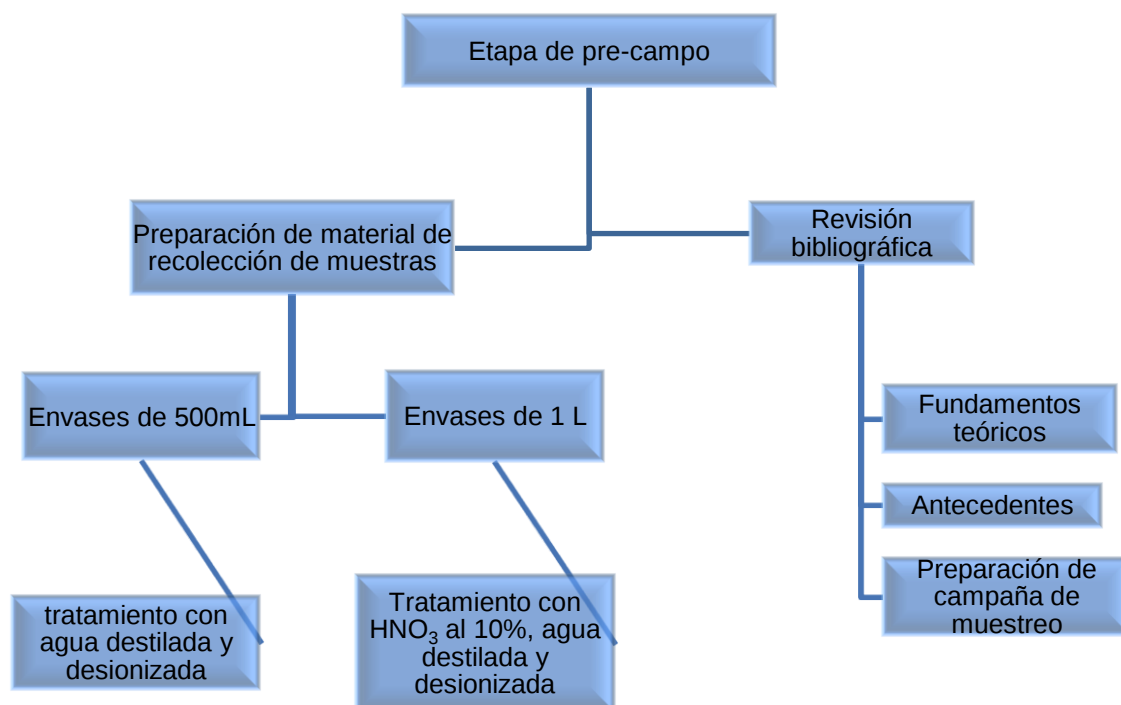


Figura 7.- Esquema de la metodología experimental de la etapa de pre-campo.

4.2 Etapa de campo

Esta etapa consistió en el traslado a la zona de estudio y la toma de muestras, así como la medición “in situ” de los parámetros fisicoquímicos pH, conductividad y temperatura. En la figura 8 es mostrada la ubicación de los puntos de captación de las

muestras. Para realizar la medición de dichos parámetros, fue utilizada una sonda multiparamétrica marca YSI, modelo 610-D. La figura 9, muestra el esquema de metodología empleada en la etapa de campo.

En el área de estudio existen 6 celdas de recolección de lixiviados activas, además de 2 lagunas de aguas superficiales. Atendiendo a la información obtenida durante el recorrido de la zona de estudio, se tomaron 8 muestras de las celdas de recolección de lixiviados y 2 de las lagunas superficiales (figura 8). Cabe destacar, que fue tomada una muestra que corresponde a la salida del evaporador que se ocupa de disminuir el volumen de los lixiviados provenientes de las celdas de recolección.

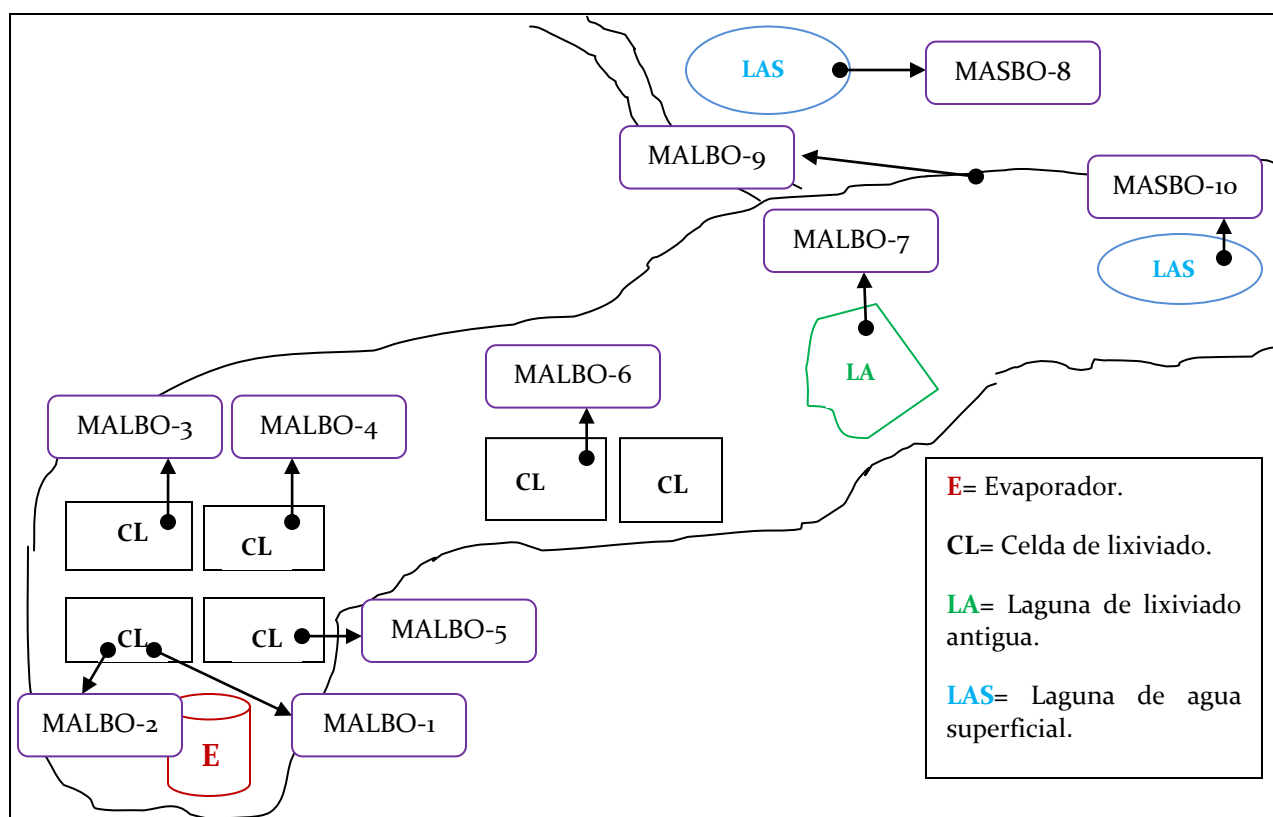


Figura 8.- Ubicación puntos de muestreo en el relleno sanitario “La Bonanza”, Charallave, Estado Miranda.

Tabla 1.-Datos recopilados de las muestras generados en la zona de estudio.

Muestra	Coordenadas UTM		Temperatura (°C)	Conductividad (μS/cm)	pH	Descripción
MALBO-1	10°16'56N	66°54'12W	52,12	201138	9,75	Lixiviado que sale del evaporador.
MALBO-2	10°16'57N	66°54'13W	29,12	7835	8,39	Mezcla del lixiviado evaporado con y sin evaporar.
MALBO-3	10°16'57N	66°54'14W	28,32	4268	8,58	Lixiviado de color amarillo claro ubicado en celdas de recolección.
MALBO-4	10°16'58N	66°54'13N	28,41	3049	9,6	Segunda laguna de sedimentación.
MALBO-5	10°16'58N	66°54'11W	33,23	6760	7,04	Lixiviado de color verde ubicado en celdas de recolección.
MALBO-6	10°17'01N	66°53'49W	29,50	3916	8,13	Lixiviado de color amarillo ubicado en celdas de recolección.
MALBO-7	10°17'01N	66°53'45W	30,46	5526	6,64	Lixiviado de color negro, situado en una laguna. Son los lixiviados más antiguos del relleno sanitario.
MASBO-8	10°17'23N	66°53'39W	31,70	882	6,63	Laguna formada por el flujo de agua superficial, particularmente lluvia.
MALBO-9	10°17'20N	66°53'34W	32,67	4534	7,21	Lixiviado de color oscuro, nuevo y proveniente de las celdas 5 y 6.
MASBO-10	10°17'15N	66°52'56W	26,05	549	5,79	Laguna formada por el flujo de agua superficial, particularmente lluvia. Presencia de eutrofización.

MALBO: muestra de agua de lixiviados de la Bonanza

MASBO: muestra de agua superficial de la Bonanza

La escogencia de los puntos de muestreo estuvo fundamentada en cubrir toda el área de estudio, donde ocurren las manifestaciones de los lixiviados en el relleno sanitario.

Para la determinación de los cationes mayoritarios Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , y sílice disuelta (SiO_2), fueron colectadas alícuotas de 1000 mL de lixiviados, las cuales a su vez fueron previamente filtradas empleando para ello una membrana de filtro Millipore con un tamaño nominal de $0,45\mu\text{m}$. Esto con la finalidad de eliminar sólidos suspendidos. Seguidamente, las muestras fueron preservadas con una alícuota de 2 mL de HNO_3 concentrado bidestilado para obtener un $\text{pH} < 2$, evitando así la posible absorción de algunas especies químicas en las paredes de los envases.

Par la determinación de los aniones Cl^- , NO_3^- y NO_2^- , se tomaron alícuotas de 500 mL del lixiviado, las cuales fueron preservadas a una temperatura menor de 5°C para evitar la descomposición del NO_3^- (APHA,1995).

Por su parte, la alcalinidad fue determinada durante las primeras 24 horas después de captada la muestra. Para ello, las muestras de lixiviados fueron mantenidas a una temperatura menor a 5°C , con el propósito de minimizar la pérdida de CO_2 . Esta determinación se llevó a cabo aplicando el método de Gran, que se caracteriza por identificar el punto donde estequiométricamente la alcalinidad es consumida y la concentración de iones hidronio aumenta.

El método de Gran consiste en graficar la ecuación de Gran $((V + v) 10^{-\text{pH}})$ en función del volumen del titulante donde V es el volumen del titulante y v es el volumen de la muestra. De esta manera, se obtiene una función que permite a través de la extrapolación hasta el valor cero de la función de Gran, obtener el punto final de la titulación.

La precisión de este método fue obtenida a partir de la titulación por triplicado de una muestra al azar, para obtener la desviación estándar de la metodología utilizada.

Por su parte, la determinación de los compuestos orgánicos volátiles, se realizó en las muestras de lixiviados recolectados en los envases de 500 mL. Estas fueron preservadas a una temperatura menor de -8°C para evitar la degradación de la muestra por parte de las bacterias.

Finalmente, para el estudio de los BTEX (benceno, tolueno, etílbenceno y xilenos), las muestras fueron previamente filtradas empleando para ello una membrana de filtro Millipore con un tamaño nominal de $0,45\mu\text{m}$, con la finalidad de eliminar los sólidos suspendidos.

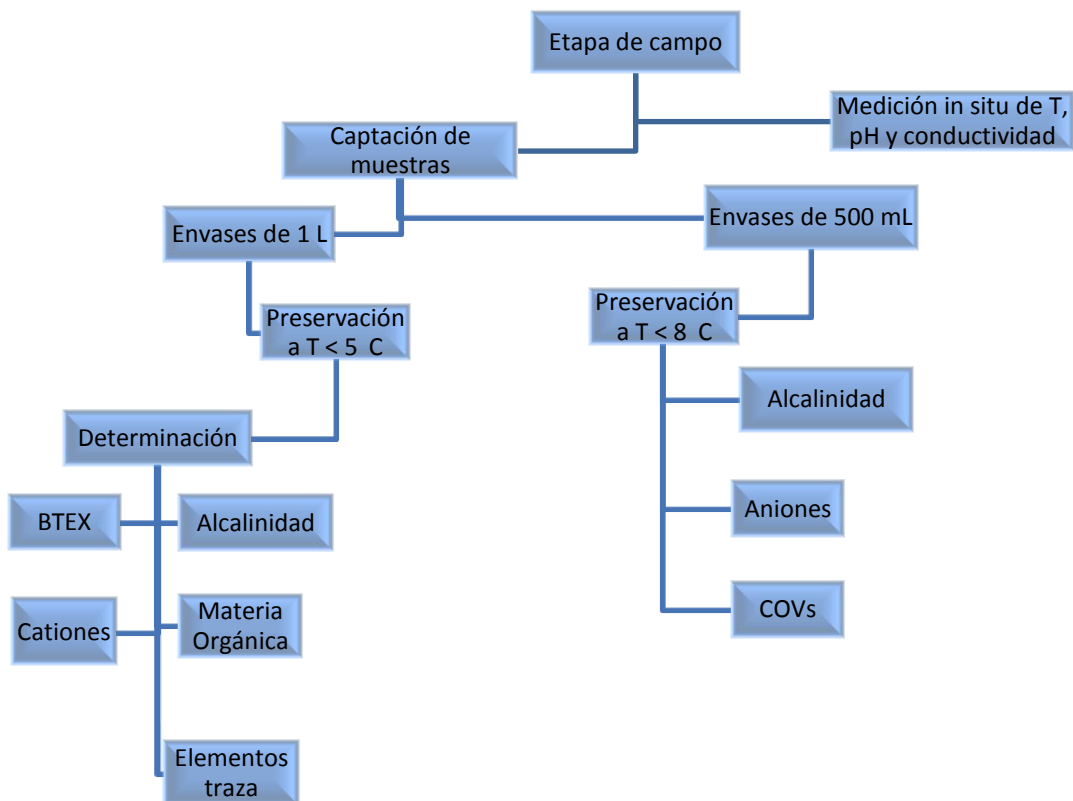


Figura 9.- Esquema de metodología experimental de la parte de campo.

4.3 Etapa post-campo

Esta etapa incluye la fase de laboratorio, que consistió en la determinación de las especies iónicas mayoritarias Na^+ , K^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} , los aniones Cl^- , HCO_3^- , NO_3^- , NO_2^- y los elementos traza As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Se, Ti, V, Zn, Co, Sr, Sb y sílice disuelta (SiO_2), además de los compuestos orgánicos volátiles y los llamados BTEX

(benceno, tolueno, etílbenceno y xilenos). Para ello se emplearan las técnicas analíticas y metodologías seguidamente reseñadas.

4.3.1 Determinación de especies catiónicas mayoritarias Na^+ , K^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+}

La determinación de Na^+ , K^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} , fue realizada mediante la técnica de espectrometría de emisión y absorción atómica, usando un equipo de marca Perkin Elmer modelo Analyst 200. Fueron preparados patrones multielementales cuyas concentraciones estuvieron en un intervalo de 0-100 mg/L, que permitió elaborar curvas de calibración de los elementos a determinar mostradas en el apéndice B.

El intervalo de concentración fue preparado tomando en consideración los resultados obtenidos a partir de un barrido efectuado previamente al análisis. Las condiciones experimentales de trabajo bajo las cuales fue llevada a cabo la determinación de dichos elementos mayoritarios son mostradas en la tabla 6, apéndice A.

4.3.2 Determinación de los aniones Cl^- , NO_3^- y NO_2^-

La determinación de aniones Cl^- , NO_3^- y NO_2^- , fue realizada mediante la técnica de cromatografía iónica, utilizando un cromatógrafo marca WATERS, modelo 430. Las condiciones experimentales bajo las cuales fue llevada a cabo la determinación son mostradas en la tabla 7, apéndice A. Para ello, fue requerida la preparación de patrones de multiespecies químicas. Estos patrones fueron usados para la construcción de curvas de calibración, para cada especie de interés. Finalmente, para obtener la precisión del método, se realizaron cinco réplicas de una muestra captada para obtener el error de la diferentes especies aniónicas que fueron determinadas.

4.3.3 Determinación de los elementos traza As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Se, Ti, V, Zn, Co, Sr y Sb

La determinación de los elementos traza fue realizada por la técnica de emisión atómica con fuente de plasma inductivamente acoplado (ICP-OES), marca Jobin Yvon, modelo Ultima 2. Para ello fueron preparados patrones multielementales con los elementos de interés, permitiendo la construcción de las curvas de calibración para cada elemento. Estas curvas pueden ser observadas en el Apéndice B. Las condiciones experimentales bajo las cuales fue llevada a cabo la determinación son mostradas en la tabla 8, apéndice A.

4.3.4 Determinación de BTEX (benceno, tolueno, etílbenceno y xilenos)

La determinación de BTEX se llevó a cabo mediante la técnica de cromatografía líquida de alta eficiencia, utilizando un cromatógrafo marca Agilent, modelo 1200 acoplado a un detector de conductividad FID. Para la identificación de estos compuestos, se prepararon patrones con las especies a determinar. La fase móvil utilizada fue una mezcla consistente de 80% metanol/ 40% H₂O grado HPLC. Mediante los datos de tiempo de retención de los patrones y de la muestra, se realizó el análisis de los picos correspondientes a los compuestos de interés, los cuales fueron cuantificados por medio del método de normalización de área, aplicado a cada muestra. Las condiciones experimentales bajo las cuales fue llevada a cabo la determinación son mostradas en la tabla 9, apéndice A.

4.3.5 Determinación de compuestos orgánicos volátiles

Se realizó un procedimiento secuencial de extracción líquido-líquido el cual fue aplicado a una cantidad aproximada de unos 100 mL de muestra de lixiviado captado,

empleando pentano y diclorometano, seguidamente se procedió a acidificar hasta un pH = 2. Dicho procedimiento permitió la determinación de los compuestos orgánicos volátiles mediante la técnica de cromatografía gaseosa GC-MS. Previo a los análisis los extractos fueron reducidos en volumen empleando un rotaevaporador. El equipo empleado fue Finnigan MAT 8222 mass spectrometer (Finnigan) acoplado a un cromatógrafo de gases marca Varian Series 3700, equipado con una columna capilar de 30m, 0,22mm i.d., 0.25 mm film BPX5 de sílice fundida (SGE). Las condiciones experimentales bajo la cual fue llevada a cabo la determinación son mostradas en la tabla 10, apéndice A.

4.3.6 Determinación del contenido de materia orgánica

La determinación de la concentración de la materia orgánica se realizó mediante el método de Walkley-Black oxidando la materia orgánica oxidable de los lixiviados con ácido crómico, se tomó un 1 mL de cada muestra, seguidamente estas se titularon por retroceso con una disolución de sulfato ferroso amónico, utilizando como indicador la difenilamina. La precisión de este método fue obtenida a partir de la titulación por triplicado de una muestra al azar, para obtener la desviación estándar de la metodología utilizada. La figura 10, muestra el esquema de metodología empleada en la etapa de post-campo.

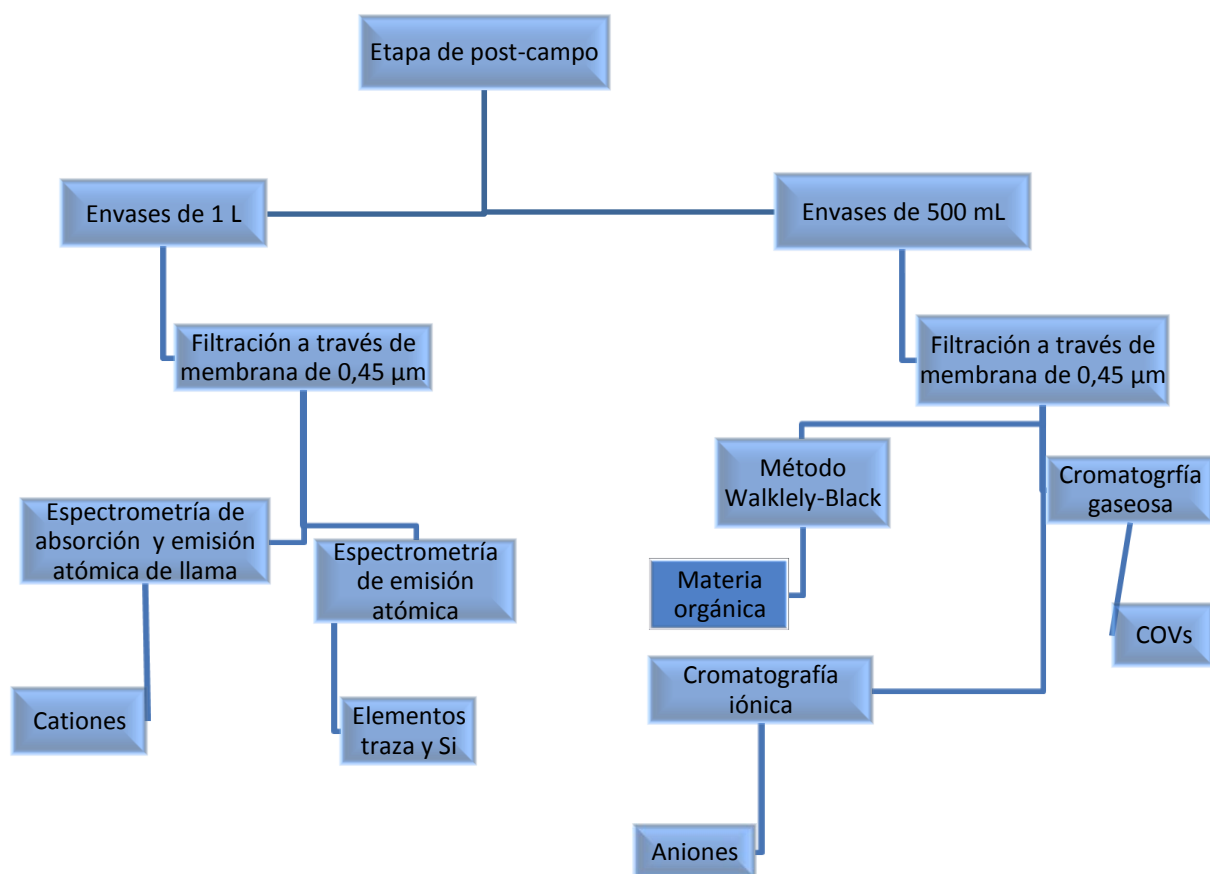


Figura 10.- Esquema experimental de la metodología empleada en post-campo.

5. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En esta sección son presentados y discutidos los resultados obtenidos a partir de los análisis efectuados durante la etapa de laboratorio, a las 8 muestras de lixiviados; además de las 2 muestras de aguas superficiales captadas en la zona de estudio.



Figura 11.- Celdas de recolección de lixiviados del relleno sanitario "La Bonanza" (Google earth, 2010).

Los lixiviados captados, se obtuvieron del relleno sanitario "La Bonanza", donde se procesan cuatro millones de kilos (4.000.000 Kg) diarios de desechos y se reciclan 800.000 kilos mensuales de desechos (COTECNICA, 2011). Los lixiviados que se producen, son enviados a las celdas de recolección donde luego son enviados a un evaporador, con el propósito de disminuir su volumen. La figura 11 muestra algunas de las celdas de recolección de lixiviado; en ese sentido, es importante señalar que la celda de recolección donde se captó la muestra MALBO-6, forma parte de los lixiviados más frescos que luego son bombeados a la celda donde se tomó la muestra MALBO-5;

estos lixiviados continúan drenando llenando las celdas que facilitaron la captación de las muestras MALBO-4, MALBO-3 y MALBO-2 que luego son enviadas al evaporador.

Para la interpretación de los resultados fue inicialmente realizada una validación de los mismos, seguido de la precisión de los datos recolectados. Esto fue realizado a través del cálculo del balance iónico, así como la estimación de errores instrumentales, a través del cálculo de los límites de detección de los análisis de las técnicas instrumentales utilizados en este trabajo.

Para la precisión de los datos obtenidos, fue calculado el límite de detección. Miller (2002). Lo define como la concentración del analito que proporciona una señal igual a la del blanco, más tres veces la desviación estándar del blanco. Los límites de detección de cada una de las especies químicas determinadas, son mostrados en la tabla 2.

El límite de detección fue calculado utilizando las curvas de calibración construida para cada especie química determinada utilizando para ello la ecuación 3. Para la obtención de este parámetro, es calculado Y_L a partir de la ecuación 2 donde b , es el punto de intersección de la curva con el eje y y $S_{x/y}$ estima el error aleatorio en la dirección y , el cual es equivalente a la desviación estándar del blanco. Seguidamente el valor de Y_L es evaluado en la ecuación de la curva de regresión para finalmente obtener el valor de Límite de detección (LDD).

$$Y_{LD} = b + 3S_{x/y} \quad (2)$$

$$LD = (Y_{LD} - b) / m \quad (3)$$

Con respecto a la validación de los resultados, la figura 12 muestra de manera gráfica el error porcentual del balance iónico; obsérvese que de las diez (10) muestras estudiadas, seis (6) poseen errores en su balance cuyo promedio es menor al 10%;

mientras que las cuatro (4) restante, tienen valores que oscilan entre 27% y 72%. Específicamente en este intervalo están las muestras MALBO-1, cuyo valor es del 72%, MALBO-5, con un valor de 27%, MALBO-7 con 29% y MASBO-8 con 40%. Morantes (1997) señala que un error mayor al 10% en las muestras podría ser el producto de la presencia de especies orgánicas u otros iones no determinados que pudieran estar afectando el balance de cargas. Esto puede ser verificado al graficar los resultados obtenidos para la concentración de la materia orgánica, mostrada en la figura 12.b. Nótese que general, existe una correspondencia entre las muestras con los mayores valores en el porcentaje de error del balance iónico y en contenido de materia orgánica. Esto parece expresar lo señalado en lo referente a la presencia de especies orgánicas no determinadas, que pudieran estar contribuyendo en el balance de cargas.

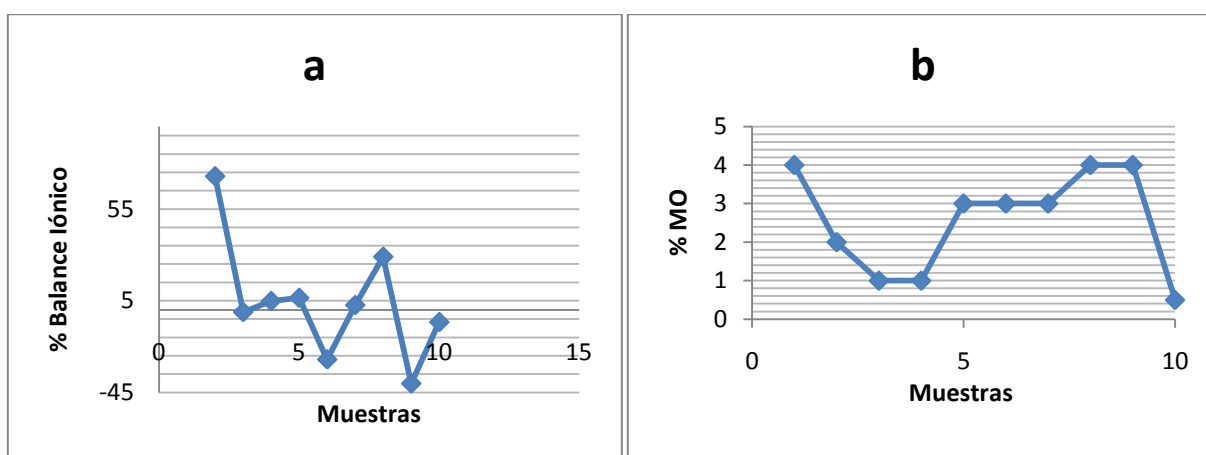


Figura 12.- (a)Error porcentual del balance iónico de las muestras de lixiviados del relleno sanitario "La Bonanza" (b) Porcentaje de materia orgánica de los lixiviados del relleno sanitario “La Bonanza”.

Los resultados obtenidos a partir de los análisis efectuados durante la etapa de laboratorio, son organizados en tres grupos, que comprenden: las características generales, incluyendo los parámetros fisicoquímicos; las especies mayoritarias; elementos traza; y los compuestos orgánicos.

5.1 Características generales de los lixiviados

En la tabla 2 se muestran los resultados generados para los parámetros pH, alcalinidad, conductividad y temperatura, así como para las concentraciones de las especies mayoritarias Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_2^- NO_3^- y sílice disuelta (SiO_2); además del porcentaje de materia orgánica. En virtud a dichos resultados, y en alusión a la literatura citada se observa que las concentraciones de los parámetros monitoreados no son los característicos de los lixiviados generados por rellenos sanitarios con una antigüedad de más 10 años. No obstante, los resultados obtenidos en este estudio podría deberse a que el lixiviado proveniente de las celdas de recolección y tratamiento, se encuentra sometido tanto a la dilución producida por las precipitaciones atmosféricas, como a una continua evaporación, como consecuencia de las condiciones climáticas cambiantes imperantes en la región investigada. Esto conlleva a que el lixiviado que se colecta en las diferentes celdas se constituye en una mezcla de lixiviados jóvenes y viejos. Puede señalarse que los valores de los parámetros del lixiviado estudiado se encuentran entre los reportados para la fase metanogénica (Oman y Junestedt, 2008).

Oman y Junestedt (2008) indican que la fase metanogénica implica la formación simultánea de metano y ácido, particularmente ácido acético, ácido valérico, ácido propiónico, entre otros, con valores de pH oscilando un pH en un rango de 7,5-9. En la tabla 1 se muestra que la mayoría de los valores de pH medidos en los lixiviados estudiados, se encuentran en dicho intervalo.

En el mismo orden de ideas, el mayor valor de pH de 9,75 unidades registrado para la muestra MALBO-1, puede atribuirse a que durante el proceso de evaporación de los lixiviados, todos los ácidos orgánicos y algunos compuestos orgánicos volátiles que pudieran contribuir con el pH, son arrastrados por el vapor de agua y de esta forma eliminados, por lo que el producto final es un lixiviado espeso con un mayor valor de

pH que el anterior. No obstante, en el resto de las muestras el pH se mantuvo oscilando entre 6 y 8.

Por otro lado, el valor más bajo de pH de 5,79 unidades fue obtenido para la muestra MASBO-10. Atendiendo a las observaciones de campo, dicha muestra tiene como característica principal su evidente proceso de eutrofización, generando la degradación de la materia orgánica y la completa eliminación del oxígeno del agua y por ende la muerte de los organismos aerobios; como consecuencia de ello, se desprenden gases como el H_2S que conlleva a un proceso de acidificación del agua (Jiménez, 2001).

Por otra parte, la carga orgánica encontrada en los lixiviados no supera el 5%, esto debido al grado de estabilización de los lixiviados, dichos valores pueden verificarse en la tabla 12 (apéndice B). Seoanez (1998), reporta para lixiviados de clase III con $pH > 7,5$ un carga orgánica $< 0,1\%$; sin embargo, en vista de que los lixiviados se encuentran continuamente mezclados con lixiviados frescos, pudiera permitir cambios en dicha carga orgánica.

En la tabla 2 se presentan los intervalos obtenidos en los lixiviados muestreados en la Bonanza. Nótese que atendiendo al Decreto 883 (Gaceta oficial N° E-5021) de la Normativa Ambiental de la República Bolivariana de Venezuela, el pH y las especies Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , tiene valores que superan los permitidos. Este Decreto en su Artículo 18 (tabla 14, apéndice B) señala que: “y a los efectos de este Decreto, se establecen los siguientes rangos y límites máximos de calidad de los efluentes líquidos que sean o vayan a ser descargados, en forma directa o indirecta, a ríos, estuarios, lagos y embalses; siempre y cuando el cuerpo de agua objeto de la descarga no haya sido clasificado ni posea una reglamentación específica sobre vertidos líquidos”.

Tabla 2. Características generales de los lixiviados.

Parámetro	Unidad	LDD	Mínimo	Máximo	Promedio	Resultados de estudios previos
pH	Unidades	-	5,79	9,75	8,2	4,5-9,0
Temperatura	°C	-	26,05	52,12	31,16	-
Alcalinidad	mgCaCO ₃ /L	-	193	2509	1351	1000-11107
Conductividad	μS/cm	-	549	201138	23845	250-3500
Materia orgánica	%	-	2	4	3	-
Silicio, SiO₂	mg/L	0,2	4,0	30,0	12,0	-
Cloruros, Cl⁻	mg/L	12	70	1448	651	150-4900
Nitritos, NO₂⁻	mg/L	4	4	2328	306	
Nitratos, NO₃⁻	mg/L	8	10	23993	2514	
Sodio, Na⁺	mg/L	0,5	53	50180	25266	35-28180
Potasio, K⁺	mg/L	2	7	39600	19803	200-23100
Magnesio, Mg²⁺	mg/L	3	10	85	31	14-140
Calcio, Ca²⁺	mg/L	2	15	534	219	21-440

Recopilaciones de los resultados de los análisis químicos, incluyendo los valores mínimo y máximo medido (mínimo y máximo), valores de la mediana y el promedio. El límite de detección del método analítico también se presenta, junto con los resultados publicados anteriormente de 4 estudios independientes (Linares, 1992; Padrón, 2005; Olivares et al, 2007; Oman y Junestedt, 2008).

5.1.1 El pH

De acuerdo con los resultados obtenidos para este parámetro, aproximadamente el 50% de los lixiviados tienen valores de pH que están por encima de 7, indicando su carácter básico; un 20% de las muestras poseen valores de pH neutros; otro 20% posee valores que son considerados ligeramente ácidos; mientras que el 10% restante es ácido. Sin embargo, el pH promedio obtenido de 8,2 es característico de lixiviados que se encuentran en la fase metanogénica; es decir de lixiviados maduros o de clase III. Estos se caracterizan por que el proceso es de tipo anaerobio con la producción de metano y con la simultanea generación de ácidos grasos tales como ácido propiónico, ácido valérico, entre otros, lo que explica que el pH se mantenga en un valor promedio

de 8,2; sin embargo la velocidad de producción de los ácidos es menor en comparación que con la concentración de metano (Oman y Junestedt, 2008).

Es de notarse que los ácidos grasos con bajo peso molecular predominan en lixiviados frescos, como puede comprobarse en la muestra MALBO-9 la cual tiene un pH de 7,21. El lugar donde se captó esta muestra fue cercano a las principales celdas de almacenamiento de los residuos sólidos, por lo que se trataba de lixiviados frescos del relleno sanitario. El ambiente de la fase anaerobia es caracterizado por un pH neutro y un lixiviado que es menos agresivo que el que se produce durante la fase aerobia, caracterizada por la formación de ácidos (Oman y Junestedt, 2008).

La distribución espacial para este parámetro se encuentra representada en la figura 13. Espacialmente se observa que los mayores valores de pH se localizan en las muestras MALBO-1 y MALBO-4 con 9,6 y 9,7 respectivamente.

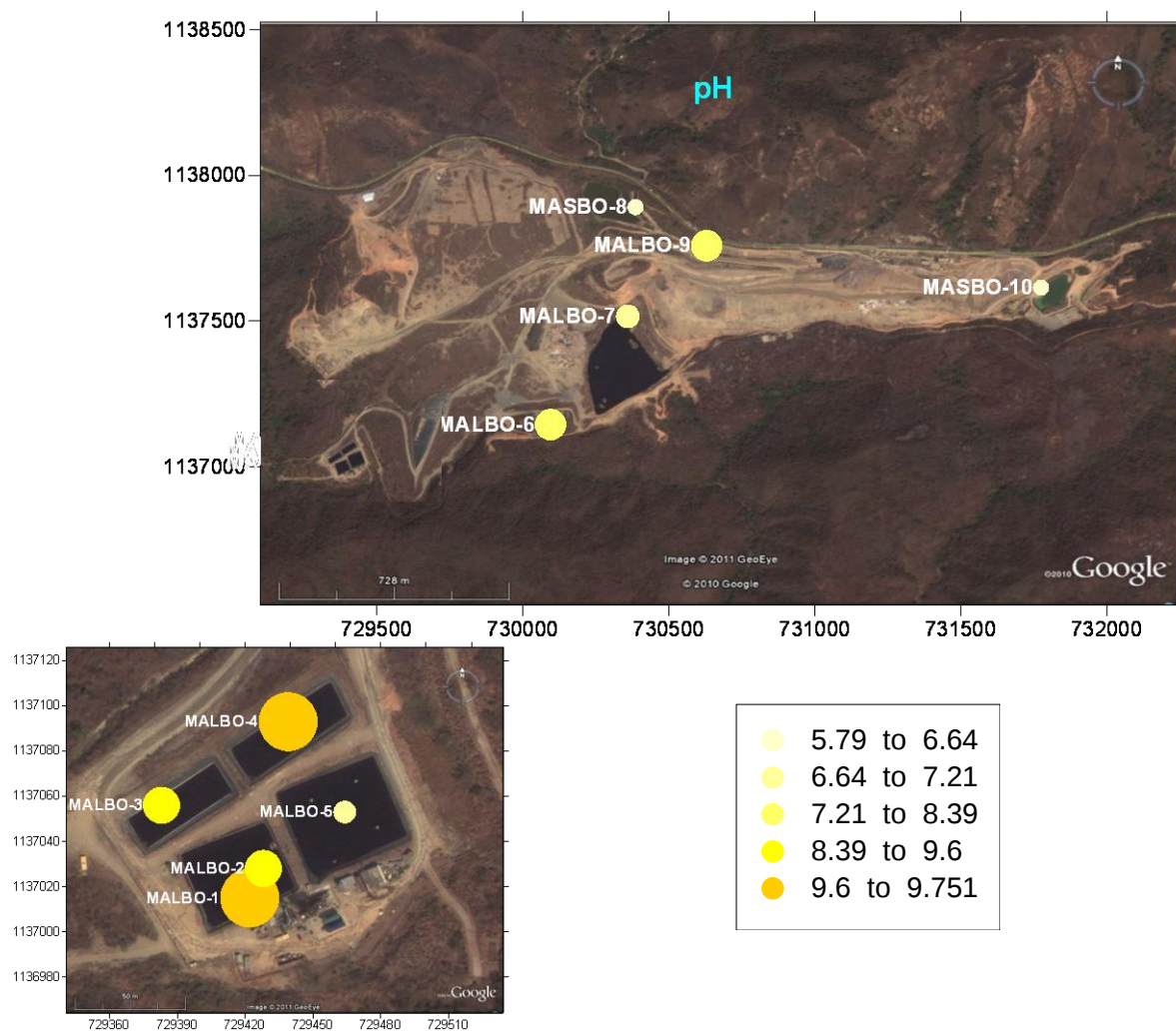


Figura 13. Distribución del pH en las muestras de lixiviados del relleno sanitario “La Bonanza”.

5.1.2 Conductividad

La conductividad es un parámetro que expresa las especies iónicas que son aportadas por la meteorización química, la meteorización atmosférica y las actividades antrópicas (Hernández, 2007). Asimismo, la conductividad depende de la concentración de las especies en solución, de su tamaño y de su carga. En la zona de estudio, los valores de conductividad oscilan entre 549 y 201138 $\mu\text{S}/\text{cm}$, obteniéndose un promedio de 23845 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tabla 2).

Asimismo, desde el punto de vista espacial, puede observarse en la figura 14 que la conductividad más alta está ubicada en la zona 1, que corresponde a la muestra tomada a la salida del evaporador. Dicha muestra se caracteriza por presentar la mayor concentración de iones como se muestra en la tabla 11; mientras que las más bajas están ubicadas en la zona donde se captaron las muestras 8 y 10. Estos resultados son los esperados ya que donde se captaron estas últimas, corresponden a las lagunas de aguas superficiales influenciadas por precipitaciones atmosféricas. Es bien sabido que las aguas de origen meteórico o de lluvia, poseen bajos valores de conductividad, debido a su baja concentración de iones en solución. Estas aguas al penetrar en el relleno sanitario y evolucionar a través del mismo, permiten el movimiento de solutos provenientes de la descomposición de los materiales sólidos conllevando al aumento en la concentración de los sólidos disueltos, reflejándose en los valores de las conductividades medidas en los lixiviados (Sánchez, 2007).

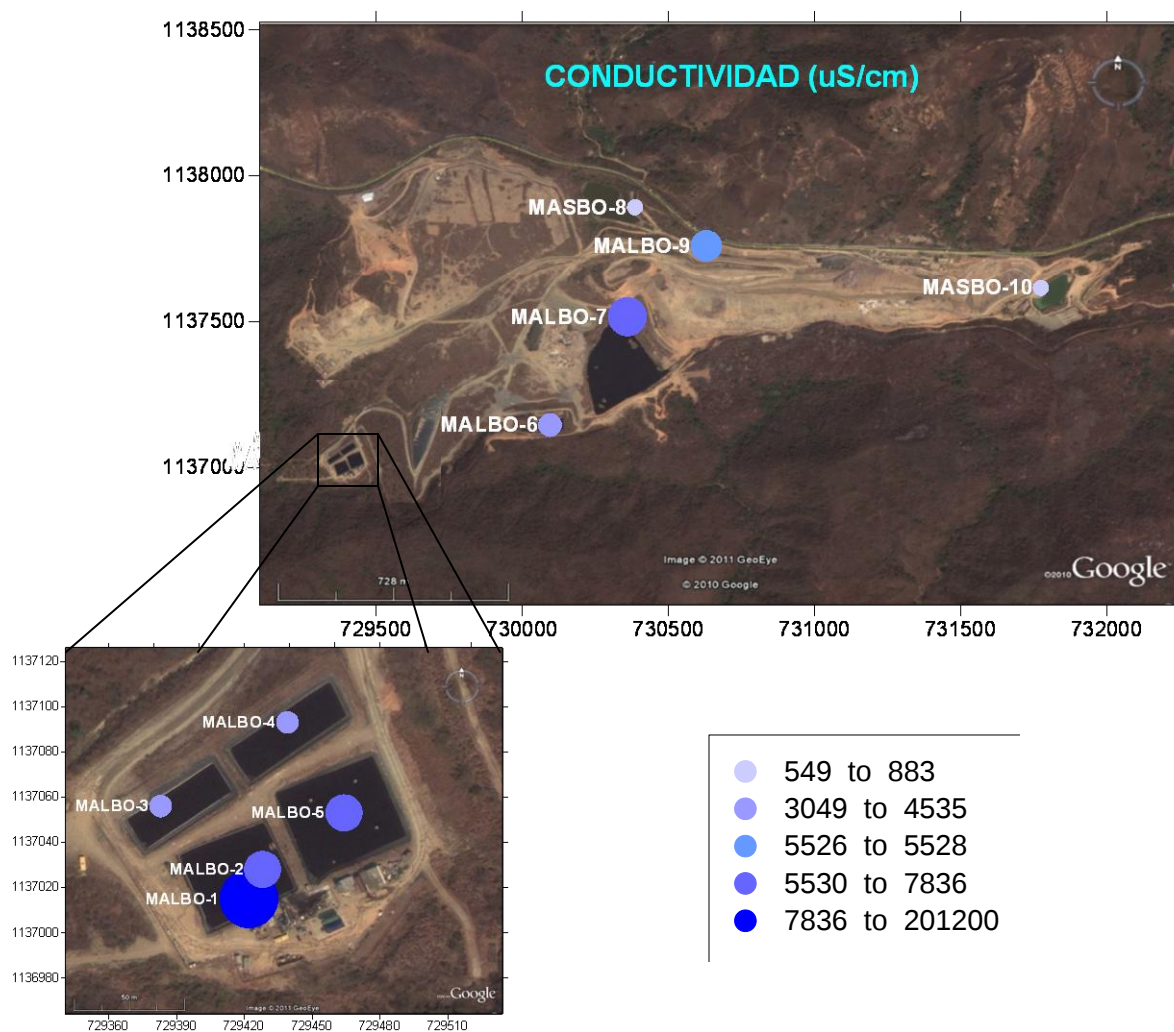


Figura 14. Distribución de la conductividad en las muestras de lixiviados del relleno sanitario La Bonanza.

5.1.3 Especies catiónicas mayoritarias Na^+ , K^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+}

Sodio y Potasio

El Na^+ presenta un valor promedio de 25266 mg/L y un intervalo de concentración de 53 y 50180 mg/L. El valor más bajo de concentración está referido a la muestra MASBO-8, que proviene de una laguna de aguas superficiales. Mientras que, la mayor concentración corresponde a la muestra referida a la muestra MALBO-1.

Debe hacerse notar que la muestra MALBO-1 fue tomada a la salida del evaporador ubicado en el relleno sanitario, lo que explica la mayor concentración de Na^+ , esto como consecuencia del proceso de la evaporación del agua, lo que conlleva a concentrar los solutos disueltos en los lixiviados. En cuanto a la muestra MASBO-8, esta fue captada en una laguna de agua superficial donde los iones presentes, son característicos de aguas de composición meteórica.

La distribución espacial de Na^+ se muestra en la figura 16, nótese que su comportamiento es similar al de la conductividad, indicando que esta especie influye significativamente sobre este parámetro en los lixiviados estudiados, esto puede observarse en la figura 15.

El ión Na^+ se caracteriza por tener una alta solubilidad y por ende es difícil de precipitar; comúnmente se encuentra en productos de fácil degradación en los rellenos sanitarios, como material putrescible, frecuentemente asociados a restos de la comida, que son fuente de compuestos como Na_2CO_3 , Na_2SO_4 , Na_2PO_4 , NaHCO_3 y NaOH , así como el NaCl que es empleado para preservar alimentos, como en los procesos de teñidos y para fabricar jabón y vidrio y en materiales de origen industrial. La OPS (2000) determinó que los residuos sólidos del Estado Miranda tienen una composición que corresponden a un 22,4% de papel y cartón y 15,9% de restos de alimentos. Estos

porcentajes son los más significativos en la composición total de la basura en el relleno sanitario de La Bonanza, lugar de depositación de desechos considerado el receptor principal de los residuos sólidos que se producen en la ciudad de Caracas y en el Estado Miranda.

Por otra parte, la concentración de K^+ en los lixiviados de la Bonanza presenta un valor promedio de 19803 mg/L, y un intervalo de concentración que oscila entre 7 y 39600 mg/L. La máxima concentración es referida a MALBO-1 y la mínima concentración a la muestra MASBO-10, correspondiente al agua de la laguna

La distribución espacial de K^+ en la zona de estudio, presenta un comportamiento muy similar al del Na^+ (figura 16) exceptuando la muestra MASBO-1; lo que permite inferir que los procesos que controlan la composición de estos iones en los lixiviados son los mismos, esto como consecuencia de las similares propiedades químicas de ambas especies. Se puede observar que los valores de concentración aumentan en las zonas donde los lixiviados tienen mas tiempo de haberse producido.

Para el caso de la muestra MASBO-10, cuya concentración de K^+ es mayor que la de Na^+ , podría deberse a la presencia de importantes niveles de nutrientes, debido al evidente proceso de eutrofización de la laguna donde se captó esta muestra.

En los residuos sólidos urbanos se encuentran numerosos materiales que contribuyen con la concentración de K^+ en los rellenos sanitarios. Entre dichos materiales se encuentran los fertilizantes de potasio, composicionalmente constituidos por KCl, K_2SO_4 y KNO_3 ; así como las pilas alcalinas que contienen el KOH como componente activo. Según la OPS (2002) el 7,5% de la composición de la basura en el Estado Miranda, se trata de desechos provenientes de jardín que involucran el uso de fertilizantes.

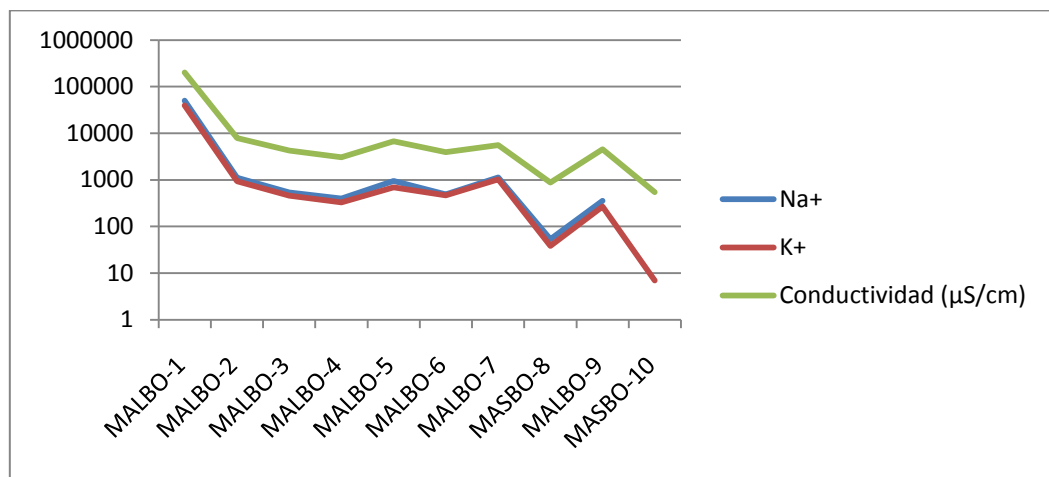


Figura 15.- Correlación de Na^+ y K^+ con la conductividad.

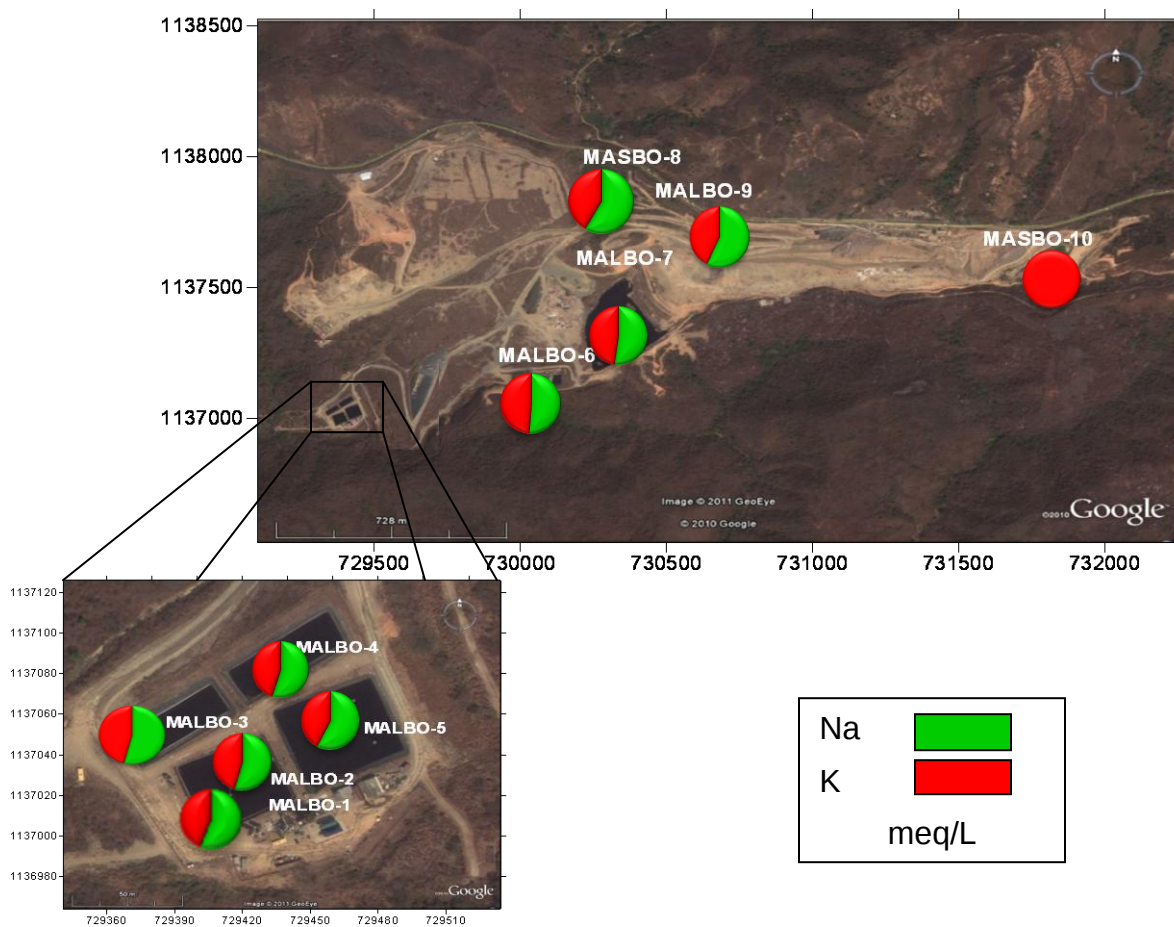


Figura 16.- Distribución espacial de sodio y potasio.

Calcio y magnesio

La concentración de Ca^{2+} en los lixiviados de la zona de estudio, presenta un valor promedio de 219 mg/L y un intervalo de concentración que está entre 15 y 534 mg/L.

En cuanto a la distribución espacial del Ca^{2+} mostrada en la figura 18, los valores de concentración más altos predominan en los lixiviados referidos a las muestras MALBO-9 y MALBO-5 cuyos valores de pH son neutros, por el contrario los valores más bajos de concentración están referidos a MALBO-1 y MALBO-4, donde el pH es alcalino.

El Mg^{2+} presenta un valor de concentración promedio de 31 mg/L y un intervalo de concentración de 10 y 85 mg/L. Nótese que existe predominancia de valores de concentraciones bajas en comparación con los demás cationes estudiados.

La figura 15 representa la distribución espacial del Mg^{2+} , obsérvese que espacialmente esta especie muestra una distribución homogénea a través de toda el área estudiada, encontrándose que las concentraciones más bajas corresponden a los lixiviados referidos a MALBO-1, MALBO-3 y MALBO-4. Esto debido a los valores altos de pH asociados a dichas muestras de lixiviados, dicha correlación de las concentraciones de las especies Ca^{2+} y Mg^{2+} puede observarse en la figura 17; en cuanto a las muestras de aguas superficiales también se encontraron bajas concentraciones, que son característicos de aguas de lluvia.

El contenido de Ca^{2+} y Mg fue mucho mayor en el lixiviado fresco captado en las muestras MALBO-5 y MALBO-9, como puede ser observado en la distribución espacial constituida por estos elementos (Figura 18). Esto permite señalar que el Ca^{2+} y Mg^{2+} presentan concentraciones más bajas en condiciones donde prevalece la fase metanogénica. Oman y Junestedt (2008) señala que las bajas concentraciones de Ca^{2+}

y Mg^{2+} , pueden estar relacionadas con el pH, debido a que altos valores de este parámetro se favorecen los procesos de sorción y precipitación, conllevando al acomplejamiento de estos cationes; de otra manera implica el acomplejamiento de los cationes, inhibiendo su movilidad en el lixiviado. La fuente principal de Ca^{2+} y Mg^{2+} en los rellenos sanitarios podría estar asociada con la presencia de bicarbonatos y oxihidróxidos de calcio presentes en distintos residuos orgánicos. El CaO e CaOH se encuentran como materia prima en la preparación de cementos y el $CaCO_3$ en materiales de vidrio (INE, 1999).

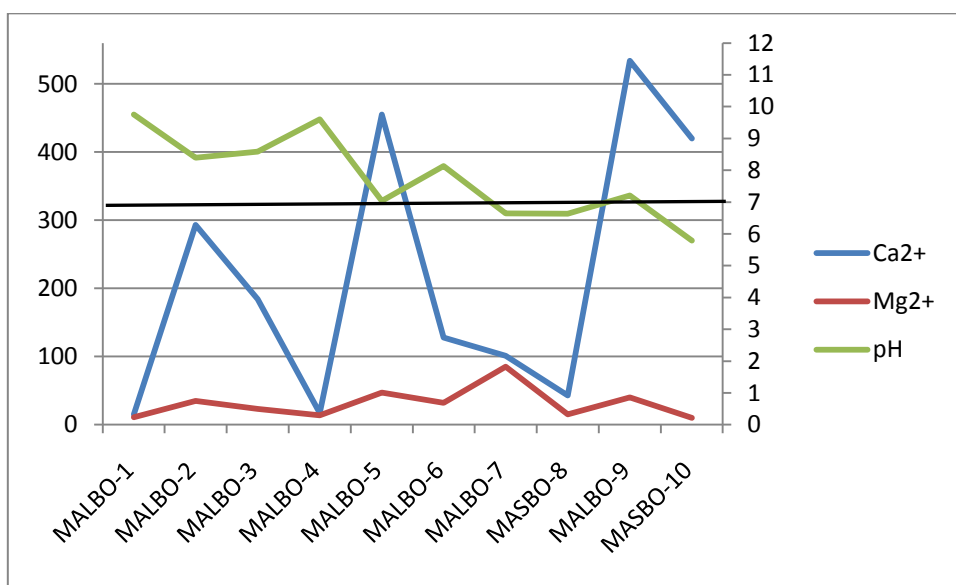


Figura 17.-Correlación de las concentraciones de Ca^{2+} y Mg^{2+} con el pH.

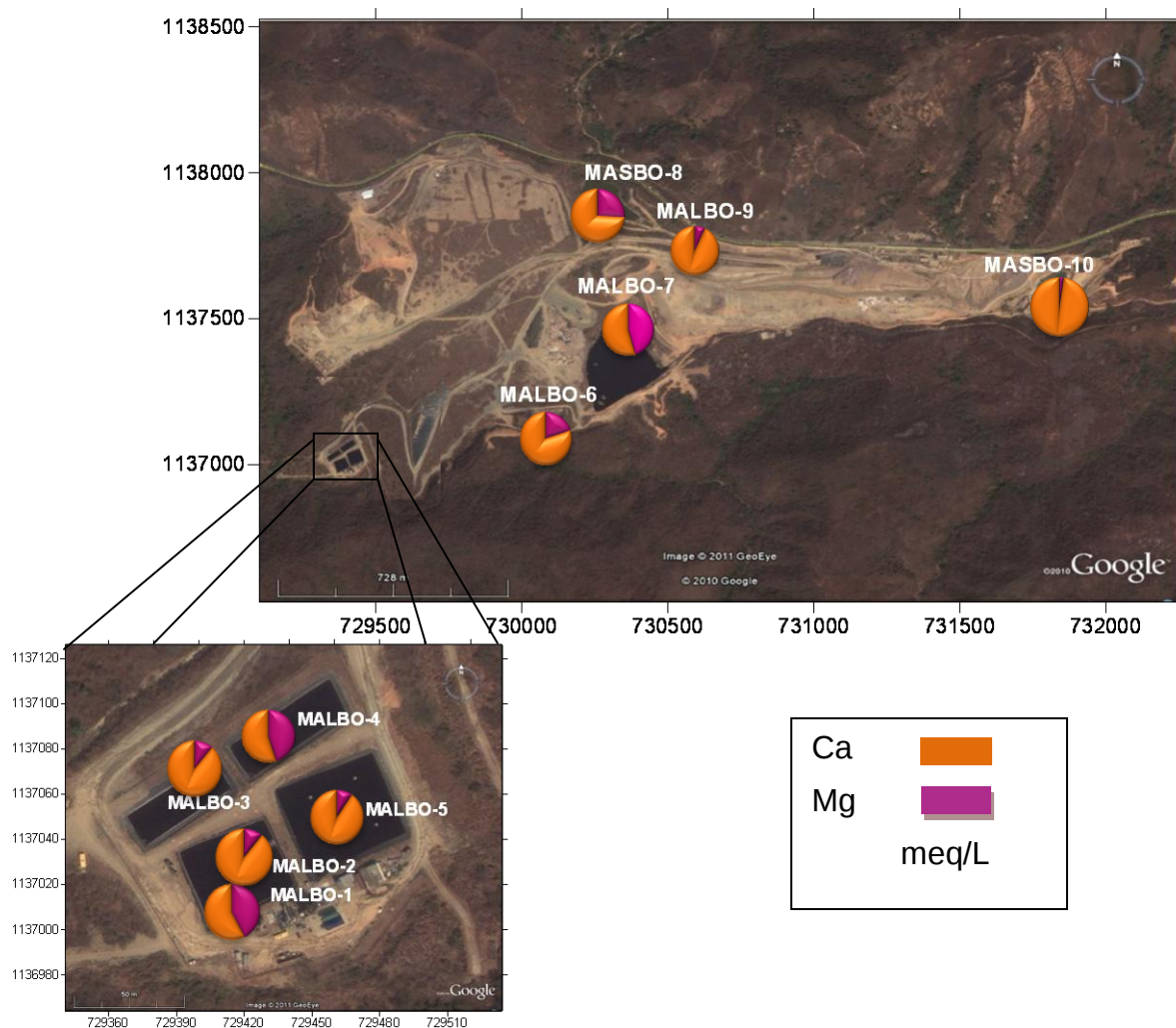


Figura 18. Distribución espacial de calcio y magnesio.

5.1.4 Especies aniónicas mayoritarias: Cl^- , NO_3^- , NO_2^-

Cloruro

La concentración de Cl^- presente en los lixiviados estudiados, tiene un valor promedio de 651 mg/L y un intervalo comprendido entre 70 y 1448 mg/L.

En la figura 16 es mostrada la distribución espacial del Cl^- , observándose que predominan altos valores de concentración, para esta especie, en todas las muestras, exceptuando la correspondiente a MALBO-1. Nótese que esta distribución es similar tanto a la mostrada por el Na^+ y por la conductividad, reflejando una asociación significativa en estas variables, dicha correlación es mostrada en la figura 19.

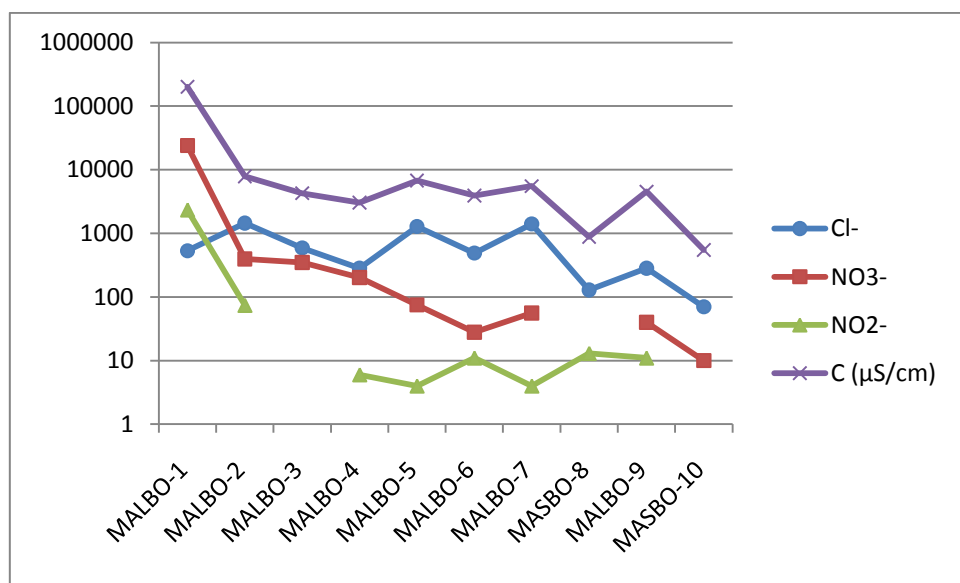


Figura 19.- Correlación de las concentraciones de Cl^- , NO_3^- y NO_2^- con la conductividad.

La presencia de Cl^- en los residuos sólidos puede ser atribuida a numerosos productos; entre los que se encuentran compuestos como CH_3Cl y CH_2CHCl , incluyendo a los disolventes clorados ampliamente utilizados en la industria como desengrasantes en

industrias electrónicas y como productos de limpieza. Sin embargo, estos disolventes clorados se degradan en ausencia de oxígeno y tiene el potencial de presentar atenuación natural (UM, 2005).

Ehring (1983) encuentra que no existe disminución en la concentración de cloruros en lixiviados, manteniéndose constantes al menos por dos años. Igualmente indica que el nivel de toxicidad puede cambiar por factores externos, tales como dilución.

Por otra parte, atendiendo a la normativa vigente contenida en el Decreto N° 883 N° E-5021, Año 1995 se debe tener en consideración que la muestra MALBO-1, MALBO-2, MALBO-3, MALBO-5 y MALBO-7 presentan concentraciones de Cl^- por encima del límite máximo establecido permisible (500 mg/L), por lo que debe tenerse precaución con algún vertido directo o indirecto de estos lixiviados a cuerpos de aguas, tanto superficiales como aquellas que puedan tener incidencia sobre las aguas subterráneas.

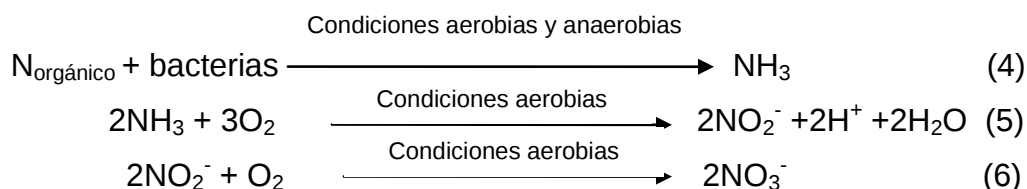
Nitrato y nitrito

Los lixiviados de la zona de estudio presentan un valor promedio en NO_3^- de 2514 mg/L y un intervalo de concentración de 56 y 23993 mg/L. El NO_3^- normalmente es encontrado en los residuos sólidos en productos asociados a fertilizantes.

En general, la distribución espacial del NO_3^- , representada en la figura 20, muestra pocas variaciones a través de toda la zona estudiada, exceptuando a la muestra MALBO-1, donde fue detectado el valor más alto de concentración de 23993 mg/L. Nótese que esta muestra fue tomada a la salida del evaporador, en consecuencia podría atribuirse dicho valor, como producto del proceso de la evaporación al cual fue sometido el lixiviado, conllevando a la pre-concentración de esta especie. Los valores bajos de NO_3^- en el resto de las muestras puede deberse a los efectos de dilución,

como consecuencia de las precipitaciones atmosféricas acaecidas en la zona, donde se encuentra asentado el relleno sanitario La Bonanza.

El NO_3^- es la forma más oxidada del nitrógeno encontrada en lixiviados; las bacterias pueden oxidar el amoníaco a nitritos y los nitritos a nitratos en condiciones aerobias, esto podría explicar las bajas concentraciones de NO_2^- encontradas en todas las muestras estudiadas, a continuación son mostradas las reacciones por medio de la cual se lleva a cabo dicha oxidación (Báez, 2009).



No obstante, puede observarse en la tabla 14 (apéndice B) que según el Decreto N° 883 Gaceta Oficial N° E-5021, Año 1995 debe considerarse que todas las muestras presentan concentraciones de NO_3^- por encima del límite máximo establecido (10 mg/L). Esto permite señalar que debe tenerse precaución en el manejo y tratamiento de los lixiviados y su posible vertido directo o indirecto hacia cuerpos de aguas subterráneas y/o superficiales.

En el caso de NO_2^- , solo fueron detectados concentraciones altas en las muestras MALBO-1 y MALBO-2; mientras que en las muestras MALBO-6, MASBO-8 y MALBO-9, los valores fueron de 11,13 y 11 mg/L, respectivamente.

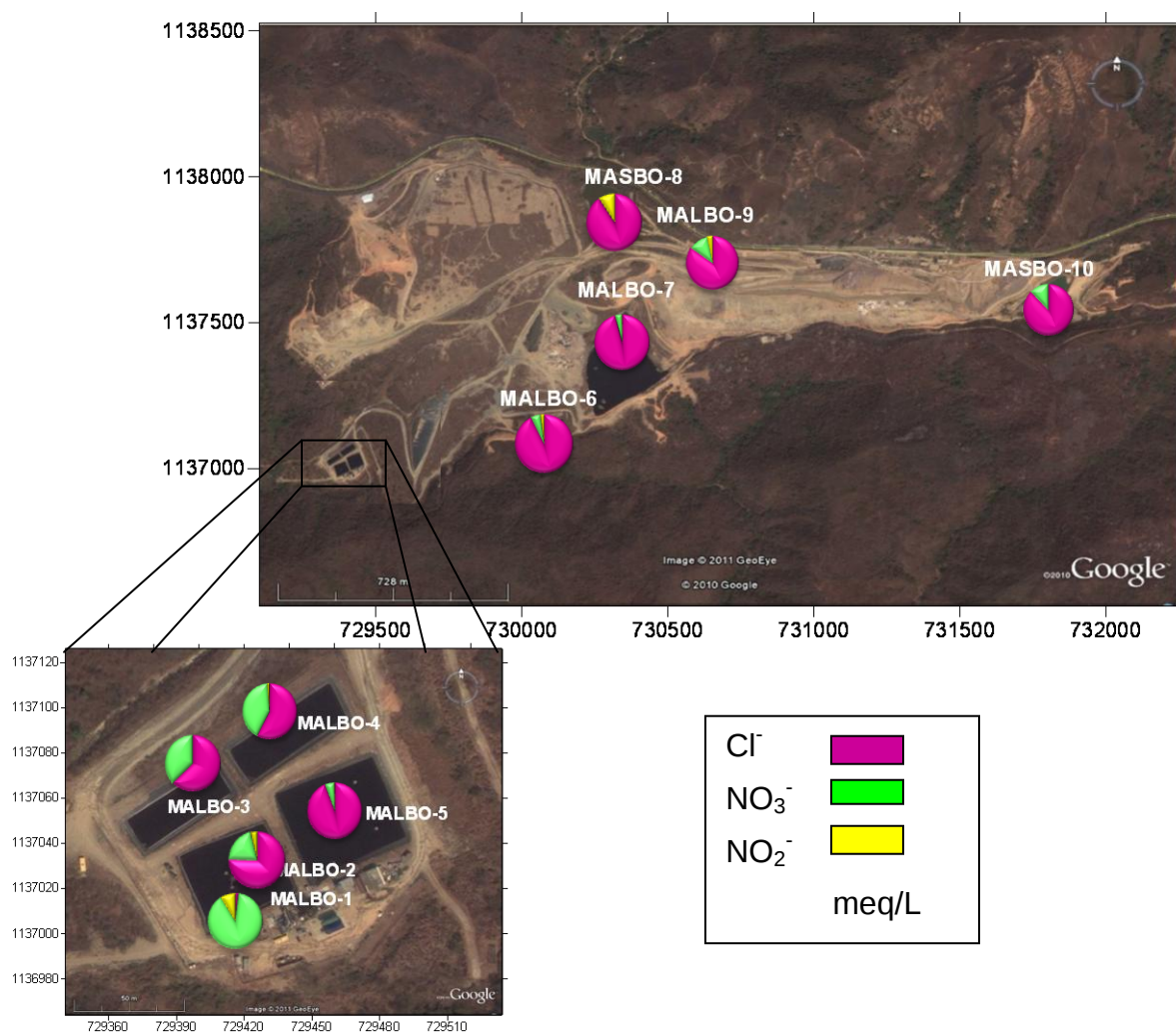


Figura 20-. Distribución espacial de cloruro, nitrato y nitrito.

5.1.5 Sílice disuelta (SiO_2)

El SiO_2 es una especie química que puede derivarse a partir de la lixiviación o hidrólisis de los materiales de vidrio, que de acuerdo a la OPS (2000) involucra el 10% de la composición de los residuos sólidos de los rellenos sanitarios del Estado Miranda. El pH es un factor determinante en la solubilización de esta especie ya que cuando dicho parámetro es ácido favorece la precipitación de sílice; mientras que si este es alcalino, tiende a estar solubilizada (Custodio y Llamas ,1976).

La concentración de SiO_2 en los lixiviados estudiados, presenta un valor promedio de 12 mg/L y un intervalo de concentración que oscila entre 4 y 30 mg/L. Los valores de concentración para esta especie se muestran en la tabla 12 (apéndice B). Obsérvese que la mayor concentración de SiO_2 es referido a MALBO-1 y el valor más bajo es encontrado en las muestras MALBO-4, MALBO-5 y MASBO-10. Dicha distribución podría deberse a la influencia del pH en la concentración del SiO_2 , ya que los valores más altos de concentración están referido a los lixiviados con pH alcalinos.

5.2 Elementos traza As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Se, Ti, V, Zn, Co, Sr y Sb.

Los resultados de las concentraciones de los elementos traza, determinados en los lixiviados se presentan en la tabla 3. En dicha tabla también son mostrados los valores mínimos, máximos y el promedio; así como el intervalo de valores reportados en estudios previos en rellenos sanitarios ubicados en otras latitudes.

Los metales pesados constituyen uno de los grupos de contaminantes que se vigilan en los lixiviados de los rellenos sanitarios. Stumm and Morgan (1970) señala que los metales pesados se encuentren fuertemente retenidos, puesto que la concentración de dichos elementos es una función de la formación de complejos con compuestos orgánicos y a la precipitación de los mismos, así como del pH y de la

presencia de especies carbonatadas. En ese sentido, a pH bajos se incrementa la concentración de metales y decrece con el incremento de las concentraciones de especies carbonatadas. La forma fisicoquímica de los elementos es un factor crítico que influye en su movilidad, biodisponibilidad y toxicidad. Oman y Junestedt (2008), reporta que típicamente menos del 10% de los metales en los lixiviados de rellenos sanitarios, se presentan como iones en su forma libre del metal.

Tabla 3. Concentraciones de los elementos trazas en los lixiviados.

Elemento (mg/L)	LDD	Mínimo	Máximo	Promedio	Oman, y Junestedt (2008)	Padrón (2005)	Olivero et al. (2007)
As	0,005	<LDD	<LDD	<LDD	<LDD-34	NE	NE
Cd	0,01	<LDD	<LDD	<LDD	<LDD	0,03-0,05	0,04-0,02
Cr	0,04	0,07	1,00	0,30	0,001-0,05	0,4-2,8	NE
Cu	0,006	0,008	0,500	0,010	0,06-0,08	0,09-0,3	0,03-0,05
Fe	0,2	0,2	6,0	2,0	0,2-43	NE	NE
Mn	0,01	0,02	5,00	1,00	0,2-5,2	0,3-2,6	0,03-0,2
Mo	0,06	0,07	0,60	0,30	0,2-0,2	NE	NE
Ni	0,06	0,06	1,00	0,50	0,09-0,9	0,5-1,2	0,1-0,4
Pb	0,04	<LDD	<LDD	<LDD	<LDD- 0,02	0,3-0,5	<0,10-0,2
Se	0,1	<LDD	<LDD	<LDD	<LDD- 0,1	NE	NE
V	0,04	0,04	1,00	0,20	0,08-0,2	NE	NE
Zn	0,05	0,10	0,20	0,10	NE	0,5-2,2	NE
Ti	0,03	0,06	0,80	0,20	0,016-0,018	NE	NE
Co	0,009	0,009	0,400	0,070	0,001-0,02	NE	NE
Sr	0,004	0,05	0,400	0,200	0,008- 1,430	NE	NE
Sb	0,02	0,02	0,09	0,03	0,002-0,006	NE	NE

Nótese que los resultados de las concentraciones obtenidas para los metales Cd, Cr, Ni, Pb y Zn en general son inferiores a las encontradas por Padrón (2005), esto podría deberse a la atenuación natural de estos elementos durante el transcurso de los años. Por su parte el Mn presenta una concentración mayor que la reportada por Padrón (2005), esto debido a que el lixiviado estudiado por dicho investigador se encontraba con un valor de pH entre 8 y 9 unidades, favoreciendo la precipitación de dicho elemento.

5.2.1 Hierro, manganeso, cromo, níquel, cobre, zinc, y cadmio

En la tabla 13 (apéndice B), puede observarse que el Fe presenta concentraciones relativamente altas en comparación con el resto de elementos determinados en todas las muestras de lixiviados. La concentración promedio de Fe fue de 2,0 mg/L, mientras que el valor mínimo 0,2 corresponde a la muestra MALBO-4, y el mayor valor de concentración se detectó en la muestra MALBO-5 con un valor de 6 mg/L.

La variabilidad en la concentración del Fe en los lixiviados (Figura 21), debe ser probablemente consecuencia de las variaciones en las condiciones redox, a medida que evolucionan a través del relleno sanitario. En los lixiviados estabilizados o de clase III, donde se tomó la muestra MALBO-1, se detectó una significativa proporción de Fe. Esto puede ser debido a la presencia de Fe (III), formado a pH neutros y alcalinos, en la forma geotita (FeOOH) o hematita (Fe_2O_3) con un tamaño de grano coloidal (VanLoon y Duffy, 2000).

Por otra parte, el Mn fue el siguiente elemento donde se evidenciaron las mayores concentraciones en comparación con el resto de los elementos. Se obtuvo un valor máximo de concentración de 5 mg/L en la muestra MASBO-8; mientras que la mínima concentración de 0,02 mg/L se detectó en la muestra MALBO-4.

Debe notarse que la concentración de Mn de manera similar al Fe, está influenciada por el pH, observándose que la concentración aumenta a medida que disminuye el pH (figura 21), esto debido a la solubilización del Mn durante la producción de ácidos orgánicos en la fase ácidogénica (Oman y Junestedt, 2008).

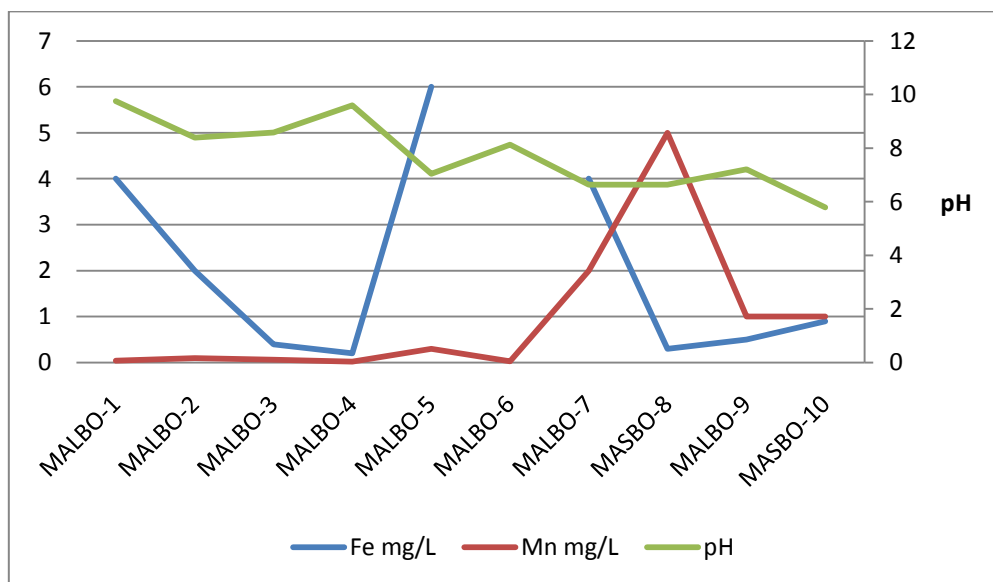


Figura 21.- Correlación de las concentraciones de Fe y Mn con el pH.

En cuanto al Cr, presenta un intervalo de concentración que oscila 0,07 y 1 mg/L con un valor promedio de 0,3 mg/L. Especialmente, los más altos valores de concentración son observados en los lixiviados estabilizados referidos a las muestras MALBO-1 y MALBO-7; mientras que, bajos valores de concentración se encuentran en las muestras MALBO-3, MALBO-6 y MALBO-9. El Cr puede ser incorporado al relleno sanitario por los residuos sólidos compuestos de restos de cemento, aleaciones del metal, pigmentos para las pinturas, el papel y el caucho, entre otros materiales (Castells, 2000).

Los valores de concentración de Ni arrojan un valor promedio de 0,5 mg/L y un intervalo de concentración que oscila entre 0,06 y 1 mg/L. El valor máximo de concentración de 1 mg/L corresponde a la muestra MALBO-1, seguida por la muestra por MALBO-7 con 0,2 mg/L. Por otro lado, el Cu presenta un valor promedio de concentración de 0,01 mg/L y un intervalo de concentración de 0,008 y 0,5 mg/L, atribuyendo a la máxima concentración a MALBO-1.

Los resultados obtenidos para los metales pesados Cr, Ni y Cu determinados en los lixiviados presentan la misma tendencia en los lixiviados captados (Figura 22), en las celdas. Debido a que los lixiviados de MALBO-1 provienen del evaporador, se espera la mayor concentración para los metales pesados. Por su parte, los lixiviados correspondientes a la muestra MALBO-7, la cual se trata de una laguna donde son vertidos los lixiviados más antiguos del relleno sanitario, está dominado por la presencia de los elementos Fe, Mn. Esto es debido a que dichos metales pesados se han ido acumulando durante un tiempo mayor que las celdas de recolección que están en funcionamiento desde la tecnificación del relleno sanitario.

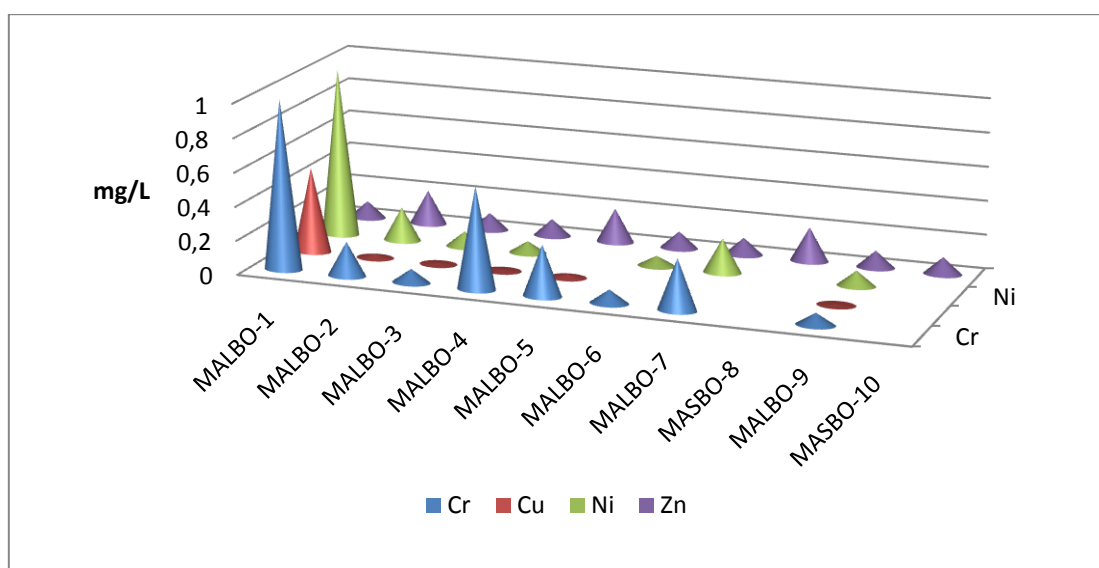


Figura 22.- Concentraciones de Cr, Cu, Ni y Zn en las muestras.

La distribución espacial de los elementos Fe, Mn, Cu, Cr, Ni y Zn es relativamente heterogénea en todos los lixiviados, salvo en los casos de Fe y Mn, donde la variación de pH influyó en la concentración. Dicha distribución puede ser consecuencia de las variadas condiciones fisicoquímicas existentes en los lixiviados.

5.2.2 Antimonio, estroncio, molibdeno, plomo, selenio y arsénico

El Sb presenta una concentración promedio 0,03 mg/L y un intervalo de concentración que oscila entre 0,02 y 0,09 mg/L. Nótese que el Sb no fue detectado en las muestras MALBO-3, MASBO-8 y MASBO-10 (figura 23). En las restantes muestras, el Sb presenta los mayores valores en las referidas a MALBO-4, MALBO-6 y MALBO-1.

El Sb puede ser encontrado en los residuos sólidos que contienen materiales compuestos de aleación con otros metales, empleándose en la fabricación de baterías, industria textil, industria de la cerámica y en aparatos electrónicos; además el SbO_3 es el más importante de los compuestos comerciales de Sb y se usa principalmente como retardante de llama. Estas aplicaciones como retardantes de llama comprenden distintos mercados como ropa, juguetes, o cubiertas de asientos (Lauwerys, 1994). Nótese además, que general, existe una asociación especial entre el Sb y el Sr en los lixiviados del relleno, exceptuando a las muestras MALBO-3, MASBO-8 y MASBO-10, donde el Sb no fue detectado.

Por otra parte, el Sr presenta una concentración promedio de 0,2 mg/L y un intervalo que oscila entre 0,05 y 0,4 mg/L. Dicho elemento se emplea en baterías y acumuladores, así como en material de recubrimiento de cables, materiales que comúnmente están presentes en los residuos sólidos, debido a que son productos de uso masivo por la población. Las concentraciones encontradas para este elemento

están representadas en la figura 23, donde la mayor concentración reportada para este elemento fue de 0,4 mg/L, correspondiente a la muestra MALBO-7, captada en la laguna antigua donde fueron vertidos los lixiviados más viejos del relleno sanitario. Nótese que también existen valores de concentración considerables en las muestras de laguna MASBO-8 y MASBO-10, esto puede estar asociado al proceso de contaminación por dicho elemento.

El Mo se detectó en pocas muestras de la zona de estudio, como se puede observar en la figura 23. La concentración promedio para este elemento es de 0,3 mg/L, cuyo intervalo de concentración oscila entre 0,07 y 0,6 mg/L. El valor más alto de concentración de Mo es referido a MALBO-1.

La fuente de Mo en los residuos sólidos se le puede atribuir a su empleo en la elaboración en la preparación de aleaciones refractarias y del acero; además ser utilizado en distintos pigmentos para pinturas y plásticos, entre otros. El MoS_2 se encuentra en productos lubricantes (Rochow, 1981).

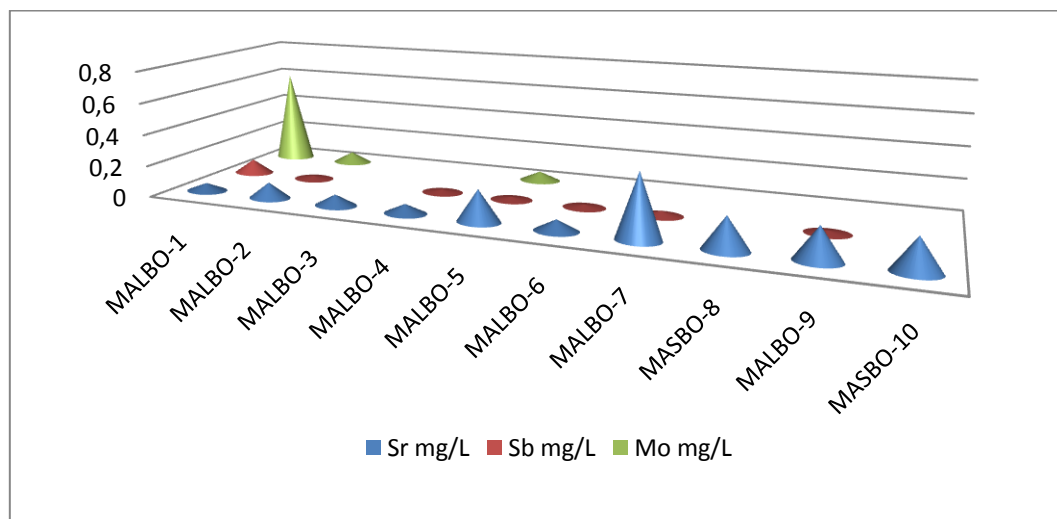


Figura 23.- Concentraciones de Sr, Sb y Mo en las muestras.

5.2.3 Titanio, cobalto y vanadio

El aporte de Ti en los lixiviados puede estar vinculado a los residuos sólidos por ser ampliamente utilizado en la producción de pinturas y plásticos en su forma de TiO_2 . Dicho elemento presenta un valor promedio de 0,2 mg/L en los lixiviados estudiados y un intervalo de concentración entre 0,06 y 0,8 mg/L.

Las concentraciones de Ti están representadas en la figura 24, donde puede notarse que las mayores concentraciones se ubican en MALBO-1 y MALBO-7. Recuérdese que en estas muestras se obtuvieron los mayores valores de las concentraciones de todos los elementos estudiados.

Asimismo, el V es un elemento ampliamente utilizado en pilas y en aleaciones con Fe para ser utilizado en revestimiento de titanio y acero. Nótese que las concentraciones de V y Ti son semejantes en muchas muestras, como se puede observarse en la figura 24.

El V presenta una concentración promedio de 0,2 mg/L, el mismo valor promedio del Ti, además de un intervalo de concentración de 0,04 y 1 mg/L. Los valores de concentraciones más altas están referidos a las muestras MALBO-1 y MALBO-7, donde se infiere que se debe a la acumulación de dicho elemento por años durante la generación de lixiviados en el relleno sanitario.

No obstante, los valores de concentración para el Ti en las muestras de agua superficial representadas por MASBO-8 y MASBO-10, se encontraron por debajo del límite de detección, evidenciando que aún no existen valores apreciables de contaminación para este elemento en dichas aguas.

Por su parte, el Co se tiene una concentración promedio de 0,07 mg/L y un intervalo de concentración que oscila entre 0,009 y 0,4 mg/L. En la figura 24 se muestra las concentraciones de este elemento en las diferentes muestras, mostrando que el valor más alto de concentración se detectó en la muestra MALBO-1, de 0,4 mg/L; puede notarse, que presenta una distribución aproximadamente homogénea en el resto de las muestras, no superando los valores de 0,05 mg/L.

La fuente de Co en los residuos sólidos urbanos, es atribuida su presencia a compuestos como LiCoO_2 encontrado en baterías recargables; asimismo puede estar como CoSO_4 el cual es usado en la industria de alimentos para animales y acabado de metales (Rochow, 1981).

Nótese que dentro de los elementos estudiados, los más peligrosos y los que la EPA considera de mayor prioridad no se detectaron, indicando que el relleno sanitario produce lixiviados con una carga mínima de elementos pesados.

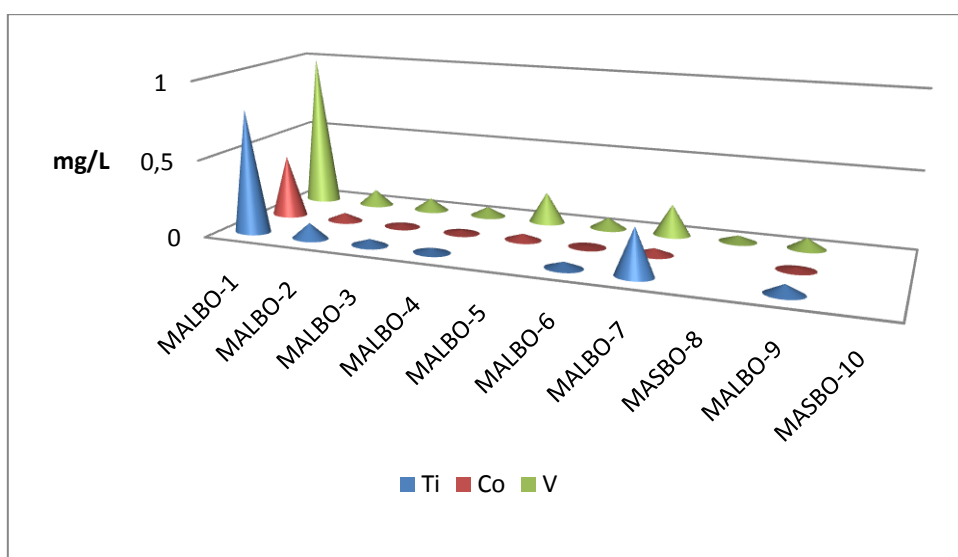


Figura 24.- Concentraciones Ti Co y V en las muestras.

5.3 Compuestos orgánicos

En esta sección son descritos los compuestos orgánicos volátiles identificados en los lixiviados del relleno sanitario “La Bonanza”. Para ello, se llevó a cabo la determinación de la presencia de BTEX en los lixiviados, mediante la técnica de cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC); seguidamente, se procedió a la identificación del resto de los compuestos orgánicos volátiles (COVs) contenidos en los lixiviados, por la técnica de cromatografía de gases (GC).

5.3.1 BTEX

Dentro de los COVs más comunes presentes en los rellenos sanitarios, se encuentran los conocidos BTEX, constituidos por benceno, tolueno, etílbenceno y xileno. Estos compuestos son formados a partir de la degradación biológica en condiciones aeróbicas. El origen de dichos compuestos se debe a su amplia utilización en la industria como solventes y agentes desengrasantes, en los procesos de refrigeración, como agentes espumantes y propelentes que son recibidos en los rellenos como desechos industriales (Scheutz et al., 2004).

Las condiciones experimentales para llevar a cabo la determinación de los BTEX en los lixiviados se muestra en la tabla 9, apéndice A. En la figura 25 puede apreciarse el cromatograma de los patrones empleados para la identificación dichos compuestos en las muestras de lixiviados y en las aguas superficiales; nótese el orden de elución para el benceno, tolueno, etílbenceno y los isómeros del xileno. Los cromatogramas individuales para cada muestra son presentados en el apéndice C.

Una vez realizado el proceso de identificación, se aplicó el método de normalización de área para los BTEX; dicho método se emplea para establecer el porcentaje de cada

especie en las diferentes muestras (Skoog et al., 2001). Los resultados del porcentaje de cada especie por muestra se muestran en la tabla 4 y los cromatogramas correspondientes para muestra se presentan en el apéndice C.

Obsérvese en la figura 26 que en general la mayor proporción de los compuestos de las diferentes muestras es referida al tolueno, seguido de la mezcla de los isómeros m,p-xilenos y luego o-xileno. No obstante, el benceno solo se detecto en las muestras MALBO-9 y MASBO-10, mientras que el etílbenceno no es detectado en ninguna de las muestras estudiadas.

El tolueno es ampliamente usado como solvente para lacas, barnices, pinturas y adhesivos y como aditivo en productos anticongelantes; adicionalmente, este compuesto puede ser degradado por microorganismos en condiciones aerobias (EPA, 1994).

El benceno es uno de los productos orgánicos de mayor consumo, se utiliza como materia prima para obtener poliestireno, compuesto principal de los envases de plásticos muy comunes en los residuos sólidos urbanos (Primo, 1996).

Para el tolueno se tiene que los porcentajes más altos están referidos a las muestras MALBO-1, MALBO-2 y MALBO-5 con 64, 62 y 60% respectivamente. El valor más bajo corresponde a la muestra MALBO-9 con un porcentaje del 20%; este valor es debido a que esta muestra corresponde a un lixiviado fresco donde existen condiciones aerobias, que podrían estar favoreciendo el proceso de biodegradación por parte de los microorganismos.

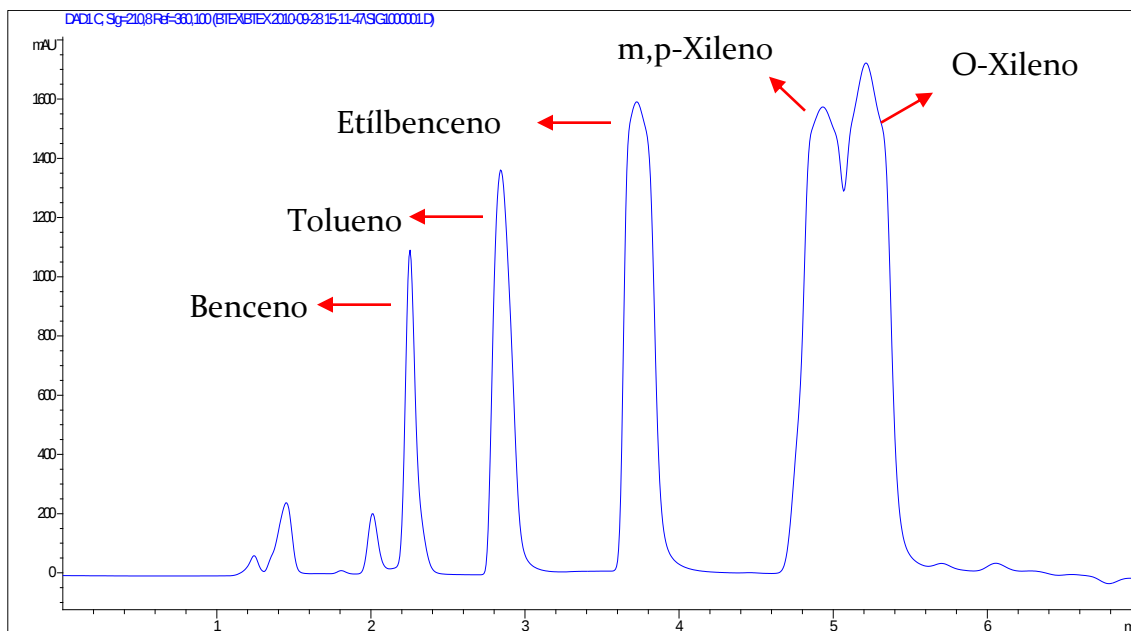


Figura 25.- Cromatograma de los patrones de BTEX.

Tabla 4. Resultados del método de normalización aplicado a los BTEX.

MUESTRA	% Normalización				
	Benceno	Tolueno	Etílbenceno	O-Xileno	m,p-Xileno
MALBO-1	ND	64	ND	10	26
MALBO-2	ND	62	ND	10	28
MALBO-3	ND	54	ND	12	34
MALBO-4	ND	34	ND	31	35
MALBO-5	ND	60	ND	14	26
MALBO-6	ND	50	ND	21	29
MALBO-7	ND	55	ND	15	30
MASBO-8	ND	ND	ND	ND	ND
MALBO-9	3	20	ND	26	51
MASBO-10	11	28	ND	22	39

ND: No detectado

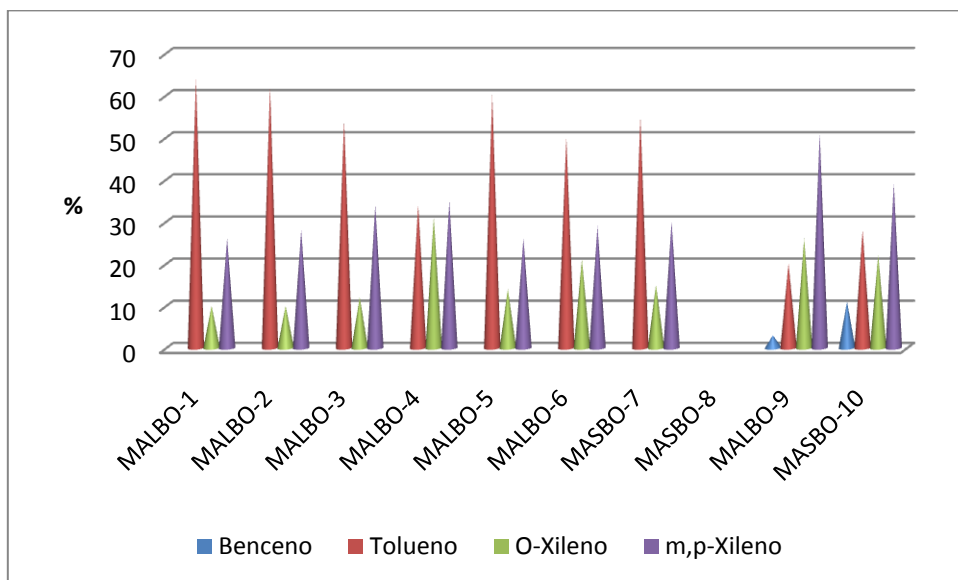


Figura 26.- Concentraciones de las mezcla BTX en las muestras.

En cuanto a los tres isómeros del xileno, la mezcla m,p-xileno eluyen juntos por tener propiedades fisicoquímicas similares como su punto de ebullición y momentos dipolares; sin embargo, debido a las diferencias de volatilidad entre el o-xileno y los otros isómeros como reflejo de sus momentos dipolares, el o-xileno eluye después de la mezcla m,p-xileno; el mayor momento dipolar del o-xileno causa en la fase líquida un alineamiento algo preferente en las moléculas, reduciendo la volatilidad, en comparación con los otros isómeros (Judson, 2003).

El p-xileno es el isómero empleado para obtener ácido tereftálico, materia prima para las fibras de poliéster y cintas magnéticas. Por otra parte, el o-xileno se utiliza para obtener anhídrido ftálico para la fabricación de plastificantes y resinas para pinturas y barnices. Por su parte, el m-xileno tiene menos aplicaciones, aunque el ácido isoftálico se usa para obtener algunos tipos de resinas de poliéster. Gran parte del excedente del m-xileno y sus mezclas brutas se reincorporan a las gasolinas para aumentar el índice de octano o se usan como disolventes (Primo, 1996).

Los porcentajes más altos para los isómeros m,p-xileno es referida a las muestras MALBO-9, posiblemente por ser la zona más expuesta al contacto de combustibles de vehículos automotores. Esto en vista de tratarse de una muestra que fue tomada fuera de las celdas de recolección y cercana a la vía de tránsito. Asimismo, en la muestra MASBO-10 fueron detectados porcentajes de los isómeros o,m,p-xilenos en la muestra de agua superficial, indicando contaminación en la misma. Puede señalarse que la presencia de los BTEX en las muestras de aguas superficiales puede deberse a derrames de gasolina de los vehículos que circulan en el relleno.

Los BTEX son compuestos utilizados como marcadores para la exposición humana a COVs, por lo que estos hidrocarburos aromáticos se absorben fácilmente en el organismo humano por diversas vías: mediante inhalación, ingestión y en poca cantidad por vía cutánea. Asimismo, es importante señalar que los mismos se metabolizan mediante la biooxidación del anillo. En ese sentido, es de gran importancia disminuir la exposición de los trabajadores del relleno ante dichos compuestos aromáticos (Ikeda, 1990).

Por otro lado, se espera que la concentración de BTEX en los lixiviados disminuya con el tiempo, dependiendo de la degradación y la volatilización de los mismos en el relleno (Kulikowska y Klimiuk, 2008).

5.3.2 COV's

Los gases emitidos a la atmósfera desde un relleno sanitario se dividen en gases principales y en compuestos orgánicos volátiles (COVs). Los gases principales son producidos en mayor cantidad y proceden de la descomposición orgánica de los residuos sólidos y de las reacciones químicas que se generan durante la descomposición de los mismos, entre ellos el metano y el dióxido de carbono. Por su

parte, los COVs pueden estar constituidos por una variedad de compuestos orgánicos, que dependen, sin embargo de las características de los residuos sólidos que ingresan al relleno (Méndez et al., 2006).

Los Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs) son aquellos líquidos o sólidos orgánicos con presión de vapor a temperatura ambiente superior a la de la atmósfera (0,01 psi), que se evaporan a razones significativas. Probablemente constituyen la segunda clase más extendida y diversa de emisiones después de las partículas (Méndez et al., 2006).

En este sentido, fueron identificados 32 compuestos orgánicos volátiles que son indicados en la tabla 5, agregado además información como su fórmula molecular, peso molecular y punto de ebullición. Los cromatogramas correspondientes a los COVs se muestran en el apéndice D. Entre los compuestos identificados se encuentran: hidrocarburos poliaromáticos (3-metilindol, propilbiclononano), orgánicos sulfurados (difenilsulfona y tiofenol), orgánicos nitrogenados (DEET, pirazina y propilfenazona, nicotina), orgánico clorados (2,4.diclorobenceno), fenoles (fenol, terpineol, bisfenol A y p-cresol), hidrocarburos alifáticos (pentano y heptacosano), éster (DEHP), éter (difeníleter), un fosfato de alquilo (trietilfosfato) y ácidos orgánicos (ácido valérico, palmítico, fenilbutírico, hexanoico, heptanoico, octanoico, dihidroxibutírico, ciclohexano dicarboxílico, linoleico, ftálico, adípico y 2-metil-4-clorofenoxipropionico).

Tabla 5. Compuestos orgánicos volátiles identificados en los lixiviados.

Compuestos orgánicos Volátiles	Fórmula	Peso molecular g/mol	P _{ebullición} (°C)
p-Cresol	C ₇ H ₈ O	108,077	202
Alcanfor	C ₁₀ H ₁₆ O	152,11	204
Terpineol	C ₁₀ H ₁₈ O	154,25	18
Fenol	C ₆ H ₆ O	94,11	181,7
3-metilindol	C ₁₀ H ₉ N	117,15	
Difeniléter	C ₁₂ H ₁₀ O	170,2	259
DEET (N,N-dietil-meta-toluamida)	C ₁₂ H ₁₇ ON	191,132	111
Difenilsulfona	C ₁₃ H ₁₀ S	198,143	145
7-Acetil-2-hidroxi-2-metil-5-isopropilbiciclononano	C ₁₃ H ₂₂ O ₂	210,143	-
Bisfenol A	C ₁₅ H ₁₆ O ₂	228,29	219
DEHP (di-2-hexilftalato)	C ₂₀ H ₃₈ O ₄	342,22	405
Heptacosano	C ₂₇ H ₅₆	380,74	422,2
Trietilfosfato	C ₆ H ₁₅ PO ₄	118,039	NA
Pirazina	C ₄ H ₄ N ₂	80,09	115
Tiofenol	C ₆ H ₅ SH	110,2	168
Nicotina	C ₁₀ H ₁₄ N ₂	162,23	247
Propilfenazona	C ₁₄ H ₁₆ N ₂ O	230,30	-
n-Pentano	C ₅ H ₁₂	72,15	35,95
Ácido Hexanoico	C ₆ H ₁₂ O ₂	116,16	202
Ácido palmítico	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	256,65	350,8
Ácido Butírico	C ₄ H ₈ O ₂	88	164
Ácido pentanoico	C ₈ H ₁₂ O ₄	172,18	187

Tabla 5.- Continuación

Ácido ciclohexano dicarboxílico	C₁₀H₉N	117,15	180
Ácido hidroxibutírico	C ₄ H ₁₀ O ₄	170,2	259
Ácido fenilbutírico	C ₁₀ H ₁₂ O ₂	164,21	165
Ácido linoleico	C ₁₈ H ₃₀ O ₂	278,43	
Ácido heptanoico	C ₇ H ₁₄ O ₂	130,2	223
Ácido octanoico	C ₈ H ₁₆ O ₂	228,29	219
Ácido ftálico	C ₈ H ₆ O ₄	166,1	210 PF
Ibuprofeno	C ₁₃ H ₁₈ O ₂	206,29	349 PF
Ácido adípico	C ₆ H ₁₀ O ₄	146,4	336
MCP (ácido 2-metil-4-cloro fenoxipropionico)	C ₁₀ H ₁₃ O ₃ Cl	216	
1,4-diclorobenceno	C ₆ H ₄ Cl ₂	146	172

Estudios realizados por la EPA (1999) les permitió determinar, que los rellenos sanitarios se ubican como la 26^a fuente de emisión de compuestos peligrosos al aire, destacándose los Compuestos Orgánicos No Metanogénicos (NMOC), que bajo la forma de Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs), representan el 85% de éstos en rellenos sanitarios (Méndez et al., 2006).

En el mismo orden de ideas, los COVs generados en rellenos sanitarios se incorporan al ambiente por volatilización a la atmósfera, donde pueden sufrir reacciones fotoquímicas con radicales hidroxilo, o dispersarse a sitios lejanos tanto en la fracción gaseosa como particulada, para posteriormente reingresar a la tierra por depositación seca o húmeda (Morales, 2006).

Cabe mencionar, que los COVs identificados en este estudio son diferentes a los encontrados por Padrón (2005) en el relleno sanitario “La Bonanza”; sin embargo todos son compuestos tóxicos por lo que no deberían ser descargados a la atmósfera. Dentro de los compuestos identificados es importante notar que son compuestos presentes en productos de uso masivo por la población, este es el caso del DEHP (2-di-hexíltalato). Dicho compuesto orgánico es ampliamente empleado para dar flexibilidad a materiales plásticos, también se emplea en la fabricación de pesticidas y cosméticos (Castells, 2000). También fue identificado el compuesto conocido como DEET (N,N-dietíl-meta-toluamida) el cual es el compuesto principal en los repelentes de insectos, así también el MCPP es empleado como pesticida de tipo herbicida (Trujillo, 2006); el Bisfenol A que está presente en fungicidas y para la elaboración de plásticos (Miravete, 2007). Asimismo, el trietilfosfato es empleado en la fabricación de detergentes, como los fenoles son empleados para la elaboración de fertilizantes, pinturas, textiles y fármacos, entre otros (Jiménez, 2001). Por otra parte, también se identifico el 1,4-diclorobenceno, especie persistente a la degradación, por ser un compuesto clorado pudiendo persistir por largos años en el ambiente (Trujillo, 2006).

Es de notarse la variabilidad de ácidos orgánicos identificados, como ácido valérico, palmítico, fenílbútrico, hexanoico, heptanoico, octanoico, dihidroxibútrico, ciclohexano dicarboxílico, linoleico, ftálico y 2-metil-4-clorofenoxipropionico, dichos compuestos se encuentran ampliamente asociados a las grasas animales y vegetales presentes en los productos alimenticios (Bailey, 1984).

Finalmente, es importante resaltar, la identificación del ibuprofeno en la muestra de lixiviados MALBO-5, ya que en el relleno sanitario existe una celda determinada a la depositación de desechos hospitalarios, por lo que se infiere que la principal fuente de este compuesto en el relleno es debido a dicha celda.

6. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos a través del estudio de los lixiviados del relleno sanitario “La Bonanza”, se derivan las siguientes conclusiones:

1. El relleno sanitario “La Bonanza” contiene lixiviados que presentan un pH promedio de 8,2. Dicho pH es característico de una fase metanogénica, además de ser lixiviados con una carga orgánica que no supera el 4%, tratándose así de lixiviados de clase III.
2. Los lixiviados estudiados presentan variaciones en las concentraciones de los cationes Na^+ , K^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} ; sin embargo, en general, los valores más altos son referidos a Na^+ y K^+ , con concentraciones consideradas de riesgo de afectar a los suelos de las áreas circundantes al relleno, y contaminación de las aguas subterráneas en el caso de migración de los mismos.
3. Dentro de los aniones estudiados en los lixiviados, las mayores concentraciones se encontraron referidas a las especies NO_3^- y Cl^- con un intervalo de concentración que oscila entre 40 y 23993 y 282 y 1448 mg/L respectivamente; mientras que, en las muestras de aguas superficiales no se evidenciaron altas concentraciones de dichos aniones.
4. El residuo resultante de la evaporación del lixiviado original, contiene concentraciones de Cl^- , NO_3^- y NO_2^- de 532, 23993 y 2328 mg/L respectivamente, que superan el límite máximo de 500 mg/L establecido por el Decreto 883.
5. Dentro de los elementos traza estudiados en las muestras de lixiviados y de aguas superficiales, se encontró que el Fe fue el metal con la mayor

concentración, seguido por Mn, bajo la influencia del pH en la movilización de los mismos, superando el límite establecido permisible de 1,0 y 0,2 mg/L respectivamente por el Decreto 883.

6. El Cr presenta concentraciones en algunas muestras de lixiviados que supera el valor establecido por el Decreto (0,05 mg/L). El resto de los elementos traza estudiados se encuentran en un intervalo de concentración que oscila entre 0,08 y 0,8 mg/L.
7. Se identificaron 32 compuestos orgánicos volátiles en las muestras de lixiviados, resultando una gran variabilidad de compuestos orgánicos en su mayoría, asociados a productos de uso masivo por la población; además se detectó la mezcla de BTEX, benceno, tolueno y los isómeros o, m y p-xileno tanto en las muestras de lixiviados como en las de aguas superficiales, con excepción del etílbenceno que no fue no detectado.
8. Las principales fuentes asociadas a las especies iónicas estudiadas se encuentran referidas a productos de la industria alimenticia y agrícola; mientras que, los elementos traza son aportados al relleno sanitario “La Bonanza” a través de materiales de tipo aleaciones, pigmentos, plásticos, baterías, entre otros. En cuanto a los compuestos orgánicos volátiles identificados en su mayoría provienen de la industria alimenticia, la industria agrícola con pesticida, fertilizantes, entre otros y la industria farmacéutica.

7. RECOMENDACIONES

Con el propósito de ampliar y mejorar el estudio de los lixiviados del relleno sanitario “La Bonanza”, son presentadas las siguientes recomendaciones:

1. Realizar una caracterización que incluya la determinación de parámetros como DBO, DQO y fósforo total.
2. Se considera prioritaria realizar un tratamiento del lixiviado, haciendo énfasis en el residuo del lixiviado sometido a evaporación, en un sistema que permita disminuir las concentraciones de Na^+ , K^+ , NO_3^- , NO_2^- y Cl^- , principalmente hasta concentraciones compatibles con el ambiente, de manera de disminuir su carga contaminante.
3. Realizar un estudio cuantitativo de los compuestos orgánicos volátiles en el aire del área del relleno sanitario así como de las zonas cercanas al mismo; para así monitorear posibles problemas de contaminación del aire y de los efectos sobre la salud de los trabajadores del relleno.
4. Se sugiere realizar un proceso de destilación a las muestras de lixiviados, previo a los diferentes determinaciones de las especies mayoritarias y elementos traza; de este modo se podría convertir la matriz de las muestras en una menos compleja y con menos probabilidad de interferencias que se podrían encontrar durante los análisis.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Bailey E., (1984). “Aceites y grasas industriales”, Editorial Reverté, Barcelona, España, 89-91p.
- Baéz M., (2009). “Validación de métodos de ensayo para el análisis de parámetros fisicoquímicos en aguas limpias y residuales en el laboratorio de medio ambiente”, Trabajo Especial de Grado, Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí, Ecuador.
- Barradas A., (2009), “*Gestión integral de residuos sólidos municipales*”, Minatitlán, Veracruz, México, 5p.
- Bernache G., (2006). “*Cuando la basura nos alcance: el impacto de la degradación ambiental*”, Ediciones CIESAS, 313p.
- Briceño G., (1992). “*Caracterización fisicoquímica del lixiviado del relleno sanitario “La Bonanza (Charallave, Estado Miranda) y determinación de su efecto en algunas propiedades químicas del suelo*”. Trabajo especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias, Escuela de Biología.
- CalRecovery INC., (1997). “Guía para rellenos sanitarios en países de desarrollo (curso internacional de rellenos sanitarios y de seguridad)”, Mar de Plata, Argentina.
- Caruso M., (2008). “Informe de relleno sanitario”. www.rafaela.gov.ar, publicación 140.
- Castell X., (2000). “Reciclaje de residuos industriales”, Editorial Diaz de Santos, Madrid, España, 125-128p.
- COTECNICA inversiones, www.cotecnica.com, consultado en marzo de 2011.
- CONNATURA, proyectos C.A, (1984). “*Estudio de las características físico-ambientales e hidrológicas del relleno sanitario La Bonanza. Informe técnico*”, editado por MARNR, 67p.

- Custodio, E. y Llamas, M., (1976). “*Hidrología subterránea*”, Ediciones Omega. Barcelona, España, 2359p.
- Ehrig H., (1983). “*Quality and quantiy of sanitary landfill leachate*”, Water Management & Research, Waste Management, V1, 53-58p.
- Environmental Protection Agency of USA (EPA), (1994). Toluene Chemical Summary. Disponible en http://www.epa.gov/opptintr/chemfact/s_toluen.txt
- Environmental Protection Agency of USA (EPA), (1999). Federal Regulations 38706, July 19.
- Environmental Protection Agency of USA (EPA), (2000). Federal Regulations 66672,
- Hernández M., (2007). “*Estudio geoquímico de las aguas subterráneas al sur de Calabozo, estado Guárico*”, Trabajo especial de grado, Facultad de Ciencias, Universidad central de Venezuela.
- Ikeda M., (1990). “*Suppression of Metabolism in Workers Exposed to Mixtures of Benzene and Toluene and to Thrichloroethylene and Tetrachloroethylene, Biological Monitoring of Exposure to Industrial Chemicals*”, Editors: Vera Fiserova-Bergerova, Masana Ogata, Chapter 27, ACGIH, 151-154p.
- Instituto Nacional de Ecología (INE), (1996). “*Minimización y Manejo de los resiuos sólidos*”. 34-36p.
- Jaramillo J., (2002). “*Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales*”.
- Jiménez B., (2001). “*La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada*”, Editorial Limusa, México.
- Judson C., (2003). “*Procesos de separación*”, Editorial Reverté, España, 798-99p.

- Keily, G., (1999). *“Ingeniería ambiental fundamentos, entornos, tecnología y sistemas de gestión”*, Volumen III, Ediciones McGraw Hill.
- Keller, A.P., (1988). *“Trace constituents in landfill gas; task report on inventory and assessment of cleaning technologies”*, Gas research Institute, Chicago, ILL, Report no. GRI-87/001 8.2, 140p.
- Kulikowska D., Klimiuk E., (2008). *“The effect of landfill age on municipal leachate composition”*, *Bioresource Technology*, Vol. 99, 5981-5985p.
- Kurniawan, A. T., Wai-hung L., Chan, G., (2006). *“Physico-chemical treatments for removal of recalcitrant contaminants from landfill leachate”*, *Journal of Hazardous Materials*, B129, 80–100p.
- Lauwerys R., (1994). *“Toxicología industrial”*, Ediciones Masson, Barcelona, España, 104p.
- Lou Z., Dong B., Chai X., Song Y., Zhao Y., Zhu N., (2009). *“Characterization of refuse landfill leachates of three different stages in landfill stabilization process”*, *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 21, 1309-1314p.
- Matejczyk M., Grazyna A., Nalecz-Jawecki G., Krzysztof U., Markowska-ASzczupak A., (2011). *“Estimation of the environmental risk posed by landfills using chemical, microbiological and ecotoxicological testing of leachates”*, *Chemosphere* V. 82, 1017-1023p.
- Méndez F., Gómez O., Girón S., Mateus J., Mosquera J., Ocampo C., (2006). *“Evaluación del impacto del relleno sanitario Doña Juana en la salud de grupos poblacionales en su área de influencia”*, Informe final, Secretaria de salud distrital, Bogotá D.C.

- Miller J., (2002), *“Estadística y Quimiometría para Química Analítica”*, Editorial Prentice Hall, Madrid, España, 114p.
- Morantes J., (1997). *“Estudio hidrogeoquímico en la cuenca del Cuyuni, Estado Bolívar, Venezuela”*, Trabajo Especial de Grado, Facultad de Ciencias, Universidad central de Venezuela, 54-55p.
- Miravete A., (2007). *“Materiales compuestos”*, Editorial Reverté, Barcelona, España, 51p.
- Morales R., (2006). *“Contaminación atmosférica urbana”*, editorial Universitaria, Santiago de Chile, Chile, 123p.
- Olivero J., Padilla C., De la Rosa C., (2007). *“Relationships between physicochemical parameters and the toxicity of leachates from a municipal solid waste landfill”*, Ecotoxicology and Environmental Safety V.70, 294-299p.
- Oman C., Junestedt C., (2008). *“Chemical characterization of landfill leachates-400 parameters and compounds”*. Waste Management. Vol. 28, 1876-1891p.
- Organización Panamericana de la Salud (OPS), (2000). *“Análisis Sectorial de Residuos Sólidos de Venezuela”*.
- Ozzane F., (1990). *“Les Lixiviats de decharges le point des connaissances en 1990”*, T.S.M N° 6, 289-300p.
- Padrón L., (2005). *“Análisis de lixiviados provenientes de La Bonanza”*, Trabajo especial de grado, Escuela de química, Universidad Central de Venezuela, Facultad de ciencias, Caracas, Venezuela.

- Primo E., (1996). “*Química orgánica básica y aplicada: de la molécula a la industria*”, Editorial Reverté, Barcelona, España, 262-269p.
- Rapti-Caputo D., Vaccaro C., (2006).” *Geochemical evidences of landfill leachate in groundwater*”, Engineering Geology V85, 111-121p.
- Rigola M., (1999). “*Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuo*”, Ediciones Alfaomega, México, Distrito Federal.
- Robinson H., Tech B, Bbarber P., (1982). “*Generation and treatment of leachate form domestic wastes in landfills*”, *Water Pollut Control* ..565– 75p.
- Rochow E. ,(1981). “*Química inorgánica descriptiva*”, Editorial Reverté, España, 235p.
- Sánchez A. (2007), *Ciudades, medio ambiente y Sostenibilidad*, Ediciones ARCIBEL, Sevilla, España. 262p.
- Scheutz, C., Mosbæk, H., Kjeldsen,P., (2004). “Bioremediation and Biodegradation. Attenuation of Methane and Volatile Organic Compounds in Landfill Soil Covers”, Technical Reports. Technical University of Denmark, Environment & Resources. Environ. Vol. 33, 61-71p.
- Seoanez Calvo, M., (1998). “*Ecología Industrial. Ingeniería medioambiental aplicada a la industria y a la empresa*”, Ediciones Mundo-Prensa, Madrid, España.
- Skoog D., Holler F., Nieman T., (2001). “Principios de análisis instrumental”, Ediciones McGra-Hill, Quinta edición, Madrid, España.
- Stumm W., Morgan J., (1970). “*Aquatic Chemistry. An introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters*”. John Wiley, New York, 161-191p.
- Tchbanoglous G., Theisen T., Vigil S., (1994). “*Integrated solid waste management*”, The McGraw-Hill Companies, Inc.

- Tchbanoglous G., Burton F., Stensel D., (2004). “Wastewater engineering: treatment and reuse”, Mc GrawHill.
- Trujillo O., (2006). “Análisis de pesticidas por cromatografía de Gas”, Universidad Nacional de Colombia, 16-51p.
- Universidad de Medellín (UM), (2005). Clínica Jurídica de interés público ambiental I, Medellín Colombia.
- VanLoon, G., Duffy, S., (2000). “Environmental Chemistry a global perspective”, OXFORD, New York, United States.
- Zhao Q. and Li X., (2001). “*Efficiency of biological treatment affected by high strength of ammonium–nitrogen as pretreatment*”, Chemosphere Vol. 44, 37–43p.
- Zou S., Lee S., Chan C., Ho K., Wang X., Chan Z., (2003). “*Characterization of ambient volatile organic compounds at a landfill site in Guangzhou, South China*”, Chemosphere Vol. 51, 1015-1022p.

9. APÉNDICES

9.1 Apéndice A Condiciones experimentales de los análisis.

Tabla 6.- Condiciones experimentales del análisis de Absorción y Emisión Atómica.

Elemento	Equipo	Longitud de Onda (nm)	Combustible
Calcio, Ca	Perkin Elmer	211	Acetileno
Magnesio, Mg	Perkin Elmer	285	Acetileno/Aire
Sodio, Na	Perkin Elmer	295	Acetileno/Aire
Potasio, K	Perkin Elmer	384	Acetileno/Aire

Tabla 7.- Condiciones experimentales de Cromatografía Iónica.

Anión	Equipo	Longitud de Onda (nm)	Flujo (mL/min)	Detector
Cl ⁻	ILC-1 Ion Liquid Cromatograph Water	-	0,6	Conductivity, Model 430
NO ₃ ⁻	ILC-1 Ion Liquid Cromatograph Water	230	0,6	Programmable Multivalength, Waters 490E
NO ₂ ⁻	ILC-1 Ion Liquid Cromatograph Water	230	0,6	Programmable Multivalength, Waters 490E

Tabla 8.- Condiciones experimentales de Emisión atómica ICP-OES.

Elemento	Longitud de Onda (nm)	Flujo de Argón mL/min	Nebulización mL/min
As	228.812	20	0,02
Cd	226.502	20	0,02
Cr	283.563	20	0,02
Cu	324.754	20	0,02
Fe	259.94	20	0,02
Mn	257.61	20	0,02
Mo	202.03	20	0,02
Ni	231.604	20	0,02
Pb	220.353	20	0,02
Se	196.09	20	0,02
V	309.311	20	0,02
Zn	202.551	20	0,02
Ti	334.941	20	0,02
Co	228.616	20	0,02
Sr	407.771	20	0,02
Sb	206.833	20	0,02

Tabla 9.- Condiciones experimentales del análisis de HPLC.

Volumen de inyección	Flujo de fase móvil	Fase móvil
20 µL	2 mL/min	80%CH ₃ OH, 20% H ₂ O

Tabla 10.- Condiciones experimentales del análisis de cromatografía de gases GC-MS.

Volumen de inyección	Temperatura de inyección	Fase móvil	Flujo de la fase móvil
1 mL Split/splitless	60°C	Helio, He	40 mL

9.2 Apéndice B

Tabla 11.- Concentración de las especies mayoritarias catiónicas y aniónicas.

Muestra	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻
MALBO-1	50180	39600	11	15	532	23993	2328
MALBO-2	1109	931	35	293	1448	396	74
MALBO-3	537	458	23	184	590	348	<LDD
MALBO-4	398	327	14	17	284	202	6
MALBO-5	949	696	47	455	1281	75	4
MALBO-6	491	467	32	128	490	28	11
MALBO-7	1126	1028	85	101	1406	56	4
MASBO-8	53	38	15	43	129	<LDD	13
MALBO-9	353	266	40	534	282	40	11
MASBO-10	<LDD	7	10	420	70	10	<LDD

Todas las concentraciones están expresadas en mg/L

LDD: Límite de detección

Tabla 12.- Concentraciones de SiO₂, alcalinidad y Materia Orgánica.

Muestra	SiO ₂ mg/L	alcalinidad mgCaCO ₃ /L	% MO
MALBO-1	30	2509	4
MALBO-2	13	1476,45	2
MALBO-3	4,0	607,95	1
MALBO-4	4,0	579	1
MALBO-5	22	3860	3
MALBO-6	9,0	965	3
MASBO-7	22	125,45	3
MASBO-8	5,0	289,5	4
MALBO-9	7,0	1254,5	4
MASBO-10	4,0	193	0,5
LDD	0,2	2	-

Tabla 13.- Concentración de los elementos traza.

Elemento	MALBO-1	MALBO-2	MALBO-3	MALBO-4	MALBO-5	MALBO-6	MALBO-7	MASBO-8	MALBO-9	MASBO-10	LDD
As	< LDD	< LDD	< LDD	< LDD	< LDD	< LDD	< LDD	< LDD	< LDD	< LDD	0,005
Cd	< LDD	< LDD	< LDD	< LDD	< LDD	< LDD	< LDD	< LDD	< LDD	< LDD	0,01
Cr	1	0,2	0,08	0,6	0,3	0,08	0,3	< LDD	0,07	< LDD	0,04
Cu	0,5	0,02	0,01	0,01	0,02	< LOD	< LOD	< LDD	0,008	< LDD	0,006
Fe	4	2	0,4	0,2	6	< LDD	4	0,3	0,5	0,9	0,2
Mn	0,04	0,1	0,06	0,02	0,3	0,03	2	5	1	1	0,01
Mo	0,6	0,07	< LDD	< LDD	0,06	< LOD	< LDD	< LDD	< LDD	< LDD	0,06
Ni	1	0,2	0,09	0,07	< LDD	0,06	0,2	< LDD	0,09	< LDD	0,04
Pb	< LDD	< LDD	< LDD	< LDD	< LDD	< LDD	< LDD	< LDD	< LDD	< LDD	0,04
Se	< LDD	< LDD	< LDD	< LDD	< LDD	< LDD	< LDD	< LDD	< LDD	< LDD	0,1
V	1	0,1	0,08	0,06	0,2	0,07	0,2	0,04	0,07	< LDD	0,04
Zn	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,05
Ti	0,8	0,1	0,04	0,03	< LDD	0,04	0,3	< LDD	0,06	< LDD	0,03
Co	0,4	0,05	0,02	0,02	0,04	0,009	0,04	< LDD	0,02	< LDD	0,009
Sr	0,05	0,1	0,07	0,06	0,2	0,07	0,4	0,2	0,2	0,2	0,004
Sb	0,09	0,02	< LDD	0,02	0,02	0,02	0,03	< LDD	0,02	< LDD	0,02

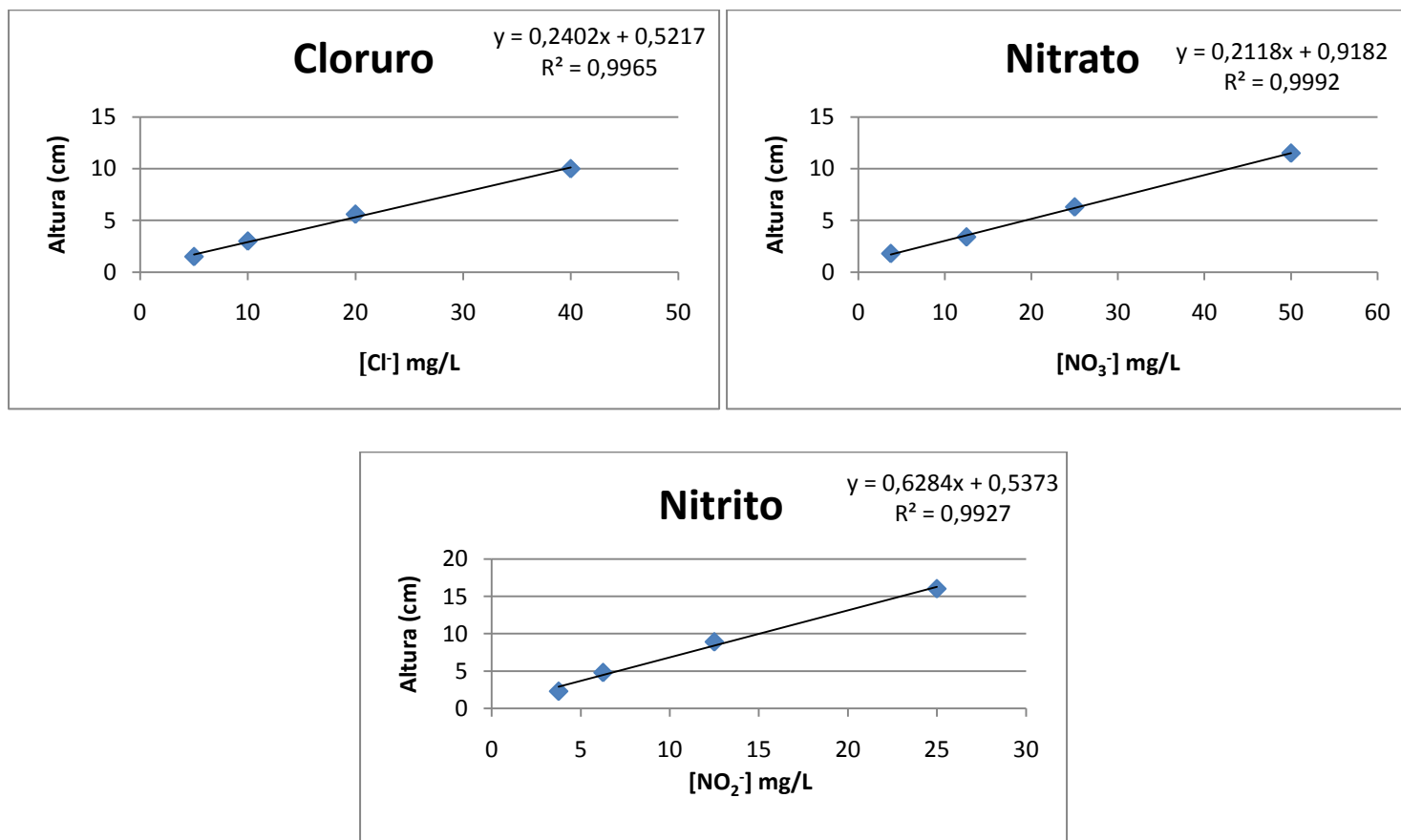
Todas las concentraciones están expresadas en mg/L

LDD: Límite de detección

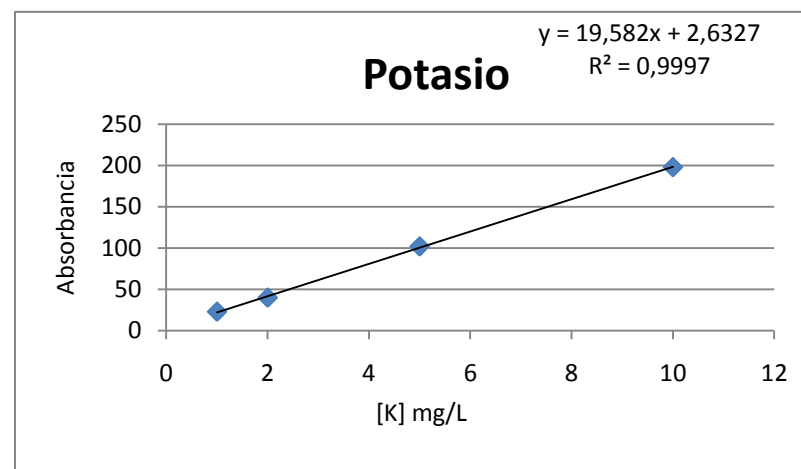
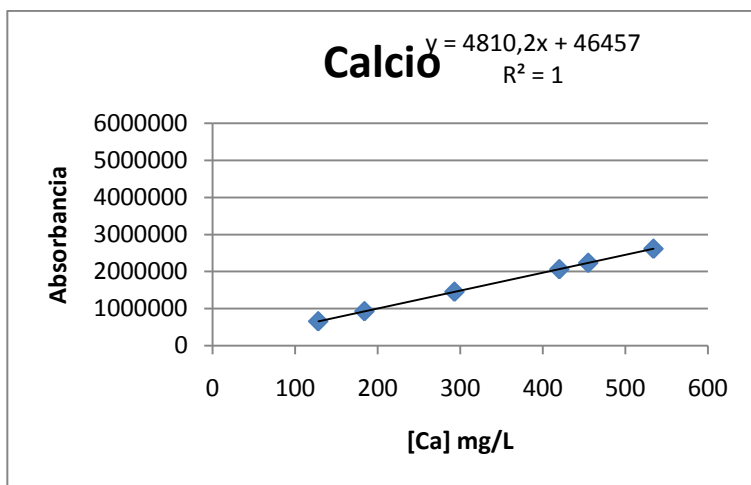
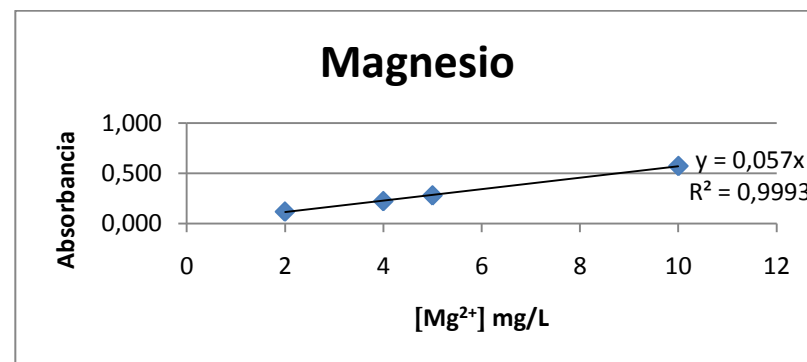
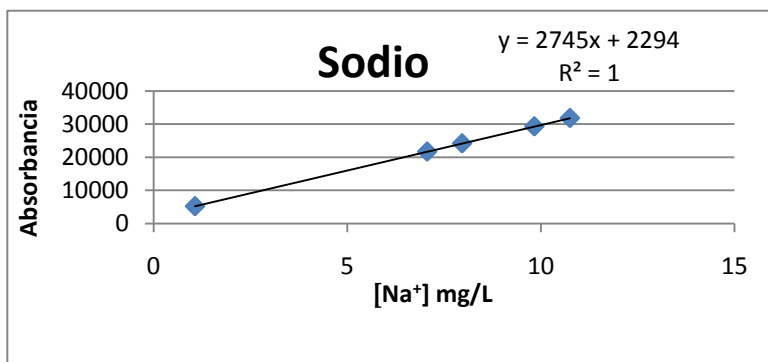
Tabla 14.-Parámetros y límites dispuestos por el MARN en su decreto 883 para efluentes líquidos.

Parámetro	Unidad	Límite o rango de cumplimiento
pH	Unidades	6-9
Cloruros, Cl^- (ríos, lagos y embalses)	mg/L	500
Nitratos, NO_3^- ; Nitritos NO_2^-	mg/L	10
Arsénico, As	mg/L	0,5
Cadmio, Cd	mg/L	0,2
Cromo, Cr	mg/L	2
Cobre, Cu	mg/L	1,0
Hierro, Fe	mg/L	10
Manganeso, Mn	mg/L	2,0
Níquel, Ni	mg/L	2,0
Plomo, Pb	mg/L	0,5
Selenio, Se	mg/L	0,05
Zinc, Zn	mg/L	5,0

❖ Curvas de calibración correspondientes a los aniones



❖ Curvas de calibración correspondientes a los elementos mayoritarios



✓ Balance iónico

$$\% \text{BI} = [(\Sigma^+ - \Sigma^-) / (\Sigma^+ + \Sigma^-)] * 100$$

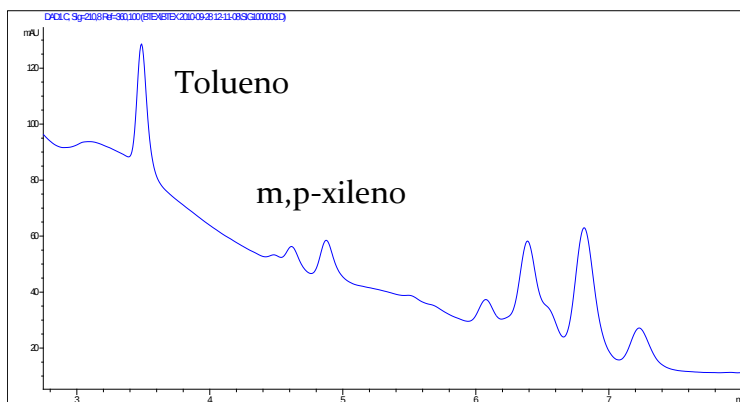
Donde:

Σ^+ representa la sumatoria de las concentraciones de las especies catiónicas Na^+ , K^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} y Σ^- es la sumatoria de las especies aniónicas Cl^- , NO_3^- y NO_2^- , todos ellos expresados en meq/L.

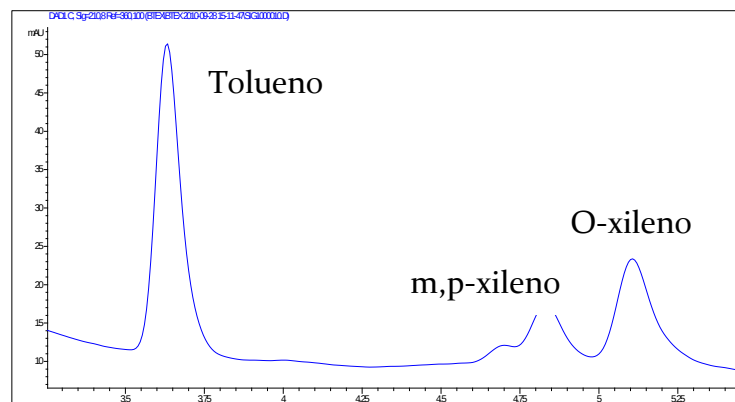
	Σ Cationes	Σ Aniones	%BI
MALBO-1	3195,95515	502,702607	72
MALBO-2	76,4367396	78,3438013	-1
MALBO-3	37,8449072	34,4037607	4
MALBO-4	26,1637412	22,9698064	6
MALBO-5	65,7266442	114,568772	-27
MALBO-6	35,5765621	33,7967443	2
MALBO-7	78,2699082	43,1552795	28
MASBO-8	4,13663018	9,70668205	-40
MALBO-9	29,6501956	33,908805	-6
MASBO-10	5,624482	5,99271262	-3

9.3 Apéndice C

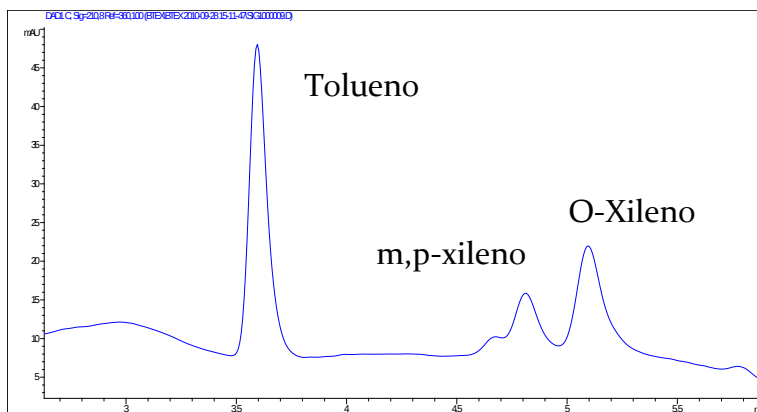
❖ Cromatogramas de BTEX en las muestras de lixiviados



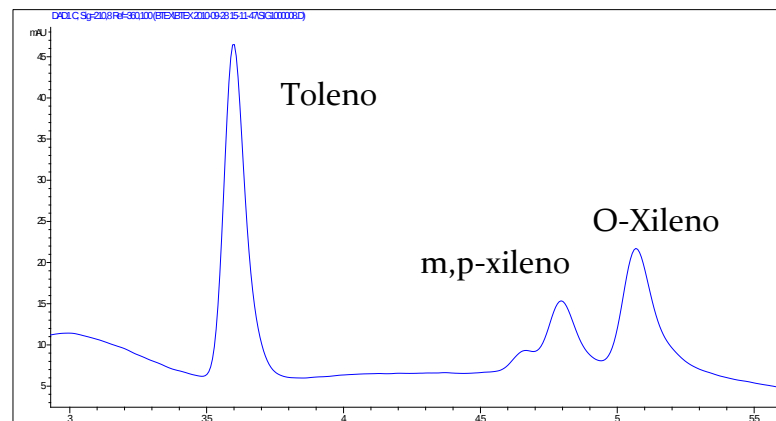
MALBO-1



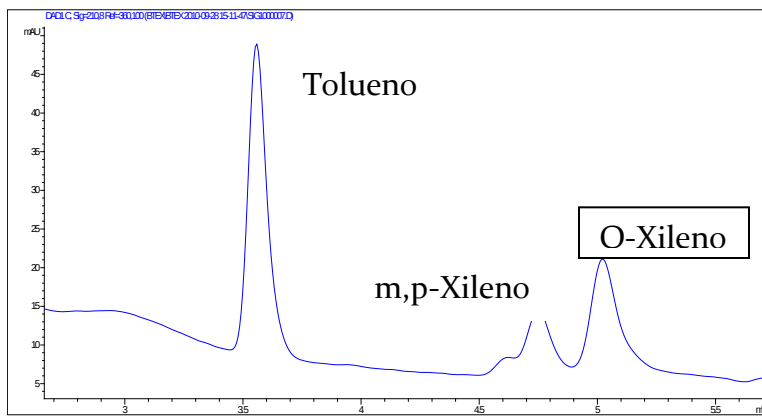
MALBO-2



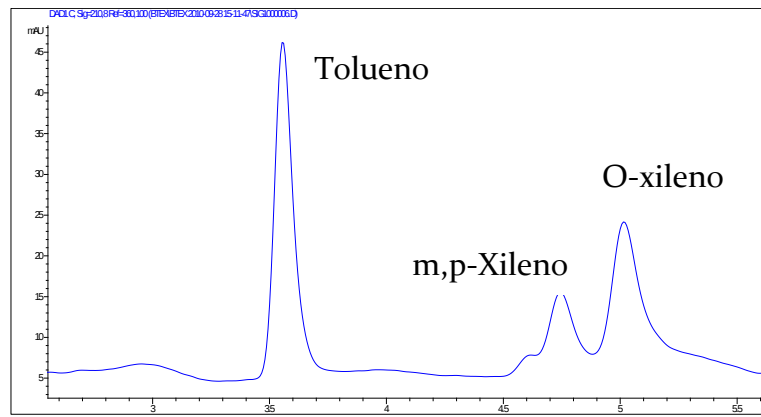
MALBO-3



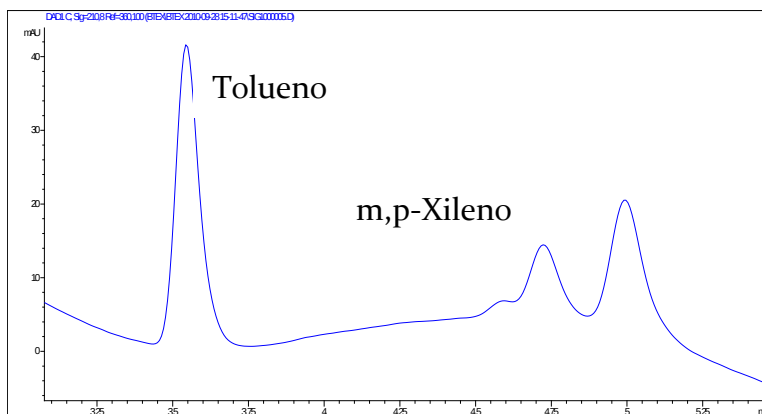
MALBO-4



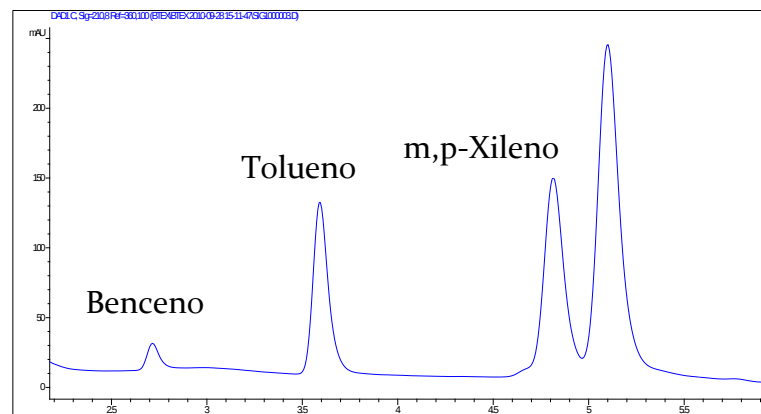
MALBO-5



MALBO-6

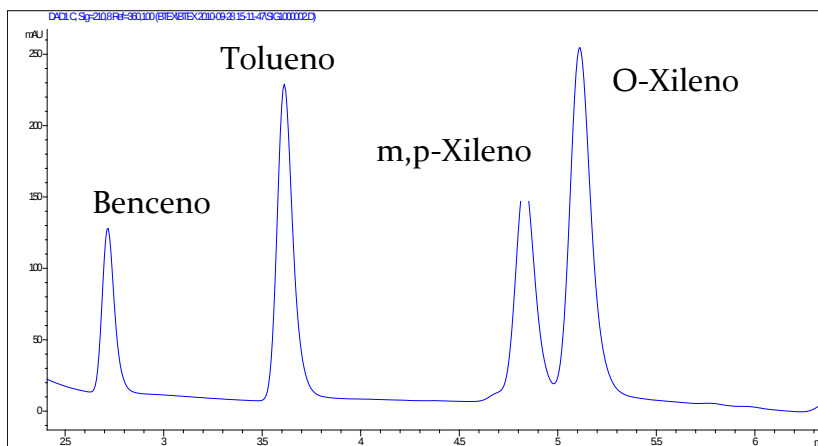


MALBO-7



MALBO-9

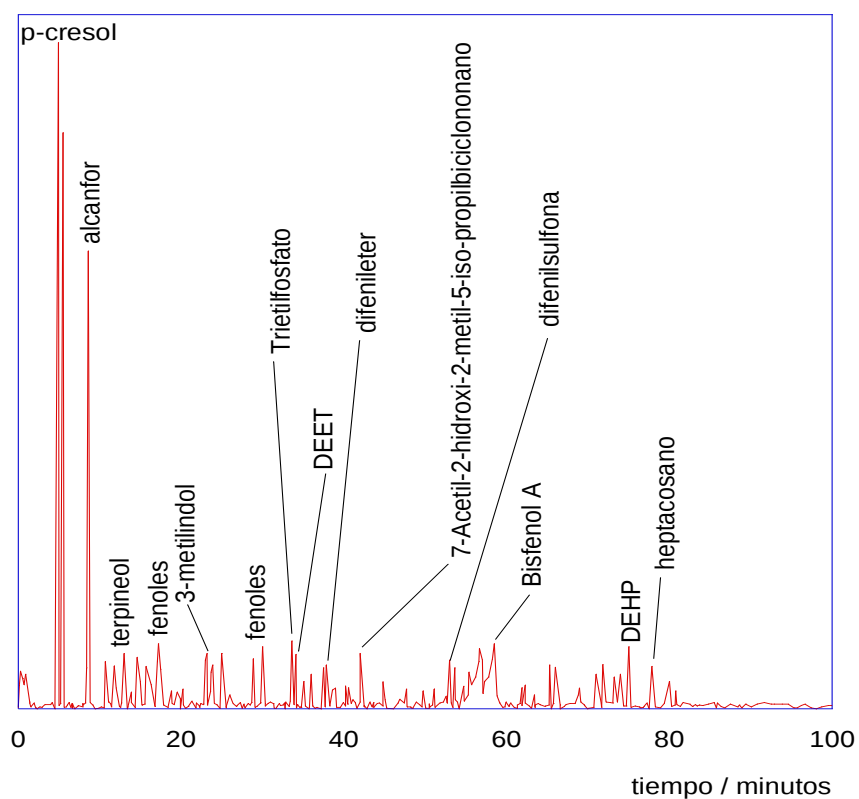
❖ Cromatogramas de BTEX en la muestra de agua superficial



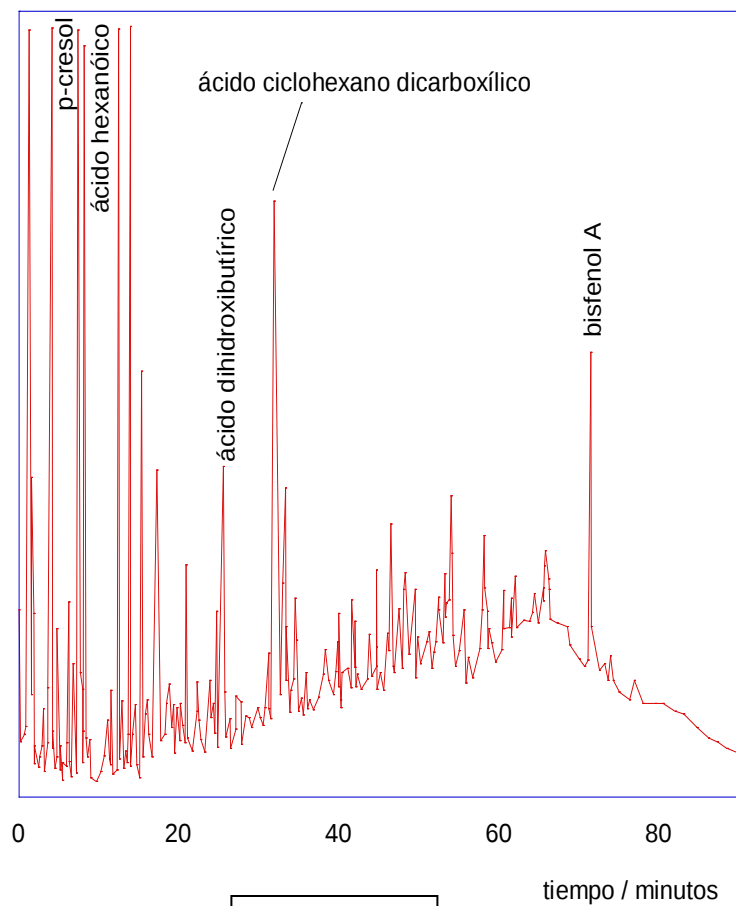
MALBO-10

9.4 Apéndice D

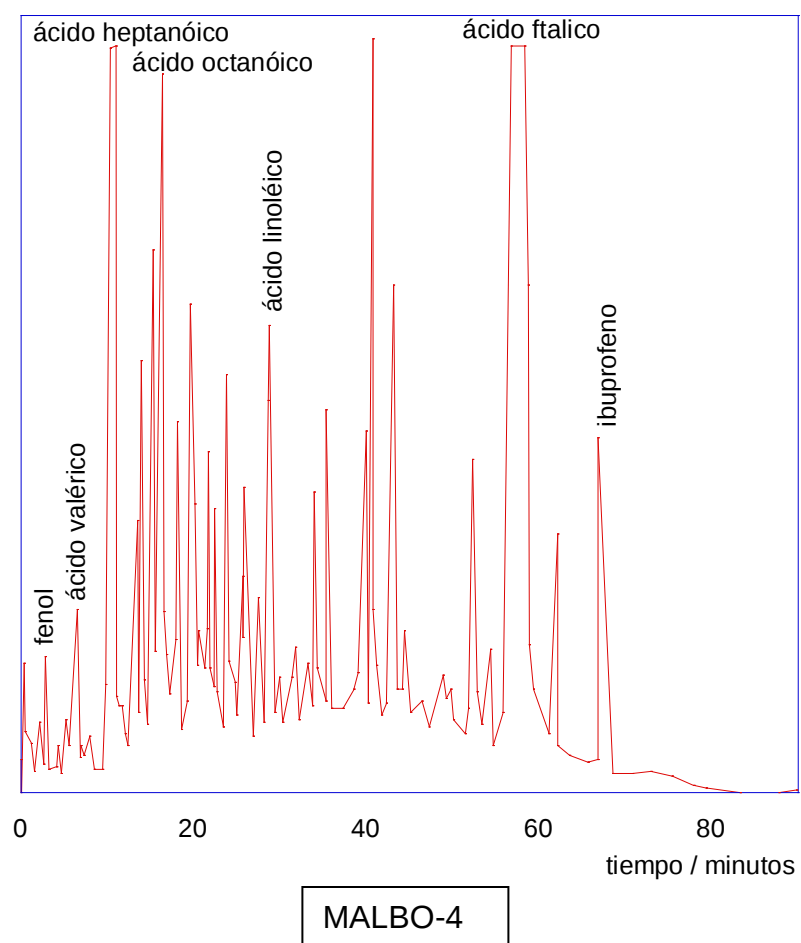
❖ Cromatograma de COVs

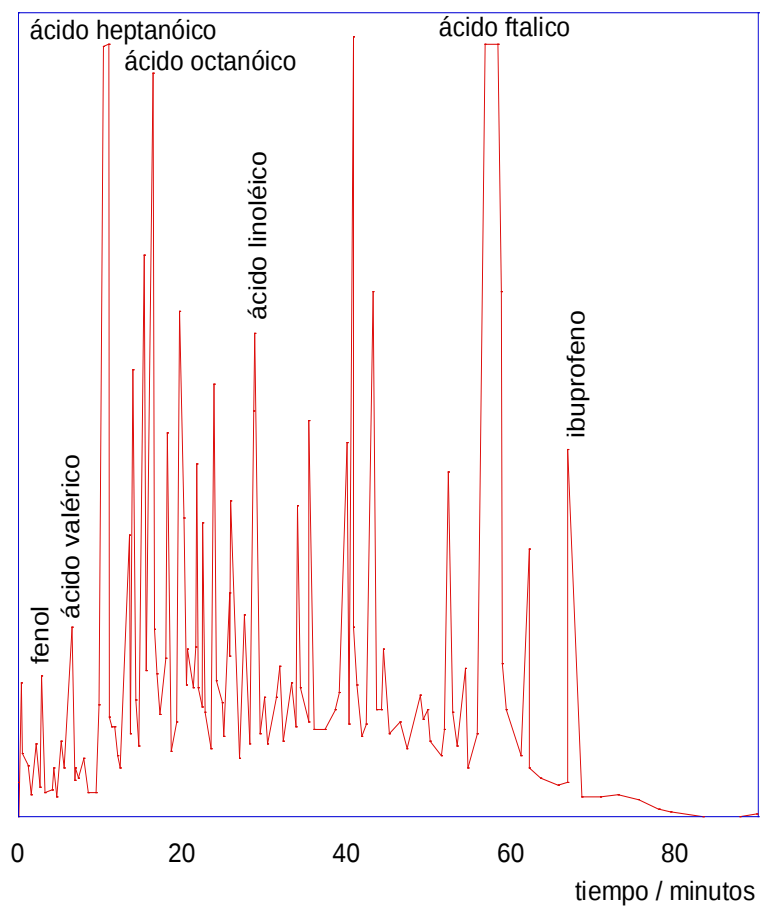


MALBO-1



MALBO-2





MALBO-5

