



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS EN MUESTRAS DE
DIFERENTES TIPOS DE RESIDUOS LÍQUIDOS MEDIANTE LA
TÉCNICA DE ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA**

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA

PRESENTA:

ING. CLAUDIA ELISA SÁNCHEZ NAVARRO

DIRECTOR DE TESINA: **DR. ENRIQUE CÉSAR VALDEZ**

MÉXICO, D.F.

ENERO 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Determinación de metales pesados en muestras de diferentes tipos de residuos líquidos mediante la técnica de espectroscopía de absorción atómica

Índice

1.	Introducción	3
	Antecedentes	3
	Objetivos	4
	Alcances	5
2.	Planteamiento del problema	7
2.1	Composición de los residuos	9
2.2	Generación de residuos	13
2.3	Lixiviados de un relleno sanitario	14
2.4	Generación de agua residual	17
2.5	Estimación anual de lixiviados con potencial para contaminar aguas superficiales y acuífero	19
2.6	Estimación de generación de lixiviados mineros	27
2.7	Estimación de agua residual que se descarga sin tratamiento	30
2.8	Impacto ambiental y daño a la salud	32
3.	Metodología	38
3.1	Espectroscopía de absorción atómica por flama	39
3.1.1	Manejo y calibración del equipo	46
3.2	Muestras	48
3.2.1	Obtención	48
3.2.1	Preparación	50
3.2.3	Análisis	50
3.3	Comparación de la concentración de metales pesados en diversos residuos	51

4.	Resultados y análisis	52
5.	Conclusiones	55
	Anexos	58
	• Glosario	
	• Método de preparación de muestras	
	• Fotos	
	Bibliografía	

1. Introducción

Nuestra historia está en los residuos, en lo que hemos utilizado y desechado, en lo que hemos comido, lo que hemos usado, en el empleo de materia prima en alimentos y accesorios, así como en nuestras actividades cotidianas. Todo nuestro registro está en los residuos que generamos, tanto sólidos como líquidos.

Desde el inicio de nuestros días se ha necesitado agua, alimento y materia para la elaboración de vivienda, vestido, utensilios de defensa, accesorios, etc., para satisfacer necesidades básicas. La consecuencia obvia de lo anterior ha sido la generación de residuos de comida, de materiales diversos y generación de agua contaminada.

Al transcurrir el tiempo, debido al aumento de la población y al avance de la tecnología, ha cambiado la cantidad y calidad de los residuos. A mayor población mayor requerimiento de agua, bienes y materia prima para manufactura.

La minería en México es una actividad económica de tradición. Es relevante mencionar que el país es productor importante en el ámbito mundial de minerales como: plata, bismuto, arsénico, plomo y zinc, entre otros. La explotación intensiva de estos recursos naturales, además de incidir en el agotamiento paulatino de sus reservas disponibles, particularmente en los no renovables, provoca alteraciones severas en los diversos medios del ambiente y a la salud humana en magnitud e intensidad diversas.

La manera más confiable de conocer la presencia de metales pesados en residuos es por análisis periódicos de las muestras. En el presente trabajo se analizaron muestras de tres diferentes residuos: lixiviados de relleno sanitario, lixiviados mineros y agua residual doméstica, el análisis se realizó en un equipo de espectroscopía de absorción atómica y los resultados se compararon con lo indicado en las normas oficiales mexicanas correspondientes observándose que en ningún caso se rebasaron los límites máximos permisibles.

La espectroscopía de absorción atómica es un método analítico para la determinación de elementos en pequeñas cantidades. Está basada en la absorción de radiación de energía por átomos libres.

Objetivos

Objetivo general

Determinar por espectroscopía de absorción atómica la presencia de metales pesados en los lixiviados de un relleno sanitario, en lixiviados mineros y en agua residual doméstica para evaluar su potencial contaminante conforme a lo establecido por las normas oficiales mexicanas correspondientes.

Objetivos particulares

1. Describir y aplicar la técnica de espectroscopía de absorción atómica para la determinación de metales pesados
2. Determinar cuantitativamente, mediante espectroscopia de absorción atómica, la presencia de metales pesados en muestras de lixiviados de un relleno sanitario, de lixiviados mineros y de agua residual doméstica.
3. Evaluar los resultados de acuerdo con las normas oficiales mexicanas en lo relativo al impacto ambiental potencial y a la necesidad de medidas de protección ambiental.

Alcances

El alcance del presente trabajo está limitado al manejo del equipo de espectroscopía de absorción atómica por flama. En primera instancia se pretendía analizar todos los metales pesados que incluye la NOM-052-SEMARNAT-2005. Al obtener los resultados por flama, se observó que era necesario utilizar la técnica de horno de grafito o de generación de hidruros por ser técnicas que analizan concentraciones más bajas que por flama. Debido al tiempo disponible para la presentación de este trabajo, se presentan los resultados de los elementos que fue posible analizar vía flama.

Qué tipo de residuos

Los residuos a analizar son aquellos generados por la disposición de basura en un relleno sanitario, lixiviados mineros y agua residual de tipo doméstica.

Los metales pesados indicados en la NOM-052-SEMARNAT-2005, son considerados tóxicos, por lo que es importante caracterizarlos para identificar su potencial contaminante pues constituyen un factor de riesgo sanitario ya que pueden contaminar suelos, aguas superficiales y subterráneas.

Qué tipo de parámetros

Los parámetros que se pretendían analizar en cada muestra de lixiviados y de agua residual, son el contenido de As, Ba, Cd, Cr, Hg, Ag, Pb y Se como lo establece la NOM-052-SEMARNAT-2005. Lográndose analizar únicamente el bario, cromo y plomo.

En el capítulo 2, se plantea la problemática de la evolución de la generación de residuos a través de los años, la producción de lixiviados ligados a los residuos y de lixiviados producidos en una mina de extracción de cobre, así como la generación de agua residual que va creciendo a la par del aumento de la población.

Para tener un mejor conocimiento y por lo tanto, un mejor control de los lixiviados y agua residual generada, es importante saber, entre otros aspectos, la concentración de los metales que son considerados por la normatividad correspondiente como tóxicos, para tomar las medidas preventivas y/o correctivas.

En el capítulo 3 se expone la metodología empleada. La aplicación de la técnica requirió primero la capacitación en el manejo del equipo, la familiarización con los componentes, el encendido/apagado, la calibración y una vez comprendido el funcionamiento se aplicó la técnica de espectroscopía de absorción de flama. Posteriormente se hace referencia al muestreo y preparación de la muestra para su posterior análisis.

En el capítulo 4 se presentan los resultados de los análisis de las muestras así como su comparación con las normas oficiales mexicanas correspondientes. Cabe adelantar que en ninguno de los casos se rebasaron los límites máximos permisibles.

Finalmente en el capítulo 5 se presentan las conclusiones derivadas del presente trabajo, con énfasis en el manejo del equipo y en el uso de la técnica analítica.

2. Planteamiento del problema

Revisando nuestra historia a través de los residuos generados, resalta que en la época prehispánica no se tiraba la basura en las calles, la compra y venta de las mercancías se realizaba en los mercados asignados. Se tenía un sistema de limpia bien estructurado en el que los aztecas desempeñaban su tarea con orden. A pesar de que la responsabilidad de la ciudad recaía en los gobernantes, la gente tenía un sentido muy desarrollado del cuidado de la naturaleza así como una conciencia del reciclado, ya que utilizaban los residuos como los huesos, madera y piedra para la elaboración de otros artículos. Los residuos que se podían quemar los incineraban en braseros y al mismo tiempo alumbraban las calzadas durante la noche. La materia orgánica la usaban como abono y cuidaban muy bien el agua que tenían, ya que además de ser un medio de transporte, de ella dependían sus cultivos, necesidades básicas como limpieza personal y vivienda. No se tienen registros ni se han encontrado, sitios que fungieran como tiraderos o lugares de depósito de residuos como los que se tienen en la actualidad, lo que es congruente ya que no había en los alrededores terrenos secos donde depositar los residuos. Todo lo anterior con una población aproximada de medio millón de habitantes.¹

Todo indica que en la época colonial se iniciaron los problemas ambientales que tenemos hasta nuestros días. Los residuos orgánicos e inorgánicos se tiraban en la calle, no existía ningún tipo de control sobre el manejo de los mismos. La diferencia estriba en que el número de habitantes y, por lo tanto, la cantidad de residuos y el volumen de agua residual eran magnitudes mucho menores que las actuales, así como diferentes sus características.

En la época colonial, dados los problemas sanitarios, se observó un verdadero interés por los residuos y se inicia con la colecta de los mismos para depositarlos posteriormente en tiraderos ubicados fuera de los primeros cuadros de la ciudad, procedimiento que continúa siendo el principal destino de los residuos en la actualidad.^{1,2}

El problema se acentúa con el crecimiento de la población y el desarrollo tecnológico, así como por la creciente demanda de bienes y servicios. Somos 112 336 538 habitantes según registros del 2010, cifra que nos coloca en el lugar 11 del mundo.³
Tabla 2.1.

¹ López, Diego, *Los Servicios Públicos de la Ciudad de México*. Editorial Porrúa, S.A., 1976.

² Díaz, Pablo. *Tesina Impacto económico de los residuos sólidos en la Ciudad de México*. Facultad de Economía, UNAM, 2012.

³ Instituto Nacional de Estadística y Geografía. *Conociendo México 2012*.

**Tabla 2.1 Población y Vivienda
Población de 1930 a 2010**

Año	Total	Hombres (%)	Mujeres (%)
1930	16 552 722	49.0	51.0
1940	19 653 552	49.3	50.7
1950	25 791 017	49.2	50.8
1960	34 923 129	49.9	50.1
1970	48 225 238	49.9	50.1
1980	66 846 833	49.4	50.6
1990	81 249 645	49.1	50.9
1995	91 158 290	49.3	50.7
2000	97 483 412	48.8	51.2
2005	103 263 388	48.7	51.3
2010	112 336 538	48.8	51.2

Nota: cifras correspondientes a las siguientes fechas censales: 15 de mayo (1930); 6 de marzo (1940); 6 de junio (1950); 8 de junio (1960); 28 de enero (1970); 4 de junio (1980); 12 de marzo (1990); 5 de noviembre (1995); 14 de febrero (2000); 17 de octubre (2005); 12 de junio (2010).

Fuente: INEGI. *Censos y Conteos de Población y Vivienda. Series Históricas*, en: www.inegi.org.mx (junio de 2011).

Todos los residuos generados se depositan en algún sitio, controlado o no, y es ahí donde se generan los lixiviados.

Por otra parte, una de las más antiguas industrias de las que se tiene conocimiento es la industria minera, pues ha sido desde sus inicios de gran beneficio para la sociedad, pero, dicha actividad provoca impactos ambientales de diversa magnitud e importancia, incluyendo contaminación de suelos y cuerpos de agua tanto superficial como subterránea. A la par del crecimiento minero está el de la generación de residuos mineros, tales como aguas residuales, lixiviados y jales entre otros.

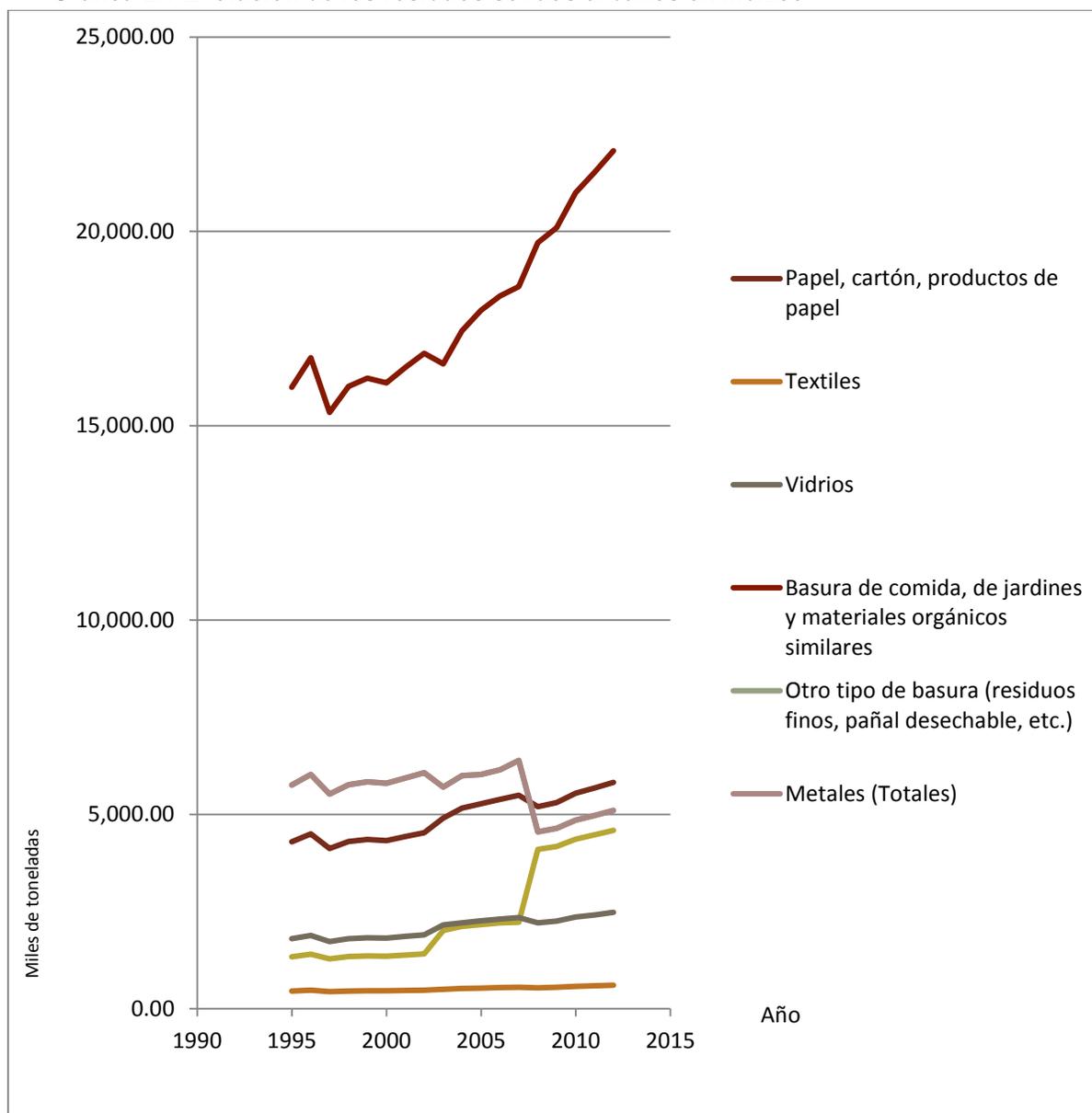
En el caso de la industria minera sí se tiene prueba de los problemas ambientales y los riesgos asociados, como muestran las evidencias de las minas prehispánicas de cinabrio -sulfuro de mercurio- de la Sierra Gorda, los jales de la época colonial de Pachuca, Taxco, Guanajuato, Zacatecas, etcétera. A algunos patios se les dio uso urbano, pero no es hasta nuestros días, que el aumento de la población y la explotación generalizada de los recursos naturales, pone en evidencia el daño ambiental que hace necesario su control.¹

¹ http://www.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/35/los_residuos.html

2.1 Composición de los residuos

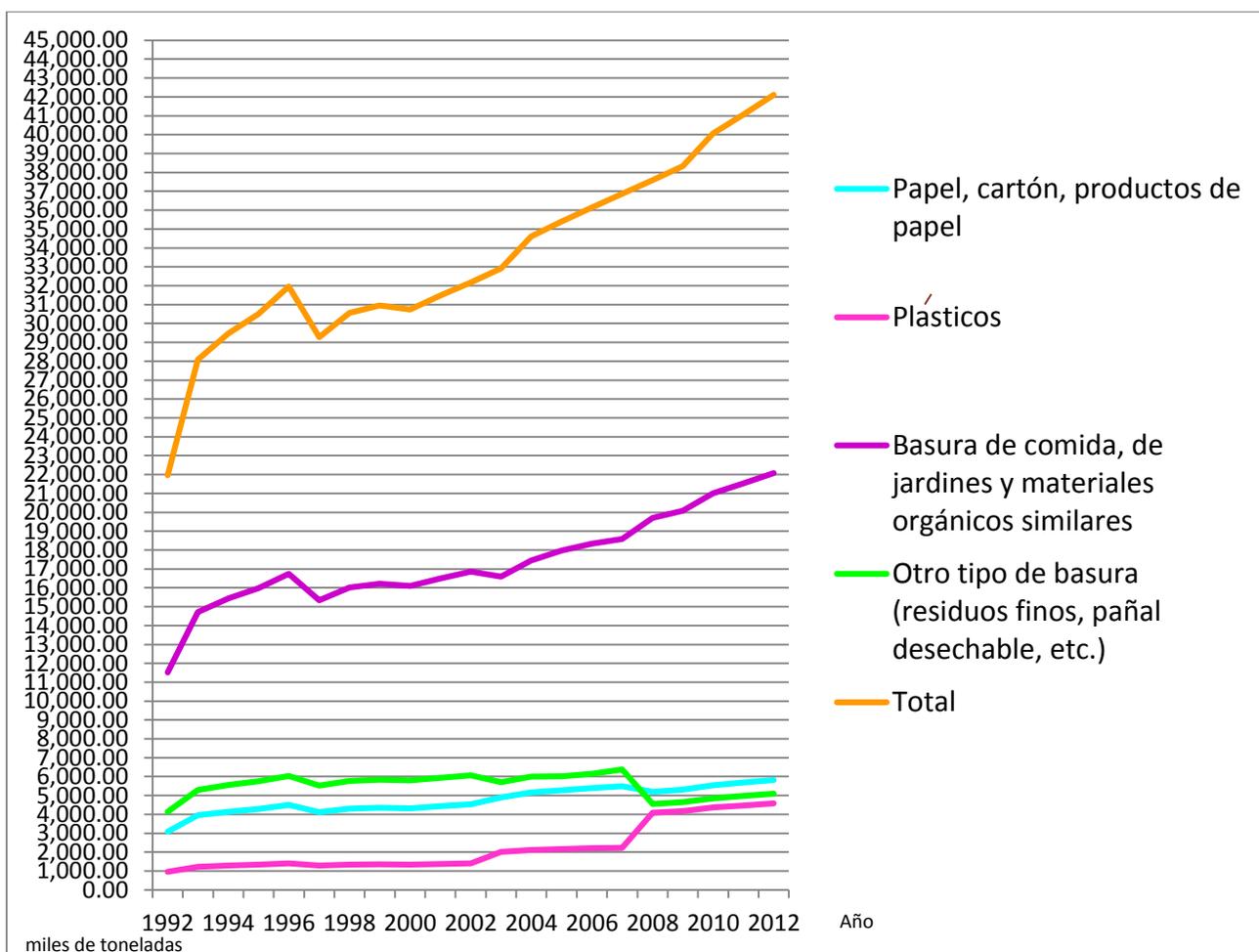
La composición de los residuos ha ido evolucionando a lo largo de la historia como consecuencia del aumento de la población, desarrollo tecnológico, urbanización de las poblaciones, nivel económico, modificación de los hábitos de consumo, entre otros. En las gráficas 2.1, 2.2 y 2.3 se observa la evolución de los residuos sólidos urbanos en México en el periodo comprendido de 1995 al 2012.

Gráfica 2.1 Evolución de los residuos sólidos urbanos en México



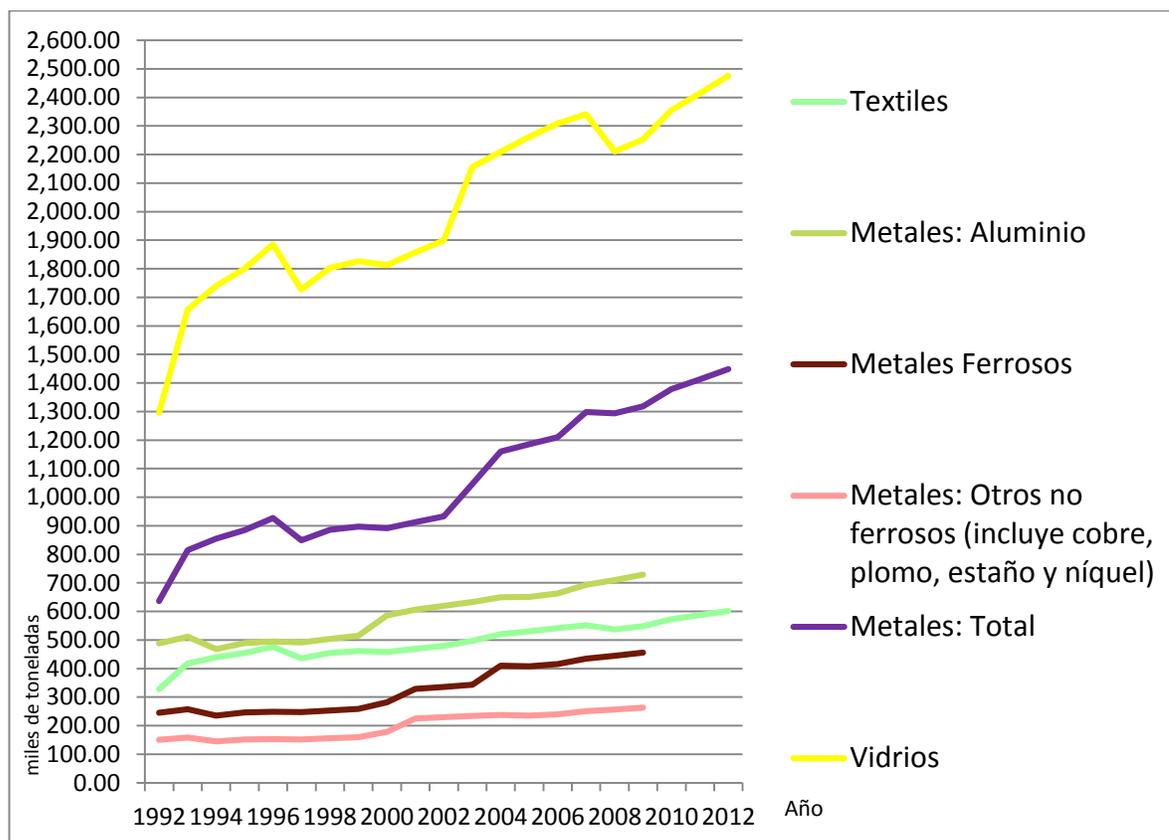
Fuente: Secretaría de Desarrollo Social, Dirección General de Equipamiento e Infraestructura en Zonas Urbano-Marginadas. Abril 2013

Gráfica 2.2 Evolución de residuos plásticos, cartón-papel, orgánica y otro tipo



Fuente: Secretaría de Desarrollo Social, Dirección General de Equipamiento e Infraestructura en Zonas Urbano-Marginadas. Abril 2013

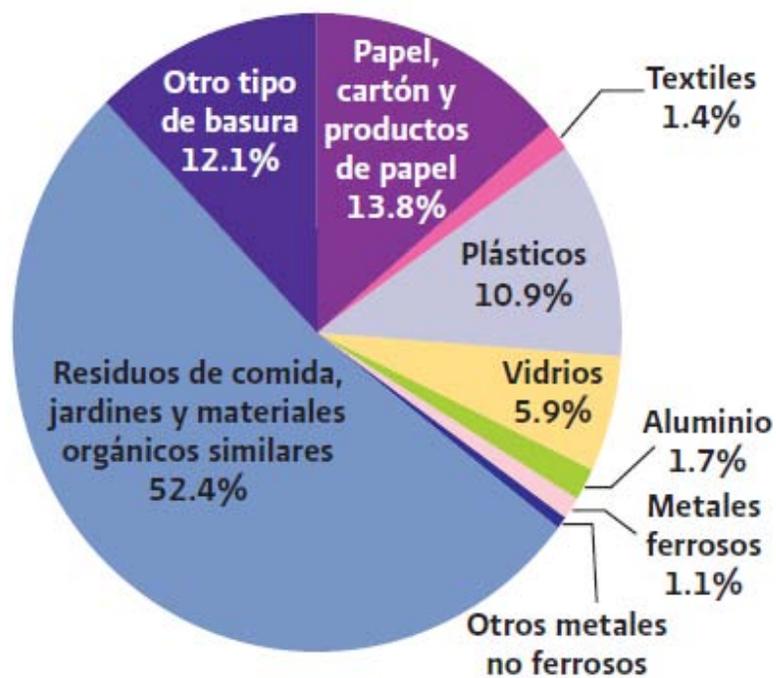
Gráfica 2.3 Evolución de residuos textiles, metales y vidrios



Fuente: Secretaría de Desarrollo Social, Dirección General de Equipamiento e Infraestructura en Zonas Urbano-Marginadas. Abril 2013

Como se muestra en las gráficas, hay un aumento en los residuos a la par del crecimiento de la población. Entre los residuos que han tenido un aumento considerable se encuentran los plásticos: plástico en botellas con agua, jugo, refresco, plástico en comida, plástico en bolsas del centro comercial, etc.

La figura 2.1 muestra la composición nacional de los residuos sólidos urbanos en México correspondiente al año 2011, se aprecia que los residuos orgánicos corresponden a más del 50%.



Fuente:

Dirección General de Equipamiento e Infraestructura en Zonas Urbano-Marginadas, Sedesol. México. 2012.

Figura 2.1 Composición nacional de los residuos sólidos urbanos en México, 2011

2.2 Generación de residuos

De acuerdo a datos de la Semarnat (Informe 2012), en México se recolectaron cada día en promedio 112.5 mil toneladas de residuos sólidos urbanos, que son los generados en las viviendas, parques, jardines y edificios públicos, principalmente. En cinco entidades se recolecta casi la mitad de los residuos del país.¹

El Distrito Federal registró una generación del 12% del total nacional; el Estado de México 16%; Jalisco 7%; Veracruz y Nuevo León 5% cada uno.

En 50 municipios y delegaciones, donde reside 32.2% de la población, se concentra el 50.6 % de la generación. Cabe destacar que en tres delegaciones del Distrito Federal se genera el 10% de la recolección total nacional: Iztapalapa, Gustavo A. Madero y Cuauhtémoc.²

En el Distrito Federal se rebasa, la generación promedio diaria por habitante a nivel nacional con aproximadamente 1.5 kilogramos, en cambio en la zona Sur, se tiene una generación per cápita del país de 0.76 kilogramos, siendo 1.01 kilogramos la media nacional. En la tabla 2.2 se tiene la generación nacional de residuos sólidos del año 1995 al 2013.

Tabla 2.2 Generación nacional de residuos sólidos urbanos por tipo de residuos (miles de toneladas)

Año	Total	Productos de papel y cartón	Textiles	Plásticos	Vidros	Metales	Basura orgánica	Otros*
1995	30509.6	4292.7	45406	1336.3	1800.1	884.8	15987.0	5754.1
1996	31959.4	4496.7	476.2	1399.8	1885.6	926.8	16746.7	6027.5
1997	29272.4	4118.6	436.2	1282.1	1727.1	848.9	15338.8	5520.8
1998	30550.5	4298.5	455.2	1338.1	1802.5	886.0	16008.5	5761.8
1999	30952.0	4354.9	461.2	1355.7	1826.2	897.6	16218.8	5837.5
2000	30732.9	4324.1	457.9	1346.1	1813.2	891.3	16104.1	5796.2
2001	31488.5	4430.4	469.2	1379.2	1857.8	913.2	16500.0	5938.7
2002	32173.5	4526.8	479.4	1409.2	1898.2	933.0	16859.0	6067.9
2003	32915.7	4904.5	497.0	2014.4	2156.0	1046.7	16592.8	5704.3
2004	34602.0	5160.0	520.1	2115.8	2210.0	1160.0	17440.0	5996.1
2005	35404.9	5275.0	530.0	2161.8	2262.0	1186.1	17968.0	6022.0
2006	36135.0	5388.0	542.0	2208.0	2309.0	1210.0	18335.0	6143.0
2007	36865.0	5489.3	552.0	2223.0	2341.0	1298.0	18576.0	6385.7
2008	37595.0	5199.4	537.6	4094.1	2210.6	1293.2	19707.3	4552.8
2009	38325.0	5300.4	548.0	4173.6	2253.5	1318.3	20090.0	4641.2
2010	40058.8	5540.2	572.8	4362.4	2355.5	1377.9	20998.8	4851.2
2011	41062.5	5679.0	587.2	4471.7	2414.5	1412.5	21524.9	4972.7
2012	42102.8	5822.8	602.0	4585.0	2475.7	1448.3	22070.3	5098.7
2013	42923.3	5936.4	613.8	4674.4	2523.9	1476.5	22500.3	5198.0

*Incluye residuos finos, material de demoliciones, hules y pañal desechable, entre otros.

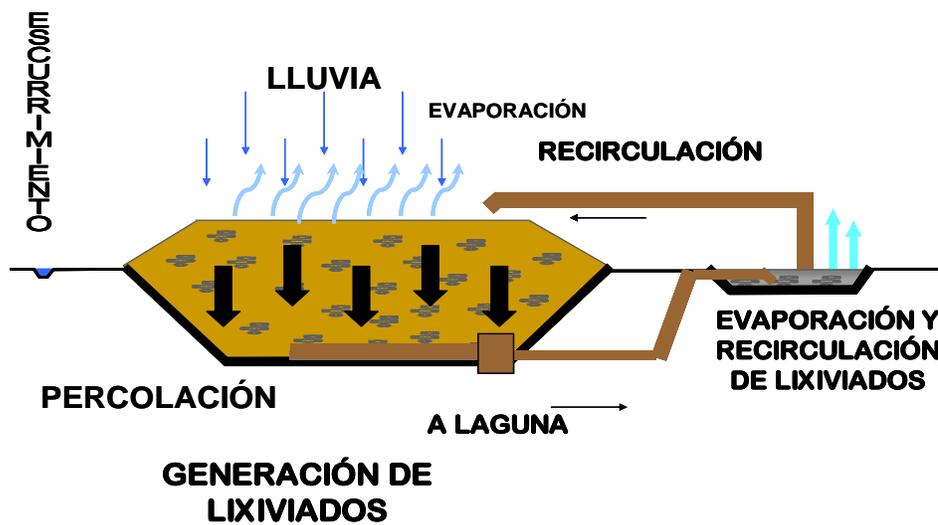
Fuente: INEGI, anuario estadístico y geográfico 2015

1 Semarnat. Informe de la situación del medio ambiente en México. 2012

2 INEGI. Boletín de prensa núm. 121/13, 9 de abril de 2013

2.3 Lixiviados de relleno sanitario

La Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 y la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos en su artículo 5 fracción XVI, definen a los lixiviados como el “líquido que se forma por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los residuos y que contiene en forma disuelta o en suspensión, sustancias que pueden infiltrarse en los suelos o escurrirse fuera de los sitios en los que se depositan los residuos y que puede dar lugar a la contaminación del suelo y de cuerpos de agua, provocando su deterioro y representar un riesgo potencial a la salud humana y de los demás organismos vivos”. Figura 2.2.



Fuente: SEDESOL 2009

Figura 2.2 Formación de lixiviados en un sitio de disposición final.

Los lixiviados se clasifican de acuerdo a su composición; la calidad y cantidad varía significativamente entre sitios y estaciones, dependiendo, entre otros de: contenido de humedad de los residuos dispuestos; hidrogeología específica del sitio; diseño, operación y edad del relleno sanitario; así como de la biodegradabilidad relativa de los diferentes contaminantes orgánicos presentes en el relleno sanitario.

De los residuos sólidos urbanos recolectados en nuestro país, sólo el 11% son separados desde su origen, por lo tanto, los demás son llevados sin ninguna selección. Figura 2.3.¹

¹ INEGI. Boletín de prensa núm. 121/13, 9 de abril de 2013



Figura 2.3 Distribución porcentual de los residuos sólidos urbanos recolectados según tipo de recolección

La disposición final de los residuos, sigue siendo en la mayoría de los casos, la colocación de los mismos directamente en suelo. En la tabla 2.3 se observa la cantidad de residuos dispuesta en diferentes sitios de disposición.

Tabla 2.3 Generación y disposición final de residuos sólidos urbanos. 1995 y 2011
Miles de toneladas

Concepto	1995	2011
Generación	30 509.6	41 062.5
Productos de papel y cartón	4 292.7	5 679.0
Textiles y plásticos	1 790.9	5 058.9
Vidrios	1 800.1	2 414.5
Basura orgánica	15 987.0	21 524.9
Otros	6 638.9	6 385.2
Disposición final	30 509.6	41 062.5
Rellenos sanitarios ^a	5 952.0	26 136.0
Rellenos de tierra controlados ^b	2 555.0	3 427.1
Sitios no controlados ^c	21 283.6	9 519.4
Reciclaje	719.0	1 980.0

Nota: se refiere a la basura producida en las ciudades (incluye desechos generados en casas habitación, comercios, instituciones, lugares de recreación y otros). La cuantificación se realiza siguiendo la metodología estipulada en las Normas Mexicanas existentes.

^a Son sitios que cuentan parcialmente con aplicación y vigilancia de las medidas necesarias para el cumplimiento de las disposiciones establecidas.

^b La organización Panamericana de la Salud lo define como "el lugar para la disposición final de los residuos sólidos que no cuentan con la infraestructura propia de un relleno sanitario, pero donde se dan las condiciones mínimas para la compactación y cobertura diaria de los residuos".

^c Se refiere a la basura generada no recolectada, dispuesta por las diferentes fuentes de generación en tiraderos clandestinos, lotes baldíos o es quemada en los traspatios.

Fuente: Secretaría de Desarrollo Social, citada en: Presidencia de la República. Sexto Informe de Gobierno, 2012. Anexo estadístico. México, D.F., 2012.

En la tabla 2.3 se aprecia que del total de los residuos generados en 2011, el 63.6% se dispone en un relleno sanitario, 8.3% se depositan en un sitio controlado, 23.2% de los residuos se destinan en un sitio no controlado y sólo 4.8% se recicla en el sitio de disposición final, excluye lo separado en diversas fuentes de generación, lo recuperado en contenedores y vehículos de recolección. La cantidad de lixiviados que se genera está directamente relacionada con la cantidad de residuos que se generan. En un relleno sanitario se debe cumplir con disposiciones de la NOM-083-SEMARNAT-2003, que incluye evitar la infiltración de los lixiviados al suelo y al acuífero. En los sitios controlados y no controlados se carece de geomembrana como medida mínima de protección contra el paso de los lixiviados y como puede verse en el 2011, 31.5% de los residuos fueron dispuestos sin tener cuidado del impacto ambiental que pudieran ocasionar al medio.

2.4 Generación de agua residual

La Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales define a las aguas residuales como “las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas”.

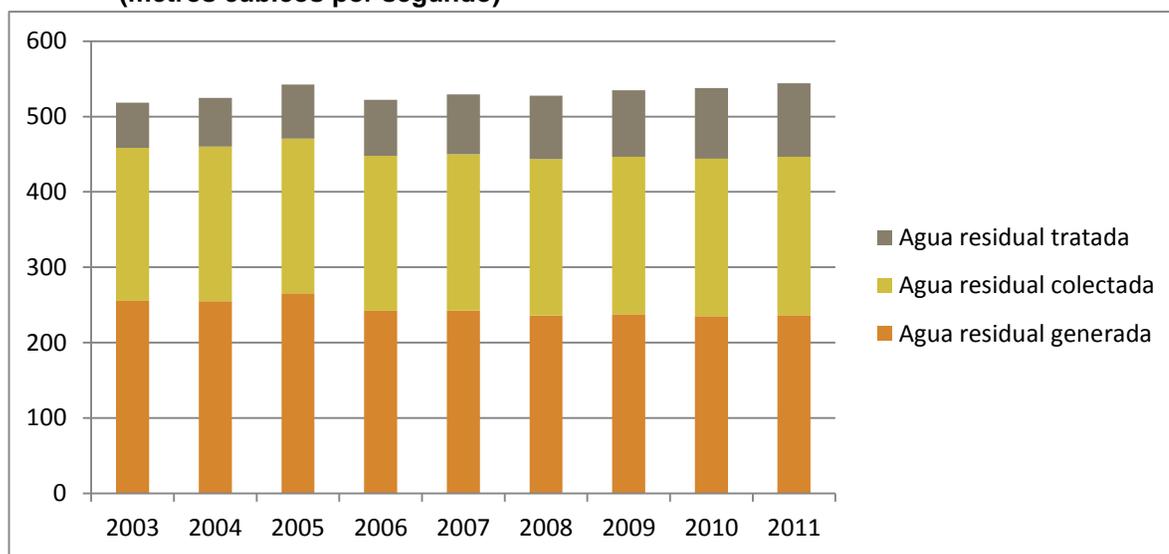
Según registros del INEGI del 2010 a nivel nacional:¹

- 88 de cada 100 municipios tienen servicio de agua potable.
- 30 de cada 100 municipios realizan tratamiento de aguas residuales.
- 77 de cada 100 fuentes de agua para abastecimiento público en los municipios y delegaciones son pozos.
- 15 son manantiales.
- 3 son tomas de ríos.
- 2 son galerías filtrantes y
- 3 son de otro tipo de fuentes de abastecimiento.

De acuerdo a los datos anteriores es notable que es alto el número de municipios que cuentan con agua potable pero desafortunadamente, también es alto el número de municipios que no proporcionan tratamiento a las aguas residuales que generan, lo que representa un impacto ambiental negativo pues el suministro de agua es de alguna fuente natural que es muy fácil de contaminar por las descargas de agua residual sin tratar. Cada vez hay más población y por lo tanto más requerimiento de agua potable, dando como resultado mayor generación de agua residual, pero desafortunadamente no se incrementa en la misma proporción el tratamiento del agua residual, como puede verse en la gráfica 2.4, donde se presenta la cantidad de agua residual generada, colectada y tratada en metros cúbicos por segundo, durante los años de 2003 al 2011. Es muy grande la cantidad de agua a la que no se le da ningún tratamiento.

¹ Instituto Nacional de Estadística y Geografía. *Conociendo México*, 2012

**Gráfica 2.4 Agua residual generada, colectada y tratada
(metros cúbicos por segundo)**



Fuente: Semarnat, compendio estadístico, 2012.

2.5 Estimación de la cantidad anual de lixiviados y efectos adversos generados en los sitios de disposición final

En este apartado se efectúa una estimación del volumen de lixiviados en el relleno sanitario de Tlalnepantla a partir de un balance hidrológico.

2.5.1 Estimación de la generación de lixiviados

La estimación de la generación de lixiviados se realizó a partir del método de Thornthwaite, el cual considera los parámetros de precipitación pluvial, evapotranspiración, escurrimiento superficial, infiltración y acumulación de agua en el suelo. Se trabajó con los datos del municipio de Tlalnepantla.

Precipitación pluvial y temperatura media mensual

Los datos de precipitación pluvial y de temperatura media mensual son los promedios comprendidos de 1963 a 2000. Ver datos en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Precipitación pluvial y temperatura media mensual

Parámetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Precipitación P, (mm)	7.7	14.4	14.9	29.8	65.2	154.2	216.3	214.6	164.2	71.8	10.4	7.8	971.3
Temperatura T, (°C)	11.6	13.9	15.1	16.5	17.1	17.2	16.2	16.2	16.0	14.7	13.3	12.2	15

Fuente: Inegi Estadísticas del Medio Ambiente del Distrito Federal y Zona Metropolitana, 2002

Escurrecimientos superficiales

Es la cantidad de precipitación que se pierde antes de filtrarse en el suelo:

$$E_s = K_e * P$$

E_s = Escurrecimiento superficial mensual en mm

K_e = Coeficiente de escurrecimiento

P = Precipitación mensual en mm

La definición de K_e se basó en la tabla 2.5.

Tabla 2.5 Valores de Coeficiente de Escurrecimiento

Condiciones del Suelo	Ke	
	Sequía	Lluvia
Suelo arenoso plano (S = 2%)	0.05	0.10
Suelo arenoso medio (2 - 7%)	0.10	0.15
Suelo arenoso inclinado (> 7 %)	0.15	0.20
Suelo arcilloso plano (2 %)	0.13	0.17
Suelo arcilloso medio (2 - 7 %)	0.18	0.22
Suelo arcilloso inclinado (> 7 %)	0.23	0.35

Las celdas son cubiertas con arcilla, por lo que se tomó el coeficiente de escurrimiento de suelo arcilloso plano. Los resultados se muestran en la fila 3 de la tabla 2.8.

Evapotranspiración

La evapotranspiración se obtiene a partir de las temperaturas medias mensuales:

$$E_{pn} = 16 (10 T / I)^a$$

E_{pn} : Evapotranspiración potencial mensual en mm “no ajustada”

I : Suma de los índices térmicos mensuales “ i ” del año

a : $6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.79 \times 10^{-2} I + 0.49239$

T : Temperatura media mensual ($^{\circ}\text{C}$)

El índice térmico mensual (fila 4 de la tabla 2.8) se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$i = (T/5)^{1.514}$$

T = Temperatura media mensual del mes considerado, en $^{\circ}\text{C}$

Una vez calculados los índices mensuales “ i ”, se procede a la obtención de la suma de éstos “ I ”, obteniéndose el resultado de:

$$I = \sum \text{ de } i = 63.7$$

Posteriormente, una vez obtenida la suma de los índices térmicos mensuales del año se obtiene el valor de a :

$$a = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.79 \times 10^{-2} I + 0.49239 = 1.5$$

Finalmente, sustituyendo los valores obtenidos en la fórmula de la evapotranspiración potencial no corregida, se transforma en la siguiente expresión, mediante la cual se obtienen los resultados ilustrados en la fila 5 de la tabla 2.8.

$$E_{pn} = 16 (10T/63.7)^{1.5}$$

Para la determinación de la evapotranspiración potencial mensual ajustada se utiliza la siguiente expresión:

$$E_{pc} = E_{pn} \times K_c$$

E_{pc} = Evapotranspiración potencial mensual en mm “ajustada”

E_{pn} = Evapotranspiración potencial mensual en mm “no ajustada”

K_c = Factor de corrección que depende de la latitud del lugar estudiado y del mes que se trate.

Para determinar este último factor de corrección, de acuerdo a Thornthwaite, está dado por:

$$K_c = N_{di}/30 * N_i/12$$

N_{di} = los días de cada mes

N_i = las horas de sol en la latitud correspondiente

En el caso que nos ocupa, las horas máximas de sol en la Latitud Norte de 19°, de acuerdo a Doorenbos y Pruitt, *Las necesidades del agua de los cultivos. Riego y Drenaje*, 1977 se presentan en la tabla 2.6, así como el factor de corrección calculado.

Tabla 2.6 Factor de corrección

Mes	Horas de sol	Días	Factor de corrección
Enero	11.2	31	0.96
Febrero	11.2	28	0.87
Marzo	12.0	31	1.03
Abril	12.6	30	1.05
Mayo	13.0	31	1.12
Junio	13.2	30	1.10
Julio	13.1	31	1.13
Agosto	12.8	31	1.10
Septiembre	12.3	30	1.03
Octubre	11.7	31	1.01
Noviembre	11.2	30	0.93
Diciembre	11.0	31	0.95

Entonces, los valores obtenidos para la evapotranspiración potencial ajustada se tienen en la fila 7 de la tabla 2.8.

Infiltración (In)

Se define como la diferencia entre la precipitación P y el escurrimiento superficial Es:

$$In = P - Es$$

In = Infiltración de agua en el suelo y está dada en mm

P = Precipitación pluvial media mensual, dada en mm

Es= Escurrimiento superficial de cada mes, en mm

Los resultados que se obtuvieron se ilustran en la fila 8 de la tabla 2.8.

Variación del agua del suelo (V)

La variación de agua del suelo, se define como la diferencia que se tiene entre la infiltración del agua en el suelo y la evapotranspiración potencial “ajustada” y está dada por la siguiente expresión:

$$V = In - Epc$$

V = Variación del agua en el suelo en mm

In = Infiltración del agua en el suelo en mm

Epc = Evapotranspiración potencial “ajustada” en mm

Los resultados obtenidos de estas operaciones se tienen en la fila 9 de la tabla 2.8.

Capacidad de Almacenamiento de Humedad del Suelo (Hs)

Como cubierta se tiene arcilla con una capacidad de campo de 450 mm/m, punto de marchitamiento de 150 mm/m, y capacidad de absorción del suelo (Hs) de 300 mm/m, tabla 2.7.

Tabla 2.7 Determinación de la humedad del suelo (USEPA)

Tipo de suelo	Capacidad de campo (mm/m)	Punto de marchitamiento (mm/m)	Agua disponible (mm/m)
Arena fina	120	20	100
Barro arenoso	200	50	150
Barro limoso	300	100	200
Barro arcilloso	375	125	250
Arcilla	450	150	300

Para el espesor de material de cubierta de 30 cm, la capacidad de absorción de humedad del suelo es de 90 mm/m.

Los resultados obtenidos se listan en la fila 10 de la tabla 2.8.

Cambio en el Almacenamiento de Humedad (AHs)

Representa el cambio de humedad del suelo mes con mes, y está dado por la siguiente expresión:

$$\Delta H_s = H_{s1} - H_{s0}$$

ΔH_s = Cambio en el almacenamiento de humedad, en mm

H_s = Capacidad de almacenamiento del suelo, en mm

Los resultados de los cálculos del cambio de almacenamiento de humedad del suelo aparecen en la fila 11 de la tabla 2.8.

Cálculo de la Evapotranspiración Real (ETA)

Representa la cantidad real de pérdida durante un mes dado.

Para aquellos meses en que $(I_n - E_{pc}) > 0$, la evapotranspiración real no está limitada por el contenido de humedad del suelo.

$$E_{pc} = ETA$$

Para los meses donde $(I_n - E_{pc}) < 0$, la evapotranspiración real está limitada por la disponibilidad de humedad del suelo.

$$ETA = I_n - \Delta H_s$$

ETA = Evapotranspiración real, en mm

I_n = Infiltración de agua en el suelo, en mm

ΔH_s = Cambio en el almacenamiento de humedad, en mm

De acuerdo a las consideraciones anteriores la evapotranspiración real para los meses establecidos se lista en la fila 12 de la tabla 2.8.

Cálculo de la Percolación

La percolación se define como el volumen de agua que se puede filtrar al subsuelo y está dada por la siguiente expresión:

$$P = I_n - \Delta H_s - ETA$$

P = Percolación del agua, en mm

I_n = Infiltración de agua, en mm

ΔH_s = Cambio en el almacenamiento de humedad del suelo, en mm

ETA = Evapotranspiración real, en mm

De acuerdo a los cálculos realizados y presentados en la tabla 2.8 se obtuvo una percolación total de 246.4 mm/año.

Cálculo de generación de lixiviados

Para el cálculo de la generación de lixiviados:

$$\text{lixiviado anual (m}^3\text{)} = \sum_{i=1}^{12} \text{Percolación} \times \text{área}$$

$$\frac{246.4}{1000} \text{ m} \times 282700 \text{ m}^2 = 69657.28 \text{ m}^3 / \text{año}$$

$$\frac{69657.28 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}}{365 \frac{\text{días}}{\text{año}}} = 206.33 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 2.21 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

En la generación de lixiviados además de los parámetros anteriores se tiene que la edad, el grado de compactación, precipitación extraordinaria, sequía, humedad de los residuos, etc., influyen en la cantidad que se pueden originar de los mismos.

Se tiene como resultado una estimación de lixiviados generados de 69657.28 metros cúbicos por año, lo que significa una generación de 2.21 litros por cada segundo. Durante un año sería un total de aproximadamente 75 310.45 m³, y considerando que la alguna de lixiviados del relleno sanitario es de 8500 m³, se necesitarían casi 9 lagunas para captar los lixiviados generados durante todo el año. En una visita al relleno sanitario se mencionó que los lixiviados se recirculan para evitar que la laguna se desborde. Esta laguna cuenta con membrana de protección para evitar que los lixiviados se infiltren. Realizan estudios periódicos para asegurarse que los metales pesados estén dentro de la normatividad vigente, asimismo a los trabajadores les practican exámenes para descartar posibles enfermedades causadas por la cercanía del manejo de los residuos sólidos urbanos.

Tabla 2.8 Cálculo del Balance de Agua

No	Parámetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1	Precipitación P, (mm)	7.7	14.4	14.9	29.8	65.2	154.2	216.3	214.6	164.2	71.8	10.4	7.8	971.3
2	Temperatura T, (°C)	11.6	13.9	15.1	16.5	17.1	17.2	16.2	16.2	16.0	14.7	13.3	12.2	15
3	Escurrimiento superficial Es, (mm)	1.001	1.872	1.937	3.874	11.084	26.214	36.771	36.482	27.914	12.206	1.352	1.014	161.721
4	Índice térmico i	3.6	4.7	5.3	6.1	6.4	6.5	5.9	5.9	5.8	5.1	4.4	3.9	63.7
5	Evapotranspiración s/c Epn, (mm)	39.3	51.6	58.4	66.7	70.4	71.0	64.9	64.9	63.7	56.1	48.3	42.4	697.6
6	Factor de corrección k	0.96	0.87	1.03	1.05	1.12	1.1	1.13	1.1	1.03	1.01	0.93	0.95	12.28
7	Evapotranspiración corregida Epc, (mm)	37.7	44.9	60.1	70.0	78.8	78.1	73.3	71.4	65.6	56.7	44.9	40.3	721.8
8	Infiltración In, (mm)	6.7	12.5	13.0	25.9	54.1	128.0	179.5	178.1	136.3	59.6	9.0	6.8	809.6
9	Variación del agua del suelo V, (mm)	-31.0	-32.3	-47.2	-44.1	-24.7	49.9	106.2	106.7	70.7	2.9	-35.8	-33.5	87.7
10	Cap. almacenamiento de humedad Hs, (mm)	0	0	0	0	0	49.9	70	70	70	70	34.2	0.7	364.8
11	Cambio almacenamiento humedad ΔHs , (mm)	-0.7	0	0	0	0	49.9	20.1	0	0	0	-35.8	-33.5	0
12	Evapotranspiración real ETA, (mm)	7.4	12.5	13.0	25.9	54.1	78.1	73.3	71.4	65.6	56.7	44.8	40.3	543.2
13	Percolación P, (mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	86.1	106.7	70.7	2.9	0.0	0.0	266.4

2.6 Estimación de generación de lixiviados mineros

La Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, que establece el procedimiento para caracterizar los jales así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales define a los lixiviados como “líquido proveniente de los residuos, el cual se forma por reacción química, arrastre o percolación y que contiene, disueltos o en suspensión, componentes que se encuentran en los residuos”.

A nivel mundial, en el año 2011, México fue el 1er lugar en producción de plata (20.1 % del total internacional). Los estados de Chihuahua, Durango, Sonora y Zacatecas aportan el 81.3%. Por otra parte, ocupó el 2do lugar en producción de fluorita, de la cual 19.5% se extrae en Coahuila y San Luis Potosí. Y tercer lugar en la producción de bismuto y celestita.

Además de la anterior, México sobresale en la producción de plomo, diatomita, cadmio, molibdeno, zinc, yeso, barita, manganeso y grafito.

A nivel nacional es el estado de Sonora el principal productor de cobre con un 78.6% y oro con 31.1%.

Con los datos anteriores queda claro que la industria minera desempeña un papel muy grande en la economía a nivel nacional.

Uno de los procesos que se utiliza para maximizar la obtención de material de baja ley es la hidrometalurgia, pues se emplean soluciones acuosas como agentes de disolución, donde se tiene un proceso de lixiviación selectiva, es decir una dilución del material, de los componentes valiosos de la mena para posterior recuperación de la solución por métodos diferentes.

Hay tres principales etapas de los procesos hidrometalúrgicos:

1. Disolución del componente deseado presente en la fase sólida.
2. Concentración y/o purificación de la solución obtenida.
3. Precipitación del metal deseado o sus compuestos.

Entre las propiedades que deben tener los agentes lixiviantes, reactivos químicos, son que no deben ser muy costosos, fácilmente recuperables y deben ser bastante selectivos para determinados compuestos. Esto explica que sea un método muy utilizado en minas cerradas donde se tienen minerales de baja ley o en residuos mineros donde sea posible recuperar cierta cantidad de mineral.

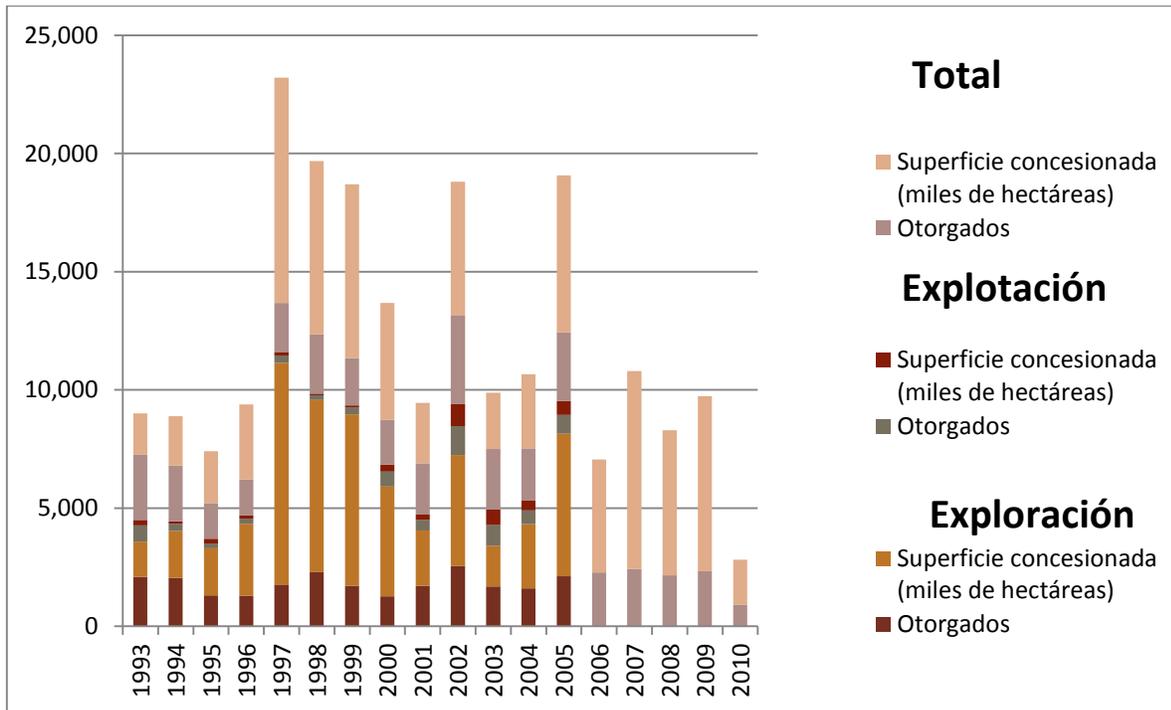
En muchos procesos hidrometalúrgicos, se logran altos niveles de extracción del metal, razón por la cual se ha utilizado demasiado este proceso, lo que significa tener extensiones muy grandes de terreno, por ejemplo, para tener una capacidad de

almacenamiento en la laguna de lixiviación de 1 000 000 m³, para poder tener volúmenes procesados en planta de 1 400 000 m³/mes y de lixiviado extraído de 1 800 m³/mes.

Son cantidades enormes las que se manejan en este proceso, lo que hace que el riesgo ambiental sea también muy grande. Se ocasionan impactos ambientales negativos al suelo, subsuelo, acuífero, flora y fauna aledaña, lo que se agrava debido a que este tipo de instalaciones son a cielo abierto, por lo que también se ve afectada la atmósfera. Uno de los principales problemas ambientales derivado del manejo y disposición de los lixiviados y jales mineros es el drenaje ácido.

En la gráfica 2.5 se puede visualizar el movimiento que se ha tenido en México, respecto a los títulos mineros otorgados desde el año 1993.

Gráfica 2.5 Títulos mineros otorgados y superficie concesionada



Fuente: Semarnat, compendio estadístico, 2012.

Los metales que más destacan en la producción nacional se pueden apreciar en la tabla 2.9.

Tabla 2.9 Volumen de la producción minero metalúrgica por productos seleccionados. 1990 y 2011
Toneladas

Producto	1990	2011
Metales preciosos^a		
Plata (kg)	2 351 561	4 150 347
Oro (kg)	8 548	84 118
Metales industriales no ferrosos^a		
Zinc	322 487	447 948
Cobre	298 695	402 430
Plomo	177 279	182 202
Molibdeno	2 001	10 787
Metales y minerales siderúrgicos		
Carbón mineral no coquizable ^b	4 219 841	13 718 159
Pellets de hierro ^a	5 327 890	7 763 048
Coque ^b	2 337 159	2 121 866
Minerales no metálicos^b		
Fluorita	633 814	1 206 907

Nota: la selección de los productos presentados se realizó con base en el valor de su producción en 2011.

^a Contenido metálico.

^b Volumen mineral.

Fuente: INEGI. *La Minería en México. Edición 1996*. Aguascalientes, Ags., 1997.

INEGI. *Banco de Información Económica (BIE)*. Minería, en: www.inegi.org.mx (10 de agosto de 2012).

Los jales mineros son los residuos provenientes de la concentración de minerales y que la NOM-052-SEMARNAT-2005 distingue de los peligrosos, de los de manejo especial y de los sólidos urbanos. Actualmente, los jales mineros se rigen bajo las especificaciones incluidas en la NOM-141-SEMARNAT-2003, que establece el procedimiento para su caracterización, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales. Para este tipo de residuos se tiene contemplado el desarrollo de un inventario de residuos minerometalúrgicos, así como la reducción de su producción y la promoción de su valorización y manejo integral.

2.7 Estimación de aguas residuales que se descargan sin tratamiento

“El tratamiento de las aguas residuales es esencial para la salud de los ecosistemas, la biodiversidad y la salud humana; para dar cumplimiento a las leyes y normas emitidas al respecto se han habilitado plantas o sitios de tratamiento”. INEGI 2010.¹

En 2010, año de referencia de la información, se registraron 2 mil 354 sitios de descarga de aguas residuales sin tratamiento; el 54% de éstas se localiza en ríos y arroyos. Jalisco, Michoacán, México, Veracruz y Chiapas tienen cada uno más de 100 puntos de descarga de aguas residuales sin tratamiento en ríos y arroyos, concentrando 49% del total nacional: figura 2.4.¹

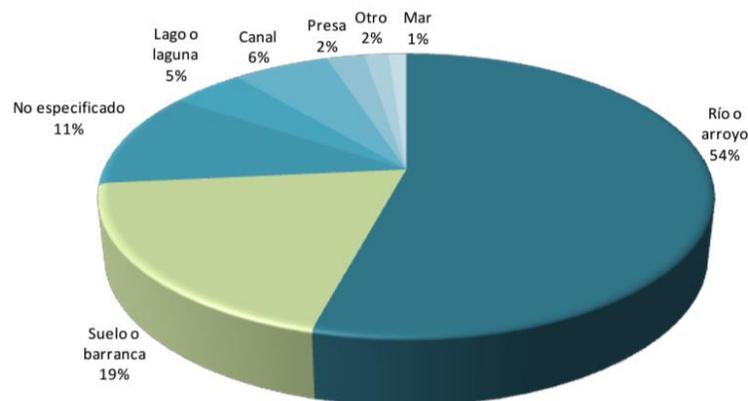


Figura 2.4 Distribución porcentual de descarga de aguas residuales municipales sin tratamiento según tipo de cuerpo receptor

¹ INEGI, Boletín de Prensa número 121/13, abril 2013

Las plantas de tratamiento de aguas residuales de las que se tenía registro en 2011, son 2289. Tabla 2.10.

**Tabla 2.10 Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en operación.
1995 y 2011**

Concepto	1995	2011
Plantas de tratamiento	469	2 289
Capacidad instalada (lps)	48 172	137 082
Volumen de tratamiento (lps)	41 706	97 640

lps: litros por segundo.

Fuente: Comisión Nacional del Agua, citada en: Presidencia de la República. *Sexto Informe de Gobierno, 2012. Anexo Estadístico*. México, DF, 2012.

Con base en la información incluida en este capítulo, se puede hacer notar que no sólo es necesario, sino obligatorio, tener medidas de protección ambiental que garanticen la salud y bienestar de los ecosistemas. Una manera de llevar a cabo esta tarea, es la prevención desde el origen, la minimización de residuos y agua residual, la otra manera de mantener la calidad ambiental es cuidar que los contaminantes presentes en los residuos generados, tanto sólidos como líquidos, estén dentro de los parámetros que establece la normatividad vigente.

La determinación de metales pesados es una herramienta básica que permite identificar la presencia de contaminantes tóxicos que estén fuera del rango permisible, y así poder tomar las medidas correctivas que permitan actuar de manera que se tenga el menor impacto ambiental posible.

2.8 Impacto ambiental y daños a la salud

No hay estadísticas acerca de los lixiviados que pudieran llegar a contaminar aguas superficiales y acuíferos. Sin embargo en el apartado anterior se menciona que del total de residuos que se dispusieron en el año 2011, 23.2% se destinaron en rellenos de tierra controlados y 8.3% en sitios no controlados, lo que da un total de 31.3%, que traducido a miles de toneladas corresponden a 12946.5, sólo en el año 2011. Como consecuencia se ocasiona que todos los lixiviados generados se infiltren llegando incluso a algún acuífero, o dañando al suelo como se reporta en la tesis (Sahagún, 2011), donde al trabajar con suelo y semillas de lechuga, calabaza, cebolla, rábano, frijol y cebollín, expuestos a lixiviados de relleno sanitario, la germinación disminuyó un 50%, con un crecimiento menor, lo que se ve reflejado en el suelo, pues disminuyó su fertilidad, porcentaje de producción y su permeabilidad y aumentó su salinidad, lo que se refleja en la germinación y crecimiento de las semillas.

Además de lo anterior, los lixiviados generados en rellenos sanitarios, no obstante que cuenten con protección para la captación de lixiviados, podrían infiltrarse si ésta llegara a romperse. Considerando además que las lagunas de lixiviados están a cielo abierto, ocasionan impacto a la atmósfera.

En el relleno sanitario de Tlalnepantla se cuenta con una laguna de lixiviados con una capacidad de 8500 m³, la cual llega aproximadamente al máximo de su capacidad con 95%, en el mes de diciembre y en el mes de abril está casi vacía.

Lo anterior refleja que los volúmenes de lixiviado que se generan son considerables. Los lixiviados dependen de la cantidad y calidad de los residuos, así como de la infiltración del agua: precipitación pluvial, cubiertas y evaporación-evapotranspiración.

Efectos sobre la salud humana

“Todas las sustancias son venenosas...la dosis correcta hace la diferencia entre el veneno y el remedio” Paracelso.

Arsénico

Es un elemento muy tóxico para el hombre. Se encuentra en forma elemental y en estados de oxidación trivalente y pentavalente, tanto en compuestos inorgánicos como orgánicos.

La toxicidad del arsénico es compleja, pues depende de la vía de exposición, del estado de valencia y de la forma química (orgánica u orgánica) del compuesto. El arsénico inorgánico es el responsable de la mayoría de los casos de intoxicación en seres humanos.

En cuanto a las especies oxidadas, generalmente las sales inorgánicas de As (III) son más tóxicas que las de As (V) y la solubilidad de los compuestos de arsénico está relacionada con su toxicidad; todos los compuestos solubles son tóxicos.

Se sospecha que el arsénico tiene efectos cancerígenos por la correlación encontrada entre la incidencia de cáncer de la piel por un lado y la ingestión de aguas con más de 0.3 (mg/L) de arsénico por otro.

En términos generales la toxicidad se incrementa en la sucesión de arsenicales orgánicos. Los compuestos pentavalentes son solubles en agua y se absorben más rápidamente por las membranas mucosas, mientras que los compuestos trivalentes se absorben más rápidamente por la piel debido a su mayor liposolubilidad.

El arsénico se deposita en hígado, riñones, corazón, pulmones y en especial en el pelo y las uñas. En los casos de envenenamientos arsenicales crónicos se encuentran en mayor concentración en el pelo. Puede atravesar la barrera placentaria y ocasionar muerte fetal.

Se encuentra en tubos para caldera, semiconductores de alta pureza, rejillas de baterías.

Bario

Elemento altamente tóxico para el hombre: causa trastornos cardíacos vasculares y nerviosos (aumento de presión arterial). Se considera fatal una dosis de 0.8 a 0.9 gramos como cloruro de bario (de 550 a 600 miligramos de bario).

La contaminación del agua por bario puede provenir principalmente de los residuos de perforaciones, de efluentes de refinerías metálicas o de la erosión de depósitos naturales.

Se encuentra en lubricantes, tuberías para rayos-x, bujías.

Cadmio

Este metal pesado es potencialmente tóxico y su ingestión tiene efectos acumulativos en el tejido del hígado y riñones.

En el organismo, algunos iones Ca^{2+} de los huesos pueden ser reemplazados por iones Cd^{2+} , pues ambos iones tienen el mismo estado de oxidación y casi el mismo tamaño. Esta sustitución puede causar fragilidad en los huesos y susceptibilidad a las fracturas.

La contaminación de las aguas superficiales con este metal pesado puede provenir de la corrosión de los tubos galvanizados, de la erosión de depósitos naturales, de los efluentes de refinerías, de metales o de líquidos de escorrentía de baterías usadas o pinturas. Muchos pigmentos usados para la coloración de plásticos o la formulación de pinturas contienen concentraciones elevadas de cadmio. La exposición laboral frente al cadmio se produce en las proximidades de las minas y de las fundiciones.

La vida media del cadmio en el organismo es muy larga y se calcula entre 10 y 30 años, periodo en el cual permanece almacenado en varios órganos, en particular el hígado y los riñones.

Se encuentra en soldaduras, pilas, cables, electrónicos, esmaltes, fungicidas, celdas fotoeléctricas.

Cromo

El estado de la valencia es crítico para la toxicidad de los compuestos de cromo. El cromo hexavalente Cr (VI) es la forma tóxica y cancerígena. El cromo trivalente Cr (III) es un elemento esencial para el metabolismo normal de la glucosa en el ser humano. Los compuestos de cromo se absorben por ingestión, inhalación o contacto con la piel. Las formas solubles del Cr (VI) se absorben con mayor rapidez que las formas trivalentes insolubles. En general, el cromo no se acumula en los tejidos, aunque las formas insolubles inhaladas pueden permanecer en los pulmones. La exposición laboral frente al cromo se produce en la minería y las fundiciones.

Se encuentra en pigmentos, productos de cromado de metales, protector de automóviles.

Mercurio

El mercurio es un metal pesado muy tóxico para el hombre en las formas crónica y aguda. En el tracto intestinal las sales mercuriosas son menos solubles que las mercúricas y, por lo tanto, son menos nocivas. Se considera que dosis de 20 a 50 mg/L en la forma mercúrica son fatales. En términos de toxicidad y de efectos adversos sobre la salud, el metil mercurio

es la forma más importante de mercurio orgánico. Sus efectos son básicamente neurotóxicos y genotóxicos.

En el agua, el mercurio se encuentra principalmente en forma inorgánica, que puede pasar a compuestos orgánicos por acción de los microorganismos presentes en los sedimentos. De estos, puede trasladarse al plancton, a las algas y, sucesivamente, a los organismos de niveles tróficos superiores como los peces, las aves rapaces e incluso al hombre.

El mercurio metálico y el inorgánico se convierten en mercurio metilado por medio de procesos biológicos que se producen en el agua contaminada con este metal. Tanto el metilmercurio como el ión metilo de mercurio, son absorbidos por los tejidos de los organismos vivos. Estas especies químicas se bioacumulan, permanecen durante largos periodos en los tejidos y pueden incorporarse en la cadena alimentaria biomagnificándose. El óxido de mercurio (II), HgO, puede atravesar las barreras hematoencefálica y placentaria.

Se encuentra en amalgamas, electrónicos, espejos.

Plata

Se considera que las personas que ingieren agua con cantidades excesivas de plata pueden presentar decoloración permanente e irreversible de la piel, los ojos y las membranas mucosas.

Se encuentra en reflectores de celdas solares, soldaduras, joyería, material médico, espejos.

Plomo

El plomo es un metal pesado en esencia tóxico con gran capacidad de bioacumulación; puede provocar en el hombre intoxicaciones agudas o crónicas. Es causa de la enfermedad denominada saturnismo.

Los efectos toxicológicos importantes de la acción del plomo en el organismo humano son: atravesar la barrera placentaria, el plomo empieza a ser detectado en el feto entre las 13 y 14 semanas de gestación. En madres expuestas, aumento de abortos espontáneos y aumento de morbimortalidad perinatal. En exposición paterna, hipospermia e incremento de abortos en su pareja. Atravesar la barrera hematoencefálica. Experimentalmente produce cáncer en animales. Estudios epidemiológicos en humanos han encontrado aumento significativo de varios tipos de cáncer, estómago, pulmón y vejiga, pero aún no hay nada definitivo respecto a eventuales acciones cancerígenas o mutagénicas del plomo en el hombre.

Los problemas de salud laboral causados por plomo suceden principalmente en la minería así como en la industria informal de fabricación de acumuladores eléctricos por extracción secundaria de plomo a partir de baterías recicladas.

Se encuentra en acumuladores, aditivos para gasolina, pigmentos.

Selenio

Es raro encontrarlo disuelto en aguas naturales. Su origen, por lo general, está ligado a descargas de residuos mineros, petroleros e industriales, pero también puede provenir de la erosión de depósitos naturales.

Las especies más frecuentes son Se (IV) y Se (VI). Ambas formas son muy estables e independientes una de la otra.

Los efectos del selenio en el hombre son similares a los del arsénico y, al igual que este, puede causar intoxicaciones agudas y crónicas que en algunos casos pueden llegar a ser fatales. Entre los principales síntomas que presentan los intoxicados con selenio están la caída del cabello y las uñas, el adormecimiento de los dedos de las manos y los pies así como problemas circulatorios.

Se encuentra en baterías solares, cerámica, electrónica.

En la tabla 2.11 se tiene un resumen de los daños a la salud y al ambiente.

Tabla 2.11 Daños a la salud y al ambiente

Sustancia	Daños a la salud	Daños al ambiente
Arsénico (As)	Toxicidad crónica o aguda (por acumulación), pérdida de energía y fatiga, cirrosis, dermatitis. Se acumula en los huesos, hígado y riñones.	Contaminación del agua por la industria metalúrgica, de frutas o vegetales en los que se usaron plaguicidas o bien, de mariscos.
Bario (Ba)	Efectos tóxicos en el corazón, vasos sanguíneos y nervios.	Contaminación del agua principalmente de residuos de perforaciones, de efluentes de refinerías metálicas o de la erosión de depósitos naturales.
Cadmio (Cd)	Acumulación en el hígado, riñones y huesos. Respirar altos niveles de cadmio produce lesión a los pulmones e ingerirlo produce daños a los riñones. En dosis altas, puede producir la muerte. Ingerir alimentos o tomar agua con cadmio irrita el estómago e induce vómitos y diarrea. El cadmio y sus compuestos con cancerígenos.	El cadmio entra al aire de fuentes como la minería, industria y al quemar carbón y desechos domésticos. Las partículas pueden viajar largas distancias antes de depositarse en el suelo o en el agua. El cadmio entra al agua y al suelo de vertederos y de derrames o escapes en sitios de desechos peligrosos.
Cromo (Cr)	Cr (VI) cancerígeno en seres humanos.	Contaminación del agua por la erosión de depósitos naturales y los efluentes industriales que contienen cromo: acero, papel y curtiembres, principalmente.
Mercurio (Hg)	Vómitos, náuseas, somnolencia, diarrea	El mercurio puede contaminar el agua o la tierra a causa de depósitos naturales de este metal o por el que se

	<p>sanguinolenta, afecciones al riñón.</p> <p>Posible cancerígeno. Una alta exposición puede dañar el cerebro, riñones, y en embarazadas daña al bebé, provocando retraso mental, en el andar o el habla, falta de coordinación, ceguera y convulsiones.</p>	<p>emite en los basureros. El metilmercurio es bioacumulable, es decir se acumula en los tejidos de peces.</p>
<p>Plomo (Pb)</p>	<p>Anemia, convulsiones, inflamaciones.</p> <p>El plomo puede causar daño a los riñones, sistemas nervioso y reproductivo.</p>	<p>El plomo no se degrada. Compuestos de plomo son transformados por la luz solar, el aire y el agua. Cuando se libera al aire puede ser transportado largas distancias antes de sedimentar. Se adhiere al suelo. Su paso a aguas subterráneas depende del tipo de compuesto y de las características del suelo.</p>

Estado de México. Programa de protección civil para basureros 2012. Sustancias químicas peligrosas en pilas y baterías

Lewis, R. Diagnóstico y tratamiento en medicina laboral y ambiental, capítulo 27-Metales (Cromo). 4a ed. 2007

Metcalf and col. Wastewater engineering. USA. 2003.

Ramírez, Augusto. El cuadro clínico de la intoxicación ocupacional por plomo. An Fac Med, Lima 2005

Robbins. Patología Estructural y Funcional. Sexta edición. Mc Graw Hill

Sánchez Felipe. Arsenicismo. Rev Cent Dermatol Pascua, vol 9, núm 1 ene-abr 2000

Vargas, Lidia. Tratamiento de agua para consumo humano. OPS/CEPIS, Lima 2004

3. Metodología

La metodología de trabajo consistió en tres etapas.

La primera consistió en conocer la técnica de espectroscopía de absorción atómica por flama y capacitación para el manejo y calibración del equipo.

La segunda etapa incluyó el muestreo, preparación y análisis de las muestras. Las muestras de lixiviados de relleno sanitario y del agua residual fueron obtenidas en el lugar de origen, la muestra de lixiviados mineros fue proporcionada por la Facultad de Química, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Laboratorio de Análisis Químico.

La tercera etapa fue la comparación de los resultados de los análisis de las muestras realizados por la autora con los resultados de los análisis que realizó la Facultad de Química, a las mismas muestras. Además, se realizó la comparación de los resultados proporcionados por el operador del relleno sanitario de Tlalnepantla de los lixiviados que ahí se generan con los obtenidos por la autora. Todo esto con la finalidad de corroborar el funcionamiento del equipo de absorción atómica que se tiene en el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, así como para comprobar el manejo, preparación y análisis de las muestras.

3.1 Espectroscopía de absorción atómica

La espectroscopía de absorción atómica es una técnica analítica para la determinación cuantitativa o cualitativa de un elemento en una muestra. Está basada en la absorción de radiación de energía por átomos libres.

En la tabla periódica se indican los elementos que se pueden analizar por espectroscopía de absorción atómica. El color azul indica el uso de óxido nitroso-acetileno. El color amarillo indica el uso de aire-acetileno tabla 3.1.

Tabla 3.1 Tabla con elementos que se analizan por espectroscopía de absorción atómica

The image shows a periodic table where elements are color-coded based on the reagent used for their analysis in atomic absorption spectroscopy. A legend at the top indicates that yellow represents 'Air/Acetylene' and blue represents 'Nitrous Oxide/Acetylene'. A detailed box for Antimony (Sb) provides its atomic number (51), atomic mass (121.75), and spectral bandwidth (0.12 nm). The PerkinElmer logo is visible in the bottom right corner.

Para entender la técnica, es necesario iniciar con el estudio del átomo. El átomo está compuesto de un núcleo rodeado de electrones. Cada elemento tiene un número específico de electrones, mismos que ocupan orbitales definidos. El nivel de energía más bajo corresponde a la configuración electrónica del átomo conocida como estado basal o fundamental. Si se aplica la energía correcta a un átomo, dicha energía será absorbida por el átomo y un electrón externo será promovido a un estado menos estable o estado excitado. Como este estado es inestable, el átomo inmediata y espontáneamente retornará a su posición estable, y será emitida una energía radiante equivalente a la cantidad de energía absorbida inicialmente en el proceso de excitación.

El proceso es ilustrado en la figura 3.1. Nótese que el paso 1 del proceso, la excitación, es forzada por un suministro de energía. El proceso de decaimiento en el paso 2, involucra la emisión de luz que ocurre espontáneamente.

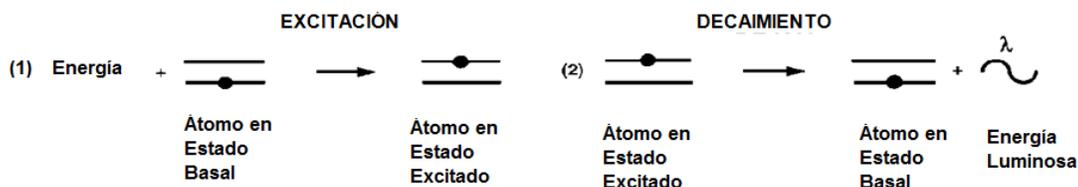


Figura 3.1 Procesos de excitación y decaimiento.

Si luz de longitud de onda característica de un átomo impacta sobre éste mismo, en estado fundamental, el átomo puede absorber la luz y entrar a un estado excitado en un proceso conocido como absorción atómica. Este proceso está ilustrado en la figura 3.2. La luz, la cual es la fuente de excitación del átomo, es simplemente una forma específica de energía. La capacidad de un átomo de absorber a longitudes de onda específicas es utilizada en la espectroscopía de absorción atómica.

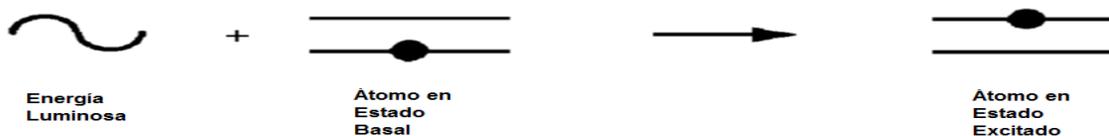


Figura 3.2. Proceso de absorción atómica.

La cantidad de medida de interés en absorción atómica, es la medida de luz a cierta longitud de onda la cual es absorbida cuando la luz pasa a través de una nube de átomos. Cuando el número de átomos en la trayectoria de la luz incrementa, la cantidad de luz absorbida incrementa en una forma predecible. Midiendo la cantidad de luz absorbida, puede realizarse una determinación cuantitativa de la cantidad del elemento presente. El uso de fuentes de luz especiales y una cuidadosa selección de longitud de onda permite la determinación cuantitativa de los elementos individuales en la presencia de otros. La nube de átomos requerida para mediciones de absorción atómica es producida proporcionando la energía térmica suficiente para la disociación de los compuestos químicos en átomos libres. Aspirando una solución de la muestra en una flama alineada en el haz de luz sirve para este propósito. Bajo las condiciones propias de la flama, la mayoría de los átomos permanecerán en estado fundamental y serán capaces de absorber luz a la longitud de onda analítica de una fuente de luz, figura 3.3. La velocidad y facilidad a la cual puede hacerse una

determinación precisa y exacta con esta técnica, hace que la absorción atómica sea uno de los métodos más populares para la determinación de metales.

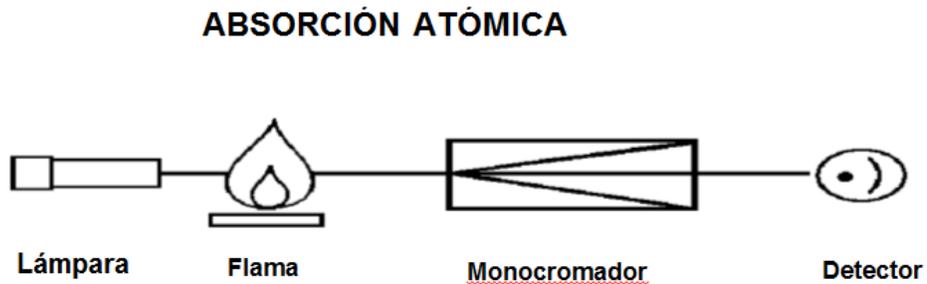


Figura 3.3. Esquema básico de absorción atómica

El proceso del análisis cuantitativo por absorción atómica está ilustrado en la figura 3.4. Luz a la longitud de onda específica con intensidad inicial, I_0 , es enfocada a la flama que contiene átomos en estado basal. La intensidad de luz inicial es disminuida por una cantidad determinada de concentración de átomos en la flama. La luz es dirigida a un detector donde la intensidad reducida, I , es medida. La cantidad de luz absorbida es determinada por comparar I e I_0 .

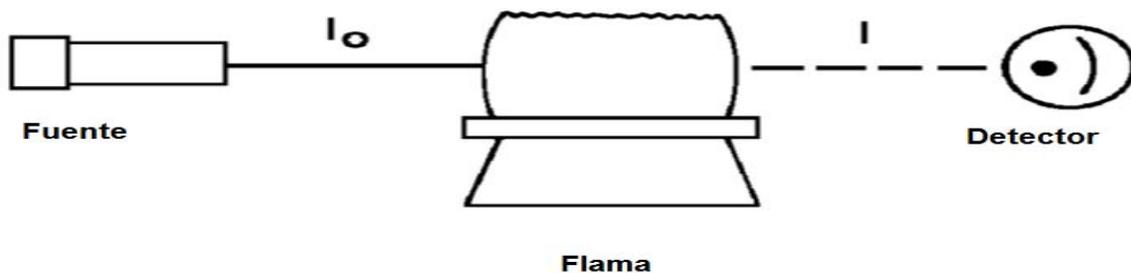


Figura 3.4. El proceso de absorción atómica.

La absorbancia A, es una cantidad puramente matemática

$$A = \log (I_0/I)$$

La absorbancia es el término más conveniente para caracterizar la luz absorbida en la espectroscopía de absorción, pues esta cantidad tiene una relación lineal con la concentración.

La ley de Beer define esta relación:

$$A = abc$$

Donde:

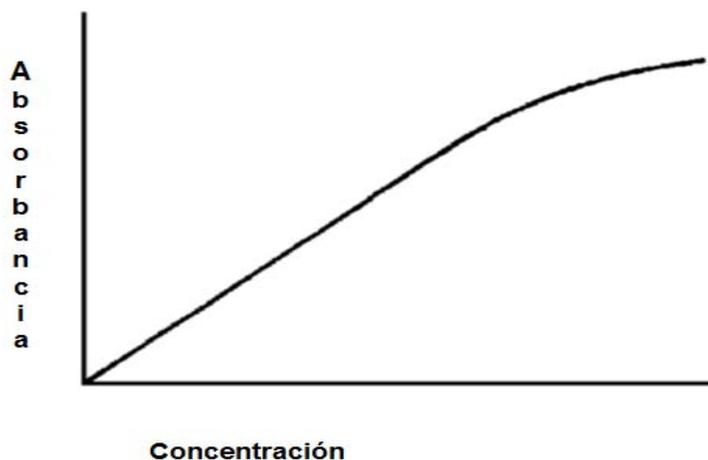
A, es la absorbancia.

a, es el coeficiente de absorción, una constante característica de las especies absorbentes a una longitud de onda específica.

b, es la longitud de la ruta de la luz interceptada por las especies de absorción en la flama y

c, es la concentración de las especies que absorben.

Esta ecuación simplemente establece que la absorbancia es directamente proporcional a la concentración de la especie absorbente para un conjunto dado de condiciones instrumentales gráfica 3.1.



Gráfica 3.1 Concentración vs Absorbancia.

Este comportamiento, directamente proporcional, entre la absorbancia y la concentración se observa en la absorción atómica. Cuando se miden las absorbancias de soluciones estándar conteniendo las concentraciones conocidas de analito se trazan los datos de absorbancia vs concentración, estableciéndose una relación de calibración similar a la de la gráfica 3.1. En la región donde se observa la relación de la ley de Beer, de la calibración se obtiene una línea recta.

Como se muestra, a medida que la concentración y la absorbancia se incrementan, un comportamiento no ideal en el proceso de absorción puede causar una desviación de la linealidad.

Después de que se establece la calibración, la absorbancia de las soluciones de concentraciones desconocidas pueden ser medidas y la concentración determinada a partir de la curva de calibración.

Cada espectrómetro de absorción debe tener componentes que cumplen con los tres requisitos básicos que se muestran en la figura 3.5. Debe ser: (1) una fuente de luz ; (2) una celda de muestra, y (3) un medio de medición de la luz específica.

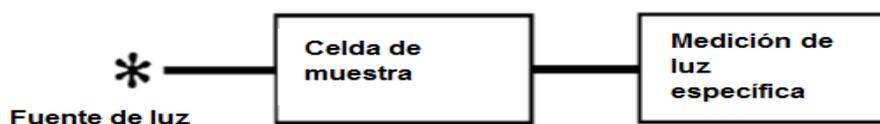


Figura 3.5 Requerimientos de un espectrómetro.

En la absorción atómica, estas áreas funcionales son implementadas por los componentes ilustrados en la figura 3.6. Se requiere de una fuente de luz que emite las líneas atómicas afiladas del elemento a ser determinado. La fuente más ampliamente utilizada es la lámpara de cátodo hueco. Estas lámparas están diseñadas para emitir el espectro atómico de un elemento en particular. La lámpara se selecciona dependiendo del elemento a determinar.

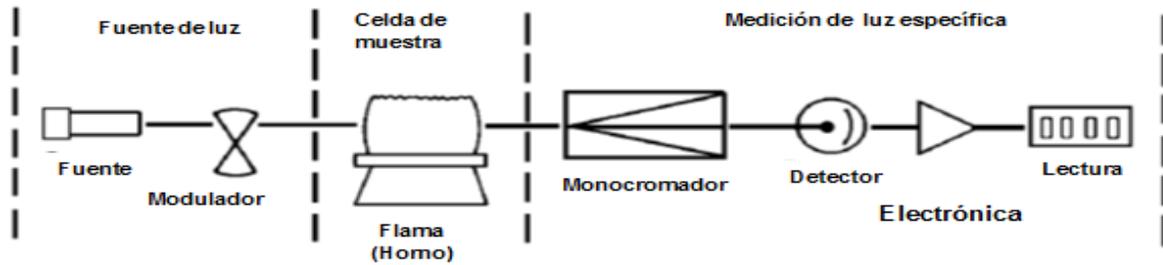


Figura 3.6. Espectrómetro básico de absorción atómica

Para que la absorción atómica ocurra, La celda de muestra, o atomizador, del espectrómetro debe producir átomos en estado fundamental. Esto involucra la aplicación de energía térmica para romper los enlaces que mantienen unidos a los átomos como las moléculas. Lo más ampliamente utilizado es la flama.

La figura 3.7 muestra una vista de un sistema de quemador de absorción atómica. En este diseño de "premezcla", la solución de la muestra es aspirada a través de un nebulizador y se atomiza como un aerosol fino en la cámara de mezcla. Aquí la muestra de aerosol, se mezcla con los gases combustible y oxidante y es llevada a la cabeza del quemador, donde la combustión y la atomización de la muestra ocurren.

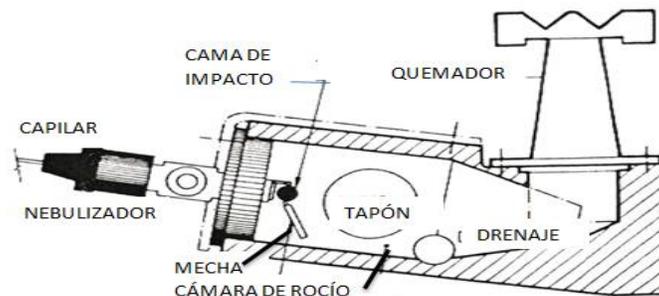


Figura 3.7. Sistema de quemador

Sólo una parte de la solución de muestra introducida en la cámara de combustión por el nebulizador se utiliza para el análisis. Las gotas más finas de neblina de la muestra, o aerosol, son llevadas con los gases de combustión a la cabeza del quemador, donde se produce la atomización. El exceso de muestra se retira de la cámara de premezcla a través de un drenaje. El drenaje utiliza una trampa de

líquido para evitar que los gases de combustión se escapen a través de la línea de drenaje.

Puesto que la energía térmica de la llama es responsable de producir las especies absorbentes, la temperatura de la flama es un parámetro importante que rige el proceso de la flama. Las temperaturas para algunas llamas que se han utilizado en la absorción atómica se incluyen en la tabla 3.2. Las dos llamas más utilizadas para la absorción atómica son aire-acetileno y óxido nitroso acetileno. Mientras que la flama de aire-acetileno es satisfactoria para la mayoría de los elementos determinados por absorción atómica, la flama más caliente de óxido nitroso-acetileno es necesaria para muchos elementos refractarios que forman.

Tabla 3.2

Temperaturas de llamas	
Oxidante-Combustible	°C
Aire-Metano	1850-1900
Gas Natural-Aire	1700-1900
Aire-Hidrógeno	2000-2050
Aire-Acetileno	2125-2400
Óx nitroso-Acetileno	2600-2800

Fuente: *Beatty, Richard. Concepts, instrumentation and techniques in atomic absorption spectrophotometry. The Perkin Elmer Corporation*

La absorción atómica por flama es un método rápido y preciso de análisis. Las determinaciones de concentraciones de analito en la región de concentración mg/L son de rutina para la mayoría de los elementos. Sin embargo, la necesidad de análisis de metales traza a niveles de $\mu\text{g/L}$ e incluso sub $\mu\text{g/L}$, requieren de técnicas más sensibles, como vapor frío de mercurio, generación de hidruros u horno de grafito. En virtud de lo anterior, no fue posible analizar todos los elementos de la NOM-052-SEMARNAT-2005, ya que al intentar analizar los elementos arsénico, cadmio, mercurio, plata y selenio resultó que las concentraciones eran demasiado bajas. En un futuro próximo se pretende continuar con el manejo completo del equipo.

3.1.1 Manejo y calibración del equipo

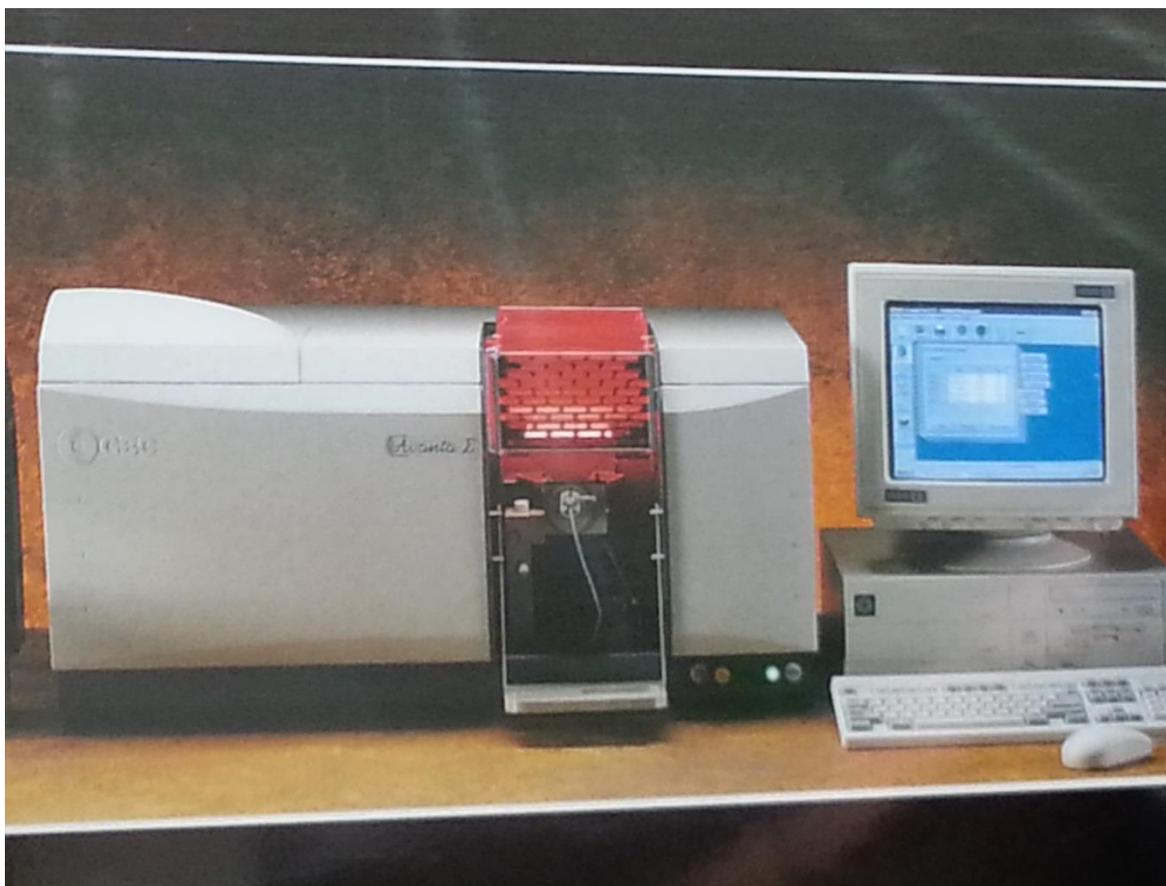


Figura 3.8 Espectrómetro de absorción atómica GBC Avanta

El equipo empleado para este trabajo es un espectrómetro de absorción atómica GBC Avanta, figura 3.8. La técnica utilizada fue espectroscopía de absorción atómica por flama. Los gases empleados fueron aire-acetileno y las lámparas de cátodo hueco, figura 3.9.

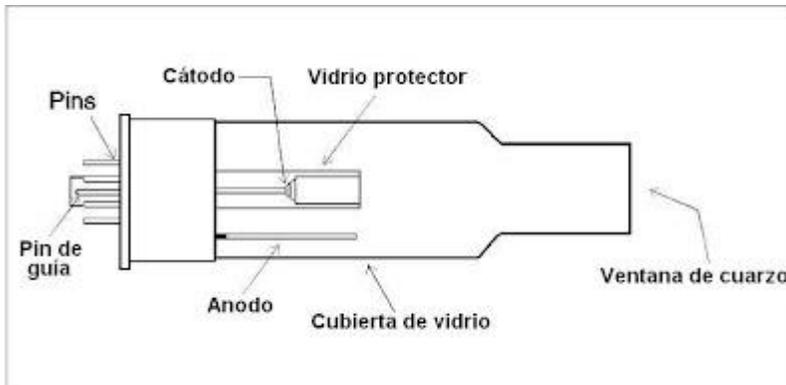


Figura 3.9 Lámpara de cátodo hueco

La calibración del equipo fue con cobre, un estándar de 5 ppm debe dar 0.8 de absorbancia.

Se llevó una bitácora con cobre. Cada vez que se prendía el equipo, se verificaba que estuviera calibrado.

Por cada elemento que se quiera analizar, primero es necesario crear el método donde se introducen los estándares con concentraciones conocidas, y se obtiene el gráfico de calibración donde se debe tener una R^2 de 0.998 como mínimo.

Una vez que se tiene el equipo calibrado ya se puede iniciar con el análisis de las muestras.



Figura 3.10 Estándares

3.2 Muestras

Las muestras se recolectaron una vez que se tuvo la certeza de haber calibrado bien el equipo de absorción atómica.

3.2.1 Obtención

Son tres diferentes tipos de muestras: lixiviados de relleno sanitario, lixiviados mineros y agua residual doméstica.

La primera de las muestras se obtuvo del relleno sanitario de Tlalnepantla. Figura 3.11.



Figura 3.11 Laguna de lixiviados de relleno sanitario de Tlalnepantla.

La segunda fue proporcionada por la Facultad de Química, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Laboratorio de Análisis Químico y su origen es la mina de cobre La Caridad ubicada en el municipio de Nacozari, Sonora, figura 3.12.



Figura 3.12 Laguna de lixiviados mineros.

La tercera muestra, agua residual cruda, fue tomada en la planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad Universitaria, la muestra es de agua residual cruda, figura 3.13.



Figura 3.13 Planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad Universitaria

3.2.2 Preparación

El muestreo se basó en la NMX-AA-003-1980. Aguas residuales.- Muestreo.

Todo el material que estuvo en contacto con las muestras fue lavado con agua desionizada, jabón libre de fosfatos, y colocado dentro de un recipiente con agua una solución de ácido nítrico al 5%, enjuagándose con agua desionizada y dejándose secar.

Todas las muestras fueron instantáneas.

La muestra proveniente de la mina fue entregada ya lista para analizar, lo único que se hizo fue filtrarla previamente al análisis. Estuvo en refrigeración a 4°C hasta que se analizó.

Las muestras de lixiviado minero y de agua residual fueron preparadas de la misma manera, basados en la NMX-AA-051-SCFI-2001 Análisis de agua – Determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas- Método de prueba.

3.2.3 Análisis

Todas las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Ambiental y en el Laboratorio de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Química.

Los análisis realizados en la Facultad de Química fueron realizados en un equipo ICP-OES, espectroscopio de emisión óptica, único equipo de este tipo que hay en la UNAM.

En el Laboratorio de Ambiental se utilizó un equipo de absorción atómica GBC Avanta.

Cada muestra se dividió en tres y cada una de ellas fue leída cinco veces por el equipo, reportándose en cada lectura el promedio de las mismas.

3.3 Comparación de la concentración de metales pesados en diversos residuos

Los resultados del análisis de las muestras fueron los siguientes:

Tabla 3.3 Resultados del Laboratorio de Ambiental

Muestra	Parámetro (mg/L)		
	Bario	Cromo	Plomo
Lixiviado de relleno sanitario	0.410	0.360	0.541
Lixiviado minero	0.010	0.020	0.337
Agua residual	0.013	0.025	0.836

Tabla 3.4 Resultados del Laboratorio de la Facultad de Química

Muestra	Parámetro (mg/L)		
	Bario	Cromo	Plomo
Lixiviado de relleno sanitario	0.3160	0.2671	0.0975
Lixiviado minero	0.0050	0.0192	0.0448
Agua residual	0.0124	0.0249	0.0228

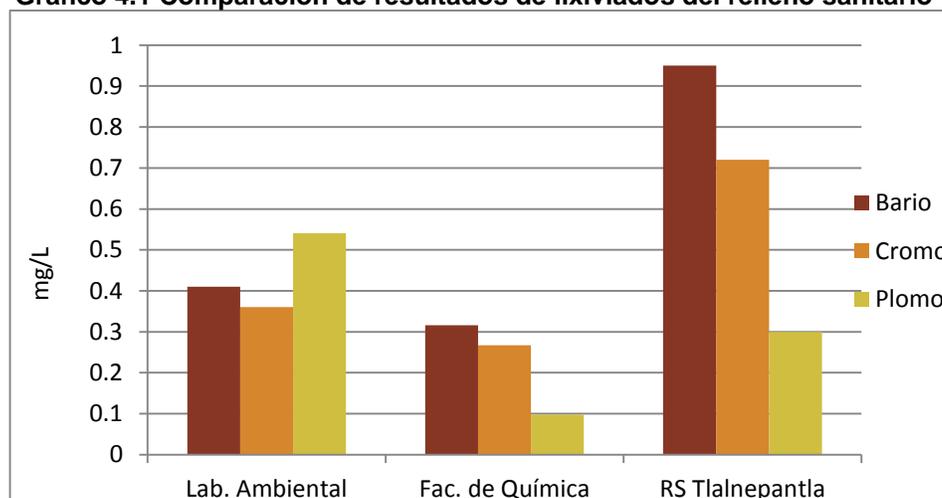
4. Resultados y análisis

Se realizó el análisis de los resultados del Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental comparándolos con los obtenidos en la Facultad de Química y los proporcionados por el relleno sanitario de Tlalnepantla. Adicionalmente se tiene el comparativo con los límites que marca la legislación correspondiente. Tablas 4.1, 4.2 y 4.3.

Tabla 4.1 Comparación de resultados de lixiviados del relleno sanitario

Parámetro	Lab. Ambiental	Fac. de Química	RS Tlalnepantla	Límite máximo permisible (mg/L)		
				NOM-001	NOM-002	NOM-052
Bario	0.410	0.3160	0.950	-	-	100
Cromo	0.360	0.2671	0.720	1.5	1	5.0
Plomo	0.541	0.0975	0.300	1.0	2	5.0

Gráfico 4.1 Comparación de resultados de lixiviados del relleno sanitario

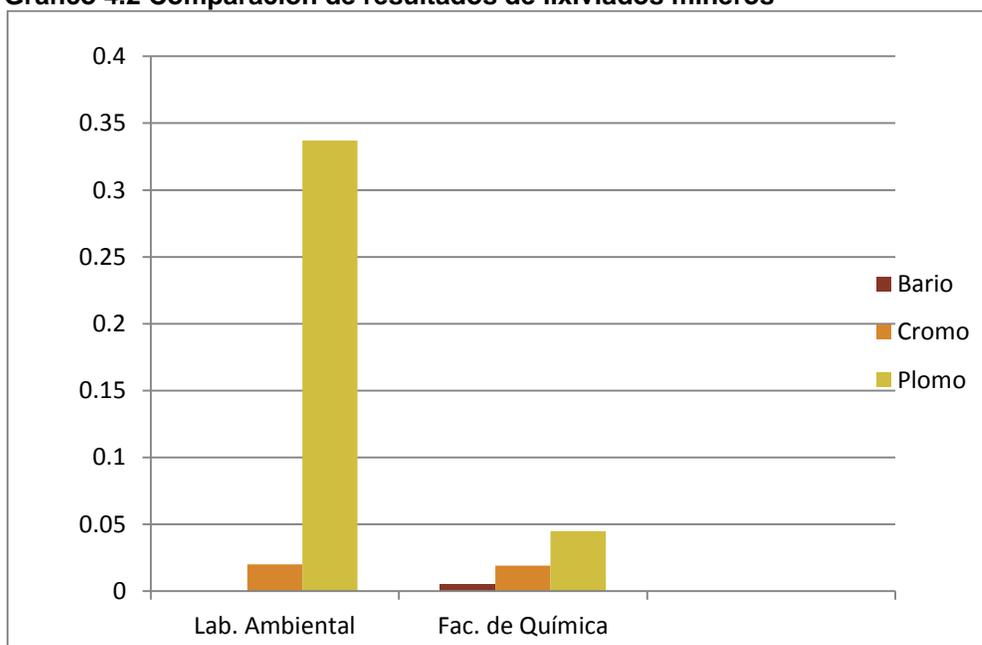


Como se muestra en el gráfico, los resultados de los análisis proporcionados por el relleno sanitario son los más altos y, siendo los más bajos los realizados por la Facultad de Química. Ninguno rebasa los límites que marca la normatividad.

Tabla 4.2 Comparación de resultados de lixiviados mineros

Parámetro	Lab. Ambiental	Fac. de Química	Límite máximo permisible (mg/L)		
			NOM-001	NOM-002	NOM-052
Bario	0.010	0.0050	-	-	100
Cromo	0.020	0.0192	1.5	1	5.0
Plomo	0.337	0.0448	1.0	2	5.0

Gráfico 4.2 Comparación de resultados de lixiviados mineros

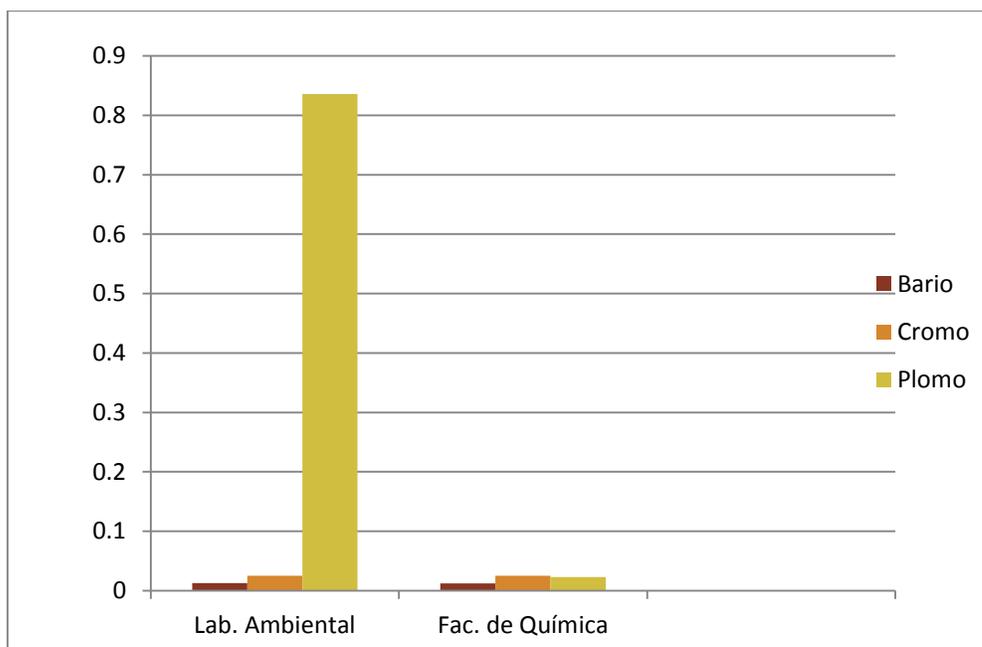


En este análisis el plomo resultó tener un valor muy alto en el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental que el obtenido en la Facultad de Química, pero aún así no se rebasa el límite máximo permisible.

Tabla 4.3 Comparación de resultados de agua residual cruda

Parámetro	Lab. Ambiental	Fac. de Química	Límite máximo permisible (mg/L)		
			NOM-001	NOM-002	NOM-052
Bario	0.013	0.0124	-	-	100
Cromo	0.025	0.0249	1.5	1	5.0
Plomo	0.836	0.0228	1.0	2	5.0

Gráfico 4.3 Comparación de resultados de agua residual



En este caso como en el de la gráfica anterior, el plomo analizado en el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental resultó estar muy por arriba de lo reportado por la Facultad de Química, sin rebasar ningún límite máximo permisible.

5. Conclusiones

De acuerdo a los objetivos planteados en este trabajo se logró:

- Manejar el equipo de espectroscopía de absorción atómica.
- Desarrollar la técnica de espectroscopía de absorción atómica por flama.
- Comprobar el buen funcionamiento del equipo de espectroscopía de absorción atómica mediante la lectura de estándares en el equipo y la comparación de resultados de análisis realizados en otros equipos.
- Determinar cualitativa y cuantitativamente tres de los ocho elementos considerados como contaminantes tóxicos en la NOM-052-SEMARNAT-2005.
- Corroborar que al menos esos elementos no rebasan los límites máximos permitidos por las normas oficiales mexicanas.
- Observar que el agua residual tratada en Ciudad Universitaria sale con menor carga contaminante.
- Comprobar el cuidado que tienen en el relleno sanitario de Tlalnepantla del manejo de los lixiviados que se generan.

Cabe aclarar que, aunque no se rebasan los límites máximos permitidos de los elementos analizados, no significa que no exista riesgo a la salud o al ambiente. Lo que representan los resultados de los análisis es el hecho de que la cantidad de contaminante que existe por litro de lixiviado o de agua residual no excede lo que marcan las normas mexicanas vigentes, pero en caso de existir un derrame o infiltración al suelo o al agua limpia, en grandes cantidades, entonces sí existe el riesgo de padecer daños, como los indicados en el apartado 2.8 Efectos sobre la salud humana y el trabajo de tesis (Sahagún, 2011) en el que se comprobó el daño a la cosecha en un suelo contaminado con lixiviados de relleno sanitario de Tlalnepantla.

Lo anterior resulta preocupante por el hecho de que hay sitios de disposición de residuos que no cuentan con geomembrana que retenga los lixiviados generados, agua residual que no es tratada, así como las grandes lagunas de lixiviados mineros que son simplemente abandonadas y que están sin ninguna protección al ambiente.

El daño ocasionado por no tomar medidas preventivas puede ser muy grande como se refleja en la información desarrollada de daños a la salud y al ambiente.

Por lo que es importante estar analizando periódicamente las concentraciones de los contaminantes.

Una técnica analítica capaz de analizar trazas de hasta 67 elementos de la tabla periódica es la espectroscopía de absorción atómica, lo que ha generado que sea la técnica analítica más empleada en todo el mundo para este fin.

Las variaciones entre los resultados de las muestras puede deberse, entre otros, a los siguientes aspectos:

- Los resultados del relleno sanitario de Tlalnepantla fueron proporcionados para poder tener un comparativo con los resultados del Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental y de la Facultad de Química; el muestreo y análisis fueron realizados por una empresa externa en el año de 2011.
- Las muestras de lixiviados del relleno sanitario de Tlalnepantla y del agua residual cruda de la planta de tratamiento de Ciudad Universitaria que se analizaron en los laboratorios de Ingeniería Sanitaria y Ambiental y Química corresponden al año 2013.
- Los valores más altos reportados de los análisis de los lixiviados del relleno sanitario por la empresa externa, definitivamente tienen relación con la cantidad y tipo de basura que se tenía al momento de realizar el muestreo y el análisis.
- En el caso de los lixiviados mineros, los resultados de los análisis están acordes al tipo de suelo que se tiene en la zona minera, tiene alto contenido de sulfuro de cobre y muy bajo contenido de sulfuro de plomo.
- La diferencia de valores entre los laboratorios de Ingeniería Sanitaria y Ambiental y de la Facultad de Química pueden ser a errores sistemáticos en el uso del equipo del primero, ya que se observan resultados mayores en todos los casos, la calibración del equipo del laboratorio de Ambiental es manual y en el de la Facultad de Química es en forma automática, así también diferentes analistas. Otra posibilidad podría ser la calidad de los estándares, ya que al estar fuera de vigencia pudieron alterar los valores de los resultados; se trabajó con ellos previa revisión del personal de la Facultad de Química manifestando que aún era posible utilizarlos. Se realizó una prueba con ellos en un equipo de absorción atómica del laboratorio de la Facultad de Química y los resultados obtenidos fueron muy cercanos a los obtenidos en el laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.
- Por último, cabe resaltar que son equipos diferentes y como tal tienen características estáticas y dinámicas propias, como la resolución, sensibilidad, tiempo de respuesta así como límites de detección.

Recomendaciones

- Es necesario continuar trabajando en el manejo del equipo para dominar las técnicas analíticas que se pueden utilizar y así aprovechar al máximo todo el potencial del equipo, analizado trazas de elementos que pudieran estar presentes en diferentes muestras.
- Preparar manuales para el muestreo, preservación y tratamiento de las muestras, para evitar errores al momento del análisis en el equipo.
- Dar mantenimiento preventivo al equipo.

ANEXOS

Glosario de Términos

Aguas residuales

Las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas.

Aguas pluviales

Aquellas que provienen de lluvias, incluyen las que provienen de nieve y granizo.

Contaminantes

Son aquellos parámetros, que en determinadas concentraciones pueden producir efectos negativos en la salud humana y en el ambiente.

Límite máximo permisible

Valor o rango asignado a un parámetro el cual no debe ser excedido en la descarga de aguas residuales.

Lixiviado

Líquido que se forma por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los residuos y que contiene en forma disuelta o en suspensión, sustancias que pueden infiltrarse en los suelos o escurrirse fuera de los sitios en los que se depositan los residuos y que puede dar lugar a la contaminación del suelo y de cuerpos de agua, provocando su deterioro y representar un riesgo potencial a la salud humana y de los demás organismos vivos.

Metales pesados

Son aquellos que, en concentraciones por encima de determinados límites, pueden producir efectos negativos en la salud humana, flora o fauna.

Parámetro

Variable que se utiliza como referencia para determinar la calidad del agua.

Relleno sanitario

Obra de infraestructura que involucra métodos y obras de ingeniería para la disposición final de los residuos urbanos y de manejo especial, con el fin de controlar, a través de la compactación e infraestructura adicionales, los impactos ambientales.

Residuos sólidos urbanos

Los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que se utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos.

Suelo

Cuerpo receptor de descargas de aguas residuales que se utiliza para actividades agrícolas.

Método de preparación de muestras

Limpieza del material

- Lavar el material con jabón libre de fosfatos
- Enjuagar con agua desionizada
- Dejar en reposo en una solución de ácido nítrico al 5%
- Secar el material y/o tomarlo directamente del que está en solución

Digestión de la muestra

- Tomar 30 ml de muestra en un vaso de precipitados
- Adicionar una disolución, en una relación 1:1, de ácido nítrico con agua desionizada, 5 (mL) ác. Nítrico: 5 (mL) agua desionizada
- Colocar un vidrio de reloj como tapa
- Poner sobre la parrilla a fuego medio entre 1 y 2 horas
- Evitar ebullición
- Enfriar
- Si hay sólidos suspendidos filtrar con papel filtro
- Aforar a 100 (mL)
- Refrigerar hasta su análisis

Fotos

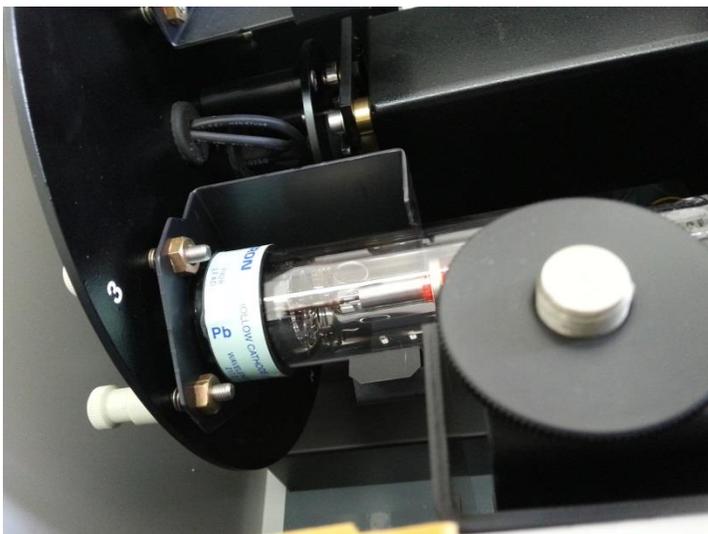
Estándares



Espectrómetro de absorción atómica en el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria



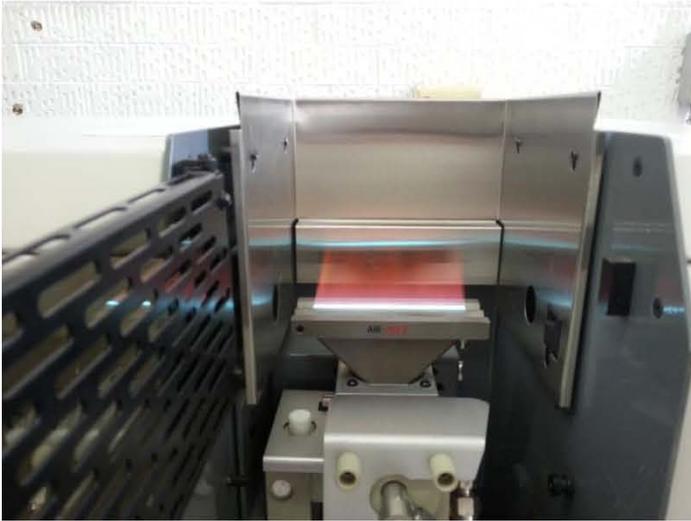
Lámpara de plomo



Encendiendo el equipo



Equipo encendido



Bibliografía

- APHA-AWWA-WPCF, *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*, 17^a ed., trad. Diorki, S.A. Madrid, 1992.
- BEATY, Richard and Kerber, Jack, *Concepts, Instrumentation and techniques in atomic absorption spectrophotometry*, 2a ed., USA, The Perkin Elmer Corporation, 1993.
- DÍAZ Juárez, Pablo, *Impacto económico de los residuos sólidos en la Ciudad de México*, tesina de licenciatura, México, UNAM, Facultad de Economía, 2012.
- ESTADO DE MÉXICO, *Programa de protección civil para basureros*, 2012.
- GBC SCIENTIFIC EQUIPMENT, *Manuales de operación*.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA, Anuario estadístico y geográfico de los Estados Unidos Mexicanos 2015.
- _____, *Boletín de prensa núm 121/13*, México, 9 de abril de 2013.
<http://inegi.com.mx>
- _____.
- _____, *Censos y conteos de población y vivienda, Series históricas*, México, junio 2010.
- _____, *Conociendo México*, México, 2012.
- _____, *Estadísticas del medio ambiente del Distrito Federal y Zona Metropolitana*, México, 2012.
- _____, *México de un vistazo*, México, 2012.
- LEWIS, R, *Diagnóstico y tratamiento en medicina laboral y ambiental*, 4^a ed., Manual moderno, 2007.
- LÓPEZ Rosado, Diego G., *Los servicios públicos de la Ciudad de México*, México, Porrúa, 1976.
- LÓPEZ Ruiz, Miguel, *Normas técnicas y de estilo para el trabajo académico*, México, UNAM, 2004.
- METCALF & EDDY INC, *Wastewater engineering*. Mc Graw Hill, USA, 2003.

NORMA MEXICANA, NMX-AA-003-1980, *Aguas residuales-muestreo*.

_____, NMX-AA-051-SCFI-2001, *Análisis de agua, determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas, método de prueba*.

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-001-SEMARNAT-1996, *Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales*.

_____, NOM-002-SEMARNAT-1996, *Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal*.

_____, NOM-052-SEMARNAT-2005, *Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos*.

_____, NOM-083-SEMARNAT-2003, *Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial*.

_____, NOM-141-SEMARNAT-2003, *Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales*.

ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, *Tratamiento de agua para consumo humano*. Lima, 2004, <http://bvsde.paho.org/>.

RAMÍREZ, Augusto, "El cuadro clínico de la intoxicación ocupacional por plomo", *Anales de la Facultad de Medicina, Universidad Nacional Mayor de San Marcos*, Lima, 2005.

ROBBINS y col., *Patología estructural y funcional*, 6ª ed., USA, Mc Graw Hill, 2000.

SÁNCHEZ, Rodríguez y col., *Arsenicismo*, *Rev Cent Dermatol Pascua*, vol 9, núm 1, ene-abr 2000.

SAHAGÚN ARAGÓN, Carla, *Análisis de pruebas ecotoxicológicas para determinar la afectación de los lixiviados que se infiltran a áreas de cultivo próximas a los sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos*, tesis de licenciatura, México, UNAM, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, 2011.

SANTOS MÁRQUEZ, María Isabel, *Análisis microbiológico del agua de pozos, residual, tratada y de riego utilizada en Ciudad Universitaria*, tesis de licenciatura, México, UNAM, Facultad de Química, 2010.

SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, Informe de la situación del medio ambiente en México, 2012.

_____, *Compendio de estadísticas ambientales*, México, 2012.

TCHOBANOUGLOUS, George et al, *Solid wastes engineering principles and management issues*, 1a ed., USA, Mc Graw Hill, 1977.