



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN

“ CUANTIFICACIÓN DE METALES PESADOS
EN SUELOS DEL MUNICIPIO DE
CUAUTITLÁN IZCALLI POR ABSORCIÓN
ATÓMICA”

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
QUÍMICO FARMACÉUTICO BIÓLOGO
P R E S E N T A:
EDGAR MUÑOZ RAMÍREZ

ASESORES: M. EN C. JULIO C. BOTELLO POZOS
DRA. ALMA L. REVILLA VÁZQUEZ

CUAUTITLÁN IZCALLI, EDO. DE MÉXICO

2002

IMPRESO CON
FALTA DE CRÉDITO



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLÁN



Departamento de
Exámenes Profesionales

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
P R E S E N T E

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

"Cuantificación de Metales pesados en suelos del Municipio de Cuautitlán
Izcalli por Absorción Atómica".

que presenta el pasante: Edgar Muñoz Ramírez
con número de cuenta: 9656524-3 para obtener el título de :
Químico Farmacéutico Biólogo

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 12 de Diciembre de 2001

PRESIDENTE

Q.M. Cecilia J. González Ibarra

Cecilia J. González Ibarra

VOCAL

Q.F.B. Delia Reyes Jaramillo

Delia Reyes

SECRETARIO

M. en C. Julio C. Botello Pozos

Julio C. Botello Pozos

PRIMER SUPLENTE

Q.F.B. Elia Granados Enriquez

Elia Granados Enriquez

SEGUNDO SUPLENTE

Q.F.B. Salvador Zambrano Martínez

Salvador Zambrano Martínez

PAGINACIÓN

DISCONTINUA

Mi mas sincero Agradecimiento:

A DIOS: Por haberme permitido dar un paso más hacia delante, por estar siempre conmigo, por la oportunidad de vivir y por todo aquello que me has dado.

A mi Madre: Dolores Ramírez (†), Por todo el inmenso amor que me diste a pesar de que en ocasiones te hice desatinar, por todo lo que aprendí de ti en el corto tiempo que te tuve a mi lado, por ser Madre y Padre a la vez, donde quiera que estés, quiero que sepas que: ¡Te Amo! y que espero algún día volverte a ver.

A Elvia Ramírez: Por el amor de madre que me has dado, por todas las noches en vela que te he hecho pasar, por estar conmigo en los momentos difíciles de mi vida, por los consejos y el apoyo que me has brindado.

A Celerino Muñoz: Por haberme aceptado como parte de tú familia, por creer en mi y apoyarme, por todo el esfuerzo que ha significado para ti el sacarme adelante. Este logro también es tuyo.

A Ángela Redonda: Por no doblegarte ante las situaciones más difíciles que se te han presentado, por todo lo que has hecho por mí y por mis hermanas, por cuidarnos a la falta de mamá. ¡Gracias por todo Abuelita!

A mis hermanas: Georgina y María de los Angeles, porque a pesar de nuestra separación, siempre hemos tratado de estar unidos y de apoyarnos mutuamente. ¡Las quiero mucho!

A Rafael, Rocío, Guillermina y Jaime por quererme como a un hermano, por motivarme a salir adelante, por ayudarme en los momentos difíciles, por escucharme y por todo los consejos que me han dado.

A mi familia: Que de alguna u otra forma me han ayudado, especialmente a mi tía Heriberta, a mi tío Luis y a mis primos Luis, Porfirio, Judit, Remedios, Josefina y Angélica.

A todos mis sobrinos, especialmente a Erick, Jorge, Isaac Eliu, Uriel, Oscar, Adal, Belén, Cristian, Daniel, Daniela. Espero este logro siembre en ustedes los deseos de superación y de salir adelante.

A la sección de Química Analítica por todas las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo, especialmente a la maestra Ceci y a la maestra Lupita.

A mi asesor Julio C. Botello: Por ayudarme en la elaboración de este trabajo, por su paciencia, dedicación y aportaciones brindadas en el desarrollo del mismo.

A mi asesora Alma L. Revilla: No solo por su ayuda en la elaboración de este trabajo, sino también por la confianza, consejos, amistad y apoyo que me ha brindado.

A mis mejores amigos: Agustín, Juan Pablo y Julio con quienes he compartido grandes momentos y a quienes los considero como a unos hermanos.

A Gabriela, Judit y Pilar: Por soportarme durante todo este tiempo, por los momentos que hemos compartido y por todo lo que hemos hecho juntos.

A la generación 23 especialmente a mis amigos(as): Alicia A., David, Nancy, Bety, Yesenia, Rosa María, Nuria, Claudia, Miriam Aidé, Miriam Sarabia, Elivet y Minerva.

A la FES-Cuautitlán y a todos los maestros por entregarme sus conocimientos y experiencias, especialmente a: Guadalupe Franco, Guadalupe Sevilla, J. C. Botello, Teresa Ramírez, M^a Ester Revuelta, Jorge Torres, M^a Eugenia Posada, Leticia Zúñiga, José Luis Covarrubias.

A la Química Celia Elena Valencia por las sugerencias, aportaciones e información proporcionada en la realización de este proyecto.

A todas aquellas personas que han sido, son y serán parte importante de mi vida.

Al CONACYT por el apoyo otorgado al proyecto J 32518-T.

Después de un Tiempo

*Después de un tiempo aprendemos la sutil diferencia
Entre sostener una mano y encadenar un alma,
y aprendemos que el amor no significa apoyo,
que la compañía no significa seguridad,
y empezamos a aprender que los besos no son contratos
Y que los regalos no son promesas, y empezamos a aceptar las derrotas
Con la cabeza en alto y los ojos abiertos, con la gracia de un adulto,
No con el pesar de un niño,
Y aprendemos a construir todos nuestros caminos en el Hoy
porque el terreno del mañana es demasiado inseguro para los planes.
Después de un tiempo aprendemos incluso que la luz del sol quema,
Si la recibimos con demasiada cantidad.
Por lo tanto, plantemos nuestro propio jardín y decoremos
Nuestra propia alma, en lugar de desear que nos traigan flores.
Y aprenderemos que en verdad, podemos soportar...
Que en realidad somos fuertes,
Y que en verdad valemos.*

Verónica A. Shoffstall.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN

OBJETIVOS

CAPITULO 1. PARTE EXPERIMENTAL

1.1	Zona de estudio	1
1.2	Muestreo	1
1.3	Toma de la muestra	1
1.4	Tratamiento de la muestra	2
1.4.1	Secado	2
1.4.2	Molido	2
1.4.3	Tamizado	2
1.5	Reactivos y material	3
1.6	Equipo	4
1.7	Digestión de las muestras	4
1.8	Manejo del Equipo de Absorción Atómica	5
1.9	Atomización por Flama	7
1.10	Horno de Grafito	7
1.11	Generador de Hidruros	9
1.12	Medición de pH	10
1.13	Sistematización de los resultados	11
1.14	Tratamiento de los datos	12

CAPITULO 2. RESULTADOS Y ANÁLISIS

2.1	Atomización por Flama	13
2.2	Generador de Hidruros	18
2.3	Generación de vapor frío	18
2.4	Horno de Grafito	21
2.5	Medición de pH	27

ÍNDICE GENERAL

2.6	Análisis estadístico del municipio de Cuautitlán Izcalli	28
2.6.1	Análisis de varianza completamente al azar (zonas del municipio de Cuautitlán Izcalli)	28
2.6.2	Análisis de varianza completamente al azar (autopista)	29
2.6.3	Análisis de varianza completamente al azar (autopista y zonas del municipio).....	30
3.	CONCLUSIONES	32
4.	APÉNDICE 1. GENERALIDADES DEL SUELO	
4.1	Contaminación del suelo.....	33
4.1.1	Contaminantes orgánicos	33
4.1.2	Contaminantes inertes	34
4.1.3	Contaminantes reciclables	34
4.1.4	Contaminantes varios	34
4.1.5	Urbanización	34
4.2	Fuentes de contaminación al suelo	34
4.2.1	Urbanas	34
4.2.2	Industriales	35
4.2.3	Agrícolas	35
4.3	Contaminación por metales pesados	35
4.3.1	Oligoelementos o micronutrientes	36
4.3.2	Metales pesados sin función biológica conocida	36
4.4	Procedencias de los metales pesados en suelo	40
4.4.1	Origen natural	40
4.4.1.1	Residuos domésticos	40
4.4.2	Fuentes Antropogénicas	42
4.5	Factores del suelo que afectan su acumulación y disponibilidad	43
4.5.1	pH	43
4.5.2	Textura	44
4.5.3	Materia orgánica	44

ÍNDICE GENERAL

4.5.4	Capacidad de intercambio	44
4.5.5	Condiciones redox	45
4.5.6	Óxidos e hidróxidos de Fe y Mn	46
4.5.7	Carbonatos	46
4.5.8	Salinidad	46
4.6	Descontaminación de suelos contaminados	47
4.6.1	Técnicas de aislamiento	48
4.6.2	Técnicas de Descontaminación	48
4.6.2.1	Extracción por fluidos	49
4.6.2.2	Aireación	49
4.6.2.3	Arrastre	50
4.6.2.4	Lavado	50
4.6.2.5	Tratamiento químico	51
4.6.2.6	Tratamiento electroquímico	52
4.6.2.6.1	Migración	52
4.6.2.6.2	Electroósmosis	52
4.6.2.6.3	Electroforesis	52
4.6.2.7	Tratamiento térmico	53
4.6.2.8	Tratamiento Microbiológico	53

5. APÉNDICE 2. FUNDAMENTOS DE LA ESPECTROFOTOMETRIA DE ABSORCIÓN ATOMICA

5.1	Teoría de Absorción y Emisión Atómica	55
5.1.1	Ley de Lambert-Beer	55
5.2	Instrumentación	56
5.2.1	Fuente de radiación	57
5.2.2	Monocromador	58
5.2.3	Detector	58
5.2.4	Amplificador	59
5.2.5	Dispositivo de lectura	59
5.3	Sistemas de atomización	59

ÍNDICE GENERAL

5.3.1	Atomización por Flama	59
5.3.2	Atomización por calentamiento electrotérmico (Horno de grafito)	60
5.3.3	Generación de Hidruros	61
5.3.3.1	Tratamiento de la muestra	61
5.3.3.2	Formación de Hidruros	62
5.3.3.3	Atomización	63
5.3.4	Generación de Vapor Frío (Análisis de Mercurio)	63
5.3.4.1	Tratamiento de la muestra	63
5.3.4.2	Atomización	64
6.	BIBLIOGRAFÍA	65
7.	ANEXOS	67

INTRODUCCIÓN

El Municipio de Cuautitlán Izcalli se fundó en el año de 1973 y cuenta con una población de 417 647 habitantes (de acuerdo al censo de 1995). Este municipio cuenta con una importante base industrial que representa su mayor y más importante potencial económico y que muestra gran diversidad de ramas. Para el desarrollo de esta actividad existen seis parques industriales: Cuamatla, Condominio Industrial Cuamatla, La luz, La Joya, Parque Industrial Cuautitlán y Xhala. en los que se ubican aproximadamente 1 337 empresas (*Plan de desarrollo municipal 1997-2000. pp.26*), que han provocado asentamientos espontáneos, situados principalmente al sur del Municipio y que han deteriorado sus recursos naturales. Por su ubicación con respecto a la Ciudad de México. Cuautitlán Izcalli ha sido un centro de atracción demográfico, y se prevé que será uno de los primeros municipios que recibirá parte del crecimiento de los próximos años. debido también a sus condiciones geográficas y grado de urbanización.

Al momento de fundar Cuautitlán Izcalli el uso del suelo agrícola se vio afectado porque se tomaron con ese propósito los terrenos más aptos para la agricultura. actualmente, se siguen disminuyendo por la expansión irregular del área urbana y continuaran a favor de los usos urbanos e industriales.

Las actividades que más impactan al ambiente son: La industria manufacturera, la industria de la construcción, la agricultura de temporal y riego, el transporte y explotación de minas y canteras entre otras.

Existe en el Municipio la problemática ambiental derivada de la contaminación de Agua, suelo y aire. El agua de los ríos, arroyos y presas esta contaminada principalmente por la deposición de residuos sólidos y por las descargas de aguas residuales de origen doméstico e industrial. que no cuentan con un tratamiento previo. El depósito de residuos sólidos de origen doméstico se hacen en un tiradero al aire libre, situado al norte de la colonia La Piedad, Contaminando el suelo.

El aire esta contaminado por fuentes fijas (industrias) y móviles (Vehículos automotores) que circulan sobre las vías primarias.

Las condiciones ambientales de Cuautitlán Izcalli y sus recursos naturales están determinados por las características de un Municipio eminentemente urbano, por lo que la flora y la fauna son considerablemente reducidas; como se mencionó anteriormente, el

acelerado proceso de urbanización ha provocado una degradación ambiental importante en el aire, suelo y cuerpos de agua y sus principales indicadores así lo reflejan en la generación de basura, altos índices de la contaminación en la calidad del aire, principalmente en la porción sur del municipio, la contaminación del agua de los ríos, arroyos y presas ha aumentado considerablemente.

Por lo anterior, es importante determinar datos puntuales de la composición del suelo para conocer el impacto en el ambiente que se puede dar en el municipio, a causa de su rápido crecimiento, tanto industrial, comercial y demográfico.

OBJETIVOS:

- Determinar la presencia de metales contaminantes (plomo, mercurio, cadmio, cobre, cromo, platino, paladio, zinc y arsénico), en suelos del Municipio de Cuautitlán Izcalli, mediante la técnica de absorción atómica, para conocer el impacto ambiental originado por el rápido crecimiento, tanto industrial, comercial y demográfico que se ha dado en este municipio.
- Muestrear durante cuatro semanas consecutivas, el tramo de la autopista México-Querétaro seleccionado realizando un tratamiento previo a la muestra, cuantificándolas con la técnica analítica de Absorción Atómica, para evaluar la cantidad presente de dichos elementos en suelos.
- Obtener los resultados y sistematizarlos, para compararlos con los reportados en la norma oficial mexicana NOM-001-Ecol-1996, y con base en ello determinar el grado de contaminación de este municipio.
- Utilizar la Absorción Atómica, variando la lámpara y el tipo de atomización de acuerdo a cada elemento, como un método muy importante en la determinación de elementos presentes en muestras ambientales, para determinaciones que van del orden de partes por billón a partes por millón.
- Generar una base de datos, recopilando la información obtenida en el presente trabajo, para dar un seguimiento de las cantidades presentes de dichos metales en la zona de análisis en estudios posteriores, con la información proporcionada tomar medidas de control de la contaminación y/o utilizar tratamientos de recuperación del suelo en el caso de encontrar niveles mayores a los permitidos.

Parte

Experimental

1.1 ZONA DE ESTUDIO

El municipio de Cuautitlán Izcalli, se localiza en la parte noroeste de la cuenca de México. Tiene una extensión territorial de 109.92 Km², colinda al norte con el municipio de Tepotzotlán y Cuautitlán México, al Este con Cuautitlán México y Tultitlán, al Sur con Tlalnepantla de Baz y Atizapan de Zaragoza, al Oeste con Villa Nicolás Romero y Tepotzotlán. ⁽¹²⁾ Cuautitlán Izcalli se erigió como una respuesta al crecimiento desmedido y sin planificación de la zona metropolitana de la ciudad de México. Fue diseñado para albergar hasta 1 600 000 habitantes así como a un número importante de industrias, por lo que se presenta como una alternativa excelente para los habitantes de la zona conurbada de la ciudad de México que deciden emigrar. Estos hechos han ocasionado un crecimiento de los asentamientos urbanos que influyen en el deterioro ambiental del aire, suelo y cuerpos de agua que si bien es cierto aún no es tan grave como en el Distrito Federal, contribuirá en el deterioro del medio ambiente local.

1.2 MUESTREO

La toma de las muestras de suelo se realizó en dos etapas, en una primera etapa se tomaron muestras durante 4 semanas consecutivas (mes de Octubre del 2000) de la Autopista México-Querétaro en el tramo comprendido entre la Quebrada y la entrada a la zona industrial Cuamatla (Km. 38) mediante un muestreo probabilístico, el cual consistió en tomar 5 muestras cada semana a distancias regulares en el tramo de muestreo en ambos lados de la autopista. Y en una segunda etapa se tomaron 20 muestras representativas del municipio de Cuautitlán Izcalli mediante un muestreo estratificado, para lo cual fue necesario dividir el área del municipio en 4 zonas, cuidando que uno de los ejes coordenados fuera el mismo para toda el área, los puntos de muestreo de cada zona se seleccionaron mediante un muestreo simple al azar ⁽¹³⁾. En el anexo 1 se muestra un mapa del municipio de Cuautitlán Izcalli en donde se observan los puntos de muestreo.

1.3 TOMA DE LA MUESTRA

La toma de la muestra se llevo a cabo con ayuda de una pala derecha, con la cual se rasco en forma de "V" desde la superficie en cada punto de muestreo hasta una profundidad de 15cm. ^(13, 18), posteriormente con la pala se rebano una de las orillas procurando tomar la

muestra desde la superficie hasta el fondo, las muestras fueron colocadas en bolsas de polietileno y etiquetadas. ⁽¹³⁾

1.4 TRATAMIENTO DE LA MUESTRA. ^(13,18, 22)

Previo al análisis fue necesario darle un tratamiento a cada una de las muestras, el cual consistió en los siguientes pasos:

1.4.1 SECADO:

En condiciones naturales los suelos poseen grados muy diferentes de humedad y antes de proceder a su análisis, las muestras deben ser secadas para evitar los cambios que se producen en el estado químico de los iones y en la materia orgánica del suelo. además de que generalmente los resultados se expresan teniendo como base el peso del suelo seco.

Las muestras fueron secadas en una estufa a 40°C durante 16 hrs. ⁽¹⁸⁾

1.4.2 MOLIDO:

Una vez secas las muestras, los agregados del suelo fueron molidos golpeándolos ligeramente con un pistilo en un mortero de porcelana.

1.4.3 TAMIZADO:

Sólo tienen un verdadero interés analítico las partículas con un diámetro menor o igual a 2mm, en cuya superficie se verifican casi la totalidad de los procesos físicos y químicos del suelo. por ello, las muestras fueron pasadas, antes de analizarlas, a través de un tamiz con orificios de 2mm de diámetro. ⁽¹³⁾

Después de tamizar y debido a que la cantidad de muestra necesaria para realizar el análisis es muy pequeña (0.5g) fue necesario realizar la técnica de "conificación y cuarteado" para de esta forma obtener una muestra representativa. Esta técnica consiste en depositar el polvo en una superficie horizontal, mediante una espátula, y cada palada sucesiva se añade al eje del cono obtenido en la adición previa. A continuación se transforma de nuevo todo el cono en otro, repitiendo este proceso, con el propósito de mezclar la tierra. Luego se aplasta el cono y se divide en cuatro partes iguales trazando dos diámetros perpendiculares. Se combina el material de las cuartas partes de las dos

diagonales opuestas y se transforma en otro cono; se coloca aparte el material de las otras dos cuartas partes. Se continua el proceso de conificación y cuarteado hasta que se obtiene una muestra del tamaño descado. (8, 21, 22)

1.5 REACTIVOS Y MATERIAL.

REACTIVOS:

- HNO_3 concentrado (J. T. Baker. 65.6%).
- HCl concentrado (J. T. Baker, 37.7%).
- Agua desionizada (Tipo I),
- Yoduro de Potasio (KI),
- Borohidruro de sodio (NaBH_4).
- Cloruro de estaño II ($\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$),
- NaOH ,
- Gas acetileno, calidad comercial estándar.
- Aire, purificado y secado a través de un filtro que elimine humedad,
- Gas Nitrógeno, Alta pureza (99.995%).

MATERIAL:

1. Vasos de precipitado de 100ml.
2. Vidrios de reloj
3. Tubos de grafito,
4. Celda de cuarzo,
5. Papel filtro Whatman 40
6. Embudos de vidrio
7. Matraces aforados de 100ml.
8. Matraces aforados de 50ml.
9. Lámparas de cátodo hueco de los elementos a analizar.
10. Reactivos estándar de los elementos a analizar.
11. Pipetas volumétricas de 1, 2, 3, 4, 5 y 10 ml.
12. Micropipetas

13. Bolsas de polietileno,
14. Espátula,
15. Pala derecha,
16. Regla

1.6 EQUIPO:

- Espectrofotómetro modelo SpectrAA-800 (Varian, Australia)
- Horno de Grafito (GTA 100, Varian, Australia)
- Generador de hidruros (VGA 77, Varian Australia)
- Horno de microondas MARS5 (CEM corporation)

1.7 DIGESTIÓN DE LAS MUESTRAS.

Debido a que los metales no se disuelven fácilmente en agua y a la cantidad de materia orgánica presente, fue necesario realizar una digestión ácida en un horno de microondas (MARS 5, CEM corporation), la cual consistió en los siguientes dos métodos:

MÉTODO I:

1. Pesar 0.5g de muestra.
2. Colocarlos en un vaso especial de teflón de 100ml.
3. Adicionar 10 ml. de ácido nítrico concentrado.
4. 13 vasos fueron colocados en el tornamesas giratorio del horno de microondas.
5. Se realizó un programa de digestión, el cual consistió en una rampa de presión de 60psi de 20 minutos al 95% de potencia del horno, y se mantiene el valor máximo de la presión durante 20 minutos más.
6. Posteriormente se dejan enfriar los vasos de teflón a temperatura ambiente.
7. El contenido de los vasos fue filtrado (con el fin de separar los silicatos los cuales no son solubles en agua), utilizando papel filtro (Whatman 40).
8. Una vez filtrado la solución se colocó en matraces volumétricos de 50ml, se llevó al volumen de aforo con agua desionizada (tipo I) y se mezcló.

De los matraces volumétricos, las muestras fueron transferidas a recipientes de polietileno y se etiquetaron para su posterior análisis.⁽¹⁰⁾

MÉTODO 2:

Debido a que metales como el Mercurio y el Arsénico son elementos volátiles, para su análisis fue necesario desarrollar un proceso diferente de digestión, el cual se llevo a cabo de la siguiente manera:

1. Se pesaron 0.5g de muestra, los cuales fueron colocados en un vaso de teflón de 100ml.
2. Se adicionaron 10ml de Agua desionizada, 6ml de HCl concentrado y 2ml de HNO₃ concentrado.
3. Se desarrolló un programa de digestión potencia-tiempo el cual consistió en mantener a la muestra durante 1 minuto al 15% de la potencia del horno de microondas, posteriormente 4 minutos al 40% y finalmente un tiempo de 10 minutos al 50% de la potencia del horno de microondas.
4. Las muestras se dejaron enfriar hasta alcanzar la temperatura ambiente.
5. Se filtro el contenido de los vasos y el filtrado se colocó en matraces volumétricos de 50ml. llevando hasta la marca con agua desionizada (tipo I).⁽¹⁸⁾

Una vez digeridas las muestras, estas se vertieron en recipientes de polietileno, los cuales fueron debidamente etiquetados para su posterior análisis, excepto en la determinación de Arsénico, ya que para su análisis es necesario darle un tratamiento adicional a las muestras, el cual se explica detalladamente más adelante.

1.8 MANEJO DEL EQUIPO DE ABSORCIÓN ATÓMICA.

Se aprendió a utilizar y manejar correctamente cada uno de los diferentes modos de atomización -ver apéndice 2- con los que cuenta el espectrofotómetro de absorción atómica (SpectrAA-800. Varian Australia), el cual se ubica en el laboratorio de Investigación de Química Analítica de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, para lo cual se revisaron cada uno de los manuales de operación del instrumento.

Debido a las diversas formas y modelos de espectrofotómetros de absorción atómica, no es posible formular instrucciones aplicables a cada instrumento. Por lo que se tiene que consultar el manual de operación de cada fabricante. Sin embargo, si se puede formular un procedimiento básico (con la flama como sistema de atomización), el cual consiste en:

- Instalar en el instrumento una lámpara de cátodo hueco del elemento a analizar y establecer el dial aproximado de longitud de onda.
- Fijar el slit (ranura) siguiendo el manual del fabricante.
- Aplicar la corriente a la lámpara de cátodo hueco, según el manual de operación del fabricante.
- Optimizar la longitud de onda ajustando el dial de longitudes de onda hasta que se obtenga la ganancia óptima de energía.
- Abrir las llaves de los gases (acetileno y aire), encender la flama y ajustar el flujo de los gases hasta donde se obtiene una mayor absorbancia en relación al metal analizado.
- Calibrar el instrumento a cero con un blanco, formado por agua desionizada o una solución ácida de con la misma concentración de ácido de los patrones y las muestras.
- Ajustar la velocidad de aspiración del nebulizador.
- Una vez seleccionadas las concentraciones de cada patrón del metal a analizar, aspirar nuevamente un blanco y poner a cero el instrumento. Aspirar entonces cada patrón sucesivamente en la flama y registrar las absorbancias.
- Leídos los patrones, se procede a leer cada una de las muestras.
- La absorbancia obtenida de cada muestra se interpola en la curva de calibración y de esta forma se obtienen las concentraciones de las mismas.

Para la determinación de trazas metálicas, las técnicas de horno de grafito, generador de vapor e hidruros y flama para la generación de átomos en estado basal en absorción atómica siguen siendo las más versátiles.

1.9 ATOMIZACIÓN POR FLAMA.

Las curvas de calibración para el análisis en flama, se prepararon a partir de soluciones Stock de 1000 ppm del analito de interés, realizándose diluciones apropiadas para llegar a las concentraciones requeridas. La flama utilizada fue aire-acetileno, y el flujo seleccionado de estos gases fue aquel donde se obtuvo una mayor lectura de absorbancia. Asimismo la altura del quemador utilizada fue aquella donde también se obtuvo la mayor lectura de absorbancia para cada una de los elementos analizados en el espectrofotómetro.

TABLA 1.1. CONDICIONES DE TRABAJO EN LAS DETERMINACIONES MEDIANTE LA ATOMIZACIÓN POR FLAMA.

Parámetro	Longitud de Onda (nm)	Ranura	Corriente de la Lámpara (mA)
Cobre	324.8	0.5	4
Cromo	357.9	0.2	7
Plomo	217	1	10
Zinc	213.9	1	5

1.10 HORNO DE GRAFITO.

Para el análisis mediante la técnica de atomización electrotérmica (horno de grafito), se montó y se alineó el dispositivo del horno siguiendo las instrucciones del manual de operación del fabricante. Se seleccionó la fuente luminosa apropiada y se ajustó a la regulación eléctrica recomendada. Se seleccionó la longitud de onda apropiada y se establecieron todas las condiciones de trabajo utilizadas. Los programas de atomización

seleccionados fueron atomizaciones en pared¹, en los cuales la temperatura y el tiempo de calentamiento fueron cuidadosamente seleccionados (ya que de ellos depende la completa desolvatación de la muestra). la buena elección de estos parámetros proporciona buena precisión en el resultado final.

ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS:

Mediante esta técnica se analizaron Cd, Pd y Pt, las curvas de calibración se realizaron solamente preparando una solución Stock adecuada del analito de interés a partir de un estándar de 1000 ppm, ya que se utilizó el modo de automezclador, de manera que la preparación de los estándares fue automatizada. La lectura tanto de los estándares como de las muestras se hizo por duplicado, las condiciones de trabajo utilizadas para cada elemento analizado se muestran en la siguiente tabla.

TABLA 1.2. CONDICIONES DE TRABAJO PARA LAS DETERMINACIONES CON HORNO GRAFITO.

Parámetro	Long. de Onda (nm)	Ranura	Corriente de la Lámpara (mA)
Cadmio	228.8	0.5	4.0
Paladio	247.6	0.2	5
Platino	265.9	0.2	10

¹ En la atomización en pared, la muestra es depositada sobre la pared interna del tubo de grafito y calentada por contacto directo del mismo.

1.11 GENERACIÓN DE HIDRUROS.

Se trabajó con el módulo VGA-77 de la siguiente manera:

Se alineó el quemador y se seleccionó la fuente luminosa apropiada, posteriormente se monto la unidad generadora (VGA-77) conectando la celda de cuarzo y colocándola sobre el quemador.

Este módulo consta de tubos capilares que absorben las soluciones requeridas por medio de una bomba peristáltica hacia una manguera de aproximadamente 50cm de longitud donde se mezclan todas las soluciones y se lleva a cabo la formación de los hidruros o de elementos en estado basal. En el módulo se indica el tipo de solución que deberá ser aspirada por cada uno de los capilares (muestra, ácido y reductor). La preparación de dichas muestras dependerá del elemento a analizar (As o Hg). Los flujos aproximados que se requieren de cada una de las soluciones son de 8 ml para la muestra y de 1 ml para el ácido y el reductor. Es importante optimizar el flujo de los reactivos, lo cual es de suma importancia para tener buena sensibilidad del elemento a analizar.

Posteriormente se optimizó la lámpara de cátodo hueco y se calibró a cero el equipo, conectando los reactivos en las mangueras correspondientes.

Los estándares se prepararon de la misma forma que las muestras y el blanco. Una vez calibrado el equipo se procedió a la cuantificación, colocando cada estándar en el capilar respectivo, después de correr la curva de calibración se leyeron las absorbancias de cada una de las muestras y se interpolaron en ella para obtener así las concentraciones de cada una de ellas. Se tomaron lecturas por triplicado de cada estándar así como de cada muestra.

Las condiciones de trabajo utilizadas en el análisis del arsénico y del mercurio se muestran en la siguiente tabla:

TABLA 1.3 CONDICIONES DE TRABAJO PARA LAS DETERMINACIONES POR GENERACIÓN DE HIDRUROS.

Parámetro	Long. de Onda (nm)	Ranura	Corriente de la Lámpara (mA)
Arsénico	193.7	0.5	10
Mercurio	253.7	0.5	4

1.12 MEDICIÓN DE pH

Se hizo la determinación de pH de cada una de las muestras siguiendo la Norma oficial mexicana NMX-AA-25-1984, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de Noviembre de 1992.

APARATOS Y EQUIPO:

- Balanza analítica
- Potenciómetro, electrodo de vidrio y electrodo de referencia
- Agitador magnético
- Termómetro con escala de -10°C a 120°C

MATERIALES Y REACTIVOS

- Agua destilada
- Solución reguladora de pH= 4
- Solución reguladora de pH= 7
- Solución reguladora de pH= 10

PROCEDIMIENTO:

- Se Calibró el potenciómetro con las soluciones amortiguadoras de pH= 4, pH=7 y pH= 10.
- 10g de muestra fueron pesados y se transfirieron a un vaso de precipitados de 250ml.
- Se adicionaron 90ml. de agua destilada.
- Posteriormente se mezcló por medio de un agitador magnético durante 10 minutos, y se dejó reposar la solución durante 30 minutos.
- Se determinó la temperatura de la solución, y después se sumergieron los electrodos en la solución y se hizo la medición de pH.
- Los electrodos fueron sacados de la solución y se lavaron con agua destilada.

1.13 SISTEMATIZACIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados obtenidos se vaciaron en tablas, dichas tablas llevaran el siguiente formato para el caso de las muestras tomadas en las laterales de la autopista:

Nº de tabla. Concentraciones de (metal) determinadas en la Autopista.

Nº de Muestra	Concentración (ppm)				Promedio
	sem. 1	sem. 2	sem. 3	sem. 4	
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

En el caso de las muestras tomadas en el municipio, el formato de las tablas será el siguiente:

Nº de Tabla. Concentraciones de (metal) en el Municipio.

Muestra	Concentración (ppm)			
	Zona 1	zona 2	zona 3	zona 4
1				
2				
3				
4				
5				
Promedio				

1.14 TRATAMIENTO DE LOS DATOS

Los datos serán comparados con la NOM-001-Ecol-1996 y con los límites establecidos en la literatura para cada metal, además, los datos serán tratados estadísticamente para ver el grado de variación de los resultados obtenidos cada semana en la autopista, así como en cada una de las zonas del municipio.

Resultados

y

Análisis

Para cada metal analizado se realizaron curvas de calibración con cinco concentraciones diferentes, obteniendo las lecturas de la absorbancia por triplicado para cada estándar así como para cada muestra analizada. Cada elemento fue analizado dependiendo de su sensibilidad a las diferentes técnicas de atomización, empleándose para ello las técnicas de Flama, Horno grafito y Generador de Hidruros.

Tabla 2.1 Técnicas de Atomización Utilizadas para los Metales Analizados

Metal	Técnica utilizada	Concentraciones de los estándares utilizados (ppm)
Cobre	Flama	0.15, 0.3, 0.6, 1.5, 3 ó 0.036, 0.12, 0.36, 0.6, 1.2
Cromo	Flama	0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2
Plomo	Flama	0.15, 1.2, 3, 6, 9
Zinc	Flama	0.3, 0.9, 1.5, 2.4, 3

Tabla 2.1 Continuación.

Metal	Técnica utilizada	Concentraciones de los estándares utilizados (ppb)
Arsénico	Generador de hidruros	1.5, 3.6, 7.5, 15, 30, 45
Mercurio	Generador de hidruros	1.2, 3, 6, 9, 12
Cadmio	Horno de Grafito	1, 3, 5, 8, 10
Paladio	Horno de Grafito	4, 8, 12, 20, 40
Platino	Horno de Grafito	100, 300, 500, 700, 900

ppm = Partes por millón = mg/Lt

ppb = Partes por billón = µg/Lt

2.1 ATOMIZACIÓN POR FLAMA.

Las curvas de calibración se prepararon a partir de soluciones stock de 1000 partes por millón, realizándose diluciones adecuadas con agua desionizada para obtener las concentraciones establecidas para cada curva.

En las tablas 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8 y 2.9, se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los metales analizados mediante esta técnica (Cu, Cr, Pb y Zn). Cada estándar, así como cada muestra se leyó por triplicado.

En los anexos 2, 3, 4, 5, y 6 se muestran las curvas de calibración de cobre (anexos 2 y 3), cromo, plomo y zinc respectivamente. realizándose para cada una de ellas un análisis de correlación lineal para verificar su comportamiento lineal y así determinar si podían ser utilizadas para interpolar en ellas las absorbancias obtenidas de las 60 muestras.

Tabla 2.2 Concentraciones de Cobre determinadas en la Autopista.

Muestra	Concentración (ppm)				Promedio
	sem. 1	sem. 2	sem. 3	sem. 4	
1	2.0430	0.4720	0.2150	0.1620	0.7230
2	0.3660	1.4800	2.0610	0.6920	1.1498
3	0.5290	0.1370	0.1370	0.1850	0.2470
4	0.3270	0.3360	0.4960	0.7020	0.4653
5	0.2090	0.1580	0.2790	0.6000	0.3115
6	0.4200	0.3190	0.3470	0.3460	0.3580
7	0.1470	0.1690	0.1250	0.2330	0.1685
8	0.2520	0.2410	0.1910	0.1960	0.2200
9	0.4160	0.4520	0.2790	0.3940	0.3853
10	0.1790	0.6630	0.2070	0.1800	0.3073

Tabla 2.3 Concentraciones de Cobre en el Municipio.

Muestra	Concentración (ppm)			
	Zona 1	zona 2	zona 3	zona 4
1	0.1310	0.1280	0.0900	0.1130
2	0.1220	0.2790	0.1140	0.0740
3	0.1140	0.1370	0.1260	0.1450
4	0.5660	0.1140	0.1310	0.0740
5	0.0660	0.1300	0.0810	0.1060
Promedio	0.1998	0.1576	0.1084	0.1024

Tabla 2.4 Concentraciones de Cromo determinadas en la Autopista.

Muestra	Concentración (ppm)				Promedio
	Sem. 1	Sem. 2	Sem. 3	Sem. 4	
1	0.1490	0.1240	0.1190	0.1130	0.1263
2	0.1680	0.1600	0.2300	0.4550	0.2533
3	0.2460	0.1370	0.2370	0.1600	0.1950
4	0.4760	0.2160	0.5470	0.1820	0.3553
5	0.1130	0.1080	0.1160	0.1190	0.1140
6	0.1720	0.1430	0.1850	0.1110	0.1528
7	0.1500	0.1170	0.0890	0.0690	0.1063
8	0.1520	0.3990	0.1760	0.1180	0.2113
9	0.1150	0.1540	0.1230	0.1080	0.1250
10	0.1320	0.2360	0.1220	0.0760	0.1415

Tabla 2.5 Concentraciones Cromo en el Municipio.

Muestra	Concentración (ppm)			
	zona 1	zona 2	zona 3	zona 4
1	0.1210	0.1010	0.0730	0.1160
2	0.1210	0.0980	0.0710	0.0640
3	0.1090	0.1030	0.1010	0.0770
4	0.4240	0.1010	0.0940	0.0690
5	0.0700	0.0760	0.0770	0.0700
Promedio	0.1690	0.0958	0.0832	0.0792

Tabla 2.6 Concentraciones de Plomo encontradas en la Autopista.

Muestra	Concentración (ppm)				Promedio
	Sem. 1	Sem. 2	Sem. 3	Sem. 4	
1	1.8100	1.7300	0.3100	2.9200	1.6925
2	0.9800	6.9600	12.4200	1.3200	5.4200
3	0.3400	0.2000	0.3400	0.5800	0.3650
4	0.9600	1.1200	1.8300	3.7800	1.9225
5	0.4200	0.2100	0.5000	0.4400	0.3925
6	0.7100	0.2900	0.4800	0.3400	0.4550
7	0.1600	0.3100	1.2800	0.8200	0.6425
8	0.6100	1.1400	1.0700	1.2000	1.0050
9	6.3200	9.4800	0.5900	0.4300	4.2050
10	0.4300	5.6400	2.3900	3.6000	3.0150

Tabla 2.7 Concentraciones de Plomo en el Municipio.

Muestra	Concentración (ppm)			
	zona 1	zona 2	zona 3	zona 4
1	0.5300	0.7600	0.5900	0.6700
2	0.5500	0.7300	0.7500	0.7000
3	0.4900	0.6500	0.7700	0.8600
4	1.7500	0.6000	0.6300	0.6300
5	0.4800	0.6900	0.6200	0.7600
Promedio	0.7600	0.6860	0.6720	0.7240

Tabla 2.8 Concentraciones de Zinc determinadas en la autopista.

Muestra	Concentración (ppm)				Promedio
	sem. 1	sem. 2	sem. 3	sem. 4	
1	0.6895	1.1142	0.8456	0.6682	0.8294
2	1.4452	3.3785	4.5076	2.5035	2.9587
3	2.5434	2.1106	0.8702	0.7677	1.5730
4	1.7725	1.4655	2.5885	1.8560	1.9206
5	0.8838	0.4784	0.8817	1.5221	0.9415
6	2.1284	0.7702	1.5929	1.4394	1.4827
7	0.5511	0.7368	0.5426	1.3800	0.8026
8	1.1623	1.1526	0.6542	0.7371	0.9266
9	1.8487	2.7989	1.5644	2.1805	2.0981
10	0.7470	2.8413	0.8686	0.6317	1.2722

Tabla 2.9 Concentraciones de Zinc en el Municipio.

Muestra	Concentración (ppm)			
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
1	0.4105	0.6630	0.2942	0.3539
2	0.4409	0.5221	0.4563	0.3282
3	0.3355	0.6804	0.8034	0.7911
4	1.3461	0.3969	0.3978	0.2507
5	0.2310	0.5018	0.2014	0.4836
Promedio	0.5528	0.5528	0.4306	0.4415

En las tablas 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8 y 2.9 se observa que las concentraciones encontradas de Cobre, Cromo, Plomo y Zinc, no rebasan los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-001-Ecol-1996 (anexo 12). De las 10 muestras analizadas de la autopista podemos ver que los resultados varían de semana a semana, es decir, no se observa una tendencia de los resultados obtenidos.

Se encontró que las concentraciones de Cobre en promedio encontradas en el lado derecho de la autopista (muestras 1-5) son mayores a las encontradas en el lado izquierdo de la misma (muestras 6-10), también se observa que las muestras analizadas a lo largo del tramo de autopista analizado presentan mayores cantidades de este metal en relación con las muestras analizadas dentro del municipio de Cuautitlán Izcalli. Por otra parte, las muestras que presentan los mayores promedios mensuales son la muestra número 1 y 2.

Con respecto a las zonas analizadas la número 3 y la número 4 son las que en promedio presentan las menores cantidades de cobre (0.1084 y 0.1024 ppm respectivamente).

La cantidad de Cromo encontrada en las muestras de la autopista no varía en gran medida con las encontradas en el municipio, sin embargo, las del municipio están ligeramente por debajo de las muestras tomadas en la autopista. Las muestras 2 y 4 de la autopista son las que presentan los mayores promedios mensuales, siendo de 0.2533 ppm (muestra 2) y 0.3553 ppm (muestra 4). Asimismo, las zonas 3 y 4 son las que presentan en promedio las menores cantidades para este metal.

En relación al Plomo las muestras 2, 5 y 9 son las que contienen en promedio una mayor cantidad de este metal, sin embargo, sólo la muestra número 2 en la tercera semana de análisis rebasa las 10 ppm (límite máximo permisible establecido por la norma), debido a que en las semanas 2 y 3 se encontraron cantidades mucho mayores a las encontradas en las semanas 1 y 4. La muestra número 9 está cerca del límite máximo permisible promedio mensual (4.205 ppm).

Los niveles de plomo detectados en las 4 zonas del municipio son homogéneos y no varían en gran medida de una zona a otra como ocurre en las muestras analizadas de la autopista.

Por otra parte, las cantidades encontradas de Zinc, tanto en las muestras del municipio como en las de la autopista no rebasan los límites máximos permisibles establecidos para este metal, sin embargo, encontramos que de las muestras analizadas, las de las zonas ubicadas dentro del municipio son las que presentan los menores niveles.

Como se puede ver las mayores cantidades encontradas para estos metales, los encontramos en la parte de la autopista, esto se puede atribuir al hecho de que en esta vía de comunicación existe un elevado flujo vehicular, así como un gran número de zonas industriales que de alguna manera contribuyen a la acumulación de dichos metales en los suelos cercanos a ellas. Los coeficientes de correlación para fueron de 0.9998 y 0.9988 (cobre), 0.9944 (cromo), 0.9983 (plomo) y 0.9952 (zinc), los cuales indican que los puntos obtenidos en cada curva siguen en porcentajes superiores al 99.50% una tendencia lineal.

2.2 GENERADOR DE HIDRUROS.

ARSÉNICO

El arsénico es analizado preferentemente como As^{+3} pues la sensibilidad es mejorada de un 20-30% que como As^{+5} . La forma mediante la cual el As^{+5} es reducido a As^{+3} es adicionando yoduro de potasio (KI) a una concentración final del 1% en HCl 1M. Para una completa reducción se requieren de 50 min. a temperatura ambiente o 4 min. a 70°C.

Condiciones de Trabajo

Individual		Secuencial	
Canal ácido	HCl 10 M	Canal ácido	HCl 10 M
Canal reductor	NaBH ₄ 0.6%, NaOH 0.5%	Canal reductor	NaBH ₄ 0.6%, NaOH 0.5%, KI 10% (*)

(*) Solución modificada de Borohidruro de sodio.

El procedimiento individual es preferido cuando se desea analizar únicamente arsénico en la muestra, por lo tanto, la reducción con KI fue indispensable.

2.3 GENERACIÓN DE VAPOR FRÍO.

ANÁLISIS DE MERCURIO.

Mediante la digestión el mercurio es llevado a su forma de Hg^{+2} , la cual no requiere de posterior reducción, ya que ese es su estado de oxidación óptimo para la formación del vapor atómico. Sin embargo las soluciones de Hg^{2+} son normalmente inestables y deben ser estabilizadas adicionando HNO₃ 5% (v/v) con HCl 5% (v/v) o dicromato de potasio 0.01% (p/v).

Condiciones de Trabajo

Recomendado		Opcional	
Canal ácido	H ₂ O (D.I)	Canal ácido	HCl 5M
Canal reductor	SnCl ₂ 25% En HCl 20%	Canal reductor	NaBH ₄ 0.3%, NaOH 0.5%

El método con SnCl_2 ofrece similar respuesta analítica que con el método de Borohidruro de sodio, además la precisión ($< 1\% \text{RSD}$) y la exactitud son excelentes. Los resultados obtenidos de estos dos metales se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 2.10 Concentraciones de Arsénico encontradas en la Autopista.

Muestra	Concentración (ppm)				Promedio
	sem. 1	Sem. 2	Sem. 3	Sem. 4	
1	0.0179	0.0148	0.0194	0.0294	0.0204
2	0.0310	0.0666	0.0548	0.0486	0.0502
3	0.0293	0.0210	0.0176	0.0234	0.0229
4	0.0362	0.0315	0.0656	0.0495	0.0457
5	0.0358	0.0158	0.0537	0.0547	0.0400
6	0.0372	0.0247	0.0487	0.0236	0.0335
7	0.0090	0.0240	0.0320	0.0477	0.0282
8	0.0090	0.0213	0.0178	0.0165	0.0161
9	0.0607	0.0486	0.0540	0.1135	0.0692
10	0.0220	0.0505	0.0127	0.0160	0.0253

Tabla 2.11 Concentraciones de Arsénico en el Municipio.

Muestra	Concentración (ppm)			
	Zona 1	zona 2	zona 3	zona 4
1	0.0220	0.0317	0.0288	0.0941
2	0.0221	0.0270	0.0289	0.0232
3	0.0170	0.0328	0.0186	0.0337
4	0.0182	0.0331	0.0116	0.0271
5	0.0274	0.0208	0.0194	0.0251
Promedio	0.0213	0.0291	0.0215	0.0407

La curva de calibración utilizada para medición de arsénico se muestra en el anexo número 7, además de las absorbancias respectivas de cada estándar, el coeficiente de correlación (0.9991) nos indican que los puntos de esta curva se alejan en un porcentaje muy pequeño (0.09%) de la tendencia lineal.

Tabla 2.12 Concentraciones determinadas de Mercurio en la Autopista.

Muestra	Concentración (ppm)				Promedio
	sem. 1	sem. 2	sem. 3	sem. 4	
1	0.0075	0.0029	0.0022	0.0028	0.0038
2	0.0043	0.0041	0.004	0.004	0.0041
3	0.0052	0.0031	0.0008	0.0005	0.0024
4	0.0046	0.0042	0.0029	0.0073	0.0048
5	0.0043	0.0061	0.0041	0.0045	0.0048
6	0.0043	0.0038	0.0024	0.0028	0.0033
7	0.0026	0.0027	0.0007	0.0031	0.0022
8	0.0021	0	0.0015	0.0034	0.0017
9	0.0036	0.0051	0.0015	0.0033	0.0033
10	0.0025	0.002	0.0027	0.0018	0.0022

Tabla 2.13 Concentraciones de Mercurio determinadas en el municipio.

Muestra	Concentración (ppm)			
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
1	0.0019	0.0014	0.0041	0.0030
2	0.0158	0.0021	0.0062	0.0038
3	0.0000	0.0004	0.0015	0.0039
4	0.0021	0.0005	0.0031	0.0023
5	0.0052	0.0021	0.0027	0.0023
Promedio	0.0050	0.0013	0.0035	0.0031

Como se puede ver en las tablas 2.10 y 2.11 los niveles detectados de Arsénico no rebasan los límites máximos permisibles establecidos para este metal (anexo 12), además, en las 4 zonas analizadas encontramos una mayor homogeneidad con respecto a las cantidades encontradas a lo largo de la autopista.

La curva de calibración utilizada para el análisis de Mercurio se muestra en el anexo 8; el coeficiente de correlación para esta curva es de 0.9946, lo que indica que solo el 0.54% de los puntos se alejan de la tendencia lineal.

En las tablas 2.12 y 2.13 se observa que ninguna de las muestras analizadas rebasa los límites máximos establecidos por la norma oficial mexicana, sin embargo, 3 muestras tomadas en la autopista se encuentran apenas por debajo del límite máximo permisible (promedio mensual), el cual es de 0.005ppm para este metal (muestras 2, 4 y 5), siendo las concentraciones respectivas de 0.0040, 0.0048 y 0.0048 ppm.

2.4 HORNO DE GRAFITO.

Para la preparación de las curvas de calibración en el horno de grafito, solo fue necesario preparar un solución concentrada del analito de interés (solución Stock) y adecuada para que el autodilutor hiciera las diluciones respectivas para preparar dicha curva.

Se utilizó un corrector de fondo de deuterio, el cual corrige las interferencias no específicas de fondo que ocurren cuando el haz de luz se absorbe o se dispersa por especies moleculares o partículas sólidas en la zona de lectura.

Los resultados obtenidos de cada una de las muestras analizadas se muestran a continuación:

Tabla 2.14 Concentraciones de Cadmio determinadas en la autopista.

Muestra	Concentración (ppm)				Promedio
	sem. 1	sem. 2	sem. 3	sem. 4	
1	0.0086	0.00002	0.0036	0.0098	0.0055
2	0.0113	0.0103	0.0174	0.0129	0.0130
3	0.0108	0.0037	0.0020	0.0021	0.0047
4	0.0108	0.0082	0.0111	0.0140	0.0110
5	0.0090	0.0021	0.0042	0.0024	0.0044
6	0.0152	0.0040	0.0024	0.0012	0.0057
7	0.0039	0.0019	0.0050	0.0050	0.0040
8	0.0051	0.0052	0.0023	0.0032	0.0040
9	0.0148	0.0089	0.0019	0.0015	0.0068
10	0.0045	0.0011	0.0053	0.0110	0.0055

Tabla 2.15 Concentraciones de Cadmio en el municipio.

Muestra	Concentración (ppm)			
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
1	0.0076	0.0030	0.0038	0.0024
2	0.0028	0.0110	0.0039	0.0030
3	0.0017	0.0038	0.0072	0.0054
4	0.0081	0.0022	0.0017	0.0023
5	0.0015	0.0034	0.0015	0.0034
Promedio	0.0043	0.0047	0.0036	0.0033

En las tablas 2.14 y 2.15 podemos apreciar que de los niveles detectados de Cadmio, los que estuvieron más elevados corresponden a las muestras tomadas en la autopista y los niveles menores se encontraron en las muestras tomadas dentro de las zonas urbanas y rurales de este municipio; además, existe una menor variación en cuanto a las concentraciones detectadas en el municipio en comparación con aquellas muestras que fueron tomadas en la autopista. El gráfico de la curva de calibración de cadmio (anexo 9) nos muestra un coeficiente de correlación de 0.9981, que indica que el 99.81% de los datos se ajustan a una línea recta, por lo que el restante 0.19% de los puntos se alejan de esta tendencia.

En el caso del paladio se construyó una curva de calibración (anexo 10), la cual tuvo un coeficiente de correlación de 0.9977, sin embargo, en 15 muestras no fue detectado este metal debido a que a pesar de formar parte de los convertidores catalíticos no es muy común que algún tipo de industria de este municipio genere contaminación por este metal; además de que las concentraciones detectadas no sobrepasan las 10 partes por billón (excepto la muestra número 2), por lo que suponemos que los suelos del municipio de Cuautitlán Izcalli rurales, urbanos y aquellos cercanos a la autopista e importantes complejos industriales no se ven afectados por él.

En las tablas 2.16 y 2.17 podemos ver que, en general, durante las primeras tres semanas de muestreo en la autopista los niveles de paladio en la autopista no varían mucho, sin embargo, en la última semana, la cantidad de paladio disminuye con respecto a las primeras semanas encontrando concentraciones por debajo de las 4 partes por billón.

En lo que respecta a la cantidad detectada de este metal en las muestras del municipio, solo tres muestras sobrepasan las 10 partes por billón (Las muestras número 3 de las zonas 1, 2 y 4), sin embargo, en promedio ninguna de las zonas analizadas sobrepasan las 10 partes por billón.

Tabla 2.16 Concentraciones de Paladio determinadas en la autopista.

Muestra	Concentración (ppm)				Promedio
	sem. 1	sem. 2	sem. 3	sem. 4	
1	0.0092	0.0052	0.0044	0.0029	0.0054
2	0.0104	0.0057	0.0051	0.0031	0.0061
3	0.0092	0.0046	0.0048	0.0024	0.0052
4	0.0067	0.0047	0.0046	0.0000	0.0040
5	0.0057	0.0049	0.0050	0.0000	0.0039
6	0.0054	0.0049	0.0051	0.0025	0.0045
7	0.0055	0.0048	0.0051	0.0000	0.0039
8	0.0053	0.0059	0.0060	0.0000	0.0043
9	0.0060	0.0054	0.0054	0.0000	0.0042
10	0.0049	0.0043	0.0048	0.0000	0.0035

Tabla 2.17 Concentraciones de Paladio determinadas en el municipio.

Muestra	Concentración (ppm)			
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
1	0	0	0.0033	0.0026
2	0	0	0.0024	0
3	0.0378	0.0259	0.0065	0.0145
4	0	0.0026	0	0.0024
5	0.0025	0	0.0025	0
Promedio	0.0081	0.0057	0.0029	0.0039

Por último, en relación con el platino (anexo 11), a pesar de que en la curva de calibración se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.9976, que permite asegurar que los datos generados por la misma siguen una tendencia lineal, no fue detectado en ninguna de las muestras analizadas, por lo que no existe ningún tipo de contaminación generada por este elemento (De acuerdo a las condiciones de trabajo utilizadas).

En los siguientes gráficos (2.1, 2.2) se muestran las cantidades promedio (en mg/Kg) encontradas de los metales analizados en cada una de las zonas de estudio (autopista y municipio).

Gráfico 2.1. Concentraciones promedio de Cu, Cr, Pb y Zn.

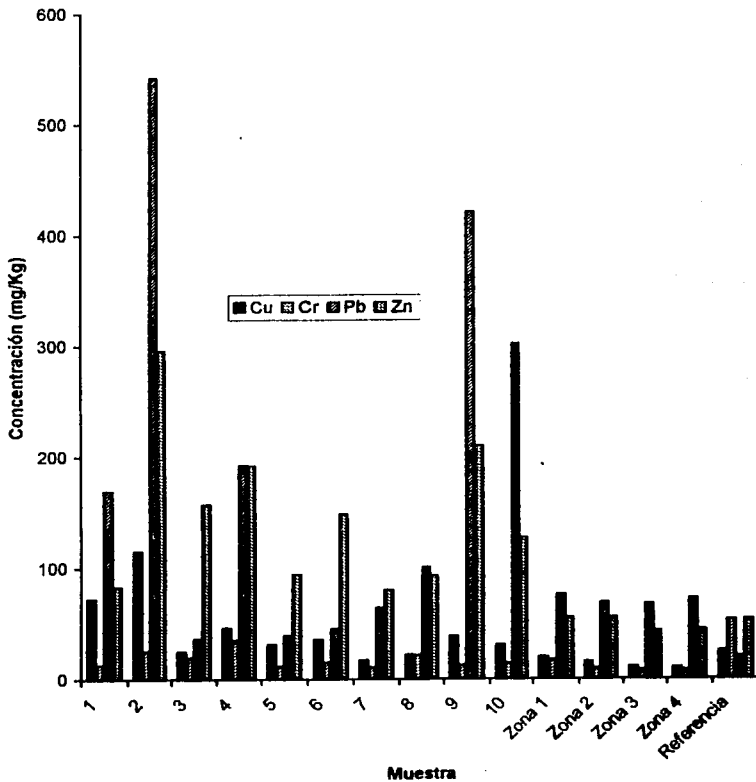
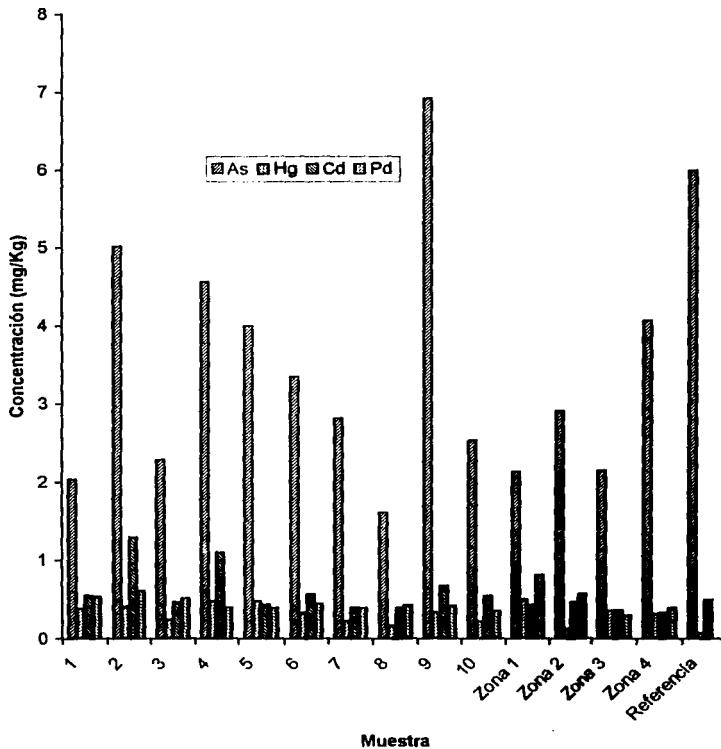


Gráfico 2.2. Concentraciones promedio de As, Hg, Cd y Pd.



En los gráficos 2.1. 2.2. se muestran los promedios de las cantidades de cada metal analizado. En ellos se aprecia de acuerdo a los valores de concentraciones de estos metales en suelos no contaminados, tomados de *Gary W. Vanloon y Stephen J. Duffy, Concentraciones (mg/Kg) de trazas metálicas, incluyendo algunos semimetales en suelos no contaminados. Environmental chemistry, a global perspective. Pag. 405 (2000)*, que 7 de las 10 muestras tomadas a lo largo de la autopista sobrepasan el valor establecido para cobre (25 mg/Kg). En lo que respecta a las cantidades encontradas en cada una de las zonas en las que se dividió el municipio, se observa que ninguna de ellas sobrepasa este límite.

En cuanto al cromo se puede ver que ninguna de las muestras analizadas sobrepasa el nivel indicado en la referencia (53mg/Kg), además, las menores cantidades las encontramos en las 4 zonas del municipio.

Las cantidades encontradas de plomo (gráfico 2.1) sobrepasan el valor indicado en la referencia (20 mg/Kg), por lo que existe un cierto grado de contaminación por plomo en este municipio (de acuerdo a la referencia), encontrándose cantidades mayores a lo largo del tramo de autopista analizado.

En relación a las cantidades encontradas de zinc, se observa en el gráfico 2.1, que las muestras tomadas en el tramo de autopista sobrepasan el valor de la referencia (54 mg/Kg) y que las cantidades encontradas en cada una de las zonas analizadas se encuentran cercanas a este valor.

En el gráfico 2.2 se puede ver que solo una muestra (muestra N° 9) rebasa el valor de la referencia (6mg/Kg) para arsénico. Las cantidades encontradas de mercurio (gráfico 2.2) sobrepasan el valor de referencia, que es de 0.071mg/Kg para este elemento, lo que indica que existe contaminación por mercurio en los suelos de este municipio.

En lo que respecta al cadmio, se observa en el gráfico 2.2 que 4 muestras tomadas en la autopista rebasan el valor de la referencia (0.5 mg/Kg), encontrándose las menores cantidades en las 4 zonas del municipio de Cuautitlán Izcalli.

En general, las mayores cantidades de estos elementos se localizan principalmente a lo largo de la autopista en comparación con las muestras tomadas dentro del municipio de Cuautitlán Izcalli.

De las muestras analizadas en la autopista , la número 2 y la 9 son las que presenta concentraciones mayores de As, Cu, Pb y Zn, muestras que fueron tomadas de La Quebrada (mta. 2) y del Km. 38 (Mta. 9). Además, la muestra número 2 es la que presenta una mayor cantidad de Cd así como una de las mayores concentraciones de Hg.

De las 4 zonas en las que se dividió el municipio, la zona número 3 es la que presenta los menores niveles encontrados de estos metales, excepto en el caso del mercurio, ya que para este metal la zona numero 2 fue la que presento la menor cantidad.

La zona 1 del municipio de Cuautitlán Izcalli es la que presenta los niveles más altos de Cd, Cr, Cu, Hg, Pb y Zn, seguida por la zona 2, ubicando estas dos zonas en el mapa del municipio (anexo 1) se puede ver que estas zonas se encuentran instalados los principales parques industriales de este municipio. Tanto la zona 3 (zona rural) y 4 (zona urbana) presentan los niveles menores de estos metales. La zona 4 es la que presenta una concentración promedio mayor de Arsénico que las demás zonas.

2.5 MEDICIÓN DE PH

Los resultados obtenidos en la medición del pH se muestran en las siguientes dos tablas:

Tabla 2.18 pH de las muestras de la autopista.

Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
pH	8.07	7.76	8.14	8.12	7.81	7.49	7.35	8.32	7.71	8.21

Tabla 2.19 pH de las muestras del municipio.

Muestra	pH			
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
1	7.75	7.84	7.55	7.62
2	7.82	7.61	7.11	7.34
3	7.55	7.11	7.55	7.28
4	8.11	8.07	6.35	7.31
5	6.78	7.70	7.12	7.29
Promedio	7.60	7.67	7.14	7.37

De acuerdo a los resultados indicados en las dos tablas anteriores, el pH de la mayoría de las muestras esta por arriba de 7. lo que indica, de acuerdo a la tabla 5.4, que metales como el Cadmio, Plomo, tienen una media y baja movilidad respectivamente. Metales como el Cromo, Cobre, Zinc y Mercurio tienen una muy baja movilidad, por lo que tienden a acumularse en la parte superficial, en el horizonte biológicamente más activo, lo que hace que estos metales estén fácilmente accesibles para los vegetales. En lo que respecta a los demás elementos (Arsénico, Paladio y Platino), debido a que la mayoría de los metales son poco móviles en suelos a pH neutros y básicos, podemos suponer que también tienden a acumularse en la parte superficial, siendo fácilmente accesibles para las plantas.

2.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL MUNICIPIO DE CUAUTILÁN IZCALLI.

Se realizó un análisis de varianza para las muestras tomadas en cada una de las zonas en las que fue dividido el municipio, así como también para las tomadas en la autopista. Adicionalmente se hizo una comparación entre los promedios de cada una de estas regiones obteniéndose los siguientes resultados:

2.6.1. ANÁLISIS DE VARIANZA COMPLETAMENTE AL AZAR (ZONAS DEL MUNICIPIO DE C. IZCALLI).

Ho: μ zona 1 = μ zona 2 = μ zona 3 = μ zona 4 (No hay diferencia entre una zona y otra)

Ha: no sean iguales (por lo menos una de ellas)

Se acepta Ho si $P > 0.05$; si $P < 0.05$ se rechaza Ho, por lo tanto Ha se acepta.

Como se observa en la tabla 2.20 en todos los casos el valor de $P > 0.05$, por lo que se acepta Ho; por tanto no hay diferencia estadísticamente significativa entre la media de cada metal de una zona a otra con un nivel de confianza del 95 %.

TABLA 2.20. ANÁLISIS DE VARIANZA COMPLETAMENTE AL AZAR (ZONAS DEL MUNICIPIO DE CUAUTILÁN IZCALLI).

METAL	FUENTE DE VARIACIÓN	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	CUADRADOS MEDIOS	F CALCULADA	P
Cobre	Entre Grupos	0.0268	1	0.0268	2.43	0.1363
	Dentro de Grup.	0.1988	18	0.0110		
Cromo	Entre Grupos	0.0131	1	0.0131	2.37	0.1409
	Dentro de Grup.	0.0994	18	0.0055		
Plomo	Entre Grupos	0.0031	1	0.0031	0.04	0.8390
	Dentro de Grup.	1.3239	18	0.0735		
Zinc	Entre Grupos	0.0681	1	0.0681	0.97	0.3372
	Dentro de Grup.	1.2622	18	0.0701		
Cadmio	Entre Grupos	5.51E-6	1	5.51E-6	0.82	0.3780
	Dentro de Grup.	1.21E-4	18	6.7E-6		
Paladio	Entre Grupos	5.98E-5	1	5.98E-5	0.60	0.4504
	Dentro de Grup.	0.0018	18	1.0E-4		
Arsénico	Entre Grupos	1.70E-4	1	1.70E-4	0.60	0.4479
	Dentro de Grup.	0.0050	18	2.8E-4		
Mercurio	Entre Grupos	9.8E-8	1	9.8E-8	0.01	0.9283
	Dentro de Grup.	2.12E-4	18	1.17E-5		

2.6.2. ANÁLISIS DE VARIANZA COMPLETAMENTE AL AZAR (AUTOPISTA).

Ho: μ semana 1 = μ semana 2 = μ semana 3 = μ semana 4 (No hay diferencia entre una semana y otra)

Ha: no sean iguales (por lo menos un par de ellas)

Se acepta Ho si $P > 0.05$; si $P < 0.005$ se rechaza Ho, por lo tanto Ha se acepta.

Como se observa en la tabla 2.21, el cobre, cromo, plomo, zinc, cadmio, arsénico y mercurio tienen un valor de $P > 0.05$ por lo que se acepta Ho, por tanto no hay diferencia estadísticamente significativa entre la media de cada metal de una semana a otra con un nivel de confianza del 95 %. Sin embargo, en el caso del paladio el valor de $p < 0.05$, por lo que se acepta Ha, es decir, hay una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de paladio de una semana a otra con un nivel de confianza del 95%.

TABLA 2.21. ANÁLISIS DE VARIANZA COMPLETAMENTE AL AZAR (AUTOPISTA).

METAL	FUENTE DE VARIACIÓN	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	CUADRADOS MEDIOS	F CALCULADA	P
Cobre	Entre Grupos	0.0730	3	0.0243434	0.11	0.9518
	Dentro de Grup.	7.7372	36	0.214924		
Cromo	Entre Grupos	0.0108	3	0.00360337	0.29	0.8327
	Dentro de Grup.	0.0036	36	0.0124503		
Plomo	Entre Grupos	12.205	3	4.06834	0.54	0.6585
	Dentro de Grup.	271.655	36	7.54596		
Zinc	Entre Grupos	0.6501	3	0.216705	0.25	0.8603
	Dentro de Grup.	31.1131	36	0.864254		
Cadmio	Entre Grupos	8.4E-4	3	2.80E-4	0.96	0.4199
	Dentro de Grup.	0.0104	36	2.90E-4		
Paladio	Entre Grupos	1.7E-4	3	5.87E-5	36.44	0.0000
	Dentro de Grup.	5.8E-5	36	1.61E-6		
Arsénico	Entre Grupos	0.0011	3	3.68E-4	0.83	0.4860
	Dentro de Grup.	0.0159	36	4.43E-4		
Mercurio	Entre Grupos	1.69E-5	3	5.63E-6	2.27	0.0967
	Dentro de Grup.	8.93E-5	36	2.48E-6		

2.6.3. ANÁLISIS DE VARIANZA COMPLETAMENTE AL AZAR (AUTOPISTA Y ZONAS DEL MUNICIPIO).

Ho: μ municipio = μ autopista (No hay diferencia entre una zona y otra)

Ha: μ municipio \neq μ autopista (no sean iguales)

Se acepta Ho si $P > 0.05$; si $P < 0.005$ se rechaza Ho. por lo tanto Ha se acepta.

Como se observa en la tabla 2.22, el cobre, cromo, plomo, cadmio, paladio, arsénico y mercurio tienen un valor de $P > 0.05$ por lo que se acepta Ho, por tanto no hay diferencia estadísticamente significativa entre la media de cada metal de una zona a otra con un nivel de confianza del 95%. Sin embargo, en el caso del zinc el valor de $p < 0.05$, por lo que se acepta Ha, es decir, hay una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de zinc de una zona a otra con un nivel de confianza del 95%.

TABLA 2.22. ANÁLISIS DE VARIANZA COMPLETAMENTE AL AZAR (AUTOPISTA Y ZONAS DEL MUNICIPIO DE CUAUTITLÁN IZCALLI).

METAL	FUENTE DE VARIACIÓN	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	CUADRADOS MEDIOS	F CALCULADA	P
Cobre	Entre Grupos	2428.11	1	2428.11	3.67	0.0795
	Dentro de Grup.	7936.12	12	661.343		
Cromo	Entre Grupos	145.167	1	145.167	2.88	0.1155
	Dentro de Grup.	604.978	12	50.4149		
Plomo	Entre Grupos	41211.5	1	41211.5	1.76	0.2093
	Dentro de Grup.	280927.0	12	23410.6		
Zinc	Entre Grupos	27783.5	1	27783.5	7.74	0.0166
	Dentro de Grup.	27783.5	12	3588.87		
Cadmio	Entre Grupos	0.1764	1	0.1764	2.45	0.1439
	Dentro de Grup.	0.8659	12	0.0721		
Paladio	Entre Grupos	0.0120	1	0.0120	0.67	0.4287
	Dentro de Grup.	0.2159	12	0.0179		
Arsénico	Entre Grupos	1.4	1	1.4	0.63	0.4413
	Dentro de Grup.	26.4885	12	2.2073		
Mercurio	Entre Grupos	3.5E-5	1	3.5E-5	0.00	0.9624
	Dentro de Grup.	0.1811	12	0.0150		

En general, el análisis estadístico nos indica que los niveles promedio de los metales analizados encontrados en cada una de las zonas no son diferentes, por lo que el lugar en donde fueron tomadas las muestras no influye de una manera determinante en los resultados obtenidos, a excepción del zinc. Asimismo, el análisis estadístico en el caso de las muestras tomadas en semanas diferentes (muestras de la autopista), nos indica que los niveles promedio de cada uno de los metales analizados son iguales (a excepción del paladio). es decir, independientemente de la semana en que fueron tomadas las muestras, esta variable no influyo en los resultados obtenidos. Sin embargo, se considera necesario hacer un estudio posterior en donde se aumente el número de muestras, tomándolas en periodos de tiempo más espaciados, para así poder establecer el grado de variación de las concentraciones de los metales analizados en función del tiempo, además para establecer una tendencia con los resultados obtenidos.

Conclusiones

CONCLUSIONES

- El alumno aprendió a emplear una metodología analítica específica para la determinación de metales en suelo.
- Las muestras analizadas no rebasan los límites máximos permisibles establecidos en la Nom-001-Ecol-1996, utilizada como referencia.
- De las zonas analizadas, la número 1 y la número 2 son las que presentan una mayor cantidad de estos metales. Siendo estas zonas donde se localizan importantes complejos industriales, además de cruzar por ellas una gran cantidad de vehículos automotores.
- Las mayores concentraciones de los metales analizados se encontraron a lo largo del tramo de la autopista.
- A pesar del grado de urbanización del municipio de Cuautitlán Izcalli y de contar con un número importante de plantas industriales, esto no ha llevado a una contaminación significativa del suelo a causa de trazas metálicas .
- Se generaron datos que permiten conocer el impacto ambiental ocasionado hasta el momento por el elevado crecimiento, tanto industrial como urbano que presenta este municipio, con la finalidad de tener un precedente para estudios posteriores.

Generalidades

del suelo

4.1 CONTAMINACIÓN DEL SUELO

La contaminación del suelo resulta de la acción de agentes muy diferentes, ya se trate de vestigios constituidos por metales, metaloides o microcontaminantes orgánicos, o de productos fitosanitarios, hidrocarburos o cuerpos radioactivos. A la larga, los metales más peligrosos son el mercurio, el plomo, el cadmio, el níquel y el cromo. También causan graves daños los insecticidas, herbicidas, funguicidas y bactericidas, cuyo uso se ha generalizado en la agricultura. La presencia de contaminantes en el suelo es nociva para la vegetación, y la bio-acumulación¹, es temible para el ser humano.

Entre los sitios más afectados figuran las regiones mineras o de agricultura intensiva, las praderas y tierras cultivadas cercanas a las autopistas, así como los terrenos de esparcido de efluentes agroindustriales o de compost humano.⁽¹⁾

Los contaminantes del suelo se pueden clasificar en: orgánicos, inertes, reciclables y varios. Entre los orgánicos podemos encontrar a las plantas y animales muertos, comida; papel, cartón, trapo y cuero y madera. Entre los inertes están la ceniza, polvo y tierra. En los reciclables se encuentran metales, vidrio, papel y cartón. En varios están los detergentes, materia patógena, explosivos, radiación, químicos, plásticos, urbanismo, erosión y corrosión.

En la clasificación anterior cabe aclarar que tanto el papel como el cartón y el trapo, además de ser orgánicos son reciclables, pues sirven como materia prima para nuevos procesos.⁽²⁾

4.1.1. CONTAMINANTES ORGÁNICOS

Los desechos orgánicos son aquellos cuya composición es de origen natural como: hojas de los árboles, la madera, el papel, cartón cuya composición principalmente es materia orgánica. La materia orgánica es el contaminante más importante, pero no en cuanto al daño que ocasiona, por las posibilidades de tratamiento que tiene.

¹ Bio-acumulación se refiere a la concentración de elementos tóxicos en los vegetales.

4.1.2 CONTAMINANTES INERTES

Son aquellos a los que no se puede dar ningún tratamiento, de modo que se llevan directamente a los tiraderos.

4.1.3 CONTAMINANTES RECICLABLES

Son aquellos que deben colectarse para poder reutilizarse, ya sea para el uso original que se les había dado, como es el vidrio y el metal o para otros usos como el trapo que es materia prima en el proceso de producción del cartón.

4.1.4 CONTAMINANTES VARIOS

Estos incluyen formas específicas de contaminación, por el daño que ocasionan, requieren una descripción especial como: la materia patógena (proveniente de hospitales o laboratorios) materiales explosivos, radioactivos y químicos de especial peligro y como un factor importante, los plásticos. La proporción con que se presentan los diferentes componentes de la basura varían dependiendo de si la zona es urbana o es rural, industrial u una combinación de estas.

4.1.5 URBANIZACIÓN

Es importante mencionar una forma particular de contaminación de suelo, que es el urbanismo. Las megalópolis modernas como la ciudad de México cubren con asfalto y cemento gigantescas áreas del suelo que pudo haber sido rico y prolífero. ⁽²⁾

4.2 FUENTES DE CONTAMINACIÓN AL SUELO

4.2.1 URBANAS

La contaminación de origen urbano incluye los desechos provenientes de: las casas habitación, del comercio y de las instituciones que ofrecen servicios a la población. Debe considerarse también la basura de las calles y banquetas, ya sea que fueran arrojadas por el hombre o arrastradas por la lluvia.

4.2.2 INDUSTRIALES

Los contaminantes del suelo de origen industrial, incluyen los materiales de los que se despojan todas las industrias como son: empaques, cajas, papel etc., y la materia que arrojan ciertas industrias específicas como son la industria petroquímica, alimenticia moderna, de la construcción, cementera y metalúrgica y las plantas de tratamiento de agua.

4.2.3 AGRÍCOLAS

Estos contaminantes abarcan la materia agropecuaria de despojos, o sea plantas y animales muertos y plaguicidas cuyo uso inadecuado ha dado lugar a acaloradas controversias. El uso de plaguicidas tiene, sin embargo, efectos secundarios dañinos como son: el envenenamiento de otros ecosistemas tanto de la litosfera como de la hidrosfera y la creciente tolerancia de insectos y hierbas a los plaguicidas haciendo que las dosis necesarias sean cada vez mayores.^(2,3)

4.3 CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS⁽³⁾

En el suelo existen unos elementos minoritarios que se encuentran en muy bajas concentraciones y al evolucionar la vida adaptándose a estas disponibilidades, ha ocurrido que las concentraciones más altas de estos elementos se han vuelto tóxicas para los organismos. Dentro de este grupo de elementos son muy abundantes los denominados metales pesados.

Se considera metal pesado a aquel elemento que tiene una densidad igual o superior a 5 gr./cm³ cuando está en forma elemental, o cuyo número atómico es superior a 20 (excluyendo a los metales alcalinos y alcalino-térreos). Su presencia en la corteza terrestre es inferior al 0,1% y casi siempre menor del 0,01%. Junto a estos metales pesados hay otros elementos químicos que aunque son metales ligeros o no metales se suelen englobar con ellos por presentar orígenes y comportamientos asociados; es este el caso del As, B, Ba y Se. Dentro de los metales pesados hay dos grupos:

TRABAJOS CON
FALTA DE ORIGEN

4.3.1 OLIGOELEMENTOS O MICRONUTRIENTES

Son los requeridos en pequeñas cantidades, o cantidades traza por plantas y animales, y son necesarios para que los organismos completen su ciclo vital. Pasado cierto umbral se vuelven tóxicos. Dentro de este grupo están: As, B, Co, Cr, Cu, Mo, Mn, Ni, Se y Zn.

4.3.2 METALES PESADOS SIN FUNCIÓN BIOLÓGICA CONOCIDA

Cuya presencia en determinadas cantidades en seres vivos lleva aparejadas disfunciones en el funcionamiento de ciertos organismos. Resultan altamente tóxicos y presentan la propiedad de acumularse en los organismos vivos. Principalmente son: Cd, Hg, Pb, Cu, Ni, Zn, Sb, Bi.

Las concentraciones anómalas que se presentan en un suelo pueden ser por causas naturales (por ejemplo, los suelos desarrollados sobre serpentinas, con altos contenidos en elementos como Cr, Ni, Cu y Mn); los metales pesados son muy estables en el suelo y en el proceso natural de transformación de las rocas para originar a los suelos suelen concentrarse, pero, en general, sin rebasar los umbrales de toxicidad. Además, los metales pesados presentes en las rocas se encuentran bajo formas químicas muy poco asimilables para los organismos.

Las rocas ígneas ultrabásicas (como las peridotitas y las serpentinas) presentan los contenidos más altos en metales pesados, seguidas de las ígneas básicas (como los gabros y basaltos). Las concentraciones menores se encuentran en las rocas ígneas ácidas (como el granito) y en las sedimentarias (como las areniscas y las calizas). Los porcentajes más altos se dan para el Cr, Mn y Ni, mientras que el Co, Cu, Zn y Pb se presentan en menores cantidades, siendo mínimos los contenidos para el As, Cd y Hg.

En los suelos, los metales más abundantes son el Mn, Cr, Zn, Ni y Pb (1-1.500 mg/kg; el Mn puede llegar a 10.000 mg/kg). En menores concentraciones se encuentran el Co, Cu y As (0,1-250 mg/kg) y con porcentajes mínimos el Cd y Hg (0,01-2 mg/kg), según Bowen, 1979. ⁽³⁾

El contenido de metales pesados en suelos, debería ser únicamente función de la composición del material original y de los procesos edafogénicos que dan lugar al suelo. Pero la actividad humana incrementa el contenido de estos metales en el suelo en

4. APÉNDICE I. GENERALIDADES DEL SUELO

cantidades considerables, siendo esta, sin duda, la causa más frecuente de las concentraciones tóxicas.

De hecho, esto sucede debido a los vertidos de origen antropogénico, procedentes de vertidos industriales, de actividades mineras, de la aplicación de plaguicidas o también del tráfico rodado. Como resultado, se emiten grandes cantidades de partículas que, después de un cierto tiempo de permanencia en la atmósfera, precipitan en los suelos lejos del lugar donde han sido vertidas.

En un balance realizado a finales de la década de los años 80, se estimó que la cantidad anual de vertidos de metales en suelos ascendía a unos 5 mil billones de Kg. El 74% de esta cantidad corresponde a las cenizas procedentes de la combustión de carburantes, principalmente carbón. ⁽³⁾

Tabla 4.1 Cantidad anual de vertidos de metales en suelos

Fuente	Contribución (%)
Cenizas de combustión	74
Desechos urbanos	9
Turba	6
Residuos metalurgia	6
Residuos materia orgánica	3
Fertilizantes	2

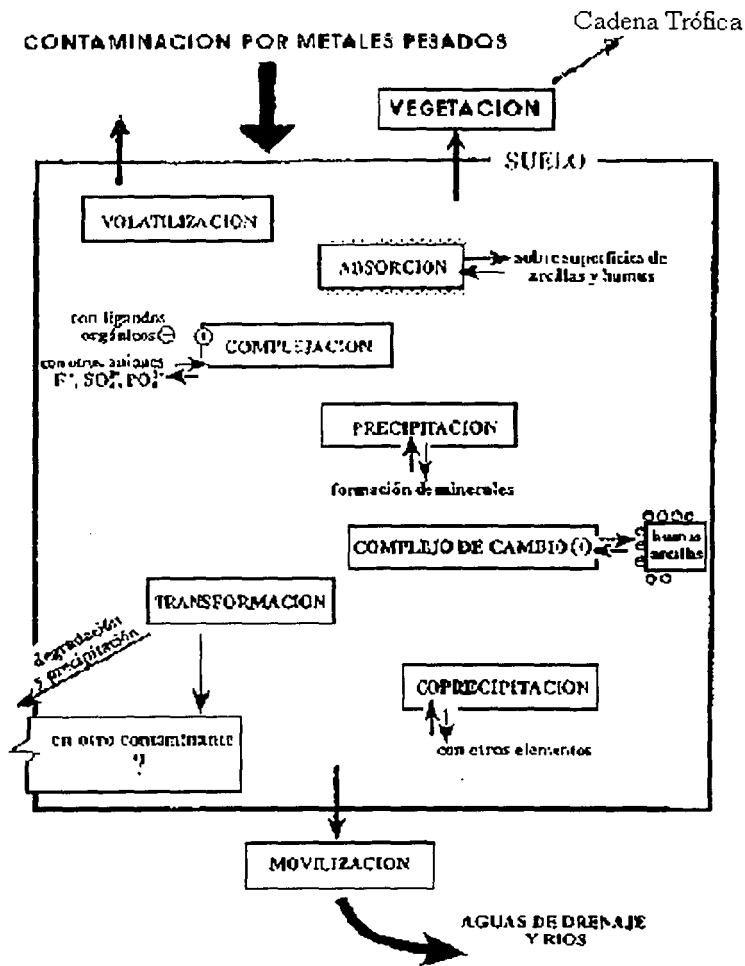
Como se observa en la siguiente tabla, los elementos que han experimentado mayores incrementos en su producción en los últimos años son: Al, Ni, Cr, Cd y V, si bien no todos llegan a los suelos proporcionalmente a la cantidad utilizada.

Tabla 4.2 Cambios en la producción primaria de algunos metales.
(1000Tn/año), (Alloway, 1990).

Metal	Producciones				Emisiones en suelos
	1930	1950	1980	1985	1980/90
Al	120	1.500	15.395	13.690	--
Cd	1	6	15	19	22
Cr	560	2.270	11.245	9.940	896
Cu	1.611	2.650	7.660	8.114	954
Fe	80.180	189.000	714.490	715.440	--
Pb	1.696	1.670	3.096	3.077	796
Mn	3.491	5.800	26.720	--	1.670
Hg	4	5	7	7	8
Ni	22	144	759	778	325
Sn	179	172	251	194	--
V	--	1,8	35	134	132
Zn	1.394	1.970	5.229	6.024	1.372

Una vez vertidos en el suelo, la concentración de los cationes metálicos en la disolución del suelo disminuye con el tiempo, puesto que pasan a ser adsorbidos en las posiciones de adsorción.

Figura 4.1 Adsorción de metales pesados en suelo.



4.4 PROCEDENCIAS DE LOS METALES PESADOS EN SUELOS ⁽³⁾

4.4.1 ORIGEN NATURAL.

El carbón es una de las principales fuentes de deposición de metales en suelos. Las centrales térmicas de combustión de petróleo pueden ser fuentes de plomo, níquel y vanadio.

Las mayores fuentes industriales de metales incluyen fábricas de hierro y acero que emiten metales como el níquel. Las fábricas de baterías, pueden emitir cantidades considerables de plomo. Los metales asociados con áreas altamente industrializadas, incluyen arsénico, cadmio, cromo, hierro, níquel, plomo, zinc y mercurio.

4.4.1.1 RESIDUOS DOMÉSTICOS

Aproximadamente el 10% de la basura está compuesta de metales. Uno de los problemas más serios de las sociedades modernas es como deshacerse de este volumen de basuras. Las dos alternativas son enterrar o incinerar. El enterramiento puede contaminar las aguas subterráneas, mientras que la incineración puede contaminar la atmósfera al liberar algunos de los metales volátiles. Los metales pesados contenidos en el material original, al volatilizarse, se concentran en los suelos. Estas concentraciones naturales de metales pueden llegar a ser tóxicas para el crecimiento de las plantas, así por ejemplo, el níquel puede aparecer en concentraciones tóxicas en suelos derivados de rocas ultra-básicas.

Concentraciones naturales muy altas en los suelos pueden ocasionar acumulación de algún metal en plantas y ocasionar efectos tóxicos para los animales que las consumen.

También hemos de considerar las actividades volcánicas, que emiten metales pesados tales como: As, Hg y Se.

En la siguiente tabla se resume la composición en metales pesados de diferentes entes naturales.

Tabla 4.3. Concentración de Metales en diversos compartimentos ambientales. (Concentraciones en mg/Kg.)

Elemento	Granitos	Basalto	Esquisto	Caliza	Arenisca	Suelos
Ag	0.04	0.1	0.07	0.12	0.25	0.05
Al (*)	7.7	8.8	8.8	9	4.3	7.1
As	1.5	1.5	13	1	1	6
Cd	0.09	0.13	0.22	0.028	0.05	0.35
Co	1	35	19	0.1	0.3	8
Cr	4	90	90	11	35	70
Cu	13	90	39	5.5	30	30
Fe (*)	2.7	5.6	4.8	1.7	2.9	4
Hg	0.08	0.012	0.012	0.18	0.29	0.06
Mn	400	1500	850	620	460	1000
Mo	2	1	2.6	0.16	0.2	1.2
Ni	0.5	150	68	7	9	50
Pb	24	3	23	5.7	10	35
Se	0.05	0.05	0.5	0.03	0.01	0.4
Sn	3.5	1	6	0.5	0.5	4
Zn	52	100	120	20	30	90

Elemento	Plantas Terrestres (mg/kg)	Mamíferos (mg/kg)	Peces Marinos (mg/kg)	Aire (polo sur) (ng/kg)	Agua Marina (mg/L)	Agua Continental (mg/L)	Lluvia (mg/L)
Ag	0.01-.8	.01-.44	0.04-0.1	-	0.04	0.3	0.006
Al (*)	90-530	0.7-28	20	0.67	2	300	2.1-105
As	0.2-7	<1.6	0.2-10	0.006	1.3-2.5	0.5	-
Cd	0.1-2.4	0.1-3.2	0.1-3	<0.4	<0.025	0.1	0.02-0.06
Co	<1	<1	0.02	<0.03	0.02	0.2	0.17-0.95
Cr	0.03-10	0.01-33	0.03-2	<0.03	0.09-0.55	1	-
Cu	5.0-15	1.0-26	0.7-15	0.51	0.01	3	0.01-15
Fe (*)	70-700	3-380	1.0-15	<29	2	500	0.4-84
Hg	<0.02	0.02-0.7	0.4	<0.01	<0.012	0.1	-
Mn	200-700	0.2-14	0.3-4.6	1.2	0.2	8	-
Mo	0.06-3	0.02-0.7	1	<0.2	10	0.5	0.01-12
Ni	1.0-5	0.7-1.2	0.1-4	<2	0.02-0.7	0.5	-
Pb	1.0-13	0.2-30	0.01-2	3.6	<0.02	3	-
Se	0.03	0.4-9	0.2	0.005	0.06-0.12	0.2	0.01-0.77
Sn	0.02-2	0.01-2	-	-	0.004	<0.01	<0.01
Zn	20-400	75-240	10	0.027	<0.6	10	0.05-100

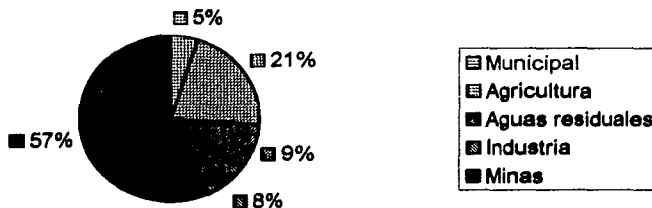
La concentración de los metales en los suelos varía considerablemente con la profundidad (como ocurre generalmente con todas las propiedades de los suelos).

4.4.2 FUENTES ANTROPOGÉNICAS

Actividades Humanas: Las actividades humanas han ejercido un efecto considerable en la concentración y movilidad de los metales en suelos. La contaminación de metales pesados en suelos tiene orígenes muy diversos, entre los que se encuentran los desechos de manufactura, cenizas de carbón, agricultura y ganadería, lluvia, fabricación de metales, basuras urbanas y el alcantarillado municipal. Ciertas actividades presentan mayores efectos que otras.

Las cantidades producidas de residuos sólidos y semisólidos en los países desarrollados, se representan en porcentajes en la siguiente gráfica.

Figura 4.2 Cantidades producidas de residuos sólidos y semisólidos en los países desarrollados



A excepción de pH ácidos, los metales son poco móviles en suelos y tienden a acumularse en la parte superficial, en el horizonte biológicamente más activo, lo que hace que los metales estén fácilmente accesibles para los vegetales.

4.5 FACTORES DEL SUELO QUE AFECTAN SU ACUMULACIÓN Y DISPONIBILIDAD. ⁽³⁾

La toxicidad de un agente contaminante no sólo va a depender de sus características inherentes, las propiedades del suelo donde se encuentre van a ser también decisivas. La sensibilidad de los suelos a la agresión de los agentes contaminantes es muy distinta dependiendo de una serie de características edáficas.

4.5.1 pH

Es un factor esencial. La mayoría de los metales tienden a estar más disponibles a pH ácido, excepto As, Mo, Se y Cr, los cuales tienden a estar más disponibles a pH alcalino.

El pH, es un parámetro importante para definir la movilidad del catión, debido a que en medios de pH moderadamente alto se produce la precipitación como hidróxidos. En medios muy alcalinos, pueden nuevamente pasar a la solución como hidroxicomplejos.

Por otra parte, algunos metales pueden estar en la disolución del suelo como aniones solubles. Tal es el caso de los siguientes metales: Se, V, As, Cr. La adsorción de los metales pesados está fuertemente condicionada por el pH del suelo.

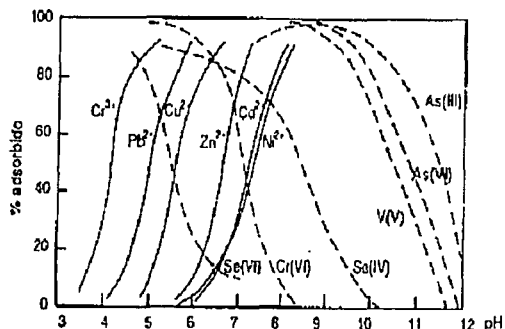


Figura 4.3. Influencia del pH sobre la absorción de algunos metales y oxianiones metálicos sobre hidróxidos de Fe amorfo (Manzione y Marril, 1989)

4.5.2 TEXTURA

La arcilla tiende a adsorber a los metales pesados, quedando retenidos en sus posiciones de cambio. Por el contrario, los suelos arenosos carecen de capacidad de fijación de los metales pesados, los cuales pasan rápidamente al subsuelo y pueden contaminar los niveles freáticos.

4.5.3 MATERIA ORGÁNICA

Los metales al reaccionar con ciertos compuestos orgánicos forman complejos o quelatos, que pueden migrar con mayor facilidad a lo largo del perfil.

La materia orgánica puede adsorber tan fuertemente a algunos metales, como es el Cu, que pueden quedar en posición no disponible por las plantas. Por eso algunas plantas, de suelos orgánicos, presentan carencia de ciertos elementos como el Cu. El Pb y el Zn forman quelatos solubles muy estables.

La complejación por la materia orgánica del suelo es una de los procesos que gobiernan la solubilidad y la bioasimilación de metales pesados. La toxicidad de los metales pesados se potencia en gran medida por su fuerte tendencia a formar complejos organometálicos, lo que facilita su solubilidad, disponibilidad y dispersión. La estabilidad de muchos de estos complejos frente a la degradación por los organismos del suelo es una causa muy importante de la persistencia de la toxicidad. Pero también la presencia de abundantes quelatos puede reducir la concentración de otros iones tóxicos en la solución del suelo.

La estabilidad de los complejos tiende a seguir la siguiente secuencia: $Cu > Fe > Mn = Co > Zn$

4.5.4 CAPACIDAD DE INTERCAMBIO

Este parámetro es función del contenido de arcilla y materia orgánica, fundamentalmente. En general, cuanto mayor sea la capacidad de intercambio catiónico, mayor será la capacidad del suelo de fijar metales. El poder de adsorción de los distintos metales pesados depende de su valencia y del radio iónico hidratado; a mayor tamaño y menor valencia, menos fuertemente quedan retenidos. ⁽³⁾

4.5.5 CONDICIONES REDOX

El potencial de oxidación-reducción es responsable de que el metal se encuentre en estado oxidado o reducido. Los diagramas Potencial (E) = f(pH) se utilizan para mostrar la estabilidad de compuestos de metales pesados y proporciona un método fácil para predecir el comportamiento de los metales pesados frente a un de cambio en las condiciones ambientales.

- Cambio directo en la valencia de ciertos metales: Por ejemplo, en condiciones reductoras el Fe^{3+} se transforma en Fe^{2+} , los iones reducidos son mucho más solubles.
- En segundo lugar, las condiciones redox pueden afectar indirectamente la movilidad de metales. Así, muchos metales están asociados o adsorbidos a hidróxidos de Fe y Mn, estos no son estables a E bajos y se convierten en FeS o $FeCO_3$, dependiendo de las condiciones químicas; cuando esto ocurre los metales que estaban asociados con los hidróxidos de Fe y Mn se movilizan.

En ambientes muy reductores el hierro se puede combinar con el S_2^- hasta convertirse en pirita. Cuando los suelos y sedimentos contienen cantidades significantes de pirita y aumenta el Eh (creación de condiciones más oxidantes) el S_2^- se oxida a SO_4^{2-} liberando cantidades de H_2SO_4 , el suelo se acidifica fuertemente y los metales se hacen muy solubles.

Muy ilustrativa es la tabla que Plant y Raiswell (1983) han desarrollado sobre la movilidad de los metales pesados y elementos asociados en función de las condiciones de pH y Eh. ⁽³⁾

Tabla 4.4. Movilidad relativa de los metales pesados según el Eh y pH del suelo

Movilidad	Eh Oxidante	pH Ácido	pH neutro, alcalino	Eh Reductor
Alta	Zn	Zn, Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au		
Media	Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au, Cd	Cd	Cd	
Baja	Pb	Pb	Pb	
Muy baja	Fe, Mn, Al, Sn, Pt, Cr, Zr	Al, Sn, Pt, Cr	Al, Sn, Cr, Zn, Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au	Zn, Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au, Cd, Pb

4.5.6 ÓXIDOS E HIDRÓXIDOS DE FE Y MN

Los óxidos e hidróxidos de Fe y Mn, juegan un importante papel en la retención de los metales pesados, ya que tienen una alta capacidad de fijar a los metales pesados e inmovilizarlos. Además, estos compuestos se presentan finamente diseminados en la masa del suelo por lo que son muy activos. Los suelos con altos contenidos de Fe y Mn tienen una gran capacidad de adsorber metales divalentes, especialmente Cu, Pb y en menor extensión Zn, Co, Cr, Mo y Ni. ⁽³⁾

4.5.7 CARBONATOS

La presencia de carbonatos garantiza el mantenimiento de altos valores de pH, en los que se tienden a precipitar los metales pesados. El Cd, y otros metales, presenta una marcada tendencia a quedar adsorbido por los carbonatos.

4.5.8 SALINIDAD

El aumento en salinidad puede incrementar la movilización de los metales por dos mecanismos. Primeramente los cationes asociados con las sales (Na, K) pueden reemplazar a metales pesados en lugares de adsorción. En segundo lugar los aniones cloruro pueden formar complejos solubles estables con metales pesados tales como Cd, Zn y Hg.

En definitiva, según la forma en la que se encuentre el metal retenido en el suelo, así será la disponibilidad relativa por las plantas y por tanto la incorporación en los organismos.

Tabla 4.5. Disponibilidad relativa de metales en función de su forma de retención en el suelo.

Forma de retención en el suelo	Disponibilidad relativa
Iones en solución del suelo	Fácilmente disponible
Ión en complejo de cambio	Relativamente disponibles pues estos metales, por su pequeño tamaño y altas cargas, quedan fuertemente adsorbidos

Tabla 4.5 Continuación...

Forma de retención en el suelo	Disponibilidad relativa
Metales quelados por compuestos orgánicos	Menos disponibles
Metal precipitado o coprecipitado	Disponible sólo si ocurre alguna alteración química
Incorporado a la matriz biológica	Disponible después de la descomposición
Metal en la estructura mineral	Disponible después de la meteorización

Al ir transcurriendo el tiempo disminuye la disponibilidad de los metales, ya que se van fijando en las posiciones de adsorción más fuertes y también los geles van envejeciendo y se van volviendo más cristalinos.

En general, se considera que la movilidad de los metales pesados es muy baja, quedando acumulados en los primeros centímetros del suelo, siendo lixiviados a los horizontes subsuperficiales en muy pequeñas cantidades. Es por ello que la presencia de altas concentraciones en el horizonte superficial seguida de un drástico decrecimiento a los pocos centímetros de profundidad es un buen criterio de diagnóstico de contaminación antrópica. (3)

4.6 DESCONTAMINACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS (4)

Es importante el eliminar los contaminantes de los suelos que se pretenden emplear para uso agrícola u otra actividad antropogénica, antes de ser utilizados.

La disyuntiva que se presenta frente a un suelo contaminado es recuperarlo o destruirlo. En un principio ha prevalecido la última opción, mientras que en los últimos años se ha prestado una especial atención a las técnicas de recuperación que posibilitan su reutilización.

La problemática de la descontaminación de los suelos podemos tratarla bajo dos perspectivas: técnicas de aislamiento de la contaminación y técnicas de descontaminación.

4.6.1 TÉCNICAS DE AISLAMIENTO

Para evitar que la contaminación se propague desde los suelos contaminados estos pueden ser almacenados en vertederos apropiados, sellados in situ o bien destruidos totalmente.

La técnica del sellado trata al suelo con un agente que lo encapsula y lo aísla. El suelo es excavado, la zona se sella con un impermeabilizante y se redeposita el suelo. Para desarrollar las barreras de aislamiento se ha utilizado diversas sustancias, como el cemento, cal, plásticos, arcilla, etc. El procedimiento tiene el inconveniente que se pueden producir grietas por las que los contaminantes pueden fugarse.

Sometiendo al suelo a altas temperaturas (1600-2300°C) se consigue su vitrificación con lo que se llegan a fundir los materiales del suelo, produciéndose una masa vítrea similar a la obsidiana. Durante el proceso hay que controlar la volatilización de numerosos compuestos, principalmente los tóxicos.

La propia filosofía de estas técnicas (que persiguen la eliminación del suelo) las hace sólo recomendable en situaciones extremas.

En otras ocasiones se realiza el aislamiento directamente, sobre los niveles de aguas freáticas. Mediante bombeos exhaustivos se consigue deprimir los niveles freáticos para alejarlos del suelo y subsuelo contaminados. El agua bombeada es tratada para eliminar su contaminación.

4.6.2 TÉCNICAS DE DESCONTAMINACIÓN

Básicamente se utilizan cinco métodos para la recuperación de los suelos contaminados:

1. Extracción
2. Tratamiento químico
3. Tratamiento electroquímico
4. Tratamiento térmico
5. Tratamiento microbiológico

En función de como se apliquen las técnicas depuradoras se habla de:

- Tratamientos in situ
- Tratamientos on site
- Tratamientos ex situ (off site)

El procedimiento *in situ* es el que requiere menos manejo, pero su aplicación resulta frecuentemente difícil de llevar a la práctica, dada la dificultad que representa el poner en íntimo contacto a los agentes limpiadores con la masa del suelo. En el tratamiento *on site* el suelo se excava y se trata en el propio terreno. El método *ex site* requiere las etapas de excavación, transporte, tratamiento en las plantas depuradoras, devolución y enterramiento. Este proceso exige mayor inversiones pero es más rápido y con él se consiguen recuperaciones más completas. ⁽⁴⁾

4.6.2.1 EXTRACCIÓN POR FLUIDOS

Consiste en separar los contaminantes mediante la acción de un fluido, a veces aire (arrastre) y en otras ocasiones se usa agua (lavado). Una vez arrastrado el contaminante, se depura el efluente con técnicas apropiadas.

Se trata de procedimientos muy sencillos pero para que sean efectivos requieren que los suelos sean permeables y que las sustancias contaminantes tengan suficiente movilidad. Además, no son métodos válidos cuando el suelo presenta una alta capacidad de adsorción. Son métodos típicamente desarrollados *in situ*.

4.6.2.2 AIREACIÓN

Se considera un método de volatilización pasiva para contaminantes volátiles. El suelo se excava y se vierte una fina capa, de unos 20 cm, sobre una superficie impermeable.

Para favorecer la volatilización se procede a la remoción periódica, por ejemplo, mediante el arado. El riego también favorece el proceso ya que el agua disuelve los contaminantes y produce su desorción y al evaporarse los arrastra hacia la superficie. Además la humedad acelera la actividad de los microorganismos. También al extender el suelo se aumenta su temperatura y se expone a la acción de los vientos, con lo que aumenta la volatilización.

En general, se trata de un proceso muy lento y tiene el inconveniente de que los contaminantes son devueltos directamente a la atmósfera, sin sufrir ninguna depuración. No obstante, en general, estos compuestos devueltos a la atmósfera tienden a degradarse rápidamente. Su principal ventaja es su bajo presupuesto económico.

4.6.2.3 ARRASTRE

Consiste en inyectar un gas para arrastrar a los contaminantes. Generalmente se utiliza aire y vapor de agua. El aire penetra desde la superficie del terreno y se fuerza su circulación al succionarlo a través de unos pozos que se excavan.

En otras ocasiones el aire o un gas se inyecta sobre la superficie del suelo o a través de pozos (en este último caso, se recomienda sellar la superficie del terreno con arcilla, plástico, cemento, asfalto, etc.). En ocasiones se mejoran los rendimientos utilizando aire caliente.

El aire se inyecta mediante unas barrenas helicoidales que perforan y mezclan el suelo, propagándose a través del migrando hacia la superficie. A veces se perforan unos pozos para extraer el aire mediante succión. El aire con los contaminantes se puede depurar utilizando filtros de carbono activo.

Es un procedimiento sólo válido para extraer contaminantes volátiles (cómo mínimo con una presión de vapor de mercurio de 0,5mm) y de bajo peso molecular, como son: xileno, benceno, tolueno, tetracloruro de carbono, tricloroetano, cloruro de metilo, etc.

La rapidez y eficacia depende de la permeabilidad del suelo. Al disminuir esta se alargan los tiempos del tratamiento, con lo que aumentan los costes. También influye el estado de humedad del suelo. Así cuanto más seco se encuentre más fácilmente será atravesado por el flujo extractante.

Es un método muy sencillo, que usa una tecnología estándar y fácil de adquirir. Posibilita tratar grandes volúmenes de suelo a un coste razonable, produciendo una alteración mínima en el terreno. ⁽⁴⁾

4.6.2.4 LAVADO

El método sólo es válido para contaminantes solubles en agua (en la práctica la solubilidad ha de ser mayor de 1000 mg/l). Normalmente se trata de una técnica in situ. Consiste en inyectar agua en el suelo. El agua moviliza a los contaminantes y luego se extrae y se depura. El agua se introduce mediante zanjas y pozos y se recoge en unos drenes (tuberías horizontales) y se extrae de los pozos mediante unas bombas de succión.

En ocasiones se utiliza agua con disolventes para facilitar la extracción. También se emplean detergentes para extraer contaminantes con comportamientos hidrofóbicos. Otra

variante consiste en utilizar soluciones acidificantes. La extracción ácida ofrece buenos resultados para el caso de los metales pesados.

Este tratamiento también puede llevarse a cabo como técnica *ex situ*. El suelo excavado es tratado con una solución acuosa en un tanque. Se tamiza para separar las fracciones más gruesas (generalmente, superiores a los 20 mm de diámetro). Los materiales finos se mezclan con un fluido lavador y posteriormente son aclarados. Después se separan las arenas, que tienen una capacidad muy baja para retener contaminantes. Las arcillas y los limos continúan en el proceso de depuración y finalmente los materiales que conserven todavía un alto porcentaje de contaminantes son separados para su aislamiento en vertederos controlados. Esta técnica es útil para una amplia gama de compuestos contaminantes como los metales pesados, cianuros metálicos, disolventes nitrogenados, hidrocarburos aromáticos, gasolinas, aceites minerales, PBC (productos organoclorados, como los policlorobifenilos), etc. Los fluidos utilizados son muy diversos dependiendo del tipo de contaminante: agua, disoluciones acuosas, disolventes orgánicos, compuestos quelantes, productos tensoactivos, ácidos y bases (E. de Miguel García, 1995).

4.6.2.5 TRATAMIENTO QUÍMICO

Se trata de depurar el suelo mediante la degradación de los contaminantes por reacciones químicas. Frecuentemente se trata de reacciones de oxidación de los compuestos orgánicos. Como agente oxidante se emplea el oxígeno y el agua oxigenada. Es un método útil para: aldehídos, ácidos orgánicos, fenoles, cianuros y plaguicidas organoclorados.

Este tratamiento se utiliza preferentemente *in situ*, inyectando el agente depurador a zonas profundas mediante barrenas huecas, o a veces, simplemente mediante un laboreo apropiado del terreno.

Otro procedimiento químico es la descloración. Esta técnica se utilizó, en un principio, para la estabilización de productos del petróleo. En suelos se ha empleado para la descloración de PBC. Consiste en la inyección de CaO , Ca(OH)_2 o NaOH . El suelo al reaccionar se calienta y al aumentar el pH hasta valores de 9 a 11 se produce la descloración de los PBC (E. de Miguel García, 1995).⁽⁴⁾

4.6.2.6 TRATAMIENTO ELECTROQUÍMICO

El desplazamiento de los contaminantes se logra mediante la creación de campos eléctricos. Es un procedimiento a realizar in situ.

Consiste en introducir, a suficiente profundidad, unos electrodos en el suelo. Los contaminantes fluyen desde un electrodo a otro siguiendo las líneas del campo eléctrico. Para favorecer el movimiento se puede añadir una fase acuosa. La movilización de los contaminantes es debida a fenómenos de: migración, electroósmosis y electroforesis.

4.6.2.6.1 MIGRACIÓN

Se trata de una movilización en forma iónica de los contaminantes bajo la influencia de un campo eléctrico. Representa el movimiento de las partículas en disolución con comportamiento iónico.

4.6.2.6.2 ELECTROÓSMOSIS

Movimiento del líquido en relación a las superficies sólidas del campo eléctrico. Se produce la movilización del líquido en masa como consecuencia de la interacción con las paredes de los poros. En las superficies desequilibradas de las partículas del suelo predominan las cargas negativas y atraen al líquido hacia el cátodo que se comporta como si fuese un gran catión. Es este el efecto más importante. ⁽⁴⁾

4.6.2.6.3 ELECTROFORESIS

Representa el desplazamiento de una partícula coloidal cargada en suspensión en un líquido. Es el que tiene menor efecto en el desplazamiento de los contaminantes. El conjunto de estos mecanismos provoca que los contaminantes se desplacen en el campo eléctrico. Los cationes van hacia el cátodo mientras que los aniones lo hacen hacia el ánodo, ambos son extraídos posteriormente.

Este procedimiento tiene la ventaja de que apenas si influye en la depuración la textura ni la permeabilidad (parámetros limitantes de muchos de los otros tratamientos). Se trata de un transporte masivo a través de los poros grandes y pequeños, a diferencia de lo que ocurre con los métodos de lavado y arrastre que apenas actúan sobre los microporos.

Este método proporciona buenos resultados para la recuperación de suelos contaminados por metales pesados, como el Cu, Zn, Pb y As. Igualmente válido para compuestos orgánicos.

4.6.2.7 TRATAMIENTO TÉRMICO

Busca la destrucción de los contaminantes mediante el suministro de calor. Se trata de un tratamiento ex situ.

En la incineración la combustión de los contaminantes se consigue sometiendo al suelo a altas temperaturas (alrededor de 1000°C). El tratamiento se desarrolla en dos fases. En una primera se oxidan la mayor parte de los contaminantes. El proceso se completa en la segunda fase en la que se mantiene al suelo a altas temperaturas durante el tiempo necesario para conseguir la destrucción completa de los contaminantes y se eliminan todos los gases. Para depurar los gases residuales se incorpora un sistema de limpieza.

Es un método muy útil para eliminar la contaminación producida por hidrocarburos poliaromáticos, PBC (policlorobifenilos) y clorofenoles.

La desorción térmica es otro proceso térmico en el que se somete al suelo a unas temperaturas más bajas (250-550°C) para conseguir la desorción en vez de la destrucción de los contaminantes. Con esta técnica se puede tratar la contaminación producida por compuestos orgánicos volátiles (con un peso molecular no muy elevado, como los lubricantes, aceites minerales, gasolinas, etc.) y determinados metales pesados volátiles como es el caso del mercurio. Con esta técnica hay que controlar el paso de los contaminantes a la fase gaseosa, por ejemplo se pueden eliminar en una cámara de combustión o fijarlos sobre carbón activado.

Estos métodos presentan el inconveniente de que el suelo queda completamente transformado, sin materia orgánica, sin microorganismos, sin disoluciones. (4)

4.6.2.8 TRATAMIENTO MICROBIOLÓGICO

Consiste en potenciar el desarrollo de microorganismos con capacidad de degradación de contaminantes (bioremediación). Se puede o favorecer la actividad de los microorganismos presentes o introducir nuevas especies. Para favorecer las acciones

bióticas se pueden mejorar determinadas condiciones edáficas. añadiendo nutrientes, agua, oxígeno y modificando el pH.

En líneas generales la mayoría de los contaminantes orgánicos se degradan bajo condiciones aerobias. Sin embargo hay determinados compuestos, como los alifáticos clorados que resisten bien en condiciones aerobias pero son fácilmente degradados en las anaerobias. Otros incluso, como es el caso de los PBC, se degradan primero en condiciones anaerobias, produciéndose la descloración de manera rápida, y luego la degradación prosigue bajo condiciones aerobias.

La velocidad de descomposición por los organismos va a depender de su concentración, de determinadas características del suelo (disponibilidades de oxígeno y de nutrientes, pH, humedad y temperatura) y de la estabilidad del contaminante.

Este tratamiento se puede desarrollar in situ, on site o ex situ. El tratamiento in situ se usa en suelos permeables cuando la contaminación afecta a los horizontes subsuperficiales. Se perforan unos pozos por los que se inyectan agua con microorganismos (a la que se le han añadido nutrientes). Se bombea el agua contaminada hacia la superficie, se depura y se vuelve a iniciar el ciclo.

Para el tratamiento on site el suelo es excavado y depositado sobre unas piscinas con fondo arenoso y revestidas de un material impermeable, como por ejemplo, una capa plástica, y con un sistema de drenaje del agua. La superficie se riega con unas soluciones enriquecidas en nutrientes, a las que se le habrán añadido los microorganismos.

Los mejores resultados se obtienen en los tratamientos ex situ. Según esta técnica el suelo contaminado es llevado a unos fermentadores, grandes cilindros que giran sobre su eje para agitar el suelo. Durante el tratamiento se añade oxígeno y nutrientes, en condiciones de temperatura controlada. ⁽⁴⁾

**Fundamentos de la
Espectrofotometría
de Absorción Atómica**

5.1 TEORÍA DE ABSORCIÓN Y EMISIÓN ATÓMICA

El átomo consiste en un núcleo central compuesto de protones cargados positivamente y neutrones. Rodeando al núcleo en orbitales definidos están los electrones, cargados negativamente. Los electrones más alejados del núcleo son llamados electrones de valencia.

Un átomo se encuentra en estado basal cuando sus electrones de valencia se encuentran en el nivel de energía más bajo (E_0). Cuando los átomos absorben cantidades discretas de calor o luz, los electrones de valencia pasan a niveles de mayor energía (E_1), ocasionando que el átomo se encuentre en un estado excitado.

Los niveles de energía están cuantizados de acuerdo al número de protones y electrones presentes en el átomo, por lo que cada elemento tiene un arreglo de niveles energéticos característico de él mismo y una determinada gama de longitudes de onda en donde absorbe energía. La cantidad de luz absorbida necesaria para excitar un átomo es proporcional al espacio entre los niveles energéticos que lo caracterizan. Mientras más amplio sea el espacio entre los niveles energéticos, más corta será la longitud de onda necesaria.

En Absorción Atómica las líneas analíticas son llamadas líneas de resonancia, y por definición resultan de las transiciones energéticas que parten del estado basal hacia un estado excitado.⁽⁵⁾

5.1.1 LEY DE LAMBERT-BEER

La absorción atómica es una técnica cuantitativa donde la determinación se lleva a cabo por comparación de la concentración de una serie de estándares con la muestra, utilizando la ley de Lambert-Beer. Dicha ley, es la relación que convierte la intensidad de la luz en concentración según la siguiente ecuación:

$$A = \text{Log } I_0/I_t$$

donde:

A = absorbancia, I_0 = Intensidad incidente, I_t = Intensidad transmitida

Por otro lado.

$$A \propto C$$
$$A = KC = abC$$

donde:

A = absorbancia, C = Concentración

K = Constante de proporcionalidad, a = Absortividad molar, b = Distancia de lectura

Bajo ciertas condiciones a y b se pueden considerar constantes, esto indica una relación lineal entre la absorbancia y la concentración. ⁽⁵⁾

La absorción de radiación por átomos en la atmósfera se observó por primera vez en 1814. Sin embargo, sólo hasta 1953 un físico australiano, Alan Walsh, demostró que la absorción atómica podía usarse como herramienta del laboratorio químico para el análisis cuantitativo. ⁽¹⁰⁾

5.2 INSTRUMENTACIÓN

El instrumento utilizado para medir la absorbancia de átomos libres se le conoce como espectrofotómetro de absorción atómica, el cual consta de las siguientes unidades fundamentales: Fuente de radiación, mon cromador, detector, amplificador y dispositivo de lectura ^(5, 6, 7). En la figura 2.1 se ilustra esquemáticamente.

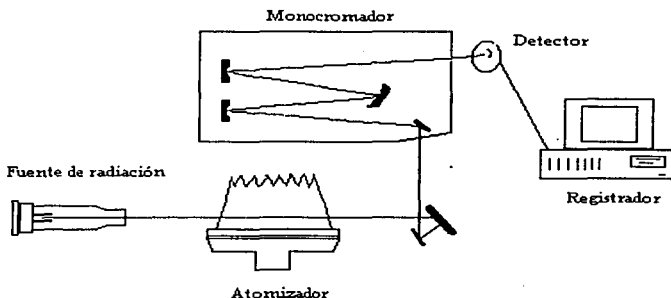


Fig. 5.1. Diagrama que muestra los componentes básicos de un espectrofotómetro de absorción atómica, con la flama como sistema de atomización.

5.2.1 FUENTE DE RADIACIÓN

Un átomo absorbe luz de longitudes de onda muy discretas, para poder medir esta absorción de bandas tan angostas con la máxima sensibilidad, es necesario utilizar una fuente que emita longitudes de onda muy específicas que puedan ser absorbidas por el átomo. Fuentes de líneas muy estrechas no solo producen alta sensibilidad, sino que también hacen que la absorción atómica sea una técnica analítica muy específica con pocas interferencias espectrales. En espectroscopia analítica son utilizadas dos tipos de fuentes de radiación: Continuas y de línea. En Absorción atómica se utilizan fuentes de línea, las cuales emiten energía a determinadas longitudes de onda o líneas analíticas, siendo tradicionalmente utilizadas las lámparas de cátodo hueco (HCL) y la de descarga sin electrodo (UDL).^(7,9)

Lámpara de cátodo hueco: La lámpara de cátodo hueco es una excelente fuente de radiación utilizada por la espectrofotometría de absorción atómica y consta de dos electrodos: Un ánodo y un cátodo hueco encerrados en un cilindro de vidrio con gas inerte (Argón o neón) y una ventana de cuarzo para la región UV o de vidrio para la región visible. El ánodo es generalmente un alambre de wolframio y el cátodo un cilindro hueco hecho del elemento que se analiza o de una aleación que lo contenga. La lámpara de cátodo hueco se ilustra a continuación.

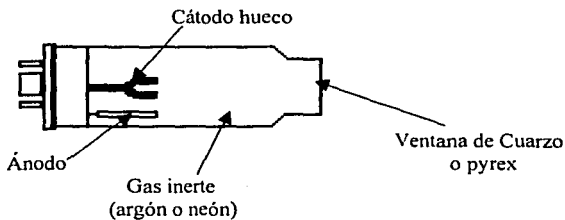


Figura 5.2. Sección transversal de una lámpara de cátodo hueco.

5. Apéndice 2. FUNDAMENTOS DE LA ESPECTROFOTOMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA.

El proceso de emisión de la lámpara consiste en aplicar una corriente (5 a 20mA) entre los electrodos, produciendo la ionización del gas. El movimiento de los electrones provoca colisiones contra las paredes del cátodo desprendiendo los átomos, los cuales pasan a la fase gaseosa, muchos de los átomos desalojados están en estado excitado; emiten fotones y regresan al estado basal. Al enfriarse la lámpara, el vapor del metal se deposita nuevamente sobre el cátodo o en otras partes, dando como resultado con el tiempo el deterioro de la lámpara hasta que queda inservible. ^(5,7,9)

5.2.2 MONOCROMADOR

Su función es aislar una única línea de resonancia del resto de las líneas emitidas por la lámpara de cátodo hueco. Los monocromadores utilizados en absorción atómica utilizan rejillas de difracción como elemento de dispersión y consiste en un bloque de vidrio con una superficie recubierta de aluminio altamente reflectivo, esta superficie aluminizada contiene ranuras finas donde la luz se difracta y por un proceso de mutua interferencia se dispersa a diferentes ángulos de acuerdo a su longitud de onda.

El ancho de ranura o *slit* es un factor determinante en el funcionamiento del monocromador, ya que controla la resolución entre longitudes de onda adyacentes. Si el *slit* es grande, la luz transmitida será alta y la razón señal / ruido excelente, pero la línea de resonancia puede no puede ser aislada de otras generando una curva de calibración excesivamente curva. Por otro lado si el *slit* es angosto, la resolución es excelente pero la razón señal/ruido inaceptable por la poca cantidad de luz que se transmite. ⁽⁵⁾

5.2.3 DETECTOR

La función de detector es convertir la radiación en una señal medible (normalmente eléctrica). La señal es entonces amplificada y usada para dar una medida cuantitativa de absorción. El detector utilizado en Absorción atómica es el tubo fotomultiplicador que ofrece una misma sensibilidad a través de todo el rango de longitudes de onda requeridas para un análisis en Absorción atómica. ⁽⁵⁾

5.2.4 AMPLIFICADOR

El detector recibe tres tipos de señal luminosa: Señal de la lámpara, señal de la flama y señal oscura¹. En un análisis la señal de la flama y la oscura son fuente de ruido, por lo tanto deben de ser discriminadas. Para tal efecto la señal eléctrica obtenida del detector se hace llegar a un pre-amplificador que diferencia la señal de la lámpara que llega en forma de pulsos (por demodulación sincrónica) de la flama y la oscura que llegan en forma continua. Una vez diferenciada solamente la señal de la lámpara pasa hacia un amplificador con lo que se elimina una gran cantidad de señal inservible y ruidosa. ^(5,7)

5.2.5 DISPOSITIVO DE LECTURA

Después amplificada la señal, esta puede interpretarse con una gran variedad de dispositivos de lectura: Registrador gráfico, medidor digital, medidor analógico, impresor, microprocesador registrador e impresor, sistemas de datos y computadoras centrales. ⁽⁵⁾

5.3 SISTEMAS DE ATOMIZACIÓN

El objetivo principal de los sistemas de atomización es llevar los elementos en solución a átomos libres en estado basal en forma de vapor y hacerlos incidir a través del haz de luz para que se lleve a cabo el fenómeno de absorción. Los sistemas de atomización son: Flama, Horno de Grafito y generador de vapor e hidruros. Estos dos últimos llamados sistemas alternos de atomización ⁽⁵⁾.

5.3.1 ATOMIZACIÓN POR FLAMA

La absorción atómica por flama requiere que la muestra a analizar este en solución. La muestra es aspirada hacia una flama (o llama) con temperatura de 2000 a 3000 °K en donde es atomizada (se separa en átomos).

El proceso de atomización se lleva a cabo en las siguientes etapas:

Nebulización: Formación de una nube o spray a partir de la muestra en solución.

Mezclado: Mezcla de la muestra en forma de spray con los gases formadores de la flama.

Evaporación: Eliminación del (los) disolvente (disolventes) de la muestra.

¹ El fotomultiplicador genera una corriente remanente denominada oscura (en ausencia de radiación) debido a fugas de electrones por efectos eléctricos o térmicos.

Fusión: Fusión de las partículas sólidas resultantes de la evaporación.

Vaporización y disociación: Vaporizar partículas sólidas y disociación de las mismas para su posterior liberación.

Atomización: Obtención de átomos en forma de vapor, libres y en estado basal. ^(5,9)

El calor de la flama elimina el solvente de la muestra y a medida que avanza en ella quedá tan solo partículas sólidas de la muestra. Las partículas sólidas se vaporizan por efecto de la alta temperatura y a continuación se disocian produciendo átomos libres y en estado basal.

En la flama la combinación más común de combustible y oxidante es la de acetileno y aire, la cual produce una temperatura de 2400 a 2700°K. Cuando se requiere una flama más caliente, se utiliza la combinación acetileno-oxido nitroso. Si la flama se mantiene relativamente rica en combustible (flama reductora), hay un exceso de especies carbonadas, las cuales las pueden reducir los óxidos metálicos y por tanto incrementar la sensibilidad.

Lo contrario de una flama reductora es una flama "oxidante", la cual contiene exceso de oxidante y es más caliente que una flama reductora. En el análisis de diferentes elementos, se recomienda el uso de flamas oxidantes o reductoras según se requiera.

La posición de la flama a la cual se observa un máximo de absorción o de emisión atómica depende del elemento que se mide así como el gasto (velocidad de flujo) de muestra, combustible y oxidante. ⁽⁷⁾

5.3.2 ATOMIZACIÓN POR CALENTAMIENTO ELECTROTÉRMICO (HORNO DE GRAFITO)

Los hornos calentados eléctricamente presentan mayor sensibilidad de la que es posible en los métodos de flama, y requieren un menor volumen de muestra.

Un horno de grafito tiene mayor sensibilidad porque la muestra completa se confina en el paso de la luz por unos cuantos segundos. En la espectroscopia de flama, la muestra está muy diluida después de la nebulización, y permanece sólo una fracción de segundo en el paso de la luz mientras va ascendiendo por la flama.

Las flamas requieren asimismo un volumen mucho mayor de muestra, debido a que ésta fluye constantemente en la flama. Mientras que para el análisis en flama se requieren 4-5ml, para un horno son adecuados volúmenes de hasta 1µl. ⁽⁷⁾

El sistema de atomización en horno de grafito consta de un tubo de grafito colocado axialmente al camino óptico de la lámpara.

La muestra es introducida a través de un pequeño orificio y depositada sobre la pared interna del tubo. El tubo de grafito es calentado por la resistencia al paso de una corriente alta (bajos voltajes) y protegido de la rápida oxidación por acción del oxígeno del aire con un flujo continuo de gas inerte (N_2 o Ar) durante el proceso de atomización. Una población de átomos libres en estado basal es producida en la sección central del tubo de grafito. El sistema es posteriormente enfriado utilizando una corriente de agua fría que pasa por sus paredes internas. ⁽⁵⁾

El proceso de atomización en horno de grafito consta de tres etapas:

1. Secado: Remoción del (los) solvente (solventes) de la muestra.
2. Calcinado o Mineralizado: Eliminación de materia orgánica e inorgánica.
3. Atomizado: Liberación de átomos en estado basal.

5.3.3 GENERACIÓN DE HIDRUROS ⁽⁵⁾

Para la formación de hidruros es de vital importancia el estado de oxidación del analito, ya que cada uno tiene un estado de oxidación óptimo para la formación de su hidruro correspondiente. Por tal motivo se requiere de una apropiada preparación de la muestra y atención a la reacción química.

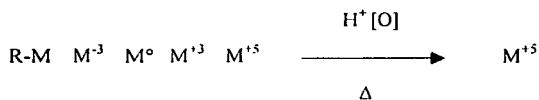
5.3.3.1 TRATAMIENTO DE LA MUESTRA

La preparación de la muestra consiste de una oxidación total del elemento a su máximo estado de oxidación óptimo, asegurando así el éxito de la formación de los hidruros.

OXIDACIÓN:

El objetivo de la oxidación es llevar al analito a su máximo estado de oxidación a partir de cualquier estado en que se encuentre en la muestra para su posterior reducción al estado óptimo.

La oxidación generalmente se lleva a cabo mediante una digestión utilizando ácidos fuertemente oxidantes (Como el HNO_3 y el H_2SO_4).

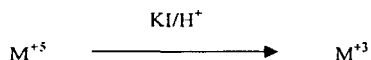


Donde:

M = As, Se, Sn, Bi o Te

REDUCCIÓN

La reducción es esencial ya que mediante esta el analito es llevado de su máximo estado de oxidación a su estado óptimo de oxidación para la formación de los hidruros. La reducción se lleva a cabo por la acción de un agente reductor y/o el pH del medio de reacción.



Donde:

⁺³ = Estado óptimo de oxidación para un elemento dado.

5.3.3.2 FORMACIÓN DE HIDRUROS

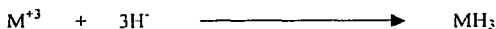
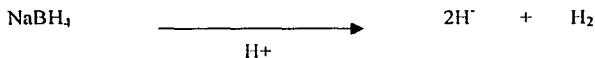
Una vez el analito en su estado óptimo de oxidación, es llevado al sistema generador donde se lleva a cabo la reacción de formación de hidruros.

Los agentes que han sido utilizados para llevar a cabo la formación de los hidruros son:

1. Borohidruro de sodio (NaBH₄)
2. Zinc / ácido
3. Magnesio-Zinc / ácido
4. Cloruro de Titanio III/HCl

El reactivo comúnmente utilizado es el Borohidruro de sodio con el cual son analizados As, Se, Bi, Sb, Te y Sn en niveles de partes por billón (ppb).

El medio de reacción debe ser ácido para que la reacción sea completa:



5.3.3.3 ATOMIZACIÓN:

Una vez formados los hidruros extremadamente volátiles a temperatura ambiente, son arrastrados por un flujo de gas hacia el haz de luz del instrumento el cual pasa a través de la celda de cuarzo.

La celda es calentada para disociar los hidruros, obteniendo así al metal libre y en estado basal.



El calentamiento de la celda puede realizarse de dos formas:

- Calentamiento con flama
- Calentamiento eléctrico

La forma más común es el calentamiento mediante una flama aire / acetileno.

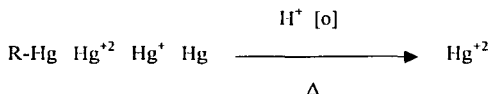
5.3.4 GENERACIÓN DE VAPOR FRÍO (ANÁLISIS DE MERCURIO) ⁽⁵⁾

5.3.4.1 TRATAMIENTO DE LA MUESTRA

El mercurio tiene un estado óptimo de oxidación (Hg^{+2}) el cual debe obtenerse previamente a la formación del vapor atómico, por lo tanto, también requiere de un tratamiento de la muestra. el cual consiste en una oxidación y estabilización.

OXIDACIÓN

La oxidación del mercurio se realiza mediante la digestión de la muestra utilizando ácidos fuertemente oxidantes.



El estado de valencia +2 del mercurio es su estado óptimo de oxidación, por lo que no es necesaria reducción previa a la formación del vapor como es el caso en la generación de hidruros.

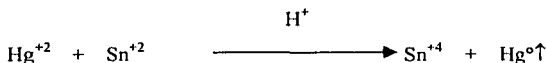
5.3.4.2 ATOMIZACIÓN

La generación de vapor atómico se lleva a cabo mediante una reacción de reducción del Hg^{+2} en medio ácido dentro del sistema generador.

Los agentes reductores comúnmente utilizados en esta reacción son:

- Cloruro de Estaño II ($\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
- Borohidruro de sodio

El cloruro de estaño se utiliza preferentemente al Borohidruro de sodio por la simplificación en la preparación de la muestra y similitud de la sensibilidad.



El mercurio tiene una presión de vapor a temperatura ambiente tal, que puede existir en forma libre en estado basal. Una vez formado el vapor atómico y ser arrastrado, absorberá el haz de luz sin necesidad de ser calentada la celda. ⁽⁵⁾

6. BIBLIOGRAFÍA

1. La lucha constante contra la contaminación del suelo
www.france.diplomatie.fr/france/es/geo/pavs12.html
2. Boletín informativo de la estación meteorológica Sur. Número 9. Enero-Marzo. 1996. www.ems.unam.mx/art1.htm
3. Inés García y Carlos Dorronsoro. Contaminación por metales pesados. Tema 15. <http://edafologia.ugr.es/Conta/Tema00/Progr.html>
4. Descontaminación de suelos contaminados. Tema 19. <http://edafologia.ugr.es/conta/tema00/progr.html>
5. Curso teórico práctico de espectrofotometría de absorción atómica. Sección Química analítica F.E.S Cuautitlán, UNAM. 1996
6. Douglas a. Skoog. química analítica. 6ta ed. Mc Graw Hill. México. 1995. p.453-475
7. Daniel, Harris. Análisis Químico Cuantitativo. 3ra ed. Grupo editorial Iberoamerica. México. 1991. p. 579-593.
8. kenneth a. Connors. Curso de Análisis Farmacéutico. Editorial Reverté. España 1980. p. 620-623
9. Douglas a. Skoog, et al. Análisis Instrumental. 4ta ed. Mc Graw Hill. México 1995. p. 227-265.
10. Hobart H. Willard. et al. Métodos Instrumentales de Análisis. 4ta ed. gpo. ed. Iberoamerica. México 1991. p. 219-248
11. Nonato Nonato. Fernando. Sistemas de atomización utilizados en espectrofotometría de absorción atómica: Flama, Horno de grafito. Generador de hidruros y generador de vapor, para el análisis de muestras complejas. FES-Cuautitlán. UNAM. 1997
12. Zuani Cruz, José; Domínguez Ávila, Humberto. Cuautitlán Izcalli. monografía municipal. Instituto mexiquense de cultura. México. 1999
13. Contin A. Investigación de suelos, métodos de laboratorio y procedimientos para recoger muestras. México. limusa, 1984. 90p.
14. The SpectrAA 800 Series. Varian Australia Pty Ltd Mulgrave, Victoria Australia. Publicación N°. 85-101042-00, Julio 1983.

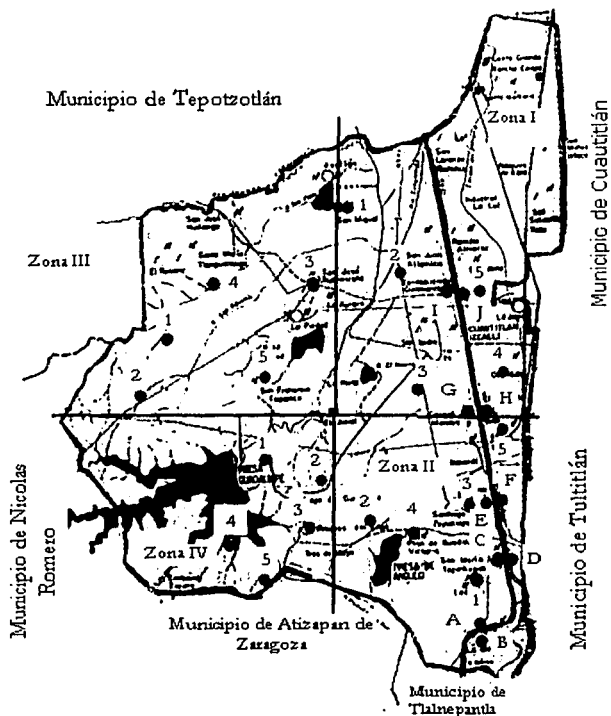
6. BIBLIOGRAFÍA

15. Flame Absorption Spectrometry. Analytical Methods. Varian Australia Pty Ltd Mulgrave, Victoria Australia. Publicación N°. 85-100009-00, Revised March 1989
16. Analytical Methods for Graphite Tube Atomizers. Varian Australia Pty Ltd Mulgrave, Victoria Australia. Publicación N°. 85-100848-00, September 1993.
17. Alan d. Hewitt, C.M Reynolds. Dissolution of metals from soils and sediments with a microwave-nitric acid digestion technique. Atomic spectroscopy. vol. 11. n°. 187-192 1990.
18. W. Van Delft, G. Vos. Comparison of digestion procedures for the determination of mercury in soils by cold-vapour atomic absorption spectrometry. Analytica chimica acta. 209, 147-155, 1988.
19. N.F.Y. Tam, Y.S. Wong. Spatial variation of heavy metals in surface sediments of Hong Kong mangrove swamps. Environmental pollution. 110, 195-205. 2000
20. NOM-001-Ecol-1996 (1997). Norma Oficial Mexicana, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
21. Norma mexicana NMX-AA-25-1984 (1992). Protección al ambiente - Contaminación de suelo -Residuos sólidos-Determinación del pH- Método potenciométrico.
22. Norma mexicana NMX-AA-15-1985 (1992). Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Muestreo - Método de cuarteo.
23. Gary W. VanLoon, Stephen j. Duffy. Environmental chemistry, a global perspective. Oxford university press. USA. 2000. pag. 384-391, 404-407.

Anexos

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ANEXO I. PUNTOS DE MUESTREO DEL MUNICIPIO DE CUAUTITLÁN IZCALLI.

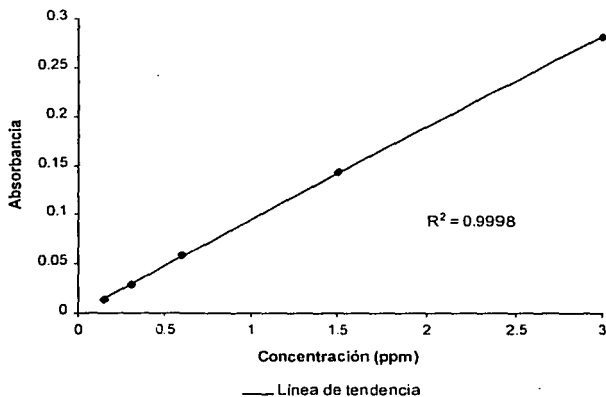


Muestra	Lugar	Etiqueta	Muestra	Lugar	Etiqueta
1	Quebrada	A	6	Km. 33	F
2	Quebrada	B	7	Km. 35	G
3	Lechería	C	8	Km. 35	H
4	Lechería	D	9	Km. 38	I
5	Km. 33	E	10	Km. 38	J

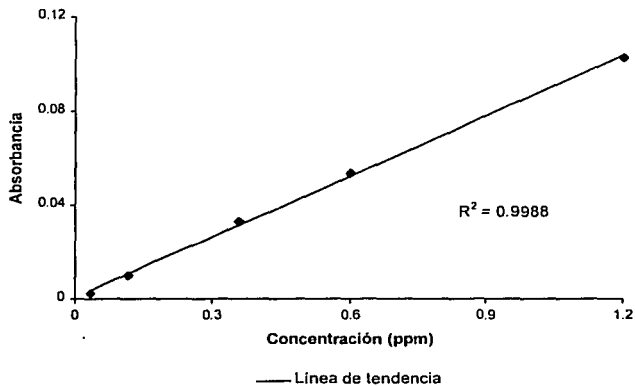
7. ANEXOS

Muestra	Zona	Lugar	Muestra	Zona	Lugar
1	1	Bosques de los frailes	1	3	ejidos
2	1	Circuito Tlapa	2	3	ejidos
3	1	Acambay	3	3	Cedros
4	1	Tecnología	4	3	Leona Vicario
5	1	Ejido San Mateo Ixtacalco (fracción La capilla)	5	3	Barrio La Esperanza
1	2	Hacienda del parque	1	4	Pingüinos
2	2	Circuito miraflores	2	4	Magnolias
3	2	Acapulco	3	4	Av. Cedros
4	2	Abasolo	4	4	Bosque de Bohemia 20
5	2	Av. Del canal	5	4	Bosque de Viena 1

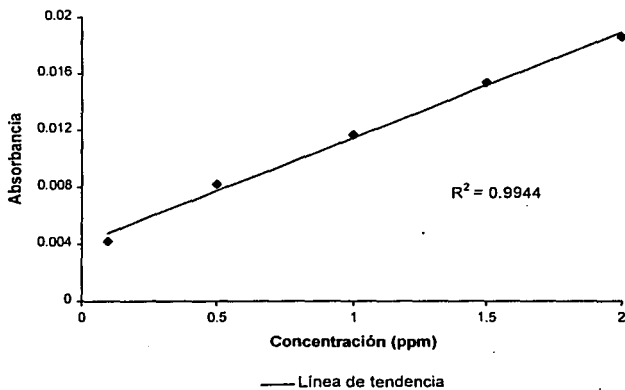
ANEXO 2. CURVA DE CALIBRACIÓN DE COBRE.



ANEXO 3. CURVA DE CALIBRACIÓN DE COBRE.

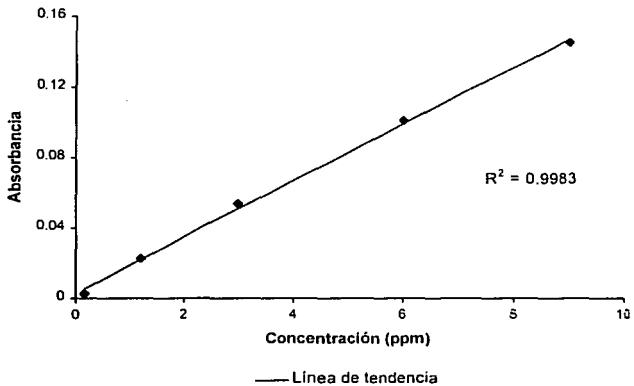


ANEXO 4. CURVA DE CALIBRACIÓN DE CROMO.

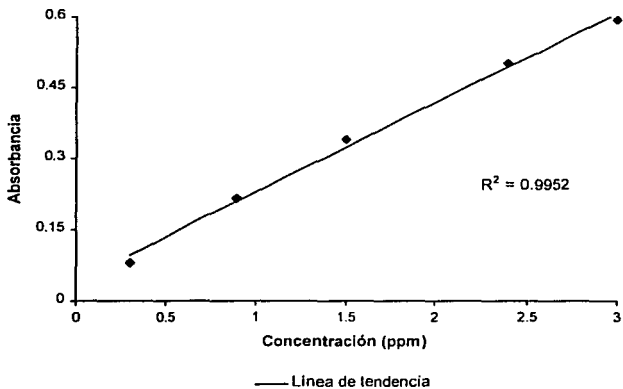


ESTA TESIS NO SALI
DE LA BIBLIOTEC 69

ANEXO 5. CURVA DE CALIBRACIÓN DE PLOMO.

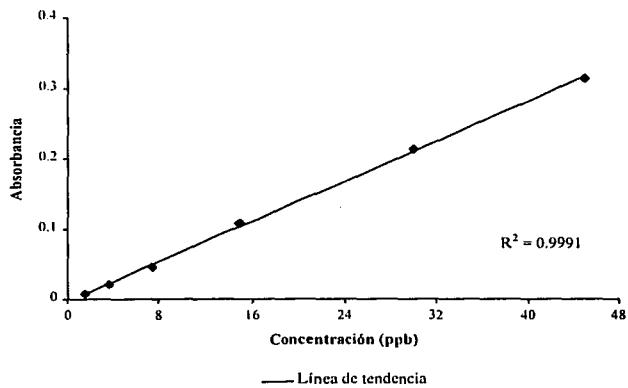


ANEXO 6. CURVA DE CALIBRACIÓN DE ZINC.

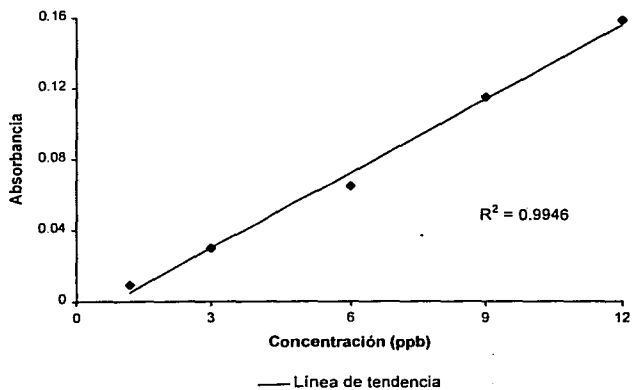


7. ANEXOS

ANEXO 7. CURVA DE CALIBRACIÓN DE ARSÉNICO.

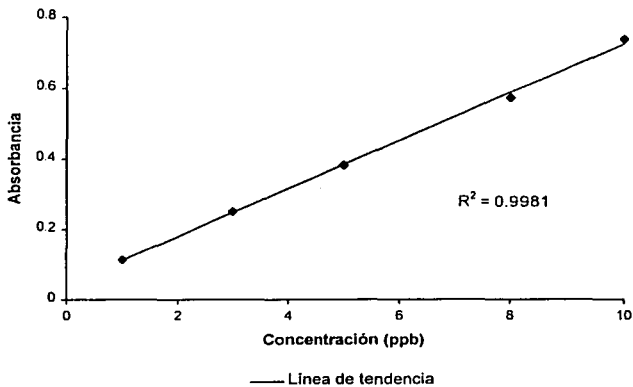


ANEXO 8. CURVA DE CALIBRACIÓN DE MERCURIO.

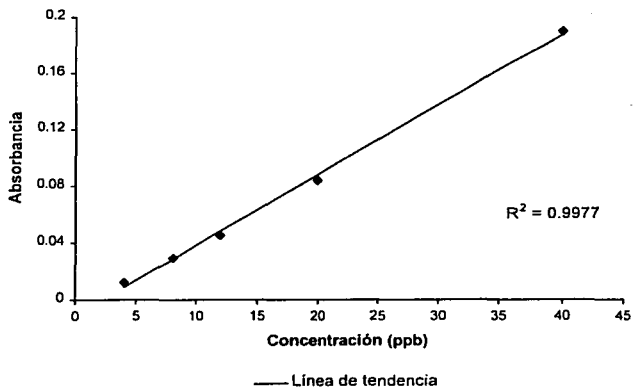


7. ANEXOS

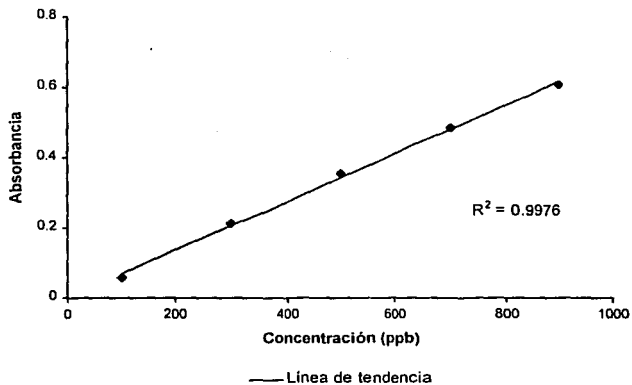
ANEXO 9. CURVA DE CALIBRACIÓN DE CADMIO.



ANEXO 10. CURVA DE CALIBRACIÓN DE PALADIO



ANEXO 11. CURVA DE CALIBRACIÓN DE PLATINO.



ANEXO 12. NOM-001-ECOL-1996

Límites máximos permisibles para metales y cianuros				
Parámetros (*)	Suelo		Humedales naturales (B)	
	Uso en riego agrícola (A)		P.M	P.D
Ppm (**)	P.M	P.D	P.M	P.D
Arsénico	0.2	0.4	0.1	0.2
Cadmio	0.05	0.1	0.1	0.2
Cianuros	2	3	1	2
Cobre	4	6	4	6
Cromo	0.5	1	0.5	1
Mercurio	0.005	0.01	0.005	0.01
Níquel	2	4	2	4
Plomo	5	10	0.2	0.4
Zinc	10	20	10	20

(*) medidos de manera total P.D= promedio diario P.M= promedio mensual.

(A) y (B): Tipo de cuerpo receptor según la Ley Federal de Derechos.

(**) partes por millón (miligramos por litro)