



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN

ESPECIACIÓN QUÍMICA DE CADMIO  
EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO  
DE AGUAS RESIDUALES.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERA QUÍMICA  
P R E S E N T A :  
IZAMARA JAZMÍN HERNÁNDEZ QUIROZ

ASESOR: M. en C. MARÍA DE JESÚS CRUZ ONOFRE



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 CUAUTITLAN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

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



DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN  
PRESENTE

DEPARTAMENTO DE  
EXAMENES PROFESIONALES

ATN: L. A. ARACELI HERRERA HERNANDEZ  
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 :

Especiación química de cadmio en una planta de tratamiento de  
aguas residuales

que presenta la pasante: Izamara Jazmín Hernández Quiroz  
con número de cuenta: 40501055-0 para obtener el título de :  
Ingeniera Química

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 Izcallí, Méx. a 13 de Octubre de 2010.

PRESIDENTE

IQ. Graciela Ruth Delgadillo García

VOCAL

MC. Gilberto Atilano Amaya Ventura

SECRETARIO

MC. María de Jesús Cruz Onofre

PRIMER SUPLENTE

MI. Arturo Ortega Díaz

SEGUNDO SUPLENTE

MI. Julio César Morales Mejía

## AGRADECIMIENTOS:

A Dios, por darme la fortaleza de seguir adelante, por permitirme terminar esta etapa de mi vida y estar siempre a mi lado.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por darme la oportunidad de formar parte de ella, por enseñarme tantas cosas tanto académicamente como personalmente.

A los laboratorios de Virología y de Biología molecular de la FES- Cuautitlán, donde se me permitió ocupar los laboratorios y equipos, para la realización de las extracciones sucesivas de este trabajo.

Así como al Instituto de Geofísica, por la facilidad otorgada en la cuantificación de cadmio, en especial al laboratorio de química analítica.

A mi asesora de tesis, la M. en C. María de Jesús Cruz Onofre, por su apoyo en la realización de este trabajo.

Al jurado, por darse el tiempo para la revisión de este trabajo y por sus aportaciones al mismo.

A la Facultad de Estudios Superiores de Cuautitlán y a todos los profesores que formaron parte en mi preparación profesional, pues me llevo una parte de cada uno de ellos.

Al M. en C. Gilberto Atilano Amaya Ventura, por brindarme su confianza, sus conocimientos y ayudarme a darme cuenta que puedo llegar más lejos.

Al Dr. Paramount, por todo el apoyo a lo largo de mi carrera.

A Triní, por su paciencia, ayuda y amistad brindada durante estos años.

A mi familia, ya que sin su apoyo este trabajo no sería posible; particularmente a mis padres Felipe de Jesús Hernández Solís y Petra Quiroz Puente, por motivarme a seguir adelante, por enseñarme que estando unidos todo se puede,



por darme la oportunidad de estudiar una carrera y por todo ese amor que me dan día con día.

A mi hermano, Omar Salvador Hernández Quiroz, que aunque me sacó de quicio muchas veces, sé que me ama; gracias por darme tu apoyo en momentos difíciles por ayudarme a salir adelante, por enseñarme que nada nos destruirá estando unidos y por ser un gran amigo y hermano.

A mis abuelitos, Esteban Hernández, Herminia Solís, José Quiroz y Josefa Puente, por darme estos padres tan maravillosos, por su cariño y sus enseñanzas.

A mis tías, en especial a María de la Luz Quiroz Puente, por su apoyo y cariño que desde la infancia nos dio y por enseñarme que con esfuerzo se puede todo.

A mis primos, Gustavo, Alejandro, Hugo y Nadia, por su cariño y por formar parte de mi vida.

A mis hermanas y amigas Yessica Trejo y Paola Granados, quienes me ayudaron a ser una mejor persona, gracias por su apoyo, cariño y regaños.

A mis amigos de la FES-C, con quienes viví tantas cosas y quienes aportaron algo a mi vida; en especial a Elizabeth Cruz, por brindarme su amistad y apoyo en momentos difíciles y por ayudarme a salir adelante.

A mi amiga Jessica Hernández, quien me ha demostrado siempre su amistad, apoyándome siempre y con quien eh tenido la oportunidad de convivir tantos años.



## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. OBJETIVOS .....	3
2.1. OBJETIVO GENERAL .....	3
2.2. OBJETIVO PARTICULAR .....	3
3. ANTECEDENTES.....	4
3.1. AGUA.....	4
3.1.1.PROPIEDADES DEL AGUA .....	4
3.1.1.1. PROPIEDADES FÍSICAS.....	4
3.1.1.2. PROPIEDADES QUÍMICAS .....	6
3.1.2.TIPOS DE AGUA .....	7
3.1.3.PROBLEMÁTICA DEL AGUA .....	8
3.2. METALES PESADOS .....	11
3.2.1.CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE METALES PESADOS .....	12
3.2.2.MOVILIDAD DE LOS METALES PESADOS.....	14
3.2.3.EFECTOS SOBRE LA SALUD.....	14
3.3. CADMIO .....	31
3.3.1.FUENTES DE CONTAMINACIÓN .....	31
3.3.1.1. FUENTES NATURALES .....	32
3.3.1.2. FUENTES ANTROPOGÉNICAS .....	33
3.3.2. EFECTOS SOBRE LA SALUD .....	35
3.3.3.CASOS DE POBLACIONES EXPUESTAS .....	37
3.4. CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS .....	37
3.4.1.CONTAMINACIÓN DEL AMBIENTE POR CADMIO.....	38
3.4.2.CONTAMINACIÓN DEL AGUA POR CADMIO .....	40
3.4.3.CONTAMINACIÓN DEL SUELO POR CADMIO .....	42
3.5. ESPECIACIÓN.....	45
3.5.1.ESPECIACIÓN EN EL AMBIENTE.....	47
3.5.2.ESPECIACIÓN DE METALES PESADOS.....	48



3.5.2.1. FORMAS QUÍMICAS .....	50
3.5.2.1.1. METALES EN FORMA DE IONES INTERCAMBIABLES.....	52
3.5.2.1.2. METALES SORBIDOS .....	52
3.5.2.1.3. METALES ENLAZADOS A CARBONATOS .....	53
3.5.2.1.4. METALES ENLAZADOS A LA MATERIA ORGÁNICA.....	53
3.5.2.1.5. METALES UNIDOS A SULFUROS.....	53
3.5.2.1.6. METALES ASOCIADOS A ÓXIDOS DE HIERRO Y MANGANESO.....	54
3.5.2.1.7. FASE RESIDUAL O LITOGÉNICA .....	54
3.6. AGUAS RESIDUALES .....	54
3.6.1.PARÁMETROS FÍSICOS.....	56
3.6.2.PARÁMETROS QUÍMICOS.....	57
3.7. PLANTAS DE TRATAMIENTO .....	59
3.7.1.TIPOS .....	60
3.8. LODOS DE DESECHO .....	64
3.8.1.ORIGEN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE LODO.....	65
3.8.2.CLASIFICACIÓN .....	66
3.8.3.CARACTERIZACIÓN DEL LODO.....	68
3.8.4.MANEJO EN MÉXICO DE LOS LODOS .....	69
4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....	71
4.1. TOMA DE MUESTRAS Y TRANSPORTE.....	71
4.2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	71
4.2.1.REACTIVOS .....	72
4.2.2.MATERIAL.....	72
4.2.3.EQUIPO.....	72
4.3. EXTRACCIÓN QUÍMICA SECUENCIAL .....	73
4.3.1.PRIMERA EXTRACCIÓN.....	73
4.3.2.SEGUNDA EXTRACCIÓN.....	73
4.3.3.TERCERA EXTRACCIÓN .....	74
4.3.4.CUARTA EXTRACCIÓN .....	74
4.3.5.QUINTA EXTRACCIÓN.....	74



4.3.6.SEXTA EXTRACCIÓN.....	75
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	79
5.1. CUANTIFICACIÓN DE CADMIO .....	81
6. CONCLUSIONES.....	87
7. RECOMENDACIONES .....	88
8. REFERENCIAS .....	89
9. APÉNDICE A. LISTA DE TABLAS .....	93
10. APÉNDICE B. LISTA DE FIGURAS.....	94
11. ANEXOS.....	95





## 1. INTRODUCCIÓN:

El problema de la escasez de agua en cantidad y calidad es una preocupación mundial. Alrededor de 1 200 millones de personas todavía no tienen acceso al agua potable y 2 400 millones no tienen servicios sanitarios adecuados [Soto *et al.* 2006].

El aprovechamiento de los recursos naturales (maderas, minerales, agua, etc.) ha sido base fundamental para el desarrollo de la humanidad. Como resultado de la tecnificación de los procesos de producción a partir de la revolución industrial (1750 d.C.), el uso de estos recursos se incrementó y, en consecuencia, también comenzaron a generarse grandes volúmenes de desechos industriales y urbanos. Estos desechos, debido al lento desarrollo y a la ineficiencia de las técnicas de su manejo, han generado una gran cantidad de sitios contaminados con metales pesados, compuestos orgánicos y otros materiales peligrosos [Virkyute *et al.* 2002].

Con la ausencia de tratamiento, las aguas negras son por lo general vertidas en cuerpos de agua superficial, creando un riesgo obvio para la salud humana y el ecosistema. Dentro de los principales problemas que provocan está la contaminación del agua y suelo agrícola por metales pesados. Los metales pesados son aquellos cuya densidad es por lo menos cinco veces mayor que la del agua. Los más importantes son: Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Mercurio (Hg), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Estaño (Sn) y Zinc (Zn)[Fergusson, 1990].

El cadmio se utiliza ampliamente en procesos industriales, como en fabricación de baterías Recargables de Níquel/Cadmio (Ni/Cd), Fertilizantes, Pigmentos en Pinturas, Galvanización, etc. Algunos de estos productos pueden ser reciclados, sin embargo una gran parte de la contaminación por cadmio es causada por el *dumping* y la incineración de cadmio de los residuos contaminados, algunos de los cuales se desechan en las descargas de aguas residuales; estas al fluir al drenaje municipal incrementan el nivel de contaminación y de este modo el agua destinada para riego se ve comprometida, provocando el deterioro de la salud pública.



La exposición a metales pesados en determinadas circunstancias es la causa de la degradación y muerte de vegetación, ríos, animales e incluso, de daños directos en el hombre. Hoy en día se conoce mucho más sobre los efectos de estos elementos, cuya exposición está relacionada con problemas de salud como retrasos en el desarrollo, varios tipos de cáncer, daños en el riñón, e incluso la muerte.

En la actualidad la mayor parte de los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas instalados en México, no contemplan el manejo y disposición de los lodos residuales que generan. Esto propicia que los lodos de desecho sean dispuestos en forma cruda o semitratada en tiraderos a cielo abierto, en rellenos sanitarios o en el sistema de alcantarillado, lo que representa un impacto ambiental importante y en varios casos un grave riesgo para la salud pública.

El presente trabajo pretende estudiar la presencia de cadmio, en los lodos de desecho de una planta de tratamiento de aguas residuales, especialmente cuando éstos son utilizados como acondicionadores de suelos. Para prevenir los efectos ecológicos de la contaminación de ríos por metales pesados y dada la gran influencia que los parámetros medioambientales tienen sobre la fisiología de los organismos (por su bioasimilación de dichos elementos en el medio), no basta con conocer los contenidos totales de los metales pesados en dichas aguas y lodos, si no que resulta fundamental conocer la forma química bajo la que se presenta, es decir la Especiación. Esto se debe a que la toxicidad de un elemento es muy distinta de una especie a otra, lo que regula no solo su disponibilidad (según se encuentre disuelto, adsorbido, ligado o precipitado) sino también el grado de toxicidad que exhiba. Conocer la forma predominante de un elemento metálico permite elegir el tratamiento más adecuado para la gestión y aplicación de los lodos, evitando la movilización de los metales pesados presentes en los mismos.



## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL:**

Determinar, por el método de Especiación química, la presencia de cadmio en lodos de desecho de una planta de tratamiento de aguas residuales, con la finalidad de proporcionar datos que permitan proponer un tratamiento adecuado que conviertan al lodo de desecho en un acondicionador de suelo.

### **2.2. OBJETIVOS PARTICULARES:**

Determinar las formas químicas en que se presenta el cadmio en los lodos de desecho.

Conocer la forma química predominante del cadmio en los lodos de desecho.

Proponer un tratamiento adecuado para el manejo del lodo de desecho como acondicionador de suelo.



### **3. ANTECEDENTES**

#### **3.1. AGUA**

Se le llama agua a la sustancia cuyas moléculas están formadas por la combinación de un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno, cuando se encuentra pura es líquida, inodora, insípida e incolora. Es el componente más abundante de la superficie terrestre y, más o menos puro, es la única sustancia que existe a temperaturas ordinarias en los tres estados de agregación: sólido (en polos, glaciares, hielo en las superficies de agua en invierno, nieve, granizo y escarcha), líquido, (lluvia, rocío, lagos, ríos, mares y océanos) y gaseoso (niebla y nubes), es parte constituyente de todos los organismos vivos y aparece en compuestos naturales [Lomelí, 2010]

El agua es el recurso natural más importante del mundo, ya que sin ella no podría existir la vida y la industria no funcionaria. A diferencia de otras materias primas, el agua no tiene sustituto en muchas aplicaciones. El agua tiene un papel vital en el desarrollo de las comunidades, por lo que es indispensable que su abastecimiento sea seguro para que una comunidad se establezca permanentemente. Sin embargo, los desechos sólidos y líquidos de una comunidad tienen un potencial considerable para contaminar el agua.

#### **3.1.1. PROPIEDADES DEL AGUA**

##### **3.1.1.1. PROPIEDADES FÍSICAS**

Las propiedades físicas del agua se atribuyen principalmente a los enlaces por puente de hidrógeno, los cuales se presentan en mayor número en el agua sólida, en la red cristalina cada átomo de Oxígeno, de la molécula de agua está rodeado tetraédricamente por cuatro átomos de hidrógeno de otras tantas moléculas de agua y así sucesivamente es como se conforma su estructura. Cuando el agua sólida (hielo) se funde, la estructura tetraédrica se destruye y la densidad del agua líquida es mayor que la del agua sólida debido a que sus moléculas quedan más cerca entre sí, pero sigue habiendo enlaces por puente de hidrógeno entre las



moléculas del agua líquida. Cuando se calienta agua sólida, que se encuentra por debajo de la temperatura de fusión, a medida que se incrementa la temperatura por encima de la temperatura de fusión se debilita el enlace por puente de hidrógeno y la densidad aumenta más hasta llegar a un valor máximo a la temperatura de 3.98 C y una presión de una atmósfera.

El agua se comporta anormalmente; su presión de vapor crece con rapidez a medida que la temperatura se eleva y su volumen ofrece la particularidad de ser mínimo a la de 3.98 C. A dicha temperatura la densidad del agua es máxima, y se ha tomado como la unidad. A partir de 3.98 C no sólo se dilata cuando la temperatura se eleva, sino también cuando se enfría hasta 0 C: a esta temperatura su densidad es 0.99980 y al congelarse desciende bruscamente hacia 0.9168, que es la densidad del hielo a 0 C.

A temperaturas mayores de 3.98 C la densidad del agua líquida disminuye con el aumento de la temperatura de la misma manera que ocurre con los otros líquidos.

Mientras que el hielo funde en cuanto se calienta por encima de su punto de fusión, el agua líquida se mantiene sin solidificarse algunos grados por debajo de la temperatura de cristalización (agua subenfriada) y puede conservarse líquida a -20 C en tubos capilares o en condiciones extraordinarias de reposo. La solidificación del agua va acompañada de desprendimiento de 79.4 calorías por cada gramo de agua que se solidifica. Cristaliza en el sistema hexagonal y adopta formas diferentes, según las condiciones de cristalización.

El agua pura es un líquido inodoro, insípido e incoloro y transparente en capas de poco espesor, toma color azul cuando se mira a través de espesores de seis y ocho metros, porque absorbe las radiaciones rojas. Sus constantes físicas sirvieron para marcar los puntos de referencia de la escala termométrica Centígrada. A la presión atmosférica de 760 milímetros de Hg, el agua hierve a temperatura de 100 C. El punto de ebullición se eleva a 374 C, que es la temperatura crítica a que corresponde la presión de 217.5 atmósferas, el calor de vaporización del agua asciende a 539 calorías/gramo a 100 C.





Su capacidad calorífica es superior a la de cualquier otro líquido o sólido, siendo su calor específico de 1 cal/g, esto significa que una masa de agua puede absorber o desprender grandes cantidades de calor, sin experimentar importantes cambios de temperatura, lo que tiene gran influencia en el clima (las grandes masas de agua de los océanos tardan más tiempo en calentarse y enfriarse que el suelo terrestre). Sus calores latentes de vaporización y de fusión (540 y 80 cal/g, respectivamente) son también excepcionalmente elevados.

### **3.1.1.2. PROPIEDADES QUÍMICAS**

El agua es el compuesto químico más familiar para nosotros, el más abundante y el de mayor significación para nuestra vida. Su excepcional importancia, desde el punto de vista químico, reside en que casi la totalidad de los procesos químicos que ocurren en la naturaleza, no sólo en organismos vivos, sino también en la superficie de la tierra, así como los que se llevan a cabo en el laboratorio y en la industria, tienen lugar entre sustancias disueltas en agua. Normalmente se dice que el agua es el disolvente universal, puesto que todas las sustancias son de alguna manera solubles en ella.

Se combina con ciertas sales para formar hidratos, reacciona con los óxidos de metales formando ácidos y actúa como catalizador en muchas reacciones químicas.

Habitualmente se piensa que el agua natural que conocemos es un compuesto químico de fórmula  $H_2O$ , pero no es así, debido a su gran capacidad disolvente toda el agua que se encuentra en la naturaleza contiene diferentes cantidades de diversas sustancias en solución y hasta en suspensión, lo que corresponde a una mezcla.

El agua es un compuesto tan versátil principalmente debido a que el tamaño de su molécula es muy pequeño, a que su molécula es buena donadora de pares de electrones, a que forma puentes de hidrógeno entre sí y con otros compuestos que tengan enlaces como: N-H, O-H y F-H, a que tiene una constante dieléctrica



muy grande y a su capacidad para reaccionar con compuestos que forman otros compuestos solubles.

El agua es, quizá, el compuesto químico más importante en las actividades del hombre y también el más versátil, ya que como reactivo químico funciona como ácido, álcali, ligando, agente oxidante y agente reductor.

### 3.1.2. TIPOS DE AGUA

Existen diferentes tipos de agua, y dependiendo de las propiedades físicas que presentan se pueden clasificar en:

a) Según sus propiedades para el consumo:

**Agua Potable.** Agua que puede ser consumida por personas y animales sin riesgo de contraer enfermedades.

**Agua no Potable.** Agua que no es apta para el consumo humano

b) Según la cantidad de minerales que tengan disueltos:

**Agua salada.** Agua en la que la concentración de sales es relativamente alta (más de 10 000 mg/l).

**Agua salobre.** Agua que contiene sal en una proporción significativamente menor que el agua marina. La concentración del total de sales disueltas está generalmente comprendida entre 1000 - 10 000 mg/l. Este tipo de agua no está contenida entre las categorías de agua salada y agua dulce.

**Agua dulce.** Agua natural con una baja concentración de sales, o generalmente considerada adecuada, previo tratamiento, para producir agua potable.

**Agua dura.** Agua que contiene un gran número de iones positivos. La dureza está determinada por el número de átomos de calcio y magnesio presentes. El jabón generalmente se disuelve malamente en las aguas duras.

**Agua blanda.** Agua sin dureza significativa.



c) Según la procedencia de las aguas:

**Aguas negras.** Agua de abastecimiento de una comunidad después de haber sido contaminada por diversos usos. Puede ser una combinación de residuos, líquidos o en suspensión, de tipo doméstico, municipal e industrial, junto con las aguas subterráneas, superficiales y de lluvia que puedan estar presentes.

**Aguas grises.** Aguas domésticas residuales compuestas por agua de lavar procedente de la cocina, cuarto de baño, aguas de los fregaderos, y lavaderos.

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

**Aguas residuales municipales.** Residuos líquidos, originados por una comunidad, formados posiblemente aguas residuales domésticas o descargas industriales.

d) Según sus propiedades:

**Agua bruta.** Agua que no ha recibido tratamiento de ningún tipo, o agua que entra en una planta para su ulterior tratamiento.

**Aguas muertas.** Aguas en estado de escasa o nula circulación, generalmente con déficit de oxígeno.

**Agua alcalina.** Agua cuyo pH es superior a 7.

### 3.1.3. PROBLEMÁTICA DEL AGUA EN MÉXICO.

Es importante saber que aunque el agua cubre  $\frac{3}{4}$  partes de la superficie de nuestro planeta, más del 97% es salada, 2% es agua dulce contenida en nieve y hielo, dejando menos del 1% dispersada en mantos subterráneos, lagos, ríos, pantanos, corrientes y reservorios superficiales (agua que está disponible para nuestro uso).



Los recursos hidrológicos son de vital importancia para el desarrollo socioeconómico de México. Sin embargo, la gran diversidad fisiográfica y climática del país hace que el agua no esté distribuida regularmente.

La distribución del agua es un problema grave debido a que el 80 % de los recursos hídricos se encuentran por debajo de los 500 m con respecto al nivel del mar y a un nivel mayor se encuentra asentada más del 70 % de la población total y se desarrolla el 80 % de la actividad industrial. El 55 % de la actividad industrial se encuentra en el Valle de México a más de 2000 m de altitud, lo que genera graves problemas de abastecimiento de agua.

El agua subterránea es otra fuente importante de este recurso, sobre todo en aquellas regiones donde no existen escurrimientos superficiales considerables.

Los problemas del agua se centran tanto en la calidad como en la cantidad, al caer con la lluvia por enfriamiento de las nubes arrastra impurezas del aire; al circular por la superficie o a nivel de capas profundas, se le añaden otros contaminantes químicos, físicos o biológicos y puede contener productos derivados de la disolución de los terrenos: calizas, calizas dolomíticas, yeso, anhidrita, sal, cloruro potásico, silicatos, oligoelementos, nitratos, hierro, potasio, cloruros, fluoruros, así como materias orgánicas. Por esto, existe una contaminación natural, pero al mismo tiempo puede existir otra muy notable de procedencia humana, por actividades agrícolas, ganaderas o industriales, que hace sobrepasar la capacidad de autodepuración de la naturaleza.

Al ser recurso imprescindible para la vida humana y para el desarrollo socioeconómico, industrial y agrícola, una contaminación a partir de cierto nivel cuantitativo o cualitativo puede plantear un problema de Salud Pública.

En México, como en muchos países del mundo, las principales fuentes de contaminación del agua se clasifican en tres grupos de acuerdo con su origen.

- **Sector social.** Corresponde a las descargas de residuos de origen doméstico y público que constituyen las aguas residuales municipales. Está relacionado con la cobertura de los servicios de agua potable y alcantarillado, se



incrementa en los grandes asentamientos urbanos. El 60 % de la población mexicana está concentrada en las grandes ciudades. Se calcula que el 57 % de las aguas residuales son generadas por la población, principalmente por las zonas localizadas en torno a las ciudades de México (23 %), Monterrey (4.1 %) y Guadalajara (4 %). Se estima que sólo el 50% de la población dispone de sistema de alcantarillado.

- **Sector industrial.** Integrado por las descargas generadas de las actividades de extracción y transformación de recursos naturales usados como bienes de consumo y satisfactores para la población. Se calcula que la industria genera el 43 % de las aguas residuales.

En México, el sector industrial se clasifica en 39 grupos, de acuerdo a los índices de extracción, consumo y contaminación, que genera el 82 % del total de aguas residuales de la industria

- **Sector agropecuario.** Constituido por los efluentes de las instalaciones dedicadas a la crianza y engorda de ganado mayor y menor, y por las aguas de retorno de los campos agrícolas. Se calcula que la superficie agrícola de riego y temporal es de 28 millones de hectáreas, que se usan 92 500 millones de m<sup>3</sup> de agua y se consume el 82 % de ella por lo que la generación de aguas residuales es del 12 % (11 100 millones de m<sup>3</sup>). Las aguas de retorno agrícola son una fuente de contaminación importante cuyo impacto se manifiesta en el alto porcentaje de cuerpos de agua que se encuentran en condiciones de eutroficación.

Con relación a la actividad pecuaria, en México no se cuenta con información suficiente en cuanto a la demanda de agua y al índice de generación de aguas contaminadas.

En la siguiente tabla se presentan los principales giros industriales responsables de las mayores cargas de aguas residuales en México, según datos de la





Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), encargada del control de la contaminación en México durante 1990.

Tomando en cuenta además las circunstancias locales de las industrias, se ha establecido medidas de prevención y control de la contaminación del agua en México a las siguientes: azúcar y alcohol, refinación de petróleo y petroquímica, papel y celulosa, curtiduría, química, textil y alimentaria.

Tabla 1. Principales Giros Industriales Responsables De Las Mayores Cargas De Aguas

Residuales En México			
INDUSTRIA	EXTRACCIÓN %	CONSUMO %	DESCARGA %
Azucarera	35.2	22.3	38.8
Química	21.7	24.4	21
Papel y celulosa	8.2	16.1	6
Petróleo	7.2	3.7	8.2
Bebidas	3.3	6.4	2.4
Textil	2.6	2.4	2.7
Siderúrgica	2.5	5.5	1.7
Eléctrica	1.5	4.7	0.7
Alimentos	0.2	0.3	0.2
Resto del sector	0.17	14.1	18.1

SEDUE, 1990

### 3.2. METALES PESADOS

Los metales pesados son aquellos cuya densidad es por lo menos cinco veces mayor que la del agua. Los más importantes son: Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Mercurio (Hg), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Estaño (Sn) y Zinc (Zn). En esta categoría se incluyen aquellos elementos



químicos que poseen un peso atómico comprendido entre 63.55 (Cu) y 200.59 (Hg) y que presentan un peso específico superior a  $4(\text{g cm}^{-3})$  [Fergusson, 1990]

Los metales son materias naturales que han desempeñado un papel fundamental en el desarrollo de las civilizaciones. Pueden encontrarse en mayores cantidades en los extractos profundos de los ríos y en menor proporción en la superficie, los mantos acuíferos no contaminados pueden contener cantidades muy pequeñas.

Uno de los mecanismos mediante el cual los metales llegan al ser humano es cuando éste consume plantas y animales, debido a que las plantas absorben el metal a través de la raíz y a su vez las especies animales lo hacen al alimentarse de aquellas.

La peligrosidad de los metales pesados es mayor al no ser química ni biológicamente degradables. Una vez emitidos, pueden permanecer en el ambiente durante cientos de años. Además, su concentración en los seres vivos aumenta a medida que son ingeridos por otros, por lo que la ingesta de plantas o animales contaminados puede provocar síntomas de intoxicación.

### **3.2.1. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE METALES PESADOS**

Los metales son un grupo de elementos que presentan propiedades físicas y químicas muy particulares. Estas características han sido aprovechadas en la fabricación de numerosos utensilios de uso cotidiano.

Dentro de los metales pesados pueden diferenciarse dos grupos:

- Oligoelementos o micronutrientes, que son los requeridos en pequeñas cantidades por plantas y animales, para completar su ciclo vital. Su ausencia causa enfermedades, su exceso intoxicaciones. Dentro de este grupo se encuentran: As, B, Co, Cr, Cu, Mo, Mn, Ni, Se y Zn. Pasando cierto umbral se vuelven tóxicos.

- Metales pesados sin función biológica conocida, cuya presencia en determinadas cantidades en seres vivos lleva a disfunciones en el funcionamiento de sus organismos. Resultan altamente tóxicos y presentan la propiedad de



acumularse en los organismos vivos (Bioacumulación). Son, principalmente: Cd, Hg, Pb, Cu, Ni, Sb, Bi. Estos son los metales tóxicos cuya concentración en el ambiente puede causar daños en la salud de las personas.

Los términos metales pesados y metales tóxicos se usan como sinónimos pero sólo algunos de ellos pertenecen a ambos grupos. La toxicidad de estos metales se debe a su capacidad de combinarse con una gran variedad de moléculas orgánicas, pero la reactividad de cada metal es diferente y consecuentemente lo es su acción tóxica. [Fergusson, 1990]

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 y además los metales pesados presentes en las rocas se encuentran bajo formas muy poco asimilables para los organismos.

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

Industrias como la automotriz, hulera y la química entre otras, contienen metales pesados en sus descargas de aguas residuales (Plomo, Mercurio, Cromo, Cadmio, Arsénico, etc.). Estas, al fluir al drenaje municipal, incrementan el nivel de contaminación y de este modo el agua destinada para riego se ve comprometida,



así como los lodos utilizados como mejoradores de suelo, provocando el deterioro de la salud pública.

### **3.2.2. MOVILIDAD DE LOS METALES PESADOS**

Los metales pesados poseen una gran capacidad para unirse con muy diversos tipos de moléculas orgánicas. Los procesos de bioacumulación son debidos básicamente a la imposibilidad, por parte del organismo afectado, de mantener los niveles necesarios de excreción del contaminante, por lo que sufre una retención en el interior del mismo.

Aunque asociamos a los metales pesados con la contaminación del agua y de los alimentos, en realidad son transportados en su mayor parte de un lugar a otro a través del aire, como gases o especies adsorbidas en las partículas materiales suspendidas.

Los metales pesados pueden quedar retenidos en el suelo ya sea disueltos en la solución del suelo o bien fijados por procesos de adsorción, complejación o precipitación.

También pueden ser absorbidos por plantas y así incorporarse a las cadenas tróficas; asimismo por volatilización puede pasar a la atmósfera y moverse a las aguas superficiales o subterráneas.

### **3.2.3. EFECTOS SOBRE LA SALUD**

Aunque en este grupo se incluyen varios elementos esenciales para el crecimiento, reproducción y/o supervivencia de los organismos vivos, otros muchos con gran importancia económica e industrial pueden ocasionar efectos perjudiciales. El medio ambiente recibe aportes de metales de origen tanto natural como antropogénico. Los procesos naturales que aportan metales al ambiente son los fenómenos geológicos normales, como la formación de minas, la meteorización y erosión de las rocas, la lixiviación y los fenómenos volcánicos en el fondo marino (Moreno S. R., 1999).



Los aportes de origen antropogénico son consecuencia de la actividad humana, la mayoría procedentes de procesos desarrollados en la minería y en la industria.

La exposición a metales pesados en determinadas circunstancias es la causa de la degradación y muerte de vegetación, ríos, animales e, incluso, de daños directos en el hombre. Hoy en día se conoce mucho más sobre los efectos de estos elementos, cuya exposición está relacionada con problemas de salud como retrasos en el desarrollo, varios tipos de cáncer, daños en el riñón, e incluso la muerte.

Generalmente los metales actúan en el organismo distribuyéndose en el cuerpo por medio del torrente sanguíneo y dependiendo de su habilidad para pasar a través de las membranas celulares, compiten con otras moléculas por sitios de unión a los que son afines. Los metales frecuentemente se concentran en un tejido u órgano específico y al ser metabolizados por lo regular se unen a enzimas, cambiando así la conformación molecular de éstas. También pueden unirse a otros sustratos y alterar la biodisponibilidad de componentes celulares importantes (Donkin *et al*, 2000).

Algunos metales de interés que pueden formar parte de sistemas vivos y en algunos casos son importantes como contaminantes ambientales, se presentan a continuación:

## **ARSÉNICO**

Su símbolo es As, su número atómico es 33 y su masa atómica es 140.116 g/mol. Se encuentra ampliamente distribuido en la naturaleza, los minerales con mayores concentraciones son los arseniuros de cobre, plata, plomo, oro y sulfuros de arsénico. El compuesto de arsénico más utilizado es el trióxido de arsénico y es un subproducto de la fundición de minerales de cobre y plomo.

Los productos generados por el hombre incluyen el arsénico metálico, pentóxido y el trióxido ( $\text{As}_2\text{O}_5$ ) y ( $\text{As}_2\text{O}_3$ ), los arseniatos de calcio y plomo  $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ ,  $\text{Pb}_3(\text{AsO}_4)_2$ . Estas sustancias pasan al medio ambiente durante el empleo como





insecticidas o herbicidas, en cultivos tan variados como la vid, el algodón, verduras, tomates, café, cocoa, etc. También se emplean como esterilizantes del suelo, como preservadores de maderas para estacas o como antiparasitarios en baños para ovejas y cabras. El Arsénico metálico se usa en aleaciones de plomo y cobre y en la fabricación de semiconductores.

La mayor parte del arsénico que existe en el agua y el medio ambiente proviene de la actividad humana. Debido a su frecuente presencia en los minerales, no es de extrañar que se produzcan descargas intensas de arsénico al medio ambiente a partir de los gases de chimenea y líquidos de descarga industrial provenientes de fundiciones de minerales, especialmente los no ferrosos, tales como cobre, estaño y cobalto, entre otros.

En el organismo humano, el arsénico se concentra en los leucocitos y se acumula fundamentalmente en el hígado, riñón, pulmón, cabello, dientes, uñas y piel. Los efectos que puede producir son cancerígenos, mutagénicos, la ingestión de grandes dosis lleva a problemas gastrointestinales, cardiovasculares, disfunciones del aparato nervioso, daños irreversibles a los diferentes órganos y finalmente a la muerte. La exposición prolongada del arsénico tanto en la población general como en los trabajadores puede provocar lesiones específicas como el cáncer en la piel, cáncer del pulmón.

La exposición crónica del arsénico en el agua de bebida causa lesiones y los niveles de concentración de arsénico en orina, sangre, cabello y uñas se consideran como marcadores de exposición. La cuantificación del arsénico en la orina es el mejor de estos indicadores.

En general las formas inorgánicas son más tóxicas que las orgánicas, las formas solubles del arsénico son fuertemente tóxicas.

Uno de los casos de intoxicación por ingestión crónica del arsénico contenido en agua de consumo es el de la Comarca Lagunera en México, ya que en ella se han usado por largo tiempo, plaguicidas que contienen arsénico en los mismos campos de donde se obtiene el agua que consumen los habitantes. Se encontró que en la población expuesta, la calidad de vida era baja (Albert L.A., 1998).



El arsénico ha sido uno de los venenos de largo plazo más utilizados en la historia de la humanidad, siendo Napoleón la víctima más famosa.

## **MERCURIO**

Su símbolo es Hg, su número atómico es 80 y su masa atómica es 200.59 g/mol. Es un líquido blanco plateado a temperatura ambiente, es un metal noble, soluble únicamente en soluciones oxidantes. El metal y sus compuestos son muy tóxicos. El mercurio forma soluciones llamadas amalgamas con algunos metales (por ejemplo, oro, plata, platino, uranio, cobre, plomo, sodio y potasio).

Una posibilidad que da lugar a la movilización del Hg es a través de su metilación, que corresponde a la formación de un compuesto organometálico. En el caso concreto del mercurio, se forma el metilmercurio,  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ , el cual, al igual que otros compuestos organometálicos, es liposoluble. En consecuencia, estos compuestos presentan una elevada toxicidad, puesto que pueden atravesar fácilmente las membranas biológicas y, en particular, la piel, y a partir de aquí, la incorporación del metal en la cadena trófica está asegurada.

El mercurio es un elemento ampliamente utilizado, el mercurio metálico se utiliza en la fabricación y reparación de instrumentos científicos como termómetros. Barómetros, bombas de vacío; en la producción electrolítica de hidróxidos a partir de cloruros de sodio y potasio. También en la síntesis de sosa cáustica y ácido acético glacial; en la fabricación de tubos fluorescentes, tubos de rayos x, lámparas de mercurio, rectificadores, termostatos automáticos y otros relacionados; en la extracción de Oro (Au) y Plata (Ag) por formación de amalgamas. Diversos compuestos inorgánicos de mercurio se utilizan en pinturas protectoras, tratamiento de madera y papel; en la industria del sombrero el nitrato de mercurio se utiliza en la fabricación de terciopelo a partir del pelo de conejo; el óxido de mercurio se usa en la fabricación de baterías secas de larga duración y como antiséptico; el cloruro de mercurio se usa como conservante de tejidos y catalizador químico; el fulminato de mercurio se usa en terapéutica dermatológica



y el mercurio amoniacado como antiséptico y antipsoriásico.

Los compuestos alquílicos son usados en la agricultura como fungicidas con el propósito de evitar la proliferación de limo en la pulpa de papel, como plaguicidas en cultivos de árboles frutales, y también en el tratamiento de granos y simientes (semillas para sembrar). Los compuestos fenilmercúricos se emplean como antisépticos, en el tratamiento de maderas y granos, también se emplearon en el pasado como diuréticos; pero su utilización fue proscrita debido que el mecanismo para incrementar la diuresis consiste en daño al túbulo renal.

Cuando un termómetro se rompe una exposición significativamente alta al Mercurio ocurre a través de la respiración, esto ocurrirá por un periodo de tiempo corto mientras este se evapora. Esto puede causar efectos dañinos, como daño al sistema nervioso, a las funciones cerebrales, a los riñones, irritación de los pulmones, irritación de los ojos, irritación de la piel, cansancio, dolor de cabeza, vómitos y diarreas; Efectos negativos en la reproducción, daño en el esperma, defectos de nacimientos y abortos.

El daño a las funciones del cerebro puede causar la degradación de la habilidad para aprender, cambios en la personalidad, temblores, cambios en la visión, sordera, incoordinación de músculos y pérdida de la memoria.

Los efectos del Mercurio en los animales son daño en los riñones, trastornos en el estómago, daño en los intestinos, fallos en la reproducción y alteración del ADN.

Han ocurrido varias epidemias de envenenamiento con mercurio orgánico como resultado de la contaminación ambiental por escapes industriales y uso inadecuado de fumigantes de granos.

En la bahía de Minamata, en el sur del Japón, se produjo una enfermedad denominada "Enfermedad de Minamata", debida al consumo de pescado y mariscos contaminados con metil mercurio, debido al paso de  $Hg^{+2}$  a metilmercurio por acción bacteriana. La producción de metil-Hg por bacterias y su liberación en el medio acuático es un mecanismo de defensa que protege los microbios del envenenamiento de Hg. La metilación bacteriana movilizó el Hg



almacenado en los sedimentos de la bahía. Este mercurio procedía de una fábrica de plásticos que utilizaba Hg como catalizador y vertía los residuos en la Bahía.

El Instituto para Conservación del Lago de Maracaibo (ICLAM) en Venezuela, ha reportado en varios estudios bioacumulación de mercurio en peces de esta cuenca.

La contaminación con mercurio inorgánico del aire y agua por la combustión de carbón y en plantas de cloro, ha sido una fuente importante de antecedentes de exposición.

## **COBALTO**

Su símbolo es Co, su número atómico es 27 y su masa atómica es 58.93 g/mol. Se halla en meteoritos, estrellas, en el mar, en aguas dulces, suelos, plantas, animales y en los nódulos de manganeso encontrados en el fondo del océano. Se observan trazas de cobalto en muchos minerales de hierro, níquel, cobre, plata, manganeso y zinc; pero los minerales de cobalto importantes en el comercio son los arseniuros, óxidos y sulfuros. El cobalto y sus aleaciones son resistentes al desgaste y a la corrosión, aun a temperaturas elevadas.

El cobalto es ferromagnético y se parece al hierro y al níquel, en su dureza, resistencia a la tensión, capacidad de uso en maquinaria, propiedades térmicas y comportamiento electroquímico. Al metal no lo afectan el agua ni el aire en condiciones normales, y lo atacan con rapidez el ácido sulfúrico, el ácido clorhídrico y el ácido nítrico; pero el ácido fluorhídrico, el hidróxido de amonio y el hidróxido de sodio lo atacan lentamente.

El Cobalto se mueve sólo bajo condiciones ácidas, pero al final la mayoría del Cobalto terminará en el suelo y sedimentos.

Este metal es esencial en el organismo al formar parte de la vitamina B12 (cianocobalamina); la dosis recomendada en la dieta es de 2.4 µg/día, la cual debe contener 0.1 µg de cobalto.



El principal uso del cobalto metálico es en aleaciones para turbinas de aviones. Los compuestos de cobalto son usados como pigmentos en vidrio, cerámica y pinturas, como catalizadores en la industria del petróleo, como secadores de pintura, y como elementos traza usados como aditivos en la agricultura y la medicina. Las fuentes antropogénicas primarias de cobalto en el ambiente se generan a partir de la quema de combustibles fósiles, del uso de lodos que contengan cobalto o fertilizantes de cobalto, y de las industrias que usen o procesen compuestos del mismo.

Su isótopo radiactivo producido artificialmente, cobalto-60, se utiliza mucho en la industria, la investigación y la medicina.

Durante la exposición por inhalación a partículas que contienen cobalto, el primer blanco expuesto es el tracto respiratorio. La exposición ocupacional de seres humanos a cobalto metálico o aleaciones del mismo, ha reportado efectos respiratorios primarios, que incluyen disminución en la función pulmonar, asma, jadeo y disnea a niveles de exposición en un rango de 0.015 a 0.130 mg de Co/m<sup>3</sup>.

También ha sido demostrado que el cobalto soluble altera la entrada de calcio a las células, funcionando como bloqueador de los canales de calcio inorgánico [Yamatani *et al*, 1998].

El Cobalto está ampliamente dispersado en el ambiente de los humanos por lo que estos pueden ser expuestos a él por respirar el aire, beber agua y comer comida que contengan Cobalto. El Contacto cutáneo con suelo o agua que contenga Cobalto puede también aumentar la exposición.

De cualquier manera, muy alta concentración de Cobalto puede dañar la salud humana. Cuando respiramos elevadas concentraciones de Cobalto a través del aire experimentamos efectos en los pulmones, como asma y neumonía; cuando se ingieren altas concentraciones de cobalto se pueden presentar vómitos, náuseas, problemas de visión, en el corazón y daño a la tiroides.

Efectos sobre la salud pueden también ser causado por radiación de los Isótopos radiactivos del Cobalto. Este causa esterilidad, pérdida de pelo, vómitos,





sangrado, diarreas, coma e incluso la muerte. Esta radiación es algunas veces usada en pacientes con cáncer para destruir tumores. Estos pacientes también sufren pérdida de pelo, diarreas y vómitos.

En 1984, una máquina de tratamiento de cáncer que contenía isótopos radioactivos de cobalto-60 fue vendida por equivocación por una clínica de Ciudad Juárez a un reciclador de metales, la máquina fue derretida y su acero radiactivo fue reciclado en la fabricación de varilla de acero para construcción. Miles de personas fueron expuestas a la sustancia altamente radioactiva. Cuando el accidente fue descubierto porque una carga de varilla activo un sensor en las afueras del laboratorio nuclear 'Los Álamos' en Estados Unidos, mucho del metal ya se había incorporado a construcciones o utilizado en productos comerciales como mesas de jardín o en sillas mecedoras. El gobierno mexicano recolecto todo el acero que se pudo localizar y fue enterrado en fosas construidas en el remoto rancho el vergel, al sur de Salamayuca Chihuahua.

## **ZINC**

Su símbolo es Zn, su número atómico es 30 y su masa atómica es 65.37 g/mol. El zinc puro y recientemente pulido es de color blanco azulado, lustroso y moderadamente duro. El aire húmedo provoca su empañamiento superficial, haciendo que tenga color gris. El zinc puro es dúctil y maleable pudiéndose enrollar y tensar, pero cantidades pequeñas de otros metales como contaminantes pueden volverlo quebradizo. Se funde a 420 C (788 F) y hierve a 907 C (1665 F). Su densidad es 7.13 veces mayor que la del agua.

El zinc es uno de los elementos traza más abundantes en humanos. Es encontrado de manera natural en todos los tejidos y fluidos y es cofactor en alrededor de 300 sistemas enzimáticos.

El zinc es considerado como elemento esencial que interviene en la regulación de diferentes síntesis, especialmente proteicas y en la constitución de metaloenzimas, desempeñando una importante función en el crecimiento.



Previene patologías, modifica la estructura de proteínas, estabiliza la molécula de insulina, etc. (Pérez G.G., 2005).

La deficiencia de zinc ha sido asociada con dermatitis, anorexia, retraso en el crecimiento, cicatrización de heridas deficiente, hipogonadismo con disminución en la capacidad reproductiva, disminución en la función del sistema inmunológico y deficiencias en las funciones mentales. La dosis diaria recomendada para zinc es de 11 mg/día en hombres y de 8 mg/día en mujeres [IOM, 2002].

El zinc ha sido fundamentalmente empleado como recubrimientos de metales, y aleaciones para prevenir la corrosión, fabricación de fertilizantes, insecticidas y preservantes de madera, acumulándose en el medio ambiente, especialmente en las partes superficiales de los suelos

También tiene aplicación en la fabricación de cosméticos, cementos de fraguado rápido, en la industria farmacéutica y como pesticida [ATSDR, 2005].

El zinc es buen conductor del calor y la electricidad. Como conductor del calor, tiene una cuarta parte de la eficiencia de la plata. A 0.91 K es un superconductor eléctrico. El zinc puro no es ferro magnético.

El Zinc es un elemento traza que es esencial para la salud humana. Cuando la gente absorbe demasiado Zinc estos pueden experimentar una pérdida del apetito, disminución de la sensibilidad, el sabor y el olor. Pequeñas llagas, y erupciones cutáneas. La acumulación del Zinc puede incluso producir defectos de nacimiento.

Incluso los humanos pueden manejar proporcionalmente largas cantidades de Zinc, demasiada cantidad de Zinc puede también causar problemas de salud eminentes, como es úlcera de estómago, irritación de la piel, vómitos, náuseas y anemia. Niveles alto de Zinc pueden dañar el páncreas y disturbar el metabolismo de las proteínas, y causar arterioesclerosis. Exposiciones al clorato de Zinc intensivas pueden causar desórdenes respiratorios.

La mayoría del Zinc es adicionado durante actividades industriales, como es la minería, la combustión de carbón y residuos y el procesado del acero.



En cuanto a los mecanismos de toxicidad de zinc, la *fiebre del metal por humo* es el principal efecto observado en trabajadores expuestos al humo o polvo de óxido de zinc, que aparece usualmente de 3-10 horas después de la exposición y los síntomas persisten durante 24-48 horas. El Zinc puede dañar a los niños que no han nacido y a los recién nacidos. Cuando sus madres han absorbido grandes concentraciones de Zinc los niños pueden ser expuestos a éste a través de la sangre o la leche de sus madres.

## **CROMO**

Su símbolo es Cr, su número atómico es 24 y su masa atómica es 51.996 g/mol. El cromo es un elemento encontrado de manera natural en animales, plantas, rocas, suelo, cenizas volcánicas y gases, es de color blanco plateado, duro y quebradizo. Sin embargo, es relativamente suave y dúctil cuando no está tensionado o cuando está muy puro. Sus principales usos son la producción de aleaciones anticorrosivas de gran dureza y resistentes al calor y como recubrimiento para galvanizados.

En humanos y animales, el cromo (III) es un nutriente esencial que desempeña una función importante en el metabolismo de la glucosa, ácidos grasos y proteínas incrementando la actividad de la insulina. Los humanos y animales son capaces de convertir los compuestos inactivos de cromo (III) inorgánico a formas fisiológicamente activas.

Aunque el cromo (III) ha sido reportado como un nutriente esencial, la exposición a niveles elevados por inhalación, ingestión o contacto dérmico puede causar algunos efectos perjudiciales a la salud y la falta de este puede causar condiciones del corazón, trastornos metabólicos y diabetes.

El cromo es empleado para producir aleaciones de cromo, sustancias refractarias y compuestos para la industria química, farmacéuticos, electrónica y de alimentos. A partir del cromato se obtiene el dicromato sódico, compuesto fundamental para la obtención de casi todos los productos químicos de cromo: cromatos, como



cromato potásico, utilizados en la fabricación de pigmentos industriales, curtidos de pieles y cueros, tintas de fibras textiles y litografía, colorantes y pintura de papel, sales de cromo impregnadas que son utilizadas en la conservación de maderas, en la industria del cemento, el cual contiene cromo hexavalente en proporción de 0.000008 a 0.002 en dicromato de potasio. El cromo y sus compuestos son irritantes y destructores de las células, variando su mecanismo con la valencia.

En los lugares cercanos a las industrias que trabajan con cromo, se han observado que los polvos de desecho en el proceso de la fabricación de cromatos así como los polvos de las chimeneas producen corrosión en la pintura de casas, automóviles, etc.

La exposición a trióxido de cromo (VI) resulta en un daño notorio a la mucosa nasal y en la perforación del septo nasal, mientras que la exposición a compuestos insolubles de cromo (VI) resulta en daños al tracto respiratorio inferior, El cáncer de pulmón es considerado como un riesgo profesional para trabajadores expuestos a cromo (VI) en el sector industrial y comercial, también pueden desarrollar carcinomas nasales y faríngeos o cáncer gastrointestinal.

Los problemas de salud causados por el cromo pueden ser erupciones cutáneas, irritación de la nariz y sangrado de la nariz, malestar de estómago y úlceras, problemas respiratorios, debilitamiento del sistema inmune, daño en los riñones e hígado, alteración del material genético, cáncer de pulmón e incluso la muerte.

En animales el Cromo puede causar problemas respiratorios, una baja disponibilidad puede dar lugar a contraer las enfermedades, defectos de nacimiento, infertilidad y formación de tumores.

En Japón en 1975, se detectó el envenenamiento por cromo hexavalente, donde el consumidor más grande de cromo la Nippon Chemical Industrial Co., depositó aproximadamente 530,000 toneladas de lodo y desechos conteniéndolo, en los linderos de la Prefectura de Chiva y alrededor de Tokio, debido a las características de dureza fue usado para la compactación de suelos y para relleno. En agosto de 1975, se encontró que el agua potable de Tokio obtenida del



subsuelo cercano a los apilamientos de desechos de cromo, superaba hasta 2000 veces el límite oficial (Gómez S.E.I., 1994).

En 1976, la industria “Cromatos de México” para eliminar sus desechos de Cromo (óxido crómico/ $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), los regaló para tapar los baches de la población de Lechería en Tultitlán, Estado de México. Además, infiltró sus afluentes líquidos a través de un pozo en los terrenos de su propia industria; esto sumado a los humos de las chimeneas, hizo de este pueblo un lugar donde el cromo hexavalente se adhería a la piel, se ingería con el agua potable y se respiraba en cada momento. Como resultado murieron varias personas con llagas, perforación del tabique nasal y cáncer de pulmón (Albert Lilia A., 1998).

## **COBRE**

Su símbolo es Cu, su número atómico es 29 y su masa atómica es 63.54 g/mol. Su utilidad se debe a la combinación de sus propiedades químicas, físicas y mecánicas, así como a sus propiedades eléctricas y su abundancia. El cobre fue uno de los primeros metales usados por los humanos.

Es el tercer metal de transición más abundante en el cuerpo humano, después del hierro y del zinc.

Algunos de los usos industriales que tiene el cobre son los siguientes: Fabricación de cables, hilos conductores, bobinas de motores, interruptores, calderas, alambiques, baterías de cocina, soldadores, fabricación de tejados donde colocar el vidrio. Se utiliza en la agricultura como insecticida, alguicida en la purificación de aguas.

El naftenato de cobre, es el agente más ampliamente utilizado en la prevención de la putrefacción de la madera, telas, cuerdas y redes de pesca. Las principales aplicaciones de los compuestos de cobre las encontramos en la agricultura, en especial como fungicidas e insecticidas; como pigmentos; en soluciones galvanoplásticas; en celdas primarias; como mordentes en teñido, y como catalizadores.



Otros ejemplos en donde se utiliza el cobre son la minería, la producción de metal, la producción de madera y la producción de fertilizantes fosfatados.

La carencia de cobre en el organismo es poco frecuente en personas que llevan una dieta balanceada. Se puede manifestar la ausencia de cobre en el organismo con anemias que van de moderadas a severas, edemas, desmineralización ósea, retardo en el crecimiento, anorexia y vulnerabilidad a infecciones.

La exposición profesional al Cobre puede llevar a padecer la fiebre del metal; esta fiebre pasará después de dos días y es causada por una sobre sensibilidad al metal.

Exposiciones de largo periodo al cobre pueden irritar la nariz, la boca y los ojos y causar dolor de cabeza, de estómago, mareos, vómitos y diarreas. Una ingestión grande de cobre puede causar daño al hígado y los riñones e incluso la muerte.

Cuando los suelos de las granjas están contaminados con Cobre, los animales pueden absorber concentraciones de Cobre que dañan su salud. Principalmente las ovejas sufren un gran efecto por envenenamiento con Cobre, debido a que los efectos del Cobre se manifiestan a bajas concentraciones.

Debido a los desechos contaminantes que provienen de la explotación de cobre, barro anódico y concentrado de molibdeno de la minera “el Salvador” -que llegan a la costa por medio del río Salado-, la Bahía de Chañaral se encuentra totalmente contaminada.

La contaminación afecta directamente a la zona, que se encuentra carente de flora y fauna el todo el sector costero. A la vez la población de este lugar se ha visto afectada, tanto en su calidad de vida, como en salud.

A causa de fenómenos naturales, la contaminación se ha extendido a otras zonas como Caleta Palito y el parque nacional Pan de azúcar.

## **NÍQUEL**

Su símbolo es Ni, su número atómico es 28 y su masa atómica es 58.71 g/mol; metal duro, blanco plateado, dúctil y maleable.



Su absorción es muy baja. Se considera como un nutriente esencial tanto de animales como en el ser humano y principalmente se distribuye entre los tejidos.

La principal utilidad que se le da al níquel es en la fabricación de baterías, en catalizadores, aceros y aleaciones, en monedas y en partes de maquinaria. Se trata de un elemento cuyas aportaciones naturales son muy reducidas, siendo las principales exposiciones de cáncer antropogénico, como el humo de tabaco, la joyería o utensilio de cocina (Hawley G.G., 1986).

La mayor parte del níquel comercial se emplea en el acero inoxidable y otras aleaciones resistentes a la corrosión. También es importante en monedas como sustituto de la plata. El níquel finamente dividido se emplea como catalizador de hidrogenación.

La aplicación más común del níquel es el uso como ingrediente del acero y otros productos metálicos. Este puede ser encontrado en productos metálicos comunes como es la joyería.

Al igual que el cromo el níquel es aportado por la dieta, no produce aparentemente efectos tóxicos en el hombre, sin embargo, una exposición crónica induce efectos toxicológicos, siendo relacionado con la dermatitis. Los cánceres de pulmón y nasal se asocian a exposiciones prolongadas a polvos procedentes de industrias destinadas al refinado de níquel o del sulfuro de níquel de modo que ambos han sido clasificados como cancerígenos (Pérez G.G., 2005).

En pequeñas cantidades el níquel es esencial, pero cuando es tomado en muy altas cantidades este puede ser peligroso para la salud humana, como son elevadas probabilidades de desarrollar cáncer de pulmón, nariz, laringe y próstata; enfermedades y mareos después de la exposición al gas de níquel, embolia de pulmón, fallos respiratorios, defectos de nacimiento, asma y bronquitis crónica, desórdenes del corazón y reacciones alérgicas como son erupciones cutáneas.

Al menos 1,350 hectáreas de aguas costeras en el municipio cubano de Moa, en la provincia oriental de Holguín, registran altos niveles de contaminación debido a las actividades de la industria del níquel en la zona y a la eliminación de desechos tóxicos y residuales que son indiscriminadamente vertidos en los ríos.



Los hallazgos del análisis de impacto ambiental, mediante la comparación de imágenes satelitales y cálculos de la superficie, también arrojan preocupantes indicios sobre la destrucción de los fondos coralinos de la Bahía de Moa, así como la desaparición de cientos de hectáreas de bosques húmedos y vegetación diversa en las áreas de extracción que están a cargo de Moa Nickel S.A., una empresa mixta creada en 1994 entre el gobierno cubano y la compañía canadiense Sherritt International Inc.

El grupo extrae minerales en 4,964 hectáreas, asimismo opera la planta especializada en la producción de sulfuros mezclados de níquel y cobalto.

## **PLOMO**

Su símbolo es Pb, su número atómico es 82 y su masa atómica es 207.2 g/mol. El plomo es un metal pesado de color azulado, que se empaña para adquirir un color gris mate, es flexible, inelástico, se funde con facilidad, inodoro, insípido, suave y muy resistente a la corrosión; no tiene un valor fisiológico conocido.

Es un metal encontrado en la corteza terrestre de manera natural, es muy abundante y se extrae de la galena (PbS) muy fácilmente. El Pb puede mezclarse con otros aniones para formar las conocidas sales de Pb. Estos compuestos son solubles en agua, mientras que el Pb elemental no lo es.

Siendo el plomo un elemento tóxico con capacidad de bioacumulación, afecta prácticamente a todos los órganos y/o sistemas del organismo.

El plomo es un producto muy importante en la industria moderna, debido a su bajo punto de fusión, alta densidad, baja dureza y resistencia a ácidos.

Sus características físicas y químicas se aplican en las industrias de la fabricación, de la construcción y del producto químico. Se forma y es fácilmente maleable y dúctil.

Los principales usos de este metal y sus compuestos son: en baterías, tetra etilo de plomo (en gasolinas), pigmentos, cerámica, plásticos, municiones, soldaduras, circuitos electrónicos, cubiertas de cables y equipo militar. Además, su uso para





atenuar ondas de sonido, radiación atómica y vibraciones mecánicas, va en aumento. En estas últimas aplicaciones, se aprovecha la suavidad y densidad alta del plomo para formar aleaciones que son las que realmente se usan.

Las fábricas de acumuladores o baterías, las de pintura muy especialmente los anticorrosivos, la industria del vidrio, la decoración de cerámicas, fabricación de licores en alambiques no apropiados, la industria bélica y los residuos dejados por las armas de fuego en los campos de tiro; los juguetes de plomo, conocidos como los soldaditos de plomo, la utilización de maquillajes con sales de plomo, productos de acero y tuberías de plomo (Hawley G. G., 1986).

El uso más amplio del plomo, como tal, se encuentra en la fabricación de acumuladores. Otras aplicaciones importantes son la fabricación de tetraetilplomo, forros para cables, elementos de construcción, pigmentos, soldadura suave y municiones.

Algunos de sus compuestos se utilizan como estabilizadores contra el calor y la luz para los plásticos de cloruro de polivinilo, Se usan silicatos de plomo para la fabricación de fritas de vidrio y de cerámica, las que resultan útiles para introducir plomo en los acabados del vidrio y de la cerámica, como detonador estándar para los explosivos, como insecticidas para la protección de los cultivos.

Es usado en la producción de baterías, municiones, productos de metal y equipo médico y científico.

Los sistemas más sensibles al metal son el nervioso y cardiovascular. A concentraciones altas el plomo tiene un efecto adverso en la reproducción humana, a exposiciones continuas afecta al esperma del hombre (ALBERT 1997). Organismos deficientes en calcio o zinc absorben plomo con mayor facilidad cuya mayoría se almacena en los huesos.

El particulado fino de plomo (10-100  $\mu\text{m}$ ) puede ser extremadamente peligroso debido a que adhiere más fuertemente a la piel, es más soluble que el particulado grueso en el tracto gastrointestinal, es fácilmente absorbible a través del sistema respiratorio; al incorporarse al torrente sanguíneo puede inducir nefrotoxicidad, neurotoxicidad, e hipertensión. Niveles de plomo en sangre de 0.48  $\mu\text{g/l}$  pueden



inducir en los niños daño durante el desarrollo de los órganos del feto, daño en el sistema nervioso central, reducción de las habilidades mentales e iniciación de desórdenes del comportamiento, daño en las funciones del calcio ya que debido a su tamaño puede sustituir a este en los tejidos óseos.

Los altos niveles de la exposición pueden dar lugar a efectos bioquímicos tóxicos en los seres humanos que causan problemas en la síntesis de la hemoglobina, de efectos sobre los riñones, daño del aparato gastrointestinal, daño en el sistema endocrino, daños neurológicos, daño del sistema reproductivo, abortos y daños agudos o crónicos al sistema nervioso.

La eliminación del plomo se efectúa por la orina, las secreciones gastrointestinales y otras vías como el sudor. Cuando la cantidad de plomo absorbida supera a la eliminada se produce acumulación de plomo en hígado, riñones, músculos y cerebro, pero de forma más clara en el tejido óseo.

En las intoxicaciones crónicas se presenta esclerosis vascular, fibrosis intersticial, atrofia glomerular y fallo renal que lleva al paciente a la muerte.

Algunos de los síntomas de envenenamiento por plomo son dolores de cabeza, vértigo e insomnio. En los casos agudos, por lo común se presenta estupor, el cual progresa hasta el coma y termina en la muerte.

El Plomo es un elemento químico particularmente peligroso, y se puede acumular en organismos individuales, pero también entrar en las cadenas alimenticias.

Recientemente, ha llamado la atención de la prensa internacional y nacional, el caso del envenenamiento por metales pesados entre la población infantil de Torreón, Coahuila, en el norte centro de México. El problema provocado por el plomo, el cadmio y el arsénico, tres elementos altamente dañinos para los humanos. El envenenamiento se debe al mal funcionamiento de la cuarta fundidora del mundo, propiedad de la Compañía Peñoles, situada en el centro de la ciudad de Torreón.

Una masiva intoxicación por plomo ha provocado la muerte de al menos 163 personas en el norte de Nigeria. La mayoría de las víctimas son niños. Están ligados a minas de oro ilegales que han contaminado con plomo el suelo y las



aguas de varias poblaciones remotas del estado de Zamfara, en el norte nigeriano. Las autoridades han cerrado las minas y han comenzado a evacuar algunas zonas.

En los años 90 se constató en la ciudad de Antofagasta (Chile) que habían niños que presentaban altos contenidos de plomo en sangre. La fuente del problema pudo ser determinada, y eran minerales y concentrados de plomo que se acumulaban sin protección en las instalaciones portuarias (pertenecientes a Bolivia), para su posterior envío.

Este trabajo se enfoca en particular en el metal Cadmio, que en el siguiente tema se abordará con mayor detalle.

### **3.3. CADMIO**

Su símbolo químico es Cd, su número atómico es 48 y su masa atómica es 112.40 g/mol. Es un metal blanco-plateado, de estructura cristalina hexagonal, brillante, dúctil y blanda, que puede cortarse fácilmente con un cuchillo. Cruje al doblarlo. Es muy similar al zinc, por sus propiedades físicas y químicas. Presenta una conductividad eléctrica cuatro veces menor que la del cobre. Es estable al aire, pierde el brillo al cabo de bastante tiempo. Al calentarlo forma una capa uniforme de óxido y a temperaturas elevadas arde con llama rojo-amarillenta formando humo marrón de óxido de cadmio. Su punto de fusión es de 321.07 C. El aluminio y el zinc lo precipitan de sus disoluciones. Es insoluble en gases, se disuelve en ácido nítrico diluido y es poco soluble en los ácidos sulfúrico y clorhídrico.

#### **3.3.1. FUENTES DE CONTAMINACIÓN**

El cadmio es un metal pesado que ha adquirido una gran importancia toxicológica; está asociado a la actividad antropogénica. A partir de la mitad del siglo pasado, la producción y el uso de cadmio al nivel industrial se ha expandido rápidamente, y su eliminación se ha convertido en un serio problema para el ambiente.



El cadmio no se encuentra en el ambiente como un metal puro, sino como un mineral en forma de óxido de cadmio, cloruro de cadmio, sulfato de cadmio o en asociación con zinc. Así como varios otros metales, el cadmio en su forma natural presenta poca importancia como fuente de contaminación para el ambiente. Lo más frecuente es que la contaminación del medio sea producida por actividades humanas. Estas actividades, lo remueven de sus depósitos naturales insolubles, distribuyéndolo en los diferentes compartimentos ambientales, como aire, tierra y agua. La dinámica ambiental del metal conlleva la exposición crónica de los organismos, con consecuencias tanto a escala individual como poblacional como consecuencia de los procesos de bioacumulación. Por ello, los impactos son variados y ocurren desde el organismo hasta el ecosistema.

#### **3.3.1.1. FUENTES NATURALES**

El cadmio se encuentra ampliamente distribuido en la corteza terrestre en una concentración promedio de 0.1 mg/Kg; en las rocas sedimentarias las concentraciones son más elevadas. Se ve más a menudo combinado con otros elementos formando compuestos sólidos, estables, que no se evaporan y que pueden encontrarse en el material particulado.

Puede encontrarse asociado a compuestos de zinc, como la esfalerita (ZnS) minerales propios son la blenda de cadmio (CdS), la otavita (CdCO<sub>3</sub>), la monteponita (CdO) representa el  $1,5 \times 10^{-5}$  % en peso de la corteza terrestre.

Las condiciones ambientales, como la erosión, causan el transporte de grandes cantidades de cadmio a los océanos, cuyo contenido del metal es alrededor de 0.1 µg/Kg.

La actividad volcánica es la mayor fuente natural de liberación de cadmio a la atmosfera. Se ha calculado que el incremento total anual debido a esta fuente es de entre 100 y 500 toneladas.

De forma natural grandes cantidades de Cadmio son liberadas al ambiente, sobre 25.000 toneladas al año. La mitad de este Cadmio es liberado en los ríos a través



de la descomposición de rocas y algún Cadmio es liberado al aire a través de fuegos forestales y volcanes.

Cabe aclarar que los procesos naturales por los cuales se libera cadmio son insignificantes como fuente de contaminación en comparación con el que procede de las actividades del hombre.

### **3.3.1.2. FUENTES ANTROPOGÉNICAS**

Con el crecimiento de las actividades industriales las fuentes contaminantes del medio con éste y otros metales han aumentado igualmente.

El cadmio se libera al aire, al suelo y al agua por actividades humanas. Se introduce al suelo a través de residuos sólidos de la producción de metales y de la manufactura de artículos que contienen cadmio; así como de cenizas producto de la incineración de residuos urbanos; está también presente en pequeñas cantidades en los fertilizantes fosfatados, desde donde puede cederse al suelo y de este a los vegetales. Por otra parte, los ríos contaminados con cadmio pueden contaminar al suelo por medio de la irrigación para propósitos agrícolas (Jinadasa y col. 1999; Mejáre y Bülow, 2001; WHO, 1992 b).

Las actividades mineras, tanto para el cadmio como para otros metales, son la fuente más evidente y las que pueden causar las concentraciones más altas del cadmio, ya que este metal se encuentra frecuentemente incorporado en diversos minerales. La exposición no solo es importante para los mineros, sino también para otros individuos no mineros que trabajen en las mismas instalaciones o cerca de ellas.

El cadmio también está presente en las actividades industriales, ya sea como componente de la materia prima, como es el caso de las industrias de baterías y colorantes, o como parte de los sub-productos del proceso, como es el caso de la obtención del zinc. En los casos en que está presente como materia prima, el cadmio suele generar concentraciones ambientales muy elevadas.



Algunas de las industrias en las que se utiliza el cadmio y el compuesto que utilizan para la elaboración de sus productos son:

- ✓ Galvanotecnia, como catalizador (hidrogenación y síntesis de metano), en la fabricación de esmaltes y en sintetización: se usa óxido de cadmio.
- ✓ Fabricación de electrodos negativos de baterías de Níquel-cadmio, pilas y galvanotecnia: se usa Hidróxido de cadmio.
- ✓ Fotografía, tintorería y absorbente de  $H_2S$ : se usa cloruro de cadmio.
- ✓ Como pigmento amarillo, en pinturas y vidrio: se usa sulfuro de cadmio.
- ✓ Se emplea en la mejora de la estabilidad de los materiales de PVC frente a la luz y los agentes atmosféricos: se usa estearato de cadmio.
- ✓ Silicatos y boratos de cadmio presentan fosforescencia y fluorescencia, y se usan como componentes de las sustancias fosforescentes de televisores blanco y negro y activadores para producir color azul y verde de tubos de TV color.
- ✓ Para el recubrimiento de cobre, hierro y acero por sus propiedades anticorrosivas. En aleaciones con cobre, níquel, oro, plata, bismuto y aluminio forma compuestos de fácil fusión, puede usarse como recubrimiento de otros materiales.

También puede encontrarse en:

- ✓ Soldadura de cañerías.
- ✓ En el tabaco de los cigarrillos.
- ✓ Quema de combustibles fósiles, como el carbón o el petróleo, y la incineración de la basura común.
- ✓ En los fertilizantes de fosfatos o en los excrementos de animales aplicados al cultivo de alimentos.
- ✓ Casi todos los alimentos contienen cadmio, pero puede ser en menor o mayor concentración, sobre todo aquellos que fueron contaminados: carnes y pescados, animales de abasto, crustáceos y moluscos, lácteos y huevos, champiñones. Al ser consumidos de forma esporádica, no existe un alto riesgo para la salud.



### 3.3.2. EFECTOS SOBRE LA SALUD

El cadmio ingresa al organismo por inhalación o por ingestión. El ingreso por la piel no está comprobado y además, no hay descripciones de casos en los que éste tenga importancia.

INGESTA: puede ser directamente a través de líquidos, ya sea por las cañerías que contienen cadmio en sus soldaduras o por el agua que ha sido contaminada por las fábricas que tiran sus desechos al río. Indirectamente, se puede ingerir cadmio a través de los alimentos, ya que el mismo que se encuentra en el suelo o el agua contaminada, pasa a los vegetales y animales, y de estos al hombre. Esta cadena es frecuente en áreas mineras, aunque también, cuando se usan fosfatos con alto contenido de cadmio como fertilizante, la deposición atmosférica de cadmio en las cosechas en lugares cercano de emisión y el vertido de lodos contaminados sobre la tierra y el mar, se contribuye a la contaminación de alimentos. Los sistemas acuáticos también son una cadena de bioacumulación a través de los crustáceos, moluscos, que ingieren plancton con cadmio, y lo acumulan en su organismo. La fuente principal para los bebés es la leche materna, ya que las madres con altas concentraciones pueden transmitirlo a través de la misma.

En personas normales, solo del 6 al 10 % del cadmio ingerido es absorbido por vía gastrointestinal. En anémicos este porcentaje puede llegar a 20. Cuando las cantidades ingeridas con los alimentos o el agua son elevadas, pueden causar intoxicación a mediano o largo plazo.

INHALACIÓN: los trabajadores se ven expuestos al respirar el aire contaminado (fábrica de baterías, soldaduras de metales), al respirar el humo de cigarrillo (duplica la ingesta diaria de cadmio) y al respirar el aire contaminado cerca de donde se queman combustibles fósiles o desechos municipales. Se absorbe entre el 30 y 50 % del cadmio inhalado.

El tamaño y la solubilidad de las partículas inhaladas, determinan la concentración y la posibilidad de difusión del cadmio de los pulmones hacia la sangre.



El cadmio puede acumularse en altas concentraciones en una gran variedad de organismos marinos y en algunas plantas. La acumulación de cadmio en animales es de gran importancia por el peligro que la ingestión prolongada de estos puede significar.

Sus efectos pueden ser divididos en dos categorías:

- **Agudos:** fiebre de vapores de metal (*metal fume fever*) causada por una exposición severa; los síntomas son equivalentes a los de la gripe; en 24 horas se desarrolla generalmente un edema pulmonar agudo, el que alcanza su máximo en 3 días; si no sobreviene la muerte por asfixia, el problema puede resolverse en una semana.
- **Crónicos:** la consecuencia más seria del envenenamiento por cadmio es el cáncer. Los efectos crónicos que primero se observan son daño en los riñones. Incluyen anemia, decoloración de los dientes, y pérdida del sentido del olfato (anosmia).

Otros efectos sobre la salud que pueden ser causados por el Cadmio son:

- Diarreas, irritación estomacal, náuseas, dolores abdominales y musculares vómitos severos y salivación
- causa daños en los huesos al desplazar al calcio (osteoporosis y dolores reumáticos)
- Fallos en la reproducción y posibilidad incluso de infertilidad
- Daño al sistema nervioso central
- Daño al sistema inmunológico
- Desórdenes psicológicos
- Posible daño en el ADN o desarrollo de cáncer.
- Afecta la glándula tiroides
- Hipertensión y enfermedades coronarias
- Acumulación en uñas y pelo
- Enfisema
- Enfermedad pulmonar obstruida
- Fibrosis





- Neumonitis química aguda

### **3.3.3. CASOS DE POBLACIONES EXPUESTAS**

Se detectó por primera vez en Japón en 1947, una enfermedad asociada directamente con la contaminación del cadmio llamada “Itai-Itai” que era de naturaleza reumática y se diagnosticó a 44 pacientes procedentes de varios pueblos situados en los márgenes del Río Jintsu en la periferia de Toyama, esta fue causada por la ingesta de arroz que fue regado con agua contaminada con cadmio, esto produjo una entrada al cuerpo de unos 300 microgramos diarios de ese metal. Hasta la fecha no ha sido posible conocer con exactitud la incidencia de esta enfermedad, pero se estima que hasta finales del 1965 había provocado la muerte a más de 100 personas de estos pueblos de Japón.

En la década de 1940, durante la fabricación de baterías alcalinas de níquel-cadmio, varias personas murieron en Suecia por la acción del óxido de cadmio, cuya concentración en el aire era de algunos miligramos por metro cúbico.

En Shipham, una población cercana a una mina de zinc en Inglaterra, se observó que los habitantes tenían signos de toxicidad por cadmio, presentando en el hígado unos niveles de metal cinco veces superior a los encontrados en habitantes de áreas no contaminadas. Las verduras cultivadas en el área cultivada contenían más de 7 mg/kg de peso seco, concentración muy superior al contenido de cadmio encontrado en la intoxicación de Japón.

En Suecia, hubo una intoxicación oral aguda en una escuela, donde los niños consumieron un zumo de fruta procedente de una máquina expendedora en la que el depósito estaba enchapado con cadmio.

### **3.4. CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS**

Los contaminantes pueden encontrarse en forma disuelta o en suspensión, y por su naturaleza química pueden ser orgánicos e inorgánicos. Nos podemos referir a ellos definiéndolos específicamente, como por ejemplo amoniaco o cadmio, pero a



menudo se tratan dentro de una definición amplia, dentro del cual encontramos las siguientes:

- Materia Orgánica Soluble, medida como Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO) o Carbono Orgánico Total (COT).
- Sólidos en suspensión y materia coloidal.
- Color, turbidez y olor.
- Acidez o alcalinidad.
- **Metales pesados.**
- Contaminantes orgánicos especiales, etc.

Los metales pesados son uno de los grupos de contaminantes más peligrosos por su persistencia y toxicidad, ya que pueden incorporarse a la cadena alimenticia y ser concentrados por los organismos. Las fuentes de contaminación del ambiente por metales pesados, especialmente en ciudades, son habitualmente las actividades industriales y las actividades mineras. Otras fuentes importantes de contaminación del ambiente en general son las incineraciones de materias de residuos, la combustión de carburantes fósiles y el uso de fertilizantes fosfatados. En el caso particular de los suelos, suelen afectar la fertilidad o el uso posterior de los mismos, mientras que en el caso de los acuíferos y aguas superficiales, pueden comprometer seriamente el uso de este recurso como fuente de agua para el consumo humano (Vullo D.L., 2003).

#### **3.4.1. CONTAMINACIÓN DEL AMBIENTE POR CADMIO**

En las últimas décadas a nivel mundial la contaminación del medio ambiente se ha incrementado gradualmente, hasta el punto de que se está poniendo en peligro la sobrevivencia de los ecosistemas y con esto, la de la especie humana.

La mayor parte del cadmio que se emite a la atmósfera se deposita en la tierra y en las aguas de la región cercana a la fuente de emisión. A partir de esta, el



cadmio es ingerido por los organismos y transportado a todos los eslabones de las cadenas alimenticias. Esta vía de asimilación es la principal ruta del cadmio para los animales y el hombre.

Las aguas procedentes de las industrias como la minera, la de recubrimientos metálicos, las fundidoras y otras más contaminan el agua con diversos metales. Por ejemplo, las sales de metales como el plomo, el zinc, el mercurio, la plata, el níquel, el cadmio y el arsénico son muy tóxicas para la flora y la fauna terrestres y acuáticas.

Debido a que el cadmio es un metal relativamente volátil, no se puede evitar que durante los procesos de soldadura se libere en altas concentraciones hacia la atmósfera.

Este elemento, al igual que el plomo, se transfiere de un lugar a otro a través de los procesos físicos, como el viento y la erosión, y de los procesos biológicos; además, esta transferencia se ve afectada por la intervención del hombre, por lo que se modifica el ciclo biogeoquímico del cadmio (figura 1).

Las sales solubles en agua de los metales pesados como el plomo, cadmio y mercurio son muy tóxicas y acumulables por los organismos que los absorben, los cuales a su vez son fuente de contaminación de las cadenas alimenticias al ser ingeridos por alguno de sus eslabones. El cadmio ha sido detectado en más de 1000 especies de flora y fauna, tanto acuática como terrestre.

Los procesos para reciclar y extraer del aire, del agua o del suelo a los metales pesados como el plomo, el mercurio y el cadmio son muy costosos, por lo que hay que evitar arrojarlos al medio ambiente.

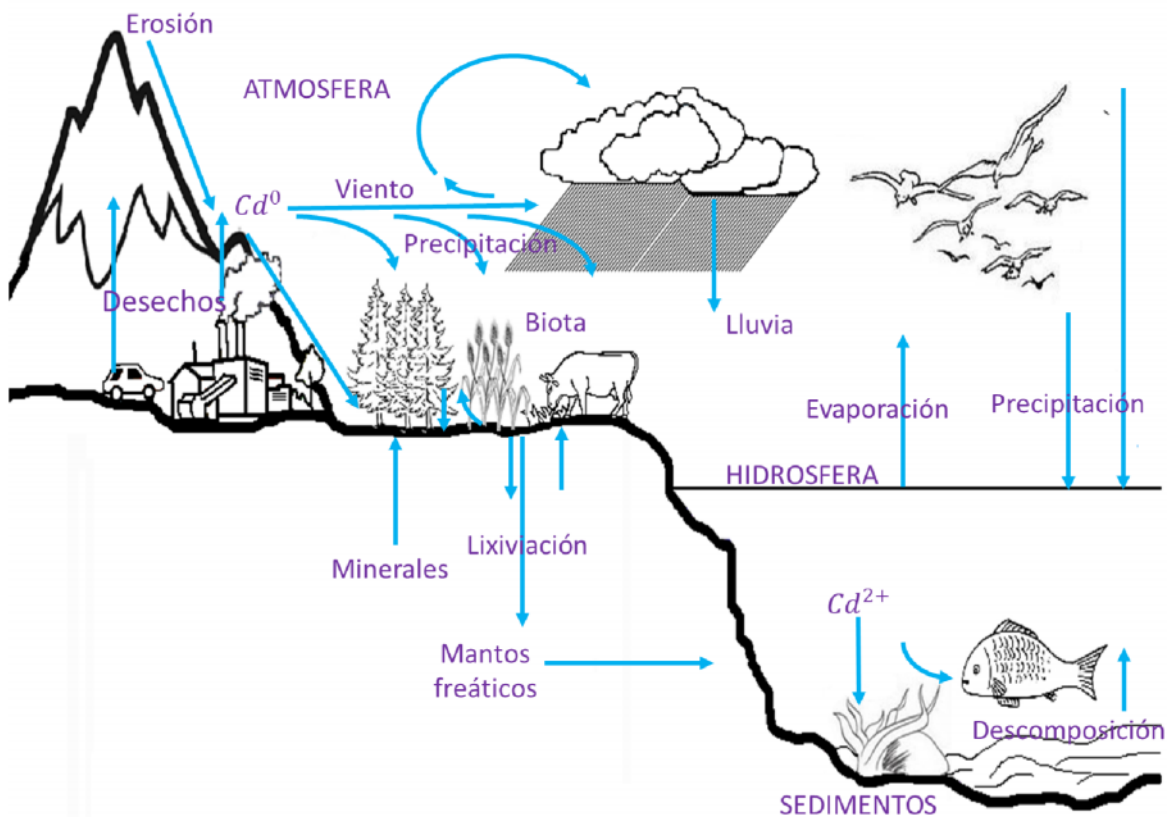


Figura 1. Ciclo biogeoquímico del Cadmio

### 3.4.2. CONTAMINACIÓN DEL AGUA POR CADMIO

Los agentes y las vías de contaminación por metales pesados en las aguas residuales de origen urbano son muchos; los contaminantes más frecuentes de las aguas incluyen compuestos orgánicos e inorgánicos disueltos o dispersos en el agua. Los contaminantes inorgánicos son diferentes productos disueltos o dispersos en el agua que provienen de descargas domésticas, agrícolas e industriales o de la erosión del suelo.

Los principales son cloruros, sulfatos, nitratos y carbonatos. También desechos ácidos, alcalinos y gases tóxicos disueltos en el agua como los óxidos de azufre, de nitrógeno, amoníaco, cloro y sulfuro de hidrógeno. Gran parte de estos



contaminantes son liberados directamente a la atmósfera y bajan arrastrados por la lluvia.

Esta lluvia ácida, tiene efectos nocivos que pueden observarse tanto en la vegetación como en edificios y monumentos de las ciudades industrializadas.

La contaminación del agua puede ser producida por:

- ✓ Compuestos minerales: pueden ser sustancias tóxicas como los metales pesados (plomo, mercurio, etc.), nitratos, nitritos. Otros elementos afectan a las propiedades organolépticas (olor, color y sabor) del agua que son el cobre, el hierro, etc. Otros producen el desarrollo de las algas y la eutrofización (disminución de la cantidad de  $O_2$  disuelto en el agua) como el fósforo.
- ✓ Compuestos orgánicos (fenoles, hidrocarburos, detergentes, etc.) Producen también eutrofización del agua debido a una disminución de la concentración de oxígeno, ya que permite el desarrollo de los seres vivos y éstos consumen  $O_2$ .
- ✓ La contaminación microbiológica se produce principalmente por la presencia de fenoles, bacterias, virus, protozoos, algas unicelulares.
- ✓ La contaminación térmica provoca una disminución de la solubilidad del oxígeno en el agua.

Las aguas residuales industriales contienen casi todos los tipos de contaminantes (minerales, orgánicas, térmicos por las aguas de refrigeración). Estas aguas se vierten a ríos o mares tras una depuración parcial.

En las aguas superficiales, el cadmio se presenta como ion libre y en su solubilidad incluyen la dureza, el pH, los complejos solubles y los sulfuros coloidales de estas; en este medio se une a la materia particulada. Cuando las aguas dulces llegan al mar, el ion  $Cd^{+2}$ , al igual que los iones de otros metales pesados, tiende a depositarse en los sedimentos y así queda limitado a las aguas de las costas y los estuarios. Esta inmovilización es potencialmente peligrosa, ya que pueden llegar a disolverse de nuevo si el pH disminuye.



La contaminación del agua potable con cadmio puede ocurrir como resultado de la presencia de impurezas de cadmio en las tuberías galvanizadas de zinc o en la soldadura, en los calentadores de agua, grifos, etc. También ha ocurrido contaminación del agua potable por la filtración de cadmio a los mantos freáticos a partir de los lodos que contengan óxidos de cadmio.

De acuerdo a la norma oficial mexicana contra la contaminación ambiental publicada el 18 de octubre de 1993, en el diario oficial el cadmio se considera dentro de los 3 primeros metales que contaminan el agua, en orden de importancia por abundancia.

El impacto del cadmio en los organismos acuáticos depende de una gran variedad de formas químicas posibles que pueden afectar a la toxicidad y acumulación de los organismos. En este sentido, la utilización del cadmio por parte del hombre ha influido en sus efectos tóxicos en gran variedad de organismos, no sólo por las aportaciones antropogénicas al medio, sino también porque altera la especiación o forma química de los elementos. Los ciclos geológicos naturales de muchos metales están siendo alterados como consecuencia de las actividades humanas. Se considera que las rutas principales de entrada de metales derivadas de actividades humanas en medio acuático son la atmósfera y los ríos.

Cuando el agua está contaminada por ácidos es más fácil la contaminación por metales que cuando no contiene ácidos.

### **3.4.3. CONTAMINACIÓN DEL SUELO POR CADMIO**

La contaminación del suelo por metales pesados está fundamentalmente relacionada con diferentes tipos de actividades humanas. Una vez en el suelo, los metales pesados pueden quedar retenidos en el mismo pero también pueden ser movilizados en la solución del suelo mediante diferentes mecanismos biológicos y químicos (Neylan D., Fulya D., 2002).

La contaminación de los suelos afecta principalmente a las zonas rurales agrícolas y es una consecuencia de la expansión de ciertas técnicas agrícolas. Los



fertilizantes químicos aumentan el rendimiento de las tierras de cultivo, pero su uso repetido conduce a la contaminación de los suelos, aire y agua.

Las principales variaciones en el contenido de cadmio en el suelo se deben a la composición de la roca madre y al suministro de metales que provienen de fertilizantes, abonos, agroquímicos y la contaminación atmosférica. En los suelos ácidos, el cadmio se intercambia fácilmente, lo que lo hace disponible para las plantas.

Los lodos de las aguas negras y los superfosfatos que se utilizan en la agricultura pueden también contaminar el suelo con cadmio ya que los suelos tratados con ellos pueden llegar a contener hasta 100 mg de cadmio por kilogramo de peso seco.

En lugares cercanos a industrias, el contenido de cadmio en los suelos puede ser elevado. También los suelos están expuestos a ser contaminados a través de las lluvias que arrastran metales pesados como el plomo, cadmio, mercurio y molibdeno, así como, sulfatos y nitratos producidos por la lluvia ácida

La contaminación por el riego con aguas residuales que contiene metales pesados es un problema grave en la ciudad de México. Las aguas residuales que se producen, son empleadas para regar grandes extensiones de terrenos dedicados al cultivo, principalmente en los estados de México e Hidalgo. Posteriormente, los productos de los cultivos son introducidos a la ciudad como alimento para la población; causando esto graves daños a la salud de la población (DCME., 1993).

Los metales pesados adicionados a los suelos se redistribuyen y reparten lentamente entre los componentes de la fase sólida. Dicha redistribución se caracteriza por una rápida retención inicial y posteriores reacciones lentas, dependiendo de las especies del metal, propiedades del suelo, nivel de introducción y tiempo (Solano M.M., 2005).

Los metales pesados, a menudo, se acumulan en la capa superficial del suelo y, por tanto, pueden ser absorbidos por raíces de las plantas y cultivos. Por estas razones, es importante conocer la naturaleza de estos sistemas y su mecanismo de funcionamiento (Neylan D., Fulya D., 2002).



La toxicidad de los metales depende no sólo de su concentración, sino también de su movilidad y reactividad con otros componentes del ecosistema. Igual que otros muchos compuestos químicos, los iones de metales pesados a menudo son adsorbidos sobre la superficie de las partículas, en especial las orgánicas que están suspendidas en el agua, en lugar de estar simplemente disueltos como iones libres o como complejos con biomoléculas solubles, como es el caso de los ácidos fúlvicos. Las partículas, en último término, sedimentan en el fondo de los lagos y quedan enterradas cuando otros sedimentos se acumulan encima. Este “enterramiento” representa un importante sumidero para muchos contaminantes del agua, y es el mecanismo por el cual se limpia el agua, sin embargo, antes de que se cubran por capas subsiguientes de sedimentos, la materia recientemente depositada en el fondo de un depósito de agua puede contaminar el agua por desorción de compuestos químicos, ya que en la adsorción y la desorción se establece un equilibrio. Además, los contaminantes adsorbidos pueden entrar en la red alimenticia, si las partículas son consumidas por organismos que habitan los sedimentos (Baird C., 2001).

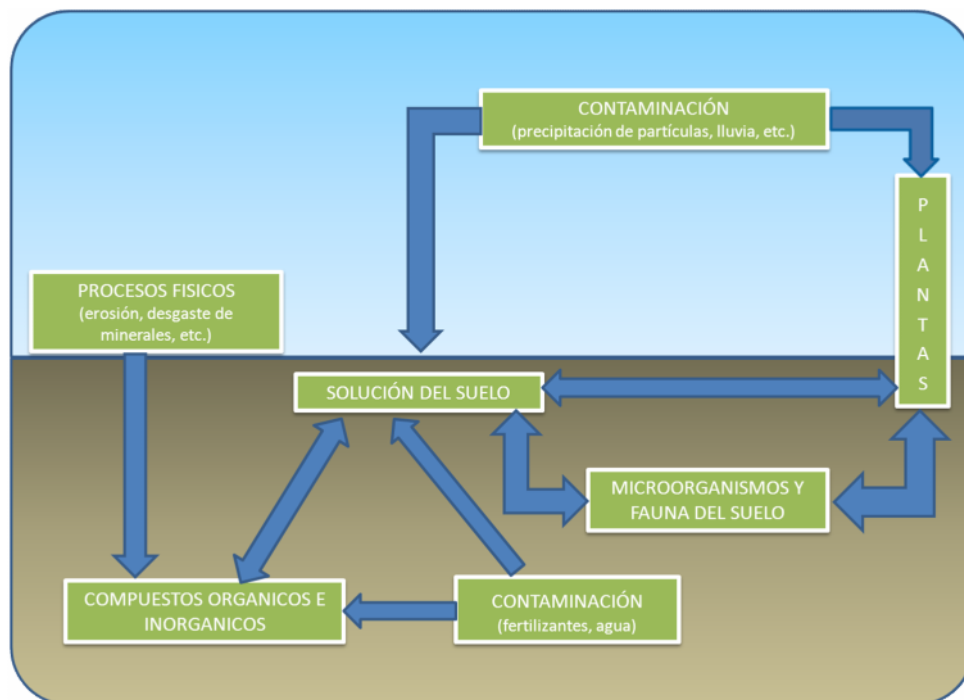


Figura 2. Transporte de cadmio en el suelo.





### 3.5. ESPECIACIÓN

El control analítico convencional de la mayoría de los metales, pesados, ligeros, mixtos y no metales se realiza mediante técnicas que generalmente conducen a la determinación de su concentración total. Si bien, una medida del contenido total de los elementos metálicos trazas permite una evaluación general de la contaminación, en numerosas ocasiones es necesario identificar la naturaleza de las especies que forma el metal. Se ha comprobado que la actividad biológica, biodisponibilidad, solubilidad, ciclos y transporte geoquímico depende de la especiación físico-química del metal.

La Especiación química se define como la distribución de un elemento químico, entre las diferentes formas en las cuales puede existir (especies) en un medio determinado. Incluye tanto los elementos libres (en forma neutra o ionizada) como los variados complejos que pueden formarse con diferentes ligantes (Lyman W. J., 1995).

La especiación química ha sido definida, en forma general, como el proceso de identificación y cuantificación de las formas químicas de un mismo elemento en una muestra dada (Hlavay *et al.* 2004). Para realizar la especiación química, comúnmente se emplea un procedimiento de extracción, simple o secuencial.

Las extracciones químicas secuenciales constituyen una metodología operativa consistente en la exposición de una muestra sólida frente a una serie de soluciones reactivas de características fisicoquímicas distintas. La finalidad que se persigue al aplicar una metodología de extracción química secuencial es determinar, con la mayor precisión posible, la distribución de los elementos traza existentes en una muestra sólida entre fracciones de distinta naturaleza fisicoquímica. A esta distribución se le ha denominado «especiación», y se ha comprobado que el reparto elemental determinado mediante la aplicación de una metodología de este tipo tiene una relación directa con el comportamiento geoquímico y la biodisponibilidad de los elementos químicos en condiciones naturales (Nirel y Morel, 1990).



La especiación química, permite asignar el grado de agresividad o toxicidad, estudiar el origen, definir los tipos de contaminación, etc.

Dentro de la especiación química puede distinguirse entre la especiación específica y la especiación operacional. En la primera se dan formas químicas concretas y en la segunda se agrupan según el comportamiento frente a diversos reactivos

Por consiguiente, la determinación de estas formas, como por ejemplo las llamadas móviles o formas unidas a carbonatos, dependiendo de los procedimientos operacionales, pueden ser útiles para dar información sobre los riesgos de contaminación ambiental.

Para estimar la removilización de los metales pesados desde los sedimentos bajo pequeños cambios en las condiciones ambientales, es de gran utilidad determinar las diversas formas químicas en que se encuentran, así como el tipo de sustrato al que se hallan asociados los cationes metálicos en los sedimentos (Rosental *et al.*, 1986; Usero *et al.*, 1997).

Esta técnica de extracción química secuencial se aplica extensamente en estudios medioambientales, aunque su capacidad de separar metales pesados o definir fracciones geoquímicamente, no es perfecto, pero es útil para entender el comportamiento químico y biodisponibilidad de metales en los sedimentos (Förstner, 1993; Prusty *et al.*, 1994; Usero *et al.*, 1997).

Determinar el contenido total de metales pesados en biosólidos que son destinados a uso agrícola es importante por el riesgo existente de que se acumulen en el suelo. Sin embargo la concentración total del metal se encuentra repartida en distintas fracciones o especies químicas. Por lo tanto la medición del contenido total es un criterio insuficiente para evaluar el verdadero riesgo, debido a que la movilidad de los metales pesados y su biodisponibilidad para las plantas depende de la especie química en la que se encuentren asociados (Scancar *et al.* 2000).

En este trabajo se utilizó la extracción secuencial. En esta técnica, diferentes extractantes químicos son aplicados secuencialmente a una misma muestra de



biosólidos, y cada etapa muestra condiciones más drásticas de extracción con respecto a la anterior.

Durante los últimos 25 años se han desarrollado una gran variedad de métodos de extracción. Algunos han sido muy utilizados. Sin embargo, los diversos procedimientos utilizados, hacen que los resultados obtenidos en diferentes estudios sean difícilmente comparados, debido a las condiciones de operación tan variables de cada método (Filgueiras *et al.* 2002).

### **3.5.1. ESPECIACIÓN EN EL AMBIENTE**

En la descripción de la concentración de compuestos inorgánicos, considerados “sustancias traza” en los ambientes naturales, es frecuente encontrar la misma expresada en términos de elementos químicos. Sin embargo, éstos son parte de las moléculas y forman diversas especies moleculares presentes simultáneamente y en relaciones diversas en el ambiente. Por otro lado, el comportamiento de un elemento depende de las especies particulares en las que está presente y la mayor reactividad de una especie no necesariamente coincidirá con la mayor concentración de esa forma química. De allí que el comportamiento de un elemento en el ambiente (biodisponibilidad, toxicidad, distribución, etc.) no pueda predecirse basándose en la concentración total (Castañe P.M., 2003).

La mayoría de los estudios realizados sobre metales en aguas residuales se refieren a la concentración total, pero no evalúan las diversas formas en que se puede presentar el metal; por otro lado, la concentración de metales en un lodo procedente de la digestión de aguas residuales presenta una amplia variación de una planta a otra (Stover R.C., 1996).

Para tomar en cuenta la complejidad del ambiente natural en el cual se encuentran los elementos traza y su importancia en el comportamiento de los mismos aparece en el contexto químico, el término “especiación”, definido anteriormente.

El óxido de cadmio y algunas sales de este metal, como el sulfuro y el carbonato, son prácticamente insolubles en agua pero pueden convertirse en sales



hidrosolubles en el medio natural, mientras que el sulfato, el nitrato y los haluros son hidrosolubles. De allí que la especiación del cadmio en el ambiente tiene importancia para evaluar su riesgo tóxico y ecotoxicológico. Los factores ambientales influyen en la captación y, por ende, en los efectos tóxicos del cadmio en los organismos acuáticos. Al aumentar la temperatura aumentan la captación y los efectos tóxicos, mientras que el aumento de la salinidad o de la dureza del agua los hace disminuir.

Estos ejemplos ilustran la necesidad de determinar no sólo la concentración total de un metal sino también el perfil del entorno fisicoquímico y su biodisponibilidad. Esta puede ser correlacionada directamente con la especiación química a través de la actividad del ion libre.

La estimación de la removilización de metales bajo condiciones ambientales y la asimilación potencial por los organismos son los principales objetivos para la diferenciación de especies en los metales traza enlazada a los sedimentos. Por otra parte, la biota puede interactuar a través de un gran número de vías con el medio ambiente que le rodea, modificando el pseudo-equilibrio entre las especies químicas en las fases líquida y sólida. Cabe indicar que los porcentajes de metales en las diferentes fracciones varían de acuerdo a la magnitud de la contaminación de los sedimentos. Por otro lado, esta variabilidad posiblemente también es resultado de las propiedades de los metales y de la competencia entre la adsorción de sedimento y la capacidad de complejación (Campbell y Tessier, 1987; Vaithyanathan *et al.*, 1993; Chen *et al.*, 1996).

### **3.5.2. ESPECIACIÓN DE METALES PESADOS**

Para comprender mejor la definición de especiación se da el término estándar oficial que la IUPAC considera; *“Los análisis de especiación se entienden como aquellos procesos que conducen a la identificación y determinación de las diferentes formas químicas y físicas de un elemento presentes en una muestra”*. Esta definición y la de especie química entendida como aquella forma de un



elemento definida por la composición isotópica, electrónica o estado de oxidación y/o estructura molecular son muy apropiadas para la descripción de especies en disolución. Sin embargo, cuando nos referimos a sólidos (suelos, lodos, sedimento o materiales biológicos), la definición anterior excluye aspectos fundamentales del campo de la especiación relativos a la interacción selectiva de las especies químicas con las distintas fases o componentes de dichos materiales sólidos, relegando este conocimiento a los procedimientos de fraccionación y extracción selectiva conocidos como metodología de fraccionación. Por lo tanto, la especiación es el procedimiento de extracción selectiva y su cuantificación de los metales que en la metodología se menciona.

Dentro de los estudios de contaminación por metales pesados en sistemas acuáticos, los sedimentos constituyen un material fundamental para conocer el grado de contaminación de una determinada zona. En sedimentos se puede realizar dos tipos de determinaciones: la concentración total de metales, que proporciona una evaluación del nivel de contaminación y, la especiación o estudio de las diferentes formas químicas en las que se encuentra el metal. Esta última nos proporciona información respecto a la biodisponibilidad en unas determinadas condiciones medioambientales. Las diferentes especies de metales tienen un comportamiento distinto con respecto a la removilización y la biodisponibilidad. La fracción de metal más móvil es la “*adsorbida como ion intercambiable*” lo que representa un riesgo de contaminación debido a la liberación de metales a las aguas bajo condiciones naturales (Förstner, 1989; Chen *et al.*, 1996).

Una de las primeras metodologías de extracción química secuencial fue desarrollada por Tessier *et al.*, (1979), y han servido de base para el desarrollo de otros esquemas posteriores de especiación como los métodos de Förstner, Salomons y Förstner; una forma alternativa de llevar a cabo la extracción química secuencial fue presentada por Stover *et al.*, (1996), la cual presenta la ventaja de que requiere menor tiempo para su realización.

Entre los diversos procedimientos existentes, los métodos de extracciones selectivas son los que aportan una información más significativa en la



determinación de las principales fases acumulativas de metales pesados en los sedimentos. A través de una serie de extracciones químicas sucesivas, se consigue remover los constituyentes más importantes de los sedimentos: carbonatos, óxidos de hierro-manganeso, materia orgánica y metales asociados a los minerales del sedimento (Legret, 1993; López-Sánchez, 1993; Usero *et al.*, 1997).

Después de revisar los diversos sistemas de especiación y las distintas fases existentes de metales pesados en sedimentos, se ha observado que todas las extracciones secuenciales tienen prácticamente el mismo procedimiento.

#### **3.5.2.1. FORMAS QUÍMICAS**

La importancia del estudio de las fracciones o especies químicas en las cuales se encuentran los metales pesados en los biosólidos, radica en que se establece su nivel de biodisponibilidad dependiendo de la estabilidad de cada especie química en condiciones ambientales. Cuando un metal se encuentra enlazado débilmente a una especie química, su índice de disponibilidad es alto porque el metal puede ser solubilizado con ligeros cambios en las condiciones ambientales del suelo, como una reducción del pH o del potencial redox (Alloway 1990).

Cuando los metales se encuentran unidos fuertemente a la especie química su estabilidad es muy alta y para que se conviertan a formas solubles se necesitarían condiciones ambientales muy drásticas, que normalmente no ocurren en la naturaleza. Si la mayor concentración de los metales se encuentra en esta fracción, indica una muy baja biodisponibilidad y en consecuencia el peligro de toxicidad se reduce. Esta información sólo es posible obtenerla con un estudio de especiación (Pérez-Cid *et al.* 1999).

La liberación de metales pesados desde las cenizas depende de las características químicas del material en la ceniza en términos de forma y solubilidad: (i) los metales pesados pueden estar presentes como sales solubles en agua donde la dilución determina las concentraciones en la solución y no hay



dependencia del pH. (ii) Los metales pesados pueden estar presentes como fases solubles o moderadamente solubles pero atrapadas en materiales que necesitan disolución, como por ejemplo, carbonatos y óxidos, los cuales cuando se disuelven con ácido liberan las fases solubles (Appelo and Postma, 1996; Freyssinet et al., 2002). La solubilidad de los metales pesados puede no estar directamente relacionada al ingreso de protones, pero los protones se requieren para disolver la cubierta superficial. (iii) Los metales pesados pueden ser liberados siguiendo el proceso de disolución. Por ejemplo, los metales pesados pueden estar presentes como carbonatos, óxidos o hidróxidos o como complejos superficiales, adsorbidos a óxidos o hidróxidos minerales en la matriz de la ceniza (Dijkstra *et al.*, 2002). La liberación de los metales pesados en esos tres escenarios puede ser gobernada por principios de equilibrio o puede ser controlada cinéticamente (Van Sloot *et al.*, 1996).

La dificultad analítica para determinar las concentraciones de una sola especie o de un grupo de especies, ha tenido por consecuencia que en general se cuantifique la concentración total de elementos trazas en el ambiente. Sin embargo, el análisis de las distintas especies químicas es una herramienta importante para predecir su comportamiento en el ecosistema y desarrollar medidas de remoción en caso de contaminación. Los modelos de especiación de elementos traza consideran la formación de complejos con ligandos inorgánicos y orgánicos de bajo peso molecular, complejos con materia orgánica disuelta, adsorción sobre la superficie del material particulado, reacciones redox, etc.

La forma química en la cual el metal se puede encontrar en los lodos residuales varía dependiendo del lugar de origen. Desafortunadamente, las limitaciones analíticas impuestas por interferencias, selectividad y sensibilidad nos impiden una completa diferenciación de metales entre formas fisicoquímicas específicas en la matriz compleja del lodo. Sin embargo se han propuesto técnicas de especiación química, como la extracción química secuencial, la cual utiliza una serie de reagentes químicos para remover fracciones de metales en lodos digeridos.



Las formas más comunes en que se encuentran los metales se describen a continuación.

#### **3.5.2.1.1. METALES EN FORMA DE IONES INTERCAMBIABLES**

Corresponde a la porción del metal total que puede ser intercambiado de sitios activos en suelos o sedimentos; Estos metales son liberados a través de un intercambio iónico, mediante un extractante ácido. Se extraen los metales intercambiables y solubles en medio ácido, incluyendo los metales adsorbidos.

Estos pueden ser fácilmente móviles en los ecosistemas acuáticos por pequeños cambios ambientales. La fracción de metal móvil es la adsorbida como ion intercambiable lo que representa un riesgo de contaminación debido a la liberación de metales a las aguas bajo condiciones naturales (Rosas R. H., 2001).

#### **3.5.2.1.2. METALES SORBIDOS**

La sorción incluye la adsorción (retención superficial) y la absorción (captación hacia el interior de la matriz). Los cationes generalmente son sorbidos en sitios de intercambio catiónico en minerales arcillosos o superficies húmicas, mientras que los compuestos aniónicos y no iónicos quedan sorbidos en la materia orgánica. Por lo que son metales en la fase adsorbida particulada o en la fase disuelta de los lodos. Hay intercambio entre iones de metales sorbidos e iones de metales acuosos por medio de mecanismos de adsorción y desorción. Dentro de la fase disuelta, los metales pueden presentar formas complejas con un número de ligantes diferentes en aguas naturales. Los iones metálicos forman complejos superficiales en un número de sitios diferentes de la materia particulada. El metal particulado puede más tarde estar biodisponible en los organismos acuáticos después de que el metal se ha depositado en el sedimento (Lester J. N., 1987).





### **3.5.2.1.3. METALES ENLAZADOS A CARBONATOS**

Se considera que los metales unidos a esta fase se liberarán al descender el pH de los sedimentos, al disolverse los metales en forma de carbonatos (Rosas R. H., 2001).

Los metales que se liberan en esta fracción se encuentran coprecipitados con minerales carbonatados, aunque también absorbidos sobre partículas de arcilla, la materia orgánica, los óxidos e hidróxidos de Fe y Mn, han sido asociados a esta fracción como consecuencia de la falta de selectividad de los reactivos extractantes empleados.

### **3.5.2.1.4. METALES ENLAZADOS A LA MATERIA ORGÁNICA**

Estos metales representan la fracción que se liberaría mediante la degradación de la materia orgánica bajo condiciones oxidantes.

Los elementos traza se encuentran asociados o incorporados a la materia orgánica, como recubrimiento de las partículas minerales o como detrito de la biota o los organismos vivos. En suelos y sedimentos el contenido orgánico se encuentra constituido por los ácidos húmicos, fúlvicos y sustancias no húmicas como los carbohidratos, proteínas, péptidos, aminoácidos, grasas, ceras y resinas.

### **3.5.2.1.5. METALES UNIDOS A SULFUROS**

Son aquellos metales pesados retenidos en redes cristalinas con azufre y que pueden movilizarse con cambios en las condiciones de pH del medio. Bajo condiciones oxidantes se origina la degradación de sulfuros con la consecuencia de metales trazas adsorbidos. La combinación de ácidos mejora la disolución de sulfuros, pero la selectividad de la extracción se reduce al atacar la fracción residual.



### **3.5.2.1.6. METALES ASOCIADOS A ÓXIDOS DE HIERRO Y MANGANESO**

Son aquellos metales ligados a oxihidróxidos de hierro y manganeso, se liberan los metales unidos a óxidos de fierro y manganeso, inestables bajo condiciones reductoras (los óxidos se disuelven y se liberan las trazas de metal adsorbidas).

Los metales en esta fase pasarán al agua en aquellas zonas donde el sedimento se encuentre bajo condiciones reductoras. Estos óxidos son sustancias de alto poder de adsorción y son termodinámicamente inestables en condiciones anóxicas. (Valores bajos de potencial redox).

Con esta extracción se extraen los óxidos de hierro libres con una mínima acción destructiva sobre los minerales de arcilla; también se extraen sílice y alúmina por lo que este método puede ser indicativo de los metales asociados a estas fases (Solano M. M.A., 2005).

### **3.5.2.1.7. FASE RESIDUAL O LITOGÉNICA**

Son los metales ligados a los minerales primarios como los silicatos, formando parte de sus estructuras cristalinas. La liberación de metales de esta fase, en un período razonable de tiempo es ciertamente improbable, ya que representa la cantidad de metal que no se extrajo en ninguna de las etapas anteriores.

## **3.6. AGUAS RESIDUALES**

Las aguas residuales presentan características físicas, químicas y biológicas especiales sobre las demás aguas, que es necesario comprender para optimizar su manejo: recolección, transporte, tratamiento y disposición final y minimizar los efectos adversos de su vertimiento en aguas naturales o al suelo, obteniendo así un mejor manejo ambiental de los desechos y la calidad del agua.

Las características de las aguas residuales o desechos domésticos son diferentes de los desechos de las industrias y de los desechos de las actividades agrícolas. Las diferencias en las características de estos desechos son múltiples, no siendo



posible utilizar los mismos sistemas de tratamiento para todos los desechos con la misma eficiencia. En otras palabras, un proceso eficiente para aguas residuales domesticas puede exigir modificaciones para tratar desechos de actividades agrícolas o resultar ineficaz en el tratamiento de un desecho industrial.

Es importante destacar que, en ocasiones, resulta más práctico reutilizar los desechos como método de manejo que verterlos al ambiente; esta es una manera de hacer una mejor utilización de los recursos. Los sistemas de manejo y tratamiento de los desechos deben tomar ventaja de las características de esos desechos, especialmente del contenido de materia orgánica, sólidos, nitrógeno y fosforo.

La disposición de aguas residuales o desechos en cuerpos de agua contribuyen, apreciablemente, a aumentar las concentraciones de nutrientes que fertilizan las aguas, y de materia orgánica que demanda oxígeno para la oxidación. De esta manera se degrada la calidad de las aguas receptoras y resultan menos aptas para usos benéficos y en ocasiones se producen efectos drásticos sobre los ecosistemas acuáticos especialmente sobre las especies de valor comercial. Los cambios en las concentraciones de materia orgánica por el vertimiento de desechos, modifican las concentraciones de oxígeno disuelto, nutrientes y temperatura en el medio acuático natural. Estas alteraciones favorecen el crecimiento de unas especies a costa de otras de menor valor, el resultado es un cambio en los ecosistemas acuáticos.

El origen de los desechos es un determinante de las características de cada desecho o tipo de desecho. En este caso se distinguen tres tipos de desechos:

- Desechos líquidos municipales. Se originan principalmente en la vivienda y el comercio, son las aguas residuales de centros urbanos.
- Desechos líquidos industriales. Son aguas desechadas de procesos y operaciones de transformacion y agua de enfriamiento, son diferentes en cada tipo de industria.



- Desechos líquidos agroindustriales. Se producen en explotaciones pecuarias y procesamiento de cosechas de cultivos.

De la misma manera que en las aguas naturales se miden las características físicas, químicas y biológicas de aguas residuales para establecer principalmente, las cargas orgánicas y de sólidos que transportan, determinar efectos del vertimiento a cuerpos de agua y seleccionar las operaciones y procesos de tratamiento que resultarán más eficaces y económicos.

### **3.6.1. PARÁMETROS FÍSICOS**

En la caracterización de aguas residuales es importante conocer la temperatura, la concentración y la clase de sólidos principalmente, el color, el olor y el sabor no son significativos en la caracterización de desechos líquidos. A continuación se describen sus respectivas características.

#### **TEMPERATURA**

Varía de un lugar a otro y durante las horas del día y épocas del año. En el trópico puede variar entre 15 y 26 C para desechos domésticos.

El aumento de temperatura acelera la descomposición de la materia orgánica, aumenta el consumo de oxígeno para la oxidación y disminuye la solubilidad del oxígeno y otros gases.

La densidad, viscosidad y tensión superficial disminuyen al aumentar la temperatura, o al contrario cuando esta disminuye, estos cambios modifican la velocidad de sedimentación de partículas en suspensión y la transferencia de oxígeno en procesos biológicos de tratamiento.

La temperatura normal de las aguas negras es ligeramente mayor que la del agua de abastecimiento, a causa del calor agregado durante la utilización del agua (Colin B., 2001).



## **SÓLIDOS**

Se encuentran en suspensión, coloidales y disueltos, en los análisis de laboratorio solo se hace la distinción entre sólidos en suspensión que retienen el papel filtro #40 y disueltos.

Los sólidos contenidos en aguas residuales se oxidan consumiendo el oxígeno disuelto en el agua, sedimentan al fondo de los cuerpos receptores donde modifican el hábitat natural y afectan la biota acuática.

## **COLOR Y OLOR**

Las aguas residuales recientes normales, tienen un color gris. Un color negro o muy oscuro, puede indicar que las aguas residuales están alteradas o son sépticas, especialmente si tales colores van acompañados de olores sépticos. Otros colores, suelen indicar la presencia de desechos industriales característicos. Las aguas residuales domésticas normales recientes son prácticamente inodoras. Los olores a podrido, así como los de ácido sulfhídrico y los de Indol, escatol y otros productos de descomposición, indican que las aguas negras están alteradas o son sépticas.

## **CONDUCTIVIDAD**

La conductividad del agua nos permite tener una idea de la concentración de sales minerales; valores altos de conductividad permiten la Complejación de metales dando el elevado contenido salino y por tanto de aniones complejantes como por ejemplo el  $Cl^-$ , beneficiando de esta forma la movilización de metales al solubilizarse.

### **3.6.2. PARÁMETROS QUÍMICOS**

A diferencia de las aguas naturales, las aguas residuales han recibido sales inorgánicas y materia orgánica de la preparación de alimentos y el metabolismo humano principalmente y toda clase de materiales que se descartan por los



desagües e imparten propiedades especiales a las aguas servidas; además, es necesario incluir biocidas, detergentes y desinfectantes.

Los compuestos inorgánicos agregados a las aguas durante su uso son principalmente:

- Sales.
- Nutrientes.
- Trazas de elementos
- Tóxicos

En aguas residuales los gases son producto de la descomposición biológica de la materia orgánica y de la transferencia desde la atmosfera. Los gases en aguas residuales son:

- Oxígeno disuelto.
- Dióxido de carbono.
- Metano
- Amoniaco.
- Ácido sulfhídrico

La materia orgánica en aguas residuales está representada por hidratos de carbono, (azucres, almidones), proteínas, grasas, celulosa, lignina, orgánicos sintéticos, etc. La identificación y medida de cada compuesto resulta muy costosa y no es necesario este grado de detalle. Se han ideado métodos para medir la materia orgánica en conjunto en base a la demanda de oxígeno para su oxidación o el contenido total de carbono.

Algunos de los análisis químicos que se les realizan a las aguas residuales para determinar su contaminación, se describen a continuación.

## **OXÍGENO DISUELTO**

El oxígeno disuelto se disuelve desde la atmósfera y de la actividad fotosintética de algas. Hay muy poco oxígeno disuelto en el producto cloacal fresco y ninguno en aguas residuales sépticas.



En el oxígeno disuelto la solubilidad del oxígeno en el agua es afectada por la turbulencia en la superficie, por la temperatura, por la presión atmosférica, por el tanto porcentaje de oxígeno en la atmósfera, por la deficiencia de oxígeno en el agua, por el área de la superficie expuesta a la atmósfera, y por otras condiciones. El oxígeno es menos soluble en el agua salina que en agua dulce y su solubilidad en las aguas negras es aproximadamente el 95% de la solubilidad en el agua dulce (Babbitt H. E., 1975).

Entre las demandas de oxígeno, figura la llamada demanda inmediata de oxígeno, definida en los métodos como “el consumo de oxígeno disuelto en una disolución acuosa tipo de la muestra, en determinado tiempo” (Babbitt H. E., 1975).

### **DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO**

Es la cantidad de oxígeno necesaria para que los microorganismos aerobios puedan oxidar metabólicamente la materia orgánica presente en la muestra de agua. En el tratamiento de las aguas residuales, se descompone toda la materia orgánica que puede demandar oxígeno para ello, y el resto es eliminada con los líquidos residuarios (Fair M.G., Geyer J.C., Okun D.D., 1976).

### **EL pH**

La determinación del pH, es importante debido al efecto que tiene sobre los microorganismos que intervienen en el proceso de lodos activados, así como en la forma química en que se pueden encontrar los metales pesados. La mayoría de los metales suelen estar más disponibles a pH ácidos, a excepción del As, Mo, Se y Cr que lo están a pH alcalinos (Colin B., 2001).

### **3.7. PLANTAS DE TRATAMIENTO**

Para poder darle el tratamiento adecuado a las aguas residuales, es indispensable tomar en cuenta las características del agua a tratar.

Típicamente, el tratamiento aeróbico implica tres etapas, llamadas *tratamiento primario*, *secundario* y *terciario*. En el caso de las ciudades, los sistemas, deben



de incluir los tres tratamientos para poder limpiar el agua de desecho. Sin embargo es fundamental someter el agua a un pre tratamiento, en donde se eliminan aquellos sólidos de gran tamaño.

El tratamiento primario consiste en la separación, por medios físicos de las partículas en suspensión, es decir de aquellos compuestos sólidos que son muy finos para eliminarlos en el pre tratamiento.

El tratamiento secundario o biológico descompone la materia orgánica de las aguas residuales, mediante procesos llevados a cabo por microorganismos. Tanto el tratamiento primario como el secundario generan grandes cantidades de lodos que se depositan en los decantadores. Éstos deben tratarse para reducir su actividad y volumen, después, si no contienen metales pesados u otros contaminantes, pueden ser utilizados como abonos agrícolas.

El tratamiento terciario pretende reducir la cantidad de determinadas sustancias disueltas en el agua.

### **3.7.1. TIPOS**

En la actualidad existen diversos tipos de plantas de tratamiento de aguas residuales como lo son:

- ✓ Sistemas de tratamientos biológicos
- ✓ Estanques de lodos activos (tratamiento aerobio)
- ✓ Tratamiento anaerobio
- ✓ Humedales artificiales

### **SISTEMAS DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO**

Los objetivos del tratamiento biológico son tres:

- Reducir el contenido en materia orgánica de las aguas.
- Reducir su contenido en nutrientes.
- Eliminar los patógenos y parásitos.

Estos objetivos se logran por medio de procesos aeróbicos y anaeróbicos, en los cuales la materia orgánica es metabolizada por diferentes cepas bacterianas.





## **ESTANQUES DE LODOS ACTIVOS**

El tratamiento se proporciona mediante difusión de aire por medios mecánicos en el interior de tanques. Durante el tratamiento los microorganismos forman flóculos que, posteriormente, se dejan sedimentar en un tanque, denominado tanque de clarificación.

El sistema básico comprende, pues, un tanque de aireación y un tanque de clarificación por los que se hace pasar los lodos varias veces.

Los dos objetivos principales del sistema de lodos activados son:

- La oxidación de la materia biodegradable en el tanque de aireación.
- La floculación que permite la separación de la biomasa nueva del efluente tratado.

Este sistema permite una remoción de hasta un 90% de la carga orgánica pero tiene algunas desventajas: en primer lugar requiere de instalaciones costosas y la instalación de equipos electromecánicos que consumen un alto costo energético. Por otra parte produce un mayor volumen de lodos que requieren de un tratamiento posterior por medio de reactores anaeróbicos y/o su disposición en rellenos sanitarios bien instalados.

## **TRATAMIENTO ANAEROBIO**

Consiste en una serie de procesos microbiológicos, dentro de un recipiente hermético, dirigidos a la digestión de la materia orgánica con producción de metano. Es un proceso en el que pueden intervenir diferentes tipos de microorganismos pero que está dirigido principalmente por bacterias.

Presenta una serie de ventajas frente a la digestión aerobia:

- Generalmente requiere de instalaciones menos costosas
- No hay necesidad de suministrar oxígeno por lo que el proceso es más barato y el requerimiento energético es menor.
- Se produce una menor cantidad de lodo (el 20% en comparación con un sistema de lodos activos), y además este último se puede disponer como abono y mejorador de suelos.



- Producción de un gas útil.

Para el tratamiento anaerobio a gran escala se utilizan reactores de flujo ascendente o U.S.B. (Por sus siglas en inglés) con un pulimento aerobio en base de filtros percoladores y humedales.

### **HUMEDALES ARTIFICIALES**

Este sistema consiste en la reproducción controlada, de las condiciones existentes en los sistemas lagunares superficiales o de aguas lenticas los cuales, en la naturaleza, efectúan la purificación del agua. Esta purificación involucra una mezcla de procesos bacterianos aerobios-anaerobios que suceden en el entorno de las raíces de las plantas hidrófilas, las cuales a la vez que aportan oxígeno consumen los elementos aportados por el metabolismo bacterial y lo transforman en follaje.

Este sistema es el más amigable desde el punto de vista ambiental ya que no requiere instalaciones complejas, tiene un costo de mantenimiento muy bajo y se integra al paisaje natural propiciando incluso refugio a la vida silvestre.

Quizás se podría mencionar como única desventaja la mayor cantidad de superficie necesaria.

La planta de tratamiento de aguas residuales de la cual se tomaron las muestras es de tipo aerobio, es decir utiliza lodos activados para el tratamiento del agua. A continuación se muestra su diagrama de flujo.



## ANTECEDENTES

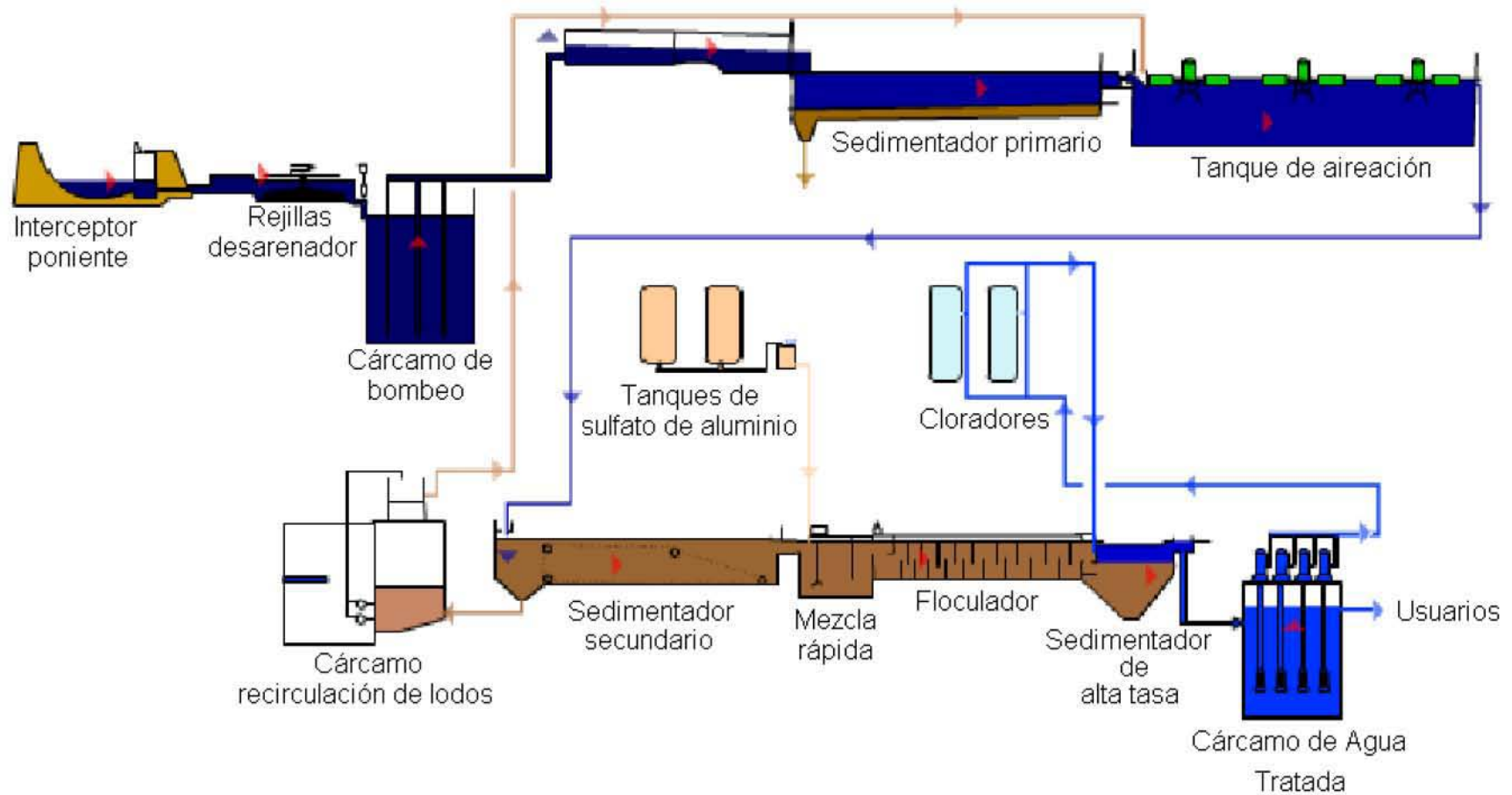


Figura 3. Diagrama de flujo de proceso de la planta de tratamiento estudiada



### 3.8. LODOS DE DESECHO

Un lodo de desecho o lodo residual es una materia orgánica húmeda con una cierta cantidad de aditivos, entre los cuales hay algunos que resultan de interés aprovechar por su importancia como nutrientes del suelo y otros cuya presencia es indeseable por su posibilidad de contaminación (metales pesados).

El lodo residual de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas constituyen una fuente importante de nutrientes y de microorganismos. Las características físicas y químicas de los lodos varían en función de su origen, urbana o industrial, y del tipo de proceso al que han sido sometidos. (Ameneiros, 2003)

Se han reportado muchos análisis químicos de lodos y los valores reportados son útiles por muchas razones. Hay una gran variación en el valor fertilizante de los lodos de aguas domésticas y de aguas residuales industriales. Un análisis químico puede establecer el nivel de utilización del lodo para este fin. La concentración de nitrógeno, de ácido fosfórico y el contenido de potasio de los lodos, así como su contenido orgánico, son indicadores de su valor fertilizante. Adicionalmente, el grado de digestión al cual ha sido sometido el lodo es también factor importante, ya que la digestión, reduce el nitrógeno del lodo y la materia orgánica digerible y con esto, su valor fertilizante. El conocimiento de los componentes de un lodo es importante para predecir cuales condiciones prevalecerán durante el espesado y para determinar qué efectos específicos impondrán las características del lodo, sobre el suelo donde se dispondrá finalmente.

En la mayor parte de los procesos de tratamiento de aguas negras, se separan las partes líquidas y sólidos de dichas aguas. El líquido, que forma el efluente de la instalación de tratamiento de aguas residuales, se elimina por dilución o extensión sobre terreno, y los sólidos, que forman el lodo y la espuma, se evacuan de formas diversas. El lodo está constituido por la acumulación de sólidos en suspensión de las aguas residuales, depositados en tanques o cámaras, mezclados con una cantidad menor o mayor de agua, para formar una masa



semilíquida. La espuma, está constituida por una masa de sólidos de las aguas negras, elevadas por el arrastre ascensional que producen gases, grasa, u otras sustancias, que flotan en la superficie de las aguas negras. El lodo y las espumas representan los sólidos que se han separado de las aguas negras, en unión de toda el agua que han podido arrastrar con ellos. Crean el problema más grave de evacuación, porque su capacidad de contaminación, por unidad de peso, es más grande que la del líquido final del tratamiento que se ha producido

### 3.8.1. ORIGEN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE LODO

El tratamiento biológico de aguas residuales produce distintos tipo de lodos dentro de cada uno de los procesos individuales. Los lodos residuales, se pueden obtener ya sea de procesos de separación como son la sedimentación y flotación, de procesos biológicos o de los procesos de potabilización de agua residual. El lodo residual puede ser considerado como residuo peligroso o no peligroso dependiendo de su origen y contenido.

#### TIPOS DE LODO

**Lodo crudo**, es aquel que no ha sido tratado ni estabilizado, que puede extraerse de plantas de tratamiento de aguas residuales. Tiende a producir la acidificación en la digestión y produce olor.

**El lodo primario** es producido durante los procesos de tratamiento primario de las aguas residuales, consiste en productos no disueltos de las aguas residuales. El lodo en el fondo de tanque primario de sedimentación se llama también lodo primario. La composición del lodo depende de las características del área de recolección de las aguas. El lodo primario contiene generalmente una gran cantidad de materia orgánica, vegetales, frutas, papel, etc.

**Lodo activo** es el lodo resultante de la eliminación de materia orgánica disuelta y los nutrientes de las aguas residuales que tiene lugar durante el tratamiento biológico del agua. Normalmente se caracteriza por la interacción de distintos tipos de bacterias y microorganismos, que requieren oxígeno para vivir, crecer y



multiplicarse, consumiendo materia orgánica. Normalmente este lodo esta en forma de flóculos que contienen biomasa viva y muerta además de partes minerales y orgánicas adsorbida y almacenada.

**Lodo activo de retorno** es el que proviene del tanque de aireación biológica al clarificador final. Los flóculos de lodo activo sedimentan al fondo y pueden separarse del agua limpia residual. La mayoría del lodo que se lleva de nuevo a tanque de aireación se le llama lodo activo de retorno.

**Lodo secundario o Exceso de lodo**, la biomasa en exceso debe de eliminarse de la planta biológica de tratamiento, para alcanzar una vida del lodo constante. El lodo en exceso contiene partículas no hidrolizables y biomasa resultado del metabolismo celular.

**Lodo terciario** se produce a través de procesos de tratamiento posterior, ejemplo, adición de agentes floculantes.

**Lodo digerido** tienen lugar en los procesos de digestión aeróbica. Tiene color negro y olor a tierra. Tiene una proporción de materia orgánica del orden de 45 a 60 %.

### 3.8.2. CLASIFICACIÓN

De acuerdo a su origen los lodos de desecho pueden clasificarse en:

- **Lodos primarios**, son los provenientes del clarificador primario, proceden de los procesos de separación, contiene de 3-8% de sólidos con aproximadamente 92-97% de materia orgánica. Estos lodos se convierten rápidamente en anaerobios seguidos de olores putrefactos.
- **Lodos secundarios**, también llamado “lodo biológicamente procesado” es generado por un proceso biológico, estos consisten de microorganismos y materias inertes.
- **Lodos terciarios**, es producido por sistemas avanzados de tratamiento, tales como precipitación química o filtración, sus características dependen de la naturaleza del proceso.



Además, los lodos pueden ser clasificados en función de su toxicidad de la siguiente manera:

- **Lodos orgánicos con bajas concentraciones de contaminantes tóxicos**, fácilmente biodegradables (prioridad I).
- **Lodos orgánicos e inorgánicos con bajas concentraciones de contaminantes tóxicos**, donde los orgánicos no son fácilmente biodegradables (prioridad II).
- **Lodos orgánicos e inorgánicos que contienen contaminantes tóxicos** (prioridad III).

Las opciones de manejo del lodo tienen que ver con los tipos de lodos y en función de su prioridad.

En la **prioridad I**, el lodo puede ser reusado como fertilizante, aunque depende también de la composición. La prevención también está supeditada al proceso de generación y su destino final puede ser el relleno sanitario o la incineración. El producto final de la incineración lo constituye una ceniza estéril, exenta de patógenos e inodora.

En la **prioridad II**, su reutilización y revaloración dependen de la composición, puede terminar como compostaje, incinerado o en relleno sanitario.

En la **prioridad III**, la prevención se hace de acuerdo con los procesos de generación de lodo o disposición en rellenos.

La aplicación al suelo de lodos de aguas residuales urbanas se define como la distribución del fango sobre el terreno o inmediatamente por debajo de la superficie del mismo; el lodo se puede aplicar en:

- ✓ Terrenos de uso agrícola.
- ✓ Terrenos de uso forestal.
- ✓ Terrenos marginales.
- ✓ Terrenos especialmente preparados para la evacuación de lodos.

En estos casos, la aplicación al suelo se diseña con el objetivo de conseguir un tratamiento adicional de los lodos. La luz solar, los microorganismos que habitan el



terreno y la desecación, se combinan para destruir los organismos patógenos y muchas de las sustancias tóxicas presentes en el lodo. Los metales de traza se quedan atrapados en la matriz del suelo y los nutrientes que consumen las plantas los convierten en biomasa útil. En los tres primeros casos, los lodos se utilizan como un recurso valioso para la mejora del terreno. El lodo actúa como acondicionador del suelo para facilitar el transporte de los nutrientes, aumentar la retención de agua y mejorar la aptitud del suelo para el cultivo. El lodo también sirve como un sustitutivo parcial de fertilizantes químicos caros.

### **3.8.3. CARACTERIZACIÓN DEL LODO**

A fin de que el tratamiento y evacuación del lodo producido en las plantas tratadoras de aguas residuales puedan llevarse a cabo de forma más efectiva, es importante conocer las características de los sólidos y del lodo a procesar. Las características son variables, dependiendo del origen de los sólidos y del lodo, del tiempo transcurrido desde su producción y del tipo de proceso al que hayan sido sometidos. En el diseño y elección de los procesos para el tratamiento de los lodos es importante conocer las siguientes características:

#### **Características químicas:**

Dentro de las características químicas es importante conocer el número de sólidos totales, sólidos volátiles, materia orgánica, cantidad de nutrientes, cantidad de metales pesados y tóxicos orgánicos.

#### **Características físicas:**

Como son las propiedades reológicas, características de sedimentación, características para la deshidratación, contenido de materia seca, contenido de materia volátil, compresibilidad y poder calorífico.

#### **Características microbiológicas:**

Es de vital importancia conocer el número de microorganismos patógenos, bacterias, virus, protozoos, parásitos, hongos y algas.





Para la caracterización de los lodos, se emplea el análisis de componentes, el cual se puede realizar mediante un balance de masa del proceso generador del lodo, con información de la calidad de la materia prima utilizada. Los expertos también se apoyan en el análisis de lixiviados, que consiste en someter una muestra de residuos a un proceso acelerado de descomposición, simulando la situación más crítica que sufrirá al ser depositado en un relleno. En el lixiviado resultante se analizan los parámetros requeridos para su caracterización.

Es muy socorrido el análisis de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad y biológico (CRETIB) del lodo, que ayuda a determinar el tipo al que corresponde.

#### **3.8.4. MANEJO EN MÉXICO DE LOS LODOS**

En México, el incremento de la población, el desarrollo tecnológico, la explotación de los recursos naturales, la creciente exigencia de mayor eficiencia en los sistemas de tratamiento y el establecimiento de nuevas plantas tratadoras de aguas residuales son factores que contribuyen a un incremento considerable en la generación y producción de lodos residuales.

Actualmente es mayor la dificultad para encontrar sitios adecuados de disposición final, por ello, es urgente y necesario encontrar sistemas de tratamiento de lodos residuales que permitan la reutilización, obtención y recuperación de productos útiles, convirtiendo el lodo en un recurso y no en un desecho.

Por otra parte, se conocen diferentes métodos de tratamiento de lodos residuales apoyándose en la composición elemental de estos; estos métodos de tratamiento son aplicables para el confinamiento final del lodo, siendo el objetivo fundamental la modificación de sus propiedades para disminuir el volumen, inhibir y/o desechar tóxicos, agentes biológicos y lograr un nivel sanitario con un grado bajo de riesgo para el ser humano y otros seres vivos.

Actualmente el gobierno del estado de México cuenta con 78 plantas de tratamiento de aguas residuales con una capacidad instalada de 7090.2 L/s con aguas de origen municipal. En lo referente a los sistemas de tratamiento en la



industria se estima que cuenten con 321 plantas de tratamiento, el gasto estimado de estas plantas de tratamiento es de 4568.4 L/s.

En la república mexicana existen un total de 1 710 plantas de tratamiento de aguas residuales en operación de las cuales 417 utilizan lodos activados para su tratamiento, esto hasta 2007 y de los cuales, se estima que del total del lodo residual producido el 80 % se dispone en tiraderos a cielo abierto mezclados con basura o se vierten al drenaje, y el 20 % restante es tratado para disponer de él como relleno sanitario o acondicionador de suelo.

En la actualidad, en México, los métodos de disposición utilizados son: basureros a cielo abierto, relleno sanitario, vertido al drenaje o corrientes superficiales e incineración. Esto provoca contaminación ambiental debido a los altos contenidos de materia orgánica, patógenos, metales pesados y tóxicos orgánicos.



#### **4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

Para la realización del análisis de especiación se han tenido precauciones especiales en la elección de materiales y la limpieza de los mismos. El material en contacto con las muestras se eligió de polietileno a fin de evitar la contaminación con los iones que puede liberar el vidrio. Estos recipientes se lavaron y se dejaron al menos 24 horas en una solución de ácido nítrico al 10%, con el fin de diluir cualquier traza de metal en dicho recipiente. Posteriormente se lavó tres veces con agua des ionizada.

##### **4.1. TOMA DE MUESTRAS Y TRANSPORTE**

La toma de muestras se realizó tres veces al día, durante una semana (exceptuando el fin de semana) en el Cárcamo de recirculación de lodos, de las cuales se formaron muestras compuestas, formadas por la mezcla de las tres muestras de cada día.

Se transportó, evitando toda contaminación accidental y en condiciones adecuadas. Se almacenó a una temperatura de 4 C hasta su análisis, con el objetivo de evitar posibles alteraciones químicas.

Como la calidad de los lodos puede alterarse durante las horas que dura la formación de las muestras compuestas, fue necesario conservar las muestras parciales en el laboratorio en un lugar refrigerado y acidificarlas con agua regia, para inhibir los procesos biológicos que, en otro caso, se producirían y con objeto de evitar un intercambio de iones y precipitación de hidróxidos (Taylor APPHA-AWWA., 1984).

##### **4.2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

Un método para evaluar la forma del metal en lodos de aguas residuales es recuperando los metales mediante extractantes selectivos como ácidos, bases, sales y agentes complejantes. El uso de extracciones simples es útil para



determinar la distribución del metal en el lodo de agua residual. Esta técnica permite desarrollar un procedimiento secuencial de fraccionamiento capaz de determinar la cantidad y formas del metal en el lodo (Stover R.C., 1996).

Para la cuantificación de cadmio, se efectuó el análisis por espectroscopía de absorción atómica con flama, utilizando el equipo Perkin Elmer AAnalyst100 para la determinación en el lodo de desecho. La cantidad de metales pesados se comparó con la Norma Oficial Mexicana (NOM-001-ECOL-1996).

#### **4.2.1. REACTIVOS**

KNO<sub>3</sub> 1 M

KF 0.5 M (pH 6.5)

Na<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub> · 10H<sub>2</sub>O 0.1 M

EDTA 0.1 M (pH 6.5)

HNO<sub>3</sub> 0.1 M

Agua Regia

Agua des ionizada

#### **4.2.2. MATERIAL**

Vasos de precipitados de 1 L, 0.5 L, 100 ml

Matraces aforados de 500 ml, 1 L, 2 L

10 Tubos de centrifuga

Matraces de 250 ml

Material de vidrio en general

Pizeta

#### **4.2.3. EQUIPO**

Agitador oscilatorio transversal

Centrifuga

Balanza de precisión

Espectrofotómetro de Absorción Atómica (EAA)



### **4.3. EXTRACCIÓN QUÍMICA SECUENCIAL**

Para evaluar la forma de los metales en lodos fue necesario desarrollar un esquema de fraccionamiento capaz de recuperar metales en cada fase por separado. El procedimiento de extracción secuencial se adaptó para separar los metales en sus fracciones intercambiables, sorbidas, puentes orgánicos, carbonatos, sulfuros y residual, según el procedimiento propuesto por Stover.

Entre cada extracción, el lodo residual se lavó con agua desionizada, se centrifugó y se guardó el sobrenadante, para remover así, el reactivo remanente y los metales presentes en el lodo residual de la extracción previa.

#### **4.3.1. PRIMERA EXTRACCIÓN**

En la primera extracción se obtuvieron los metales intercambiables; para esto, de la muestra compuesta se toma 1 ml, se coloca en un recipiente de polietileno, se le agrega 50 ml de  $\text{KNO}_3$  (1 M), y se coloca en el agitador horizontal a 20-25 rpm durante 16 horas a temperatura ambiente. Transcurrido este período, se pasa el contenido del recipiente de polietileno, con sumo cuidado, para no perder parte de la mezcla, a un tubo de centrifuga. Éste se centrifuga a 10,000 rpm durante 10 minutos. A continuación se extrae el líquido sobrenadante, se deposita en un recipiente de polietileno y se guarda en refrigeración a 4 C hasta su análisis.

Se lava el residuo con 25 ml de agua desionizada, se centrifuga a 10,000 rpm durante 10 minutos. El agua de lavado se desecha teniendo cuidado de no perder parte del residuo sólido. El residuo sólido se coloca en otro recipiente, para poder ser utilizado en la siguiente extracción.

#### **4.3.2. SEGUNDA EXTRACCIÓN**

En la segunda extracción se obtuvieron los metales sorbidos; a los sólidos de la primera extracción se le agregan 80 ml de KF (0.5 M y pH 6.5), y se colocan en agitación a 20-25 rpm, durante 16 horas. Al término y siguiendo el procedimiento de la extracción anterior, se centrifugó a 10,000 rpm por 10 minutos. El



sobrenadante se almacenó a 4 C y los sólidos se recuperaron con 25 ml de agua y se centrifugó a 10,000 rpm por 10 minutos. El agua de lavado se desecha y los sólidos pasan a la siguiente extracción.

#### **4.3.3. TERCERA EXTRACCIÓN**

En esta extracción se obtuvieron los metales unidos a puentes orgánicos; a los sólidos de la segunda extracción se le agregan 80 ml de  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  (0.1 M), y se colocan en agitación a 20-25 rpm, durante 16 horas. Al término y siguiendo el procedimiento de la extracción anterior, se centrifugó a 10,000 rpm por 10 minutos. El sobrenadante se almacenó a 4 C y los sólidos se recuperaron con 25 ml de agua y se centrifugó a 10,000 rpm por 10 minutos. El agua de lavado se desecha y los sólidos pasan a la siguiente extracción.

#### **4.3.4. CUARTA EXTRACCIÓN**

En la cuarta extracción se obtuvieron los metales unidos a puentes de carbono; a los sólidos de la tercera extracción se le agregan 80 ml de EDTA (0.1 M y pH 6.5), y se colocan en agitación de 20-25 rpm, durante 8 horas. Al término y siguiendo el procedimiento de la extracción anterior, se centrifugó a 10,000 rpm por 10 minutos. El sobrenadante se almacenó a 4 C y los sólidos se recuperaron con 25 ml de agua y se centrifugó a 10,000 rpm por 10 minutos. El agua de lavado se desecha y los sólidos pasan a la siguiente extracción.

#### **4.3.5. QUINTA EXTRACCIÓN**

Esta extracción se usó para la obtención de los metales con puentes de carbono (doble extracción). Se utilizaron 80 ml de EDTA (0.1 M y pH 6.5), con agitación durante 8 horas. Posteriormente se centrifugó a 10,000 rpm por 10 minutos. El sobrenadante se almacenó a 4 C y los sólidos se recuperaron con 25 ml de agua. Se centrifugó a 10,000 rpm por 10 min. El sobrenadante se desechó y los sólidos pasaron a la siguiente extracción.



#### **4.3.6. SEXTA EXTRACCIÓN**

En esta extracción se obtuvieron metales en fracción de sulfuros; a los sólidos de la quinta extracción se le agregan 50 ml de  $\text{HNO}_3$  (0.1 M), y se colocan en agitación de 20-25 rpm, durante 16 horas. Al término y siguiendo el procedimiento de la extracción anterior, se centrifugó a 10,000 rpm por 10 minutos. El sobrenadante se almacenó a 4 C y los sólidos se recuperaron con 25 ml de agua y se centrifugó a 10,000 rpm por 10 minutos. El agua de lavado se desecha.

En la figura 4, se muestra el diagrama de extracciones sucesivas, como referencia del procedimiento experimental.



## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

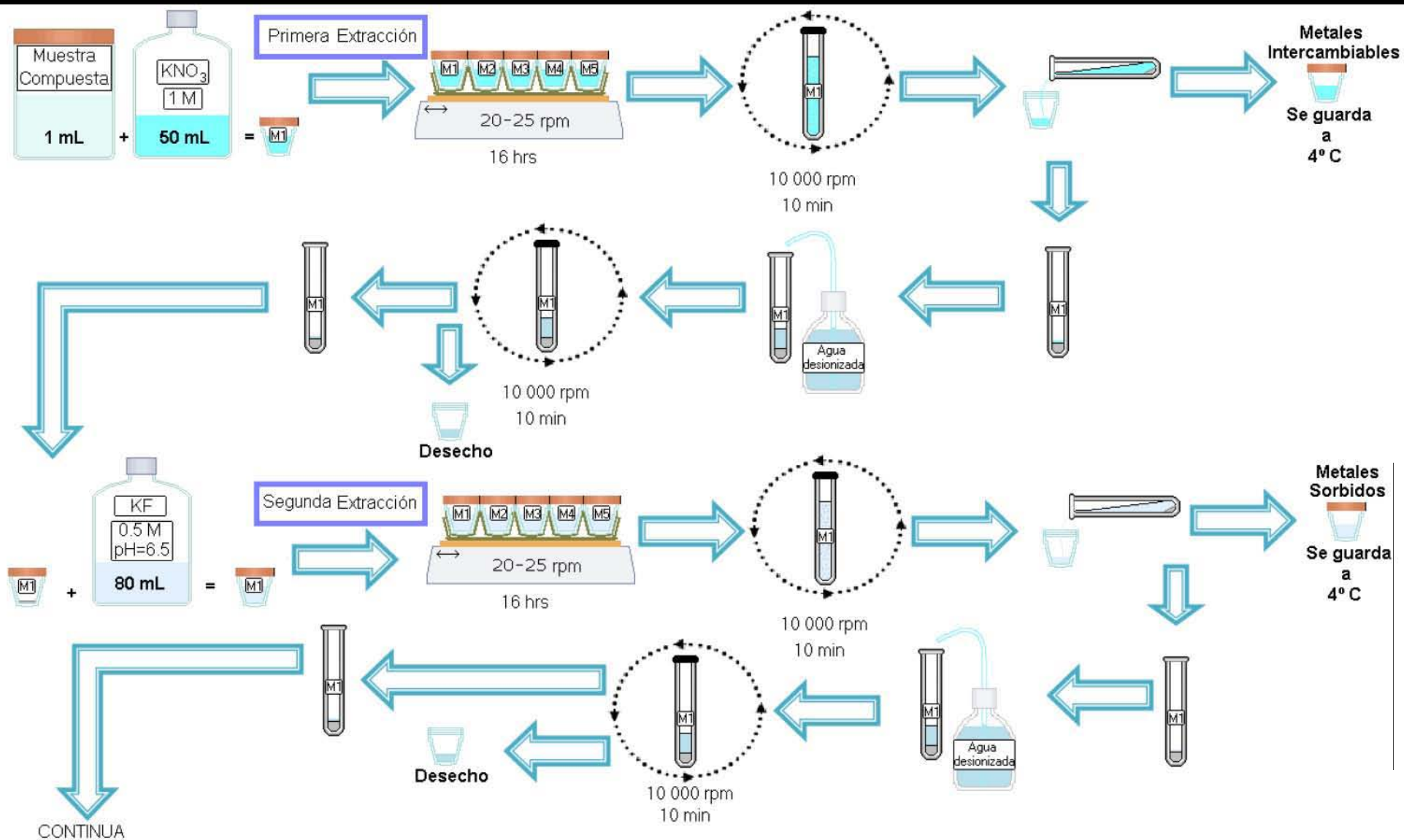


Figura 4. Diagrama de extracciones sucesivas





## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

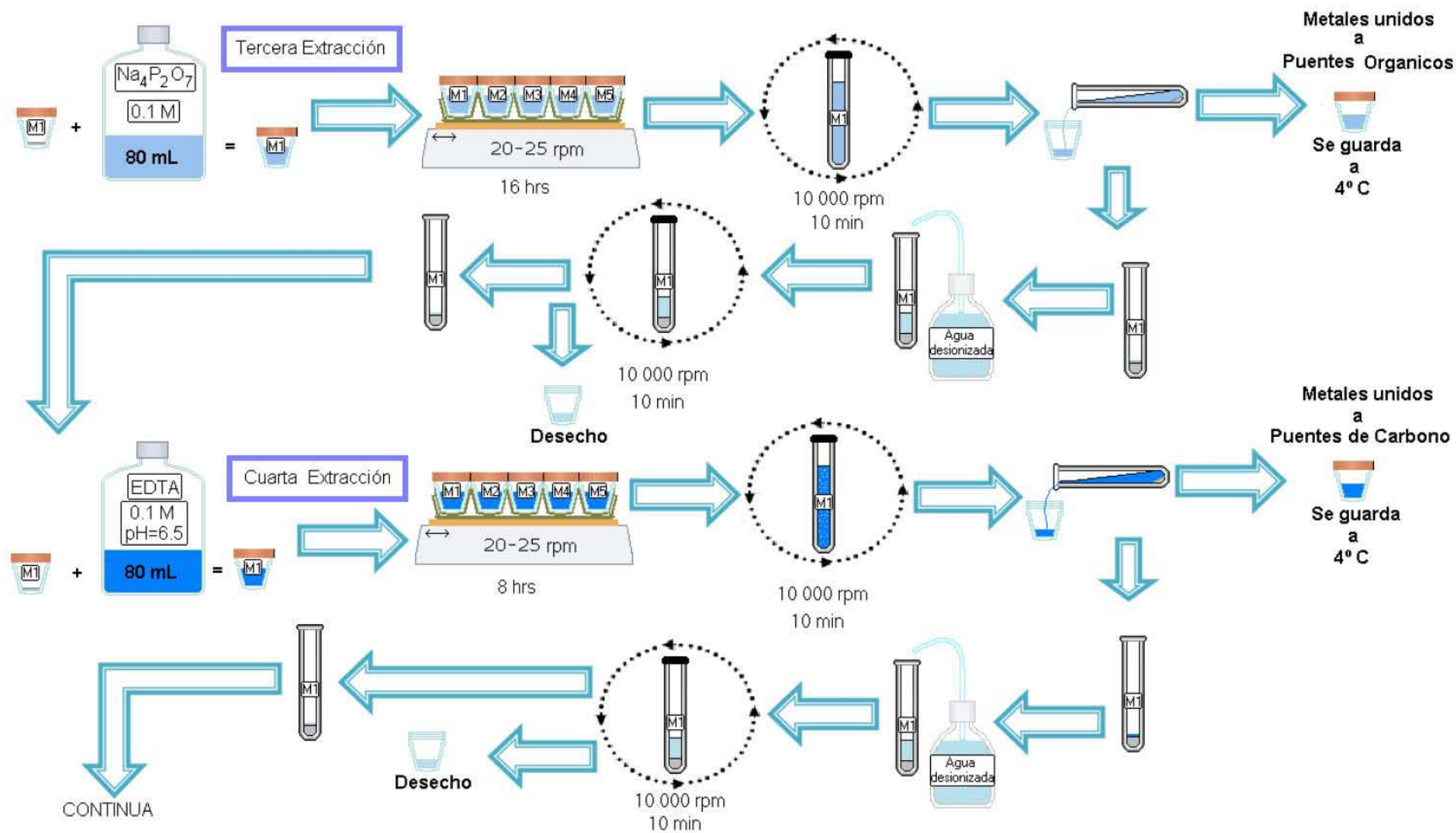


Figura 4. Diagrama de extracciones sucesivas (Continuación)



## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

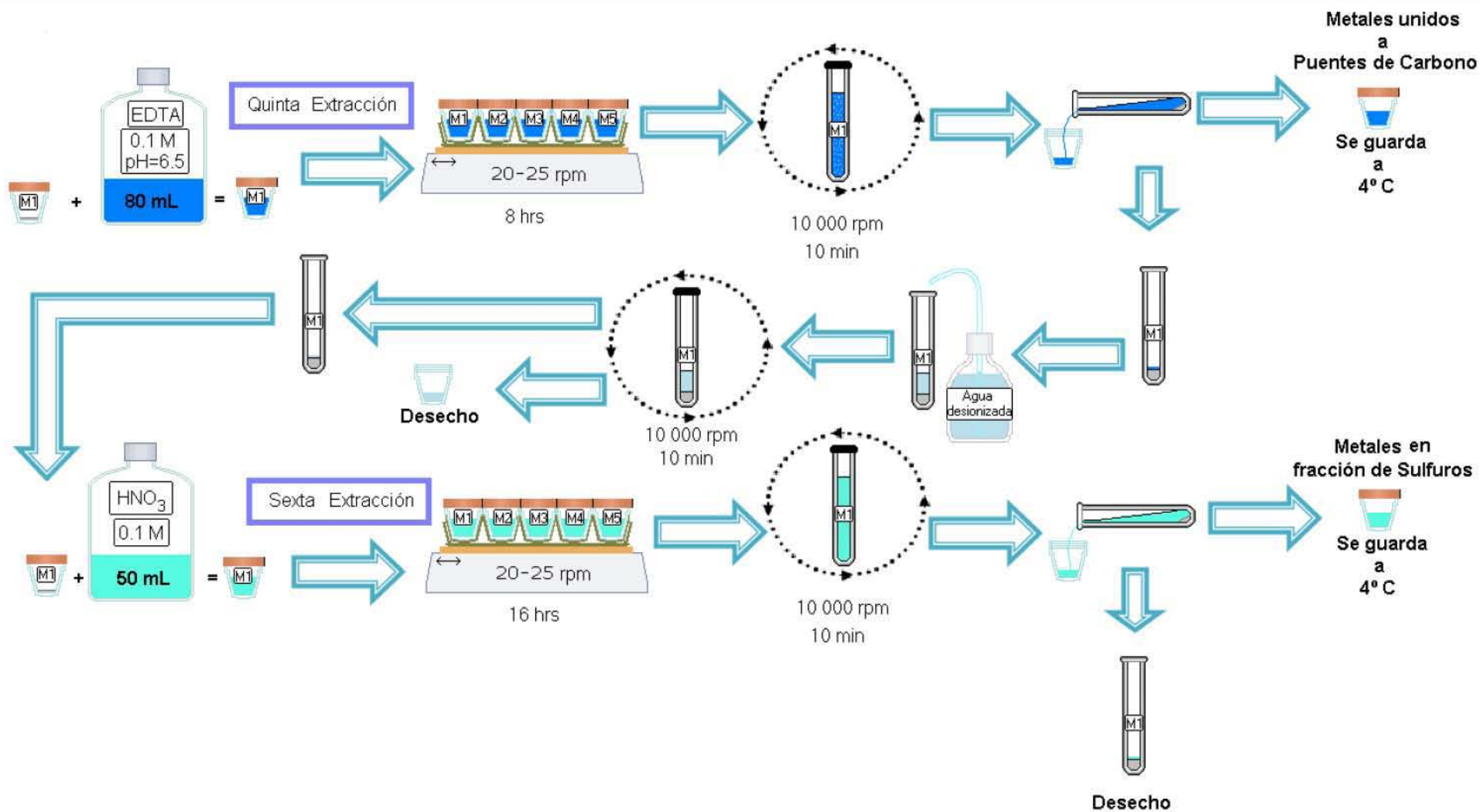


Figura 4. Diagrama de extracciones sucesivas (Continuación)



## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las muestras de lodo, fueron tomadas en la planta de tratamiento de aguas residuales, que se alimenta del Emisor Poniente. El Emisor Poniente es un canal de aguas negras que inicia en el Distrito Federal y corre entubado hasta Cuautitlán Izcalli, en donde a la altura del centro comercial Perinorte se vuelve a cielo abierto, por lo que cruza este municipio, Cuautitlán-México y Teoloyucan, hasta llegar a la Laguna de Zumpango. Recibe las descargas de los ríos Tlalnepantla, San Javier, Cuautitlán y Hondo de Tepetzotlán, los cuales son regulados previamente por las presas Madín, San Juan, las Ruinas, Guadalupe y La Concepción, en el Estado de México.

Se realizó el estudio de la concentración total de Cd en los lodos de desecho, para conocer el grado de contaminación y compararlo posteriormente con el estudio de especiación y su posible daño al ambiente.

Los contenidos totales de cadmio expresados como la suma de fracciones del proceso de extracción química secuencial se muestran en la Tabla 2, en donde se puede observar la variación en la concentración, dependiendo del día de la semana, esto se debe a las descargas que efectúan las diferentes industrias que se encuentran conectadas al Emisor Poniente. Otro aspecto que también contribuye a las altas concentraciones medidas en el reactor, es debido a la fracción de lodos re circulados procedentes del sedimentador secundario, en el que se concentran los metales.

Tabla 2. Concentración de cadmio total en lodos de desecho

MUESTRA	Cd <sub>T</sub> (ppm)
1	0.205
2	0.254
3	0.074
4	0.099
5	0.165



En la Figura 5, se tiene la concentración total de cadmio comparada con el límite máximo permisible (LMP) según la Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, en donde se observa que la cantidad total de cadmio obtenida los primeros dos días es mayor que el límite máximo permisible de la norma, lo que denota un grave problema para el ambiente, si se deposita como acondicionador de suelos o en las descargas de lodo de desecho al drenaje.

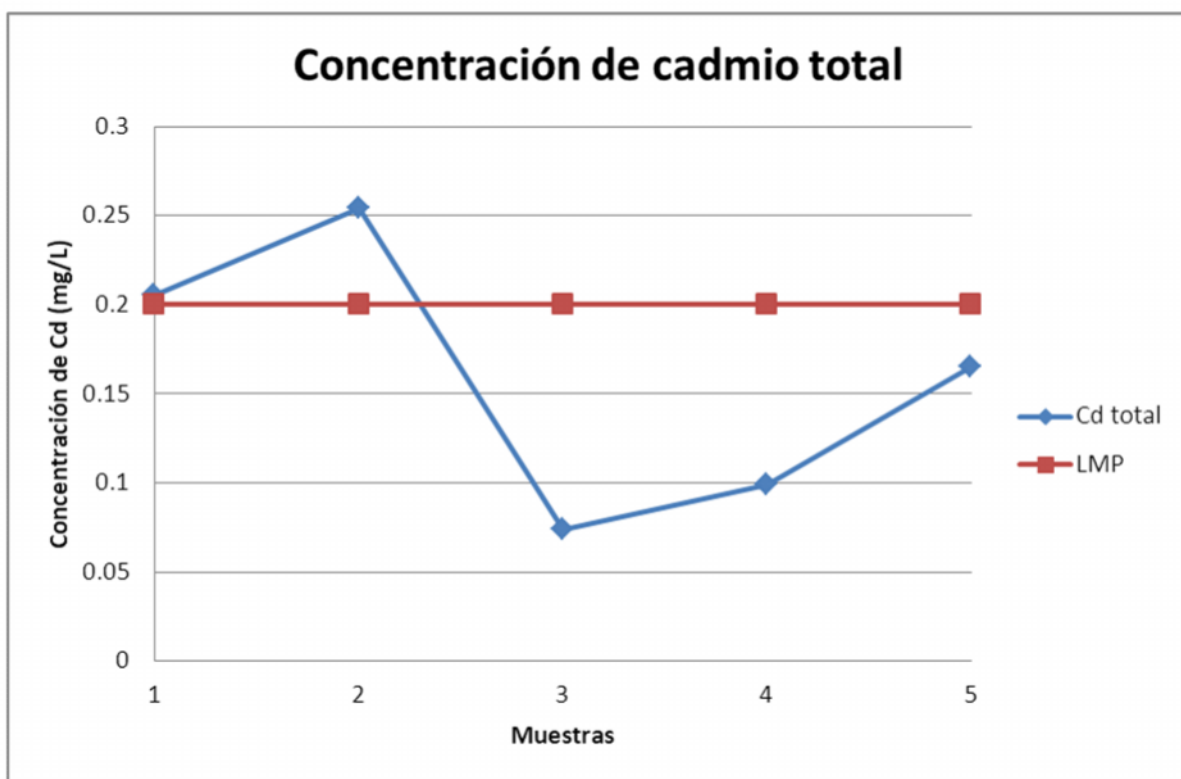


Figura 5. Concentración de cadmio comparada con el LMP de la NOM-001-ECOL-1996

El valor de pH tomado en el tanque de aireación, se muestra en la Figura 6, el efecto que produce el pH en los metales pesados es de vital importancia pues en niveles por debajo de 4.5 se hallan en forma soluble y su toxicidad se incrementa, mientras que a pH básicos, tienden a precipitar disminuyendo su toxicidad. La tabla completa de parámetros medidos en la planta de tratamiento se encuentra en el anexo A.

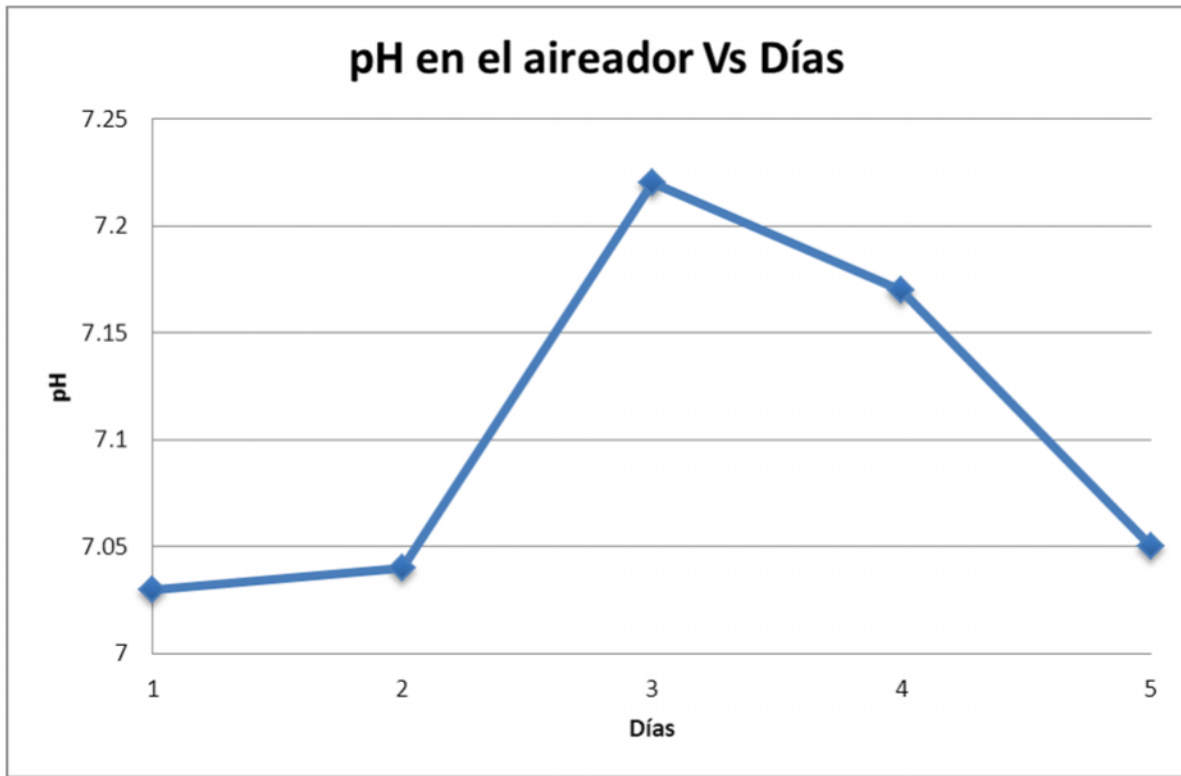


Figura 6. pH medido en el tanque de aireación

### 5.1. CUANTIFICACIÓN DE CADMIO

Para la determinación de los metales en las diferentes fracciones que componen los lodos, se siguió una metodología similar a la cuantificación total de metales en agua.

En la Tabla 3 y en la Figura 7, se observan los resultados obtenidos para cada una de las fracciones correspondientes a la especiación química secuencial.

Tabla 3. Concentración de las fracciones de cadmio en los lodos de desecho

MUESTRA (DIA)	M1	M2	M3	M4	M5	M6
1	0.032	0.038	0.034	0.036	0.037	0.028
2	0.038	0.036	0.052	0.048	0.046	0.034
3	0.016	0	0.015	0.027	0.016	0
4	0.018	0.014	0.023	0.026	0.004	0.014
5	0.027	0.018	0.016	0.035	0.043	0.026

M1= Fracción de metales intercambiables.

M2=Fracción de metales sorbidos



M3=Fracción de metales unidos a puentes orgánicos.

M4=Fracción de metales unidos a puentes de carbono.

M5= Fracción de metales unidos a puentes de carbono (doble extracción)

M6= Fracción de metales unidos a sulfuros

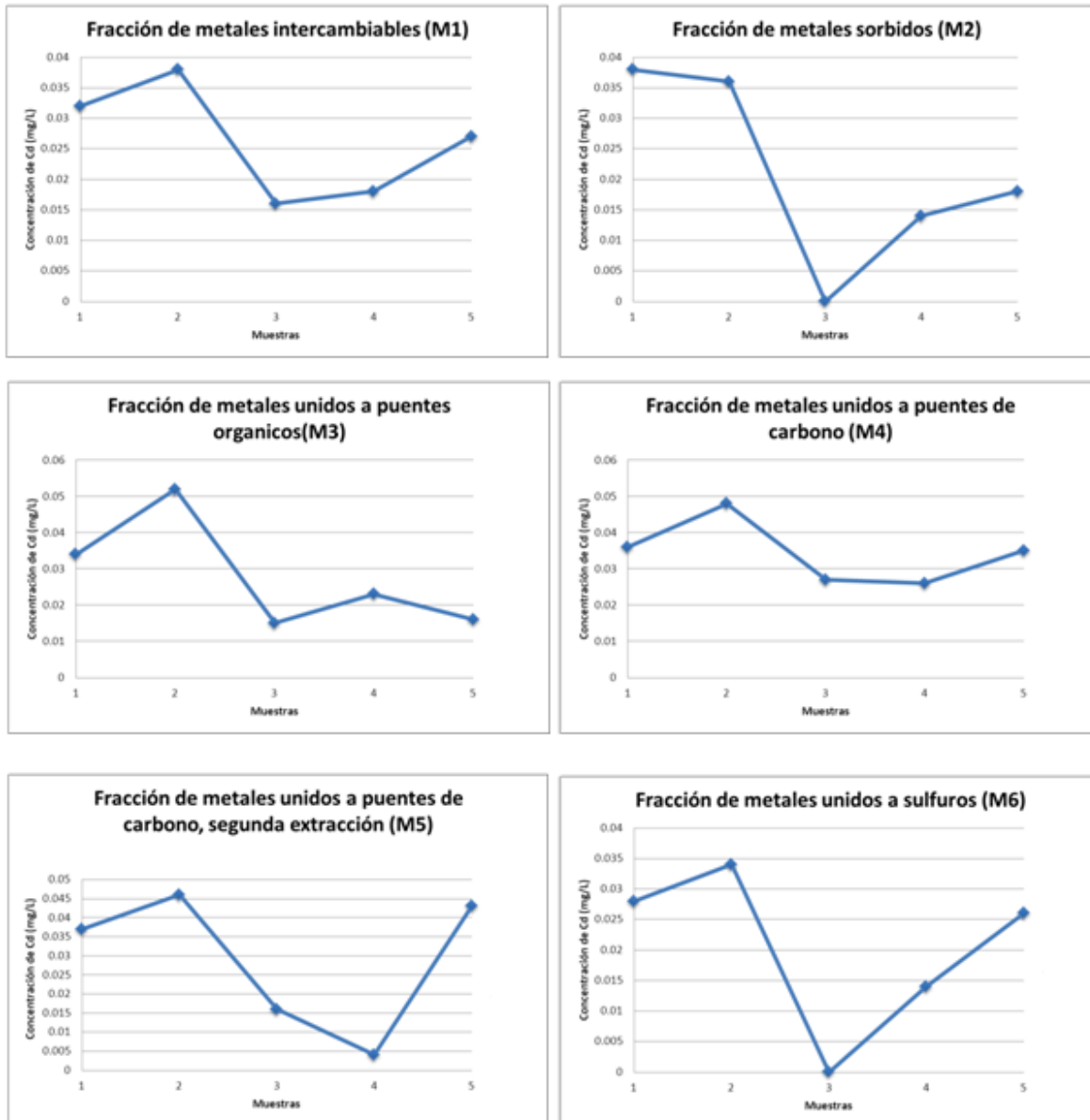


Figura 7. Especiación química de cadmio contenido en los lodos

Al comparar la concentración de cada fracción con el límite máximo permisible, como se muestra en la Figura 8, se observa que cada fracción por sí sola no



rebasa el LMP, y a pesar de que los primeros dos días rebasan la norma de cadmio total. Por medio de la especiación se puede deducir si las formas químicas en las que se encuentra mayormente el cadmio verdaderamente representan un riesgo para el medio ambiente, al ser desechados los lodos al desagüe.

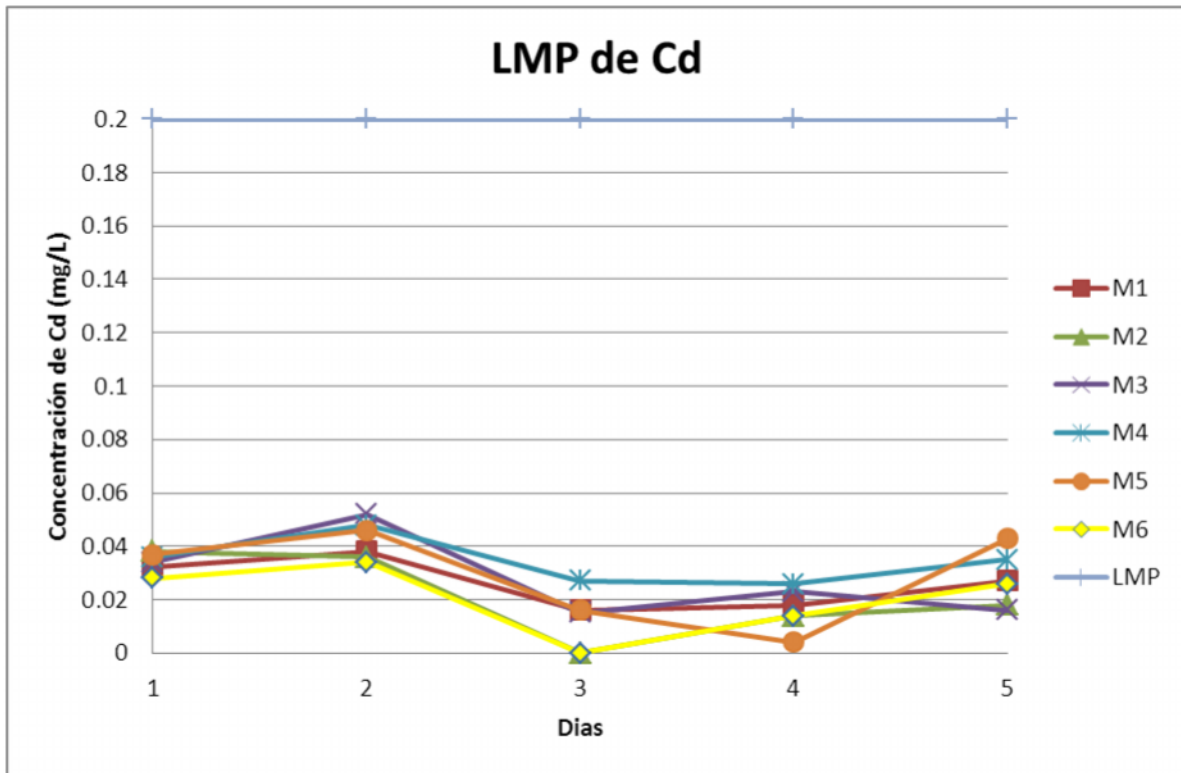


Figura 8. Comparación de la concentración de cadmio en cada fracción de la especiación.

En la Figura 9. Podemos observar el porcentaje de las fracciones de la especiación química secuencial, de cada una de las muestras tomadas de los lodos de retorno, notando que varía considerablemente la fracción predominante a lo largo de la semana. En el primer día tenemos que la fracción de metales sorbidos (M2) es la de mayor concentración, mientras que la fracción de metales unidos a sulfuros (M6) es la que se encuentra en menor concentración; así pues el segundo día la fracción de mayor concentración fue la de metales unidos a puentes orgánicos (M3) y la que menor porcentaje tuvo al igual que el primer día fue la M6; por otro lado el tercer día en que se tomaron las muestras comienza a existir una variación puesto que no se obtienen concentraciones de la M2 ni de la M6, además de que el valor máximo se obtuvo en la fracción de metales unidos a puentes de carbono (M4); al día siguiente la concentración máxima se obtuvo en la M4 y la mínima en la segunda extracción de la fracción de metales unidos a





puentes de carbono (M5); en la última muestra tomada se observa que la máxima concentración se tiene en la M5 y la mínima en la M3.

Es común encontrar metales unidos a carbonatos en concentraciones bajas. En este trabajo de investigación se obtuvieron valores elevados, lo que indica que el cadmio puede estar depositándose en el medio mediante la lixiviación del suelo, además de la gran cantidad de contaminantes depositados a lo largo del Emisor Poniente por las actividades industriales y urbanas.

La fracción de carbonatos es sensible a los cambios de pH, liberando los metales asociados a través del proceso de disolución de carbonatos en valores cercanos o inferiores a 5. Esto hace que las concentraciones puedan ser cambiadas a fracciones móviles unidas a materia orgánica, iones intercambiables y enlaces sorbidos (Stover R.C, 1996)

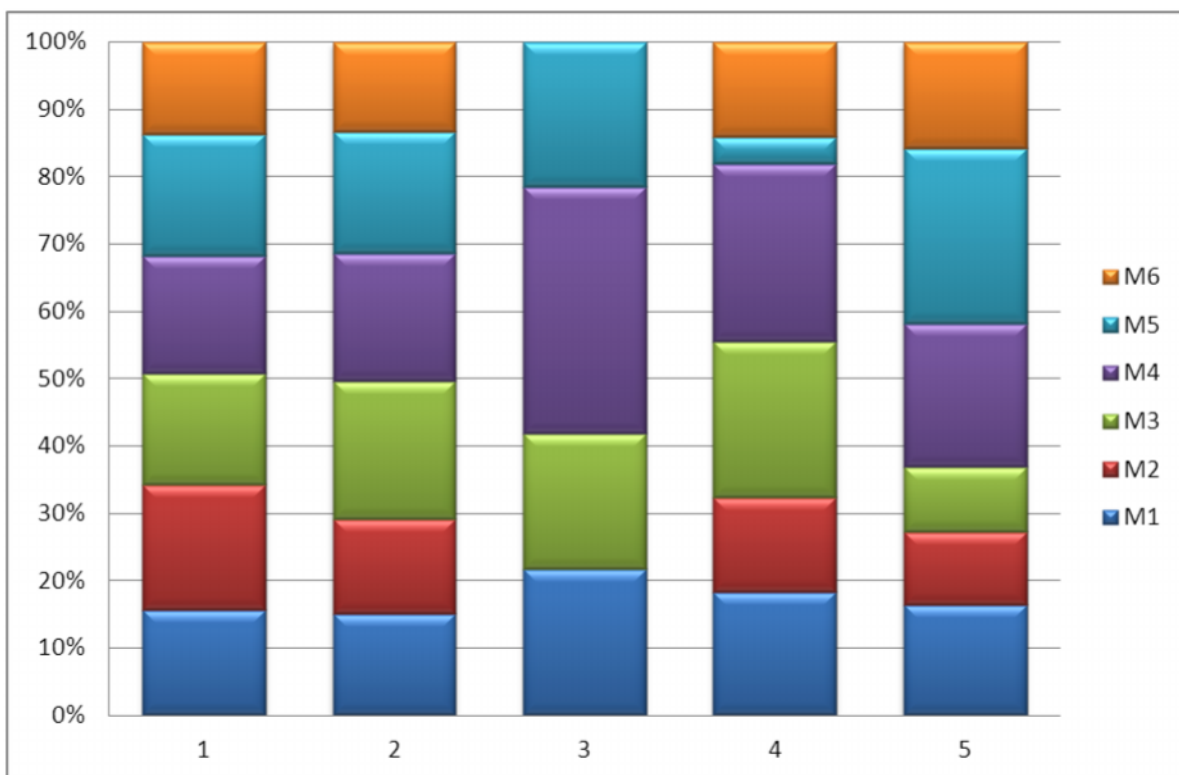


Figura 9. Porcentaje de las fracciones de la especiación química secuencial

En la extracción química secuencial el objetivo es liberar de manera gradual los metales pesados en función de su capacidad de movilización mediante reactivos de agresividad creciente. De esta forma se van liberando fracciones del metal cuya peligrosidad va decreciendo según se avanza a lo largo de la especiación. La





fracción de los metales pesados más fácilmente movilizable y por lo tanto más peligrosos son liberados en primer lugar, mientras que la última fracción, en donde su movilidad es nula, su peligrosidad es escasa. De acuerdo a lo anterior, tenemos que las fracciones móviles en nuestra extracción son la Fracción de metales intercambiables (M1), la Fracción de metales sorbidos (M2) y la Fracción de metales unidos a puentes orgánicos (M3). Mientras que las fracciones inmóviles son la Fracción de metales unidos a puentes de carbono (M4), la Fracción de metales unidos a puentes de carbono (doble extracción) (M5) y la Fracción de metales unidos a sulfuros (M6).

De acuerdo al promedio semanal de las muestras, en la Figura 10, se puede observar de una mejor manera los porcentajes en que se encuentran las diferentes fracciones estudiadas, donde vemos que el 56 % pertenece a las fracciones Inmóviles y el resto a las fracciones móviles. Esto indica que aunque el Cadmio se encuentra en altas concentraciones sobre el límite máximo permisible de la norma este metal en su mayoría se encuentra inmóvil, retenido en redes cristalinas, y permite una poca movilización en el medio ambiente. Sin embargo, el 44% aun es un valor elevado, el cual se debe tomar en cuenta, pues éste puede alterarse si se cambian drásticamente las condiciones en las que se encuentra (pH, temperatura, etc.).

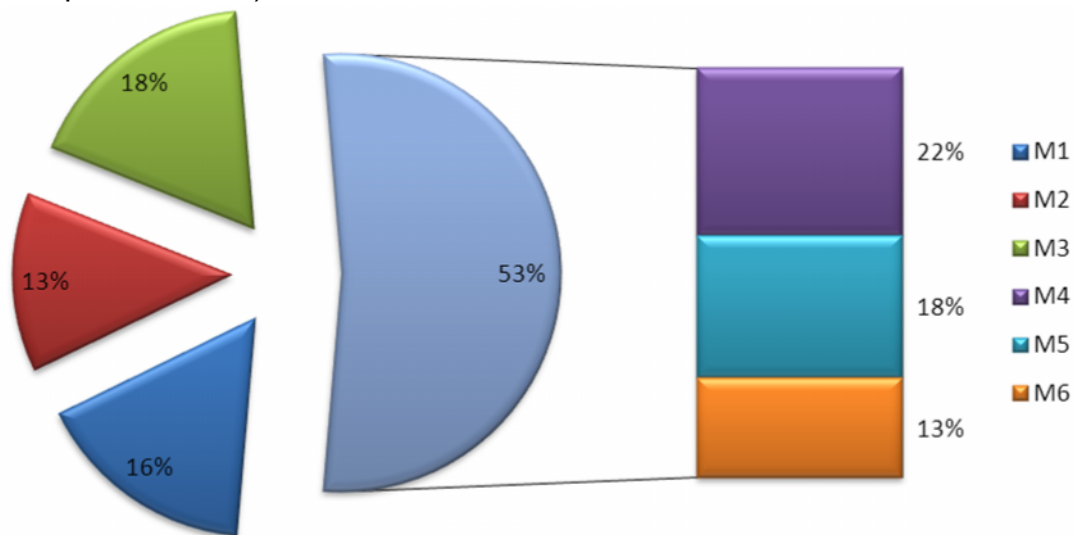


Figura 10. Porcentaje promedio semanal de las fracciones de la especiación química secuencial.



Basándonos en el contenido total promedio en los lodos residuales el orden de seguimiento del contenido de cadmio en sus diferentes formas químicas se presenta de la siguiente forma.

$$\text{Cd} = \text{M4} > \text{M5} > \text{M3} > \text{M1} > \text{M2} > \text{M6}$$

Esta forma de representar los resultados nos da un resumen del estudio de especiación realizado y nos deja ver la forma en que está caracterizada la contaminación por cadmio en el emisor poniente.

Podemos comparar estos resultados con otros análisis hechos a aguas y lodos residuales de municipios vecinos, tal es el caso de F. M. Melo Sánchez et. Al., en donde mediante espectroscopia de absorción atómica, se determinó la cantidad de algunos metales pesados en aguas residuales del río San Javier, encontrando que en mayor cantidad se tiene al Cr y Cu, sin detectar cadmio. Este estudio se llevó a cabo a finales de 1999 y principios del 2000. Dado que este río forma parte del emisor poniente, la concentración obtenida de cadmio en este año, puede deberse a la contaminación que aguas pluviales llevan al drenaje.

Por otro lado, el estudio realizado por Cruz., en el 2005, denota una gran cantidad de Cd, especialmente en las fracciones movibles que se desechan al drenaje, en el municipio de Cuautitlán. Otro caso en el que el 58% del cadmio cuantificado, se encuentra en las fracciones movibles se presentó en la planta de tratamiento de aguas residuales ubicada en el municipio de Naucalpan en el estudio realizado por Enríquez A. R. en el 2008.



## 6. CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación se logró la determinación de la presencia de cadmio en los lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales que se alimenta del Emisor Poniente; así como la concentración e identificación de las formas químicas en que el cadmio se presenta. Se encontró que la concentración total de cadmio, rebasa el límite máximo permisible de la NOM-001-ECOL-1996, posiblemente debido a que una parte de los lodos se re circula al tanque de aireación, provocando la concentración de este metal; además de la alta actividad industrial en las áreas cercanas que descargan sus desechos en el Emisor Poniente.

Por otro lado, mediante la especiación química se logró identificar que la forma predominante pertenece a la fracción de metales unidos a puentes de carbono (M4), la cual forma parte de las fracciones inmóviles. Sin embargo el cadmio se presentó también en la fracción de metales intercambiables, fracción de metales sorbidos y en la fracción de metales unidos a puentes orgánicos, lo que nos indica que este metal se puede movilizar en el medio ambiente, pudiendo ser absorbido por plantas y animales, en caso de ser utilizado como acondicionador de suelo.

Comparando los porcentajes de cada fracción, destaca que las fracciones inmóviles en las que se encuentra el cadmio representan más del 50% de la muestra, demostrando así que, al someter estos lodos a un tratamiento adecuado, se pueden utilizar como mejoradores de suelo, sin riesgo a que se presente una contaminación en el medio ambiente por cadmio.

Por otro lado, una limitante para la disposición y aprovechamiento de este lodo, es que en ocasiones, se rebasa el límite establecido por la norma, por lo que se recomienda se tome en cuenta un programa adecuado de pre-tratamiento, con el fin de disminuir la cantidad de metales pesados, ya sea para descargar nuevamente estos lodos al drenaje o para permitir su aplicación en diferentes áreas.



## 7. RECOMENDACIONES

Tomando en cuenta los resultados de este estudio, se recomienda realizar un análisis detallado de especiación de metales pesados en estos lodos de desecho, ya que para determinar el manejo adecuado y la disposición de los lodos es necesario tomar en cuenta los valores máximos permisibles en las normas oficiales mexicanas; caracterizar adecuadamente los lodos, así como establecer un tratamiento adecuado para su aplicación futura, ya sea como relleno sanitario, como fertilizante o en vertido directo.

Es muy importante mejorar la calidad de los lodos generados ya que en la planta analizada se pueden obtener varias toneladas de lodos al día, por esto hay que darles un manejo adecuado a estos lodos ya que pueden representar un gran beneficio para la agricultura o la restauración de suelos. Actualmente estos lodos son desaprovechados y son devueltos en su mayor parte al Emisor Poniente.

Para elegir el tren de tratamiento correcto, el lodo se debe caracterizar para conocer sus propiedades químicas, físicas y biológicas; debido a que una fracción importante de las sustancias contaminantes que se separa en el proceso de tratamiento del agua residual se encuentra en estos lodos. Los procedimientos para tratar los lodos varían según la fuente y el tipo de aguas de las que se derivan, de acuerdo a los datos obtenidos y proporcionados por los operadores de la planta, se propone darle un tratamiento primario al influente, para favorecer la precipitación y separación de los metales disueltos en las fracciones móviles, con la finalidad de disminuir su concentración en los lodos; a los lodos darles una estabilización anaerobia, realizar el espesamiento del lodo y dado que se cuenta con el terreno, secar el lodo mediante lechos de secado, para su futuro aprovechamiento.

Es conveniente reiterar que los lodos residuales no deben desecharse sin un periodo de depuración previa.



## 8. REFERENCIAS

AYALA, F.J. Olcina J. 2002. Riesgos Naturales. Ariel Ciencia.

BARCELO I., et. Al. Modelación de especies químicas disueltas de Fe y Pb en el agua de la presa José Antonio Álzate en estado de México. UAM

BATLEY, G. E., and GARDNER D. 1977. Sampling and storage of natural waters for trace metal analysis. W. R. vol. 11

CASTAÑE P. M. et. Al. 2003. Influencia de la especiación de los metales pesados en medio acuático como determinante de su toxicidad. Revista toxicológica

CASTILLO, I, Problemas de calidad de Agua en México. Instituto nacional de Ecología.

CHICON L. Especiación de metales pesados en lodos de aguas residuales de origen urbano y aplicación de lodos digeridos como mejoradores de suelos. Universidad de Málaga.

CUBILLOS A. Parámetros y características de las aguas residuales. División de protección de la salud ambiental.

DE LA ROSA P., D. A., et. Al. 2007. Electroremediación de suelos contaminados, una revisión técnica para su aplicación en campo. Revista internacional de contaminación ambiental.

ENRÍQUEZ, R. 2008. Especiación de metales pesados, en lodos de aguas residuales de origen urbano. UNAM

ESCALAS A. 2006. Tecnologías y usos de las aguas residuales en México. UASLP

FERGUSSON, J. F., 1990. The heavy Elements. Chemistry, Environmental Impact and Health Effects. Pergamon Press.

FERNÁNDEZ, A.J., 1999. Especiación química y física de metales en la materia particulada atmosférica: aplicación al estudio de la contaminación ambiental de la ciudad de Sevilla. Universidad de Sevilla



- FRIESE, K.C., PRIVAN, V. 1995. Analysis of silicon nitride powders for Al, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na and Zn by slurry-sampling electro thermal atomic absorption spectrometry.
- GALVÃO, L. A. 1987. Serie vigilancia 4. CADMIO. Centro panamericano de ecología humana y salud, organización panamericana de la salud, OMS.
- GARCÍA, I. Dorronsoro, C. Contaminación por metales pesados. Departamento de Edafología, Universidad de Granada, España.
- GONZÁLEZ, E., TORNERO M. A., et al. 2009 Concentración total y especiación de metales pesados en biosólidos de origen urbano
- HLAVAY J., PROHASKA T., WEISZ M., WENZAL W. W. y STINGEDER G. J. 2004. Determination of trace elements bound to soil and sediment fractions.
- INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA. 2008. Metales pesados. Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana y Regional. Investigación sobre Sustancias Químicas y Riesgos Ecotoxicológicos.
- JARUP L. 2003. Hazards of heavy metal contamination. British Medical Bulletin 68.
- KOSSIO Acuña, Luis Alfonso. Tratamiento de Aguas y lodos de desechos Industriales.
- LAKE D. L., KIRK P. W. 1988. Heavy metal solids association in sewage sludges. W. R. vol. 23
- LÓPEZ J., et. Al. 2002. Extracciones químicas secuenciales de metales pesados. Aplicación en ciencias geológicas. Universidad de Zaragoza.
- LOMELÍ M., TAMAYO R. 2010. <http://www.sagan-gea.org/hojared/CAgua.html>
- MANAHAM, S. 1998. Environmental Chemistry. Stanley. Edf
- MAQUEDA, A. P. 2003. Fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados. Universidad de las Américas puebla.



MARTÍNEZ, G. et. Al. 2001. Especiación de metales pesados (Cd, Zn, Cu y Cr) en el material en suspensión de la pluma del río Manzanares, Venezuela. INTERCIENCIA.

MELO Sánchez, F. M.; MARQUES Estrada, C.; JUÁREZ J., M.; MARTÍNEZ M., F. J.; MIRANDA Reyes, P.; ESQUIVEL Ruiz, L. F. 2000. Análisis de metales pesados en las aguas residuales del río san Javier y repercusión en la salud e impacto ambiental.

MENDEVIL Reynoso, Jenny. Riesgos a la Salud en el manejo de lodos biológicos generados en el tratamiento de aguas residuales.

NOYOLA, Adalberto; CABIROL, Nathalie; CISNEROS, Margarita; RUBIO, Luis Antonio y TINAJERO, Antonio. 2007. Digestión anaerobia termófila de lodos de desecho para la Producción de biosólidos clase A.

OLMOS, J, Gavilán, et al. Especiación y Cuantificación de mercurio en suelos contaminados con residuos de Minería, UNAM.

ONOFRE, M.J. 2005. Especiación de Metales Pesados y comportamiento Microbiológico ante la presencia del plomo en lodos Activados, UNAM.

PALACIOS T. J. 2007. Actividad peroxidasa, antimicrobiana y hemolítica de complejos metal-ácido meclofenámico. Universidad de las Américas Puebla.

RODRÍGUEZ R. A., et. Al. 2007. Distribución química de plomo, cromo y cadmio en lodos cloacales y sus cenizas. Universidad nacional de san juan argentina.

ROJAS, R, 2002. Sistemas de tratamiento de aguas residuales. Gestión integral de tratamiento de aguas residuales.

ROSAS H. 2001. Estudio de la contaminación por metales pesados en la Cuenca del Llobregat.

SARABIA, R. 2002. Toxicidad y acumulación de cadmio en poblaciones de diferentes especies de Artemia. Universidad de Valencia.

SCHEINER, B. J., DOYLE, F. M. & KAWATRA, S. K. (Eds.) 1989. Biotechnology in minerals and metal processing. Society of Mining Engineers Inc., Littleton (CO).



SCHRAMMEL, P, WENDLER, I, ANGERER, J., 1996. The determination of metals (antimony, bismuth, lead, cadmium, mercury, palladium, platinum, tellurium, thallium, tin and tungsten) in urine samples by inductively coupled plasma-mass spectrometry.

SEMARNAT. 2008. Estadísticas del agua en México 2008.

SEMARNAT. 2009. Atlas del agua en México 2009.

SEDUE. 1990. Control de contaminación en México.

SOTO, Eduardo; MIRANDA, Rosa del C; SOSA, César A y LOREDO, José A. 2006. Optimización del Proceso de Remoción de Metales Pesados de Agua Residual de la Industria Galvánica por Precipitación Química.

STERRITT, R. M. and LESTER, J. N. 1980. Atomic absorption spectrophotometric analysis of the metal content of waste water samples. *Environmental technology*, 1:9, 402-417.

STOVER R. C., L. E. SOMMERS, y D. J. SIRVIERA. 1996. Evaluation of metals in waster sludge. *Journal WPCF*.

SUESS, M. 1982. Examination of water for pollution control. Volume 3. Biological, Bacteriological and virological examination. World health organization and Pergamon Press. Oxford.

TRACK F.M., VERLOO M.G. 1995. Chemical speciation and fractionation in soil and sediment heavy metal analysis: a review. *International journal of environmental analytical chemistry* vol. 59

URDOVÁ, Eva; VAVRUKOVÁ, Lenka; SUCHÁNEK, Miloslav; BALDRIAN, Petr and GABRIEL Jí. 2004. ICP-MS Determination of heavy metals in submerged cultures of Word-rotting fungi *Talanta*

VILLA SEÑOR, Gándara Guadalupe. Tratamiento y disposición de los lodos producidos en las plantas de tratamiento de aguas residuales.





## APÉNDICE A. LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Principales giros industriales responsables de las mayores cargas de aguas residuales en México	pág. 11
Tabla 2. Concentración de cadmio total en lodos de desecho	pág. 79
Tabla 3. Concentración de las fracciones de cadmio en lodos de desecho	pág. 81



## APÉNDICE B. LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo biogeoquímico del cadmio	pág. 40
Figura 2. Transporte de cadmio en el suelo	pág. 44
Figura 3. Diagrama de flujo de la planta de tratamiento estudiada	pág. 63
Figura 4. Diagrama de extracciones sucesivas	pág. 76
Figura 5. Concentración de cadmio con el LMP de la NOM-001-ECOL-1996	pág. 80
Figura 6. pH tomado en el tanque de aireación	pág. 81
Figura 7. Especiación química de cadmio contenido en los lodos	pág. 82
Figura 8. Comparación de la concentración de cadmio en cada fracción de la especiación	pág. 83
Figura 9. Porcentaje de las fracciones de la especiación química secuencial	pág. 84
Figura 10. Porcentaje promedio semanal de las fracciones de la especiación química secuencial.	pág. 85



## ANEXO A. Parámetros medidos en la planta de tratamiento.

DIA	MUESTRA	pH	TEMPERATURA
1	INFLUENTE	7.34	21.98
	SEDIMENTADOR PRIMARIO	7.27	19.85
	TANQUE DE AIREACION	7.03	19.56
	SEDIMENTADOR SECUNDARIO	7.14	20.12
2	INFLUENTE	7.3	22.8
	SEDIMENTADOR PRIMARIO	7.31	20.8
	TANQUE DE AIREACION	7.04	20.66
	SEDIMENTADOR SECUNDARIO	7.35	20.60
3	INFLUENTE	7.23	22.68
	SEDIMENTADOR PRIMARIO	7.35	21.3
	TANQUE DE AIREACION	7.22	21.2
	SEDIMENTADOR SECUNDARIO	7.52	21.11
4	INFLUENTE	7.20	22
	SEDIMENTADOR PRIMARIO	7.24	21.3
	TANQUE DE AIREACION	7.17	21.14
	SEDIMENTADOR SECUNDARIO	7.53	21.37
5	INFLUENTE	7.24	23
	SEDIMENTADOR PRIMARIO	7.15	21.6
	TANQUE DE AIREACION	7.05	21.3
	SEDIMENTADOR SECUNDARIO	7.35	21.48