



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN**

**“ESPECIACION DE METALES PESADOS, EN
LODOS DE AGUAS RESIDUALES DE ORIGEN
URBANO”**

**TESIS
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
LICENCIADO EN QUIMICA INDUSTRIAL**

**PRESENTA
RICARDO ENRIQUEZ ARENAS**

ASESOR: MC. MARIA DE JESUS CRUZ ONOFRE

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MÉXICO. 2008



Universidad Nacional
Autónoma de México



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

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

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



DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
P R E S E N T E

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 :

Espedición de Metales Pesados, en Lodos de Aguas Residuales
de Origen Urbano

que presenta el pasante: Ricardo Enriquez Arenas
con número de cuenta: 30027428-4 para obtener el título de :
Licenciado en Químico Industrial

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

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 11 de Febrero de 2002.

PRESIDENTE Dr. Juan Manuel Aceves Hernández

VOCAL MC. Ruth Martínez Reséndiz

SECRETARIO MC. María de Jesús Cruz Onofre

PRIMER SUPLENTE Dra. María Inés Nicolás Vázquez

SEGUNDO SUPLENTE Ql. Griselda Ávila Enríquez

[Handwritten signatures and initials over the list of names]



*A mí Madre
María*





AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme fortaleza para terminar mi carrera.

A mí querida madre María, que siempre ha estado junto a mí en los momentos más difíciles de mi vida.

A mis hermanos Eliseo y Oscar, a mi hermana Ana, quienes siempre me apoyaron en mis estudios.

A la **Universidad Nacional Autónoma de México**, donde curse todos mis años de preparatoria y universidad.

A **Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán** y su excelente plantilla de maestros, por darme las herramientas de una profesión.

A mi asesora de Tesis, **MC. María de Jesús Cruz Onofre** quien desde el día que la conocí siempre me brindo su apoyo y confianza para la realización del presente trabajo, gracias maestra.

A mis sinodales que revisaron mi trabajo de tesis.

Al Organismo de Agua Potable y Alcantarillado de Naucalpan (OAPAS), por permitirme hacer mi estudio en la planta de tratamiento de aguas de Naucalpan.

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 estudio.

Al Laboratorio de Investigación en Calidad Ambiental del Tecnológico de Monterrey Campus Estado de México, por permitirme realizar las determinaciones analíticas de este trabajo en su laboratorio.

A mis Compañeros y amigos de la FES-C, con quién conviví todos los años de Universidad.

INDICE GENERAL

Indice General.....	i
Resumen.....	ii
Capítulo I. Introducción.....	1
Capítulo II. Justificación.....	3
Capítulo III. Objetivos.....	5
3.1 Objetivo General.....	5
3.2 Objetivos Particulares.....	5
Capítulo IV. Antecedentes.....	6
4.1 Contaminación del Ambiente.....	6
4.2 Contaminación del Agua.....	6
4.3 Parámetros Físicos de las Aguas Residuales.....	7
4.3.1 Temperatura.....	7
4.3.2 Color y Olor.....	7
4.3.3 Conductividad.....	8
4.3.4 Sólidos y los Sólidos Totales.....	8
4.4 Parámetros Químicos de las Aguas Residuales.....	8
4.4.1 Oxígeno y Oxígeno Disuelto.....	9
4.4.2 Demanda Bioquímica de Oxígeno.....	9
4.4.3 Concentraciones de Iones Hidrógeno o pH.....	9
4.5 Contaminación por Metales Pesados.....	10
4.6 Metales Pesados y Aguas Residuales.....	11
4.7 Especiación en el ambiente.....	12
4.8 Especiación de Metales pesados.....	12
4.8.1 Metales en forma de Iones Intercambiables.....	13
4.8.2 Metales enlazados a Carbonatos.....	14
4.8.3 Metales Sorbidos.....	14
4.8.4 Metales Asociados a Óxidos de Hierro y Manganeso.....	14
4.8.5 Metal enlazado a la Materia Orgánica.....	15
4.8.6 Metales Unidos a Sulfuros.....	15
4.8.7 Fase Residual o Litogénica.....	15
4.9 Sistemas de Lodos Activados.....	15
4.9.1 Usos de los Lodos.....	16
4.9.2 Manejo en México de Lodos en Plantas de Tratamiento..	18
4.9.3 Análisis de Lodos.....	20
4.10 Contaminación por Rellenos Sanitarios.....	21
4.11 Especificaciones.....	23

Capítulo V. Características Químicas de Metales Pesados.....	25
5.1 Cromo.....	26
5.1.1 Usos.....	26
5.1.2 Contaminación de Cromo en el Medio Ambiente.....	27
5.2 Plomo.....	28
5.2.1 Usos.....	29
5.2.2 Contaminación de Plomo en el Medio Ambiente.....	29
5.3 Cadmio.....	31
5.3.1 Usos.....	31
5.3.2 Contaminación de Cadmio en Medio Ambiente.....	32
5.4 Arsénico.....	32
5.4.1 Usos.....	33
5.4.2 Contaminación de Arsénico en el Medio Ambiente.....	33
5.5 Cobre.....	34
5.5.1 Usos.....	34
5.5.2 Contaminación de Cobre en el Medio Ambiente.....	34
5.6 Zinc.....	34
5.6.1 Usos.....	35
5.6.2 Contaminación de Zinc en el Medio Ambiente.....	35
5.7 Níquel.....	35
5.7.1 Usos.....	36
5.7.2 Contaminación de Níquel en el Medio Ambiente.....	36
Capítulo VI. Origen de los Metales Pesados en las Aguas Residuales.....	37
6.1 Fuentes, Agentes y Vías de Contaminación.....	37
6.2 Orígenes de Metales en los Sistemas Acuáticos.....	38
6.2.1 Origen Natural o Litogénico.....	38
6.2.2 Origen Antropogénico.....	39
6.2.2.1 Origen Industrial.....	39
6.2.2.2 Origen Agropecuario.....	39
6.2.2.3 Origen Doméstico.....	40
6.3 Vías principales de entrada de Metales en los Sistemas Acuáticos.....	41
6.3.1 La Vía Atmosférica.....	41
6.3.2 La Vía Terrestre.....	41
6.3.3 La Vía Directa de entrada.....	41
Capítulo VII. Movilización de Metales Pesados en el Medio Ambiente.....	42
7.1 Impacto Ambiental.....	42
7.2 Mecanismos de Movilización de Metales Pesados.....	43
7.3 Movilización de Metales Pesados en el Suelo.....	44
7.4 Interacción de los Metales Pesados en el Suelo y los Sedimentos.....	45

7.5	Absorción de Metales Pesados por las Plantas.....	46
7.6	Interacciones entre Metales y Organismos Acuáticos.....	46
7.7	Factores que Afectan la Movilidad de los Metales.....	48
7.7.1	Factores Abióticos Inherentes al Metal.....	48
7.7.2	Factores Fisicoquímicos Ambientales.....	48
7.7.2.1	Acidificación.....	48
7.7.2.2	Condiciones redox.....	49
7.7.2.3	Materia Orgánica.....	49
7.7.2.4	Temperatura.....	49
7.7.2.5	Composición de Iones Inorgánicos.....	50
7.8	Factores Bióticos que Afectan la Movilización de Metales Pesados....	50
7.8.1	Biodisponibilidad.....	51
7.8.2	Biolixiviación.....	51
7.8.3	Microorganismos y Metales Pesados.....	52
7.8.3.1	Biosorción.....	53
7.8.3.2	Bioacumulación de Metales Pesados.....	53
7.8.3.3	Biomineralización.....	53
7.8.3.4	Biotransformación.....	54
7.8.3.5	Quimiosorción.....	54
Capítulo VIII. Descripción de la Zona Estudiada.....		55
8.1	Municipio de Naucalpan.....	55
8.1.1	Economía	56
8.1.2	Hidrografía.....	57
8.2	Río de los Remedios.....	57
8.3	El Gran Canal de Desagüe.....	60
8.4	Partes de la Planta de Tratamiento de Aguas Muestreada.....	60
8.4.1	Cárcamo de Bombeo.....	60
8.4.2	Desarenador.....	61
8.4.3	Aireación.....	62
8.4.4	Clarificador o Filtro Biológico.....	63
8.4.5	Proceso de Lodos Activados que se Producen en la Planta	64
8.4.6	Desinfección.....	65
8.4.7	Almacenado y Distribución.....	66
Capítulo IX. Metodología Experimental.....		68
9.1	Toma de Muestras y Transporte.....	68
9.2	Procedimiento Experimental.....	69
9.2.1	Reactivos.....	69
9.2.2	Material.....	69
9.2.3	Equipo.....	70
9.3	Extracciones Sucesivas.....	70

9.3.1 Primera Extracción.....	70
9.3.2 Segunda Extracción.....	71
9.3.3 Tercera Extracción.....	71
9.3.4 Cuarta Extracción.....	71
9.3.5 Quinta Extracción.....	71
9.3.6 Sexta Extracción.....	72
9.3.7 Residuos Finales.....	72
Capítulo X. Resultados y Discusión.....	74
10.1 Determinación de Plomo y Cromo.....	74
10.1.1 Cromo	75
10.1.2 Plomo.....	76
10.2 Metales Pesados en Baja Concentración Zn, Cd, Cu, As y Ni.....	77
10.3 Análisis de Especiación de los metales pesados.....	80
10.3.1 Especiación de Cromo y Plomo.....	81
10.3.2 Especiación de Cromo.....	82
10.3.3 Especiación de Plomo.....	83
10.3.4 Análisis de Zn, Cd, Cu, Ni y As.....	86
10.4 Evaluación de los Metales Pesados.....	89
10.5 Parámetros Físicoquímicos de las Aguas Analizadas.....	90
10.5.1 Temperatura.....	91
10.5.2 pH.....	92
10.5.3 Conductividad.....	92
10.5.4 Sólidos Suspendedos Totales y Sedimentables.....	93
Capítulo XI. Conclusiones y Recomendaciones.....	94
11.1 Conclusiones.....	94
11.2 Recomendaciones.....	95
Referencias.....	97
ANEXOS.....	iii
Anexos 1. Afluente Inicial (Diciembre)	
Anexos 2. Efluente Final (Diciembre)	
Anexos 3. Afluente Inicial (Enero)	
Anexos 4. Efluente Final (Enero)	
Anexos 5. Diagrama de la Planta de Tratamiento de Aguas	



RESUMEN

En México, el estudio de especiación de metales pesados es un tema de actualidad, debido a que estos contaminantes tienen un gran impacto ambiental y a la salud pública. La aportación de metales pesados al medio ambiente, proviene en gran medida de la contaminación por las actividades humanas, sobre todo de procesos industriales. Este incremento incesante de la contaminación, ha conducido a la necesidad del estudio y comprensión de la evolución y destino de los contaminantes presentes en el medio ambiente y sus posibles efectos sobre los organismos vivos. En este sentido, cabe destacar la necesidad de caracterizar la contaminación de los materiales de consumo humano, de origen ambiental, biológico, etc. Priorizando las diferentes especies contaminantes sobre la determinación de los contenidos totales. Esto es debido a que cada vez y con menos dudas al respecto, se ha unificado la opinión acerca de la relación existente entre la toxicidad de los elementos y la forma química en que se encuentran.

En el presente trabajo se realizó la determinación y especiación de metales pesados por extracciones sucesivas del agua residual, se estimó la concentración de metales pesados y sus fracciones químicas en el lodo activado y en el efluente final de la planta de tratamiento del río de Los Remedios, que está ubicada frente al parque Naucalli en el Municipio de Naucalpan. Se realizó un muestreo diario por dos semanas, tres veces al día con muestras compactas, se cuantificó la concentración de los metales pesados para conocer su presencia en el ambiente de la zona evaluada, para posteriormente determinar su origen y su movilidad en el ecosistema mediante el análisis de especiación química. En esta revisión se presentan los resultados obtenidos de los análisis en laboratorio, usando técnicas de extracciones selectivas para la separación de metales en diferentes fases químicas, ocupando el Espectrofotómetro de Absorción Atómica (E.A.A) para la cuantificación de metales pesados.

Para determinar la factibilidad de aprovechar los lodos generados en esta planta de tratamiento como mejoradores de suelo de acuerdo con las normas oficiales vigentes (NOM-052-SEMARNAT-1993), se evaluó el contenido total de metales y su movilidad en



el medio para saber si estos lodos poseen características benéficas que puedan ser aprovechadas. De acuerdo a los resultados se encontró dos metales (Pb y Cr) que excedieron los límites permitidos, cumpliendo con las normas de calidad cinco metales (Ni, As, Cu, Cd y Zn). Con respecto al análisis de especiación se encontró que en fases móviles estaban Cd, Zn y Ni en mayor concentración y en fases inmóviles o residuales Cr, Pb, As y Cu en su mayor parte.

Con base a lo anterior, se observó que el principal problema para poder utilizar los lodos deriva del alto contenido de cromo y plomo, lo cual se requiere incrementar la eficiencia en las políticas de disminución de estos contaminantes, al igual de la modificación de las condiciones de operación de los procesos existentes para la depuración de las aguas residuales, añadiendo procesos complementarios en la planta donde se realizaron los estudios.



Capítulo I

Introducción

El agua es el recurso natural más importante del mundo, ya que sin ella no podría existir la vida y la industria no funcionaría. 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 ambiente.

Es importante percatarse de que todas las aguas naturales contienen varios contaminantes que provienen de la lixiviación y de los procesos de la intemperie (intemperismo), a esta contaminación natural se agrega aquella causada por las aguas residuales de origen doméstico o industrial, que se pueden eliminar de varias maneras, por ejemplo en el mar, en la tierra, en extractos subterráneos o, más comúnmente en aguas superficiales (Tebutt T. H. Y., 1999).

Cualquier cuerpo de agua es capaz de asimilar cierta cantidad de contaminación sin efectos serios debido a los factores de dilución y autopurificación que están presentes. Si hay contaminación adicional, se altera la naturaleza del agua receptora y deja de ser adecuada para sus diferentes usos. Así, es de gran importancia comprender los efectos de la contaminación y conocer las medidas de control disponibles para el manejo eficiente de los recursos hidráulicos (Fair M.G., 1976).

En México los metales pesados se han convertido en un tema de actualidad tanto en el campo ambiental como en la salud pública, debido a su carácter tóxico y acumulativo, que afecta a todos los organismos que componen la cadena de alimentación, principalmente en el medio acuático. La aportación de metales pesados a este ambiente, en su mayoría proviene de las actividades humanas sobre todo de los procesos industriales, cuyos desechos contienen cantidades variables de metales pesados, como; cromo (Cr), cadmio



(Cd), cobalto, (Co), cobre (Cu), plomo (Pb), mercurio (Hg), níquel (Ni), zinc (Zn) y arsénico (As). Además de otros contaminantes como sustancias orgánicas, sustancias radioactivas y microorganismos.

La generación de lodos de desecho de las plantas de tratamiento de aguas residuales es uno de los problemas actuales, ya que la mayor parte de ellos contienen metales pesados y algunos de esos lodos se usan como acondicionamiento de suelos. Esta carga de metales puede llegar a causar grandes problemas de contaminación, sobre todo porque de acuerdo con las condiciones químicas del medio, se presenta el fenómeno de la especiación química de los metales, lo que favorece en un momento dado su movilización e incorporación en los suelos, en el agua y los microorganismos. Esta investigación se enfoca a la determinación y estudio de especiación química que tienen los metales pesados en las aguas residuales, para poder evaluar sus efectos sobre el medio ambiente.

En este estudio se presenta el análisis de especiación de siete metales pesados (cromo, cadmio, cobre, plomo, níquel, zinc y arsénico), se estudian los factores que determinan el origen y su movilidad en el medio ambiente, se muestran las características de la zona estudiada, además de informar el grado de contaminación en las aguas residuales del río de Los Remedios.



Capítulo II

Justificación

El presente trabajo de investigación pretende realizar una aproximación al problema asociado a la presencia de metales pesados en lodos de aguas residuales de origen urbano, especialmente cuando éstos son utilizados como mejoradores de suelos, analizando también las características que determinan la calidad de las aguas tratadas y poder comprender mejor su acumulación en el medio ambiente.

Más importante que el contenido total de metales pesados, resulta la identificación de las formas químicas (especiación) de esos metales, lo que permite la elección del tratamiento más adecuado para la gestión y aplicación de los lodos, evitando la movilización de los metales pesados presentes en los mismos.

La importancia de la realización de esta investigación; *“Especiación de metales pesados, en Lodos de Aguas Residuales de Origen Urbano”*, esta fundamentada en que diariamente se desprenden grandes cantidades de residuos tóxicos a las aguas superficiales sin que haya un monitoreo capaz de determinar la contaminación real que sufren nuestras aguas. México es un importante productor de plomo (entre otros metales) a nivel mundial y una gran cantidad de industrias lo utilizan para generar productos derivados de este elemento, gran parte de estas industrias arrojan sus desechos a los drenajes sin ningún tratamiento de sus aguas, esto está provocando que cada vez más aumenten las concentraciones de plomo en el medio ambiente. Metales pesados como cromo, también, es muy común que sus desechos sean arrojados a las aguas residuales, ya sea por la industria o por la lixiviación de sustancias tóxicas de rellenos sanitarios que a través de la lluvia lleva los diferentes metales pesados a los mantos acuíferos y aguas superficiales.

Las aguas y lodos residuales que se estudiaron se obtuvieron de la planta de tratamiento del río de Los Remedios, municipio de Naucalpan, este es considerado como el más industrializado de México, y cuenta con una gran cantidad de industrias de la



transformación, química, farmacéutica, cosmética, alimentaría, entre otras. Además de contar con un relleno sanitario al oeste del municipio, existen también, gasolineras, hospitales, escuelas, talleres y otras instituciones, que desechan químicos en sus efluentes a las aguas residuales y una densa población que tiene este municipio, que a diario contamina el agua con sus desechos. Estos factores hacen que este estudio sea de un gran interés social.

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 (Rosas R.H., 2001). En este sentido se realizó el estudio de especiación, este nos proporciona información respecto a la biodisponibilidad en determinadas condiciones medioambientales que pueden tener los metales.

Actualmente el número de personas enfermas y con afectaciones en su organismo relacionadas con el consumo de metales pesados va aumentando, y es de vital importancia que investiguemos como monitorear y controlar este problema de salud pública para prevenir posibles enfermedades (Hostynet J.J., 2002).

Por estos motivos se fundamenta la importancia de la presente investigación, debido a que existen pocos reportes de calidad de las aguas y lodos residuales generados en nuestro país. Investigaciones como esta pueden dar como resultado un esquema de la situación general en el país, a la vez que permiten sentar las bases del manejo y utilización de las aguas residuales y de sus lodos de diversas plantas de tratamiento del país, para determinar la factibilidad de aprovecharlos benéficamente de acuerdo con los límites establecidos por las normas mexicanas de calidad de aguas y lodos residuales. En el presente proyecto, además de analizar en el laboratorio las características de las aguas en relación con sus metales pesados, en particular se investigó sobre las causas que originan tales cantidades de desechos tóxicos, además de problemas que pueden causar a la población y así poder prevenir la contaminación excesiva en las aguas residuales.



Capítulo III

Objetivos

3.1 Objetivo General

Determinar la concentración y especiación química de los metales pesados de plomo, cromo, zinc, cobre, cadmio, níquel y arsénico en el efluente final y sistema de lodos activados de una planta de tratamiento de aguas de origen urbano.

3.2 Objetivos Particulares

- Determinar las formas químicas (especiación) en que se encuentran los metales pesados en los lodos de purga del sedimentador, mediante extracción química secuencial.
- Evaluar el destino de los metales pesados en el ambiente, su movilidad y su biodisponibilidad en los diferentes ecosistemas.
- Caracterizar la calidad de los lodos y las aguas residuales en cuanto a su contenido de metales pesados de acuerdo con las normas existentes.



Capítulo IV

Antecedentes

4.1 Contaminación del Ambiente

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. En los años recientes, los investigadores más reconocidos del orbe, realizaron un reporte a nivel mundial sobre el calentamiento global con sus consecuencias del aumento de la temperatura en 4°C, en un futuro cercano, el derretimiento de los hielos polares y una posible nueva era glacial. Todo esto debido a la contaminación atmosférica. Por el lado, de la contaminación del agua es importante conocer que tres cuartas partes del planeta Tierra están cubiertas por agua, pero sólo el 3 % de esta agua es dulce, y de esta el 66.66% se encuentra en los polos congelada, de esta última porción de agua el 64% se encuentra almacenado en mantos subterráneos, de tal manera que los lagos ríos, pantanos, corrientes y reservorios superficiales constituyen una pequeña parte del agua que esta disponible para el uso humano y como vemos es muy reducido.

De esta pequeña cantidad de agua que disponemos, la ocupamos para uso industrial, doméstico y con el tiempo hemos contaminado los pocos reservorios de aguas que contamos por descargar grandes cantidades de contaminantes como desechos orgánicos, químicos y metales pesados que son muy difíciles de eliminar.

4.2 Contaminación del Agua

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 amoníaco o cadmio, pero a menudo se



tratan dentro de una definición amplia, dentro del cual encontramos las siguientes (Fair M.G., Geyer J.C., Okun D.D., 1976):

- 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.

4.3 Parámetros Físicos de las Aguas Residuales

Las determinaciones hechas en análisis físicos pueden ser: temperatura, color, olor y turbidez, entre otros, se describen a continuación sus respectivas características.

4.3.1 Temperatura

Es útil la observación de la temperatura, porque puede indicar los antecedentes de las aguas negras, su efecto sobre la actividad biológica, la solubilidad de los gases y el efecto de la viscosidad sobre la sedimentación. La temperatura normal de las aguas negras es ligeramente mayor que la del agua de abastecimiento, a causa de calor agregado durante la utilización del agua (Colin B., 2001).

4.3.2 Color y Olor

Las aguas negras recientes normales, tienen un color gris. Un color negro o muy oscuro, puede indicar que las aguas negras 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 negras 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.

4.3.3 Conductividad

La conductividad del agua nos da una idea de la concentración de sales minerales lo que es de importancia, especialmente si las aguas están dedicadas a la producción de agua potable. 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.

4.3.4 Sólidos y los Sólidos Totales

Los sólidos o residuos de la evaporación son importantes como indicio de la concentración de las aguas negras y del tratamiento necesario, o como medida de la eficiencia de un dispositivo de tratamiento.

Los sólidos totales pueden dividirse en materia volátil y materia fija. Se conoce en general, que la posición volátil representa la materia orgánica. Esta porción de los sólidos totales, tiene mucha significación para la fuerza o concentración de las aguas negras que pueden entrar en putrefacción (Colin B., 2001). Los sólidos también se pueden dividir en materia en suspensión y en materia soluble, dividiéndose cada una de ella en materia volátil y en materia fija.

4.4 Parámetros Químicos de las Aguas Residuales

Son diversos los análisis químicos que se le hacen a las aguas residuales para determinar su grado de contaminación, a continuación mencionamos los mas relevantes.



4.4.1 Oxígeno y Oxígeno Disuelto

El oxígeno se da en los análisis de las aguas negras en forma de oxígeno disuelto, oxígeno consumido, o demanda de oxígeno. 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).

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).

4.4.2 Demanda Bioquímica de Oxígeno

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) del agua negra o de un agua contaminada por polución, es la cantidad de oxígeno requerida para la descomposición biológica de los sólidos orgánicos disueltos, en condiciones anaerobias y en un tiempo y a una temperatura determinada. En el tratamiento de las aguas negras, 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).

4.4.3 Concentración de iones Hidrógeno o pH

La determinación del pH, es útil principalmente para regular el funcionamiento de las instalaciones de tratamiento de las aguas negras. Este parámetro es importante debido al efecto del pH 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 mas disponibles a pH ácidos, a excepción del As, Mo, Se y Cr que lo están a pH alcalinos (Colin B., 2001).

4.5 Contaminación por Metales Pesados

Las actividades industriales generan una contaminación a gran escala con metales pesados (Cu, Zn, Pb, Cd, Cr, Ni, Hg, etc.) en el medio ambiente. 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).

Un análisis realizado en el año de 1988 en Estados Unidos, reveló que la toxicidad total anual debida a metales pesados, excede la toxicidad total combinada de todos los desechos radioactivos y orgánicos generados cada año (Hughes y Poole., 1989). La descarga de estos en el agua constituye una amenaza ambiental mayor que su liberación en el aire.

La contaminación por el riego de aguas residuales con 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 agentes y las vías de contaminación por metales pesados en las aguas residuales de origen urbano son igualmente diversos, destacando los vertidos ilegalmente a la red de alcantarillado de aceites lubricantes usados, con altos contenidos de plomo, situación claramente en recesión, no sólo por las mejoras introducidas en la gestión de dichos residuos, sino, fundamentalmente, por la introducción de las gasolinas sin plomo, pinturas y colorantes con ciertos niveles de plomo, vertidos de taladrinas, sustancias utilizadas en la industria metalúrgica como refrigerantes y lubricantes, con alto contenido en metales, pilas



botón con elevados niveles de níquel, cadmio o mercurio procedentes del ámbito doméstico, residuos originados de la industria del decapado, etc.. También merece la pena considerar otras vías de contaminación como la procedente de la corrosión de tuberías y depósitos metálicos, así como la proveniente del arrastre por el baldeo de calles o por las aguas pluviales, siendo un buen ejemplo de ello el plomo procedente de la combustión de las gasolinas o los metales provenientes de procesos de corrosión diversos, depositados en el medio urbano (Chicon L., 2007).

4.6 Metales Pesados y Aguas Residuales

La extracción y utilización del agua en nuestro país va en aumento y como consecuencia, hay una mayor descarga de aguas residuales, provenientes tanto de las actividades cotidianas de la población como la requerida por la industria para sus procesos productivos (INEGI., 1994). Y esta no parece modificarse en los próximos años según se observa en el periodo 1980 al año 2000 según se muestra en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Extracción y descarga de aguas residuales por población e industrias, 1980-2000 (SEDUE., 1998).*

Extracción (m³/seg)	1980	1990	2000
Población	126.6	146.4	157.8
Industria	84.4	97.6	105.2
Total	211	244	263
Descarga (m³/seg)			
Población	94.9	109.8	118.4
Industria	71.7	82.9	89.4
Total	166.6	192.7	207.8

La tabla 4.1 muestra como se están agotando los recursos acuíferos con la creciente población, además de que son pocas las políticas para la reducción de emisiones de aguas residuales, es importante crear conciencia entre la población de que el agua que

* Los valores del año 2000 estuvieron pronosticados estadísticamente.



consumimos se esta agotando y que si no la cuidamos podríamos carecer de este vital recurso en los próximos años.

4.7 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 esta presente y la mayor reactividad de una especie no necesariamente coincidirán 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).

Para estimar la remoción 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).

La mayoría de los estudios realizados sobre metales de 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).

4.8 Especiación de Metales Pesados

La Especiación química se define como la distribución de un elemento químico particular 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).

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

4.8.1 Metales en forma de Iones Intercambiables

Estos pueden ser fácilmente móviles en los ecosistemas acuáticos por pequeños cambios ambientales (Rosas R. H., 2001). Las concentraciones de metales en este medio son representativas de la fracción de metal soluble y más fácilmente movilizable en el suelo (Solano Marín M.A. 2005). 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).



4.8.2 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.

4.8.3 Metales Sorbidos

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).

4.8.4 Metales Asociados a Óxidos de Hierro y Manganeso

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).



4.8.5 Metal enlazado a Materia Orgánica

Estos metales representan la fracción que se liberaría al pasar a condiciones oxidantes. Un caso típico es la deposición de los sedimentos anóxicos sobre superficies en contacto con la atmósfera (Rosas R.H., 2001). 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.

4.8.6 Metales Unidos a Sulfuros

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.

4.8.7 Fase Residual o Litogénica

Las constituyen metales unidos a minerales, formando parte de sus estructuras cristalinas. La liberación de metales en esta fase, en un período razonable de tiempo es ciertamente improbable (Rosas R.H., 2001). Extraíbles en medio ácido. Indicativo del riesgo de lixiviación a pH ácido e ingestión (Solano M.A., 2005).

4.9 Sistemas de Lodos Activados

El sistema fue desarrollado en Inglaterra en 1941 por Arden Locket. Este proceso biológico es quizás el más utilizado para el tratamiento de aguas residuales, orgánicas e industriales.



Un sistema de lodos activados se puede dividir en dos partes esenciales: un reactor biológico y una fase de separación (Lester J., 1987). En el reactor o mezcla de licor aireado, grandes poblaciones de microorganismos crecen bajo condiciones aerobias, oxidando componentes orgánicos o suspendidos presentes en las aguas residuales y convirtiéndolos a dióxido de carbono, agua y material celular. Ya que el sistema está sujeto a una entrada continua de materia orgánica, el desarrollo de la sucesión microbiana no es la usual como en un sistema cerrado. Esta sucesión se mantiene en una etapa concreta en la que el rendimiento de depuración es máximo si existe un equilibrio entre lodo producido, purgado y recirculado acorde con los consumos energéticos demandados por los sistemas de aireación.

4.9.1 Usos de los Lodos

En el ámbito mundial se han desarrollado alternativas de usos de lodos generados en las plantas de tratamientos de aguas residuales, siendo una de ellas la incorporación en suelos agrícolas, evitando así el costo de confinamiento. Esta práctica representa la oportunidad de darle un valor agregado al residuo que se está generando en la planta de tratamiento de aguas residuales, al aprovecharse como fertilizante y/o acondicionador de suelos (Hernández H. J. M., 2005).

En México, cuando los lodos provienen de aguas muy contaminadas por compuestos tóxicos o metales pesados, su empleo es restringido en la agricultura, se pueden utilizar pero se deben de cumplir con los límites máximos permitidos en la Norma NOM-004-SEMARNAT-2002 (SEMARNAT 2002). Los límites máximos permisibles para Metales pesados en Biosólidos aparecen en la Tabla 4.2.



Tabla 4.2 Límites máximos permisibles (LMP) de metales pesados en lodos residuales la Norma NOM-004-SEMARNAT-2002 (SEMARNAT 2002).

CONTAMINANTE (Determinados en forma Total)	EXCELENTES mg/kg En base seca	BUENOS mg/kg En base seca
Arsénico	41	75
Cromo	39	85
Cadmio	1200	3000
Plomo	1500	4300
Cromo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2800	7500

Ocasionalmente, el vertido al suelo está limitado por la capacidad de la tierra de aceptar grandes cantidades de agua contenida en el lodo. Más normal es la limitación debida a las altas concentraciones de sales, a la materia orgánica, a los metales pesados y a los organismos patógenos. Los lodos estabilizados y desecados pueden ser utilizados como mejora en vertidos a suelos (Seoanez C.M., 1999). Últimamente parece ponerse en duda el uso de lodos procedentes de las estaciones depuradoras en vertidos a suelos, buscando los procesos y acciones que tiene este suelo y su biota sobre los residuos aplicados en él.

Cuando los lodos de estaciones depuradoras se descomponen mediante la formación de compost, esta actividad promueve la digestión aerobia y procesos anaerobios que convierten al material orgánico en un material de enmienda de suelos. La humedad del lodo se reduce hasta el 50 %. Prácticamente, todos los organismos patógenos desaparecen, y el producto final puede ser aplicado al suelo en formas ventajosas (Seoanez C.M., 1999).

4.9.2 Manejo en México de Lodos en las Plantas de Tratamiento

De la información proporcionada sobre un estudio de 18 plantas de tratamiento en México, se obtuvo que del total de las plantas de tratamiento analizadas, cuatro no aplican ningún tipo de tratamiento a los lodos que generan, lo que representa un total de 6.08 ton de lodos no tratados al día. Fig.4.1 (Castrejón A., 2007). Esta situación resulta preocupante debido a que los lodos crudos con el alto contenido de microorganismos representan un riesgo a la salud humana y al medio ambiente. De acuerdo con esta problemática, es de vital importancia el establecimiento de medidas que obliguen a todas las plantas a tratar sus residuos, en este caso los lodos y a disponerlos o aprovecharlos de manera adecuada.

Del total de lodos analizados generados en el conjunto de plantas de tratamiento en México (304 ton/día) se reportó que la mayor parte son estabilizados mediante procesos de digestión, ya que 155.6 ton/día (51%) son tratadas mediante digestión anaerobia y 66.6 ton/día (22%) mediante digestión aerobia; mientras que 76.3 ton (25%) son tratadas por el proceso de estabilización alcalina. Figura 4.1.

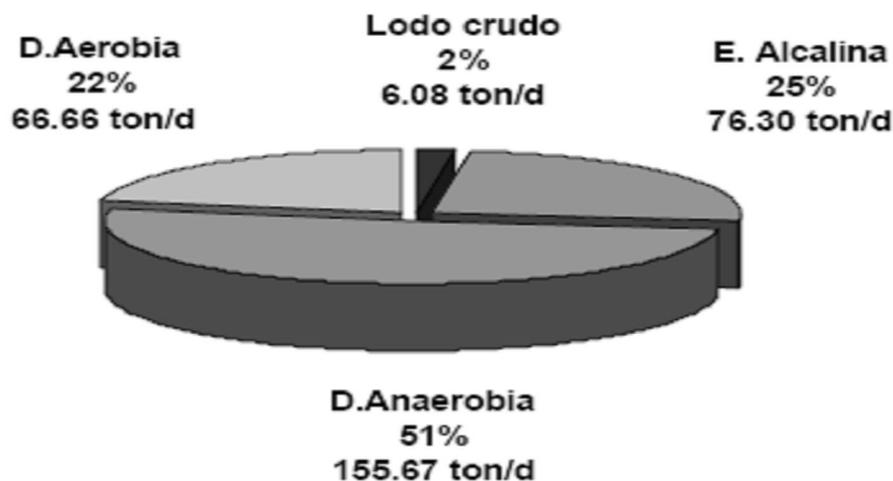


Figura 4.1 Tratamiento y generación de lodos residuales en 18 plantas de tratamiento analizadas de acuerdo con el proceso de estabilización. (Castrejón. A., 2007).

El destino final de la mayor parte de lodos generados en las plantas de tratamiento analizadas es la disposición, ya que de 231.4 ton/día de lodos (76%) son dispuestos en rellenos sanitarios, los cuales son sitios adecuados para esta actividad. Sin embargo, 6.08 ton de lodos generados en las plantas analizadas son vertidos en el drenaje diariamente. Figura 4.2.

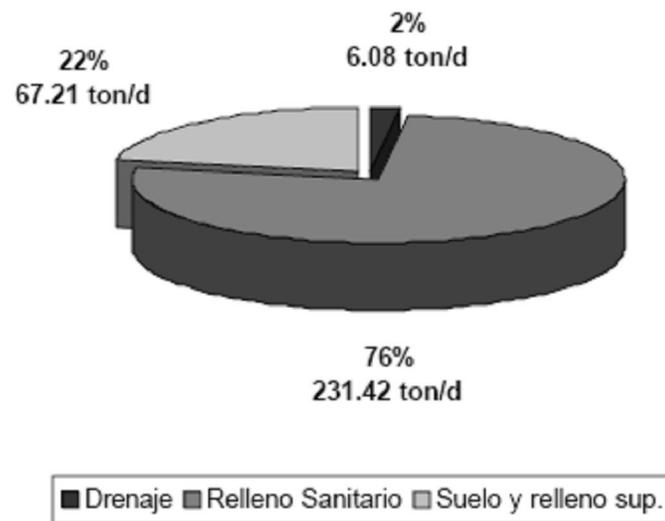


Figura 4.2 Disposición y aprovechamiento de lodos residuales en las plantas analizadas (Castrejón A., 2007).

En cuanto al aprovechamiento benéfico, sólo el 22% de lodos generados en las plantas analizadas utilizan a los lodos como mejoradores de suelo o como cubierta de rellenos superficiales, lo cual representa un total de 67.2 ton de lodos aprovechados por día Figura 4.3.

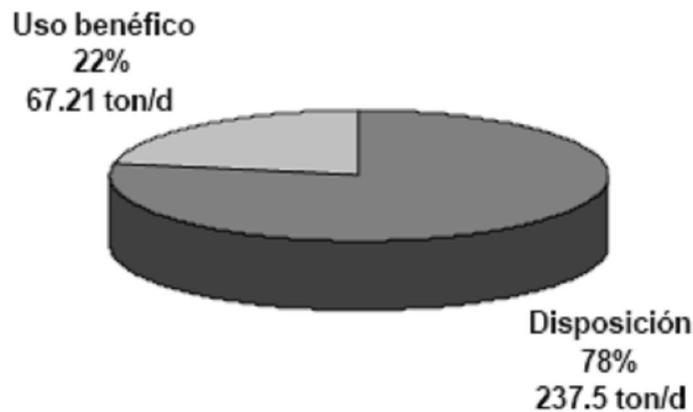


Figura 4.3. Porcentaje de disposición y aprovechamiento de los lodos residuales analizados (Castrejón A., 2007).

4.9.3 Análisis de Lodos

El lodo residual puede ser considerado como residuo peligroso o no peligroso dependiendo de su origen y contenido; para esto se realizan pruebas de laboratorio denominadas análisis CRETI. Este se realiza con fundamento a los procedimientos federales basados en la NOM-052-SEMARNAT-1993 que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. Se estima que el total de 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 suelos (INEGI., 1994). Ver figura 4.2.

Las muestras de los lodos activados contienen partículas o materia orgánica, que en general requieren de un tratamiento previo al análisis, con objeto de reducir la interferencia de materia orgánica y convertir el metal asociado a las partículas a metal libre y de esta forma determinarlo por Espectrofotometría de Emisión de Plasma (ICP-MS) o por Espectrofotometría de Absorción Atómica.(E.A.A).



En general se recomienda una digestión ácida; la digestión con HNO_3 , H_2SO_4 , HCl es adecuada para la materia orgánica de difícil oxidación, es necesario también emplear $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$, HNO_3 , HF para la digestión si existen grandes cantidades de materia orgánica en una digestión seca.

Un método para evaluar la forma del metal en lodos de aguas residuales se determina recuperando los metales usando 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).

Técnicas de extracción secuencial como es la especiación química la cual utiliza una serie de agentes químicos para remover metales de fracciones de varios componentes, ofrecen un aprovechamiento conveniente para la partición de metales en lodos digeridos (Stover R.C., 1996). Hay quienes usaron una extracción de un esquema secuencial incorporando nitrato de potasio, fluoruro de potasio, pirofosfato de sodio, EDTA y ácido nítrico para fraccionar varios metales que se encuentran en forma intercambiables, adsorbidas, enlaces orgánicos y en forma de carbonato y sulfato.

4.10 Contaminación por Rellenos Sanitarios

En la actualidad, a nivel mundial, el tema referente a la disposición final de los residuos sólidos generados en las congregaciones urbanas, ha cobrado una gran importancia tanto para la población en general, como para los responsables de los servicios de aseo urbano; debido principalmente a los problemas de contaminación ambiental y de la afectación a la salud pública que pueden generar, los cuales en ocasiones cuando se ha hecho una correcta selección del sitio, pueden tener implicaciones ambientales sumamente graves (Sánchez G.J., 1994) No se debe olvidar que aún cuando un sitio de disposición final de residuos sólidos haya sido clausurado, los problemas antes mencionados pueden



continuar por mucho tiempo, cuando se ubican en zonas geológicas inadecuadas, situación que se presenta en la actualidad con mucha frecuencia.

En términos generales, los problemas que un sitio de disposición final de residuos sólidos puede generar sobre los elementos del entorno que son susceptibles de verse afectados por dicha infraestructura, se describen a continuación (Geoffrey B.L, 1994).

Aguas Superficiales y Subterráneas. La principal afectación que un depósito de residuos sólidos puede generar en las aguas superficiales y subterráneas, son por lixiviados, producto del paso del agua de lluvia a través de los paquetes de basura, cuya carga orgánica medida como DBO, puede alcanzar valores de hasta 40,000 ppm. Estos lixiviados no sólo poseen una elevada carga de DBO, sino que además puede tener un alto contenido de metales pesados, bacterias coniformes y en ocasiones, hasta sustancias carcinogénicas.

Estos lixiviados pueden llegar a contaminar los cuerpos superficiales de aguas por escurrimientos no controlados, o bien infiltrarse a través de formaciones permeables y contaminar los mantos acuíferos, con las consecuencias secundarias que esta contaminación provoca, como es la inutilización de estos recursos para su aprovechamiento futuro. En especial, cabe señalar que la contaminación de acuíferos elimina su aprovechamiento para diferentes usos, durante un plazo muy largo, puesto que cuando se detecta, la regeneración de estos sistemas es muy tardada pudiendo quedar afectados de por vida (Sánchez G.J., 1994). Además de lo anterior, la contaminación de suelos y la disminución de su productividad, debido al contacto que pueden tener con lixiviados que se generan en cualquier sitio de disposición final de basura, son alteraciones que dañan a la agricultura, o bien llegan a inutilizar terrenos altamente cotizados para un determinado uso.

En el manejo de los residuos sólidos es un conjunto de servicios de intrínseca naturaleza social. Esto es, pocos servicios públicos pese a su composición “pública” presentan y requieren altos niveles de participación social. El manejo de basura conlleva un hecho social. Cada persona, cada familia, una colonia, una ciudad, participan directa o



indirectamente en la génesis, desarrollo y posterior disposición de sus desechos (Cruz J. R., 1994).

4.11 Especificaciones

Los metales pesados están catalogados por la Agencia de Protección al Ambiente (EPA) de los Estados Unidos y por la Normatividad Mexicana (NOM-CRP-001-ECO/93) como residuos peligrosos. A partir de 1950 la cantidad de metales ha aumentado en el medio ambiente debido a procesos industriales, uso de combustibles fósiles, residuos domésticos, etc. (SEDUE., 1990).

Las descargas de aguas residuales provenientes de la industria, actividades agroindustriales, de servicios y el tratamiento de aguas residuales a los sistemas de drenaje y alcantarillado urbano o municipal a que se refiere esta norma deben cumplir con las especificaciones que se indican en la tabla 4.3. NOM-CCA-031-ECOL/1993.



Tabla 4.3. Límites Máximos permisibles de parámetros fisicoquímicos y de metales pesados según la NOM-CCA-031-ECOL/1993.

Parámetros	Límites Máximos Permisibles	
	Promedio Diarios	Instantáneo
Temperatura (°C)		40°C (313°K)
pH (unidades de pH)	6 a 9	6 a 9
Sólidos sedimentables (ml/L)	5	10
Grasas y aceites (mg/L)	60	100
Conductividad eléctrica (microhos/cm)	5,000	8,000
Aluminio (mg/L)	10	20
Arsénico (mg/L)	0.5	1.0
Cadmio (mg/L)	0.5	1.0
Cianuros (mg/L)	1.0	2.0
Cobre (mg/L)	5	10
Cromo hexavalente (mg/L)	0.5	1.0
Cromo total (mg/L)	2.5	5.0
Fluoruros (mg/L)	3	6
Mercurio (mg/L)	0.01	0.02
Níquel (mg/L)	4	8
Plata (mg/L)	1.0	2.0
Plomo (mg/L)	1.0	2.0
Zinc (mg/L)	6	12
Fenoles (mg/L)	5	10
Sustancias activas al azul de metileno (mg/L)	30	60



Capítulo V

Características Químicas de Metales Pesados

Los metales pesados son un grupo de elementos caracterizados por poseer propiedades metálicas y una densidad superior a 5 g/cm^3 . 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 artificial. 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 artificial son consecuencia de la actividad humana, la mayoría procedentes de procesos desarrollados en la minería y en la industria. 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. Dentro de los metales pesados pueden diferenciarse dos grupos:

1.- Oligoelementos o micronutrientes, aquellos que son requeridos en pequeñas cantidades, normalmente a nivel trazas, por parte de los organismos para completar su ciclo vital. Sin embargo estos se vuelven tóxicos al superar cierto valor límite. Principalmente As, Cr, Co, Cu, Mo, Mn, Ni, Se y Zn (Pérez G.G., 2005).



2.- Metales pesados sin función biológica conocida, de forma que, en presencia de organismos vivos conduce a disfunciones de su sistema biológico. Son altamente tóxicos y tienden a acumularse en los organismos. Básicamente Cd, Pb, Hg, Sb y Co.

Para entender mejor la toxicología y características de los metales pesados a estudiar se presentan de forma particular y detallada sus propiedades a continuación.

5.1 Cromo

El cromo es un elemento esencial para el organismo humano; unido a la niacina forma el factor de tolerancia a la glucosa y se encuentra en grandes concentraciones en los ácidos ribonucleicos (RNA).

Así mismo, es un microelemento esencial para el metabolismo de los ácidos grasos e interviene en diferentes sistemas enzimáticos; el hombre lo ingiere en casi todos los alimentos, con una pobre absorción gastrointestinal. Diariamente se ingieren de 200 a 290 mg de los cuales 63 a 78 mg se eliminan en las heces y 100 a 160 mg por la orina. Existe normalmente en los tejidos en su estado trivalente (Hawley G. G., 1986).

5.1.1 Usos

El mineral 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 cuál 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. El cromo hexavalente y el trivalente son precipitantes de proteínas a grandes concentraciones $> 2\%$ y $\text{pH} < 5.4$, además son precipitantes de los ácidos nucleicos, especialmente del cromo +6, siendo el más afectado el DNA, inhibiendo entonces el crecimiento celular (Córdoba P.D., 1991).

Diferentes estudios han evidenciado efectos citotóxicos causados por compuestos de cromo +3 y +6 en altas concentraciones. Algunos de ellos son aberraciones cromosómicas en células de vegetales cultivados, alteraciones de propiedades físico-químicas de ácidos nucleicos y nucleótidos, alteración de la replicación del DNA in vitro, pero sólo en compuestos de cromo +6 se han reconocido que induce mutaciones en levaduras y bacterias (Albert L.A., 1998).

En otros estudios se concluyó que los cromatos son mutagénicos y que ejercen su efecto directamente por modificación de las bases de DNA; esta evidencia ha sido considerada como mecanismo carcinógeno (Córdoba P. D., 1991).

5.1.2 Contaminación de Cromo en el Medio Ambiente

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.

En Japón en 1975, se detectó el envenenamiento por cromo hexavalente, donde el consumidor más grande de cromo la Nipón Chemical Industrial Co., depositó aproximadamente 530,000 toneladas de lodo y desechos conteniéndolo, en los linderos de la Prefectura de Chiba 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/ Cr_2O_3), los regaló para tapar los baches de la población de Lechería en Tultitlan, Edo. 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).

Las autoridades para evitar que siguieran las intoxicaciones cerraron la planta de Cromatos de México S.A., (que operó de 1958 a 1978), tras comprobar la presencia de cromo en la población humana y vegetal de los alrededores, que había acumulado en niveles superiores a los normales, estos después del cierre han seguido contaminando aire, suelo y agua de la zona (Gómez S.E.I., 1994).

5.2 Plomo

Durante siglos, se ha sabido que el plomo es tóxico. Hay quizás más conocimiento acerca de los agudos y crónicos efectos adversos del plomo en los humanos que acerca de cualquier otro veneno. Aunque los efectos de altas concentraciones de plomo en el cuerpo son conocidos, las investigaciones durante los últimos 15 años han comenzado a destacar los problemas causados por niveles mucho más bajos de exposición que previamente se consideraron no peligrosos. Los efectos de esta exposición a largo plazo no es neutral; afecta al cerebro, originando un cambio de comportamiento y déficit en los niveles de inteligencia (Gray N.F., 1996). En el capítulo IV, en tabla 4.3 se muestran las concentraciones máximas permitidas para el plomo en las aguas residuales.

El plomo, elemento metálico sin función conocida en el cuerpo, ha sido extraído de las profundidades de la tierra e introducido a la biosfera. Se encuentra en la naturaleza como galena (PbS), grusita (PbCO_3) y anglesita (PbSO_4).



5.2.1 Usos

Las fabricas 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 e 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).

Una vez adsorbido el plomo, circula en el organismo unido a los glóbulos rojos. Forma con los fosfatos del plasma fosfatos coloidales de plomo, los cuales son muy solubles y constituyen el plomo circundante y tóxico. Se deposita en riñones, hígado, piel glándulas, sistema nervioso y en huesos largos, donde puede ser movilizado nuevamente.

El plomo produce lesiones en los órganos y sistemas siendo los más agredidos, el sistema nervioso central, el sistema nervioso periférico, el renal, el hematopoyético y el gastrointestinal. En las intoxicaciones crónicas se presenta esclerosis vascular, fibrosis intersticial, atrofia glomerular y fallo renal que lleva al paciente a la muerte (Córdoba P. D., 1991).

5.2.2 Contaminación de Plomo en el Medio Ambiente

Las concentraciones de plomo en el medio ambiente se han elevado conforme ha aumentado su uso. Este aumento ha sido notorio sobre todo a partir de 1750, y es paralelo al desarrollo de la Revolución Industrial. Afines de la segunda Guerra Mundial, la concentración por plomo se elevó aún más, entre otras causas, por la introducción de compuestos orgánicos de plomo como aditivos para gasolina (Albert L. A., 1998). Durante el siglo XX la concentración de Plomo en el mundo estuvo aumentando alarmantemente como se vió en el estudio que se hizo en Groenlandia donde se ve como el plomo ha estado aumentado en concentración al paso de los últimos años. Ver tabla 5.1.



Tabla 5.1 Acumulación de Plomo en Groenlandia (Albert L. A., 1998).

Año	Concentración de plomo ($\mu\text{g/g}$ de nieve)
1750	20
1800	40
1850	50
1900	90
1950	180
2000	500

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 (James F. Smith., 1999).

En otros lugares, puede presentarse la contaminación por plomo pero las fuentes emisoras pueden ser distintas, como en el caso reciente que afecta a los vecinos de la empresa Pigmentos y Óxidos S. A. en el área metropolitana de Monterrey, Nuevo León.

El plomo también está considerado como un contaminante que causa estragos a nivel mundial, debido a su bajo costo y propiedades que lo hacen de mucha utilidad. En una ciudad grande como el Distrito Federal el plomo se usó como antidetonante de gasolina hasta 1997 debido a que sus emisiones en el ambiente y la exposición del mismo afectó la salud pública, por lo cual tuvo que ser regulado y controlado. En los últimos años, la producción de plomo ha ido aumentando en miles de toneladas por año. Los principales productores son Estados Unidos, URSS, Australia, Canadá, Perú, **México**, China, Yugoslavia y Bulgaria.

El plomo no solo se descarga en el ambiente durante su extracción, fundición o refinación, sino también durante otros procesos como la combustión de hidrocarburos



fósiles, el procesamiento de minerales metálicos no ferrosos y por un uso de aditivos para la gasolina. La cantidad anual que se dispersa como contaminante atmosférico es muy elevada. Las emisiones antropogénicas de plomo en el aire se han calculado en alrededor de 450000 toneladas. Esta cantidad duplica las emisiones por fuentes naturales (Albert Lilia A., 1998).

El plomo atmosférico tiene gran importancia, no sólo porque una vez en el medio, el contaminante llega a otras regiones por la acción del viento sino, además, porque es una fuente de exposición por inhalación para los seres vivos. También por este medio, el plomo llega a depositarse en diversos sustratos como el suelo, el agua y la vegetación.

5.3 Cadmio

Actualmente se ha puesto más atención al metabolismo del cadmio ya que sus concentraciones en el ambiente han aumentado y, por lo tanto, pueden tener efectos adversos sobre el ser humano (Hawley G. G., 1986).

La ingestión de alimentos o bebidas contaminadas con cadmio puede causar trastornos agudos en el tracto gastrointestinal. Los síntomas incluyen náuseas, salivación, vómito, dolor abdominal tipo cólico y dolor de cabeza.

5.3.1 Usos

En la actualidad existe una restricción constante en el uso del cadmio, tanto para las aplicaciones existentes como para el desarrollo de nuevas tecnologías. Esto último se debe a que se ha comprobado que el cadmio es persistentemente tóxico aún en concentraciones muy pequeñas y que se concentra muy fuertemente en las cadenas alimenticias (Albert L.A., 1998). Ver la tabla 4.3 en el capítulo IV los límites máximos permitidos para el cadmio.



Las principales fuentes antropogénicas por las cuales se libera cadmio al ambiente son los usos de este elemento. Sus derivados se utilizan en pigmentos y pinturas, baterías, como estabilizadores del cloruro de polivinilo (PVC), como recubrimiento de otros materiales, en procesos de galvanoplastia, electroplateado, en aleaciones, en acumuladores, en soldaduras, en reactores nucleares, en joyería etc. (Hawley G.G., 1986).

5.3.2 Contaminación de Cadmio en Medio Ambiente

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

En las aguas superficiales, el cadmio se presenta como ión libre y en su solubilidad influyen la dureza, el pH, los complejos solubles y los sulfuros coloidales de éstas. La contaminación del agua potable con cadmio puede ocurrir como resultado de impurezas de cadmio en las tuberías galvanizadas de zinc o en la soldadura.

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. 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 (Albert Lilia A., 1998).

5.4 Arsénico

El arsénico y sus derivados fueron muy populares como agentes de intoxicación intencional, después, a ese problema toxicológico se sumaron las intoxicaciones accidentales, profesionales y endémicas. En el organismo humano, el arsénico se concentra



en los leucocitos y se acumula fundamentalmente en el hígado, riñón, pulmón, pelo, dientes, uñas y piel. Los efectos que puede producir son cancerígenos, mutagénicos, daños irreversibles a los diferentes órganos y puede producir la muerte (Albert L.A., 1998).

5.4.1 Usos

Los productos generados por el hombre incluyen el arsénico metálico, pentóxido y el trióxido (As_2O_5) y (As_2O_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 (Hawley G.G., 1986).

5.4.2 Contaminación de Arsénico en el Medio Ambiente

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 casos de intoxicación por ingestión crónica del arsénico contenido en agua de consumo, este puede ser de origen natural o antropogénico; como es el caso 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 porque las personas de este pueblo tenían, además, otras afecciones que los de la población no expuesta no tenía. El promedio de vida es menor en Salvador de Arriba ya que las personas



de este lugar sólo alcanzan a vivir hasta 64 años, mientras que la población no expuesta viven hasta 76 años, es decir doce años más (Albert L.A., 1998).

5.5 Cobre

Se trata de un elemento esencial para el organismo humano, donde se encuentra complejo con proteínas, siendo la principal la ceruplasmina, que participa en la oxidación de Fe^{+2} a Fe^{+3} en una etapa previa a la formación de la hemoglobina. (Córdoba P. D.1991). También forma parte de importantes enzimas que participan en los procesos de oxidación, como por ejemplo la del citocromo oxidasa, la tirosina y varias aminoxidasas (Pérez G.G., 2005).

5.5.1 Usos

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 y una gran cantidad de usos que tiene este metal (Solano M.A., 2005).

5.5.2 Contaminación de Cobre en el Medio Ambiente

Se estima que las emisiones mundiales de Cobre a la atmósfera son de 18500 toneladas de origen natural y 56300 por causas antropogénicas. El 83 % de este metal posteriormente es depositado en las zonas continentales y en los océanos. Desde el aire, el cobre también puede precipitarse a los ambientes acuáticos por la lluvia o por el polvo.

5.6 Zinc

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).

5.6.1 Usos

El zinc ha sido fundamentalmente empleado como recubrimientos de metales, y aleaciones para prevenir la corrosión, fabricación de fertilizantes, insecticidas y perseverantes de madera, acumulándose en el medio ambiente, especialmente en las partes superficiales de los suelos (Hawley G.G., 1986).

5.6.2 Contaminación de Zinc en el Medio Ambiente

Es importante resaltar que el zinc es un elemento fundamental en el funcionamiento celular del ser humano, sin ser tóxico a dosis altas, y dado que suele asociarse con el cadmio (elemento muy tóxico) su incremento en la zona pluvial puede informar sobre una presencia indeseable de este último metal en el agua.

5.7 Níquel

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. Forma parte de algunas enzimas como urea y es capaz de activar otras como la carboxilasa la tripsina o la acetil-coenzima A. 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 (Ver en la tabla 4.3 los límites máximos permitidos para el Níquel). 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).



5.7.1 Usos

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).

5.7.2 Contaminación de Níquel en el Medio Ambiente

En el medio ambiente las aportaciones de níquel son consecuencia de la combustión de aceites, carbón e incineraciones de fangos residuales en la industria. Las actividades humanas que más contribuyen a la incorporación de níquel a medio ambiente son la minería, la fundición, y refinado de los concentrados, la fabricación de aleaciones y la industria del chapado.



Capítulo VI

Origen de Metales Pesados en las Aguas Residuales

El origen de los metales pesados en suelos y sedimentos debería ser únicamente función de la composición del material original y de los procesos geológicos que se dan en los sistemas. No obstante la actividad humana ha incrementado el contenido de estos metales en cantidades considerables, normalmente a niveles superiores a las concentraciones tóxicas, como consecuencia de la trágica alteración de los ciclos biogeoquímicos (Ver tabla 4.3). Las fuentes de estos metales pesados se debe a la deficiencia de los procesos industrializados en los que son utilizados como materias primas, de modo que gran parte de estos procesos son vertidos al medio ambiente en forma de residuos, ya sea líquidos o sólidos (Pérez G.G., 2005).

La presencia de elementos metálicos en sistemas acuáticos fluviales y costeros se origina por las interacciones del agua con los sedimentos y la atmósfera con la que está en contacto, produciéndose fluctuaciones en las concentraciones en el agua, como resultado de las fuerzas hidrodinámicas naturales, biológicas y químicas (Márquez S.W., 2000).

6.1 Fuentes, Agentes y Vías de Contaminación

La procedencia de los metales pesados encontrados en los sistemas acuáticos es variada, asociándose las fuentes de contaminación a pequeñas industrias establecidas en zonas urbanas o en centros industriales carentes de plantas de tratamiento, a talleres de automóviles, al pequeño y mediano comercio, a grandes infraestructuras como puertos y aeropuertos, a grandes áreas comerciales, arreglo y limpieza de calles o a las de tipo propiamente doméstico (Chicon L., 2007).



6.2 Orígenes de Metales en los Sistemas Acuáticos

En los sistemas acuáticos continentales (ríos, lagos, embalses, etc.) los metales pesados son introducidos como resultado de la acción de procesos naturales y antropogénicos. Por ello, vamos a distinguir entre el origen natural de metales pesados y otro antropogénico; si bien en la práctica la distinción entre una contaminación de origen industrial, doméstico o natural y la producida por actividades mineras resulta difícil de discernir (Rosas R.H., 2001).

6.2.1 Origen Natural o Litogénico

El contenido en elementos metálicos de un suelo libre de interferencias humanas depende en primer grado de la composición de la roca madre originaria y de los procesos erosivos sufridos por los materiales que conforman el mismo. La acción de factores medioambientales sobre las rocas y los suelos derivados de ellas son los determinantes de las diferentes concentraciones basales (niveles de fondo) de los metales pesados en sistemas fluviales (aguas, sedimentos y biota).

La diferencia en la composición físico-química de los sedimentos como el tamaño de las partículas, distribución y mineralogía afectan a las concentraciones de los metales pesados de origen natural. Una alta concentración de metales en sedimentos puede resultar en ciertos casos de su material geológico sin que haya sufrido una contaminación puntual (Rosas R. H., 2001).

Las fuentes naturales, en las que los metales comúnmente se encuentran contenidos en el material original como consecuencia de la meteorización, dan lugar a una concentración que puede resultar tóxica para el crecimiento de plantas y por consiguiente para los animales que las consumen (Pérez G.G., 2005).



6.2.2 Origen Antropogénico

Se entiende por contaminación de origen antropogénico la procedente de la intervención humana en el ciclo biogeoquímico de los metales pesados. El uso de los metales pesados se ha ido aumentando paralelamente al desarrollo industrial y tecnológico. Actualmente es difícil encontrar una actividad industrial o un producto manufacturado en los que no intervenga algún metal pesado. Si bien, la tendencia aunque lenta, es sustituir progresivamente en la industria, algunos metales pesados potencialmente tóxicos por otros materiales más inocuos (Rosas R.H., 2001). La contaminación antropogénica es muy amplia y abarca una multitud de aspectos, incrementando siempre la contaminación endógena. Los orígenes antropogénicos más comunes son, el industrial, el agropecuario y el doméstico que se explican a continuación.

6.2.2.1 Origen Industrial

Las principales fuentes de metales pesados en los sistemas acuáticos son las aguas residuales procedentes de las industrias que utilizan los cauces fluviales como vertederos. A menudo estos vertidos no se someten a procesos de depuración o su tratamiento. Un alto grado de industrialización y urbanización es un fuerte riesgo de contaminación por metales pesados, especialmente en sedimentos anaerobios y ricos en sulfuros que favorecen la retención y acumulación de metales (Solano M. A., 2005).

6.2.2.2 Origen Agropecuario

Los orígenes de los metales pesados en las aguas continentales son causados por la lixiviación de los terrenos de cultivo en los que se han producido una acumulación previa de dichos elementos debido al uso o abuso de pesticidas fertilizantes y desechos orgánicos susceptibles de ser utilizados como abono. Los metales presentes en los terrenos alcanzan los cursos de agua no sólo directamente al ser lixiviados por el escurrimiento superficial, sino también indirectamente al infiltrarse desde acuíferos previamente contaminados.



La aplicación de terrenos de cultivo de lodos provenientes de depuradoras y el riesgo de los mismos con aguas residuales son también una fuente significativa de contaminación metálica para los cultivos.

6.2.2.3 Origen Doméstico

Las aguas residuales de las ciudades son portadoras de los metales pesados de origen doméstico. Los vertidos domésticos transportan una amplia gama de metales contenidos en las excreciones humanas, en los restos de los alimentos, en las aguas de lavado, etc. (Mengchand H., 2000).

Podemos incluir en este ámbito el aporte de metales a través de los combustibles fósiles que se utilizan en las calefacciones y los automóviles. Las emanaciones gaseosas de los automóviles, no sólo afectan a las ciudades, sino que también lo hacen a las zonas limítrofes de autopistas y carreteras de gran tráfico. Los metales así originados incluyen al Cd, Cu, Ni, Pb y Zn siendo el Pb el más abundante proveniente de la combustión de la gasolina.

Estos metales contenidos en las partículas de los humos de combustión y en las originadas por el desgaste de neumáticos, ferodos de freno y otros materiales metálicos, pueden llegar a alcanzar los sistemas acuáticos: directamente (precipitación de partículas, lluvia) o indirectamente por la lixiviación de los terrenos (calles, carreteras, y zonas adyacentes donde previamente se produjo la deposición) debido a el escurrimiento superficial de las aguas de tormenta y de los riesgos de las ciudades. Frecuentemente esta agua de escurrimiento urbano no es depurada y alcanza rápidamente los cursos fluviales, incluso antes de que se produzca la crecida del río que daría lugar a la dilución de los contaminantes (Solano M.A., 2005).



6.3 Vías Principales de Entrada de Metales en los Sistemas Acuáticos

Los metales pesados pueden ser originados en el medio ambiente por tres vías principales de entrada que son;

6.3.1 La Vía Atmosférica

Se produce debido a la sedimentación de partículas emitidas a la atmósfera por procesos naturales o antropogénicos (principalmente combustión de combustibles fósiles y procesos de fundición de metales).

6.3.2 La Vía Terrestre

Producto de filtración de vertidos, del escurrimiento superficial de terrenos contaminados (minas, utilización de lodos como abono, lixiviación de residuos sólidos, precipitación atmosférica, etc.) y otras causas naturales.

6.3.3 La Vía Directa de Entrada

La vía directa de metales es a consecuencia de los vertidos directos de aguas residuales industriales y urbanas a los cauces fluviales.

El Río de los Remedios estudiado, está localizado en una de las zonas con mayor densidad de población urbana e Industrial del país, esto está provocando que la concentración de contaminantes como los metales estén por encima de normas de calidad de aguas residuales. Las descargas de efluentes de industrias que trabajan con metales pesados están provocando una seria contaminación del agua residual, esto se comprobó con el análisis del agua que se evaluó.



Capítulo VII

Mobilización de Metales Pesados en el Medio Ambiente

Los estudios de calidad de las cuencas hidrográficas han adquirido gran interés en las últimas décadas, dado el incremento de la población en sus riberas, el creciente grado de industrialización y los aportes del sector primario que se presentan. La importancia que tiene el estudio de metales pesados en aguas y lodos residuales, es por su elevada toxicidad, alta persistencia y rápida acumulación por los organismos vivos. Sus efectos tóxicos de los metales pesados no se detectan fácilmente a corto plazo, aunque si puede una incidencia muy importante a medio y largo plazo.

Los metales son difíciles de eliminar del medio, puesto que los propios organismos los incorporan a sus tejidos y de éstos a sus depredadores, en los que acaba manifestando. La toxicidad de estos metales pesados es proporcional a la factibilidad de ser absorbidos por los seres vivos, un metal disuelto en forma iónica puede absorberse más fácilmente que estando en forma elemental, y si esta se halla reducida finamente aumentan las posibilidades de su oxidación y retención por los diversos órganos (Rosas R. H., 2001).

7.1 Impacto Ambiental

El impacto ambiental de los contaminantes metálicos en suelos y sedimentos es estrictamente dependiente de la capacidad de acomplejamiento de estos componentes del medio ambiente y su respuesta a las condiciones fisicoquímicas y biológicas de su entorno. Los metales son especies químicas no degradables. Por tal motivo, una vez volcados en el medio ambiente, sólo pueden distribuirse entre los entornos aire-agua-suelo, a veces cambiando su estado de oxidación, o incorporarse a los seres vivos. (Vullo D.L ,2003).

La estimación de la movilización de metales bajo condiciones ambientales y la asimilación potencial por los organismos son los principales objetivos para la diferenciación de especies de 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 los 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 competición entre adsorción de sedimento y la capacidad de Complejación (Rosas R.H., 2001).

El impacto medioambiental que se produce depende de la cantidad y tipo de productos químicos liberados. De esta forma los productos más peligrosos son los más resistentes a una descomposición química, como los metales, que son capaces de almacenarse y acumularse en los suelos. Por esto es necesario, conocer la movilidad de los elementos y a partir de ésta evaluar su persistencia y biodisponibilidad (Pérez G.G., 2005).

7.2 Mecanismos de Mobilización de Metales Pesados

La movilización se puede entender como la velocidad en que un contaminante se distribuye en un medio y viene determinada por la transferencia de una sustancia de un medio ambiental a otro. La movilidad regula la distribución del contaminante, y por tanto, su aporte a otros sistemas (Pérez G.G., 2005).

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. Así por ejemplo, cerca de la mitad de la entrada de los metales pesados en los Grandes Lagos es debida a la deposición desde el aire. Evidencias recientes procedentes de Suecia, indican que la deposición de plomo en los sedimentos de los lagos Europeos data de la época de los antiguos Griegos, cuando la plata era el primer metal que se producía en masa para su utilización en las monedas. Aparentemente, una cantidad importante de plomo que contaminaba la plata cruda escapo hacia el aire durante el refinado de ese metal (Colin B., 2001).



7.3 Mobilización de Metales Pesados en el Suelo

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).

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).

Debido a la toxicidad potencial directa sobre la biota y la amenaza indirecta sobre la salud humana por la contaminación de las aguas subterráneas y la acumulación de los mismos en los cultivos, existe un interés generalizado en cuanto al destino de los metales pesados en suelos contaminados (Solano M.M., 2005). En general, los metales pesados incorporados al suelo pueden seguir cuatro diferentes vías.

- Pueden quedar retenidos en el suelo, ya sea disueltos en la fase acuosa del suelo, ocupando sitios de intercambio o específicamente adsorbidos sobre constituyentes inorgánicos del suelo, asociados con la materia orgánica del suelo y/o precipitados como sólidos puros o mixtos. Desde la base físico-química se sabe que los metales precipitan como resultado de cambios en el pH, oxidación y otros cambios de su composición química.
- Pueden ser absorbidos por las plantas y así incorporarse a las cadenas tróficas.
- Pueden pasar a la atmósfera por volatilización.
- Pueden mobilizarse a las aguas superficiales.



Los metales pesados quedan retenidos en el suelo por medio de tres vías (Baird C., 2001).

- Por absorción en las superficies de las partículas minerales.
- Por complejación con las sustancias húmicas en partículas orgánicas.
- Por reacciones de precipitación.

Biológicamente, el intercambio de cationes por parte del suelo es el mecanismo por el cual las raíces de las plantas absorben los iones metálicos como el potasio, el calcio y el magnesio. Aunque las raíces liberan iones hidrógeno al suelo por intercambio con los iones metálicos, no es esta la principal razón de que el suelo donde crecen las plantas sea a menudo ácido. La mayoría del ácido es debido a procesos metabólicos que involucran a las raíces y a los microorganismos en el suelo, lo cual da lugar a la producción de ácido carbónico y a ácidos orgánicos débiles (Baird C., 2001).

7.4 Interacción de los Metales Pesados en el Suelo y los Sedimentos

El último lugar donde son depositados los metales pesados, y muchos compuestos orgánicos tóxicos, es su depósito y entierro en suelos y sedimentos. 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).

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 reservorio de agua puede recontaminar 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). La toxicidad de los metales depende no sólo de su concentración, si no también de su movilidad y reactividad con otros componentes del ecosistema (Hostynek J.J., 2003).

7.5 Absorción de Metales Pesados por las Plantas

Por siglos, la capacidad casi mágica de plantas ha fascinado al hombre, de crecer y de reproducirse en el más simple de los materiales, luz del sol, aire, agua y minerales. Como parte de este acto de adsorción, las plantas requieren raíces para adquirir los minerales esenciales tales como hierro, cobre, níquel, cinc y selenio del suelo. Aunque estos elementos son esenciales, son también potencialmente tóxicos, así que las plantas poseen la bioquímica compleja para controlarlos. Por las razones que no están todavía claras, las plantas también tienen la capacidad de adquirir y de desintoxicar elementos no esenciales tales como arsénico, cadmio, cromo y plomo (Salt D.E, Prince R.C., Pickering I.J., 2002).

7.6 Interacciones entre Metales y Organismos Acuáticos

Para la mayoría de los organismos la exposición a metales pesados, por encima de una concentración umbral, puede ser extremadamente tóxica y ecotoxicológica en los ambientes acuáticos son: Hg, As, Cr, Pb, Cd, Ni y Zn. Los iones de estos elementos suelen penetrar la célula a través de los mismos sistemas de transporte que utilizan otros cationes metálicos fisiológicamente importantes (Ca, Mg, Cu, Zn). Dentro de la red trófica, los organismos fotosintetizadores o productores son las principales vías de acceso de los metales pesados hacia los consumidores, incluido el ser humano (Moreno S.R., 1999).

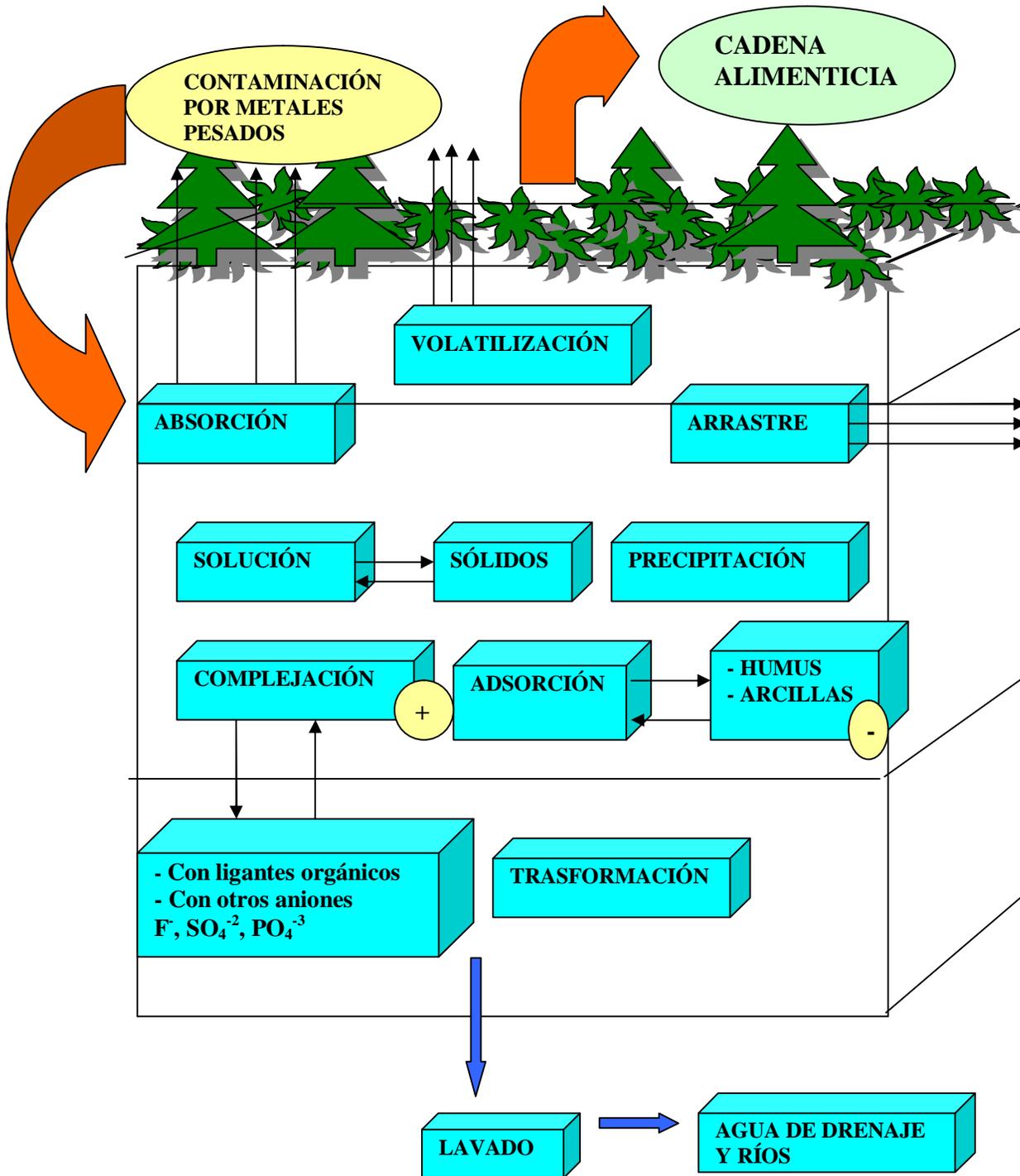


Figura 7.1 Dinámica de los metales pesados en el suelo (Solano Marín M.A., 2005).



La captación y toxicidad de los metales pesados para los organismos acuáticos están influidas no sólo por su concentración; también son relevantes el tiempo de exposición y otros factores bióticos y abióticos del ambiente (Castañé P.M., 2003). En la figura 7.1 podemos visualizar cómo es la dinámica que pueden tomar los metales para movilizarse en el medio ambiente, a través de varios mecanismos de transporte anteriormente descritos.

7.7 Factores que Afectan la Movilidad de los Metales

En el medio ambiente podemos encontrar diversos factores que pueden afectar la movilidad de los metales pesados los cuales los podemos dividir en abióticos y no abióticos. Los factores abióticos se dividen en dos grupos que son:

7.7.1 Factores Abióticos Inherentes al Metal

En los que se encuentran la naturaleza del metal, su abundancia de disponibilidad en el medio, su estado molecular específico y su tiempo de permanencia en el sistema (Rosas R.H., 2001).

7.7.2 Factores Físicoquímicos Ambientales

La movilización es relativa a todos estos factores pero especialmente a aquellos que afectan la transferencia desde fases sólidas a líquidas. Los mecanismos por los cuales los elementos traza de los suelos contaminados pueden ser movilizados son acidificación, condiciones redox, materia orgánica, temperatura e iones inorgánicos (Solano M.M., 2005).

7.7.2.1 Acidificación

Se puede afectar a la especiación y a la movilidad de muchos metales, resultado de la oxidación de sulfuros minerales y precipitados y de fertilizantes de NH_4^+ , por la fijación biológica de nitrógeno, por precipitación atmosférica ácida (SO_x y NO_x) sobre los suelos, por descomposición de materia orgánica, por agotamiento de bases por lixiviación y por



vertidos de contaminantes ácidos. Este factor juega así mismo un papel importante en las interacciones de los metales pesados con parámetros como la dureza del agua (principalmente carbonatos), con compuestos orgánicos. Los cambios de pH pueden influir fuertemente en la adsorción o liberación de cationes por las sustancias orgánicas (Rosas R. H., 2001).

7.7.2.2 Condiciones Redox

El potencial redox de un ambiente dado influye sobre los fenómenos de especiación metálica. Los equilibrios redox están controlados por la actividad de electrones libres en el medio, que a su vez vienen definidos por el potencial redox (Rosas R.H., 2001). Condiciones oxidantes pueden causar la oxidación y disolución de sulfuros insolubles. A la inversa, condiciones reductoras pueden conducir a la disolución de óxidos y a la liberación de sus elementos traza coprecipitados en la solución. Fortísimas condiciones reductoras también darán lugar a la precipitación de sulfuros insolubles de elementos traza (Lester, Jhon N., 1987). El potencial redox puede influir en los procesos de adsorción de los contaminantes.

7.7.2.3 Materia Orgánica

Los ligantes orgánicos son constituyentes químicos que se combinan con los metales en un complejo químico y alteran la distribución de los metales pesados; se produce por regla general una disminución de los niveles disueltos y un aumento de la concentración de metales en forma coloidal en suspensión así como en sedimentos (Solano M.M., 2005 y Rosas R. H., 2001).

7.7.2.4 Temperatura

Influye sobre la solubilidad de los metales y al igual que el contenido de oxígeno disuelto afecta de forma decisiva tanto a la distribución como al estado fisiológico de la



biota del sistema acuático del que va a depender la respuesta frente a lo tóxico (Rosas R. H., 2001).

7.7.2.5 Composición de Iones Inorgánicos

Presentes en las aguas, tanto aniones como cationes, tienen una gran influencia sobre la toxicidad de los metales pesados, debido a la formación de compuestos insolubles como carbonatos o la adsorción sobre carbonato cálcico y en los suelos que pueden tener un marcado efecto en la adsorción de elementos traza y su incorporación en complejos inorgánicos solubles e insolubles. Hay cuatro tipos de efectos: competición por los sitios de adsorción (por ejemplo, Ca^{2+} y Zn^{2+} inhibiendo la adsorción de Cd^{2+}), formación de complejos solubles (con aniones como Cl^- y SO_4^{2-}), formación de compuestos insolubles como $\text{Pb}_2(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$, efectos de fuerza iónica, de manera que incrementos en la fuerza iónica de la solución del suelo como resultado de la contaminación, aplicación de fertilizantes o salinidad puede conducir a una adsorción reducida y a la desorción de metales de lugares de la superficie (Solano M.M., 2005 y Rosas R. H., 2001).

7.8 Factores Bióticos en el Ambiente que Afectan la Movilización de Metales Pesados

El comportamiento de los metales pesados se ve afectado por factores biológicos que intervienen en la solubilización e insolubilización de elementos inorgánicos, alteración de minerales y formación de depósitos.

La especiación de un metal puede deberse a la acción ejercida por determinados organismos sobre los metales. La actividad metabólica de los microorganismos juega un papel importante en la movilidad de los elementos tóxicos en el medio ambiente. Debido a la acción de algunas cepas bacterianas o a la de algunos organismos que pueden aparecer en el medio, especies metálicas más o menos móviles, tóxicas y bioasimilables para la biota de niveles tróficos superiores que las pre-existentes (Lester, Jhon N., 1987).



La insolubilización y acumulación de metales pesados puede asociarse con la biodegradación de los ligantes orgánicos que forman los complejos órgano-metálicos solubles. El metal puede ser precipitado como hidróxido o absorbido por los microorganismos que en función de su tamaño y composición de sus paredes celulares actúa como activos orgánicas (Rosas R. H., 2001).

7.8.1 Biodisponibilidad

La biodisponibilidad se define como la fracción del metal que puede interactuar con un organismo biológico y ser incorporado a su estructura. Como causa de tal asimilación puede causar un efecto negativo o positivo (Pérez G. G 2005).

La toxicidad de los metales pesados es muy alta. Su acción directa sobre los seres vivos ocurre a través del bloqueo de actividades biológicas, es decir, la inactivación enzimática por la formación de enlaces entre metal y los grupos-SH (sulfidrilos) de las proteínas, causando daños irreversibles en los diferentes organismos. Para que los metales pesados puedan ejercer su toxicidad sobre un ser vivo, éstos deben de encontrarse disponibles para ser captados por éste, es decir que el metal debe estar disponible (Vullo D.L., 2003).

7.8.2 Biolixiviación

Por intermedio de acción microbiana, los metales presentes en los minerales resultan extraídos en la fase acuosa. Desde el punto de vista de la biorremediación, el biolixiviado puede utilizarse dentro de la perspectiva de la hidrometalurgia, recuperando metales a partir de materiales sólidos contaminados como suelos, cenizas resultantes de quema de desechos, sedimentos acuáticos, etc. (Lyman W.J., 1995).

Pero como era de esperar, existen otros microorganismos en la naturaleza capaces de lograr una solubilización efectiva de metales tales como Mn, Fe, Zn, Cd y Pb a pH mayores a través un mecanismo diferente. Se ha comprobado que este mecanismo ocurre a



través de la liberación de compuestos orgánicos capaces de acomplejar y así solubilizar metales, tales como ácidos carboxílicos o los compuestos llamados sideróforos (Vullo D.L., 2003).

7.8.3 Microorganismos y Metales Pesados

Todas las interacciones entre los microorganismos y los metales u otros elementos como el carbono, nitrógeno, azufre y fósforo son componentes fundamentales de ciclos biogeoquímicos (Vullo D.L., 2003). Dependiendo de sus estados de oxidación que se presente un metal y la especie que este conformando, un microorganismo puede realizar dos transformaciones posibles. Una correspondería a la movilización del metal, es decir el pasaje de un estado insoluble inicial (metales asociados a suelos, sulfuros u óxidos metálicos) correspondería a una fase sólida. Este proceso se le conoce como lixiviación microbiana. El otro corresponde a la inmovilización del metal, es decir el pasaje de un estado soluble inicial en fase acuosa a uno insoluble final en fase sólida (Lyman W.J., 1995).

Dentro de la amplia diversidad microbiana, existen microorganismos resistentes y microorganismos tolerantes a metales. Los resistentes se caracterizan por poseer mecanismos de destoxificación codificados genéticamente, inducidos por la presencia del metal. En cambio, los tolerantes son indiferentes a la presencia o ausencia de metal. Tanto los microorganismos resistentes como tolerantes son de particular interés como captadores de metales en sitios contaminados, debido a que ambos pueden extraer los contaminantes. La resistencia o tolerancia experimentada por microorganismos es posible gracias a la acción de diferentes mecanismos, ver figura 7.2. Estos fenómenos son: biosorción, bioacumulación, biomineralización, biotransformación y quimiosorción mediada por microorganismos (Vullo D., 2003).



7.8.3.1 Biosorción

Los microorganismos utilizados como biosorbentes, aislados a partir de ecosistemas contaminados, retienen los metales pesados a intervalos de tiempo relativamente cortos al entrar en contacto con soluciones de dichos metales. La biomasa capaz de participar en estos procesos es fácilmente extraíble de sistemas acuosos como cursos de aguas o efluentes de diversos orígenes, por lo que el proceso global de biorremediación sería rentable. Los fenómenos de biosorción se caracterizan por la retención del metal mediante una interacción fisicoquímica del metal con ligantes pertenecientes a la superficie celular.

7.8.3.2 Bioacumulación de Metales Pesados

Este mecanismo celular involucra un sistema de transporte de membrana que internaliza al metal pesado presente en el entorno celular con gasto de energía. Algunos ejemplos de este proceso son muy interesantes, como el caso de acumulación de uranio por la bacteria *Pseudomonas aeruginosa*, el cual fue detectado íntegramente en el citoplasma, al igual que en la levadura *Saccaromyces cerevisiae* (Vullo D., 2003).

Las concentraciones de muchos metales pesados que encontramos en el agua de consumo son, habitualmente, pequeñas y no causan problemas directos a la salud. Como es el caso de los compuestos orgánicos tóxicos, las cantidades de metales que ingerimos a través de los alimentos son usualmente, mucho más preocupantes que las atribuidas al agua de consumo (Baird C., 2001).

7.8.3.3 Biomineralización

Los microorganismos son capaces de precipitar metales y radionuclidos como carbonatos e hidróxidos, mediante un mecanismo de resistencia codificado en plásmidos. Este mecanismo aparece por el funcionamiento de una bomba que expulsa el metal tóxico presente en el citoplasma hacia el exterior celular en contracorriente a un flujo de H^+ hacia



el interior celular. Esto produce una alcalinización localizada sobre la superficie celular externa y por lo tanto la precipitación del metal pesado.

7.8.3.4 Biotransformación

Este es un proceso que involucra un cambio químico sobre el metal pesado, como por ejemplo en el estado de oxidación o metilación. Esta transformación biológica de los metales pesados que resultan tóxicos mediada por enzimas microbianas puede dar como resultado compuestos poco solubles en agua o bien compuestos volátiles (Vullo D.L., 2003).

7.8.3.5. Quimiosorción

Son aquellas reacciones en donde los microorganismos biomineralizan un metal, formando un depósito primario.

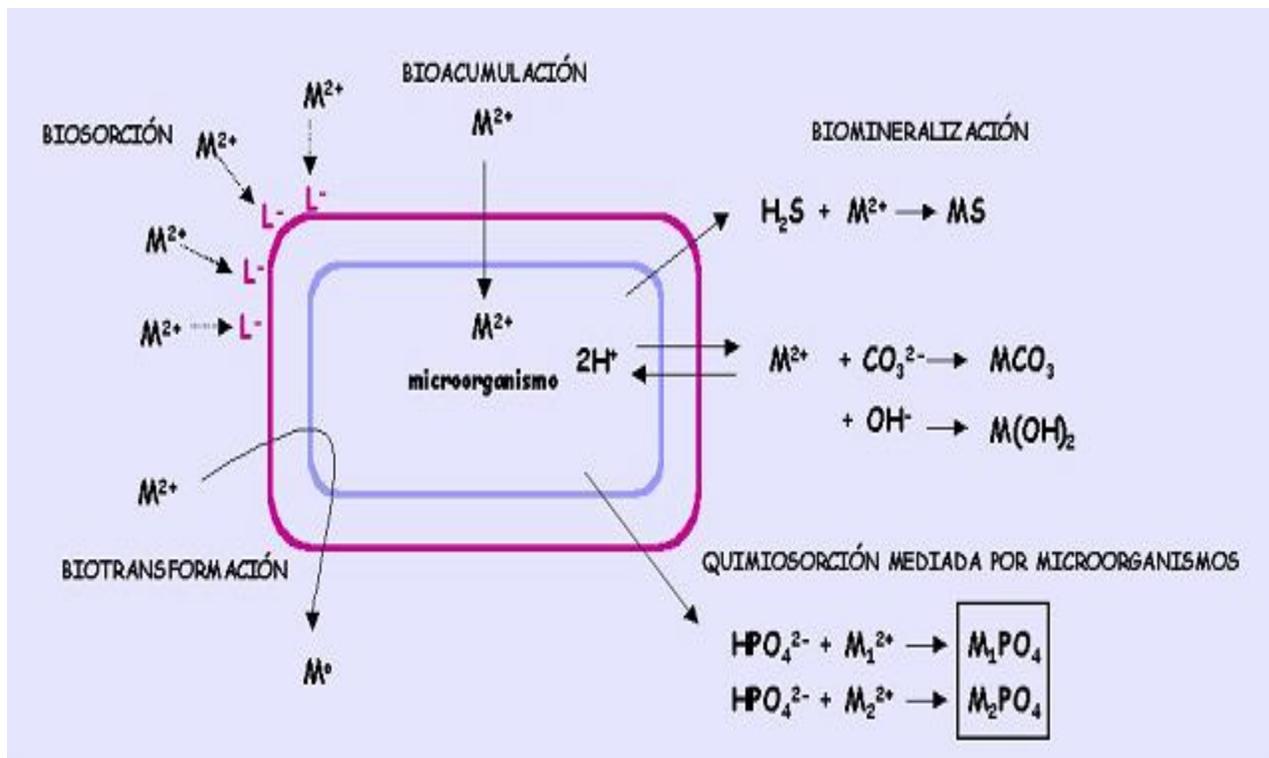


Figura 7.2 Factores de adsorción y desorción que hay en las células para entrada y salida de iones (Vullo D.L., 2003).



Capítulo VIII

Descripción de la Zona Estudiada

8.1 Municipio de Naucalpan

Naucalpan tiene una extensión territorial de 149.86 kilómetros cuadrados, tiene una población de 821,442 habitantes (INEGI., 2005). Tiene una altitud entre 2258 a 3650 metros sobre el nivel del mar. El municipio está ubicado en el Valle de México en la parte meridional, al noroeste del D.F., limita al norte con Atizapán de Zaragoza, Tlalnepantla de Baz y Jilotzingo; al sur con Huixquilucan; al este y sureste con el Distrito Federal. Figura 8.1 y figura 8.2



Fig. 8.1 Ubicación del Municipio de Naucalpan dentro del Estado de México.



Fig. 8.2 Localización del municipio de Naucalpan dentro de la zona urbana en donde se realizó la investigación.

8.1.1 Economía

Naucalpan está considerado como uno de los municipios más ricos del país; en la zona colindante con el Distrito Federal se ubican un sinnúmero de industrias pequeñas y medianas; entre las que se pueden mencionar laboratorios farmacéuticos, industria de autopartes, industria química, manufactura de textiles y de inyección de plásticos. Por otro lado, el sector comercial y de servicios es importante y en los últimos 20 años ha tenido un gran desarrollo, iniciado con la apertura del centro comercial Plaza Satélite (Gutiérrez A. P., 1997).

En 1993 los establecimientos económicos eran 17,860: de la industria manufacturera 1,913; comercios 9,658 y 6,289 de servicios; en 1995 había 4 establecimientos de hospedaje temporal: 2 de cuatro estrellas, uno de dos estrellas y uno de clase económica; 4 establecimientos de alimentos y bebidas, 29 agencias de viajes, 12



tiendas Conasupo, 49 tianguis, 37 mercados públicos, un rastro especializado, 43 lecherías Liconsa con una distribución de 120,910 litros de leche diarios, 19 cines y 15 teatros (Gutiérrez A.P., 1997). Estas características nos dan una idea de la gran concentración urbana e industrial que existe en la zona, que a diario contamina el medio que le rodea.

8.1.2 Hidrografía

Seis ríos (entre los que destacan el San Lorenzo o San Juan Totolinga y el **de Los Remedios**), siete presas (las más importantes la de Los Cuartos, Las Julianas, San Miguel Tecamachalco, La Colorada, Los Arcos y El Sordo), doce manantiales, tres acueductos entre los cuales destaca el Acueducto del río Lerma (Poeri C. Z. R., 1987).

8.2 Río de Los Remedios

El caótico proceso de urbanización de la zona metropolitana del valle de México ha implicado graves problemas para el ambiente, lo que se manifiesta en la persistente expansión urbana que invade terrenos, aun de zonas federales. Por esto, el papel de los productores de suelo urbano, tales como promotores inmobiliarios, de asentamientos irregulares y las propias industrias, ha sido el ejercer diversas clases de presiones sobre el Río de Los Remedios, incrementando las aguas y los desechos que transitan por su cauce, ver figura 8.3 (CONAGUA., 2006).



Fig.8.3 Río de Los Remedios, Naucalpan Edo. de México.

Mientras que muchas ciudades del mundo han centrado su desarrollo en los ríos que forman parte de su territorio y en la actualidad obtienen diversos beneficios de aquellos, en México los utilizamos como sitio para tirar desechos de todo tipo (CONAGUA., 2006).

El cauce del Río de Los Remedios tiene una longitud total de 15.7 Km, de los cuales 4.1 Km se encuentra en el Distrito Federal y el resto en el Estado de México; recibe las descargas reguladas del Vaso del Cristo y drena parte de la zona de Naucalpan, Atizapán, Tlalnepantla y el Distrito Federal. Durante la temporada de estiaje únicamente transitan aguas residuales, incrementando su gasto durante la temporada de lluvias debido a las aportaciones pluviales. Inicia en el Vaso del Cristo y recoge las aportaciones de los ríos Tlalnepantla y San Javier que son capturadas por el Emisor del Poniente o el Emisor Central. Actualmente descarga en el Gran Canal a la altura del Km 9, y puede ser aliviado hacia el Interceptor Central del Sistema de Drenaje Profundo.

De las aguas residuales que se producen en el D.F y la zona Metropolitana una parte se utiliza para riego en los Estados de México e Hidalgo; en donde se manejan los cultivos de alfalfa, col, chile, fríjol, lechuga, avena, pepino, entre otros. Industrias como la



automotriz, hulera y la química entre otras, contienen en sus descargas de aguas residuales metales pesados como contaminantes (plomo, mercurio, cromo, arsénico, etc.), éstas al fluir al drenaje municipal incrementan el nivel de contaminación y por consiguiente se hace más costoso el tratamiento de las mismas, de este modo el agua destinada para el riego, esta provocando el detrimento de la salud pública.

Ante esta problemática es necesario tomar acciones encaminadas al análisis y control de metales pesados en las plantas de tratamiento de agua; para aumentar la calidad del agua tratada y la calidad en la salud pública.

El panorama que se observaba en el 2003, antes de la rectificación, correspondía no a la de un río sino a la de un tiradero a cielo abierto en donde además de basura, podíamos observar desde animales muertos, llantas, desperdicios de batería de vehículos automotores, desechos de carrocerías, grandes cantidades de envases plásticos, etc., lo que propiciaba la proliferación de fauna nociva, como ratas, jaurías de perros transmisores de la rabia, moscas, mosquitos, etc. (CONAGUA., 2006).

El Río de Los Remedios, junto con otros arroyos intermitentes funcionan como colectores de aguas negras y presentan un alto grado de contaminación al pasar por zonas habitacionales e industriales, la calidad del agua se va deteriorando paulatinamente, en virtud de las numerosas descargas de aguas residuales que se incorporan en su trayecto y que contienen una concentración importante de sustancias nocivas como metales pesados, solventes, ácidos, grasas y aceites, entre otros.

El Río de los Remedios es una vía de drenaje artificial que drena el norte de la zona metropolitana, incluyendo zonas del Distrito Federal y del Estado. El río de los Remedios recoge las aguas residuales de los ríos Tlalnepantla y San Javier, descargando sus caudales en el Gran Canal de Desagüe.



8.3 El Gran Canal de Desagüe

Es la vía de desagüe más importante del Valle de México. Está formado por un canal de 47.5 km de largo que vértebra el Sistema General de Drenaje del Valle. El Gran Canal drena las aguas del norte, noreste y centro de la zona metropolitana y las dirige hacia sus salidas al norte.

El Gran Canal comienza en el Distrito Federal donde recibe los caudales de los ríos de la Piedad y Consulado, teniendo la mayor parte de su extensión en el Estado de México, donde recibe los aportes provenientes de la cuenca del lago Texcoco. Estas últimas le llegan por medio del Canal de la Draga (emisario del Drenaje General del Valle y del río de la Compañía), del río de los Remedios y del Drenaje Cartagena.

Las aguas del Gran Canal de Desagüe fluyen o son bombeadas hacia el norte y salen del Valle de México por los túneles de Tequisquiac (Túnel Viejo y Nuevo), con capacidades respectivas de 17.5 m³/s y 60 m³/s. Fuera del Valle, estos dos conductos engrosan el caudal del río Salado, que a su vez es afluente del río Tula, tributario principal del río Pánuco, en la vertiente del Golfo de México.

8.4 Partes que constituyen la Planta de Tratamiento de Aguas muestreada para el estudio de Metales Pesados

El proceso de la planta tratadora es continuo, entra agua negra y sale agua tratada con un cierto grado de limpieza. El tratamiento es primario ya que solo se le realiza un tratamiento muy básico como lo vemos en las partes que la constituyen.

8.4.1 Cárcamo de Bombeo

Las aguas negras llegan a un cárcamo de bombeo (pozo), donde se va depositando esta agua, y de aquí es trasladada mediante un conjunto de bombas en un

orden de 40 L x segundo al desarenador para que comience su tratamiento. En la figura 8.4 se observa el pozo o cárcamo donde es almacenada el agua residual antes de ser tratada.



Fig. 8.4 Cárcamo de Bombeo de Aguas Negras de la planta de tratamiento de Naucalpan.

8.4.2 Desarenador

El Desarenador es una estructura diseñada para retener la arena, basura, cabellos, plástico, hilo, fibra, etc., que traen las aguas residuales a fin de evitar que ingresen al proceso de tratamiento y lo obstaculicen creando serios problemas (Babbitt H.E., Baumann R.E., 1975).

El Desarenador cuida de la separación previa de arenas, y otros materiales sólidos, de densidades superiores a las de materias orgánicas, para prevenir la erosión en bombas, la acumulación de sólidos en otros recipientes posteriores, y el taponamiento por depósito en tuberías (Rigola L.M., 1999). En la figura 8.5 podemos observar el desarenador que es utilizado en la planta de tratamiento.



Fig.8.5 Desarenador de la planta de tratamiento de Naucalpan

8.4.3 Aireación

La aireación de las aguas residuales es la aplicación de aire u oxígeno en el agua, en el tratamiento de aguas residuales y de los efluentes de la decantación primaria que son recogidos en un depósito de aireación. Mediante el sistema de aireación se aporta oxígeno en un tanque de lodos activos a la vez que se produce la agitación de los mismos, logrando una mezcla adecuada del agua residual y los lodos (Babbitt H. E., Baumann R. E., 1975).

La aireación por turbinas es la que se ocupa en la planta de tratamiento de agua analizada, ver fig. 8.6. Con ella se consigue una entrada de oxígeno atmosférico por aeración superficial y dispersa el aire comprimido por la acción de cizalladura, producida por la turbina rotativa. Las burbujas de aire que entran por una tubería o tubo perforado, colocado debajo del agitador, se rompen por el efecto de corte de las palas del agitador, que giran a alta velocidad (Fair M.G., Geyer J.C., Okun D.D., 1976).

Una característica importante de las turbinas es su flexibilidad, debido al hecho de que el grado de mezcla está controlado por la potencia suministrada a la turbina y es, en consecuencia, independiente del caudal de aire, controlado por la capacidad del compresor.



Fig.8.6 Aireador de turbinas, planta de de tratamiento de Aguas muestreada.

8.4.4 Clarificador o Filtro Biológico

Esta formado por un reactor, en que se ha situado un material de relleno sobre el cual crece una película de microorganismos aerobios con aspecto de limo. Moderadamente, se utiliza como relleno material plástico de una configuración especialmente desarrollada, de alta superficie y poco peso por unidad de volumen aparente. El agua residual se descarga en la parte superior mediante un distribuidor, rotativo cuando se trata de un tanque circular. A medida que el líquido desciende a través del material relleno entra en contacto con la corriente de aire ascendente y los microorganismos. La materia orgánica se descompone lo mismo que con los lodos activos, dando más material celular y CO_2 (Colin B., 2001).



Los filtros percoladores no permiten reducir de forma económica, más allá del 85% de la materia orgánica, pero son más fáciles de operar que un sistema de lodos activos y en cambio permiten el pretratamiento, a rendimientos de solamente 40 a 65%, las cargas horarias por metro cuadrado son muy superiores. Cuando se pretenden buenos rendimientos, la operación se puede regular por recirculación de parte del líquido tratado, combinado con una distribución superficial y una altura del lecho adecuadas. En la Fig. 8.7 se muestra un clásico clarificador utilizado en muchas plantas de tratamiento de aguas.



Fig. 8.7 Clarificador en la planta muestreada.

8.4.5. Proceso de Lodos Activados que se Producen en la Planta

El proceso de lodos activos consiste en poner en contacto en un reactor el agua residual, la biomasa y el oxígeno disuelto. Aunque el aporte de oxígeno se calcula en función de la carga orgánica del vertido hay que verificar que su introducción se realiza añadiendo la energía suficiente para la mezcla de los componentes (Fair M.G., Geyer J.C., Okun D.D., 1976). Después de un tiempo de reacción suficiente, la masa de lodos activados se lleva a un decantador secundario donde se separa el agua clarificada. Parte de los lodos



sedimentados se devuelven al reactor para mantener la concentración de la biomasa requerida y el resto se elimina como purga. La proporción de fangos que hay que recircular es un parámetro fundamental para el control de una depuradora biológica. Con el se regula la carga másica de trabajo del reactor al reintroducir solamente aquella cantidad de células necesaria para mantener la relación de carga especificada.

8.4.6 Desinfección

Tanque de "**desinfección**" tiene cuatro secciones o mamparas, es el más chico, en este paso si se utiliza un producto químico que es el cloro, por su efectividad para matar todos los gérmenes que vengan revueltos con el agua y algunos virus. El tanque tiene una conducción hacía una cisterna en donde se depositará el agua ya tratada, esta agua deberá cumplir con las Normas Oficiales Mexicanas de aguas tratadas. En la figura 8.8, se muestra el cuarto donde se controla la desinfección del agua tratada (Colin B., 2001).



Fig. 8.8 Cuarto de Cloración de la planta de tratamiento muestreada.

8.4.7 Almacenado y Distribución

En la cisterna de la planta se deposita el agua tratada para posteriormente regar al parque municipal, campos de fútbol ó se distribuye en pipas para su rehúso, ver figura. 8.9.



Fig. 8.9 Cisterna de Almacenamiento de Agua tratada.

Los beneficios de una planta tratadora es que podemos rehusar el agua que hasta ahora se desperdiciaba, el agua tratada se utiliza para el riego de áreas verdes, limpieza, servicio de auto lavado, en viveros, en el sector agrícola, excepto para consumo humano. En la figura 8.10 se observa el parque Naucalli en donde es regado todos los días con el agua de la planta de tratamiento evaluada.



Fig. 8.10 Parque Municipal Naucalli, visto desde la planta de tratamiento que esta al cruzar la calle.

En el Anexo 5 se muestra el diagrama de la planta de tratamiento de aguas donde se puede ver su estructura, con todas sus partes que la componen además de cómo esta constituida en forma general.



Capítulo IX

Metodología Experimental

9.1 Toma de Muestras y Transporte

Se inició el estudio con un muestreo diario de tres veces al día durante dos semanas, de lunes a domingo en dos diferentes puntos de monitoreo de la planta, en el reactor de recirculación de lodos y en el efluente final. Se tomaron muestras compuestas que estaban formadas por una mezcla de muestras tomadas en diferentes momentos (en la mañana, tarde y noche).

Se hizo el muestreo donde el lodo residual estaba en recirculación y tenía una corriente máxima al igual que del agua del efluente que se analizó. La toma del agua y lodo se realizó en recipientes de polietileno de alta densidad lavados en el laboratorio con ácido nítrico diluido y tres veces con agua del río a muestrear, evitando toda contaminación accidental, con un transporte correcto al laboratorio y una conservación en condiciones satisfactorias.

Las muestras de lodo se tomaron directamente a la salida del reactor aerobio de la planta en recipientes de plástico y se trasladaron al laboratorio en una hielera a 4 °C, con objeto de evitar posibles alteraciones químicas de las mismas durante el tiempo que transcurre entre la toma de muestra y su análisis. Como la calidad de las aguas negras 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 ácido Nítrico (HNO_3), 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). Todas las extracciones se hicieron por duplicado. Se uso agua desionizada para preparar las soluciones y enjuagar el material que se ocupó. Todas las muestras se guardaron a 4 °C hasta su análisis.



Se empleo el equipo de Absorción Atómica (Marca VARIAN SpectrAA Atomic Absortion Spectrometrer Modelo 220 Fasf Secuential) para determinación de metales pesados en el efluente final y lodo residual del río de Los Remedios. Se llevo a cabo el análisis de acuerdo al método descrito en APHA, AWWA, WPCFE, 1992 Y NOM-AA-51-1981 y la cuantificación mediante el programa de computo denominado “GBC AVANTA, VER.1.31”. La cantidad de metales pesados se comparó con la Norma Oficial Mexicana (NOM-ECOL-001-1993).

9.2 Procedimiento Experimental

Un método para evaluar la forma del metal en lodos de aguas residuales se determina recuperando los metales usando 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. Está técnica permite desarrollar un procedimiento secuencial de fraccionamiento capaz de determinar la cantidad y formas del metal en el lodo (Stover R.C., 1996). En el procedimiento experimental que se presenta, se recogen las condiciones experimentales y los reactivos empleados en la extracción secuencial.

9.2.1 Reactivos

- KNO_3 0.1 M
- KF 0.5 M
- $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 0.1 M
- EDTA 0.1M
- HNO_3 1 M
- HCl 0.5 N
- Agua desionizada

9.2.2. Material

- Vasos de precipitados de 1L, 0.5L, 100 ml
- Matracas aforados de 100 ml
- Tubos de centrifuga
- Matracas de 250 ml
- Material de vidrio en general



9.2.3 Equipo

- Agitador de prueba de jarras
- Centrifuga
- Balanza de precisión
- Espectrofotómetro de Absorción Atómica (EAA)
- Refrigerante

9.3 Extracciones sucesivas

Para evaluar la forma de los metales en lodos fue necesario desarrollar un esquema de fraccionamiento preciso, 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. Entre cada extracción, el lodo residual se lavó con 25 ml de 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.

9.3.1 Primera Extracción

Para obtener metales intercambiables se realizó una extracción con solución de KNO_3 1M, en equipo de prueba de jarras con agitación a 20-25 rpm, durante 16 hr, en una relación 50:1. Posteriormente se centrifugó a 10,000 rpm por 10 min. El sobrenadante se almacenó a 4 °C para posteriormente la determinación de los metales y los sólidos se recuperaron con 25 ml de agua desionizada, centrifugándose a 10,000 rpm por 10 min., el sobrenadante se desechó y los sólidos se pasaron a la siguiente extracción.



9.3.2 Segunda Extracción

La segunda extracción fue para metales sorbidos y se utilizó con KF 0.5 M (pH 6.5), con agitación a 20-25 rpm, durante 16 horas y en una relación 80:1. Al término, 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 minutos. El sobrenadante se desechó y los sólidos pasaron a la siguiente extracción.

9.3.3 Tercera Extracción

Esta extracción es para metales con puentes orgánicos. Se realizó con $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 0.1 M, con agitación a 20-25 rpm, durante 16 horas, y en una relación de 80:1. Se centrifugó a 10,000 rpm por 10 minutos. El sobrenadante se almacenó a 4 °C y a los sólidos se les añadió 25 ml de agua. Se centrifugó de nuevo a 10,000 rpm por 10 minutos. El sobrenadante se desechó y los sólidos pasaron a la siguiente extracción.

9.3.4 Cuarta Extracción

Se realizó para obtener los metales con puentes de carbono. Se utilizó EDTA 0.1 M (pH = 6.5), se agitó a 20-25 rpm, durante 8 horas, en una relación 80:1. Se centrifugó a 10,000 rpm por 10 minutos. El sobrenadante se almacenó a 4 °C y a los sólidos se les adicionaron 25 ml de agua. Se centrifugaron de nuevo a 10,000 rpm por 10 minutos. El sobrenadante se desechó y los sólidos pasaron a la siguiente extracción.

9.3.5 Quinta Extracción

Esta Extracción se usó para la obtención de los metales con puentes de carbono (doble extracción). Se aplicó EDTA 0.1 M, con agitación durante 8 horas y en una relación de 80:1. 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.



9.3.6 Sexta Extracción

Para metales en fracción de sulfuros se aplicó la extracción con HNO_3 0.1 M, con agitación lenta, durante 16 horas, y en una relación 50:1. Se centrifugó a 10,000 rpm por 10 minutos. Se almacenó el sobrenadante a 4 °C y a los sólidos se le adicionaron 25 ml de agua. Se centrifugó a 10,000 rpm por 10 minutos, y se desechó el sobrenadante.

9.3.7 Residuos Finales

Los sólidos que sobraron en la última extracción se guardaron para determinar su concentración total y tomarlos como metales en fase residual, unidos en redes cristalinas y enlaces de sílice difíciles de romper. A estos compuestos se les hizo una digestión con agua regia (HNO_3 y HCl concentrado) para su determinación.

Los contenidos de metales pesados de cada extracción fueron determinados tras la digestión con agua regia por Espectrofotometría de Absorción Atómica. Todas las extracciones se llevaron a cabo por duplicado. Para determinar los contenidos de los metales extraídos de las distintas fases del procedimiento secuencial químico, se prepararon soluciones patrón de cada metal con los mismos reactivos utilizados en cada etapa con objeto de minimizar los efectos de matriz. Se utilizó un blanco para correlaciones de fondo en cada etapa de extracción. Con objeto de verificar la sensibilidad de detección bajo el equipo en las condiciones instrumentales utilizadas, se utilizó el límite de detección como la concentración que origina una señal neta igual a tres veces la desviación estándar del blanco (Esta ya estaba determinada en uso del equipo). En la figura 9.1 se ejemplifica el diagrama de flujo que se utilizó en la especiación química.

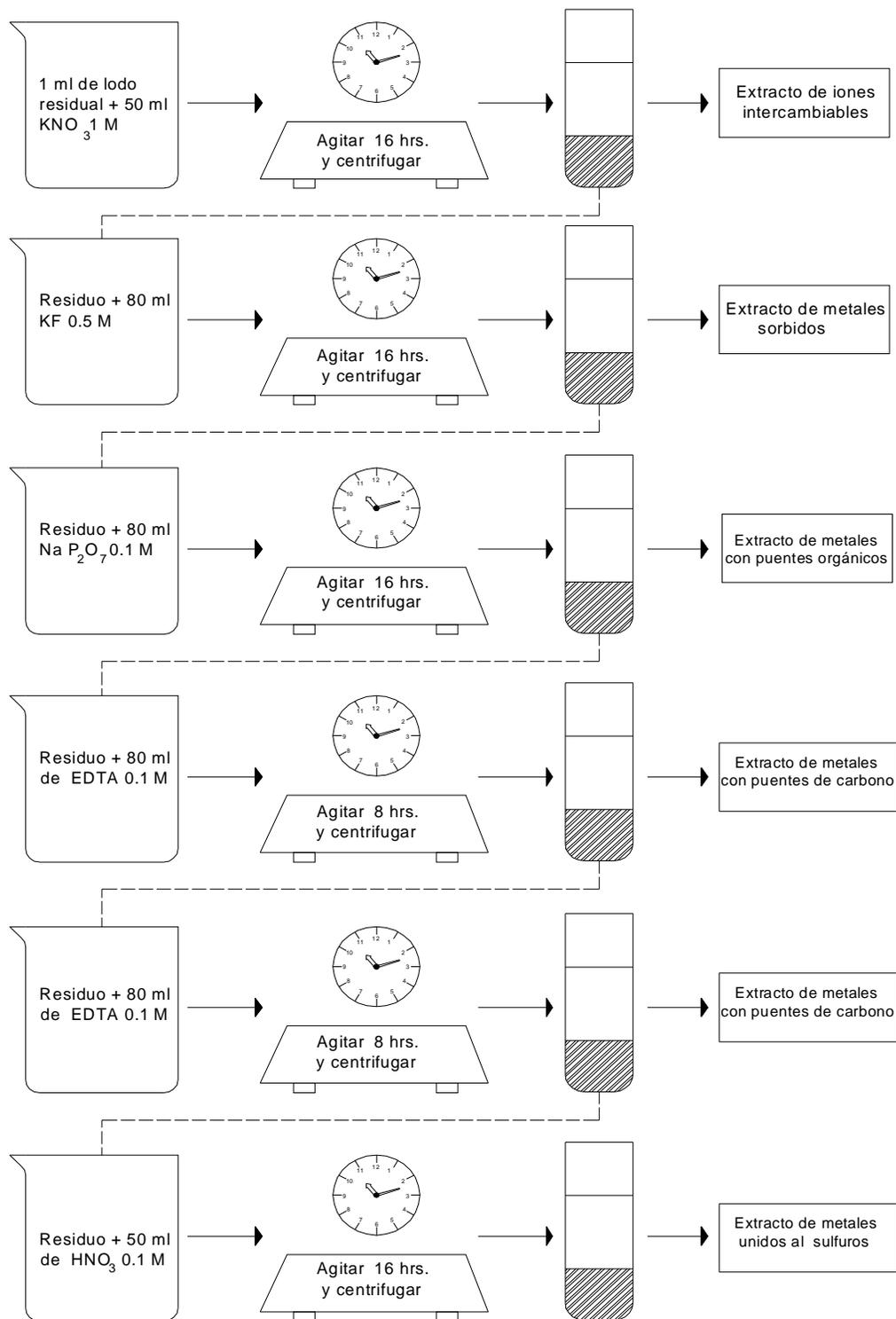


Figura 9.1 Diagrama de las extracciones sucesivas que se llevaron a cabo.



Capítulo X

Resultados y Discusión

Se realizó el estudio de la concentración total de los metales pesados, Cr, Pb, Zn, Cu, As, Cd, y Ni en efluente final del agua tratada para conocer su limpieza o grado de contaminación y entender posteriormente en el estudio de especiación, su movilización en el medio y su posible daño a la salud.

10.1 Determinación de Plomo y Cromo

La tabla 10.1 expone las concentraciones de plomo y cromo en el efluente final del tratamiento primario que se le hace a esta agua residual en la planta de tratamiento estudiada, la tabla arroja concentraciones variables y elevadas que están por encima de los Límites Máximos Permisibles (LMP) según la NOM-ECOL-001-1993.

Tabla 10.1 Concentración total (ppm) en los efluentes finales de M.1 y M.2 de Cr y Pb. Los resultados son el promedio diario de la muestras compuestas tomadas 3 veces al día.

Días	Cr		Pb	
	M.1	M.2	M.1	M.2
1	8.13	7.76	2.10	1.40
2	2.11	11.12	2.10	1.80
3	5.40	9.53	2.40	1.20
4	9.20	13.48	2.10	1.30
5	10.52	14.88	1.80	1.80
6	12.92	15.64	2.10	2.30
7	8.13	15.60	2.40	2.00
Promedio	8.05	12.57	2.14	1.68
L.M.P	1.00		0.50	



Para la determinación de los metales en el efluente, se tomaron 3 muestras por día, los siete días de la semana, por dos semanas, a el conjunto de muestras de la primera semana se nombro M.1 y M.2 para la segunda. Los resultados de la tabla 10.1 indican que hay presencia constante de estos metales pesados (Cr y Pb) en la parte del río de Naucalpan frente al parque Naucalli. Para conocer si las causas de tales concentraciones son debidas a la contaminación urbana e industrial que existe en esta parte del río, o a otros factores como los naturales, en el análisis de especiación química lo podemos deducir. En la tabla 10.1 se muestran las concentraciones de cromo y plomo en diferentes tiempos de muestreo y como vemos sobrepasan por mucho los valores establecidos en normas ambientales lo que representa un aumento de entre 8 ppm a 12 ppm para el cromo y 2 ppm de concentración de plomo, siendo sus LMP de 1 ppm para el Cr y de 0.5 ppm para el Pb.

10.1.1 Cromo

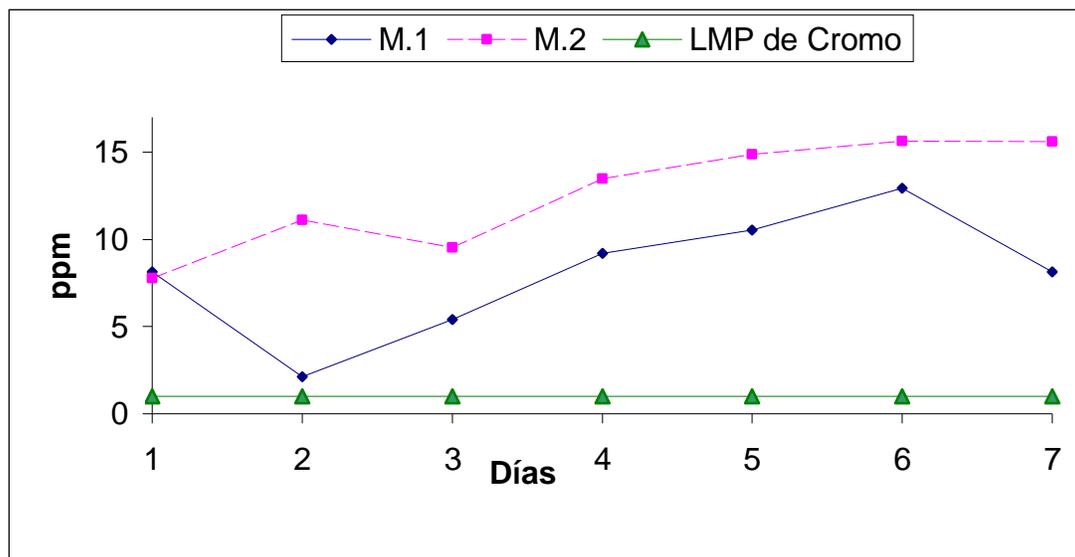


Figura 10.1 Concentración total de cromo en el efluente final en M.1 y M.2 vs los días transcurridos.

Como se puede observar en la Figura 10.1 la cantidad de cromo encontrada en el análisis es elevada de acuerdo a la NOM-ECOL-001-1993, lo que nos lleva a pensar que la actividad industrial en las áreas cercanas que emiten sus descargas a esta parte del río de Los Remedios, está eliminando en forma indiscriminada cromo a las mismas. La gráfica



muestra las concentraciones de cromo altas y constantes a través del transcurso de los días en que se analizaron las aguas residuales. Por lo anterior, es posible decir que esta agua al final del tratamiento no puede ser empleada como agua potable, debido a que estos metales durante el tratamiento del agua residual se eliminan en muy bajas cantidades durante el proceso.

Podemos comparar nuestros resultados con otros hechos a las aguas residuales de municipios vecinos. En el río San Javier evaluado respecto a sus metales pesados que esta ubicado en el Norte del D.F, se encontraron cantidades superiores de cromo hasta 6 ppm, arriba de los LMP (Melo S. F., 2000), concentraciones muy similares a las encontradas en esta investigación. Es importante resaltar que es la zona de Lechería (Cuautitlán Izcalli) se siguen encontrando cantidades muy elevadas de cromo en donde antes estaba la Compañía Cromatos de México (Albert L.A., 1998). Estas comparaciones nos permiten conocer que las concentraciones de cromo en el medio ambiente de estos municipios están altas.

10.1.2 Plomo

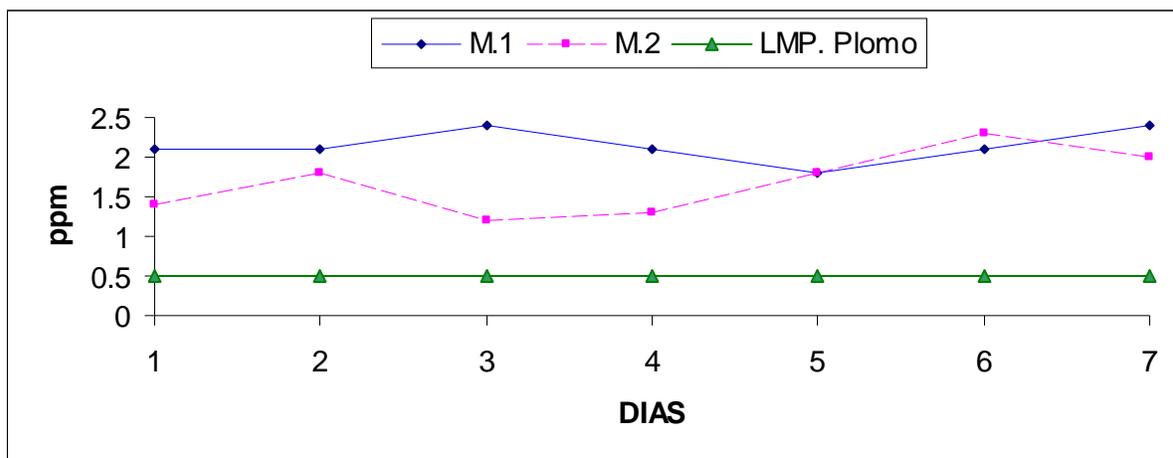


Figura 10.2 Concentración total de plomo en el efluente final en las M.1y M.2 vs días transcurridos.

En la figura 10.2 se observa como la concentración de plomo permanece alta, muy por arriba de los límites permitidos por la NOM-ECOL-001-1993. Esto puede ser debido a la deposición del plomo del aire contaminado por este metal, a la contaminación de talleres



clandestinos, además, de las industrias que desechan sus efluentes sin tratamiento a las aguas del río de Los Remedios. Podemos afirmar que origen del plomo es antropogénico, originado por la actividad humana que esta sentada en este municipio. En diferentes partes del mundo estudios en aguas residuales reportan altas concentraciones de plomo, principalmente en ciudades con alta concentración urbana e industrial (Centeno A.J., 1997). Los resultados los podemos comparar con los encontrados en el estudio de la planta de tratamiento de aguas de Cuautitlán (Cruz O.M., 2005). Donde se encontraron concentraciones en el efluente final de hasta 7 ppm de plomo, más altos que los resultados obtenidos en esta investigación.

10.2 Metales Pesados en Baja Concentración Zn, Cd, Cu, As y Ni

Estos metales se analizaron, y se encontró su presencia en muy bajas concentraciones, por abajo de lo especificado por las leyes ambientales que regulan la calidad de las aguas residuales, en la tabla 10.2 se presentan los resultados de los análisis de M.1 y M.2.

Tabla 10.2 Concentración ppm en los efluentes finales de M.1 y M.2 de los metales de Zn, Cd, Cu, Ni y As, comparados con los Límites Máximos Permitido (LMP) por NOM-ECOL-001-1993.

DIAS	Zn		Cd		Cu		Ni		As	
	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)
	M.1	M.2	M.1	M.2	M.1	M.2	M.1	M.2	M.1	M.2
1	0.804	0.664	0.030	0.018	0.030	0.034	0.047	0.040	0.0007	0.0007
2	1.022	0.080	0.030	0.014	0.030	0.000	0.012	0.012	0.0007	0.0006
3	0.862	0.468	0.040	0.021	0.030	0.0181	0.047	0.032	0.0008	0.0007
4	0.864	0.846	0.040	0.026	0.040	0.00	0.004	0.003	0.0006	0.0006
5	0.63	0.631	0.040	0.024	0.040	0.000	0.040	0.047	0.0001	0.0006
6	0.267	0.361	0.040	0.023	0.040	0.000	0.011	0.013	0.0	0.0007
7	0.466	0.344	0.050	0.012	0.050	0.050	0.047	0.043	0.0001	0.0008
Media	0.702	0.484	0.0380	0.0197	0.0371	0.0145	0.0297	0.027	0.0004	0.0006
semanal										
L.M.P	20		0.2		4.0		2.0		0.2	

Tales resultados coinciden con estudios hechos en ríos de aguas residuales en México (Castrejón A.J.A., 2002). Donde se examinaron 18 plantas de tratamiento de aguas residuales de diferentes partes el país de los cuales las concentraciones de Zn, Cd, Cu, As, y Ni estaban por debajo de lo permitido por las normas oficiales de calidad de aguas negras.

En los resultados podemos observar que las concentraciones de casi todos estos metales es reducida, sólo el zinc presenta una concentración superior si lo comparamos con los demás metales, aunque por debajo de los L.M.P. Es importante recalcar que aunque están todos los metales en baja concentración hay una presencia constante, esto nos indica que las actividades humanas están contaminando a diario con metales pesados las aguas del río.

En la figura 10.3 se ven las concentraciones de los metales Cd, Cu, Ni y As y su variación entre los dos muestreos, están representados en forma de barras para visualizar mejor su variación en la concentración.

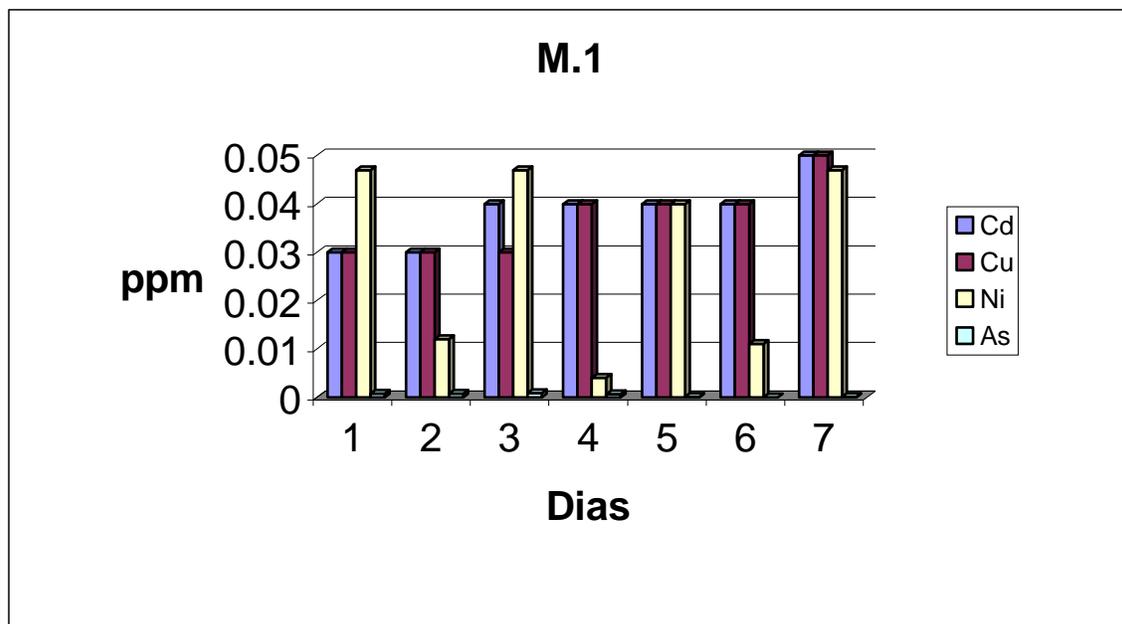


Figura 10.3 Concentración en ppm de Cd, Cu, Ni y As, en los efluentes finales de M.1.

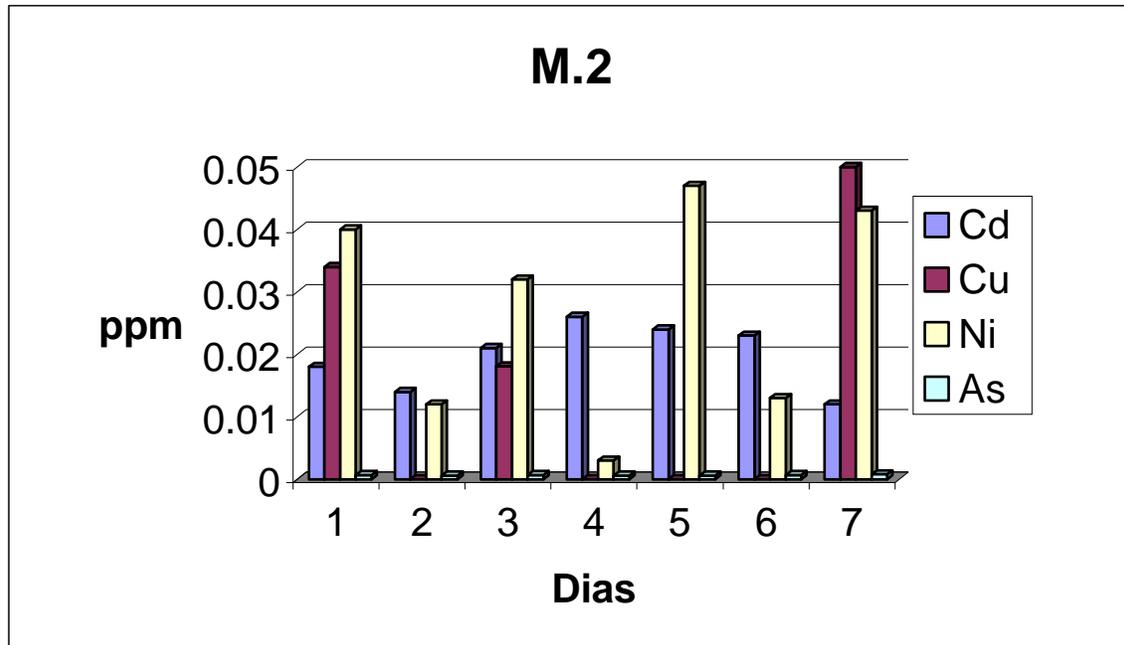


Figura 10.3 Concentración en ppm de Cd, Cu, Ni y As, en los efluentes finales de M.2.

La concentración promedio de los metales pesados en el efluente final se muestra en la figura 10.3 y 10.4 para el zinc. Las concentraciones de Zn, Cd, Cu, Ni y As se encuentran en niveles adecuados, por lo que no representa problemas de toxicidad en río de Los Remedios si lo vemos desde el punto de vista de su concentración total, por esto son importantes los análisis de especiación que nos pueden orientar si un metal se puede movilizar en el medio ambiente dependiendo la forma química en que se encuentre presente.

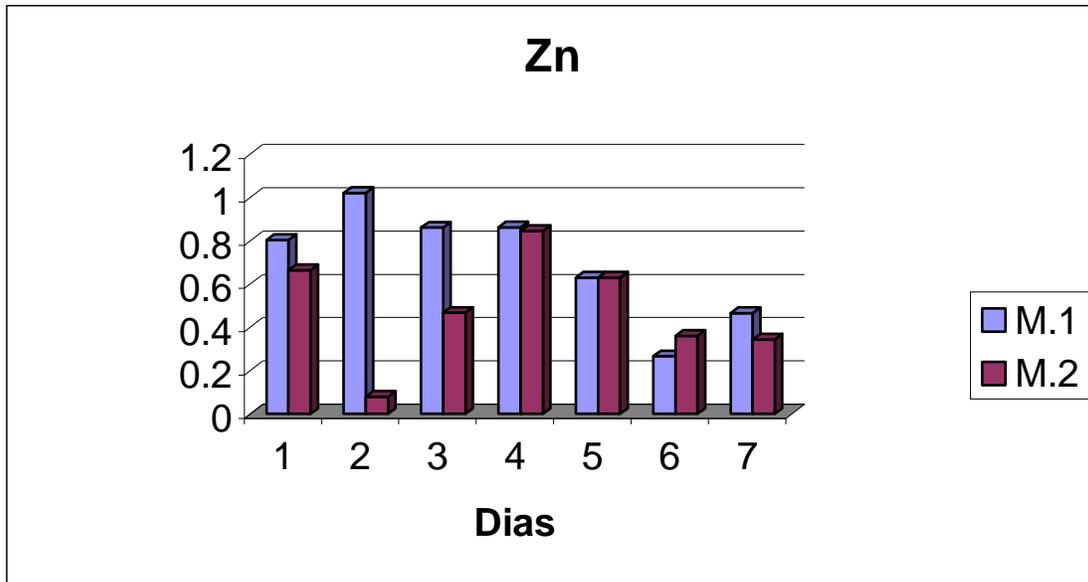


Figura 10.4 Concentración total de Zn (ppm) en el efluente final de M.1 y M.2.

En la figura 10.4 se muestran las concentraciones de zinc y su variación en las dos semanas de muestreo (M.1 y M.2). Siempre encontramos presencia de este metal en el agua.

10.3 Análisis de Especiación de los Metales Pesados

Las muestras fueron tomadas tres veces por día, durante dos semanas formando dos muestras compactas a las que se nombraron como M.1 y M.2. Con el objetivo de obtener la distribución de los metales estudiados en los diferentes componentes de las muestras evaluadas, se ha empleado un procedimiento o esquema de extracción secuencial, cuyos resultados se detallan a continuación. Siguiendo el procedimiento descrito de extracción química selectiva se obtuvieron los resultados que se resumen en las tablas 10.3 y 10.4 que detallan las características de los lodos residuales del río de Los Remedios respectivamente en cuanto a metales pesados. Es importante aclarar que englobamos las fracciones en dos grupos; las móviles e inmóviles para que se comprendiera mejor su posible efecto al medio ambiente. ♦

♦**Fracciones Móviles;** Metales intercambiables, Metales sorbidos, Metales con puentes orgánicos
♦**Fracciones Inmóviles;** Metales ligados a carbono, Metales ligados a sulfuros, Metales residuales.



10.3.1 Especiación de Cromo y Plomo

Los contenidos totales de cromo y plomo expresados como suma de fracciones del proceso secuencial de extracción química se muestran en la tabla 10.3, donde se presentan en una tabla aparte de los otros metales pesados porque estos estuvieron arriba de los L.M.P establecidos en las Normas y por lo tanto es importante su estudio por separado.

Tabla 10.3 Concentración de Cr y Pb en diferentes fracciones químicas contenidas en el lodo activado de M.1 y M.2. [^]

FRACCIONES	Concentración ppm			
	Cr		Pb	
	M.1	M.2	M.1	M.2
F.1	0.5400	0.3010	0.1100	0.0900
F.2	0.7720	0.6020	0.1100	0.0990
F.3	0.7620	0.6000	0.0900	0.1100
F.4	0.8740	0.3010	0.1400	0.2000
F.5	0.8150	0.9190	0.0900	0.1100
F.6	2.7520	3.1000	0.2300	0.3100

En la figura 10.5 y 10.6 se visualizan las gráficas de barras, clásicas en los análisis de especiación, donde se muestran las fracciones más importantes de cromo y plomo que están en fases residual, sulfuros y carbonatos (fases inmóviles) que se encuentran en su mayoría, mientras que en forma de M. intercambiable, M. sorbidos y unidos a materia orgánica (fases móviles), están en menor concentración pero en muy significativo porcentaje. Este estudio de especiación se puede comparar con otros trabajos en donde se encuentra el cromo y plomo mayoritariamente en fases residual y en forma de sulfuros

[^] **F.1** 1ra. Extracción. **Metales intercambiables**, (KNO_3 1 M), **F.2** 2da. Extracción **Metales sorbidos** (KF 0.5 M), **F.3** 3ra. Extracción. **Metales con puentes orgánicos** ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ 0.1 M), **F.4**, 4ta y 5ta. **Extracción. Metales con puentes de carbono** EDTA 0.1 M, **F.5** 6ta. Extracción **Metales en forma de sulfuros** (HNO_3 0.1 M), **F.6** Residuos Finales. **Metales en forma residual**

(Rosas R. H. 2001 y Blandine C., 2006). Estos autores encontraron porcentajes de cromo y plomo en fases inmóviles arriba del 80%, estando la fase residual en mayor concentración.

La suma de las fracciones en las concentraciones de los metales de cromo y plomo en el lodo residual es menor que el promedio de las concentraciones encontradas en efluente final lo cual puede parecer ilógico, esto se debe a posibles errores de manipulación de las muestras, factores estadísticos, o fallas de detección en el equipo, claro que en el análisis de especiación nos enfocamos en el porcentaje de las fracciones químicas del lodo activado y no en sus concentraciones totales, por lo tanto, no pueden ser representativas sus concentraciones, sino solo las fracciones porcentuales como tal.

10.3.2 Especiación de Cromo

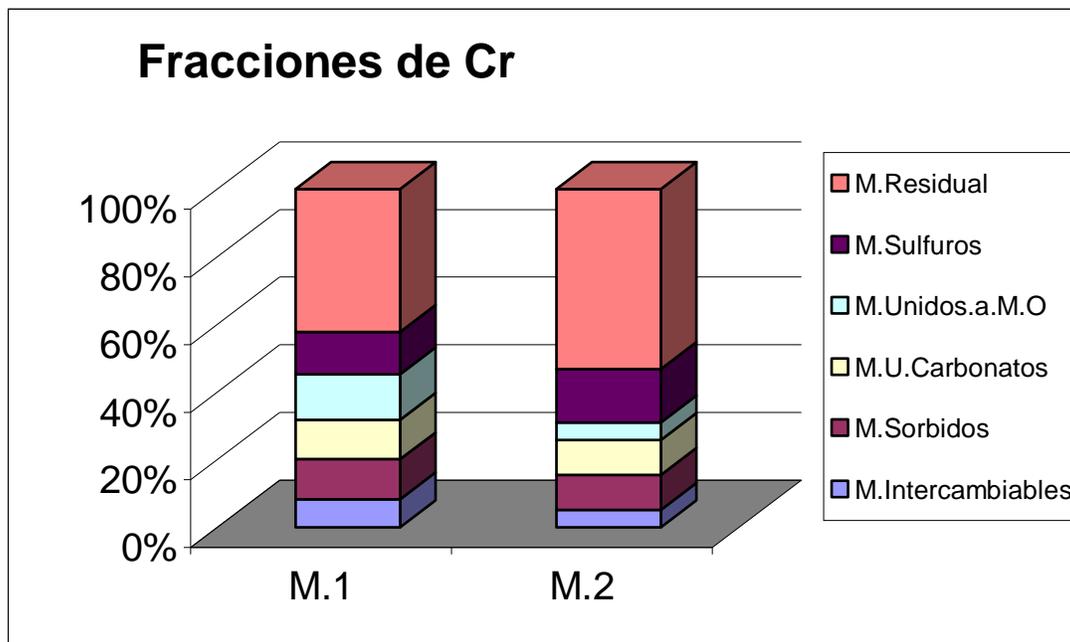


Figura 10.5 Porcentaje de cromo en las fracciones químicas evaluadas en M.1 y M.2

El estudio de cada una de las fracciones de cromo se representa en la figura 10.5. En ella se aprecia que las concentraciones más representativas de este elemento, que se encuentran en fase residual, unida a sulfuros y carbonatos. Dicha fracción se encuentra constituida por silicatos, materia orgánica refractaria, arcillas, minerales primarios y



secundarios que contienen materiales traza en el interior de la red cristalina, por lo cual podemos deducir que la causa probable de la alta concentración de cromo es la contaminación de origen litogénico porque esta constituido en fases residuales, por otro lado una parte también se puede considerar el origen como antropogénico ya sea por la lixiviación de suelos a causa de la deforestación y construcción de nuevos fraccionamientos o carreteras en la zona evaluada, estos factores y la contaminación industrial pueden ser la causa principal del alto porcentaje de fracciones de cromo en forma residual y unida a sulfuros en el río de los remedios. Resultados como estos son similares a los encontrados por Rosas R.H., 2001, en ríos de Cataluña España con las mismas características que el evaluado en este estudio.

Es importante mencionar que si este metal esta unido a enlaces residual, sulfuros y carbonatos, es poco el porcentaje que se puede movilizar en el medio ambiente, pero también hay una parte considerable de cromo intercambiable y unido a materia orgánica, esta fracción si puede ser absorbido por las plantas y entrar a la cadena alimenticia, hasta llegar a los seres humanos, creando infinidad de trastornos en la salud de las personas. Estudios similares a esta investigación son realizados por investigadores en diferentes ríos de aguas negras del mundo (Yangsheng L. L ,2006 y Neylan D., 2002). Donde se encuentra cromo en forma residual y sulfuros en su mayor parte.

10.3.3 Especiación de Plomo

En diferentes estudios en varias partes del mundo, donde la concentración urbana es grande, resultados de altas concentraciones de plomo originado por la contaminación son comunes tal es caso de un evaluación hecha en Taiwán (Yu-Ling W., 2005). En donde obtuvieron concentraciones altas de plomo y concluyeron que era de origen antropogénico debido a diferentes actividades industriales que se realizaban cerca de ríos con aguas residuales.

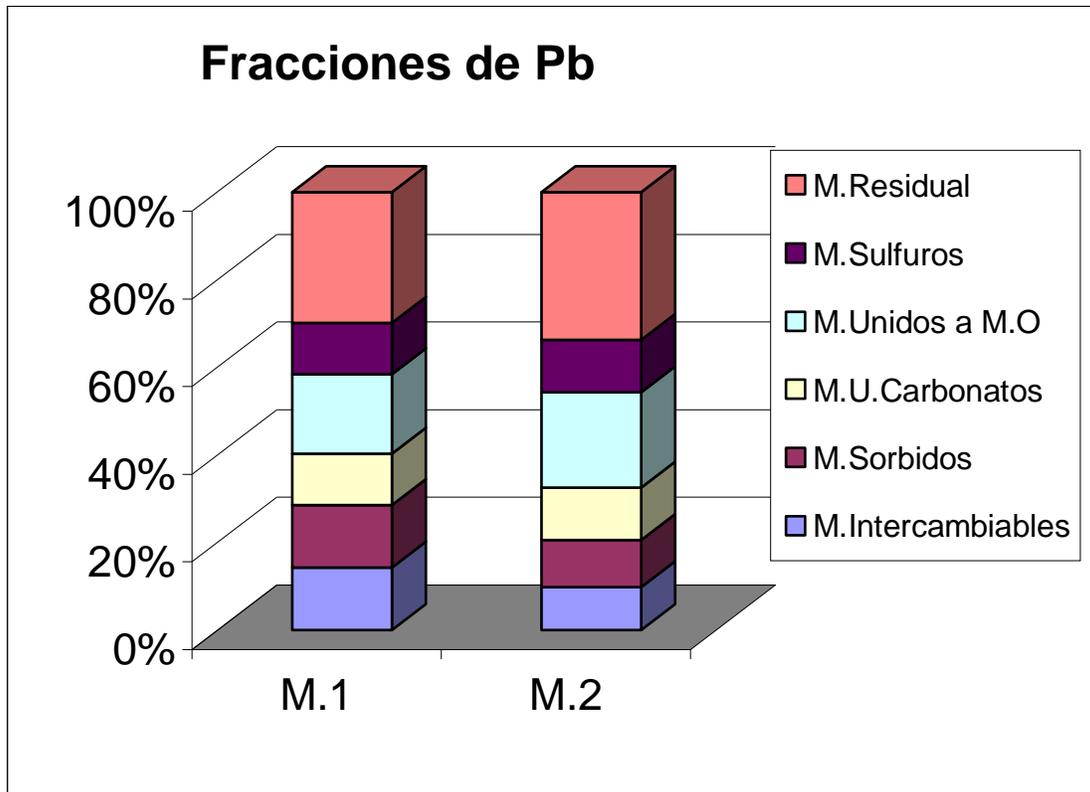


Figura 10.6 Porcentaje de plomo en las fracciones químicas evaluadas en M.1 y M.2.

Las fracciones de plomo están visualizadas en la figura 10.6 en donde podemos apreciar que los puentes más importantes están enlazados a materia residual y carbonatos, esto comprueba muchos estudios en donde se encuentra al plomo en estas fracciones (Rosas R. H. 2001 y Pérez G.G., 2005). Los metales unidos a carbonatos es común encontrarlos en bajas concentraciones, en este estudio estuvieron altas, esto nos indica puede estar depositándose en el medio por la lixiviación de suelos que existe en la zona de estudio, además de la gran masa de contaminantes que recoge el río de Los Remedios de las actividades industriales y urbanas.

Dicha fracción de carbonatos es sensible a los cambios de pH, liberando los metales asociados a través del proceso de disolución de carbonatos 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).

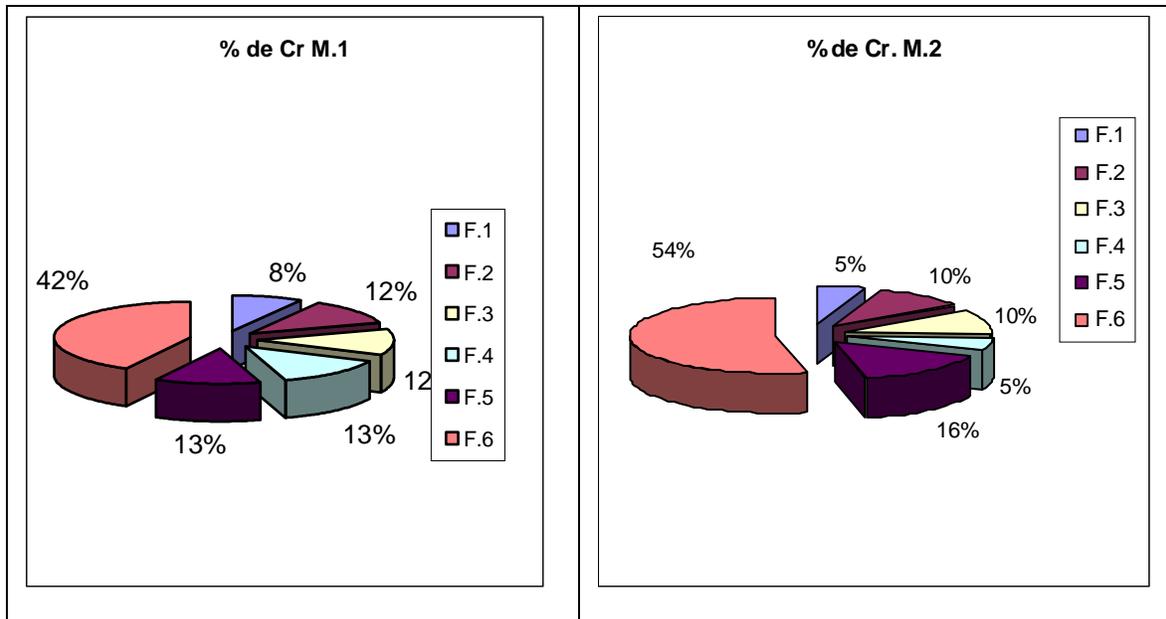


Figura 10.7 Porcentajes de cromo. F.1; M. Intercambiables, F.2; M. Sorbidos, F.3; M. Orgánicos, F.4; M. Carbonatos, F.5; M. Sulfuros, F.6; M. Residuales.

En la figura 10.7 se puede visualizar de una mejor manera los porcentajes en que se encuentran las diferentes fracciones estudiadas de cromo en la M.1 y M.2 donde vemos la fase residual y de sulfuros en mayor porcentaje tanto como para la M.1 como en la M.2 donde llegan hasta 75% en M.2. Esto nos indica que aunque estén en altas concentraciones estos metales casi siempre están en inmóviles retenidos en redes cristalinas, y permite una poca movilización en el medio ambiente. El otro 25% esta contenido en las fases móviles, en donde encontramos al cromo unido principalmente a materia orgánica, esto se debe a la facilidad que tiene este elemento de complejarse con moléculas orgánicas.

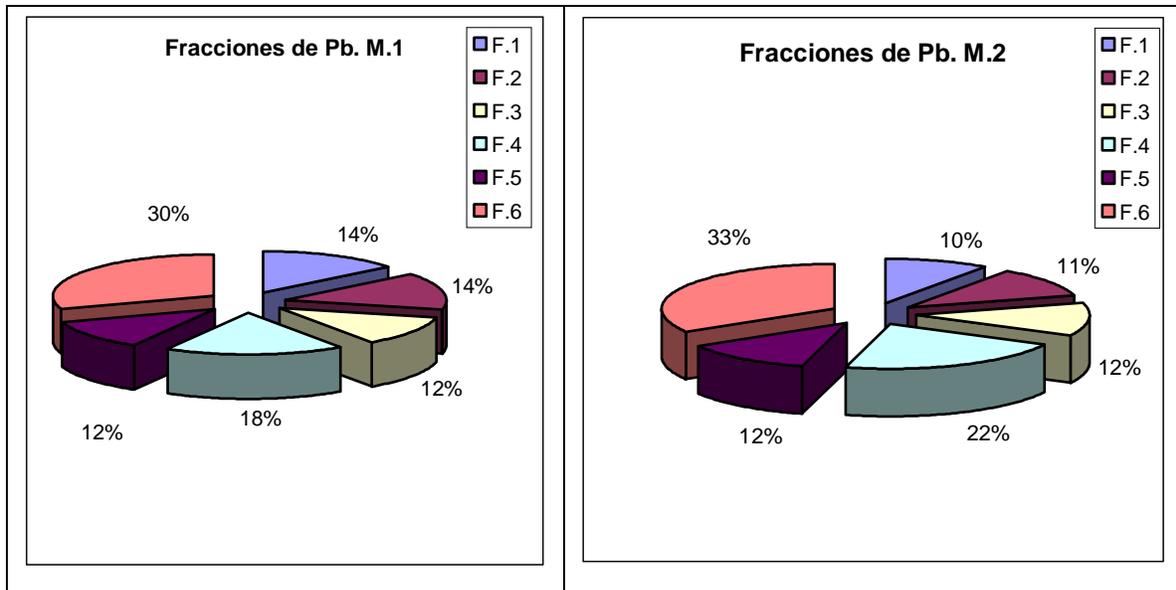


Figura 10.8 Porcentajes de plomo. F.1; M. Intercambiables, F.2; M. Sorbidos, F.3; M. Orgánicos, F.4; M. Carbonatos, F.5; M. Sulfuros, F.6; M. Residuales.

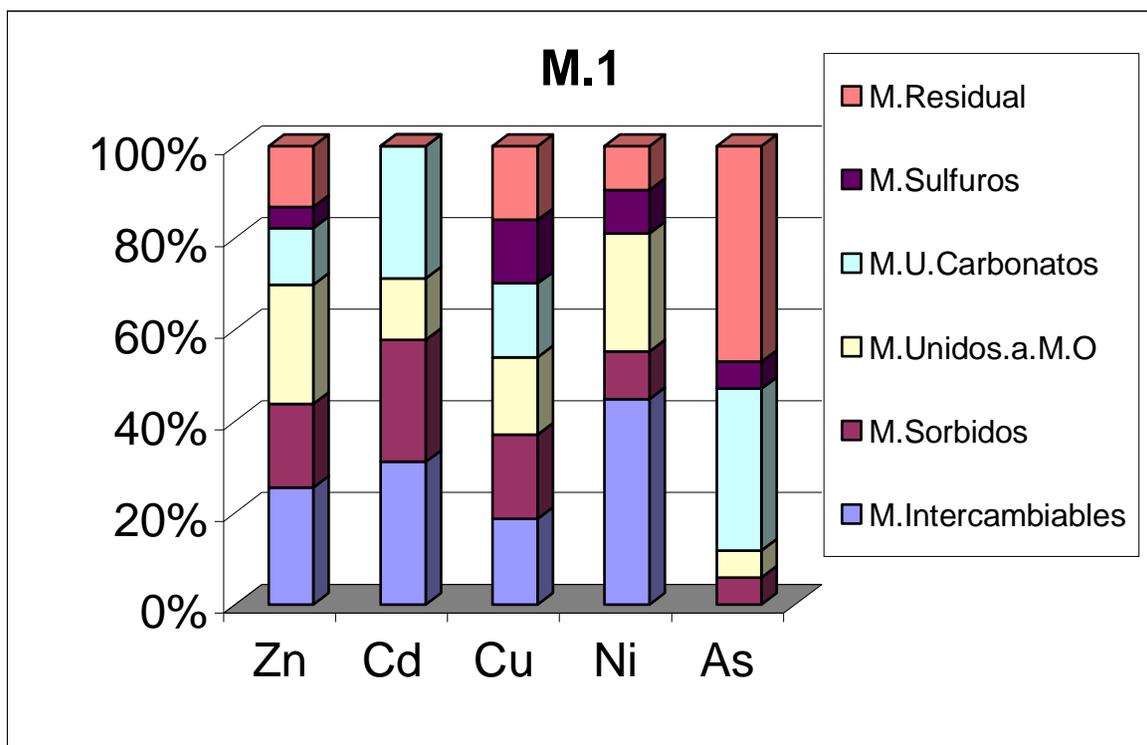
En la Figura 10.8 se muestran dos diagramas donde se muestran los porcentajes encontrados de plomo en las diferentes fracciones químicas, aunque la fracción mayor es la residual, las demás también están en importante concentración. Las fases inmóviles para el plomo suman hasta 67% en M.2 por tanto de fases móviles suman 33%. Este alto porcentaje de plomo en fases móviles, se puede considerar que es debido a la deposición de plomo atmosférico y la contaminación industrial que existe en la zona.

10.3.4 Análisis de Zn, Cd, Cu, Ni y As

La diversa afinidad competitiva de metales en los sedimentos también varía con el contenido de enlaces a materia orgánica, intercambiables, puentes sorbidos, carbonatos, sulfuros, el nivel de influencia antropogénica que eventualmente causa la variación de los niveles de la concentración del metal en las diferentes fracciones extraídas. En la tabla 10.4 se muestran fracciones de Zn, Cd, Cu, Ni y As.

**Tabla 10.4** Concentración de Zn, Cd, Cu, Ni y As en diferentes fracciones químicas contenidas en el lodo activado de las dos muestras.

Fracciones	Concentración (ppm)									
	Zn		Cd		Cu		Ni		As	
	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2
F.1	0.0688	0.0720	0.0140	0.0130	0.0500	0.0400	0.004	0.000	0.0000	0.0000
F.2	0.0494	0.0387	0.0120	0.0190	0.0490	0.0550	0.001	0.001	0.0001	0.0000
F.3	0.0701	0.0424	0.0060	0.0230	0.0450	0.0500	0.002	0.002	0.0001	0.0002
F.4	0.0334	0.0950	0.0130	0.0110	0.0430	0.0610	0.000	0.001	0.0006	0.0000
F.5	0.0126	0.0484	0.0000	0.0140	0.0370	0.0560	0.001	0.002	0.0001	0.0000
F.6	0.0357	0.0700	0.0000	0.0090	0.0430	0.0490	0.001	0.004	0.0008	0.0007

**Figura 10.9.** Porcentaje de Zn, Cd, Cu, Ni y As en las fracciones químicas evaluadas en la M.1.

Como se muestra en la figura 10.9 se puede visualizar que aunque las concentraciones de estos metales pesados están por debajo de L.M.P, las fracciones móviles tienen el mayor porcentaje (Cd 58% y Cu 60%), esto nos indica que pueden ser absorbidos



muy fácilmente por seres vivos. El arsénico se encuentra en su mayor parte en forma residual <80% y el zinc y níquel están mayoritariamente en fases inmóviles (62% Zn y 75% Ni).

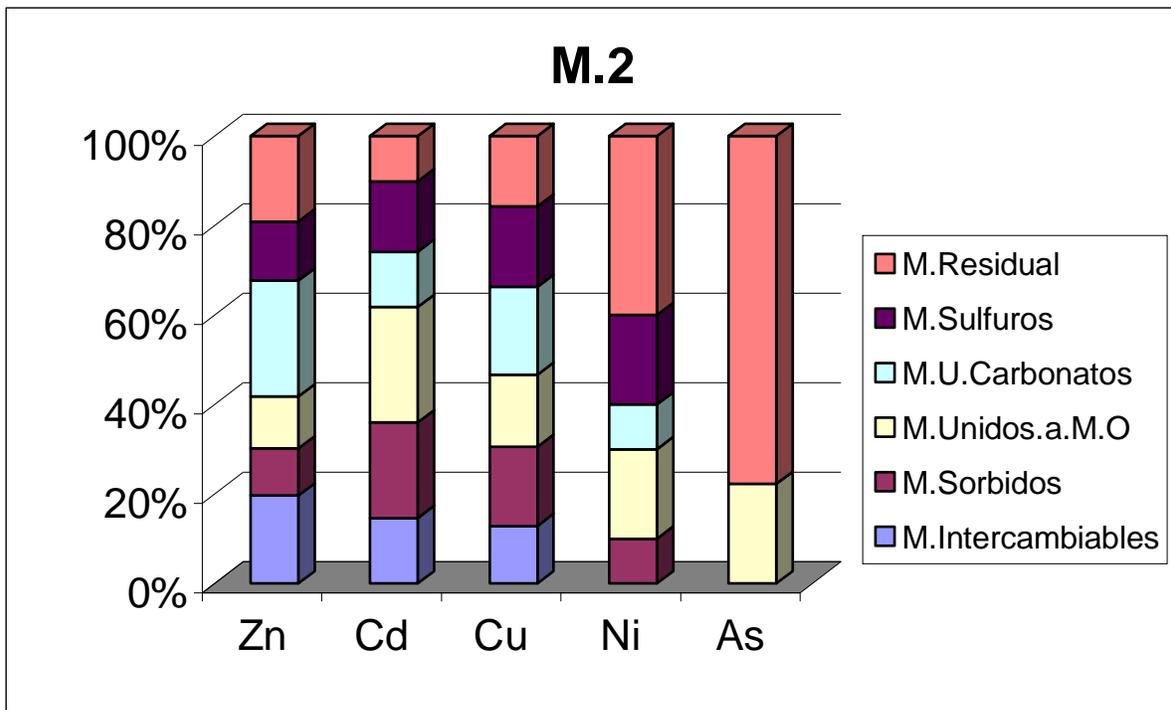


Figura 10.10 Porcentaje de Zn, Cd, Cu, Ni y As en las diferentes fracciones químicas evaluadas en la M.2.

Para ver si hubo diferencias significativas entre cada tratamiento entre M.1 y M.2 comparamos sus porcentajes, en la segunda muestra que se presenta en la Fig.10.10 vemos que las fracciones móviles están en menor porcentaje que en M.1, es decir que son en cierta medida diferentes entre sí, pero en términos generales no dan una idea similar de los porcentajes de las fracciones que están presentes.



10.4 Evaluación de los Metales Pesados

Basándonos en el contenido total promedio en los lodos residuales el orden de seguimiento del contenido de los metales pesados en las diferentes formas químicas se presenta de la siguiente manera:

Cr = Residuales > Sulfuros > Carbonatos > Intercambiables > Orgánicos > Sorbidos

Pb = Residuales > Sorbidos \geq Orgánicos \geq Intercambiables > Carbonatos > Sulfuros

Zn = Intercambiables > Carbonatos > Orgánicos > Residuales > Sorbidos > Sulfuros

Cu = Sulfuros \geq Carbonatos > Intercambiables \geq Orgánicos \geq Sorbidos > Residuales

Ni = Residuales > Orgánicos > Intercambiables \geq Sulfuros \geq Orgánicos \geq Sorbidos

Cd = Sorbidos > Orgánicos > Intercambiables > Carbonatos > Sulfuros > Residuales

As = Residuales > Carbonatos > Orgánicos > Sulfuros > Sorbidos > Intercambiables

Por otra parte también se ha hecho una comparación de la secuencia que siguen los metales pesados en las fracciones estudiadas.

Residuales Cr \geq Pb \geq As \geq Ni > Zn > Cd \geq Cu

Sulfuros Cr > Ni > As > Cu \geq Cd > Zn > Pb

Carbonatos Cu > Zn > As > Cr > Cd > Pb > Ni

Orgánicos Cd > Ni > Pb > As > Cu > Zn > Cr

Sorbidos Cd \geq Cu > Pb \geq Zn > Ni > As > Cr

Intercambiables Zn > Ni \geq Cu \geq Cd > Cr \geq Pb > As

Esta forma de representar los resultados nos dan un resumen del estudio de especiación realizado y nos dejar ver la forma que esta caracterizada la contaminación por metales pesados en el río de Los Remedios.

Los metales estudiados en el lodo activado presentaron un aumento considerable en sus concentraciones en el período enero debido al arrastre del río de gran cantidad de material en suspensión. Sin embargo, los aportes del río para Zn, Cr y Pb si son continuos,



lo que sugiere que estos metales podrían estar siendo introducidos desde fuentes alternas como pudieran ser, industrias manufactureras, talleres mecánicos y las gasolineras ubicados en los alrededores de la desembocadura, en donde dichos elementos forman parte de aleaciones (Pb, Zn y Cr), entre los más importantes están compuestos antidetonantes de la gasolina (Pb). La alta concentración que presentaron los metales en el efluente final, sugiere que una de las causas por las cuales estos elementos entran al sistema de drenaje es la asociación de partículas suspendidas, la resuspensión de los sedimentos de fondo, la entrada en solución del metal y posterior precipitación y adsorción de partículas no esta descartada.

10.5 Parámetros Físicoquímicos de las Aguas Analizadas

Para poder entender las causas de las fracciones de metales pesados en ciertas especies químicas es necesario tener en cuenta los parámetros físicoquímicos del agua residual analizada. Su efecto combinado tiene gran influencia sobre el grado de toxicidad y sobre la incorporación de metales pesados por los organismos acuáticos.

Tabla 10.5 Los resultados son el promedio diario de M.1 durante tiempo de análisis de metales pesados. ³

Parte de la Planta	Parámetros físicoquímicos				
	Temperatura °C	pH	Conductividad μS/cm	S.S.T mg/L	S.S ml/L
Afluente	16	7.31	912.6	76	3.5
Inicial					
Clarificador	15.9	7.32	897.6	56	2.5
Efluente	15.2	7.29	734.5	4.0	N D
Final					

³ S.S.T; Sólidos Suspendidos Totales S.S; Sólidos Sedimentables



En las tablas 10.5 y 10.6 están los resultados para pH, temperatura, conductividad, sólidos totales y sólidos sedimentables, durante el tiempo en que se efectuó el análisis.

Tabla 10.6 Los resultados son el promedio diario de M.2 durante el tiempo de análisis de metales pesados.

Parte de la Planta.	Parámetros fisicoquímicos				
	Temperatura °C	pH	Conductividad μS/cm	S.S.T mg/L	S.S ml/L
Afluente Inicial	14.25	7.35	953.5	88	2.0
Clarificador	13.06	7.40	874.16	28	N.D
Efluente Final	12.6	7.12	884.3	12	N D

10.5.1 Temperatura.

La temperatura en ríos de aguas residuales varía con la época del año, la cantidad de caudal, la situación de la zona de muestreo, la hora y día de la determinación y la profundidad, además de si alguna industria esta descargando grandes cantidades de agua caliente al caudal del río (Rosas R. H., 2001).

Las temperaturas en tres puntos de muestreo de la planta de tratamiento muestreada, se representan en las tablas 10.5 y 10.6 las temperaturas son bajas, características de la temporada de Invierno en que determinaron los metales pesados. La temperatura encontrada oscila entre 12 °C a 16 °C esto pudo disminuir la solubilidad de metales en el agua durante el análisis efectuado.



10.5.2 pH

El efecto que el pH produce sobre los metales pesados es que a niveles por debajo de 4.5 se hallan principalmente en forma soluble y su toxicidad se incrementa, mientras que a pH básicos, tienden a precipitar y por ende, a disminuir su toxicidad. El pH es un parámetro importante para el agua. En pH menor a 6 es un fuerte corrosivo para los metales ya que puede presentar reacciones de disolución en las sales de las rocas.

Los valores de pH en el río de Los Remedios se presentan en las Tablas 10.5 y 10.6 y oscilan entre 7.00 a 7.50, presentan una ligera alcalinidad debido al arrastre de polvo de las excavaciones de nuevos asentamientos urbanos en la zona estudiada y al remodelamiento de la súper avenida Lomas Verdes que esta a un costado del río. Estos valores de pH pueden justificar la presencia de metales en forma residual, carbonatos y sulfuros encontrados en la mayoría de los metales pesados. Las descargas de efluentes industriales ácidos estabilizan el pH en 7.0, ya que no se elevan los valores arriba de 8.0 como los encontrados en estudios de ríos del municipio de Tultitlan (Cruz O. M.J 2005).

10.5.3 Conductividad

La conductividad depende principalmente del terreno que atraviesa el agua residual, no obstante los efluentes procedentes de industrias y áreas urbanas incrementan notablemente este parámetro. En el río de Los Remedios los valores de conductividad están entre 850.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 950.0, esto es debido a la concentración de sales disueltas en el río, que favorecen la complejación de metales pesados, dando el valor ligeramente alcalino encontrado en el agua residual, beneficiando a la movilidad de algunos metales a solubilizarse como el arsénico.

Es importante entender que los valores de conductividad nos permiten saber la cantidad de sólidos que se encuentran disueltos en el agua residual y estos se pueden relacionar con el contenido de metales en el agua.



10.5.4 Sólidos Suspendidos Totales y Sedimentables

En lo referente a los sólidos, su composición en las aguas residuales, constituyen la base para decidir el tipo de tratamiento y el control de la operación de las plantas de tratamiento, bien sean biológicos o fisicoquímicos. Para el caso aquí estudiado en las tablas 10.5 y 10.6 se muestran los valores para sólidos suspendidos totales y sólidos sedimentables, donde se puede ver el grado remoción de sólidos que tiene esta agua residual en el tren de tratamiento.

Es importante aclarar que los parámetros fisicoquímicos determinados, se obtuvieron en colaboración con analistas de la planta de tratamiento de aguas en la que se efectuó el análisis de metales pesados. Los resultados completos se muestran en los apéndices 1, 2, 3 y 4.



Capítulo XI

Conclusiones y Recomendaciones

11.1 Conclusiones

Se determinó la concentración y especiación química de los metales pesados de plomo, cromo, zinc, cobre, cadmio, níquel y arsénico en el efluente final y en el sistema de lodos activados de una planta de tratamiento de aguas de origen urbano. Se concluyó que las concentraciones de cromo y plomo están muy por encima de los Límites Máximos Permitidos (LMP) de las Normas de Calidad de Aguas Residuales. Esto puede ser debido a la alta contaminación industrial y urbana que existe en la zona estudiada. Las concentraciones de los metales de Zn, Cu, Cd, Ni y As se encuentran por debajo de LMP, pero siempre están presentes.

Las concentraciones de dos de los metales estudiados están muy por encima de los valores reglamentados por la legislación mexicana para aguas de consumo e incluso para aguas de descarga a los cuerpos de aguas residuales. Esto podría estar afectando la estabilidad del ecosistema poniendo en peligro la salud de la población asentada en los márgenes del río de Los Remedios.

Dentro del estudio de especiación química encontramos que el plomo, cromo, arsénico y níquel se presentaron en fases residuales, carbonatos y sulfuros, atrapados en fases inmóviles que les permiten poca movilidad en el medio ambiente. Los metales de zinc, cadmio y cobre estuvieron en su mayor parte en forma intercambiable, unida a materia orgánica, y adsorbatos, esto nos indica que están movilizándose constantemente en el medio ambiente, pudiendo ser absorbidos por las plantas y animales.



En lo que se refiere al análisis de especiación de metales pesados, se considera que su composición mayoritaria en fases residuales y sulfuros no afecta la calidad de los lodos, pero si vemos que dos metales (Pb y Cr) excedieron los límites establecidos en la norma, este factor se puede considerar una limitante para su disposición o aprovechamiento. Adicionalmente, los metales que no superaron los límites están contenidos en fases móviles con aporte industrial considerable por lo que un adecuado programa de pretratamiento de descargas reduciría la concentración de metales pesados permitiendo su aplicación de los lodos en diferentes áreas.

Es importante mencionar que este estudio es uno de los primeros pasos para conocer la calidad de los lodos generados en el país y el posible cumplimiento con el proyecto de la Norma Mexicana NOM-004-ECOL 1993 para permitir el aprovechamiento o disposición de los lodos en México. Por ello, es recomendable continuar recabando información acerca de la calidad de los lodos que contribuye al desarrollo de la normatividad correspondiente.

11.2 Recomendaciones

Tomando en cuenta los resultados de este estudio respecto a la alta concentración de plomo y cromo se recomienda realizar una investigación más detallada de las posibles industrias que desechan sus efluentes con altas concentraciones de metales pesados al río de Los Remedios y vigilar que cumplan con las normas de deposición de efluentes a aguas residuales

Se recomienda efectuar una depuración de los lodos de la planta de tratamiento de aguas para incrementar la eficiencia de trabajo e instalar un tratamiento primario (sedimentación) para evitar que se dañen los sellos de las bombas de transferencia con la arena bombeada a la planta. Esto mejoraría la separación de metales en fases inmóviles. (Residual, sulfuros y carbonatos). También se recomienda realizar un tratamiento con agentes químicos a las aguas para favorecer la precipitación y separación de los metales que



se encuentran disueltos en altas concentraciones y en fracciones móviles (Metales intercambiables, sorbidos y unidos a materia orgánica).

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 río de Los Remedios.



Referencias

Aguirre Gómez A., (2001). Química de los suelos ácidos templados y tropicales, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Primera Edición México.

Aguirre Gómez A., (1993) Química de los suelos salinos y sódicos, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán., Primera edición México.

Albert L.A., (1998), Curso de toxicología ambiental, editorial Limusa, segunda edición, Pág. 185-209 México DF.

APHA, AWWA - WEF., (1995). Standard methods for the examination of water and wasterwatwer, 19th edition, publication office american public health association, Washington, DC.

Babbitt Harold E., Baumann Robert E., (1975). Alcantarillado y tratamiento de aguas negras, editorial continental, quinta impresión., Pág. 403-434 USA.

Blandine Clozel, Véronique Ruban, Cédric Durand, Pierre Conil, (2006). Origin and mobility of heavy matals in contaminated sediments from retention and infiltration ponds. Applied Geochemistry 21(2006) 1781-1798. Francia.

Castañé PM, Topalián ML, Cordero RR y Salibián A., (2003), Influencia de la especiación de los metales pesados en el medio acuático como determinante de su toxicidad. Rev. Toxicol. 20: 13-18 Argentina.



Castrejón A, J. A. Barrios, B. Jiménez, C. Maya, A. Rodríguez y A. González., (2002). Evaluación de la calidad de lodos residuales de México, Instituto de Ingeniería. Grupo de tratamiento y reúso. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria.

Centeno A.J., (1997) Curso de elementos trazas y metales tóxicos, impacto en la calidad del ambiente y desarrollo de enfermedades., Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales A.C

Chicón L., (2005). Trabajo de Investigación del Programa de Doctorado en Ingeniería Ambiental de la Universidad de Málaga. Especiación de metales pesados en aguas residuales de origen urbano y aplicación de lodos digeridos como mejoradores de suelos. España.

Colin Baird., (2001). Química Ambiental, Editorial Reverte. S. A W.H. Freeman and Company, Primera Edición en español, Pág. 391-42. USA.

Córdoba P. D., (1991). Toxicología, El Manual Moderno, Primera Edición. Colombia

Cruz Jiménez Rosalía., (1994). Aspectos generales del manejo de los residuos sólidos, curso internacional de diseño de disposición final de residuos peligrosos, Servicios Urbanos del DDF. México

Cruz Onofre M.J., (2005). Especiación y transporte de metales pesados en un sistema de lodos activados de una planta de tratamiento de aguas residuales. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán (Tesis de Maestría). México.

Dirección de Contenidos y Métodos Educativos de la Dirección General de Evaluación y de Incorporación y Revalidación D.C.M.E., (1993), Equilibrio Ecológico de la República Mexicana, Quinta reimpresión., México.



Fair M.G., Geyer J.C., Okun D.D., (1976). Abastecimiento de aguas y remoción de aguas residuales, editorial Limusa, S.A, Segunda Reimpresión, México.

García C. F., (2001). La tesis y el trabajo de tesis: recomendaciones metodológicas para la elaboración de un trabajo de tesis, Limusa, México.

Geoffey B.L, (1994). Curso Internacional sobre diseño y disposición final de residuos sólidos, Internacional, solid waste association ISWA, Palacio de Minería, México.

Gómez S. E. I., (1994). Estudio sobre la cinética de remoción del metal pesado cromo en un sistema experimental de lodos activados. Tesis de Maestría en Ciencias, CINVESTAV-IPN. México.

Gray N.F., (1996). Calidad de la Agua Potable, Editorial John Wiley & Sons Ltd., Pág. 48-291 España.

Gutiérrez Arzaluz, P., (1997) Ocoyoacac monografía municipal, Gobierno del Estado de México/AMECROM.

Harris D. C., (1992). Análisis Químico Cuantitativo, Grupo Editorial Iberoamericana. Impreso en México.

Hawley G. G., (1986). Diccionario de química y productos químicos. Ediciones Omega, Nueva edición, España.

Hernández H. J. M, Olivares S. E, Villanueva F. I. Rodríguez F. H., Vázquez A. R. Pisan Z. J. F. (2005). Aplicación de lodos Residuales, estiércol Bovino y Fertilizante químico en el cultivo de sorgo forrajero (*Sorghum vulgare Pers.*), Rev. Int. Contaminación Ambiental. 21(I) 31-36. México.



Hostynek J.J., (2003). Pergamon, factors determining percutaneous metal absorption, food and chemical toxicology, 41 327-345 USA.

Hughes, M.N y Poole, R.K., (1989). Metal and micro-organism. Ed. Chapman and Hall, Nueva York.

James F.Smit., (1999) "A Mexican city awakes to an ecological night mare". Los Angeles Times, 20 de Mayo.

Lester, John N P.H.D., (1987). Heavy Metals In Wastewater And Sludge Treatment Processes, Volume II Treatment And Disposal, CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida.

Lyman W.J., (1995). Transport and transformation processes. En: Rand G M (ed) Fundamentals of Aquatic Toxicology. Taylor & Francis. 449-492. Washington.

Márquez A., Senior W., Martínez G., (2000). Concentraciones y Comportamiento de Metales Pesados en una Zona Estuarina de Venezuela. Interciencia, septiembre, año/vol. 25, número 006, Asociación Interciencia. Caracas Venezuela. pp. 284-291.

Melo S. F., Márquez E., Juárez J. F., Martínez M.F., (2000). "Análisis de metales pesados en las aguas residuales del río San Javier y repercusión en la salud e impacto ambiental", Depto. de Química, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología, I.P.N. (2000), México.

Mengchand He, Zijian Wang, Hongxiao Tang., (2001). Modeling the ecological impact of heavy metals on aquatic ecosystems: a framework for the development of an ecological model. The Science of the Total Environment 266, 291-298. China.

Moreno Sánchez R, Devars S., (1999). Abundancia de los metales pesados en la biosfera. Contaminación Ambiental por Metales pesados. AGT. Editor. 1-10. México.



Muñoz Razo C., (1998). Como elaborar y asesorar una investigación de tesis, Prentice Hall Hispanoamericana, S.A., Primera Edición, México.

Nelson N.I, Pereira B. E., (1992). Aspectos Toxicológicos De Los Agentes Químicos, Centro Panamericano De Ecología Humana, Organización Panamericana De Salud, Organización Mundial De La Salud, Metepec. México.

Neylan Dirilgen and Fulya Dogan., (2002). Speciation of chromium in the presence of copper and zinc and their combined toxicity ecotoxicology and environmental Safety 53 (2002) 397-403. Turkey

Pérez G.G. (2005). Disponibilidad de metales tóxicos en sitios contaminados, aplicaciones y limitaciones de la Fraccionación en la determinación de gradientes de Polución. Universidad Nacional de Barcelona (Tesis Doctoral) España.

Poeri Cervantes Z. R., (1987). Naucalpan de Juárez monografía municipal 1987, Gobierno del Estado de México/AMECROM.

Rigola Lepeña Miguel., (1999). Tratamiento de Aguas Industriales, Aguas de Proceso y Residuales, Editorial Macombo. Pág. 137-139. Colombia.

Rosas Rodríguez H., (2001). Estudio de la contaminación por metales pesados en la cuenca del Llobregat, Universidad Politécnica de Catalunya. (Tesis Doctoral). España.

Rosental CE., (1986). Toxicity, Bioavailability and metal especiation. Crsiol 106 C: 585-595. USA.

Salt D.E., Prince R.C ., Pickering I.J., (2002). Chemical Speciation of accumulated metals in plants: evidence from X-ray absorbtion spectroscopy. Microchemical Journal 71, 255-259. USA.



Sánchez Gómez Jorge., (1994). Metodología para el Emplazamiento de Rellenos Sanitarios, Curso Internacional Sobre Diseño y Disposición final de residuos, Sólidos (Rellenos Sanitarios), Asociación Mexicana para el Control de los Residuos Sólidos y Peligrosos, A.C. México.

Seoanez C. M, Angulo A. I., (1999). Aguas Residuales Urbanas, Tratamiento de Bajo costo y aprovechamiento, Ediciones Mundi-Prensa, Segunda Edición, España.

Solano Marín M.A., (2005). Movilización de metales pesados en residuos y suelos industriales afectados por la hidrometalurgia de cinc (Tesis doctoral). Universidad de Murcia, Facultad de Química, España.

Soumia Amir, Mohamed Hafidi, Geoges Merlina, Jean-Claude Revel., (2004). Sequential extraction of heaavy metals during composting of sewage sludge. *Chemosphere* 59 (2005) 801-810. France.

Stover R.C., y LE. Sommers, Y D.J. Silviera., (1996). Evaluation of metals in waster sludge. *Journal WPCF.*, 48; (9).USA.

Tebutt T. H. Y., (1999). Fundamentos De Control De La Calidad De Agua Editorial Limusa, Séptima Reimpresión, México.

Vullo D.L., (2003). Microorganismos y Metales pesados: Una interacción en beneficio del medio ambiente, *Revista, Química Viva* Vol.2, número 3, México.

Yangsheng Liu, lanzan Ma, Yaqiong Li, Living Zheng., (2006). Evolution of heavy metal speciation during the aerobic composting of sewage sludge. *Chemosphere*. China.



Yu-Ling Wei, Yaw-Wen Yang, Jyh Lee., (2005). Lead speciation in 0.1N HCl-extracted residue of analog of Pb-Contaminated soil, *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena* 144-147, 299-301. Taiwán.

Referencias de Internet

<http://www.inegi.gob.mx> (Instituto Nacional de Geografía y Estadística)

<http://www.semarnat.gob.mx> (Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca)

<http://www.naucalpan.gob.mx> (Municipio de Naucalpan de Juárez)

<http://www.oapas-naucalpan.gob.mx> (Organismo de Agua Potable y Alcantarillado).

<http://www.cna.gob.m> CONAGUA (Comisión Nacional del Agua)

<http://www.ine.gob.mx> Instituto Nacional de Ecología (SEDUE)



ANEXOS

Anexo 1

Afluente Inicial (Diciembre)

TABLA DE RESULTADOS 1

PARÁMETRO	Unidades	Mín.	Máx.	Promedio	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES		
					Promedio Mensual	Promedio diario	Instantáneo
TEMPERATURA*	°C	12.5	19.5	16.0	N.S.I.	N.S.I.	40 C (313 K)
pH*	unidades de pH	6.75	7.58	7.31	N.S.I.	5.5 – 10	5.0 – 10.0
CONDUCTIVIDAD*	µS/cm	847	950	912.6	N.S.I.	N.S.I.	N.S.I.
GRASAS Y ACEITES**	mg/L	24.4	39.6	31.68	15	25	N.S.I.
GASTO	L/s	-----	-----	-----	N.S.I.	N.S.I.	N.S.I.

TABLA DE RESULTADOS 2 (Parámetros Obligatorios)

PARÁMETROS	RESULTADO	LIMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PROMEDIO DIARIO	UNIDADES
DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO	* 274	150	mg/L
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	* 76.0	125	mg/L
SÓLIDOS SEDIMENTABLES	* 3.5	2	mL/L
FÓSFORO TOTAL	* 4.69	30	mg/L
NITRÓGENO TOTAL	* 47.645	60	mg/L
COLIFORMES FECALES	* 405x10 ⁶	2000	NMP / 100 mL
HUEVOS DE HELMINTO	* 2	≤ 1	unidades/ L

TABLA DE RESULTADOS 3 (Parámetros Adicionales)

PARÁMETROS	RESULTADO	LÍMITE MAX.	UNIDADES
NITRÓGENO DE NITRITOS	3.84	N.S.I.	mg/L
NITRÓGENO DE NITRATOS	0.125	N.S.I.	mg/L
NITRÓGENO DE KJENDALH	43.68	N.S.I.	mg/L
SUSTANCIAS ACTIVAS AL AZUL DE METILENO	0.08	N.S.I.	mg/L
DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO	420	800	mg/L

NOMENCLATURA:

< M.L D.- Menor que el Limite de Detección

N. D - No Detectado

p. p. - Promedio Ponderado.

* - Parámetros Normados (NOM – OO1 – SEMARNAT – 1996)

N. A. – No Aplica

N. S. I. – No Se Indica.

L. M. P. - Limite Máximo Permissible.

Máx. -Máximo

Mín.- Mínimo

Anexo 2



Efluente Final (Diciembre)

TABLA DE RESULTADOS 4

PARÁMETRO	Unidades	Mín.	Máx.	Promedio	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES		
					Promedio Mensual	Promedio diario	Instantáneo
TEMPERATURA*	C	9.6	19.1	15.2	N.S.I.	N.S.I.	40 C (313 K)
pH*	unidades de pH	7.54	7.33	7.29	N.S.I.	5.5 – 10	5.0 – 10.0
CONDUCTIVIDAD*	µS/cm	657	778	734.5	N.S.I.	N.S.I.	N.S.I.
GRASAS Y ACEITES**	mg/L	8.6	18.40	12.683	15	25	N.S.I.
GASTO	L/s	-----	-----	-----	N.S.I.	N.S.I.	N.S.I.

TABLA DE RESULTADOS 5 (Parámetros Obligatorios)

PARÁMETROS	RESULTADO	LIMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PROMEDIO DIARIO	UNIDADES
DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO	* 70	150	mg/L
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	* 4.0	125	mg/L
SÓLIDOS SEDIMENTABLES	* N.D.	2	mL/L
FÓSFORO TOTAL	* 2.42	30	mg/L
NITRÓGENO TOTAL	* 60.64	60	mg/L
COLIFORMES FECALES	* 260	2000	NMP / 100 mL
HUEVOS DE HELMINTO	* N.D.	≤ 1	unidades/ L

TABLA DE RESULTADOS 6 (Parámetros Adicionales)

PARÁMETROS	RESULTADO	LÍMITE MAX.	UNIDADES
NITRÓGENO DE NITRITOS	20.2	N.S.I	mg/L
NITRÓGENO DE NITRATOS	1.240	N.S.I	mg/L
NITRÓGENO DE KJENDALH	39.2	N.S.I	mg/L
SUSTANCIAS ACTIVAS AL AZUL DE METILENO	< 0.01	N.S.I	mg/L
DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO	14097	800	mg/L

NOMENCLATURA:

< M.L D.- Menor que el Limite de Detección	N. A. – No Aplica	Máx. -Máximo
N. D - No Detectado	N. S. I. – No Se Indica.	Mín.- Mínimo
p. p. - Promedio Ponderado.	L. M. P. - Limite Máximo Permissible.	
* - Parámetros Normados (NOM – OO1 – SEMARNAT – 1996)		



Anexo 3

Afluente Inicial (Enero)

TABLA DE RESULTADOS 7

PARÁMETRO	Unidades	Mín.	Máx.	Promedio	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES		
					Promedio Mensual	Promedio diario	Instantáneo
TEMPERATURA*	°C	11.9	16.3	14.25	N.S.I.	N.S.I.	40 C (313 K)
pH*	unidades de pH	7.23	7.48	7.35	N.S.I.	5.5 – 10	5.0 – 10.0
CONDUCTIVIDAD*	µS/cm	926	978	953.5	N.S.I.	N.S.I.	N.S.I.
GRASAS Y ACEITES**	mg/L	21.7	39.6	26.61	15	25	N.S.I.
GASTO	L/s	-----	-----	-----	N.S.I.	N.S.I.	N.S.I.

TABLA DE RESULTADOS 8 (Parámetros Obligatorios)

PARÁMETROS	RESULTADO	LIMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PROMEDIO DIARIO	UNIDADES
DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO	* 120.78	150	mg/L
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	* 88.0	125	mg/L
SÓLIDOS SEDIMENTABLES	* 2.0	2	mL/L
FÓSFORO TOTAL	* 7.04	30	mg/L
NITRÓGENO TOTAL	* 48.624	60	mg/L
COLIFORMES FECALES	* 4×10^6	2000	NMP / 100 mL
HUEVOS DE HELMINTO	* 1	≤ 1	unidades/ L

TABLA DE RESULTADOS 9 (Parámetros Adicionales)

PARÁMETROS	RESULTADO	LÍMITE MAX.	UNIDADES
NITRÓGENO DE NITRITOS	<a 0.005	N.S.I	mg/L
NITRÓGENO DE NITRATOS	0.235	N.S.I	mg/L
NITRÓGENO DE KJENDALH	48.384	N.S.I	mg/L
SUSTANCIAS ACTIVAS AL AZUL DE METILENO	<a 0.05	N.S.I	mg/L
DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO	672	800	mg/L

NOMENCLATURA:

< M.L D.- Menor que el Limite de Detección

N. D - No Detectado

p. p. - Promedio Ponderado.

* - Parámetros Normados (NOM – OO1 – SEMARNAT – 1996)

N. A. – No Aplica

N. S. I. – No Se Indica.

L. M. P. - Limite Máximo Permissible.

Máx. -Máximo

Mín.- Mínimo



Anexo 4

Efluente Final (Enero)

TABLA DE RESULTADOS 10

PARÁMETRO	Unidades	Mín.	Máx.	Promedio	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES		
					Promedio Mensual	Promedio diario	Instantáneo
TEMPERATURA*	C	9.0	14.9	12.6	N.S.I.	N.S.I.	40 C (313 K)
pH*	unidades de pH	6.38	7.57	7.12	N.S.I.	5.5 – 10	5.0 – 10.0
CONDUCTIVIDAD*	µS/cm	739	958	884.3	N.S.I.	N.S.I.	N.S.I.
GRASAS Y ACEITES**	mg/L	9.7	18.4	13.11	15	25	N.S.I.
GASTO	L/s	--	--	--	N.S.I.	N.S.I.	N.S.I.

TABLA DE RESULTADOS 11 (Parámetros Obligatorios)

PARÁMETROS	RESULTADO	LIMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PROMEDIO DIARIO	UNIDADES
DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO	*	71.05	150 mg/L
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	*	12.0	125 mg/L
SÓLIDOS SEDIMENTABLES	*	N.D.	2 mL/L
FÓSFORO TOTAL	*	5.4	30 mg/L
NITRÓGENO TOTAL	*	20.462	60 mg/L
COLIFORMES FECALES	*	N.D.	2000 NMP / 100 mL
HUEVOS DE HELMINTO	*	N.D.	≤ 1 unidades/ L

TABLA DE RESULTADOS 12 (Parámetros Adicionales)

PARÁMETROS	RESULTADO	LÍMITE MAX.	UNIDADES
NITRÓGENO DE NITRITOS	2.88	N.S.I	mg/L
NITRÓGENO DE NITRATOS	0.222	N.S.I	mg/L
NITRÓGENO DE KJENDALH	17.36	N.S.I	mg/L
SUSTANCIAS ACTIVAS AL AZUL DE METILENO	< 0.05	N.S.I	mg/L
DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO	288	800	mg/L

NOMENCLATURA:

< M.L D.- Menor que el Limite de Detección

N. A. – No Aplica

Máx. -Máximo

N. D - No Detectado

N. S. I. – No Se Indica.

Mín.- Mínimo

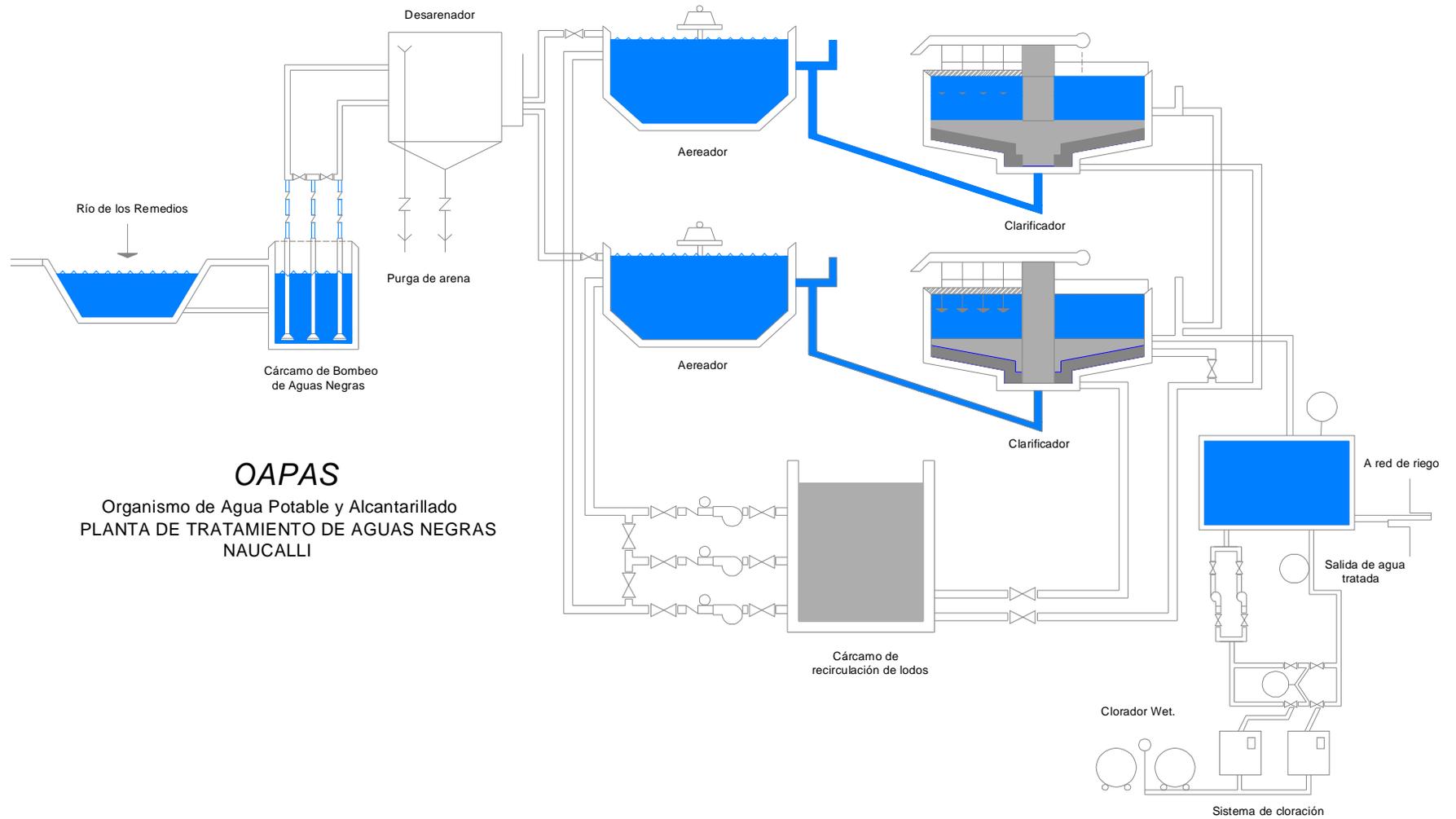
p. p. - Promedio Ponderado.

L. M. P. - Limite Máximo Permissible.

* - Parámetros Normados (NOM – OO1 – SEMARNAT – 1996)



Anexo 5



OAPAS
Organismo de Agua Potable y Alcantarillado
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS NEGRAS
NAUCALLI

