



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“DIAGNÓSTICO AMBIENTAL EN EL PREDIO QUE
OCUPÓ UNA FUNDICIÓN DE COBRE”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA**

PRESENTA

DIANA ANGÉLICA BAEZA DOMÍNGUEZ



MÉXICO, D.F.

AÑO 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Carlos Galdeano Bienzobas
VOCAL: Águeda Elena Ceniceros Gómez
SECRETARIO: Ana Laura Maldonado Hermenegildo
1^{er}. SUPLENTE: Juan Pablo Saucedo Vázquez
2^{do} SUPLENTE: Alejandra Mendoza Campos

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

LABORATORIO DE BIOGEOQUÍMICA AMBIENTAL, FACULTAD DE QUÍMICA

ASESOR DEL TEMA:

Dra. Águeda Elena Ceniceros Gómez

SUSTENTANTE:

Diana Angélica Baeza Domínguez

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	7
2. ANTECEDENTES	9
2.1. El suelo	9
2.2. Contaminación Antropogénica del Suelo	14
2.3. Contaminación por Elementos Potencialmente Tóxicos en el Suelo	15
2.4. Elementos Potencialmente Tóxicos: EPT'S	20
2.5. Normas mexicanas existentes en materia de Contaminación del Suelo	26
2.6. Técnicas Analíticas utilizadas en el proyecto: Digestión Ácida, ICP-EOS y FRX.....	32
2.7. Remedación de Suelos Contaminados con EPT'S	40
3. OBJETIVOS	54
3.1 Objetivos particulares.....	54
4. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	55
4.1. Descripción de las condiciones Climáticas.	56
4.2. Edafología	57
5. PARTE EXPERIMENTAL	58
5.1. Muestreo	58
5.2. Manejo y Control de Muestras	61
5.3. Preparación de las Muestras.....	61
5.4. Análisis Físicos y Químicos.....	62
6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	65
6.1. Suelos y Fondos	65
6.2. Zanjas	84
7. GEOQUÍMICA DEL ARSÉNICO Y PLOMO	94
7.1. Arsénico	94
7.2 Plomo	98
7.3. Análisis Final	101

8. PROPUESTA DE REMEDIACIÓN	106
9. PROPUESTA: RECUPERACIÓN DE COBRE (Cu) EN SUELOS POR COLUMNAS DE LIXIVIACION	115
9.1. Parte Experimental.....	115
9.2. Resultados y Análisis de Resultados	118
10. CONCLUSIONES	120
11. REFERENCIAS	123
12. ANEXOS	129
12.1. Anexo A. Suelos y fondos	129
12.2 . Anexo B. Mapas de Suelos y fondos	132
12.3. Anexo C. Zanjas.....	139
12.4. Anexo D. Concentración total de Cobre en las muestras de suelos	141
12.5. Anexo E. Conjunto de Técnicas de remediación: Costos y tiempo.	142

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación antropogénica es aquella que es producida por los seres humanos, es decir, es el daño ecológico que originan las actividades que se desarrollan diariamente, como son las industriales, mineras, agropecuarias, artesanales, domésticas, etc., estas actividades han ejercido un efecto considerable en la concentración y movilidad de los elementos en los suelos; dependiendo del tipo de actividad son específicos los residuos que se generan, los cuales pueden ser peligrosos y sumamente tóxicos para la población y el ambiente.

A consecuencia de la protección y recuperación de suelos por sustancias tóxicas, se han desarrollado diferentes técnicas de remediación para suelos, las cuales dependen del tipo de contaminante y de sus concentraciones presentes en un suelo en específico. Por tal motivo la recuperación de los suelos contaminados se ha convertido en una actividad importante debido a la preocupación sobre los riesgos que provocan los contaminantes que penetran a los suelos por la actividad antropogénica generada a lo largo del tiempo. Por lo tanto se han creado soluciones para la limpieza e integración de los sitios contaminados de acuerdo a estudios que determinan la movilidad y biodisponibilidad de los elementos

En México para determinar los niveles de remediación en suelos se sigue la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, que establece los criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. En dicha norma se indican los pasos a seguir para la caracterización de un predio que consisten en medir los niveles de concentraciones totales de los elementos potencialmente tóxicos y/o determinar los niveles de fondo que se encuentran de manera natural.

En virtud de que los elementos regulados pueden estar presentes en el suelo de manera natural y en ocasiones en concentraciones tales que pueden representar un riesgo para la salud de la población humana o de los ecosistemas, es importante

INTRODUCCIÓN

establecer criterios para determinar el nivel de contaminación de origen antropogénico en suelos y en su caso las concentraciones de remediación y debido a la preocupación por la emisión de compuestos tóxicos que bajo ciertas condiciones pueden tener efectos nocivos a la salud de la población y afectaciones al equilibrio ecológico.

En el norte de México existe un predio donde se llevó a cabo este diagnóstico ambiental a partir de las concentraciones totales de referencia para delimitar el suelo contaminado de acuerdo a la información generada para proponer un plan de remediación y así recuperar el terreno con el fin de usarlo en un futuro para servicio y espacios recreativos como: oficinas, talleres, centros de capacitación, huerto didáctico, jardín escultórico, museo etc.

2. ANTECEDENTES

2.1. El suelo

El suelo es un recurso natural único, crucial y de gran importancia a nivel global para satisfacer las necesidades de la población humana. Más allá de su rol fundamental en los ecosistemas y la economía, y a diferencia del agua y el aire, no es un recurso infinito, de hecho es un recurso natural no renovable porque su regeneración es muy lenta y cada vez más escaso debido a que es ignorado en la puesta en práctica de las políticas y la agenda de desarrollo de cada país generando problemas de degradación, destrucción y contaminación natural o antropogénica que afectan a la sociedad, ecosistemas y a la biodiversidad. (Sanz y Sánchez M., 2006)

Las ciencias que se encargan del estudio del suelo son la **edafología** y la **pedología**, la primera se encarga del estudio de la composición y naturaleza del suelo en su relación con las plantas y el entorno que lo rodea, mientras que la segunda se ocupa del estudio de su formación, clasificación, morfología, génesis, taxonomía y de la interacción con el resto de los factores geográficos. (Sanz y Sánchez, 2006). De acuerdo a estas ciencias el suelo puede definirse como:

“La parte exterior de la corteza terrestre, formada por rocas desintegradas por efecto de la meteorización*. Está conformado por finas partículas minerales una flora y fauna microbiana que transforman la materia mineral en alimento de plantas.”

El término “suelo” puede tener distintas definiciones según la disciplina de estudio, a las funciones y servicios que realiza por ejemplo: la regulación y la distribución del flujo de agua o como amortiguador de los efectos de diversos contaminantes. Para la Ingeniería Civil es el material sobre el cual se construye y excava. (Sanz y Sánchez M, 2006). Desde el punto de vista agrícola, el suelo es la capa de material fértil que recubre la superficie de la Tierra y que es explotada por las raíces de las plantas y a partir de la cual obtiene sostén, nutrimentos y agua. (Sanz y Sánchez M, 2006). Desde una perspectiva ambiental, existen varias definiciones que incorporan su papel fundamental en los procesos que se presentan en los ecosistemas, por lo tanto se puede definir el suelo como:

***Meteorización:** Es el conjunto de procesos (químicos, físicos y biológicos) de desintegración y alteración que sufren las rocas y minerales cuando quedan expuestas a la acción de la atmósfera.

Una mezcla heterogénea de aire, agua, materia orgánica e inorgánica y microorganismos, que comprende la capa superior de la superficie terrestre hasta diferentes niveles de profundidad, en donde se llevan a cabo una serie de reacciones químicas y que tienen gran repercusión en un buen número de procesos relacionados con el ambiente. (Sanz y Sánchez M, 2006)

El suelo es una formación natural que se encuentra en la intersección de la litosfera, hidrosfera, biosfera y atmósfera. Resulta de la acción conjunta de procesos físicos, químicos y biológicos sobre el medio original. Dichos procesos transforman el material inicial hasta darle una morfología y propiedades características. El suelo está compuesto por elementos minerales y orgánicos en estado sólido, líquido y gaseoso, los cuales se interrelacionan dando lugar a distintos niveles de organización con variaciones tanto espaciales como temporales. Es un sistema complejo en el que suceden de manera continua procesos químicos, físicos y

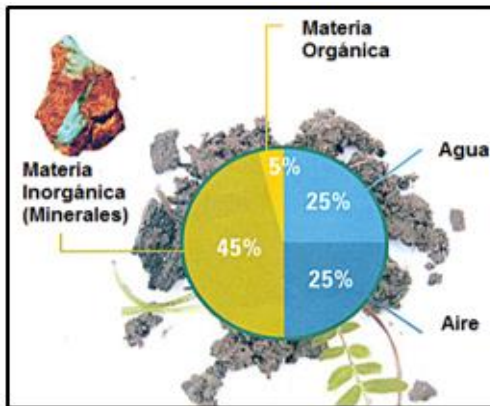


Figura 1. Composición del Suelo
(Fuente: <http://portalacademico.cch.unam.mx>)

biológicos.

Formación del Suelo

El suelo se forma mediante el fenómeno de Edafogénesis* que es el resultado final de la descomposición de las rocas bajo la acción de diversos factores biológicos, topográficos, el clima y la roca madre. Aunque el suelo está en constante formación, el proceso es sumamente lento. Se calcula que para tener

un centímetro de suelo en la capa superficial son necesarios entre 100 y 400 años, por lo cual se considera que el suelo es un recurso natural no renovable en la escala de tiempo humana como se mencionó anteriormente. (SEMARNAT, 2007). Si cavamos una zanja y observamos la sección vertical que aparece, conocida como perfil, podemos ver, en la mayoría de los casos, una serie de capas más o menos paralelas a la superficie. Estas capas se conocen como “**horizontes**” y son el resultado de los procesos geológicos, químicos y biológicos en el material parental durante la vida del suelo. A medida que aumenta la edad del suelo, los horizontes son generalmente más fáciles de observar.

***Edafogénesis:** Conjunto de procesos fisicoquímicos y biológicos que intervienen en la formación del suelo a partir de la roca madre o roca parental hasta la configuración de un determinado tipo de suelo.

ANTECEDENTES

La mayoría de los suelos presentan generalmente tres o cuatro horizontes, definidos principalmente por el color, textura, estructura, contenido en materia orgánica y presencia de carbonatos. A continuación (*Tabla 1 y Figuras 2 y 3*) se presenta el perfil con la identificación y descripción de los horizontes principales que suelen presentar los suelos.

Tabla 1. Perfil general de un Suelo

HORIZONTES DE UN SUELO	
O. Horizonte Orgánico	Es la capa menos profunda del suelo. Alcanza una profundidad de unos pocos cm.
A. Horizonte superficial	Contiene gran cantidad de materia orgánica descompuesta (de ahí su color oscuro). Es aquí donde se da la mayoría de los procesos biogeoquímicos (crecimiento de la biomasa, y liberación de nutrientes). Esta capa superficial del suelo es eliminada a causa de la erosión o la actividad humana, con ella desaparece la mayor parte del potencial ecológico del suelo y tarda cientos o miles de años para que recupere su condición original.
E. Horizonte de lavado	Se lleva a cabo la lixiviación de minerales, arcillas y cationes presentes en esta capa. Suele tener tonos más claros y textura suelta
B. Horizonte subsuperficial	Se produce acumulación y precipitación de arcillas, coloides y soluciones provenientes del Horizonte A. Está compuesto por una o más capas de colores brillantes como el color marrón, amarillo o rojizo que indica su origen a partir de óxidos de hierro o minerales de arcilla, mientras que los tonos grises o verde – azulados evidencian una formación bajo condiciones de reducción.
Horizonte C	Está formado por la fracción mineral de la roca madre. Esta poco afectado por los procesos biológicos propios del suelo aunque si está afectado por procesos fisicoquímicos
Horizonte R	Roca madre: Capa compuesta por rocas y por lo tanto difícil de penetrar

Fuente:

Elaboración propia con datos de:

° Sanz Juárez M, Sánchez Andreu J, Sánchez Sánchez A. (2006). *Química del suelo y medio ambiente. Publicaciones de la Universidad de Alicante*. Pág. 16,

° Volke Sepúlveda T., Velasco Trejo J. A., De la Rosa Pérez D.A. (2005). *Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación. Instituto Nacional de Ecología*. Pág. 15

° Gardí, C., Angelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz Gaistardo, C., Encina Rojas, A., Jones, A., Krasilnikov, P., Mendonça Santos Brefin, M.L., Montanarella, L., Muñiz Ugarte, O., Schad, P., Vara Rodríguez, M.I., Vargas, R. (eds), 2014. *Atlas de suelos de América Latina y el Caribe, Comisión Europea - Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, L-2995 Luxembourg*, Pág. 13

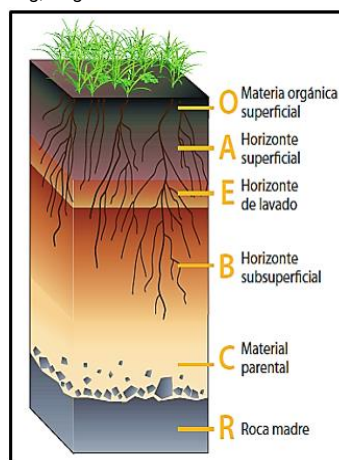
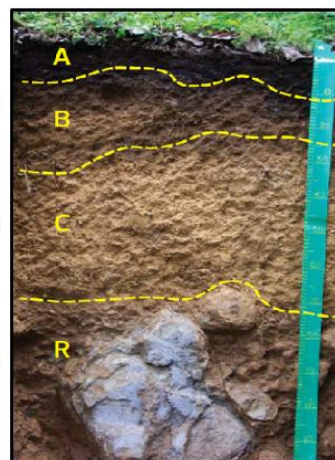


Figura 2. (Izquierda) Esquema de un perfil teórico donde se muestra los horizontes más importantes del suelo.

Figura 3. (Derecha) Ejemplo de un suelo en Nayarit, México donde se puede apreciar los horizontes A, B, C.

(Fuente: *Atlas de suelos de América Latina y el Caribe, pdf en línea*)



ANTECEDENTES

El suelo se compone de una mezcla compleja de partículas minerales y orgánicas que representan los productos de la meteorización y de los procesos bioquímicos. Además de estos elementos sólidos, también encontramos líquidos y gases en este complejo sistema. La fracción líquida del suelo está formada por una disolución acuosa de sales, iones (Na^+ , K^+) y por una amplia serie de compuestos orgánicos. Esta fase líquida del suelo desempeña un papel fundamental en el sistema como vehículo de las sustancias químicas donde los poros y grietas del suelo albergan la parte gaseosa, constituida fundamentalmente por gases atmosféricos, aunque con una mayor concentración de dióxido de carbono que el existente en la atmósfera de la Tierra debido al metabolismo respiratorio de los seres vivos del suelo, incluidas las raíces y los hongos.

El suelo es un recurso natural que desempeña varias funciones y usos:

- ❖ Actúa como regulador y medio filtrante del ciclo de agua y ciclos biogeoquímicos*
- ❖ Alberga una gran diversidad de organismos lo que implica que el suelo contiene importantes reservas genéticas.
- ❖ Es el espacio para actividades agrícolas, ganaderas, forestales, recreativas, de construcción y es parte de la riqueza cultural del paisaje. (Sanz y Sánchez, 2006)

- **Propiedades Físicas.**

Color: Se utiliza para clasificar el suelo y sirve como indicador de los minerales dominantes presentes en el mismo así como del contenido y estado de descomposición de la materia orgánica. (Raudes, 2009)

Textura: Describe la proporción de las partículas minerales presentes en el suelo en función de su tamaño. Las principales clases de partículas, según la clasificación de la FAO*: arcilla (<0,002 mm), limo (0,002 - 0,63 mm) y arena (0,063 - 2,0 mm). El intervalo de tamaños para cada clase puede variar en los diferentes países. (Sanz y Sánchez, 2006)

***Ciclos biogeoquímicos:** Movimiento de los elementos como el O₂, H, Ca, Na, S, P, K y otros elementos entre los seres vivos y el ambiente mediante una serie de procesos: producción y descomposición.

***FAO:** Por sus siglas en inglés: Food and Agriculture Organization, organismo especializado de la ONU que dirige las actividades internacionales encaminadas a erradicar el hambre

Estructura: Se refiere al arreglo o disposición física de las partículas del suelo (también llamados agregados) y el espacio entre ellas. La estructura del suelo tiene una gran influencia en el movimiento del agua y el aire, y también en el crecimiento de las raíces. Depende de factores tales como el material parental, la mineralogía, la actividad biológica, las condiciones ambientales, la gestión del suelo y la cantidad de arcilla y materia orgánica. (Sanz y Sánchez, 2006)

- **Propiedades químicas del Suelo.**

Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC): Se define como la capacidad de los suelos para retener o intercambiar cationes (Ca^{+2} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Fe^{3+} , Al^{+3} , Mn^{2+} y H^+). El Sistema Internacional expresa, la CIC en centimoles de carga positiva por Kg de suelo ($cmol/Kg$). (Sanz y Sánchez, 2006)

El pH en el Suelo: El potencial de hidrógeno determina la concentración de iones hidrógeno (H^+), por la interacción de los componentes sólidos y líquidos del suelo. Es el indicador principal del grado de acidez (pH inferior a 7) o alcalinidad (un pH por arriba de 7) que influye en la solubilidad, movilidad, disponibilidad de otros constituyentes y contaminantes inorgánicos presentes en el suelo. El valor de pH es el logaritmo del recíproco de la concentración de iones hidrógeno, que se expresa por números positivos del 0 al 14.
$$pH = \log(1/[H^+]) = -\log[H^+]$$

En base al grado de acidez o basicidad los suelos pueden dividirse en distintas clases: suelos ácidos se dan generalmente en regiones húmedas, suelos alcalinos son comunes en regiones áridas o semiáridas. (Sanz y Sánchez, 2006)

Conductividad eléctrica: Es la capacidad de una solución de suelo para transportar corriente eléctrica, generalmente se expresa en $m\Omega/cm$ o en mS/cm . Es una propiedad que se encuentra muy relacionada con el tipo y valencia de los iones presentes, su concentración total, su movilidad y su contenido de sólidos disueltos. La determinación de la conductividad eléctrica es por lo tanto una forma indirecta de medir la salinidad del suelo. (Linares, 2006)

Potencial REDOX: Es la capacidad reductora u oxidativa del suelo. La principal materia reductora del suelo resulta ser la materia orgánica, ya que se suele incorporar de forma reducida en los aportes de la biomasa. El metabolismo del suelo tiende a oxidarla, mediante la intervención de otros de sus elementos que pasan así a formas más reducidas. Del mismo modo, el oxígeno es el principal agente oxidante.

El potencial redox afecta a aquellos elementos que pueden existir en el suelo en dos o más estados de oxidación, como es el caso del O, C, N, S, Fe, Mn, C y Cu. Las condiciones de óxido-reducción resultan ser de vital importancia en los procesos de meteorización o alteración de los minerales del suelo y las rocas de las que proceden, por lo que repercuten directamente en la formación de los tipos de suelo, así como en la actividad biológica de los mismos. Del mismo modo, afectan a su fertilidad, ya que condicionan la biodisponibilidad* de varios elementos nutritivos indispensables para el desarrollo de las plantas, vía modificación del pH. (Cruz, 2007).

2.2. Contaminación Antropogénica del Suelo

“Un suelo contaminado es todo aquel cuyas características físicas, químicas o biológicas han sido alteradas negativamente por la presencia de componentes de carácter peligroso de origen antropogénico, en concentración tal que represente un riesgo para la salud humana o el ambiente.”(Nova Lex., Ed., 2008)

La contaminación antropogénica se refiere, como se mencionó anteriormente, al impacto negativo de los procesos o materiales procedentes de las actividades humanas generando un cambio en las propiedades del suelo y por consiguiente un daño en la población y los ecosistemas.

Las principales fuentes de contaminación de origen antropogénico son:



Aunque el suelo puede recibir elementos tóxicos de fuentes naturales, las actividades humanas han ejercido un efecto considerable en la concentración y

***Biodisponibilidad:** Es la fracción de las sustancias químicas, minerales, nutrientes o metales pesados que está disponible para la absorción por las plantas y seres vivos.

movilidad* de los elementos potencialmente tóxicos (EPT'S) provenientes de plaguicidas, fertilizantes, lodos residuales, aguas de riego, aguas residuales, emisiones de automóviles, depósitos minerales uso de productos fitosanitarios* entre otras generando una gran cantidad de problemas.

Así, algunos son esenciales para muchos seres vivos, microorganismos, plantas, animales y el hombre, si bien, es verdad, que cuando sobrepasan ciertas concentraciones se transforman en tóxicos, otros tienen efectos beneficiosos, mientras que otros provocan graves daños ambientales.

Por lo tanto, resulta de gran interés, conocer el comportamiento (reacciones químicas) y movilidad, de estos elementos en el suelo y los problemas ecológicos que se pueden presentar por altas concentraciones, así como el grado de toxicidad que cada elemento tiene para determinar si es nocivo o tiene beneficios al ecosistema y a la sociedad. (Sanz y Sánchez, 2006).

2.3. Contaminación por Elementos Potencialmente Tóxicos en el Suelo

Algunos elementos son necesarios para los seres vivos, pero pueden llegar a ser tóxicos si rebasan ciertas concentraciones, a estos últimos se les llamaba con frecuencia "metales pesados". Químicamente se entendía por "metal pesado" a los metales cuyo peso específico sea mayor a 5 g/cm^3 y que estén localizados entre los números 22 al 34 y 72 al 84, además de las series lantánida y actínida.

No obstante es una definición algo convencional y, sobre todo, poco uniforme cuando se consideran sus propiedades fisicoquímicas y sus funciones biológicas. Así, a nivel biológico los **elementos esenciales** son el Fe, Mn, Zn, Cu y Mo. El grupo formado por Ni, Cr, V y Ti, entre otros, por encontrarlos en bajas concentraciones en condiciones normales en suelos, plantas y organismos vivos se les denomina **elemento o metal traza**. Por último los elementos que son innecesarios para los seres vivos se les llaman **no esenciales o tóxicos**.

Sin embargo, ninguna de las definiciones anteriores agrupa al total de elementos que puede formar parte del conjunto de los llamados "metales pesados" por lo tanto desde hace varios años se ha generalizado el término **Elementos Potencialmente Tóxicos o EPT** para designar a los elementos químicos, metales y metaloides, que por diversas actividades humanas se han ido incorporando al ambiente.).

***Movilidad**: Se refiere a la distribución y retención de los metales en los suelos a consecuencia de la actividad biológica, la interacción sólido-líquida y acción del agua.

***Productos fitosanitarios**: De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), se define al producto fitosanitario como la sustancia o mezcla de sustancias destinadas a prevenir la acción de destruir directamente formas de vida animal o vegetal (insectos, ácaros, roedores, bacterias) perjudiciales para la salud pública y para la agricultura.

ANTECEDENTES

Algunos EPT's son esenciales para diversas especies y necesarios para que se lleven a cabo determinadas funciones biológicas, pero a la vez tóxicos cuando se hallan a concentraciones elevadas; la especie química en que se encuentran, las características del suelo (pH, potencial redox, contenido y naturaleza de la materia orgánica y arcillas, presencia de oxi-hidroxidos de Fe, Al y Mn) y condiciones climáticas son determinantes de su movilidad y por consiguiente de su disponibilidad y toxicidad para los seres vivos. (Felipó, 2001 citado por Moreno y Moral ,2008)

Los EPT'S se encuentran en rocas y / o material originario del suelo en forma natural, si bien, en su mayor parte se encuentran formando parte de compuestos y estructuras no disponibles para los organismos vivos pero ciertos elementos pueden liberarse al ambiente por distintos factores, principalmente por los procesos edafogénicos* de formación de los suelos y las diversas acciones contaminantes, tanto naturales como antropogénicas. Dentro de las fuentes naturales de contaminación podemos citar: (Sanz y Sánchez, 2006).

- *Meteorización de material originario*
- *Erupciones volcánicas*
- *Disgregación de meteoritos*

En cuanto a la **contaminación antropogénica**, en la *Tabla 2* se mencionan las principales fuentes de contaminación de elementos potencialmente tóxicos.

Tabla 2. Fuentes de elementos potencialmente tóxicos en el medio ambiente

Minería y Fundiciones	Industrias
Montones de residuos contaminan por meteorización, erosión (As, Cd, Hg, Pb) Lixiviación de minerales (As, Cd, Hg, Pb) Transporte de menas (As, Cd, Hg, Pb) Fundiciones, contaminación debida a polvo, aerosoles (As, Cd, Hg, Pb, Sb, Se) Industria de hierro y acero (Cu, Ni, Pb) Acabado de metales (Zn, Cu, Ni, Cr, Cd)	Plástico (Co, Cr, Cd, Hg) Textiles (Zn, Al, Ti, Sn) Microelectrónica (Cu, Ni, Cd, Zn, Sb) Protección de Madera (Cu, Cr, As) Refinerías (Pb, Ni, Cr)
Agricultura	Aplicación de residuos al Suelo
Fertilizantes (por ejemplo As, Cd, Mn, U y Zn en algunos fertilizantes fosfóricos) Estiércol (As, y Cu en algunos estiércoles de cerdos y gallinas, Mn, y Zn en estiércol de corral) Plaguicidas (Cu, Mn, y Zn en funguicidas, As y Pb en insecticidas) Aguas de riego (Cd, Pb, Se) Corrosión de metales (Fe, Pb, Zn)	Lodos (Cd, Cr, Cu , Hg, Mn, Ni, Pb, V, Zn) Lixiviados desde basureros (As, Cd, Fe, Pb) Escombreras (Cd, Cr, Cu, Pb, Zn) Cenizas (Cu, Pb)

Fuente: Sanz Juárez M, Sánchez Andreu J, Sánchez Sánchez A. (2006) *Química del suelo y medio ambiente*. Publicaciones de la Universidad de Alicante. Pág. 679

***Procesos Edafogénicos:** Entre los procesos principales se encuentran la lixiviación, lavado y salinización.

- ❖ **Dinámica y Movilidad de los Elementos Potencialmente Tóxicos en el Suelo:** La composición mineral del suelo, junto con las propiedades de cada elemento en particular, y las condiciones del medio, son determinantes para la forma o formas predominantes en que cada elemento se presenta en un determinado suelo, lo que en definitiva va a establecer el comportamiento de estos elementos en la dinámica general del suelo. Los elementos se pueden encontrar en los suelos en distintas formas fisicoquímicas: (Sanz y Sánchez, 2006)
- ❖ **Solubles:** Como iones libres, o en forma de complejos solubles unidos tanto a ligandos orgánicos como inorgánicos.
- ❖ **Intercambiables:** Retenidos por complejos de esfera externa de los suelos, y pueden ser desplazados isotópicamente por otros cationes o aniones presentes mayoritariamente en la disolución del suelo.
- ❖ **Adsorbidos a las superficies inorgánicas y orgánicas de los suelos:** son liberados más lentamente que los intercambiables, y no son fácilmente reemplazables por cationes mayoritarios.
- ❖ **Precipitados:** carbonatos, sulfatos, fosfatos. hidróxidos, etc.

La movilidad de un elemento depende no sólo de su especiación química, sino de una serie de parámetros del suelo, no todos los cationes intercambiables están igualmente disponibles, sino que depende del mineral o minerales de los que están formando parte como complejo intercambiable. Cuando el metal está precipitado, no se comportará igual si lo hace como carbonato, sulfato o fosfato. Tampoco será lo mismo que el metal se encuentre formando parte de un sulfuro (relativamente oxidable y solubilizable) que de un silicato (prácticamente resistente en todos los medios). (Galán, 2008) Las condiciones o parámetros fisicoquímicos que son determinantes para la movilidad de los metales pesados se presentan a continuación:

a) El pH. Es un parámetro importante a la hora de definir la movilidad del catión. Los cambios en el pH afectan la formación de diferentes especies químicas, como

complejos de hidróxidos y carbonatos. En general, en medios de pH moderadamente ácidos los metales tienden a estar más disponibles y pueden precipitarse como hidróxidos, aunque en medios muy alcalinos, los metales pueden nuevamente pasar a la disolución del suelo como hidrox-complejos. (Cruz, 2007)

b) Potencial de Oxidación- Reducción. Es responsable de que el metal se encuentre en estado oxidado o reducido. Las condiciones redox pueden producir: un cambio directo en la valencia de ciertos metales y una influencia indirecta en la movilidad de los metales. (Cruz, 2007)

c) Especiación de los metales. Es importante conocer la forma química bajo la que se presenta el metal, es decir su especiación, ya que va a regular no solo su disponibilidad sino también el grado de toxicidad que presente la cual dependen directamente de la forma química. En algunos casos hay diferencias importantes entre la toxicidad de las distintas formas de oxidación de un mismo elemento, como es el caso de los compuestos del Cr (III) y Cr (VI). (Cruz, 2007).

d) Materia Orgánica. Reacciona con los metales formando complejos o quelatos*. La adsorción* puede ser tan fuerte que hace queden estabilizados, como el caso del Cu, o formen quelatos también muy estables, como suele pasar con el Pb y Zn. En muchos casos se forman complejos organometálicos* lo que facilita la solubilidad del metal, la disponibilidad y dispersión porque pueden degradarse por los organismos del suelo. Esto conduce a una persistencia de la toxicidad. (Galán, 2008)

e) Intercambio Catiónico. El poder de intercambio catiónico depende del tipo de arcilla, de la materia orgánica, de la valencia y del radio iónico del metal. A mayor tamaño y menor valencia, menos fuertemente quedan retenidos. (Galán, 2008)

f) Carbonatos: La presencia de carbonatos garantiza el mantenimiento de pHs, alcalinos > 8 y en estas condiciones tienden a precipitar los metales pesados. (Galán, 2008)

***Adsorción:** Proceso por el cual átomos, iones o moléculas son atrapados o retenidos en la superficie de un material

***Quelatos:** Son complejos de un ion metálico unidos a una molécula orgánica (ligando) por más de un sitio de coordinación

***Complejos Organometálicos:** Compuesto en que los átomos de carbono de un ligado orgánico forman enlaces covalente con un átomo metálico

g) Óxidos e hidróxidos de Fe y Mn. Juegan un importante papel en la retención de metales, metaloides y en su inmovilización. Se encuentran finamente diseminados en la masa de suelo por lo que son muy activos. Por su baja cristalinidad y pequeño tamaño de partícula tienen una alta capacidad de adsorción para metales divalentes, especialmente Cu y Pb, y en menor proporción Zn, Co, Cr, Mo, Ni y también As. (Galán, 2008)

h) Salinidad. El aumento de la salinidad puede incrementar la movilidad de metales y su retención por dos mecanismos. Primeramente, los cationes Na^+ y K^+ pueden reemplazar a metales en lugares de intercambio catiónico. En la segunda fase, los aniones cloruro y sulfato pueden formar compuestos más estables con metales tales como: Pb, Zn, Cu y Hg.

Por otra parte, las sales normalmente favorecen pH alcalino. (Galán, 2008)

Los procesos más importantes a los que se ven sometidos los elementos en el suelo son: **lixiviación, volatilización, adsorción por organismos, adsorción, complejación y precipitación**, los cuales se ven afectados a su vez por las condiciones fisicoquímicas (pH del medio, potencial redox, especiación de cada elemento). En seguida se muestra un esquema (*Figura 4*) donde se muestran los cuatro procesos distintos que pueden seguir los elementos potencialmente tóxicos incorporados al suelo: (Cruz, 2007)

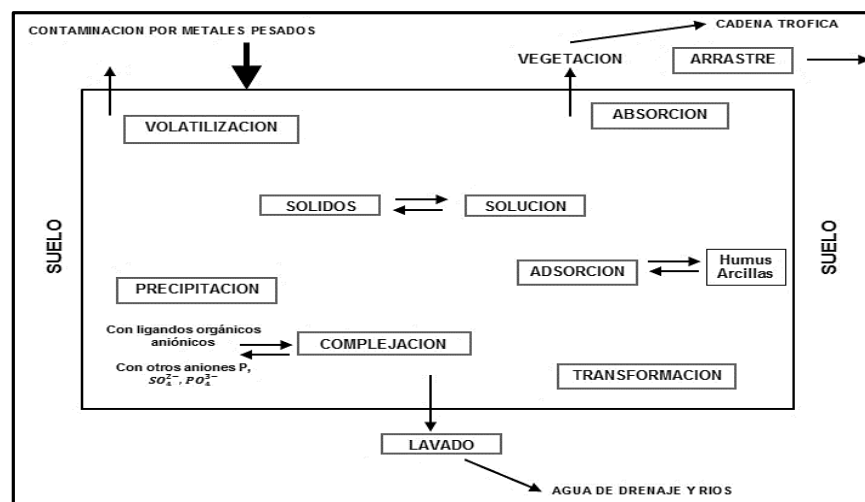


Figura 4. Dinámica de los metales pesados en el suelo. (Fuente: Cruz Guzmán Alcalá M. (2007). La contaminación de suelos y aguas)

ANTECEDENTES

Vía 1: Quedar retenidos en el suelo, disueltos en la disolución del suelo o bien fijados por procesos de adsorción, complejación y precipitación

Vía 2: Ser absorbidos por las plantas y así incorporarse a la cadena trófica*

Vía 3: Pasar a la atmósfera por volatilización

Vía 4: Movilizarse a las aguas superficiales o subterráneas

2.4. Elementos Potencialmente Tóxicos: EPT'S

A continuación se presenta de manera breve las características de los elementos (arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio) que comúnmente están presentes en suelos contaminados los cuales en concentraciones mayores a los límites pueden provocar daños a la salud de las poblaciones humanas

Arsénico, As

Se ubica en el grupo VA de la tabla periódica, es un elemento de color gris y aspecto metálico y está ampliamente distribuido por toda la corteza terrestre. Los compuestos de mayor importancia son el arsenito de sodio, el arsenato básico de plomo, el ácido cacodílico y el ácido metarsenico. Los más tóxicos son el trióxido y el pentaóxido de As (As_2O_3 y As_2O_5), comercialmente utilizados como raticidas, insecticidas y herbicidas. (Jiménez, 2001). Es un elemento que también puede adsorberse en oxi-hidroxidos de hierro bajo condiciones moderadamente reductoras o acidas. En ambientes reductores ($pH < 8$) y ácidos ($pH > 6$), los óxidos de As (III) y los sulfuros de As son estables. Sin embargo, bajo condiciones oxidantes las especies derivadas del arseniato son las más abundantes. (Sanz y Sánchez, 2006). La toxicidad del arsénico es muy compleja; depende de la forma química en que se presenta en el ambiente, la vía de exposición y del estado de valencia. El As puede entrar al cuerpo mediante tres rutas: vía respiratoria, por el tracto digestivo y la piel. Los compuestos con estado de oxidación +3 son más tóxicos que los pentavalentes debido a que los arsenitos suelen retenerse en mayores cantidades y por mucho más tiempo que los arsenatos en los tejidos. En cuanto a la forma química, los compuestos inorgánicos resultan ser más tóxicos del arsénico se presenta así:

***Cadena trófica o alimenticia:** es el proceso por el cual se transfiere energía alimenticia por medio de seres vivos, en donde cada uno de estos se alimenta del anterior y es alimento del siguiente. Es además una corriente de nutrientes y energía establecida entre las distintas especies de un ecosistema en relación a la nutrición del mismo

ANTECEDENTES

arsenitos inorgánicos > Compuestos orgánicos trivalentes > arsenatos inorgánicos > compuestos de Arsonio > arsénico elemental (Eisler et al. 1994 citado en Kabata, 2011). Por último, los efectos negativos del arsénico, principalmente de los compuestos inorgánicos trivalentes, radica en su actividad cancerígena, pudiendo producir cánceres de pulmón, piel, hígado etc.

Bario, Ba

Es un metal alcalinotérreo que se localiza en el grupo IIA de la tabla periódica, es abundante en la naturaleza y representa aproximadamente el 0,04 % de la corteza terrestre. En forma natural el Ba existe como carbonato. Sus principales fuentes son los minerales de barita: sulfato de bario y carbonato de bario. El Ba se utiliza mucho en la fabricación de aleaciones para las piezas de níquel-bario del sistema de encendido de automóviles y en la fabricación de vidrio, cerámica y tubos de imagen de los televisores. Los compuestos de bario también tienen efectos irritantes sobre las membranas mucosas y los ojos. El carbonato de bario un compuesto insoluble, no parece producir efectos patológicos por inhalación, sin embargo puede causar graves intoxicaciones por vía oral. (Nordberg, s.f)

Berilio, Be

Pertenece al grupo IIA de la tabla periódica, es un metal grisáceo, luminoso, ligero, duro y con elevado punto de ebullición que se presenta naturalmente en rocas y se estima que su concentración en la corteza terrestre va de 2 a 10 ppm. Por su alta reactividad, el Be normalmente no se encuentra en forma libre en la naturaleza. A causa de sus propiedades singulares como alta tenacidad y alta conductividad térmica, ha sido usado en un gran número de aplicaciones industriales, por ejemplo: aleaciones con cobre las cuales son empleadas en aparatos eléctricos, materiales de guerra, reactores atómicos y como aditivo en combustibles especiales. El Be es extremadamente tóxico, ya sea como metal o en cualquier compuesto. Las principales afecciones que provoca este elemento al introducirse por las vías respiratorias son: dermatitis, conjuntivitis, neumonía aguda y beriliosis palmar crónica. (Jiménez, 2001y Volke 2005)

Cadmio, Cd

El cadmio es un metal alcalino que pertenece al grupo IIB de la tabla periódica. Es un elemento que raras veces se suele encontrar en forma nativa en la naturaleza, apareciendo generalmente en asociación con minerales Zn, Pb-Zn y Pb-Cu-Zn. El Cd pasa fácilmente a la disolución del suelo como catión divalente Cd^{2+} que es la forma más usual, formando complejos con Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- o ligandos orgánicos. En general la adsorción de cadmio por los suelos se ve modificada por la presencia de ciertos iones en el medio y los cationes divalente como: Ca^{2+} , Co^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} y Pb^{2+} disminuyen la adsorción de Cd debido a la competencia entre el cadmio y estos iones. Se emplea en aleaciones con aluminio, Cu, N, Au, Ag, Bi y Zn para facilitar su fundición, en la fabricación de electrodos de baterías alcalinas, en los reactores nucleares, plásticos, fotoceldas y joyería. Es otro de los metales tóxicos que actúa como veneno acumulativo debido a su larga vida media, ataca principalmente a los riñones, destruye el tejido testicular y los glóbulos rojos. (Sanz y Sánchez, 2006).

Cromo, Cr

Pertenece VIB de la tabla periódica, es uno de los elementos que no se encuentra naturalmente en forma elemental, sólo en compuestos. Se puede presentar desde su forma divalente hasta hexavalente, siendo este último el más tóxico por su facilidad en atravesar las membranas celulares. Los tres factores principales que gobiernan el comportamiento del Cr, en función de su estado de oxidación (3^+ o 6^+) en el suelo son: pH, potencial redox y materia orgánica. La especie cromato depende del pH estando en equilibrio con otras especies como $HCrO_4^-$ y dicromato $Cr_2O_7^{2-}$ siendo la forma predominante el CrO_4^{2-} a pH superior a 6. El dicromato tiende a reducirse a Cr^{3+} en el suelo por la acción de la materia orgánica, siendo este hecho una posibilidad de interconversión entre las diferentes formas del cromo en el suelo. (Sanz y Sánchez, 2006)

Mercurio, Hg

Es un líquido metálico 13.6 veces más denso que el agua se encuentra en el grupo

ANTECEDENTES

IIB de la tabla periódica, es un elemento tóxico hasta el momento no se ha identificado alguna función fisiológica útil en el hombre. El mercurio es muy reactivo y una vez liberado en el suelo reacciona rápidamente con los constituyentes de este. A pH normal del suelo se encuentran los iones Hg^{2+} como Hg^+ , pero el ion monovalente representa únicamente una pequeña fracción de la concentración total de mercurio en suelo, aunque se incrementa unas 10 veces por cada unidad de aumento del pH. El Hg^{2+} presenta una gran facilidad para formar complejos con Cl^- , OH^- , S^{2-} , y los grupos funcionales con azufre de la materia orgánica (Jiménez, 2011, Sanz y Sánchez, 2006). La toxicidad del Hg depende de la forma química en la que se encuentre pero, de manera general provoca daños en el sistema nervioso (daños en la coordinación, sentidos del tacto, visión y gusto) e inmunitario, aparato digestivo, pulmones (irritación, edema) y riñones. (Nordberg, s.f)

Níquel, Ni

Es un metal de transición del grupo VIII B de la tabla periódica. El níquel es un elemento fácil de movilizar en el suelo cuando este está húmedo, entonces es cuando puede ser susceptible a coprecipitarse*, principalmente con óxidos de hierro y manganeso. Debido a las características particulares del níquel este se encontrará fundamentalmente en la disolución del suelo como ion hidratado a pH ácidos y formando complejos con $[OH]^-$ y ligandos orgánicos a pH por encima de la neutralidad. La distribución de níquel en el perfil del suelo, está relacionado con la materia orgánica con los óxidos amorfos y con la fracción arcillosa, dependiendo por tanto del tipo de suelo. La adsorción de níquel en suelos, este se encuentra unido a compuestos orgánicos, silicatos, óxidos e hidróxidos, carbonatos y fosfatos. La disponibilidad del níquel está muy relacionada con el pH del suelo, de forma que la solubilidad del metal es inversamente proporcional al valor del pH. Este elemento es empleado en el electroplatinado, instrumentos dentales, en la producción de acero inoxidable y monedas. Los compuestos de níquel pueden provocar reacciones alérgicas, náusea, vómito y diarrea, además ciertos compuestos han sido listados como carcinógenos por la EPA*. (Jiménez, 2001 y Sanz y Sánchez, 2006)

*EPA: Por sus siglas en inglés Environmental Protection Agency es una agencia del gobierno federal de Estados Unidos encargada de proteger la salud humana y proteger el medio ambiente: aire, agua y suelo

Coprecipitar: El proceso por el cual una especie que normalmente es soluble se separa de la disolución durante la formación de un precipitado.

Plata, Ag

La plata es un elemento del grupo IB, es estable en el ambiente y permanece así hasta que es extraído nuevamente. Con el tiempo puede cambiar de la forma original en que fue liberado a plata metálica y luego volver a ser parte de los mismos o de otros compuestos. Gran parte de ella se obtiene como subproducto de los minerales argentíferos de sulfuros de plomo, zinc, y cobre. La exposición al polvo con niveles relativamente altos de compuestos de plata como el nitrato de plata o el óxido de plata, pueden causar problemas respiratorios, irritación en los pulmones y la garganta así como dolor de estómago. (Jiménez, 2001)

Plomo, Pb

Es un metal que se encuentra en el grupo IVA de la tabla periódica. Se presentan con valencias 2^+ y 4^+ de los cuales el Pb (II) es la forma más común y reactiva. Cuando forma complejos con ligandos orgánicos (ácidos húmicos y fulvicos) o inorgánicos (Cl^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , PO_4^{3-}), se forman compuestos poco solubles, el carbonato de plomo, formado a pH menor 6 y el PbS son las formas sólidas más estables del plomo. Este elemento queda muy fuertemente retenido en los suelos, por lo que la concentración de plomo en la disolución del suelo es muy baja, especialmente en relación a metales como el Cd, Zn y Cu. Así, en suelos donde la concentración de $[OH]^-$ y $[Cl]^-$ es elevada se ha podido comprobar un aumento en la concentración de plomo soluble (McLaughlin, et al 1996 citado por Sanz y Sánchez, 2006). De los contaminantes ambientales conocidos el plomo tiene pocos competidores como un elemento persistente que causa efectos perjudiciales a los humanos, animales y ecosistemas. Su toxicidad se debe principalmente a que es acumulativa. La mayoría del plomo que está presente en el organismo se encuentra principalmente en la sangre, aunque al presentar una saturación de este elemento, el exceso entra en los tejidos blandos, incluyendo órganos, en particular, el cerebro. En último término, el plomo se deposita en los huesos, donde reemplaza al calcio puesto que los iones Pb^{+2} y el Ca^{+2} son similares en tamaño. Los síntomas de una intoxicación de plomo incluyen anemia, fatiga, dolor de cabeza, insomnio y pérdida de peso. (Baird, 2001).

ANTECEDENTES

Selenio, Se

Este elemento presenta valencias 2^- , 0 , 2^+ , 4^+ , 6^+ y está en el grupo VIA de la tabla periódica; se puede hallar en forma de Se^{2-} (seleniuros), Se (elemental), $Se_2O_3^{2-}$ (tioseleniatos), SeO_3^{2-} (selenitos), y SeO_4^{2-} (seleniatos). Las especies de selenio presentes en la disolución del suelo dependen de las condiciones redox y del pH. El Se^{6+} predomina en condiciones aeróbicas (oxidantes, alto potencial) tanto en medio ácido, neutro o básico. Pero en medios ácidos aeróbicos hay tendencia hacia el estado Se^{4+} . Bajo condiciones anaeróbicas (reducción, bajo potencial) predomina Se^{2-} . En suelos aireados ácidos (pH 4.5- 6.5) el selenio se encuentra normalmente como selenito férrico básico de baja solubilidad y es inaccesible para las plantas. En suelos alcalinos (pH 7.5- 8.5) el selenio puede ser oxidado a seleniato. (Sanz y Sánchez, 2006). El selenio elemental es inocuo para el hombre pero sus compuestos llegan a ser peligrosos que al absorberse provoca daños en los pulmones (edema), tracto intestinal o lesiones en la piel como quemaduras y en las mucosas. (Nordberg, s.f)

Talio, Tl

El talio puede encontrarse en forma elemental o en estado de oxidación uno Tl (I) y tres Tl (III). El talio se utiliza, básicamente, en la obtención de fungicidas, sistemas ópticos, células fotoeléctricas etc., si bien la principal fuente de contaminación se debe al procesado de otros metales como el cobre, plomo y zinc. Los factores de acumulación son más elevados que para otros metales, absorbiéndose en el hombre a través de las mucosas y de la piel y se acumula principalmente en huesos y medula renal. Los efectos provocados por el Tl se manifiestan de 1 a 2 días; producen daños gastrointestinales, dolor de extremidades y parálisis, polineuritis, presión alta, ceguera, daños al hígado y riñón y pérdida de cabello. (Jiménez, 2001)

Vanadio, V

Es un metal de transición que no se encuentra en forma pura por sus propiedades intrínsecas y es propenso a reaccionar con otros elementos. Sin embargo, su liberación en la atmósfera es principalmente ocasionada por la actividad humana,

ANTECEDENTES

por lo que es considerado un contaminante ambiental. En condiciones fisiológicas el V^{+5} predomina como anión vanadato y V^{+4} como catión vanadilo (VO^{2+}). A pH cercano a 7 el vanadio se encuentra como V^{3+} y en condiciones ácidas de pH 3.5, el ion vanadio es muy estable; en soluciones básicas predomina el ion ortovanadato. El V se concentra en el hígado y tiene una vida media de 15 a 20 horas, provoca irritación de las vías respiratorias superiores, fallas respiratorias y colorea la lengua de verde. (Jiménez, 2001)

2.5. Normas mexicanas existentes en materia de Contaminación del Suelo

A consecuencia de la existencia de una gran cantidad de sitios contaminados por elementos potencialmente tóxicos en México se establecieron la NMX-AA-132-SCFI-2006 que indica los lineamientos para realizar muestreo de suelos.

En dicha norma se señala el procedimiento para el manejo y control de las técnicas para la toma de las muestras de suelos, así como la Norma Oficial Mexicana 147 NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (NOM-147) que establece las diferentes alternativas para determinar la concentración de los EPT'S para posteriormente realizar un plan de remediación.

NMX-AA-132-SCFI-2006: MUESTREO DE SUELOS PARA LA IDENTIFICACIÓN Y LA CUANTIFICACIÓN DE METALES Y METALOIDES, Y MANEJO DE LA MUESTRA

Objetivo:

Esta norma mexicana establece las especificaciones técnicas para la obtención y el manejo de muestras, que permitan la caracterización de suelos en el sitio de estudio, a través de la identificación y cuantificación de metales y metaloides, entendiendo por éstos el arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y vanadio.

Esta norma, establece una guía general o un **Plan de Muestreo** para la conducción del muestreo de los suelos, además de la aplicación de métodos analíticos para lograr definir la naturaleza y extensión de la contaminación.

ANTECEDENTES

Para la aplicación del Plan de Muestreo, anteriormente se debe realizar un proceso sistemático de revisión de documentos, mapas e información del sitio para determinar si la propiedad es o podría estar contaminada y ubicar el sitio contaminado. El propósito del Plan de Muestreo es : organizar, definir y establecer los procedimientos y responsabilidades de los participantes, así como, describir la técnica de muestreo que se va realizar para programar las actividades, su duración y las medidas de aseguramiento de calidad en cada etapa del muestro.

Dicho plan debe contener la siguiente información:

Lugar y fecha de elaboración	Número de muestras y profundidad de las muestras
Nombre y firma de los responsables de la elaboración	El procedimiento de muestreo, materiales, equipos de muestreo y seguridad, recipientes, etiquetas y registros de campo. La custodia de las muestras.
Tipo de muestra	Procedimiento de aseguramiento y control de calidad del muestreo.
Localización del Sitio y Diseño de muestreo	Descripción de actividades, responsables y tiempos de ejecución.
Justificación para la ubicación, criterios y métodos utilizados para la distribución de los puntos e muestro.	
La ubicación y el número de puntos de muestreo	

También se establecen los tipos de muestreo, así como los métodos para determinar la localización y distribución de los puntos de muestreo donde se incluyen especificaciones para obtener muestras de suelo representativas para establecer la distribución horizontal de los metales y metaloides y valorar su posible migración vertical. Los tipos de muestro que incluye la NMX-AA - 132-SCFI-2006 son los siguientes:

ANTECEDENTES

Tabla 3. Muestreo Exploratorio

Muestreo Exploratorio	
Objetivo: Obtener las muestras de suelo representativas para establecer la presencia de contaminación y en su caso la distribución horizontal de la misma, y valorar su posible migración vertical.	
Áreas no urbanas	Área urbana
<p>Muestreo Superficial (0 cm a 5 cm de profundidad): El tipo de muestra que se toma es simple y el número mínimo de puntos de muestreo del sitio van de acuerdo a lo que establece la Norma 132. La distribución de los puntos se puede hacer a juicio de experto o de acuerdo a las especificaciones establecidas en los apéndices informativos de la NOM-147.</p> <p>Muestreo Vertical: Se realiza para valorar la migración vertical de contaminantes, se pueden utilizar excavaciones, que permitan el acceso de la persona, así como ver y mostrar el perfil del suelo. El tipo de muestra es simple y el número mínimo de pozos va en función del área supuestamente contaminada. La profundidad está determinada por la profundidad a la que se obtengan valores iguales o menores de concentraciones de referencia (establecidas en las normas oficiales mexicanas aplicables)</p>	<p>Muestreo Superficial (0 cm a 5 cm de profundidad): Se toman los mismos criterios que para las áreas no urbanas.</p> <p>Muestreo Vertical: En el caso en que se considere necesario se realizan muestreos verticales tomando los mismos criterios para áreas no urbanas.</p>

Tabla 4. Muestreo de Detalle

Muestreo de Detalle	
Objetivo: Determinar el volumen del suelo contaminado de acuerdo a las concentraciones de remediación determinadas en las normas oficiales mexicanas aplicables.	
Áreas no urbanas	Área urbana
<p>Muestreo Superficial (mayor a 0.1 hectárea y menores a 1 hectárea): El tipo de muestra que se toma es simple y el número mínimo de muestreo se define en los apéndices A, B, C de la NMX_AA - 132-SCFI-2006.</p> <p>Muestreo Superior en extensiones mayores o iguales a 1 hectáreas: Para definir el área de muestreo y el tipo de muestra se utilizan los mismos criterios que en el muestreo exploratorio. Cada hectárea se divide en partes iguales y la profundidad de muestreo depende de si es para uso residencial e industrial (0 cm a 5 cm) o para uso agrícola y forestal: (0 cm a 30 cm)</p> <p>Muestreo Vertical Solo se realiza cuando los resultados de los análisis químicos de las muestras tomadas durante el muestro exploratorio indican que puede existir migración vertical de los contaminantes Se toman muestras por medio de pozos en cortes verticales hasta la profundidad indicada por el muestreo exploratorio o bien hasta que se alcance roca firme o nivel de saturación de agua.</p>	<p>Muestreo superficial (0 cm – 5 cm): El área de muestreo se define sumando las áreas en las cuales en el muestreo exploratorio se obtuvieron valores por encima de la concentración de referencia establecidas en las normas oficiales mexicanas aplicables. El número mínimo de puntos de muestro van en función de la superficie del área a muestrear. La distribución de los puntos de muestreo van de acuerdo a las áreas contaminadas, procurando incluir parques, jardines (públicos y particulares) y banquetas.</p> <p>Muestreo Vertical En el caso en que se considere necesario se realizan muestreos verticales tomando los mismos criterios para áreas no urbanas.</p>

ANTECEDENTES

Tabla 5. Muestreo de Fondos

Muestreo de Fondos	
Objetivo: Obtener muestras representativas del sitio en estudio, que permitan determinar las concentraciones de los metales y metaloides en suelos no afectados por la fuente de contaminación. Con ello se definirán los niveles de fondo locales que sirvan de referencia y representación del suelo no afectado	
Áreas no urbanas	Área urbana
El tipo de muestra que se toma es simple, donde la selección del área y puntos de muestreo van en función de la geología, pH, topografía, localización del sitio, historia del sitio y de la posible contaminación antropogénica que se encuentre alrededor del sitio. El número mínimo de puntos de muestreo es de 12 por cada tipo de suelo definidos según su matriz mineralógica. Para la distribución de los puntos de muestreo se recomienda utilizar el muestreo simple aleatorio que se explica en los apéndices de la Norma 132 y la profundidad de muestreo va de 0 cm a 5 cm a partir de la superficie	El número mínimo por muestra es de 12 por cada tipo de suelo definido según su matriz mineralógica. La profundidad que en la que se realiza el muestreo es 0 a 5 cm a partir de la superficie y la ubicación de los puntos de muestreo van de acuerdo a la información documental y de campo específica y que no estén afectados por la fuente de contaminación del sitio evaluado.

Tabla 6. Muestreo de Comprobación posterior a la Remediación

Muestreo de Comprobación posterior a la Remediación	
Objetivo Demostrar que un suelo, que se determinó contaminado con metales y metaloides y que ha sido sometido a una remediación, ha alcanzado concentraciones menores o iguales a los valores establecidos como concentraciones objetivo.	
Suelos no excavados	Suelos excavados
Para este muestreo se toman los mismos criterios que en el muestreo exploratorio.	Este muestreo se realiza previamente antes de ser excavado el suelo. La distribución de los puntos de muestreo y el tipo de muestreo se realizará según se encuentre dispuesto el material.

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2001, QUE ESTABLECE CRITERIOS PARA DETERMINAR LAS CONCENTRACIONES DE REMEDIACION DE SUELOS CONTAMINADOS POR ARSENICO, BARIO, BERILIO, CADMIO, CROMO HEXAVALENTE, MERCURIO, NIQUEL, PLATA, PLOMO, SELENIO TALIO Y/O VANADIO.

Objetivo:

La presente Norma Oficial Mexicana establece los criterios para la caracterización y determinación de concentración de remediación de suelos contaminados por Arsénico, Bario, Berilio Cadmio, Cromo Hexavalente, Mercurio, Níquel, Plata, Plomo, Selenio, Talio, Vanadio y sus componentes inorgánicos; así como los criterios de remediación.

El crecimiento de las actividades humanas que dan origen a la contaminación antropogénica ha contribuido a que las concentraciones de los elementos

ANTECEDENTES

potencialmente tóxicos se estén incrementando en el suelo, generando mayores sitios de contaminados los cuales provocan grandes daños y riesgos a la salud humana y a los ecosistemas.

La presente Norma Oficial Mexicana, establece diferentes alternativas para determinar la concentración objetivo a la cual se debe remediar un suelo., estas opciones incluyen:

- ❖ Concentraciones de Referencia (Totales y Solubles)
- ❖ Concentraciones de Fondo en el suelo
- ❖ Calculo de concentraciones específicas conforme a las características propias del sitio
- ❖ Concentraciones basadas en la biodisponibilidad de los contaminantes.

Cuando las concentraciones de estos elementos en el sitio de estudio son mayores que las concentraciones de referencia, se pueden realizar estudios particulares que determinen la movilidad y biodisponibilidad de los elementos normados y los parámetros de exposición reales en el sitio evaluado, a partir de las características del propio suelo en estudio.

La Norma plantea dos escenarios dependiendo básicamente de las dimensiones de las áreas afectadas:

Extensión afectada menor o igual a 1000 m²

- Accidentes, emergencias o eventos de contaminación
- Se deben resolver inmediatamente aplicando criterios generales de remediación, los cuales no requieran de estudios o procesos de toma de decisiones para evitar el retraso en el tiempo de respuesta

Extensión afectada mayor a 1000 m²

- Eventos contaminados que se presentan de manera deliberada o fortuita, continua o súbita (derrame, descarga, filtración, depósito o transferencia del contaminante del suelo).
- Se debe desarrollar un modelo conceptual que permita identificar: la población humana potencialmente expuesta, las fuentes de contaminación, el mecanismo de liberación y transporte de los contaminantes.

ANTECEDENTES

Con la información del modelo conceptual, el responsable puede seleccionar entre cuatro opciones para establecer, una vez determinada la existencia de contaminación, la concentración objetivo de remediación:

1. Remediar hasta las concentraciones de referencia en la *Tabla 3*. (NOM - 147)
2. Remediar hasta las concentraciones de Fondo.
3. Remediar hasta las concentraciones específicas totales.
4. Remediar hasta las concentraciones de referencia de la fracción soluble establecidas en la *Tabla 4* más las fracciones solubles de la muestra de fondo.(NOM-147)

Especificaciones generales para extensiones menores o iguales a 1000 m²: El responsable procederá a remediar a las concentraciones de referencia totales (CR_T) señaladas en la *Tabla 3* o a seguir cualquier de las metodologías descritas en la presente NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

Tabla 7. Concentraciones de Referencia Totales (CRT) por tipo de uso de suelo

CONTAMINANTE	USO AGRÍCOLA/ RESIDENCIAL/COMERCIAL (mg/kg)	USO INDUSTRIAL (mg/kg)
Arsénico	22	260
Berilio	5400	67 000
Bario	150	1900
Cadmio	37	450
Cromo (VI)	280	510
Mercurio	23	310
Níquel	1600	20000
Plata	390	5100
Plomo	400	800
Selenio	390	5100
Talio	5.2	67
Vanadio	78	1000

NOTA: a. En caso de que se presenten diversos usos del suelo en un sitio, debe considerarse el uso que predomine b. Cuando en los programas de ordenamiento ecológico y de desarrollo urbano no estén establecidos los usos del suelo, se usará el valor residencial.

Tabla 8. Concentraciones de referencia de contaminantes solubles (CRs)

CONTAMINANTE	CONCENTRACION (mg/L)
Arsénico	0.500
Berilio	10.000
Bario	0.122
Cadmio	0.100
Cromo Hexavalente	*
Mercurio	0.020
Níquel	1.100
Plata	0.500
Plomo	0.500
Selenio	0.100
Talio	0.020
Vanadio	0.160

* En el caso del cromo hexavalente en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2001 se establecen los criterios para determinar la CRs

Métodos Analíticos

La presente Norma también establece métodos analíticos para caracterizar los suelos contaminados por los elementos normados o para la determinación de las concentraciones de fondos. Algunos de los métodos analíticos que se proponen que deben emplearse son los siguientes:

- ❖ Medición de pH
- ❖ Digestión Ácida por Microondas
- ❖ Método por Espectrometría de emisión con plasma acoplado inductivamente.

El procedimiento a seguir para cada método se describe detalladamente en los apéndices de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.

2.6. Técnicas Analíticas utilizadas en el proyecto: Digestión Ácida, ICP-EOS y FRX

Las muestras de suelos pueden presentar un alto contenido de materia orgánica o ser sólidos totalmente inorgánicos originados de los metales o rocas. Por lo tanto el método de preparación debe ser capaz de descomponer y disolver todos los compuestos a los que está asociado el analito, de modo que los elementos se encuentren en la disolución para el análisis posterior. En el tratamiento de la muestra se tienen que cumplir los siguientes puntos:

- ❖ La preparación de la muestra se debe realizar sin que se produzca pérdida de ningún analito.
- ❖ La preparación de la muestra debe incluir la transformación de esta en la forma química más recomendable para su posterior determinación.
- ❖ Se debe evitar introducir interferencias procedentes de reactivos o medios de reacción.
- ❖ El tratamiento debe incluir, si es necesario, la dilución o concentración de los analitos para ofrecer concentraciones que caigan dentro del intervalo de trabajo del método de análisis escogido.

Para la detección de metales y metaloides se requiere de la aplicación de diversas técnicas analíticas que permitan la determinación de los contaminantes, así como su cuantificación. Como lo menciona la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2001 se

ANTECEDENTES

pueden utilizar diferentes técnicas analíticas de acuerdo al tipo de muestra, su naturaleza, la caracterización que se desea realizar, la exactitud de la medición, el número de muestras, los equipos disponibles en el laboratorio y el costo. Las utilizadas en el proyecto fueron: Digestión acida por microondas, Espectrometría de emisión con plasma acoplado inductivamente y adicionalmente se usó Espectrometría de fluorescencia de Rayos X. para determinar concentraciones totales

A continuación se detallan algunos aspectos importantes de las técnicas analíticas que se realizaron en el laboratorio para la determinación de las concentraciones de los elementos potencialmente tóxicos.

DIGESTIÓN ACIDA ASISTIDA POR MICROONDAS.

En nuestro caso nos interesa el análisis de muestras sólidas de suelo, para la mayoría de las técnicas se requiere que las muestras estén en estado líquido por lo que se optó por la Digestión Ácida asistida por Microondas. El uso de hornos de microondas para la descomposición tanto de muestras inorgánicas como orgánicas se propuso por primera vez a mediados de la década de 1970 y con los años se ha vuelto un método muy importante para la preparación de las muestras. El proceso consiste a grandes rasgos en introducir las muestras junto con una mezcla ácida conveniente en unos recipientes diseñados especialmente para este tipo de digestión (vasos de fluorocarbono). La mezcla ácida con la muestra se somete a altas frecuencias de microondas en donde las moléculas absorben la energía.

En el primero el calor se transfiere por conducción, debido a que los recipientes utilizados en el método de calentamiento suelen ser malos conductores, se requiere más tiempo para calentar el recipiente y posteriormente transferir el calor a la disolución por conducción, además de que solo una pequeña fracción del líquido se mantiene a la temperatura del recipiente y, por lo tanto, en su punto de ebullición. (Cengage Learning, s.f). En cambio con la energía del microondas se logra transferir directamente a las moléculas de la disolución casi simultáneamente sin calentar el recipiente; en consecuencia, rápidamente se alcanzan temperaturas de ebullición en toda la disolución (calentamiento homogéneo).

Otra ventaja de este método es que se evitan pérdidas por evaporación logrando una mínima contaminación al ambiente y se utilizan cantidades de reactivos significativamente menores, lo que reduce la interferencia por contaminantes en los reactivos. Las únicas variables que afectan la eficiencia de este método son el tipo de microondas que se utilice, el tipo de recipiente, el número de recipientes y el tipo y cantidad de la muestra y por último el tipo y cantidad de los reactivos que se vayan a emplear las cuales van a afectar a la temperatura y presión durante el proceso. (Cengage Learning, s.f)

ESPECTROSCOPIA DE EMISIÓN ÓPTICA POR PLASMA ACOPLADO INDUCTIVAMENTE: ICP-EOS.

Para el análisis de suelos es de gran importancia conocer los elementos químicos de que está formada la muestra independientemente de que estos elementos estén o no enlazados a otros y de cómo lo estén. Es decir, a veces lo que se quiere determinar es simplemente la composición elemental, tanto cualitativa (que elementos hay) como cuantitativamente (cuánto hay de cada elemento). En esto consiste el análisis elemental por medio de la espectroscopia atómica.

Esta técnica analítica se basa en **las interacciones de la radiación con la materia**, esto es, la medición e interpretación de la radiación electromagnética absorbida dispersada o emitida por átomos, moléculas u otras especies químicas. Estos fenómenos están asociados con cambios en los estados de energía de las diferentes especies. Por consiguiente, dado que cada especie posee estados energéticos característicos, la espectroscopia puede utilizarse para identificarlas. (Gavira, 2011)

La espectroscopia de emisión óptica por plasma inductivamente acoplado (ICP-OES) es la técnica empleada en el análisis de la composición de artefactos, basada en el principio de que los electrones, cuando son excitados (sometidos a una temperatura elevada) emiten luz de una determinada longitud de onda. Se establece la presencia o ausencia de diversos elementos examinando la trayectoria espectral, correspondiente a sus longitudes de onda características. (Otero, 2009).

ANTECEDENTES

Una muestra ambiental normalmente está formada por muchos compuestos químicos mezclados. El espectro atómico no proporciona la naturaleza de estas especies moleculares pero si su composición elemental. Para ello es necesario disociar las moléculas en sus átomos, esto se consigue mediante métodos de atomización que consisten en transformar en un nebulizador* a la muestra en vapor atómico calentándola por medio de plasma, llama o corriente eléctrica. Para ICP-OES como su nombre lo indica, se utiliza plasma* que es simplemente un gas altamente ionizado, en su mayoría argón. A las temperaturas del plasma (hasta 1000°C) la desolvatación, atomización y excitación son muy efectivas. La muestra, nebulizada, se mezcla con el plasma en una antorcha de cuarzo donde se forma una "llama de plasma" en cuya parte superior los átomos, excitados por las altas temperaturas, emiten radiaciones características. (Figura 6) (Gavira, 2011)

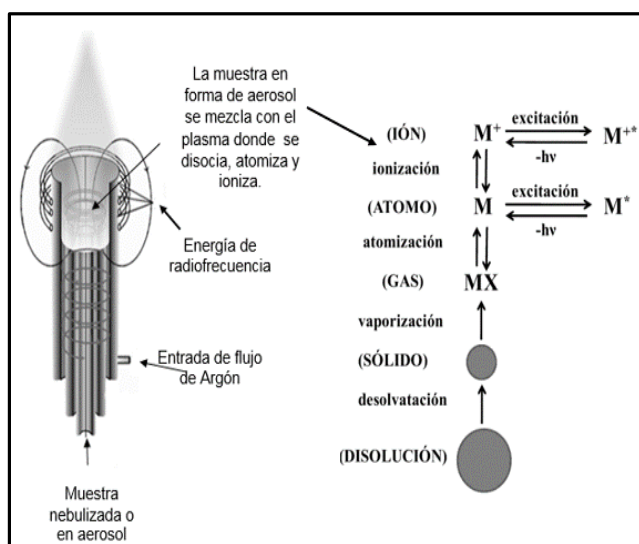


Figura 6. La primera función del plasma es eliminar el disolvente (desolvatación) dando lugar a partículas microscópicas de sal. Después ocurre la descomposición de las partículas que originan moléculas gaseosas individuales (vaporización) y finalmente, las moléculas son disociadas en átomos libres (atomización). (Otero, 2009)

La fuente espectroscópica es la punta de la flama, donde los átomos del analito son ionizados térmicamente produciendo así los espectros de emisión correspondientes. Es decir, cuando el argón fluye a través de la antorcha, se aplica una chispa al gas, que permite arrancar algunos electrones de los átomos de argón. Estos electrones entonces son atrapados en el campo magnético y son acelerados. El suministro de

energía a los electrones mediante la bobina se conoce como: Acoplamiento **Inductivo**. Estos electrones altamente energéticos colisionan a su vez con otros átomos de argón, arrancando nuevos electrones. Esta ionización colisional del gas argón continúa como resultado de una reacción en cadena convirtiendo el gas inicial

***Nebulizador:** Aparato que sirve para convertir un líquido en partículas muy finas que pueden formar una especie de aerosol que es una mezcla de gotas de la muestra las cuales son transportadas hasta el centro del plasma de argón en el caso del análisis por ICP-OES.

***Plasma:** es un estado de la materia en el que casi todos los átomos que los forman están ionizados faltándoles a sus núcleos uno o varios de los electrones que lo neutralizan, y estos electrones se mueven libremente por el interior del sistema así formado esta nube electrónica, conformada de cargas positivas y negativas, es perfectamente conductora como si fuera metal, y tiene viscosidad como si fuera un líquido

en un plasma consistente en electrones e iones de argón que forman la descarga de ICP. (Otero, 2009).

Detección de la Emisión.

En ICP-OES, la luz emitida por los átomos excitados en el plasma se mide para obtener información de la composición de la muestra. La emisión del plasma es policromática*, debido a que las especies excitadas emiten a longitudes de onda diferentes. Esta radiación policromática debe ser separada en longitudes de onda individuales para identificar la emisión de cada especie excitada y medir su intensidad sin interferencia de otras longitudes de onda. La separación de la luz según la longitud de onda se puede llevar a cabo mediante un monocromador, que permite la medición de diferentes longitudes de onda al mismo tiempo. (Otero, 2009)

La extracción de información cuantitativa y cualitativa de una muestra mediante ICP-OES es muy sencilla. La información cualitativa implica identificar la presencia de emisión a las longitudes de onda características de los elementos de interés. Las interferencias espectrales que pueden ocurrir debido a la presencia de otras especies en la muestra pueden dar lugar a una incertidumbre en relación a la presencia del elemento en el plasma, pero afortunadamente, el número relativamente grande de longitudes de onda alternativas disponibles para medir la emisión de un elemento permite superar dichas interferencias cambiando la longitud de onda de la medida. La información cuantitativa se obtiene relacionando la intensidad de emisión con la concentración de una curva de calibración de cada elemento. (Otero, 2009).

En la figura 7 se muestra el proceso que se lleva a cabo en la espectroscopia de emisión atómica por plasma. Primero la muestra se hace pasar por un nebulizador el cual transforma la muestra líquida en una especie de aerosol que posteriormente pasará por una antorcha donde se mezclará con el plasma. La muestra se disocia, atomiza y se ioniza y la luz emitida por los átomos fuertemente excitados pasa por un monocromador el cual la descompone en longitudes de onda de cada elemento. Finalmente las longitudes de onda se localizan en el espectro y de esta manera se

*Radiación policromática: Es aquella que está formada por fotones de muchos tipos, es decir, de varias energías

detecta el elemento y su concentración en la que se encuentra en la muestra. Esta técnica tiene como ventaja el determinar un gran número de elementos en un amplio intervalo de concentraciones, además, cuenta con límites de detección bajo y las interferencias químicas son virtualmente eliminadas a causa de la alta temperatura del plasma, y las interferencias físicas pueden ser fácilmente compensadas mediante técnicas que aprovechan la capacidad multielemental del plasma

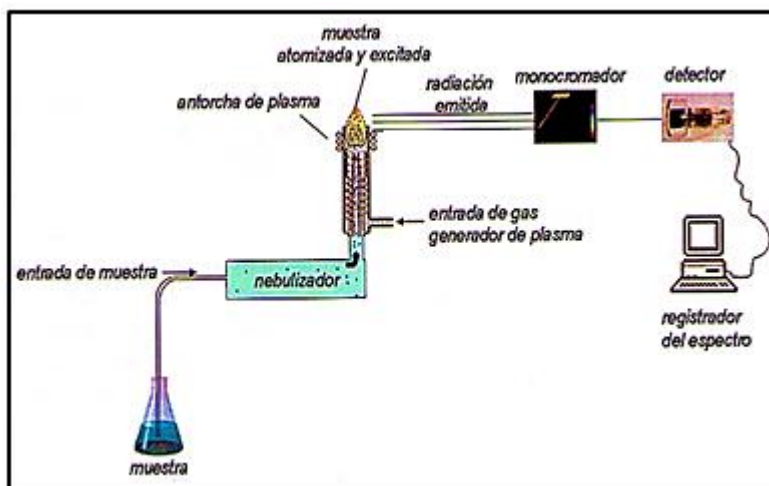


Figura 7. Esquema del proceso de espectroscopia de emisión atómica en plasma. La muestra se atomiza y excita al mismo tiempo dentro del plasma y la radiación que emite se dirige hacia un monocromador. (Fuente: Gavira J. (2011) Técnicas fisicoquímicas en medio ambiente)

ESPECTROMETRÍA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X (FRX)

Los rayos X son una radiación electromagnética que fue llamada así por su descubridor, Wilhelm Rontgen (1895), debido a su extraña naturaleza casi fantasmal, ya que se observó que podían atravesar determinados materiales aparentemente sin dañarlos, permitiendo a su vez identificar la estructura cristalina de muchas especies químicas y medir las concentraciones de buena parte de los elementos de la muestra, esencialmente sin destruirla.

La fluorescencia* de rayos X, es sobre todo, una técnica de análisis elemental que no requiere la atomización de la muestra; la difracción* permite identificar tanto sus elementos como sus especies moleculares, también sin alterarla. Este tipo de información es de gran utilidad porque algunos elementos de alto peso molecular como el arsénico son tóxicos cuando se presentan en iones libres o forman ciertos compuestos, pero no en otros; aparte de que sus propiedades de interacciones con el medio también son diferentes. (Gavira, 2011)

”

***Fluorescencia:** Es un fenómeno por el cual algunas sustancias tienen la capacidad de absorber luz a una determinada longitud de onda, por lo general en el rango ultravioleta, y luego emiten luz en una longitud de onda. Dicho de otra manera, absorben fotones con una determinada energía y liberan fotones con menor energía.

***Difracción:** Desviación que experimenta la luz al chocar con obstáculos o al pasar por aberturas cuyo diámetro es menor o igual que la longitud de onda.

Cuando un electrón muy energético procedente de un cañón de electrones se hace incidir sobre un átomo, puede chocar contra otro electrón del átomo y expulsarlo. Este efecto se debe a que el electrón incidente cede parte de su energía al electrón que se halla en el átomo, impartándole por lo tanto un impulso, análogamente a la bola de billar que choca con otra de una en reposo. De todos modos los electrones del átomo, los que más cuesta expulsar son los de las capas más profundas (K, L, M, etc.) por que están fuertemente unidos al núcleo. Una vez arrancado el electrón, el átomo queda convertido en un ion positivo. Este ion, con una vacante electrónica en un nivel profundo, es muy inestable. Para recuperar la estabilidad otro electrón del átomo tendera a ocupar el “hueco. Al “caer” desde una capa de superior energía a otra de menor, este electrón perderá energía en forma de fotón cuya longitud de onda queda en la zona de rayos X del espectro electromagnético. (Figura 8) (Gavira, 2011).

Lógicamente, el electrón que “cae” a una órbita inferior dejará a su vez otra vacante, la cual tenderá a ser ocupada por otro electrón de un nivel superior, y así sucesivamente. Cada salto de un electrón a un nivel inferior generará un fotón

Los saltos entre niveles energéticamente muy distanciados generarán fotones* de muy alta energía, en la zona de los rayos X. Este efecto es lo que se llama **fluorescencia de rayos X.** (Figura 8) (Gavira, 2011)

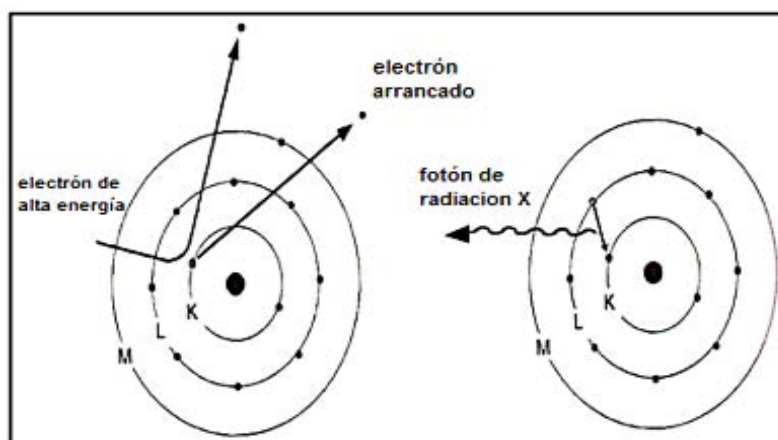


Figura 8. Generación de un fotón de radiación X. En una primera etapa (izquierda) un electrón de alta energía procedente del exterior colisiona con un electrón del mismo átomo, que pierde energía en forma de un fotón de rayos X. (Fuente: Gavira J. (2011). Técnicas fisicoquímicas en medio ambiente)

“La fluorescencia es un proceso de emisión en el cual las moléculas son excitadas por la absorción de radiación electromagnética y, al relajarse al estado basal, liberan el exceso de energía en forma de fotones.”

El espectro de fluorescencia de un elemento químico es relativamente simple y fácil de interpretar. Está formado por algunos picos debidos a trasmisiones de electrones desde capas más externas a capas más profundas donde han quedado vacantes debido a irradiaciones con rayos X. Un instrumento de fluorescencia está compuesto principalmente por una fuente, un selector de radiación y un detector. (Gavira, 2011) En la **figura 9** se muestra el esquema de un Espectrómetro de fluorescencia de rayos X clásico o Espectrómetro de fluorescencia de rayos X de dispersión de longitudes de onda, llamado así porque el espectro de fluorescencia policromático emitido por la muestra al ser excitada por un haz de radiación producido por un tubo de rayos X, es descompuesto en sus componentes monocromáticas en función de sus longitudes de onda, al difractarse en un monocristal de tamaño conocido. El haz difractado para cada posición angular del monocristal incide sobre un detector, generalmente un detector de gas proporcional de flujo o de centelleo, que convierte los fotones en impulsos eléctricos. De acuerdo con la **Ley de Bragg**,

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

Midiendo el valor del ángulo θ al que se difracta cada una de las radiaciones que constituyen el espectro emitido por la muestra, como el espaciado d del cristal analizador es conocido, se puede calcular la longitud de onda λ de cada una. Del análisis de estas longitudes de onda se puede conocer la composición cualitativa de la muestra, mientras que la medida de su intensidad nos da la composición cuantitativa. (Albella, 1993)

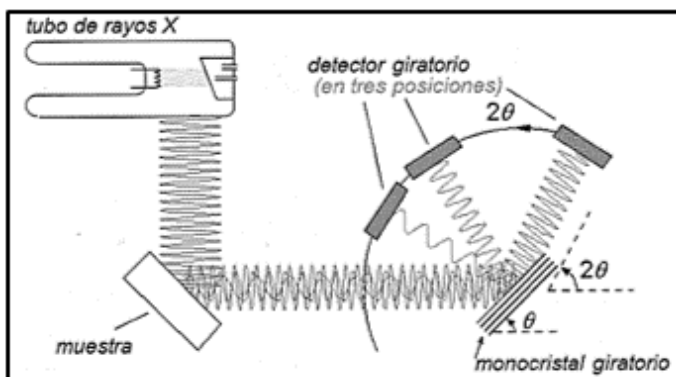


Figura 9. Selección de fotones en un experimento de fluorescencia de rayos X. El cristal monocromador va girando de modo que, al recibir una radiación policromática procedente de la muestra, para cada posición del cristal solo se reflejan fotones de una longitud de onda concreta. El detector (que se muestra en tres posiciones) debe girar sincrónicamente con el cristal pero a doble velocidad para recibir la radiación correspondiente. (Fuente: Gavira J. (2011) Técnicas fisicoquímicas en medio ambiente)

2.7. Remediación de Suelos Contaminados con EPT'S.

La **Remediación de Suelos** es la ejecución de las acciones a las que se someten los sitios contaminados para eliminar o reducir los contaminantes hasta un nivel seguro para la salud y el ambiente o prevenir su dispersión en el ambiente sin modificarlos. En este sentido puede decirse que son todas las acciones que tienen la finalidad de lograr la “limpieza” de un sitio que presenta residuos peligrosos o suelos contaminados, también pueden ser acciones que estén encaminadas a reducir los riesgos o evitar la exposición de las personas a los contaminantes. Esto último puede ocurrir cuando la resolución de un problema de contaminación es tan compleja y los costos de la eliminación de los contaminantes son tan altos que no es posible efectuar la remediación. (De Jesús, 2012)

“La remediación es el conjunto de medidas a las que se someten los sitios contaminados para eliminar o reducir los contaminantes hasta un nivel seguro para la salud y el ambiente o prevenir su dispersión en el ambiente sin modificarlos, de conformidad con lo que establece la LGPGIR.*” (De Jesús, 2012)

La remediación de un sitio no solo comprende la extensión de suelo sino también el agua subterránea, flora, fauna o los edificios presentes en un sitio. Debido a esto, la remediación de la zona siempre va precedida de estudios a través de los cuales se determina la extensión de la contaminación y se determinan los riesgos y las posibles soluciones para lograr la limpieza de un sitio. Por lo tanto las opciones de remediación para sitios contaminados, dependen de tres consideraciones generales: (Sellers 1999 citado en Volke, 2002, Pág. 10)

1. El tipo de contaminantes y sus características físicas y químicas.

Estas características determinan si un sitio requiere ser remediado y la manera en la que el contaminante debe tratarse. Dichas propiedades además, establecen como puede ser el movimiento del contaminante y si este es o no persistente en el ambiente. La estructura química de un contaminante determina su toxicidad y por consiguiente permite fijar ciertos criterios para establecer los límites de limpieza.

*LGPGIR: La Ley General de Prevención y Gestión Integral de Residuos

2. La localización y características del sitio.

Así como el uso de suelo (industrial, residencial o agrícola), fundamentalmente afectan la meta de la limpieza y los métodos que pueden emplearse para alcanzarla.

3. Características naturales del suelo.

Los sedimentos y cuerpos de agua, a menudo determinan las particularidades de los sistemas de tratamiento. Para suelo o lodos, el manejo del material a tratar (conversión del contaminante a una forma en la que pueda tratarse y / o trasportarse desde la fuente de la contaminación hasta el lugar de tratamiento), es el paso crítico en la mayoría de los procesos de tratamiento

Las tecnologías de remediación pueden actuar conteniendo la contaminación, separando el contaminante o destruyendo el contaminante. El uso de una tecnología en particular depende además de los factores mencionados, de su disponibilidad, fiabilidad (demostrada o proyectada), estado de desarrollo (laboratorio, escala piloto o gran escala) y de su costo

FACTORES QUE INCIDEN EN LA EFICIENCIA DE UNA TECNOLOGÍA DE REMEDIACIÓN

El comportamiento de los contaminantes en el suelo, así como la efectividad de una tecnología de remediación, está determinado por una variedad de factores que interactúan de manera compleja y que dependen de las características propias del contaminante así como las del sitio contaminado. En general, dentro de los factores a considerar se encuentran los siguientes:

- ❖ **Procesos Químicos:** reacciones de hidrólisis, oxidación, reducción, fotólisis.
- ❖ **Procesos físicos o de transporte:** sorción, advección, dispersión, difusión, volatilización y solubilización.
- ❖ **Procesos biológicos:** biodegradación, biotransformación y toxicidad.

A continuación se describen algunos de los factores más importantes que se deben considerar para la caracterización del contaminante y el suelo.

CARACTERIZACIÓN DEL CONTAMINANTE.

Antes de seleccionar una tecnología de remediación, es esencial contar con información acerca del tipo de contaminante el cual puede clasificarse en orgánico (se componen básicamente de átomos de carbono y pueden ser de origen antropogénico) e inorgánico (generalmente no contienen átomos de carbono e incluyen a los metales), además de contar con información acerca de la concentración y toxicidad, su distribución a través del sitio y el medio en el que se encuentra (agua o partículas de suelo), entre otras.

Para cualquier acción de remediación, ya sea en fase investigación o limpieza, es definir los perfiles horizontal y vertical de los contaminantes, tanto como sea posible. A continuación se describen algunas de las características fisicoquímicas importantes a determinar en un contaminante: (Volke, 2002)

❖ **Estructura del contaminante.**

Independientemente de la naturaleza del contaminante, su estructura química determina su polaridad, solubilidad, volatilidad y capacidad para reaccionar con otras sustancias. Algunos compuestos son altamente resistentes a la transformación, mientras que otros son completamente química o bioquímicamente reactivos (**Alexander 1994, Eweis et al. 1998, Sellers 1999 citado en Volke, 2002**)

❖ **Concentración.**

Es un factor de gran importancia para definir si el sitio puede remediarse con el uso de tecnologías biológicas, o si es necesario utilizar tecnologías fisicoquímicas o térmicas.

❖ **Toxicidad.**

Es el factor clave para decidir la remediación de un sitio contaminado. La descarga de químicos tóxicos a un suelo implica, entre muchos otros problemas, que son generalmente resistentes a la biodegradación. Si el contaminante como tal no es tóxico, algunos de sus componentes pueden ser tóxicos o inhibitorios para ciertos microorganismos, retardando o impidiendo la biodegradación de otros contaminantes degradables (Alexander, 1994 citado en Volke, 2002).

❖ Solubilidad.

Es la cantidad de un compuesto que puede disolverse en agua, es decir, define la disponibilidad potencial de los compuestos en la fase líquida. En general, la solubilidad disminuye al aumentar el tamaño de la molécula, y los compuestos polares son más solubles que los no polares. (Alexander 1994, Eweis *et al.* 1998, Sellers 1999 citado en Volke, 2002)

❖ Polaridad y carga iónica.

Los compuestos no polares tienden a ser hidrofóbicos y se concentran preferencialmente en la materia orgánica del suelo. Los compuestos no polares generalmente tienen menor movilidad en el suelo que los compuestos polares. La carga iónica determina la capacidad de un compuesto para su adsorción en un sólido.

❖ Sorción.

Los mecanismos de sorción incluyen la adsorción, que es la atracción de un compuesto hacia una superficie sólida, y la absorción, que es la penetración de un contaminante en un sólido. La sorción de un químico tiene un gran impacto en su degradación y depende de las propiedades del contaminante y del suelo. La adsorción afecta la volatilización y difusión del contaminante (y por consiguiente su transporte y destino), así como su disponibilidad para microorganismos (Alexander 1994, Riser-Roberts 1998 citado en Volke, 2002).

❖ Reacciones de oxidación-reducción.

Este tipo de reacciones pueden degradar compuestos orgánicos, o bien, convertir compuestos metálicos a formas que son más o menos solubles que la forma original del contaminante (Sellers 1999 citado en Volke, 2002)

CARACTERIZACIÓN DEL SUELO.

En seguida se describen algunos de los factores que se deben considerar y que son de gran importancia para poder implementar la tecnología de remediación adecuada:

❖ Tamaño de partícula.

Los suelos se clasifican en función de su tamaño de partícula, siendo sus tres principales componentes las arcillas (< 0.002 mm), los sedimentos (0.002 - 0.05 mm) y las arenas (0.05 - 2.0 mm). Es importante considerar esta propiedad, ya que la relación área/volumen de los diferentes tipos de partícula, tienen un impacto directo sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, y por consiguiente en las tecnologías de remediación. (Van Deuren et al. 1997, Eweis et al. 1998 citado en Volke, 2002)

❖ pH.

El pH determina el grado de adsorción de iones por las partículas del suelo, afectando así su solubilidad, movilidad, disponibilidad y formas iónicas de un contaminante y otros constituyentes del suelo (Alexander 1994 citado en Volke, 2002). La solubilidad de muchos contaminantes inorgánicos cambia en función del pH y normalmente su movilidad disminuye con altos valores de pH.

❖ Humedad.

La humedad del sitio es un factor importante para la elección de una tecnología en particular. Una alta humedad puede impedir el movimiento de aire a través del suelo, lo que afecta los procesos de biorremediación, así como provocar problemas durante la excavación y transporte, además de aumentar costos durante el uso de métodos de remediación térmicos (Van Deuren *et al.* 1997 citado en Volke, 2002)

❖ Materia orgánica.

La fracción orgánica de los suelos está constituida por desechos vegetales y animales, que generalmente se le conoce como humus. Un suelo con alto contenido húmico, disminuye la movilidad de los compuestos orgánicos y así la eficiencia de ciertas tecnologías (extracción de vapores, lavado de suelo) (Van Deuren *op. cit.*, Eweis *op. cit.* citado en Volke, 2002)

TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN

El termino tecnología de tratamiento o remediación implica cualquier operación unitaria o serie de operaciones unitarias que altera la composición de una sustancia peligrosa o contaminante a través de acciones químicas, físicas o biológicas de manera que reduzcan la toxicidad, movilidad o volumen del material contaminado

(EPA 2001 en Volke, 2002). Las tecnologías de remediación pueden clasificarse de diferentes maneras, con base en los siguientes principios:

1. Estrategia de Remediación.

Son tres estrategias básicas que pueden usarse separadas o en conjunto, para remediar la mayoría de los sitios contaminados:

- Destrucción o modificación de Contaminantes: Este tipo de tecnologías busca alterar la estructura química del contaminante.
- Extracción o Separación: Los contaminantes se extraen y/o separan del medio contaminado, aprovechando sus propiedades físicas o químicas (volatilización, solubilidad, carga eléctrica).
- Aislamiento o Inmovilización del contaminante: Los contaminantes son estabilizados, solidificados o contenidos con el uso de métodos físicos o químicos

2. Lugar en que se realiza el proceso de remediación.

-In situ. Son las aplicaciones en las que el suelo contaminado es tratado, o bien, los contaminantes son removidos del suelo contaminado, sin necesidad de excavar el sitio. Es decir, se realizan en el mismo sitio en donde se encuentra la contaminación.

-Ex situ. La realización de este tipo de tecnologías, requiere de excavación, dragado o cualquier otro proceso para remover el suelo contaminado antes de su tratamiento que puede realizarse en el mismo sitio (*on site*) o fuera de él (*off site*).

En la tabla 5 se presenta la comparación de las ventajas y desventajas del lugar donde se realicen tecnologías de remediación.

Tabla 9. Ventajas y Desventajas de las Tecnologías de Remediación In Situ y Ex Situ

	In Situ	Ex situ
Ventajas	-Permite tratar el suelo sin necesidad de excavar ni transportar. -Potencial disminución en costos.	-Menor tiempo de tratamiento. -Más seguros en cuanto a uniformidad: es posible homogeneizar y muestrear periódicamente
Desventajas	-Mayores tiempos de tratamiento. -Pueden ser inseguros en cuanto a uniformidad: heterogeneidad en las características del suelo. -Dificultad para verificar la eficacia del proceso	-Necesidad de excavar el suelo -Aumento en costos e ingeniería para equipos. -Debe considerarse la manipulación del material y la posible exposición al contaminante.

Fuente: Volke Sepúlveda T. y Velasco Trejo J. A. (2002). *Tecnologías de remediación para Suelos contaminados. México. Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT).*

3. Tipo de tratamiento.

La remediación se divide en tres tipos de tratamiento: los biológicos, fisicoquímicos y térmicos. En este proyecto de tesis solo se mencionan los tipos de remediación que son específicamente para tratar suelos contaminados con metales y metaloides en cada categoría.

- Tratamientos biológicos (biorremediación).

El término biorremediación se utiliza para describir la variedad de sistemas que utilizan organismos vivos (plantas, hongos, bacterias, etc.) para degradar, transformar o remover compuestos orgánicos e inorgánicos tóxicos a productos metabólicos inocuos o menos tóxicos. Esta estrategia biológica depende de las actividades catabólicas de los organismos, de las rutas de biodegradación de los contaminantes, de la estructura química del compuesto y de las especies microbianas degradadoras. El proceso de biorremediación incluye reacciones de óxido-reducción, procesos de adsorción e intercambio iónico, e incluso reacciones de acomplejamiento y quelación que resultan en la inmovilización de metales. (Volke, 2002) La biorremediación puede emplear organismos propios del sitio contaminado (autóctonos) o de otros sitios (exógenos), puede realizarse *in situ* o *ex situ*, en condiciones aerobias (en presencia de oxígeno) o anaerobias (sin oxígeno) (Eweis *et al.* 1998). Aunque no todos los compuestos orgánicos son susceptibles a la biodegradación, los procesos de biorremediación se han usado con éxito para tratar suelos, lodos y sedimentos contaminados con hidrocarburos del petróleo, solventes (benceno y tolueno), explosivos, clorofenoles, pesticidas, conservadores de madera (creosota) e hidrocarburos aromáticos policíclicos (Van Deuren *et al.* 1997, Semple *et al.* 2001 citado en Volke, 2002).

FITORREMEDIACIÓN

La fitorremediación es un proceso que utiliza plantas para remover, transferir, estabilizar, concentrar y/o destruir contaminantes (orgánicos e inorgánicos) en suelos, lodos y sedimentos, y puede aplicarse tanto *in situ* como *ex situ*.

Aplicaciones: Puede aplicarse eficientemente para tratar suelos contaminados con compuestos orgánicos como benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos; solventes clorados; desechos de nitrotolueno; agroquímicos clorados y organofosforados; además de compuestos inorgánicos como Cd, Cr(VI), Co, Cu, Pb, Ni, Se y Zn (Sellers ,1999). Se ha demostrado también su eficiencia en la remoción de metales radioactivos y tóxicos de suelos y agua

Limitaciones. Existen varias limitaciones que deben considerarse para su aplicación: 1. El tipo de plantas utilizado determina la profundidad a tratar; 2. Altas concentraciones de contaminantes pueden resultar tóxicas; 3. Puede depender de la estación del año; 4. No es efectiva para tratar contaminantes fuertemente sorbidos; 5. La toxicidad y biodisponibilidad de los productos de la degradación no siempre se conocen y pueden movilizarse o bioacumularse en animales.

En la *figura 9* se muestra el esquema general del proceso de fitorremediación: la **rizodegradación** se lleva a cabo en el suelo que rodea a la raíces. Las sustancias excretadas naturalmente por éstas, suministran nutrientes para los microorganismos. Durante la Fitoextracción, los contaminantes son captados por las raíces (**fitoacumulación**), y posteriormente estos son traslocados y/o acumulados hacia los tallos y hojas (Fitoextracción). En la **fitoestabilización**, las plantas limitan la movilidad y biodisponibilidad de los contaminantes del suelo, debido a la producción en las raíces de compuestos químicos que pueden adsorber y/o formar complejos con los contaminantes, inmovilizándolos así en la interface raíces-suelo (Sellers,1999). La **fitodegradación** consiste en el metabolismo de contaminantes dentro de los tejidos de la plantas, a través de enzimas que catalizan su degradación.

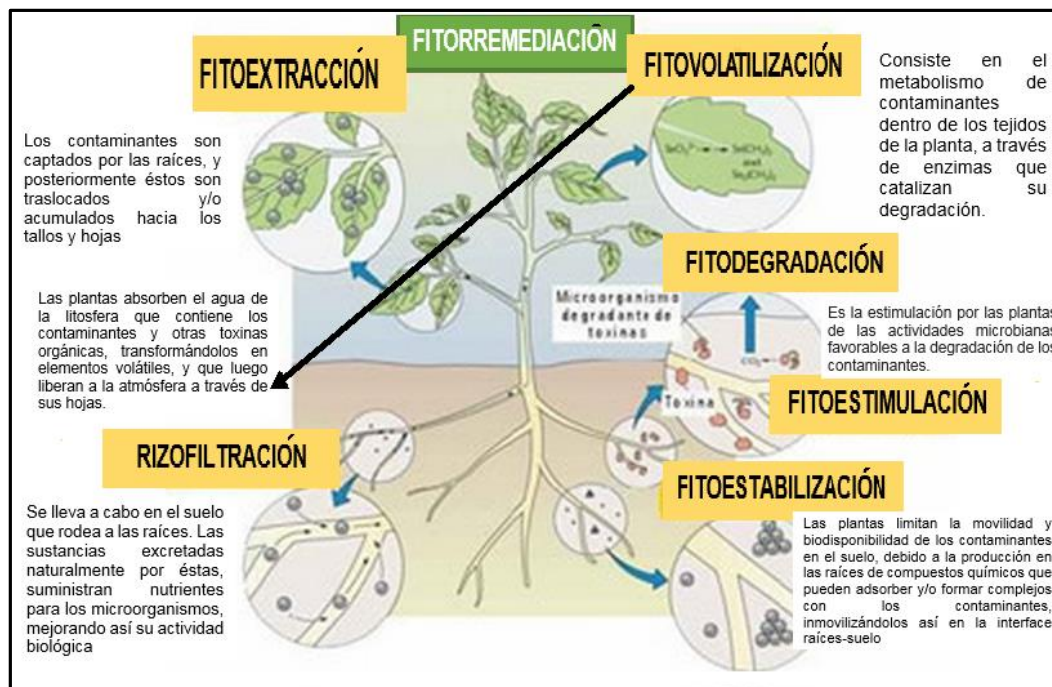


Figura 10. Esquema del proceso de Fitorremediación. Fuente: Elaboración propia con datos de: Volke Sepúlveda T. y Velasco Trejo J. A. (2002). *Tecnologías de remediación para Suelos contaminados. México. Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT).*

BIOAUMENTACIÓN

La tecnología de bioaumentación se utiliza cuando se requiere el tratamiento inmediato de un sitio contaminado, o cuando la microflora autóctona* es insuficiente en número o capacidad degradadora. Consiste en la adición de microorganismos vivos, que tengan la capacidad para degradar el contaminante en cuestión, para promover su biodegradación o su biotransformación. (Riser-Roberts 1998 citado en Volke, 2002)

Aplicaciones: Se ha usado para tratar suelos contaminados con herbicidas, insecticidas, nitrofenoles, BPC (Bifenilos policlorados), HTP (Hidrocarburos totales de petróleo) y HAP (Hidrocarburos aromáticos policíclicos). También se ha aplicado efectivamente para tratar residuos con concentraciones relativamente altas de metales (Alexander, 1994 y Eweis et al. citado en Volke, 2002).

Limitaciones: Antes de llevar a cabo la bioaumentación en un sitio, deben realizarse cultivos de enriquecimiento, aislar microorganismos capaces de cometabolizar* o utilizar el contaminante como fuente de carbono, y cultivarlos hasta obtener grandes cantidades de biomasa (Alexander 1994 citado en Volke, 2002)

***Microflora autóctona:** Conjunto de microorganismos que han aparecido y viven de forma natural en un área

***Cometabolizar:** Un proceso en el cual una sustancia puede ser biodegradada sólo en la presencia de una fuente secundaria de carbono

ANTECEDENTES

- Tratamientos fisicoquímicos.

Los tratamientos fisicoquímicos aprovechan las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para destruir, separar o contener la contaminación. Este tipo de tecnologías generalmente son efectivas en cuanto a costos y pueden concluirse en periodos cortos, en comparación con las tecnologías de biorremediación. Sin embargo, los costos pueden incrementarse cuando se utilizan técnicas de separación en las que los contaminantes pueden requerir de tratamiento o disposición (**Van Deuren et al. 1997 citado en Volke, 2002**) Mientras que las tecnologías de biorremediación son principalmente métodos destructivos, las fisicoquímicas incluyen las tres estrategias básicas de acción sobre el contaminante (destrucción, separación e inmovilización). Al igual que el resto de las tecnologías de remediación, las fisicoquímicas pueden realizarse *in situ* o *ex situ* pero la mayoría de estas tecnologías se aplican *in situ*

REMEDIACION ELECTROKINÉTICA

La remediación electrocinética es una tecnología en desarrollo que aprovecha las propiedades conductivas del suelo, cuyo objetivo es separar y extraer contaminantes orgánicos e inorgánicos (metales) de suelos, lodos y sedimentos, con el uso de un campo eléctrico que permite remover las especies cargadas (iones). Esta técnica implica la aplicación de una corriente directa de baja intensidad entre un electrodo positivo y uno negativo. Los iones metálicos, iones amonio compuestos orgánicos con carga positiva, migran hacia el cátodo; mientras que los aniones como el cloruro, cianuro, fluoruro, nitratos y compuestos orgánicos cargados negativamente se mueven hacia el ánodo (EPA, 2001 citado en Volke 2002). En la figura 11 se muestra un esquema del proceso de que se lleva a cabo en la remediación electrocinética.

Aplicaciones: Pueden tratarse contaminantes orgánicos polares y metales pesados. Se ha utilizado a nivel piloto para tratar contaminantes inorgánicos como Pb, Ni, Hg, As, Cu, Zn y Cr; además de orgánicos como BTX (Buteno, Tolueno y Xileno). Es una tecnología que puede emplearse para mejorar otras tecnologías de

ANTECEDENTES

remediación como la biorremediación y la remoción de contaminantes no solubles (Sellers 1999 citado en Volke, 2002)

Limitaciones: Su eficiencia disminuye en medios con un contenido de humedad menor 10%; la presencia de ciertos metales o materiales aislantes provocan variaciones en la conductividad eléctrica del suelo; los depósitos minerales (alta conductividad eléctrica) pueden provocar problemas; valores extremos de pH y reacciones de óxido-reducción pueden disminuir su eficiencia y formar productos indeseables.

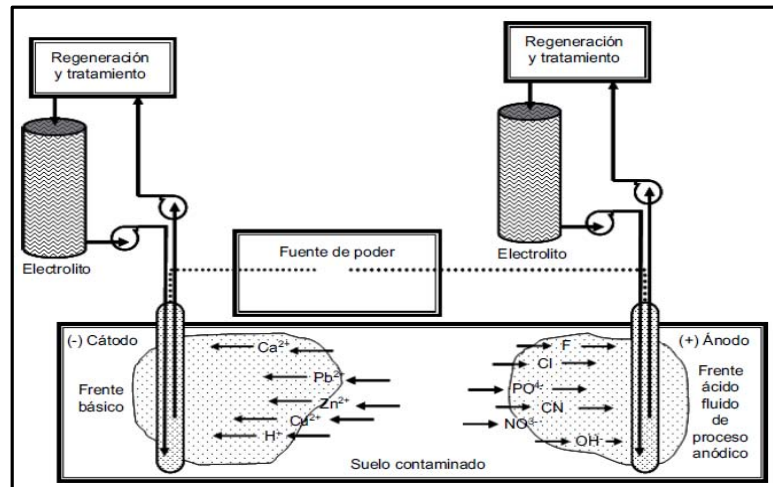


Figura 11. Esquema básico de remediación electrocinética, las especies iónicas migran por la acción del campo eléctrico.

LAVADO, EXTRACCION POR SOLVENTES E INUNDACION DE SUELOS

Estas tres tecnologías separan contaminantes orgánicos e inorgánicos del suelo por medio de un líquido de extracción. El fluido líquido requiere de un tratamiento posterior para remover o destruir los contaminantes. Cada una de estas tecnologías relacionadas entre sí, trabajan de manera diferente sobre los contaminantes (Sellers 1999 citado en Volke, 2002).

Lavado de suelos. Los contaminantes sorbidos en las partículas finas del suelo son removidos con el uso de soluciones acuosas en un suelo excavado. De esta manera se reduce el volumen del material contaminado, ya que las partículas finas son extraídas del resto del suelo.

Extracción por solventes. Este tipo de procesos, utiliza solventes orgánicos para disolver los contaminantes y así removerlos del suelo.

Inundación del suelo. Grandes cantidades de agua, en ocasiones con algún aditivo, se aplican al suelo o se inyectan en cuerpos de agua cercanos, para aumentar el nivel del agua en la zona contaminada, favoreciendo así el paso de los contaminantes del suelo hacia el cuerpo de agua. Un sistema de inundación, debe incluir la extracción y tratamiento del agua contaminada (Sellers 1999, EPA 2001 citado en Volke 2002).

Aplicaciones: El lavado de suelos se ha utilizado con éxito para tratar suelos contaminados con hidrocarburos, HAP (Hidrocarburos aromáticos policíclicos) PCP (Clorofenoles), pesticidas y metales pesados. Por medio de inundación, pueden recuperarse compuestos inorgánicos (metales), y tratarse COV (Compuestos orgánicos volátiles halogenados y no halogenados), COS (Compuestos orgánicos semivolátiles halogenados y no halogenados), gasolinas y pesticidas

Limitaciones: Las soluciones utilizadas y los solventes pueden alterar las propiedades fisicoquímicas del suelo; es difícil tratar suelos poco permeables o heterogéneos; los surfactantes usados en lavado pueden adherirse al suelo y disminuir su porosidad; los fluidos pueden reaccionar con el suelo reduciendo la movilidad de los contaminantes. En general, se requiere tratar previamente los suelos con alto contenido de materia orgánica y es necesario tratar los vapores generados.

SOLIDIFICACIÓN/ESTABILIZACIÓN S/E

Es un proceso en el que el suelo contaminado se mezcla con aditivos para inmovilizar los contaminantes, disminuyendo o eliminando la lixiviación. La **solidificación** se refiere a las técnicas que encapsulan (atrapan físicamente) al contaminante formando un material sólido, y no necesariamente involucra una interacción química entre el contaminante y los aditivos solidificantes. La **estabilización** limita la solubilidad o movilidad del contaminante, generalmente por la adición de materiales, como cemento Portland, cal o polímeros, que aseguren que los constituyentes peligrosos se mantengan en su forma menos móvil o tóxica

ANTECEDENTES

(Sellers 1999, EPA 2001 citado en Volke, 2002). La S/E puede realizarse tanto *in situ* como *ex situ*.

Aplicaciones. Los procesos de Solidificación/ Estabilización son usualmente utilizados para tratar contaminantes inorgánicos, en suelos y lodos contaminados con metales

Limitaciones. Los COV (Compuestos orgánicos volátiles halogenados y no halogenados) tienden a volatilizarse durante el mezclado del suelo con los agentes de solidificación/estabilización, y generalmente éstos no son inmovilizados; la profundidad a la que se encuentre el contaminante limita algunos procesos; el material solidificado puede impedir el futuro uso del sitio; los metales volátiles (Pb, Cd, As, Hg) pueden volatilizarse durante el tratamiento y no es recomendable para sitios con más de 25% de metales (Riser-Roberts 1998 citado en Volke, 2002).

SEPARACIÓN FÍSICA

Las técnicas de separación buscan concentrar los contaminantes sólidos por medios físicos y químicos. La mayoría de los contaminantes orgánicos e inorgánicos tienden a unirse, química o físicamente, a la fracción más fina del suelo. Las partículas finas de arcillas y sedimentos pueden separarse de arenas y gravas gruesas para concentrar los contaminantes en volúmenes menores de suelo. De esta manera, el volumen de suelo obtenido puede tratarse o disponerse. Entre los tipos de separación física se encuentran: por gravedad, por tamaños de partícula y separación magnética. (Volke, 2002)

Aplicaciones: Los contaminantes que pueden tratarse por separación física son los COS (Compuestos orgánicos semivolátiles halogenados y no halogenados), gasolinas y compuestos inorgánicos. Pueden usarse para algunos COV (Compuestos orgánicos volátiles halogenados y no halogenados) y pesticidas. La separación magnética se usa específicamente para metales pesados y partículas magnéticas radioactivas.

Limitaciones: Alto contenido de arcillas y de humedad incrementa los costos del tratamiento; la separación por gravedad asume diferencias entre la densidad de la

ANTECEDENTES

fase sólida y líquida; la gravedad específica de las partículas afectan la eficiencia del proceso.

- Tratamientos térmicos.

Al igual que las tecnologías fisicoquímicas y a diferencia de las biológicas, los procesos térmicos incluyen la destrucción (producen residuos sólidos como cenizas), separación (producen vapores que requieren tratamiento o disposición) e inmovilización de contaminantes. Los procesos térmicos utilizan la temperatura para incrementar la volatilidad, quemado, descomposición o fundición de los contaminantes (inmovilización). Estos tratamientos ofrecen tiempos rápidos de limpieza, pero son generalmente los más caros. Los altos costos se deben a los costos propios para energía y equipos, además de ser intensivos en mano de obra. (Van Deuren *et al.* 1997 citado en Volke, 2002).

VITRIFICACIÓN

El proceso de vitrificación puede llevarse a cabo *in situ* o *ex situ*, y utiliza una corriente eléctrica para fundir los suelos contaminados con temperaturas que van de 1,600 a 2,000 °C. Es un proceso de S/E que estabiliza la mayoría de los contaminantes inorgánicos y destruye los orgánicos. El producto de la vitrificación es un material cristalino químicamente estable que no produce lixiviados, en el cual quedan incorporados los compuestos inorgánicos. Durante el proceso, las altas temperaturas, provocan la destrucción o remoción de los materiales orgánicos **(EPA, 2001 citado en Volke, 2002).**

Aplicaciones: La vitrificación es usada generalmente para inmovilizar la mayoría de los contaminantes inorgánicos. Sin embargo, se ha probado que el proceso también puede destruir o remover COV (Compuestos orgánicos volátiles halogenados y no halogenados) y COS (Compuestos orgánicos semivolátiles halogenados y no halogenados) y otros compuestos orgánicos como dioxinas y BPC (Bifenilos policlorados).

Limitaciones: Las limitaciones de la vitrificación son las mismas que se señalan en los procesos de estabilización/solidificación.

3. OBJETIVOS

- Realizar una caracterización integral del suelo y subsuelo en un predio contaminado por actividades minero-metalúrgicas con el fin de definir las alternativas de remediación, que además de garantizar la minimización del riesgo ambiental y a la salud humana, garantice el desarrollo a largo plazo de la vegetación.

-

3.1 Objetivos particulares

- Caracterizar muestras de fondos, suelos y subsuelos para determinar las concentraciones totales de los elementos potencialmente tóxicos
- Realizar la fase inicial de un diagnóstico ambiental y proponer de ser necesario un plan de remediación del suelo que se está estudiando.

4. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El área de estudio (*Figura 12*) consta de 40 hectáreas y fue utilizado por una empresa minero-metalúrgica por más de 100 años, actualmente la empresa pretende realizar una remediación del sitio para lograr una reintegración urbana; el uso futuro del suelo no será residencial sino que será destinado a usos de tipo comercial y recreativo por ejemplo: oficinas, talleres, centros de capacitación, huerto didáctico, jardín escultórico, invernaderos, museo entre otros.

En un Diagnóstico Ambiental se requiere realizar la búsqueda documental para conocer el clima, fauna, flora, y tipo de suelo para posteriormente realizar los estudios de caracterización y evaluación de riesgos a la salud e impacto en el ambiente para determinar las acciones de remediación que permitan recuperar el suelo contaminado e integrarlo a las actividades antes mencionadas.

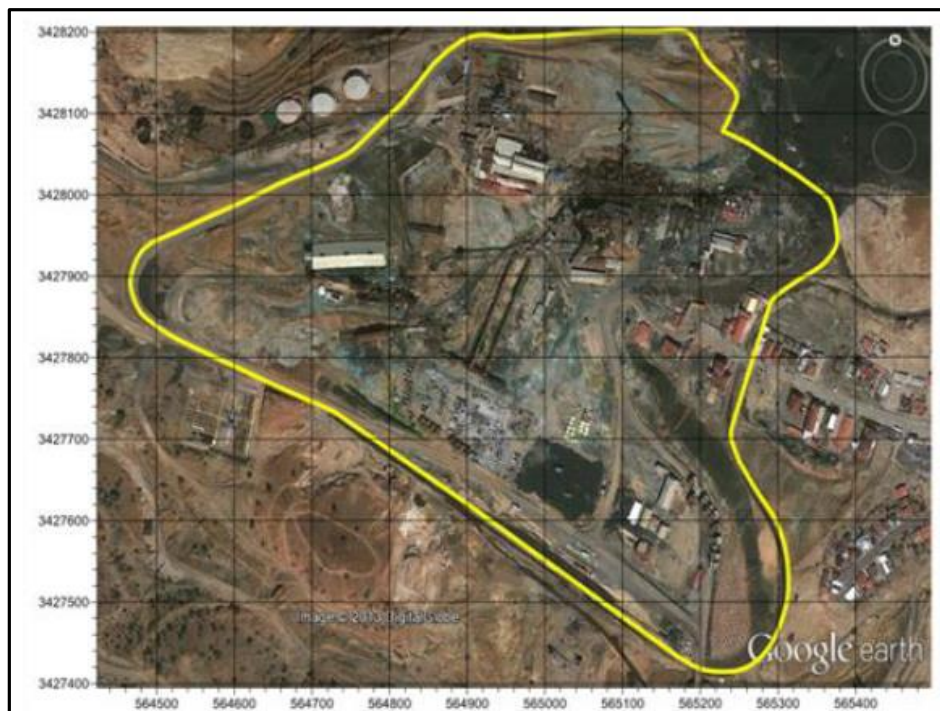


Figura 12. Vista general de la Zona de estudio. (Fuente: <https://earth.google.es/>)

4.1. Descripción de las condiciones Climáticas.

Clima

De acuerdo a la clasificación climatológica por **CONABIO** e **INEGI** el clima predominante en la región de estudio es un clima semiárido-templado el cual pertenece a los climas secos, con una temperatura media anual entre 12°C y 18° C, con temperaturas del mes más frío que oscilan entre -3° y 18°C y la temperatura menor del mes más caliente de 22° C; presenta lluvias de verano mayores al 18% anual.

Temperatura

Los datos de temperatura, precipitación y evaporación fueron tomados de la base de datos del **Servicio Meteorológico Nacional (SMN)** y de acuerdo a los datos la temperatura media anual reportada para el período 1951- 2010 por la estación es de 16.4°C. La temperatura máxima promedio normal representada durante este periodo fue 22.9°C y la mínima promedio normal de 9.8 °C.

Precipitación

La precipitación normal anual reportada para el periodo 1951- 2010 por la estación meteorológica es de 512.2 mm. La precipitación pluvial máxima se presenta entre los meses de julio y agosto, con una precipitación normal reportada de 136.6 a 106.3 mm y para el resto del año fluctuó entre 5.2 y 44.1 mm. El número de días con lluvia en este periodo fue de 47.1, de los cuales 13 fueron en julio y 9.5 en agosto.

Evaporación

La tasa de evaporación total anual normal reportada por el **Servicio Meteorológico Nacional (SMN)** entre el periodo de 1951-2010 es de 2, 161 mm. La temporada que presenta mayor tasa de evaporación transcurre entre los meses de abril y julio, fluctuando entre 222.9 y 314.5 mm por mes. El resto del año la tasa de evaporación oscila entre 83.5 y 173.3 mm por mes.

4.2. Edafología

El tipo dominante de suelo en el área del proyecto es el denominado phoezem (Del griego phaios, oscuro y del ruso zemlja). Este tipo de suelos se caracteriza por tener una capa superficial suave y oscura rica en materia orgánica y en nutrimentos. Su profundidad es muy variable, cuando es alta se encuentran generalmente en terrenos planos y se utilizan para la agricultura de riego o temporal de granos, legumbres u hortalizas.

Los phoezem menos profundos, situados en laderas o pendientes, presentan como principal limitante para su uso agrícola, la abundancia de rocas o alguna cementación muy fuerte en el suelo, por lo que presentan rendimientos bajos y se erosionan con más facilidad, que serían los característicos del sitio de estudio. Su humedad relativamente elevada impide que se acumulen los carbonatos secundarios o sales solubles. Debido al alto contenido en humus e iones de calcio que se unen a las partículas del suelo, presentan una estructura muy permeable y bien agregada. (www.inafed.gob.mx)

En la visita de campo realizada por el grupo de trabajo durante el proyecto no fue posible identificar el tipo de vegetación y fauna característica del sitio de estudio porque el predio ha sido destinado para uso industrial por más de 100 años y presenta ciertas diferencias respecto al mismo tipo de suelos que se han utilizado para la agricultura.

5. PARTE EXPERIMENTAL

5.1. Muestreo

Para la caracterización de la zona de estudio se llevó a cabo un **Muestreo Exploratorio: a) Superficial, b) Valores de Fondo y c) Vertical** como lo marca la NMX-AA-132-SCFI-2006

Muestreo exploratorio.

De acuerdo a la norma mexicana NMX-AA-132-SCFI-2006, el primer paso que se realizó fue un muestro exploratorio con la finalidad de obtener las muestras de suelo que fueran representativas y establecer la presencia de contaminación y en su caso la distribución horizontal de la misma y valorar su posible migración vertical. El muestreo exploratorio se realizó en dos fases. En la primera, se tomaron muestras de suelo superficial y en la segunda, se tomaron muestras en perfiles de suelo (muestreo vertical).

a) Muestreo superficial (0 cm a 5 cm de profundidad).

La superficie de estudio es de aproximadamente 40 hectáreas, de acuerdo a esto, el número mínimo de muestras simples superficiales para caracterizar el sitio se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$Y = X^{0.3} * 11.71 \qquad \text{Ec. (1)}$$

Dónde:

Y: es el número mínimo de puntos de muestreo

X: es la superficie del suelo de la zona de estudio expresada en hectáreas

Dando como resultado un total de **35 muestras simples superficiales**. (*Mapa. 1*)

b) Muestreo para obtener valores de fondo.

Para obtener las concentraciones naturales de la zona, de los diferentes elementos normados para utilizar como referencia, según lo indica la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 se realizó un muestreo fuera de la zona de influencia. El

número total de muestras simples y superficiales para utilizarse como valores de fondo **fueron 12. (Mapa 2).**

c) Muestreo vertical.

Para valorar la migración vertical de contaminantes, se tomaron muestras simples a intervalos de 30 cm hasta alcanzar la profundidad a la que se obtuvieron valores iguales o menores a las concentraciones de referencia, establecidas en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2001. **El número total de zanjas fue de 6, mientras que el número de muestras simples por zanjas fue de 7 dando como resultado 42 muestras. (Mapa 1)**

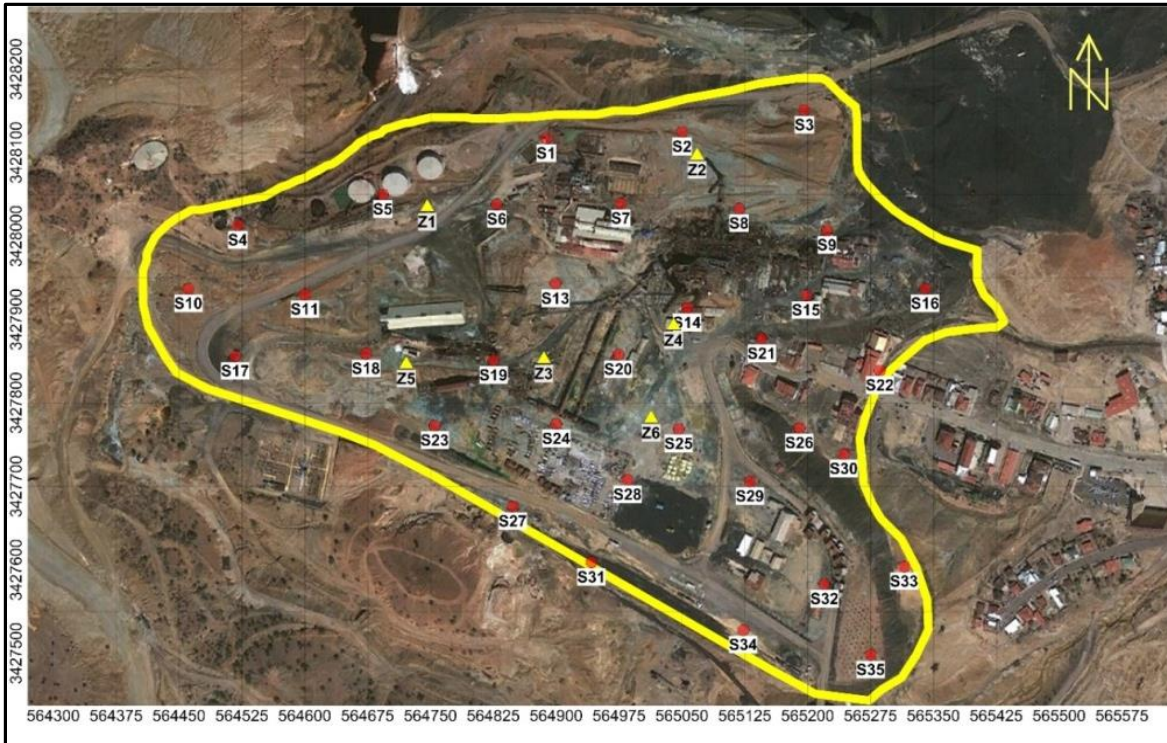
Para la toma de muestras se utilizó el siguiente equipo y material:

- Bolsas de polietileno (PE de alta densidad)
- Palas de jardinería de acero inoxidable
- Cepillo para limpieza del material
- Bitácora

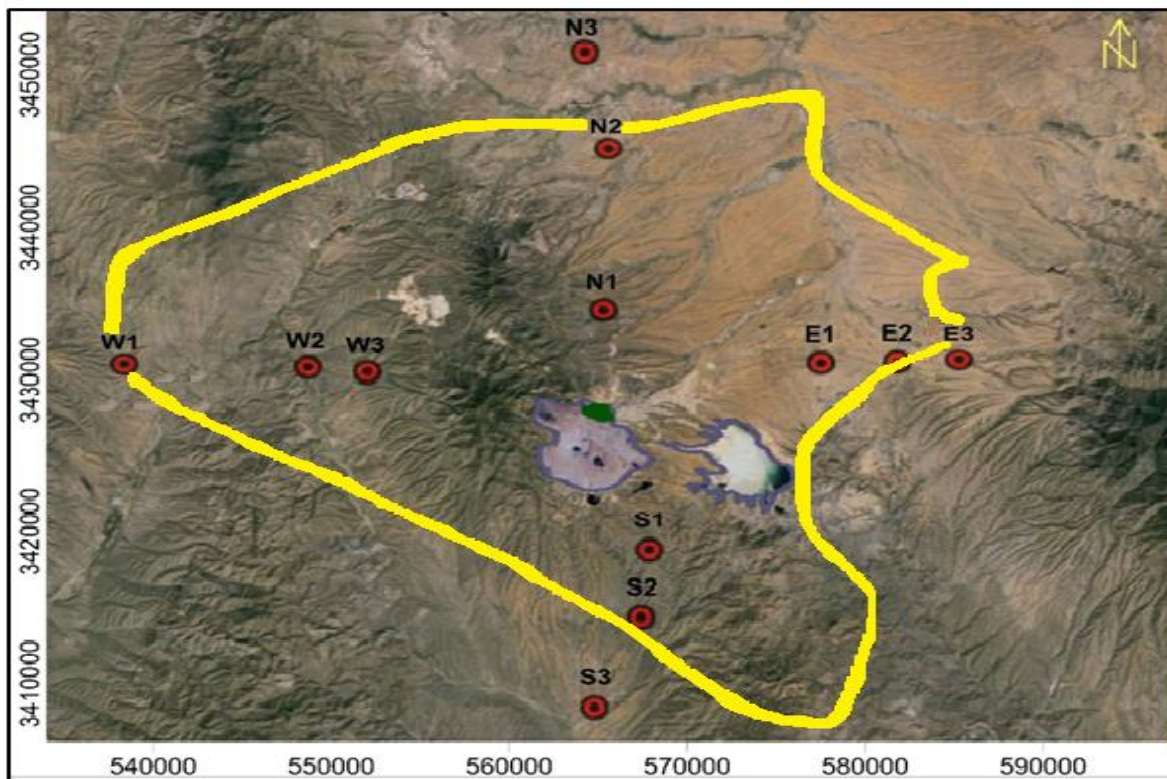
La técnica general para la toma de las muestras consistió en ubicar con equipo GPS el punto de muestreo y posteriormente se tomó la muestra compuesta; se realizó la identificación de la misma (se etiquetó) y se almacenó en bolsas de polietileno.

En la bitácora de campo se registraron las coordenadas del sitio de muestreo y la descripción del mismo. Se realizó la limpieza del material utilizado siguiendo el control de calidad aplicado en la toma de cada muestra.

 PARTE EXPERIMENTAL



Mapa 1. Localización geográfica de los puntos de muestreo. Los puntos rojos representan la ubicación de las muestras de suelos y los puntos amarillos representan la ubicación de las muestras para las



zanjas.

(Fuente:

<https://earth.google.es/>)

Mapa 2. Localización geográfica de los puntos de muestreo para los valores de fondo suelos y zanjas.

(Fuente: <https://earth.google.es/>)

5.2. Manejo y Control de Muestras

Como se mencionó en el apartado anterior al obtener las muestras de suelo, se registró toda la información concerniente al momento del muestro en la libreta de campo (bitácora). Los datos que se anotaron son referentes al tipo de muestro que se llevó a cabo, las características del sitio y el suelo como se indica en la NMX-AA-132-SCFI-2006

Posteriormente el envasado y etiquetado de las muestras se realizó de acuerdo a las siguientes especificaciones:

El envase debe estar cerrado de manera hermética (en este caso se utilizaron bolsas de plástico polietileno), lo cual garantiza la inviolabilidad de las muestras hasta la llegada al laboratorio. El etiquetado de cada una de las muestras incluye:

- Clave de identificación.
- Lugar del muestro.
- Fecha y Hora del muestro junto con las iniciales de la persona quien tomó la muestra.

Al terminar el envasado y etiquetado, las muestras fueron trasladadas al laboratorio en donde fueron preparadas conforme a la naturaleza de los metales y metaloides a identificar y cuantificar, y sometidas a los procesos de preparación y análisis correspondientes.

5.3. Preparación de las Muestras

En todas las muestras obtenidas (Suelos, Fondos y Zanjas) se les realizó el siguiente procedimiento de acuerdo a NMX-AA-132-SCFI-2006

- **Secado.**

Las muestras se secaron al aire extendiéndose en charolas logrando una profundidad menor a 2.5 cm. El secado se realiza con el propósito de facilitar el manejo de las muestras, mejorar la homogeneidad y disminuir los cambios químicos indeseables.

- **Tamizado.**

Una vez secas las muestras, se retiraron las piedras y los posibles restos de plantas, posteriormente las muestras se tamizaron a malla de 10 mm ya que es la que tiene el grado de fineza conveniente para la mayoría de los análisis requeridos

y para cuantificar los elementos potencialmente tóxicos. (Se descarta el material grueso retenido en cada una de las mallas).

- **Homogeneizado, cuarteo y molienda.**

En este paso, las muestras ya secas y tamizadas se mezclaron completamente con ayuda de una pala. A continuación, se aplanó la muestra de forma cuidadosa hasta tener un espesor uniforme en toda la charola. Por último se dividió la muestra aplanada en cuatro partes iguales y se retiraron las dos partes diagonalmente opuestas. La muestra que quedó se vuelve a mezclar y se repitió el proceso de cuarteo hasta que la muestra quede reducida al tamaño deseado. En este paso se aseguró que la cantidad de muestra que se analizaría representara la composición de la cantidad total de los finos del suelo una vez tamizado en el laboratorio.

Finalmente cada muestra se molió durante 5 minutos en un Molino Pulverisitte 6. El molido fino que se obtuvo se etiquetó y guardó; entre cada muestra se limpió y purgó con arena grado laboratorio el equipo de acuerdo al procedimiento del Laboratorio para evitar contaminación entre las muestras

5.4. Análisis Físicos y Químicos

- **Determinación de pH, Potencial Redox y Conductividad Eléctrica**

Para todas las muestras (Suelos, Fondos y Zanjias) se realizaron las mediciones de pH, Potencial Redox y Conductividad eléctrica como se indica a continuación:

En un frasco de 120ml se agregó 20g de muestra con 60 ml de agua desionizada; a continuación se agitaron los frascos durante 5 min a 440 rpm en un equipo Heidolph Unimax 2010 y se dejaron reposar durante una hora para permitir que los sólidos se sedimenten.

Para tomar la lectura de manera correcta, el electrodo se sumerge en la solución pero sin que toque el sedimento (la muestra de suelo). Al tomar la lectura la temperatura de la muestra no puede variar por más de 2°C de la solución. Se realizó la lectura de pH, Potencial Redox y Conductividad eléctrica por triplicado para cada muestra, enjuagando el electrodo con agua destilada entre cada medición.

PARTE EXPERIMENTAL

Por cada 10 lecturas de pH y Potencial Redox, se tomó lectura de una solución amortiguadora de pH conocido como verificación de la calibración (Estándar 7). En el caso de las mediciones de Conductividad, por cada 10 lecturas se tomó lectura de una solución estándar de $1413 \mu\text{s}/\text{cm}$ como verificación. Los resultados se registraron en la bitácora correspondiente.

La lectura del pH se realizó con un potenciómetro Hanna, para el potencial redox, la lectura se leyó con un equipo Beckman y las lecturas de conductividad eléctrica se realizaron en un Equipo Corining Conductivity Meter 441.

- **Digestión Ácida por Microondas en muestras de suelos en áreas de estudio y fondos.**

Para este procedimiento se utilizó la muestra de molido fino. Se pesó 0.5 g de la muestra y se agregó 10 mL de ácido nítrico concentrado (se utilizaron vasos de fluorocarbono para microondas).

Los recipientes se tapan y se colocan en la unidad de microondas para su digestión. Una vez fríos los recipientes, la muestra digerida se filtró y a continuación se llevó a la marca de aforo de 50 mL con agua desionizada.

Concentraciones totales de elementos potencialmente Tóxicos (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004).

A todas disoluciones obtenidas por Digestión Ácida asistida por microondas se les determinó la concentración total de los elementos normados: Arsénico, Bario, Berilio, Cadmio, Cromo, Níquel, Plata, Plomo, Selenio, Talio y Vanadio mediante la técnica de espectrometría de emisión atómica por plasma inductivamente acoplado (ICP-OES.)

Para visualizar los resultados obtenidos fácilmente se realizaron mapas con ayuda del programa Surfer 11 para la localización de las zonas contaminadas por elementos potencialmente tóxicos de acuerdo a la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.

- **Fluorescencia de Rayos X en muestras de Zanjas**

Para las zanjas se realizó, para la determinación de concentraciones totales, un análisis por Fluorescencia de Rayos X para conocer los niveles de concentración de cada elemento potencialmente tóxico. Para dicho análisis, se molió aproximadamente 20g de la muestra en mortero, se empaquetó y etiquetó para análisis.

El equipo que se utilizó fue un FM-XRF- Analyzer, marca Niton Thermo el cual se programó para que diera lectura en modo suelo; se calibró con dos estándares: Montana 2710a y un Blanco SiO₄ Sigma; a continuación se colocó la muestra dentro del equipo y se realizaron 5 lecturas por muestra (cinco puntos por muestra) con un tiempo de 90 segundos por lectura. Por cada 10 muestras se volvió a tomar lectura de los estándares como control de calidad.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1. Suelos y Fondos

Como se indicó en la parte experimental, para la caracterización de las muestras de suelos y fondos se realizaron tres lecturas de pH, Potencial Redox, Conductividad eléctrica y posteriormente se calculó un promedio de cada medición para disminuir los posibles errores que se tuvieran al realizar la medición y del equipo utilizado de cada análisis fisicoquímico y así obtener un valor más preciso y confiable. Las lecturas completas de cada análisis fisicoquímico así como las concentraciones totales se encuentran en el **Anexo A**. A continuación se presenta el análisis estadístico donde se calculó la media y desviación estándar para conocer el comportamiento general de las propiedades físicas y químicas de los suelos impactados (*Tabla 6*) y valores de fondo (*Tabla 7*).

Tabla 10. Análisis estadístico de las Muestras de Suelo dentro del área de influencia

SUELOS			
Parámetro estadístico	pH	Potencial Redox (Ag/AgCl) mV	Conductividad Eléctrica $\mu\text{S/Cm}$
Media	4.85	115.28	980.85
Mediana	4.95	109.67	478.30
Desviación Estándar	1.12	63.38	1320.54

Tabla 11. Análisis estadístico de las muestras de Fondos

FONDOS			
Parámetro estadístico	pH	Potencial Redox (Ag/AgCl) mV	Conductividad Eléctrica $\mu\text{S/Cm}$
Media	5.07	107.18	2756.36
Mediana	5.28	117.73	2383.34
Desviación Estándar	1.18	66.01	1275.45

En el caso de los suelos estudiados para delimitar el área impactada se observa que los resultados de la caracterización de las muestras para el pH la media es de 4.85 y los suelos se encuentran entre 4 – 5 con una desviación estándar muy pequeña, es decir, hay una distribución homogénea de los valores de pH; y para los suelos de fondo de la región presentan un pH promedio de 5.07 con una desviación estándar pequeña. En el caso de la conductividad eléctrica (CE) de acuerdo al análisis estadístico, el valor de la desviación estándar está muy alejada del valor de

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

la media, tanto para suelos como para fondos, indicando que hay una distribución heterogénea de los valores de CE. Finalmente para el potencial redox, también se aprecia que los valores de la desviación estándar para suelos y fondos están muy alejados del valor de la media lo que indica un comportamiento heterogéneo.

De acuerdo con los valores de conductividad eléctrica y pH los suelos se clasifican en: suelos salinos, suelos sódicos o alcalinos, suelos salinos-alcalinos y suelos alcalinos degradados. En la tabla 8, se muestra de manera simplificada la clasificación y características más sobresalientes de los suelos según el U.S Salinity Laboratory (tomado de Bonnet, 1960):

Tabla 12. Características de los suelos salinos

Clase de suelos	Conductividad eléctrica (mmho/cm)	Porcentaje de sales en el suelo	pH del suelo
Normal	< 4	0 – 0.15	En general < 8.5
Salino estricto	≥ 4	0.15 – 0.65	Normalmente < 8.5
Salino alcalino	≥ 4	0.15 – 0.65	Pocas veces > 8.5
Alcalino estricto	< 4	0 -0.15	Entre 8.5 y 10
Alcalino degradado	< 4	0 – 0.15	Normalmente < 6

Fuente: Urbano Terrón P. (1991). *Tratado de fitotecnia general*. España. Mundi-Prensa Libros. .Pág. 430

Al tener un pH menor a 6 se puede considerar que en la zona de estudio son **suelos alcalinos degradados**; estos suelos tienen un bajo contenido en sales solubles y niveles de sodio cambiante. Por su elevado contenido en Na^+ , las propiedades físicas y químicas de estos suelos son parecidas a los suelos alcalinos, en donde la conductividad eléctrica del extracto de saturación de estos suelos suele ser inferior a 4 ohm/cm . (Casas, 2011) En el caso del potencial redox, este parámetro solo nos brinda información acerca de la capacidad de donar o aceptar electrones que tiene el suelo. Un valor positivo y de alta magnitud (+800mV) es indicativo de un ambiente que favorece las reacciones de oxidación mientras que para un valor de Eh negativo y de baja magnitud (-300mV) es indicativo de un ambiente altamente reductor. (Fassbender, 1987) Por lo tanto, de acuerdo a los valores obtenidos en el análisis estadístico para suelos y fondos, al ser valores positivos en el suelo de estudio es un ambiente donde se favorecen las reacciones de oxidación.

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Al conocer el comportamiento de las propiedades fisicoquímicas del suelo que se está estudiando, se prosiguió con el tratamiento y análisis de datos de las concentraciones totales de los elementos potencialmente tóxicos que se obtuvieron después de la digestión ácida asistida por microondas mediante ICP-OES tanto para suelos y fondos.

Se realizó un análisis estadístico para comparar las concentraciones totales de cada EPT'S tanto de suelos y fondos.

Tabla 13. Análisis estadístico de las concentraciones totales de cada EPT'S de las muestras de suelos y fondos dentro del área de influencia

Concentraciones Totales de los Elementos Potencialmente Tóxicos (mg/L)												
Concentraciones de referencia totales (CRT) por tipo de uso de suelo (NOM-147)												
(Uso agrícola/ residencial/comercial-Uso industrial)												
(mg/kg)	390-5100	22-260	150-1900	5400-67000	37-450	280-510	23-310	1600-20000	400-800	390-5100	5.2-67	78-1000
Suelos	Ag	As	Ba	Be	Cd	Cr	Hg	Ni	Pb	Se	Tl	V
Media	5.77	208.59	122.48	1.69	6.20	615.30	<L.D	27.15	298.93	0	6.11	59.24
Mediana	3.94	130.27	113.21	0.82	5.84	503.16	<L.D	15.39	267.06	0	5.70	38.22
Desviación estándar	5.89	246.66	58.31	1.80	4.62	687.17	<L.D	34.62	302.73	0	4.05	126.43
Fondos	Ag	As	Ba	Be	Cd	Cr	Hg	Ni	Pb	Se	Tl	V
Media	4.72	185.51	124.76	2.02	8.14	600.51	<L.D	24.31	374.89	0	6.04	39.11
Mediana	4.50	161.46	117.86	0.63	6.75	461.05	<L.D	19.67	280.93	0	6.80	38.04
Desviación estándar	2.72	128.83	56.29	2.28	4.17	392.21	<L.D	16.24	376.43	0	3.43	14.64

De acuerdo al análisis estadístico de la concentración total de cada EPT'S indica que el único elemento que presenta una concentración por arriba de la concentración de referencia para uso industrial que marca la NOM -147 es el cromo total, seguido por el arsénico, plomo, talio y vanadio con concentraciones totales entre los límites de uso agrícola e industrial y por último bario, berilio, cadmio, mercurio, níquel, selenio y vanadio tienen una concentración por debajo de los límites de uso agrícola. Es importante mencionar que la media de las muestras de fondos son ligeramente menores a las muestras de suelos en arsénico (185.51mg/kg), cromo (600.51 mg/kg), níquel (24.31 mg/kg), talio (6.04 mg/kg), y vanadio (39.11 mg/kg), lo cual indica que la contaminación de estos elementos no es mayor en los alrededores de la zona principal de estudio. En el caso de Pb y Cd las medias obtenidas para las 35 muestras son mayores a las obtenidas para valores de fondo lo que indica la presencia de forma natural de los elementos regulados en la NOM-147.

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Por lo que es necesario realizar un análisis puntual para identificar en cuales puntos de muestreo existe contaminación antropogénica y que elementos sobrepasan los límites marcados en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Este análisis se realizó por medio de una representación visual con ayuda del programa **Surfer 11**.

Surfer 11 es un programa para crear mapas personalizados que permite un control total en todos los parámetros de la zona que se desea estudiar y para este proyecto de tesis Surfer ayudo en la elaboración de mapas los cuales representan las zonas de mayor y menor contaminación de acuerdo a los elementos de importancia del terreno que se está estudiando. Con la ayuda de dicho programa se determinaron 4 niveles de concentración por cada elemento potencialmente tóxico basándonos en las Concentraciones de Referencia Totales (CTR) por tipo de Suelo de acuerdo a lo establecido a la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. (Tabla 10)

Tabla 14. Niveles de Concentración que se determinaron en base a la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

NIVEL	INTERVALO
BAJO	Nivel por debajo del límite de detección
MEDIO	Nivel entre el límite de detección y la concentración de Referencia Totales (CTR) de Uso agrícola/residencial/comercial
INTERMEDIO	Nivel entre la Concentración de referencia de Uso agrícola/residencial/ comercial y Uso industrial
ALTO	Nivel por arriba de la Concentración de referencia

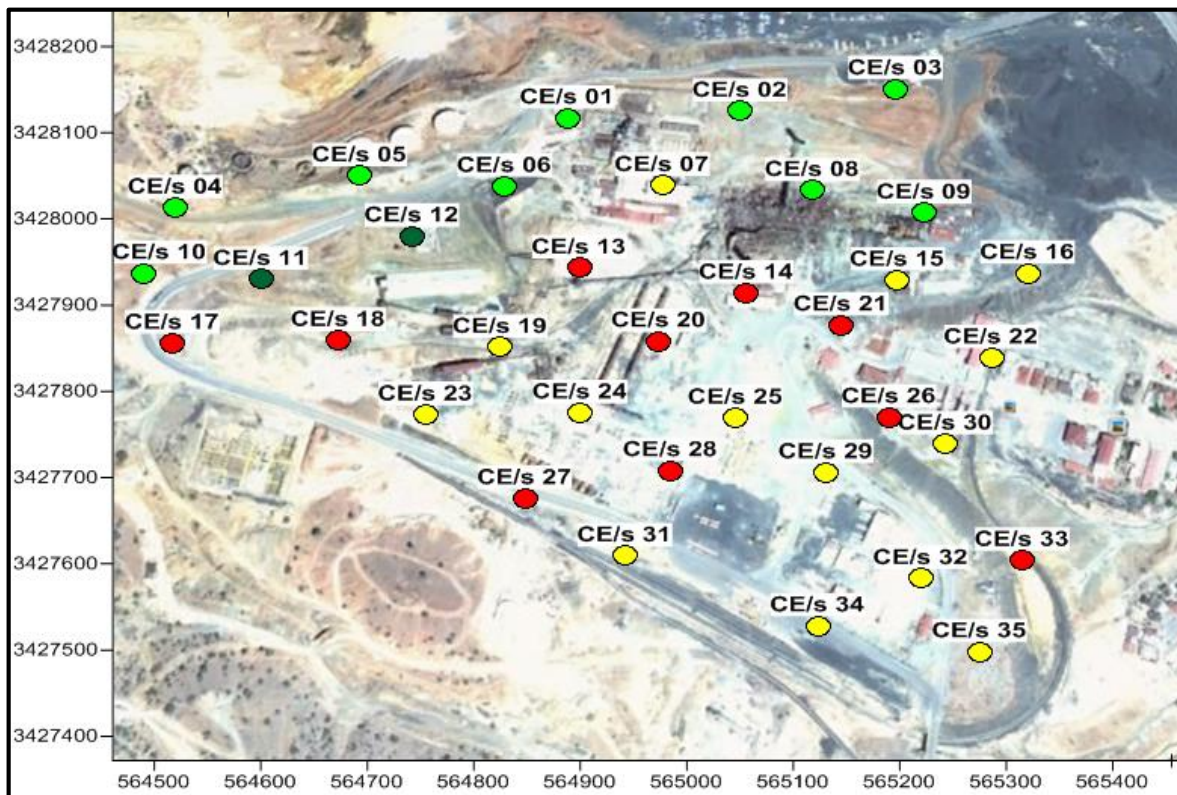
Por ejemplo para Arsénico, el **nivel bajo** es por debajo del límite detección del método analítico que en este caso es 0.041 mg/kg, para el **nivel medio** el intervalo que se marco fue entre el límite de detección hasta la concentración de referencia total para los suelos de uso agrícola/residencial/comercial que señala la NOM 147, en este caso es de 0.041- 22 mg/kg. Para el **nivel intermedio** se determinó como intervalo la concentración total de referencia entre el suelo de uso agrícola y el suelo de uso industrial: 22-260 mg/kg, y por último para el **nivel alto** de contaminación mayores a 260 mg/kg.

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

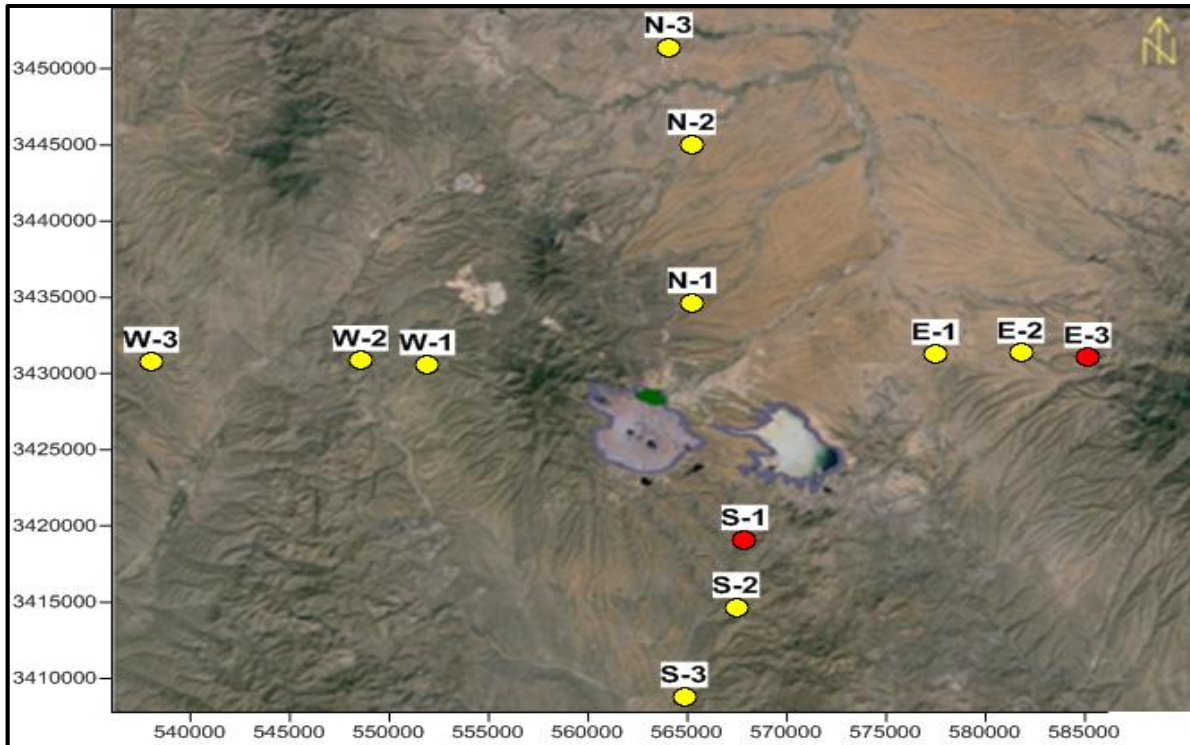
Tabla 15. Niveles de concentración con sus respectivos intervalos para Arsénico

NIVEL	INTERVALO PARA ARSENICO
BAJO	≤ 0.041 mg/kg
MEDIO	0.041 – 22 mg/kg
INTERMEDIO	22- 260 mg/kg
ALTO	≥ 260

Con los intervalos de concentración definidos, Surfer señaló cada punto de muestreo con el color correspondiente al nivel de concentración que posee y los plasmó en el mapa de sitio como se muestra a continuación: (Mapa 3 y 4)



Mapa 3. Ubicación de Puntos de muestreo de Suelos con su correspondiente nivel de concentración de Arsénico



Mapa 4. Ubicación de Puntos de muestreo de Fondos con su correspondiente nivel de concentración de Arsénico

Para los sitios de muestro de suelos (*Mapa 3*) se puede apreciar que el arsénico solo se encuentra en dos puntos de muestreo con nivel bajo de concentración, 9 puntos con nivel medio, 14 con un nivel intermedio y 10 puntos de muestro con nivel alto de concentración, este último. Indica una contaminación

Por otro lado, para fondos (*Mapa 2*), existen dos 2 puntos de muestreo con nivel alto de concentración de arsénico y 10 puntos de muestreo con nivel intermedio. Por lo tanto, se puede decir que el sitio que estamos estudiando contiene arsénico tanto en los suelos impactados como en las muestras de fondos. Identificadas las muestras de suelos y fondos que presentan concentraciones por arriba del límite de referencia se realizó un promedio de los valores de las muestras contaminadas de suelos por arsénico donde el promedio de contaminación es de 514.25 mg/kg. Para fondos se realizó el mismo cálculo pero solo de las muestras que no se encuentra contaminadas dando un valor promedio de 138.22 mg/kg. Comparando los valores promedio de las concentraciones, el valor de fondos se encuentra muy alejado del

valor de los suelos por lo tanto el nivel de remediación a establecer sería el de los valores de fondos.

Para todos los demás elementos potencialmente tóxicos se realizó el mismo procedimiento para determinar el nivel de concentración que tiene cada punto de muestreo. Dichos mapas se encuentran en el **Anexo B** con sus respectivas tablas de intervalos de concentración. Estos mapas revelaron a simple vista que únicamente el arsénico, cromo total y el plomo presentaban puntos de muestreo con niveles altos de concentración o dicho de otra manera estos elementos rebasan las concentraciones de referencia que marca la NOM 147 en alguno de los puntos de muestreo es por eso que se presentaron adicionalmente los mapas de Cr y Pb.

CROMO TOTAL.

Los niveles de concentración para el cromo total (*Tabla 12*) se determinaron con el mismo criterio que para el arsénico. El nivel bajo de concentración esta debajo del límite de detección que en este caso es 0.003 mg/kg. Para el **nivel medio** el intervalo que se marco fue entre el límite de detección hasta la concentración de referencia total para los suelos de uso agrícola/residencial/comercial que señala la NOM 147 para cromo total, en este caso es de 0.003- 280 mg/kg. Para el **nivel intermedio** se determinó como intervalo la concentración total de referencia entre el suelo de uso agrícola y el suelo de uso industrial: 280-510 mg/kg, y por último para el **nivel alto** de contaminación, mayores a la concentración de referencia de uso industrial ≥ 510 mg/kg.

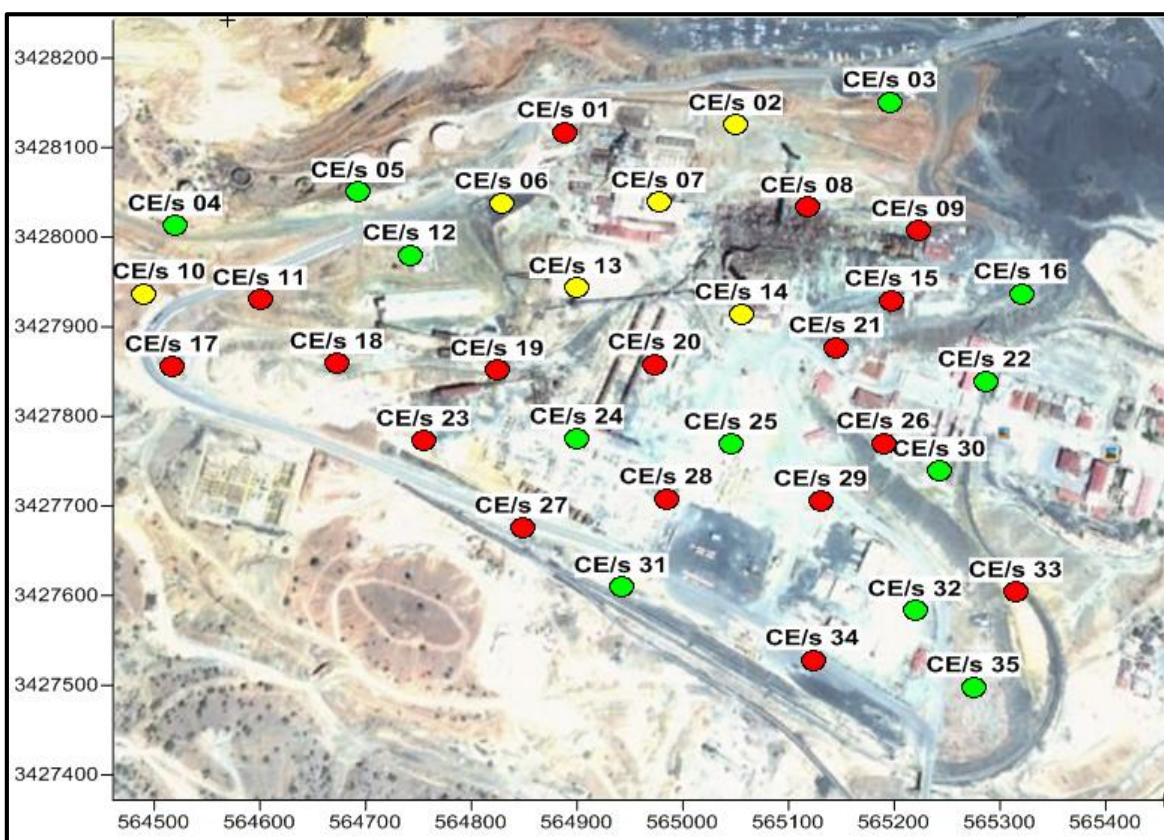
Tabla 16. Niveles de concentración con sus respectivos intervalos para Cromo total

Nivel de Concentración	Intervalos para Cromo Total (mg/kg)
Bajo	≤ 0.003
Medio	0.003- 280
Intermedio	280 – 510
Alto	≥ 510

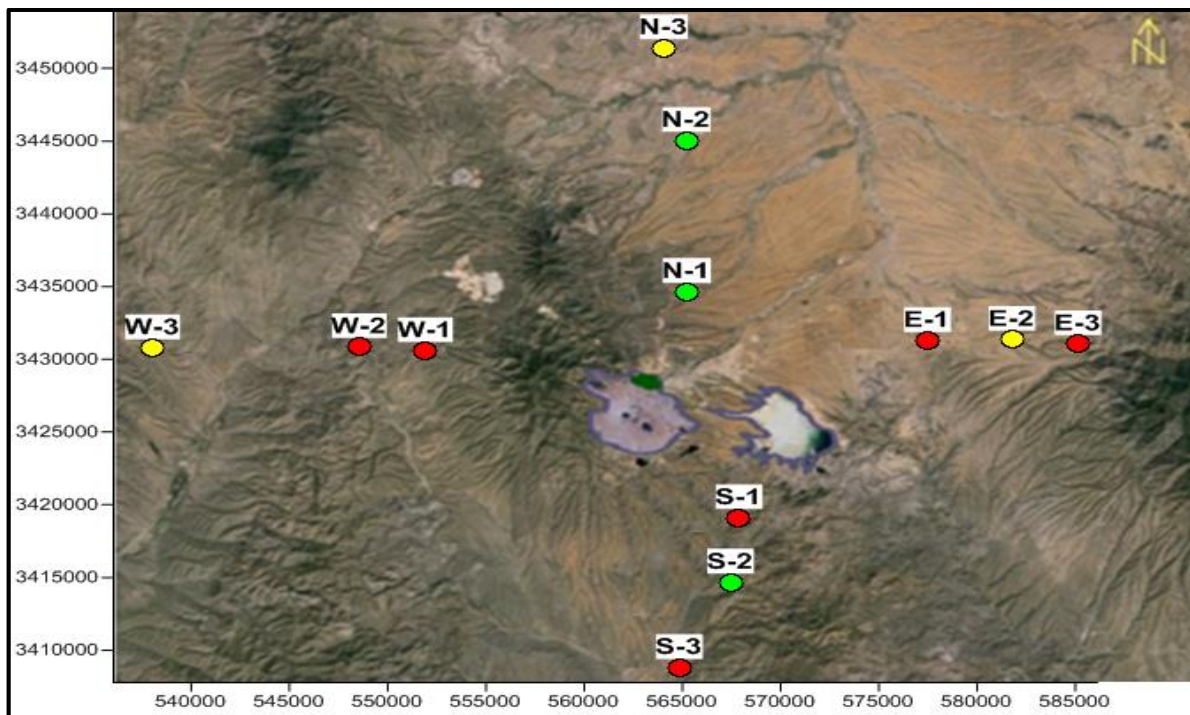
RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para las muestras de suelos (Mapa 5), se observa que el sitio de estudio no presenta ningún punto de muestreo con un nivel bajo de concentración de cromo total. En cambio para el nivel medio de concentración, se tiene 12 puntos de muestreo; 6 puntos de muestro con nivel intermedio de concentración y finalmente 17 puntos de muestro con nivel alto de concentración.

En el caso de los fondos (mapa 6) se aprecia que ninguno de los puntos de muestreo presenta nivel bajo de concentración de cromo total; para los niveles de concentración medio e intermedio se tiene 3 puntos de muestreo por cada nivel y finalmente se presentan 6 puntos de muestreo con un nivel alto de contaminación de cromo total.



Mapa 5. Ubicación de Puntos de muestreo de Suelos con su correspondiente nivel de concentración de Cromo Total



Mapa 6. Ubicación de Puntos de muestreo de Fondos con su correspondiente nivel de concentración de Cromo Total

PLOMO

En el caso del plomo, los intervalos de concentración (*Tabla 13*) que se determinaron fueron los siguientes: El **nivel bajo** se encuentra por debajo del límite de detección que en este caso es 0.009 mg/kg, para el **nivel medio** el intervalo que se marco fue entre el límite de detección hasta la concentración de referencia total para los suelos de uso agrícola/residencial/comercial que señala la NOM 147, en este caso es de 0.009- 400 mg/kg. Para el **nivel intermedio** se determinó como intervalo la concentración total de referencia entre el suelo de uso agrícola y el suelo de uso industrial: 400-800 mg/kg, y por último para el **nivel alto** de contaminación, concentración mayor al referencia de uso industrial ≥ 800 mg/kg.

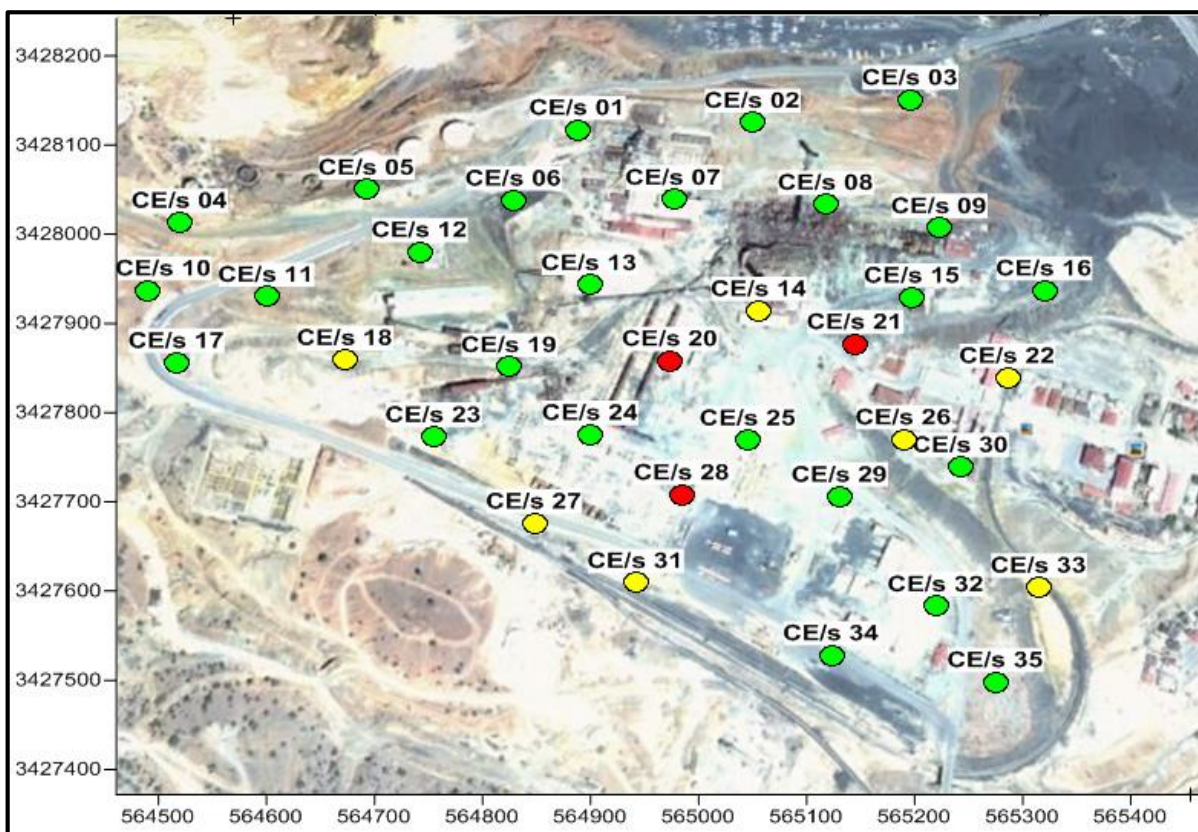
Tabla 17. Niveles de concentración con sus respectivos intervalos para Plomo

Nivel de Concentración	Intervalos para Plomo (mg/kg)
Bajo	≤ 0.009
Medio	0.009- 400
Intermedio	400-800
Alto	≥ 800

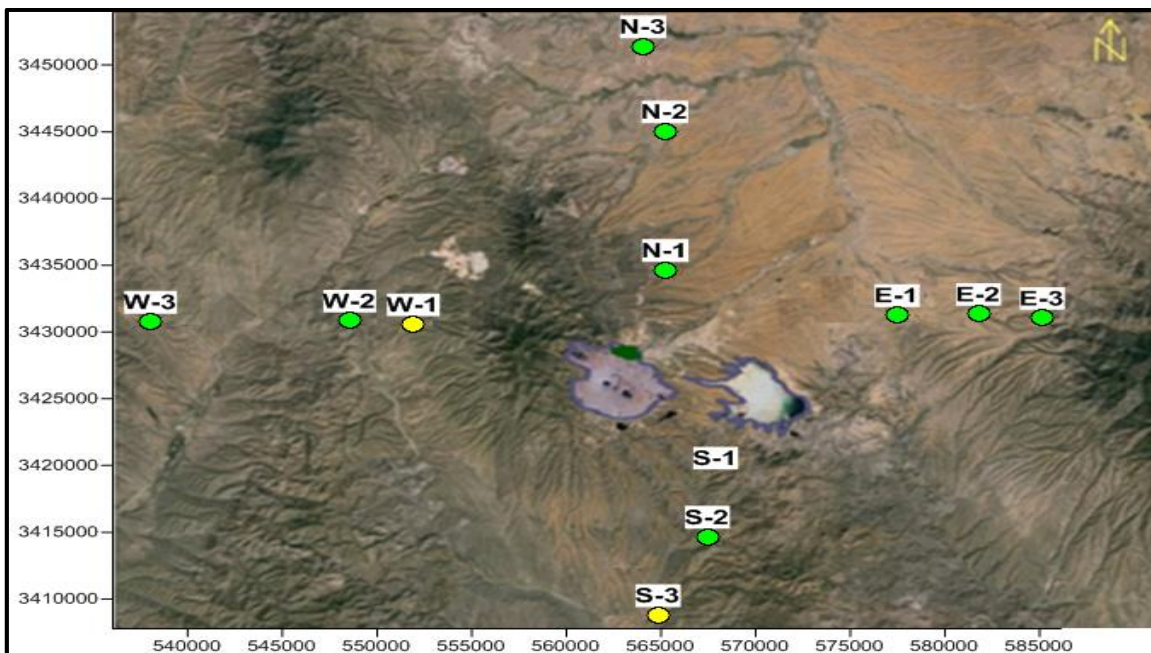
RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el mapa 7, se aprecia que el sitio de estudio no presenta ningún punto de muestreo con nivel bajo de concentración; 25 puntos de muestreo con nivel medio de concentración; para el nivel intermedio de concentración se tienen 7 puntos de muestreo y por ultimo 3 puntos de muestreo con un nivel alto de concentración.

Para fondos (*Mapa 8*), se observa que el sitio no presenta ningún punto de muestreo con un nivel bajo de concentración pero si contiene 9 puntos con nivel medio de contaminación; 2 puntos de muestreo con nivel intermedio de concentración y finalmente 1 punto de muestreo con nivel alto de concentración.



Mapa 7. Ubicación de Puntos de muestreo de Suelos con su correspondiente nivel de concentración de Plomo

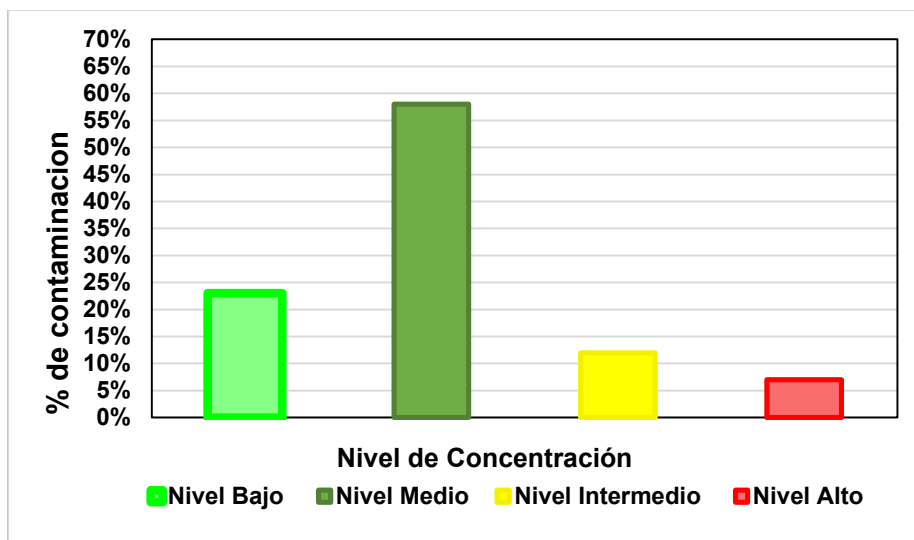


Mapa 8. Ubicación de Puntos de muestreo de Fondos con su correspondiente nivel de concentración de Plomo

Al conocer el nivel de contaminación que tiene cada punto de muestreo tanto para suelos y fondos de los EPT'S en especial de los tres elementos que poseen concentraciones por arriba de las de referencia que son arsénico, cromo total y plomo, se generaron las siguientes tablas y graficas con la finalidad de saber la cantidad exacta de puntos de muestreo con concentraciones por arriba de la marcada en la NOM-147 y de esta manera conocer de manera global que tan impactado se encuentran los suelos que se está estudiando.

Tabla 18. Cuantificación de los puntos de muestreo por cada nivel de concentración para suelos dentro del área de estudio

Elemento Potencialmente Tóxico	Sitios con nivel bajo de concentración	Sitios con nivel medio de concentración	Sitios con nivel intermedio de concentración	Sitios con nivel alto de concentración
Arsénico	2	9	14	10
Bario	-	27	8	-
Berilio	7	28	-	-
Cadmio	4	31	-	-
Cromo Total	-	12	6	17
Mercurio	35	-	-	-
Níquel	-	35	-	-
Plata	2	33	-	-
Plomo	-	25	7	3
Selenio	35	-	-	-
Talio	10	11	14	-
Vanadio	-	34	1	-



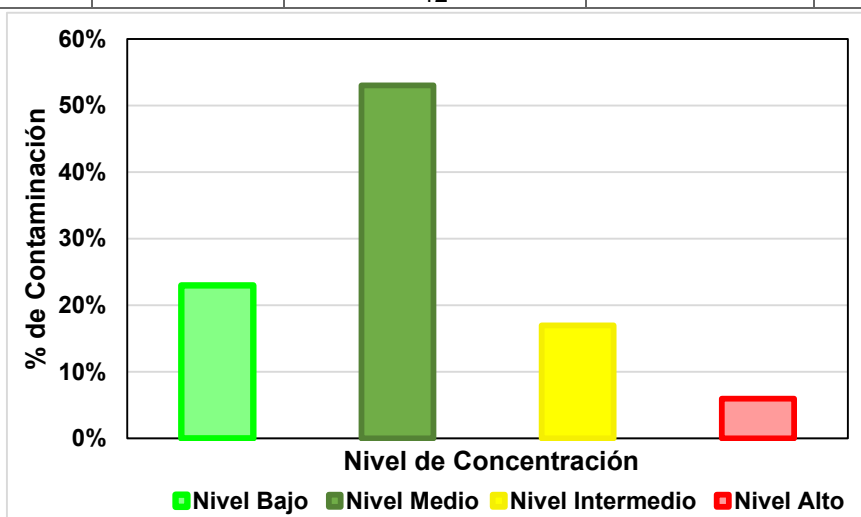
Gráfica 1. Nivel de concentración global del Sitio para Suelos

Los elementos que se encuentran con un nivel alto de concentración o mejor dicho han rebasado las concentraciones de referencia totales para uso industrial (CTR) para las muestras de suelos son el **Arsénico**, **Cromo Total** y **Plomo**, como se visualizó en los mapas anteriores, **con 10, 17 y 3 puntos de muestreo contaminados respectivamente** (Tabla 14).

Mientras que el nivel de concentración general para las muestras de suelo está en un nivel medio con un porcentaje de **58%** lo que corresponde a suelo industrial, es decir, que el predio no está contaminado más allá de los valores permitidos para suelo de tipo industrial. Solo tiene 7% de sitios contaminados con As, Cr y Pb. Este mismo análisis se realizó en las muestras de fondos.

Tabla 19. Cuantificación de los puntos de muestreo por cada nivel de concentración para Fondos

Elemento Potencialmente Tóxico	Sitios con nivel bajo de concentración	Sitios con nivel medio de concentración	Sitios con nivel intermedio de concentración	Sitios con nivel alto de concentración
<i>Arsénico</i>	-	-	10	2
<i>Bario</i>	1	8	3	-
<i>Berilio</i>	4	8	-	-
<i>Cadmio</i>	-	12	-	-
<i>Cromo Total</i>	-	3	3	6
<i>Mercurio</i>	12	-	-	-
<i>Níquel</i>	-	12	-	-
<i>Plata</i>	3	9	-	-
<i>Plomo</i>	-	9	2	1
<i>Selenio</i>	12	-	-	-
<i>Talio</i>	1	4	7	-
<i>Vanadio</i>	-	12	-	-



Gráfica 2. Nivel de Contaminación global del Sitio para Fondos

Para fondos también se encontraron concentraciones mayores a lo que indica la NOM-147 para de arsénico, cromo total y plomo en 2, 6 y 1 sitios contaminados respectivamente lo que corresponde a un 6% de sitios que sobrepasan los límites de referencia total. Lo anterior indica que As, Cr y Pb son de origen natural y se pueden utilizar estos datos para establecer el nivel de remediación. Se analizaron los datos para conocer los puntos de muestreo que están contaminados y cuál es el porcentaje que representan, El objetivo de este análisis es saber si en los sitios de muestreo que contienen niveles altos de contaminación está presente únicamente un solo elemento o se encuentran los tres EPT'S con el fin de elegir la técnica de remediación adecuada para la zona que se está estudiando.

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tabla 20. Suelos

Clave de Muestreo	NIVEL DE CONCENTRACIÓN				Clave de Muestreo	NIVEL DE CONCENTRACIÓN			
	Bajo	Medio	Intermedio	Alto		Bajo	Medio	Intermedio	Alto
CE/s 01		AP		C	CE/s 19		P	A	C
CE/s 02		AP	C		CE/s 20				ACP
CE/s 03		ACP			CE/s 21				ACP
CE/s 04		ACP			CE/s 22		C	AP	
CE/s 05		ACP			CE/s 23		P	A	C
CE/s 06		AP	C		CE/s 24		CP	A	
CE/s 07		P	AC		CE/s 25		CP	A	
CE/s 08		AP		C	CE/s 26			P	AC
CE/s 09		AP		C	CE/s 27			P	AC
CE/s 10		AP	C		CE/s 28				ACP
CE/s 11	A	P		C	CE/s 29		P	A	C
CE/s 12	A	CP			CE/s 30		CP	A	
CE/s 13		P	C	A	CE/s 31		C	AP	
CE/s 14			CP	A	CE/s 32		CP	A	
CE/s 15		P	A	C	CE/s 33			P	AC
CE/s 16		CP	A		CE/s 34		P	A	C
CE/s 17		P		AC	CE/s 35		CP	A	
CE/s 18			P	AC	Total de sitios contaminados	2	26	23	19

*Para identificar de manera rápida el elemento presente en cada sitio de muestreo únicamente se colocó la inicial de cada elemento, donde letra **A** corresponde a arsénico, para el cromo total la letra **C** y la letra **P** para el plomo.

La tabla 16 muestra cual es el elemento presente en cada punto de muestreo dependiendo del nivel de concentración ya sea bajo, medio, intermedio o alto. Contiene la clave de campo de los puntos de muestreo y con ayuda de los mapas generados con el programa Surfer 11 se fue identificando que elemento o elementos están presentes en cada sitio.

Para el nivel bajo de concentración solo se tienen 2 puntos con arsénico, (CE/s11 y CE/s12). En cambio para el nivel medio de concentración se puede apreciar que el plomo y el cromo están presentes en 2 y 9 puntos de muestreo diferentes respectivamente. Por otro lado se observa la presencia en los mismos 6 puntos de muestreo tanto de As como de Pb. Esto también ocurre pero ahora con Cr y Pb presentes en los mismos 7 puntos de muestreo.

En el nivel intermedio de contaminación, el arsénico y el cromo están presentes en 9 y 4 puntos de muestreo diferentes respectivamente. Pero en 2 puntos de muestreo se tiene la presencia tanto de As como de Pb.

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Finalmente se tiene 19 puntos de muestreo con nivel de contaminación alto donde los tres elementos potencialmente tóxicos: As, Cr y Pb se encuentran en solo tres puntos de muestreo: **CE/s03, CE/s04 y CE/s05**. En 5 puntos de muestreo diferentes están presentes tanto As y Cr y por último el cromo y arsénico de forma independiente están en 9 y 2 puntos de muestreo diferentes respectivamente.

Posteriormente se realizó el mismo análisis para fondos (*Tabla 17*)

Tabla 21. Fondos

Clave de Muestreo	NIVEL DE CONCENTRACIÓN			
	Bajo	Medio	Intermedio	Alto
N-1		CP	A	
N-2		CP	A	
N-3		P	AC	
E-1		P	A	C
E-2		P	AC	
E-3		P		AC
S-1				ACP
S-3			AP	C
W-1			AP	C
W-2		P	A	C
W-3		P	AC	
Total de sitios contaminados	0	9	10	6

En el nivel bajo de concentración no se tiene ningún punto de muestreo; para el nivel medio de concentración se tiene 6 puntos de muestreo con plomo y finalmente están presentes cromo y plomo en los mismos puntos de muestreo (**N-1, N-2 y S-2**).

*La letra **A** corresponde a arsénico, para el cromo total la letra **C** y la letra **P** para el plomo.

Para el nivel intermedio de concentración (menor al valor de uso industrial) se tienen 5 puntos de muestreo únicamente con arsénico; tres puntos de muestreo tanto con arsénico como cromo. Y 2 puntos de muestreo con arsénico y plomo.

Finalmente para el nivel alto de concentración (mayor al valor establecido en la NOM-147 para suelo de uso industrial), el cromo sobrepasa en 4 puntos de muestreo. En un solo punto de muestreo se encontraron arsénico y cromo y en un solo punto de muestreo (**S-1**) están presentes los tres elementos potencialmente con una concentración de 454.08 mg/kg para arsénico, 1291.88 mg/kg de cromo total y 1478.12mg/kg de plomo, estas concentraciones rebasan los niveles mayores a los establecidos para suelos de uso industrial.

Por último se realizó el cálculo de los coeficientes de correlación para las concentraciones de los ETP'S de suelo y fondos con el propósito confirmar si el

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

arsénico, plomo y cromo se encuentran en diferentes o los mismos puntos de muestreo.

Tabla 22. Coeficientes de correlación de los elementos potencialmente tóxicos para Suelos

	Ag	As	Ba	Be	Cd	Cr	Ni	Pb	Tl	V
Ag	1									
As	0.59	1								
Ba	0.05	0.25	1							
Be	0.02	-0.13	0.023	1						
Cd	0.44	0.69	- 0.032	0.21	1					
Cr	-0.03	0.56	0.471	0.07	0.30	1				
Ni	0.27	0.51	0.138	-0.16	0.63	0.21	1			
Pb	0.61	0.75	0.112	-0.11	0.71	0.19	0.48	1		
Tl	0.53	0.33	- 0.437	0.23	0.51	-0.34	0.22	0.47	1	
V	-0.15	0.04	0.189	-0.06	0.13	0.08	0.73	0.01	-0.08	1

Tabla 23. Coeficientes de correlación de los elementos potencialmente tóxicos para Fondos

	Ag	As	Ba	Be	Cd	Cr	Ni	Pb	Tl	V
Ag	1									
As	0.12	1								
Ba	0.20	0.39	1							
Be	0.45	-0.22	-0.17	1						
Cd	0.51	0.40	0.28	0.00	1					
Cr	-0.43	0.30	0.20	-0.11	0.20	1				
Ni	0.40	0.22	0.02	-0.03	0.31	-0.33	1			
Pb	-0.27	0.81	0.28	-0.15	0.02	0.57	-0.03	1		
Tl	0.26	0.30	0.41	-0.02	0.39	-0.39	0.34	-0.07	1	
V	0.26	0.18	0.64	0.54	0.09	0.22	-0.25	0.21	0.26	1

En el caso de las muestras de los suelos (*Tabla 18*), el arsénico presenta un coeficiente de correlación de 0.69 y 0.75 junto con cadmio y plomo respectivamente lo que indica que estos elementos se encuentran con As en la mayoría de los puntos de muestreo y para cadmio se observa que este elemento está presente junto con plomo al tener un coeficiente de 0.71. Por otro lado el cromo al no presentar un coeficiente de correlación mayor a 0.5 indica que este elemento no se presenta con ninguno de los demás ETP's.

Para fondos (*Tabla 19*) únicamente el coeficiente de correlación de arsénico con plomo presenta un valor de 0.81 lo que indica que hay presencia de estos dos elementos en la mayoría de los sitios de muestreo y en el caso de cromo este

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

presenta coeficientes de correlación menores indicando que el Cr no está presente con ningún otro ETP'S.

Acorde al análisis anterior, esto nos indica que la mayoría de los puntos de muestreo tienen contaminación antropogénica de cromo total con 9 pero también está presente en 4 puntos de muestreo de suelos y fondos. En el caso de arsénico presenta concentraciones por arriba de las de referencia en dos puntos de muestreo para suelos. En el caso del plomo este no está presente como único elemento potencialmente tóxico en ningún punto de muestreo tanto de suelo como de fondos pero si está presente en los puntos de muestreo donde también se tiene cromo total y arsénico (tres para suelos y uno para fondos).

De manera particular los resultados para el cromo determinados por ICP-OES solo hacen referencia a la concentración total del elemento pero no revela el estado oxidación en el que se encuentra. Es de gran importancia conocer el estado de oxidación del cromo presente en la zona de estudio porque cada una de las especies de este elemento tiene propiedades químicas diferentes que pueden afectar o beneficiar las características del suelo que se está estudiando.

El cromo puede estar presente en el suelo en distintas formas químicas, sus principales estados de oxidación van desde Cr (0) la forma metálica, hasta la forma hexavalente, Cr (VI); siendo los más importantes el Cr^{+3} y Cr^{+6} desde una perspectiva ambiental. La importancia del Cr (III) se debe a que es una de las formas químicas del cromo que se encuentra en mayor abundancia en el ambiente, es más estable que el Cr (VI), y se considera como microelemento esencial para el hombre porque mejora el metabolismo de lípidos y carbohidratos. En la mayoría de los suelos el Cr (III) es poco móvil y debido a su capacidad de adsorción que el suelo tenga, este será retenido por más tiempo. En suelos frescos y húmedos y con condiciones levemente acidas, la oxidación del cromo puede ocurrir en presencia de sulfuros y hierro (II) (condiciones anaerobias) y se acelere en presencia de materia orgánica en el suelo, por lo que un suelo suficiente materia orgánica permite retener por más tiempo el Cr^{+3} en el suelo. (Gonzales et.al., s.f)

En el caso del Cr^{+6} , su importancia se debe a que es una de las especies químicas que presenta gran peligro para el ser humano por su gran facilidad de penetrar membranas celulares convirtiéndolo en un elemento altamente tóxico. El cromo (VI) se encuentra generalmente bajo la forma de aniones, cromatos o dicromatos solubles los cuales son muy tóxicos debido a su alto poder oxidante. (Ferro et al., 2009). Por su alta capacidad corrosiva, una exposición a los compuestos de Cr(VI) provoca, independientemente de la dosis, rápidas reacciones alérgicas en la piel, puede producir úlceras, lesiones renales entre otros padecimientos por lo que la EPA* ha colocado al Cr^{+6} en la posición cuatro de la lista de sustancias cancerígenas. La presencia de grandes cantidades de cromo (VI) en los suelos, casi siempre es consecuencia de las actividades antropogénicas (Harte et al 1995). Sin embargo, la materia orgánica contenida en el suelo reduce con facilidad al cromo (VI) en cromo (III) (Gonzales et.al., s.f)

ESPECIACIÓN DEL CROMO (III) Y CROMO (VI)

La especiación del cromo hexavalente y la trivalente generalmente depende de una variedad de parámetros ambientales principalmente: pH, concentración y la disponibilidad de ligandos en el suelo (Katz, 1991 citado en EPA, 2010). Los compuestos de Cr (VI) más destacados son los cromatos y dicromatos metálicos ($PbCrO_4$, Ag_2CrO_4 , Tl_2CrO_4 , Ba_2CrO_4 , $HgCrO_4$ y K_2CrO_4). Además forma un cierto número de oxácidos y oxoaniones incluyendo $HCrO_4^-$, $Cr_2O_7^{2-}$ y CrO_4^{2-} , siendo el último de gran importancia medioambiental y toxicológica. Debido a su elevado potencial de ionización y coordinación tetraédrica, el ion cromato es un agente oxidante energético y ácido fuerte. (Pazos, 2007). Por ello, si consideramos un medio acuoso y como variables principales tanto pH como el potencial redox, tendremos como predominantes las especies que se muestran en el diagrama Eh vs pH para el cromo (Figura 12). A pH neutros y alcalinos los iones CrO_4^{2-} son los predominantes y conforme va disminuyendo el pH entre 1 - 6 la concentración de $HCrO_4^-$ aumenta mientras que a pH bajos la especie dominante es el $Cr_2O_7^{2-}$ (EPA, 2010). En el caso del cromo trivalente, los compuestos más destacados son las sales solubles en agua como acetato, bromuro, cloruro, yoduro, nitrato y perclorato.

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Destacan también compuestos insolubles como Cr_2O_3 , $Cr(OH)_3$ y $CrPO_4$. El Cr^{+3} puede existir en forma ionizada a pH menores de 3, en este estado de oxidación su movilidad es alta (soluble). Mientras que a pH superiores, se lleva a cabo su hidrólisis. Específicamente a pH entre 3.6 y 6.3 se forman los siguientes compuestos $Cr(OH)^{+2}$, $Cr(OH)_2^+$ a pH entre 6.3 y 11.5 se forma $Cr(OH)_3$ y a pH mayores de 11.5, $Cr(OH)_4^-$ (Figura 13) (Velasco, 2009)

Una forma teórica de conocer el estado de oxidación en el que se encuentra el cromo presente en los suelos y fondos fue en base al diagrama de Pourbaix o Eh vs pH.

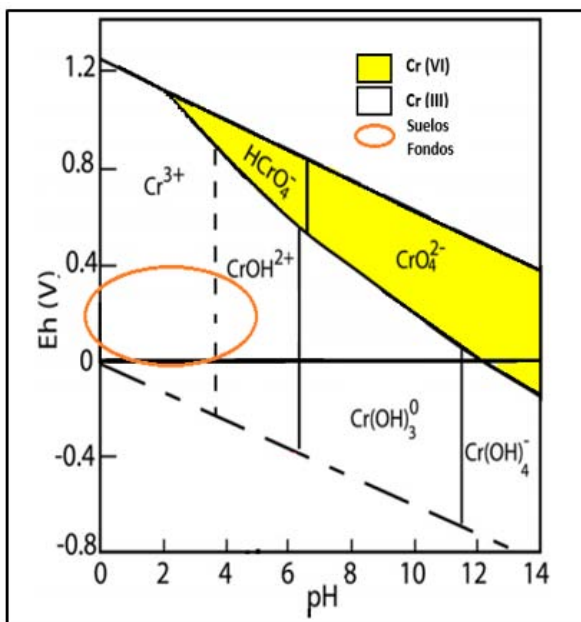


Figura 13. Diagrama de Eh vs pH para las especies de cromo en solución. De color amarillo se resaltan las especies del Cr (VI) y de color blanco las especies del Cr (III). Con un círculo rojo se señalan la zona de los resultados de la caracterización de los suelos y fondos que se muestran en las tablas 6 y 7. (EPA, 2010)

Este diagrama define las zonas del predominio de los estados de oxidación más estables de un metal, sus productos de corrosión y sus iones asociados en una solución acuosa. En el diagrama de Pourbaix del cromo que se presenta en la figura 12, se señala de color amarillo las especies del Cr (VI) y en blanco las especies con estado de oxidación +3. Y con un círculo rojo se muestra la zona en que se encuentran los resultados promedio de la caracterización (Tablas 6 y 7) de los suelos y fondos en donde las especies

que predominan son Cr^{+3} y $Cr(OH)^{+2}$. Por lo tanto, de acuerdo a la literatura antes citada, el estado de oxidación del cromo presente en las muestras de suelos y fondos es Cr (III) el cual no es peligroso para el ser humano independientemente de la concentración en la que se encuentra, en este caso, el cromo se descarta como elemento potencialmente tóxico para este estudio.

En el laboratorio no se contó con el equipo necesario para realizar un análisis experimental para corroborar el estado de oxidación del cromo, pero en un futuro si es que se requiere seguir con la línea de investigación para obtener dichos resultados se propone realizar una digestión alcalina de acuerdo al método 3060a “

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Alcalina Digestion for Hexavalent Chromium “ y finalmente realizar las lecturas correspondientes por medio de Polarografía siguiendo los pasos que marca el método 7198 “ Chromium, Hexavalent (Differential Pulse Polarography) que establece la EPA para determinar en qué estado oxidación de encuentra el cromo y así tomar las medidas necesarias para una posible remediación de dicho elemento. En conclusión, al descartar al cromo como elemento potencialmente tóxico, se concluye que las muestras de suelo solo están contaminadas con **Arsénico y Plomo**. Del total de los 10 sitios contaminados, únicamente 7 de estos presentan contaminación solo de As y los tres sitios restantes se encuentran contaminados tanto de As como de Pb. En el caso de las muestras de fondos, en dos sitios de muestreo se identificó únicamente As en concentraciones mayores al valor de referencia de la norma y otro con presencia tanto de As y Pb de origen natural.

6.2. Zanjas

Para la caracterización de las zanjas se realizó el mismo tratamiento de datos para las determinaciones de cada análisis físico y químico; las tablas de resultados se encuentran en el **Anexo C**. Se realizó un análisis estadístico donde se calculó la media y desviación estándar para conocer el comportamiento general de las propiedades fisicoquímicas de las zanjas (Tabla 19).

Tabla 24. Análisis estadístico de zanjas dentro del área de influencia

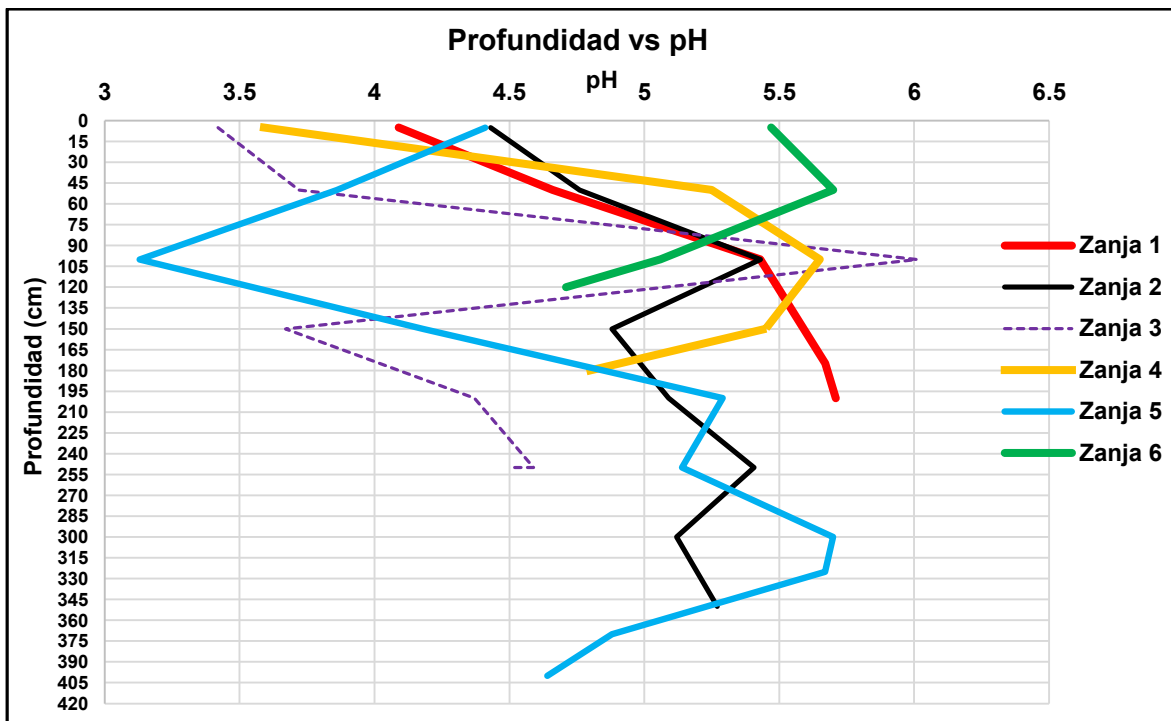
pH						
Parámetro Estadístico	Zanja 1	Zanja 2	Zanja 3	Zanja 4	Zanja 5	Zanja 6
Media	5.11	5.06	4.32	4.95	4.69	5.24
Mediana	5.43	5.11	4.37	5.25	4.76	5.27
Desviación estándar	0.710	0.317	0.872	0.821	0.821	0.436
Lectura de potencial (mV)						
Parámetro Estadístico	Zanja 1	Zanja 2	Zanja 3	Zanja 4	Zanja 5	Zanja 6
Media	243.99	289.57	351.29	294.44	290.27	277.61
Mediana	218.90	287.50	349.53	289.83	296.15	277.25
Desviación estándar	40.52	24.88	28.55	28.28	44.74	16.01
Lectura de Conductividad eléctrica (uS/cm)						
Parámetro Estadístico	Zanja 1	Zanja 2	Zanja 3	Zanja 4	Zanja 5	Zanja 6
Media	426.17	444.34	841.54	377.10	1680.82	3587.33
Mediana	117.53	243.33	982.67	115.20	1041.67	4310.00
Desviación estándar	561.65	368.48	747.60	396.56	1497.19	1898.12

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

El pH se encuentra entre 4-5.5 en las 6 zanjas con una desviación estándar menor que 1 lo que indica que hay una distribución homogénea de los valores. En el caso del potencial redox, las lecturas se encuentran en un intervalo de 250 a 300 mV, únicamente en la zanja 3 se presenta con un valor de promedio de 351.29 mV, no tan alejada del valor de la mediana lo que indica una distribución homogénea.

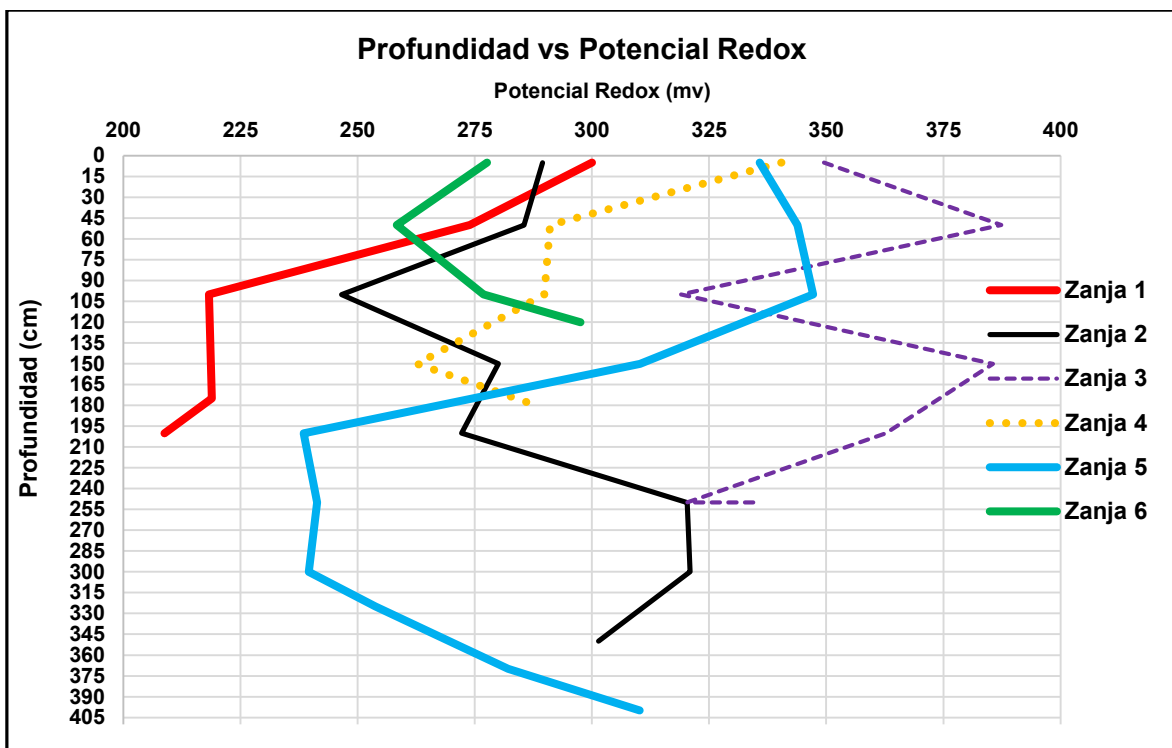
Finalmente la conductividad eléctrica presenta valores muy diferentes en las 6 zanjas con valores de media muy alejados a la mediana lo que indica que la distribución no es homogénea.

Posteriormente se realizaron gráficas de profundidad vs pH, Potencial redox y Conductividad eléctrica para cada una de las 6 zanjas que se presentan a continuación

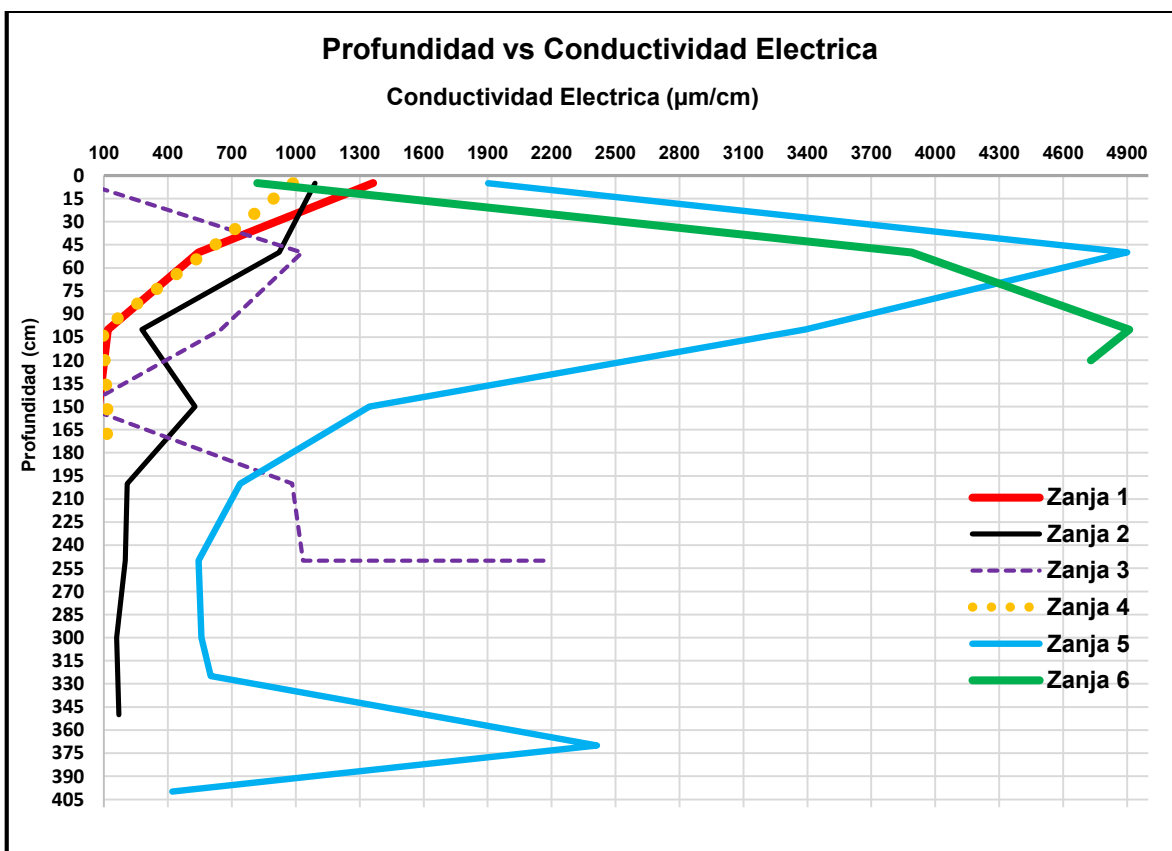


Gráfica 3. Profundidad vs pH de las 6 Zanjas

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS



Gráfica 4. Profundidad vs Potencial Redox de las 6 Zanjas



Gráfica 5. Profundidad vs Conductividad Eléctrica de las 6 Zanjas

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las gráficas 3, 4 y 5 permiten identificar la profundidad (migración vertical) hasta donde ha llegado la contaminación antropogénica, para la zanja 1 se observa que el suelo se encuentra con un pH ácido, conforme va aumentando la profundidad el pH se vuelve alcalino hasta mantenerse constante a una profundidad de 175 cm; esta tendencia también se presenta en las gráficas de Potencial Redox, Conductividad vs Profundidad, en donde a 218 mV y 55.73 $\mu\text{m}/\text{cm}$ con una profundidad de 175 cm se mantienen constantes. Esto quiere decir que la contaminación por elementos potencialmente tóxicos está presente solo hasta 175 cm y si se requiere remover el suelo como posible forma de remediación sería hasta dicha profundidad en el caso de la zanja 1.

Este mismo comportamiento no se presentó para la zanja 2; en el análisis de pH y potencial redox no se logra apreciar una tendencia de las lecturas. El pH se mantiene constante a partir de 100 cm a un pH = 5.5, mientras que en el potencial redox, en la profundidad de 150 cm los valores son relativamente constantes (280 mv). En la conductividad eléctrica se logra observar que los valores decrecen de manera constante a partir de la profundidad de 150 cm (209.33 $\mu\text{m}/\text{cm}$). Por lo tanto se puede concluir que para la zanja 2 la contaminación antropogénica llegó hasta 150 cm

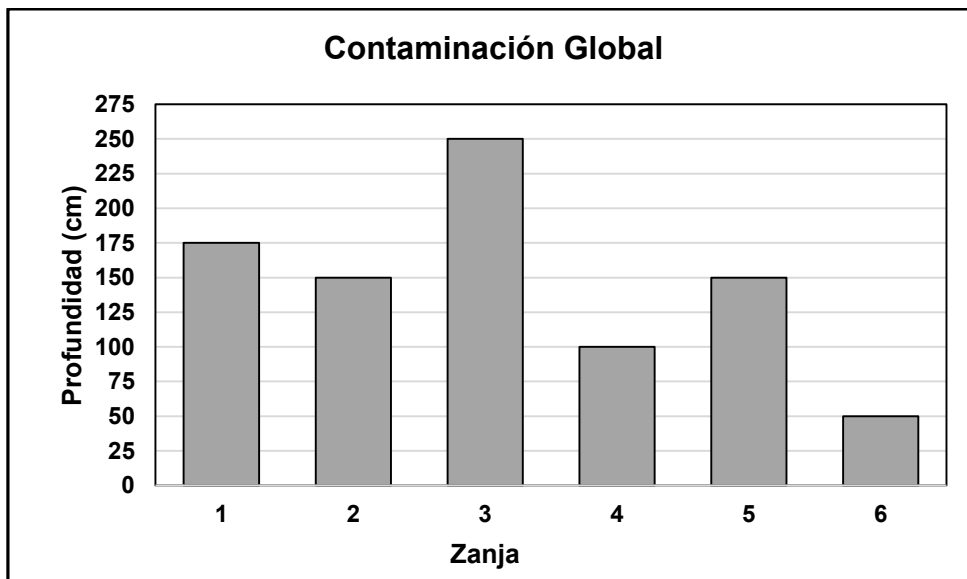
Para la zanja 3, los valores de pH no son constantes hasta una profundidad de 250 cm (pH =4.37) esto mismo ocurre con los valores de potencial redox pero a una profundidad de 150cm (362 mv) y para la conductividad eléctrica las lecturas son constantes a partir de 150 cm de profundidad con un valor de 1000 ($\mu\text{m}/\text{cm}$).

Las muestras de suelo para las zanja 4 y 6 presentan una tendencia parecida en los tres análisis químicos, sin embargo las lecturas se muestran constantes hasta una profundidad de 100 cm y 50 cm respectivamente.

Finalmente para la zanja 5, aunque las lecturas de pH y potencial redox están muy dispersas, en los valores para la conductividad eléctrica se logra apreciar que a partir de 150 cm los valores muestran un comportamiento constante.

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la gráfica 6 se realiza un análisis global de la afectación vertical por la contaminación por EPT'S, la contaminación antropogénica alcanzó una profundidad de hasta 250 cm, en sitios específicos, y en promedio hasta una profundidad de 200 cm



Gráfica 6. Profundidad que ha alcanzado la contaminación antropogénica en cada una de las 6 zanjas determinado por medio de pH, potencial redox y conductividad eléctrica

Conociendo la profundidad que ha alcanzado la contaminación antropogénica, por los valores de pH, potencial y conductividad eléctrica, se realizó adicionalmente un análisis de Fluorescencia de Rayos X para las zanjas con el fin de conocer la concentración de cada elemento potencialmente tóxico y así determinar con mayor certeza de que elemento está contaminado el predio y llegar a proponer las medidas de remediación necesarias y adecuadas.

Como se menciona en la parte experimental se realizaron 5 lecturas modo suelo de cada muestra y entre cada 10 muestras se realizó una calibración con los estándares Montana 2710a y Blanco SiO_4 Sigma; se realizó el promedio de cada una de las muestras, así como de los estándares y se obtuvo un valor único para la concentración de cada elemento potencialmente tóxico.

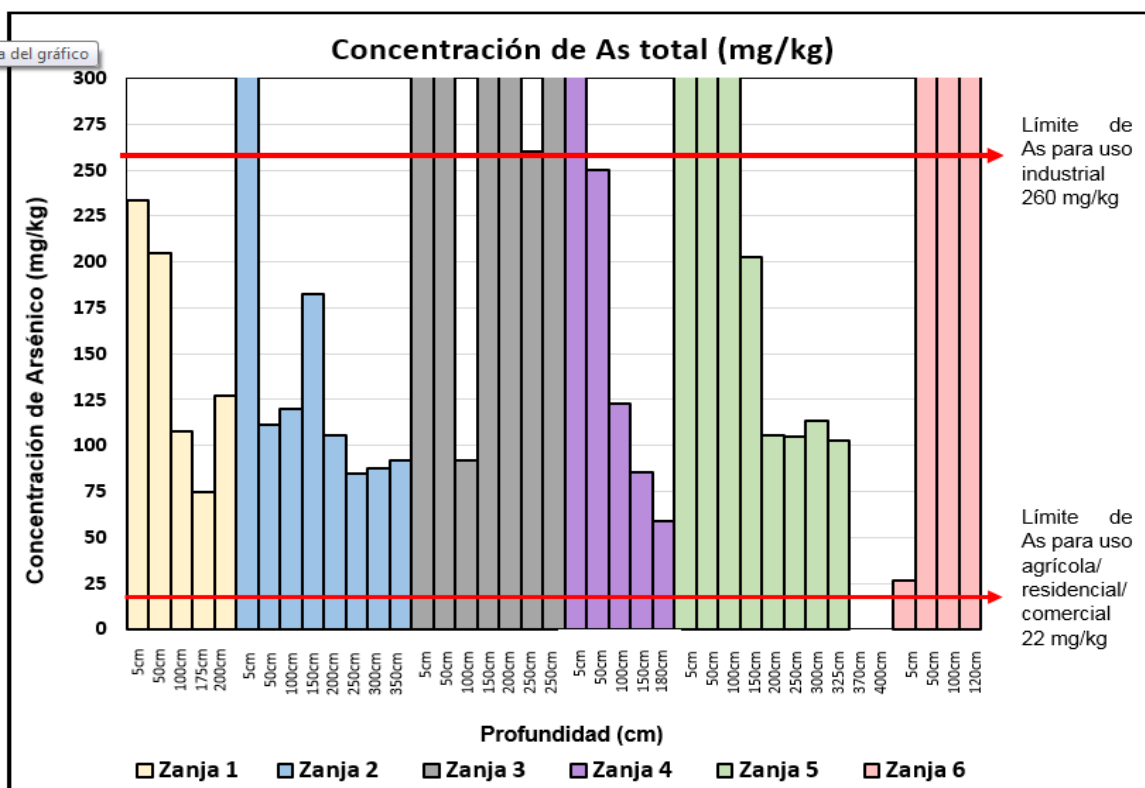
Los resultados del análisis de Fluorescencia de Rayos X se presentan en la **Tabla 7 del Anexo B** en donde se observa que los elementos que se encuentran en

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

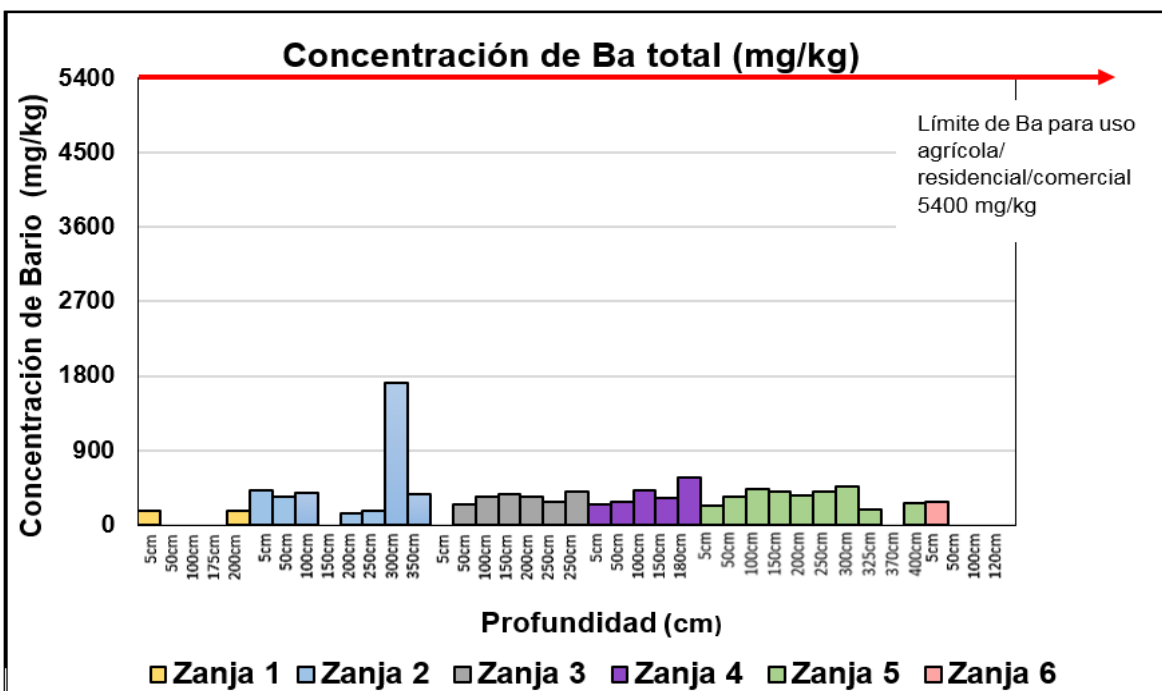
(concentraciones menores del límite de detección) como elementos traza son: plata, cadmio, mercurio, níquel, selenio y talio; en cambio los elementos que tienen una concentración mayor al límite de detección son el **arsénico, bario, cromo vanadio y plomo**.

A continuación se presentan gráficas de cada uno de los 4 elementos que presentaron concentraciones mayores al límite de detección en el análisis de Fluorescencia de Rayos X para saber si estos EPT'S sobrepasan los límites de referencia que marca la NOM – 147.

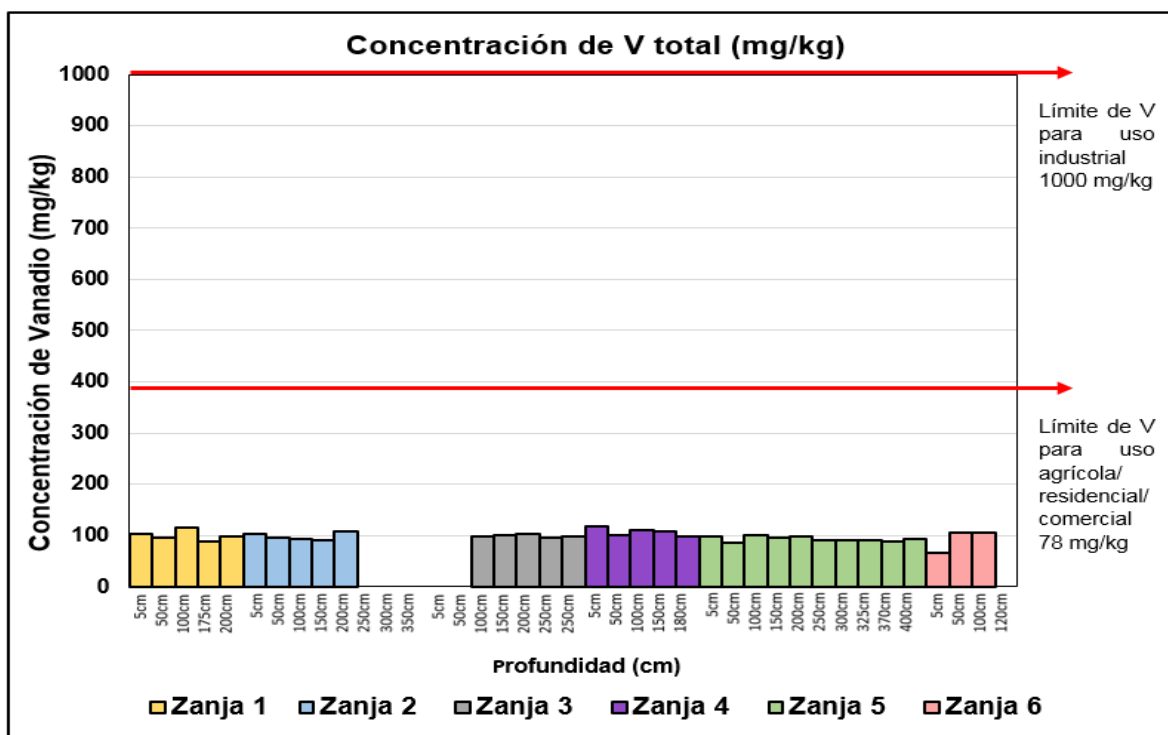
En las gráficas 7, 8, 9,10 y 11 se muestra las concentraciones del As, Ba, Cr y V de las 6 zanjas por cada nivel de profundidad que se determinaron por Fluorescencia de Rayos X; en cada gráfico, con líneas de color rojo se indica los límites de los EPT'S para el uso agrícola/residencial/comercial y el límite para uso industrial que marca la NOM-147



Gráfica 7. Concentraciones de las Zanjas determinadas por Fluorescencia de Rayos X. Las líneas rojas muestran los límites de concentración para Arsénico en suelos agrícolas/residencial/comercial y de uso industrial que marca la NOM-147. Del lado derecho se muestra la tabla de los niveles de contaminación que se determinaron para suelos y fondos para este trabajo de tesis.

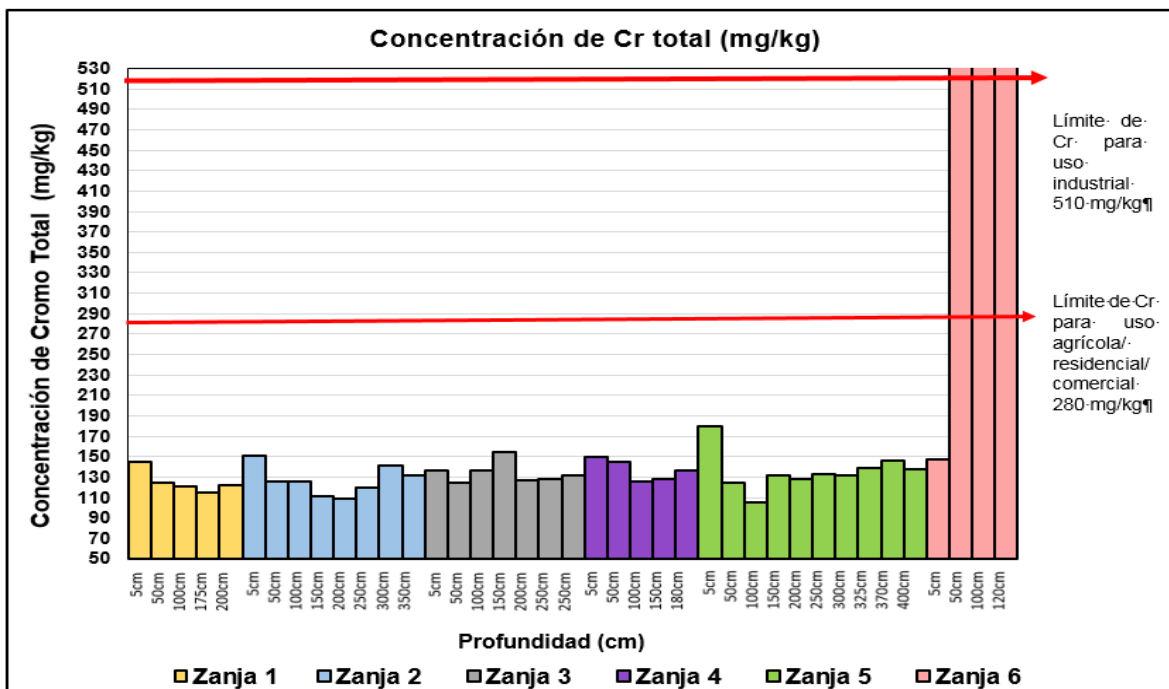


Gráfica 8. Concentraciones de las Zanjas determinadas por Fluorescencia de Rayos X. La línea roja muestran el límites de concentración para Bario en suelos agrícolas/residencial /comercial que marca la NOM-147. Del lado derecho se muestra la tabla de los niveles de contaminación que se determinaron para suelos y fondos en este trabajo de tesis.

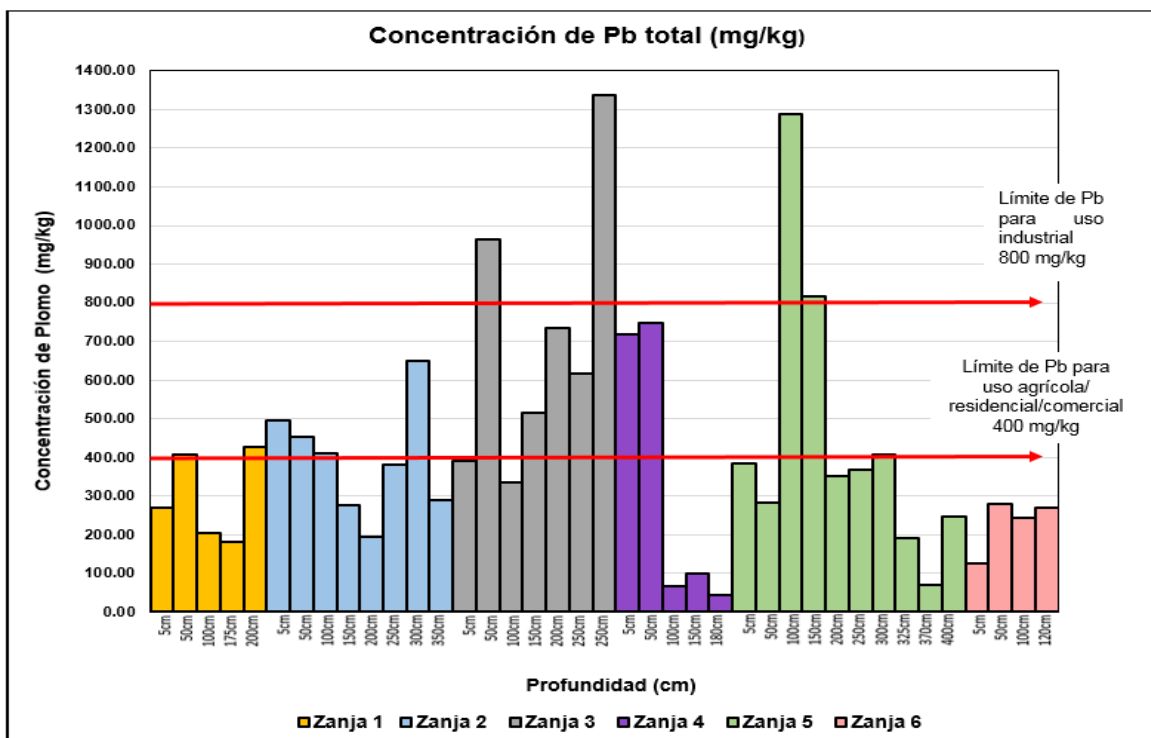


Gráfica 9. Concentraciones de las Zanjas determinadas por Fluorescencia de Rayos X. La línea roja muestran el límites de concentración para Vanadio en suelos agrícolas/residencial /comercial que marca la NOM-147. Del lado derecho se muestra la tabla de los niveles de contaminación que se determinaron para suelos y fondos en este trabajo de tesis.

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS



Gráfica 10. Concentraciones de las Zanjas determinadas por Fluorescencia de Rayos X. La línea roja muestran el límites de concentración para Cromo en suelos agrícolas/residencial /comercial que marca la NOM-147. Del lado derecho se muestra la tabla de los niveles de contaminación que se determinaron para suelos y fondos en este trabajo de tesis.



Gráfica 11. Concentraciones de las Zanjas determinadas por Fluorescencia de Rayos X. La línea roja muestran el límites de concentración para Plomo en suelos agrícolas/residencial /comercial que marca la NOM-147. Del lado derecho se muestra la tabla de los niveles de contaminación que se determinaron para suelos y fondos en este trabajo de tesis.

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el caso del **arsénico** (*Gráfica 7*), para la zanja 1 las concentraciones totales no sobrepasan los límites de referencia para uso de suelo industrial (260 mg/kg) en todo el intervalo de profundidad y de acuerdo al nivel de concentración establecido anteriormente, esta presenta un nivel **intermedio**.

En el caso de la zanja 2 y 4, a una profundidad de 5 cm el arsénico rebasa los límites de concentración de uso industrial, clasificando el nivel de concentración en **alto**, mientras que en los siguientes intervalos de profundidad la concentración se mantiene a menor las concentraciones permitidas por la NOM-147.

En las zanjas 5 y 6, a una profundidad de 5cm, 50cm y 100 cm el arsénico presenta un nivel de concentración alto rebasando la concentración total de referencia y por último para la zanja 3, la contaminación antropogénica del arsénico rebasa los límites de concentración de uso industrial en: 5cm ,50cm, 150cm, 200cm y 250cm de profundidad.

Otro elemento potencialmente tóxico que presentó concentraciones por arriba del límite de detección fue el bario, pero en este caso sus concentraciones no sobrepasaron las concentraciones totales de referencia tanto para uso de suelo agrícola/residencial/comercial (54 000 mg/kg) y mucho menos para uso industrial (67 000 mg/kg) en ninguna de las 6 zanjas como se aparecía en la gráfica 8. Por lo tanto su nivel de concentración solo se limitó a nivel medio, el cual nos indica que no se necesita remediar en las 6 zanjas.

En el caso del Vanadio (*Gráfica 9*), para la zanja 2 a un intervalo de profundidad de 250cm a 350cm, para la zanja 3 con una profundidad de 5cm a 50cm y en la zanja 6 a 120cm se aprecia que la concentración de este elemento no rebasa el límite de detección, mientras que en los demás intervalos de profundidad la concentración se encuentra entre los límites de uso agrícola/residencial/comercial (78mg/kg) y uso industrial (1000 mg/kg), que en base a la tabla de concentración lo coloca en un nivel **intermedio**. Las zanjas restantes: 1,4 y 5, no presentaron niveles de contaminación alto porque para todos los intervalos de profundidad las concentraciones están de

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

igual manera entre los límites de uso agrícola/residencial/ comercial y el uso industrial.

En la gráfica 10 se presentan las concentraciones de cromo total, se puede apreciar que únicamente en la zanja 6 en un intervalo de profundidad de 50cm a 120cm las concentraciones rebasan el límite para uso industrial (510mg/kg) colocando a dichos puntos en un nivel **alto** de concentración. Mientras que en ninguna de las demás zanjas rebasa el límite para uso agrícola/residencial/comercial (280mg/kg) colocando a todas ellas en un nivel de concentración medio porque las concentraciones del análisis de fluorescencia de rayos X está entre 0.003 – 280 mg/kg.

Por último en la gráfica 11 se presentan las concentraciones de plomo, se observa que solo en la zanja 3 en un intervalo de profundidad de 0cm a 5cm y a 250 cm las concentraciones de Pb rebasan el límite de uso industrial (800mg/kg). Por otra parte en la zanja 5 en un intervalo de 50cm a 100cm y de 100cm a 150cm de igual manera presentan concentraciones por arriba del límite industrial que marca la NOM-147. Para las zanjas 1 y 6, las concentraciones se encuentran por debajo de la concentración de referencial agrícola/residencial/comercial (400mg/kg) y para las zanjas 2 y 4 su concentración se encuentra por debajo de 800 mg/kg (límite de uso industrial)

En general se tiene 11, 3 y 4 muestras con arsénico cromo total y plomo respectivamente que presentan elevadas concentraciones colocando a las muestras en un nivel alto de contaminación. En el caso del cromo, al no conocer en qué estado de oxidación se encuentra dicho elemento, ya sea Cr (III) o Cr (IV) pero en base al pH y potencial se asume que se trata de Cr (III) por lo tanto no se tomara en cuenta para la elección de las alternativas de remediación en este proyecto.

Por lo que una vez definido el grado de afectación y los elementos a remediar es necesario investigar la geoquímica de dichos EPT'S (arsénico y plomo) para proponer los métodos viables para llevar a cabo la remediación

7. GEOQUÍMICA DEL ARSÉNICO Y PLOMO

La geoquímica es una especialidad de las ciencias naturales que se basa en la geología y la química, para estudiar la composición y funcionamiento de nuestro planeta y específicamente determina la abundancia absoluta y relativa, distribución y migración de los **elementos químicos así como su origen, distribución, composición, especies químicas, evolución y las interacciones en la tierra** (Hidrosfera, Atmósfera, Biosfera y Geósfera). (SGM, 2005)

Existen diferentes procesos que determinan la geoquímica de los elementos químicos pero en este trabajo de tesis se tratarán los procesos que intervienen en la movilidad y bioaccesibilidad del arsénico y plomo como: **estructura, reacciones redox, solubilidad, precipitación, adsorción, desorción y especiación** los cuales nos servirán como referencia para poder implementar las medidas de remediación adecuadas.

7.1. Arsénico

Propiedades Generales	
Símbolo	Numero Atómico: 33
As	Masa Atómica: 74.92
	Densidad : 5.7 g/cm ³ a 14 °C
	Punto de Fusión : 814°C (36 atm)
	Sublima : 615°C
	Configuración electrónica: [Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 4p ³
	Isotopos que van del ⁶⁸ As -- ⁷⁹ As. Más estable ⁷⁵ As
	Alotropos: amarillo. Negro y gris (más estable)

El arsénico es un metaloide perteneciente al grupo 5A (o grupo 15) de la tabla periódica. Tiene tres alotropos: amarillo, negro y gris siendo este último el más común y estable. Su contenido en la corteza terrestre está entre 2 mg/kg, siendo el elemento número veinte en la lista de los elementos más abundantes. (N.A.S., 1977 en Carbonelli, 1995)

De acuerdo a su estructura electrónica, el arsénico presenta dos electrones en la primera capa, 8 en la segunda y 18 en la tercera, mientras que en la cuarta capa esta se encuentra incompleta con únicamente 5 electrones. Debido a que en la cuarta capa, el orbital s está completamente lleno y el orbital p medio lleno, el arsénico presenta cuatro estados de oxidación: As⁻³; As⁰; As (III) y As (V). Por su

gran habilidad de perder electrones hace que su carácter catiónico aumente y se presente principalmente como As (III) y As (V) (Flora, 2015)

Química del Arsénico

La oxidación y reducción del arsénico dependen principalmente del pH y el potencial redox, predominando en forma de oxianiones como arsenito (As (III)) o como arsenato (As (V)). La forma pentavalente predomina en ambientes oxidantes: a pH menor a 6.9 el $H_2AsO_4^-$ predomina; mientras que a altos pH el $HAsO_4^{2-}$ se convierte en la especie dominante. Bajo condiciones reductoras y a un pH menor de 9.2 se presentan las especies trivalentes (H_3AsO_3) las cuales se logran disociar únicamente con un pH alto. (Flora, 2015) En la figura 17, se muestran las condiciones de pH y potencial en las que se encuentran las especies de arsénico.

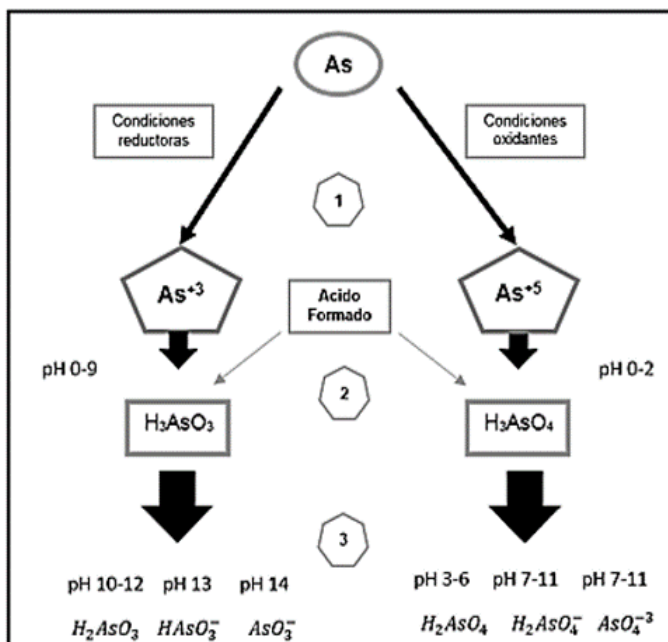


Figura 14. 1) Oxidación del arsénico bajo condiciones oxidantes y reductoras. 2) Formación de ácidos de As (III) y As (V) bajo diferentes valores de pH y 3) Disociación de los ácidos en los diferentes oxoaniones bajo diferentes valores de pH

El potencial redox y el pH controlan la especiación del arsénico. Los oxoaniones del arsenito son estables a condiciones de: Eh +300mV con pH 4 y a -200mV con pH 9 mientras que los arsenatos son estables en condiciones oxidantes. Bajo condiciones oxidantes y pH bajo (menor de 6.9) el arsénico se presenta como $H_2AsO_4^-$, mientras que a un pH alto debido a la ionización de un protón más la especie $HAsO_4^-$ es

la que predomina. En condiciones reductoras y un pH menor de 9.2 la especie neutral del arsenito H_3AsO_3 es predominante.

El comportamiento de adsorción y desorción del arsénico en los minerales juega un papel importante en la regulación de las concentraciones de la soluciones en el agua. En presencia de azufre reducido, el arsénico existe en solución como sulfito mientras que en condiciones reductoras estos sulfitos (As_2S_3 , AsS) precipitan.

Las reacciones redox tienen gran importancia en el comportamiento de la mayoría de las especies químicas y esto no excluye al arsénico. El equilibrio termodinámico sugiere que bajo fuertes condiciones oxidantes el As (V) debería ser dominante a comparación del As (III), sin embargo esto no ocurre necesariamente en los sistemas naturales y todo dependerá de las parejas redox las cuales se ven influenciadas por la oxidación / reducción del arsénico.

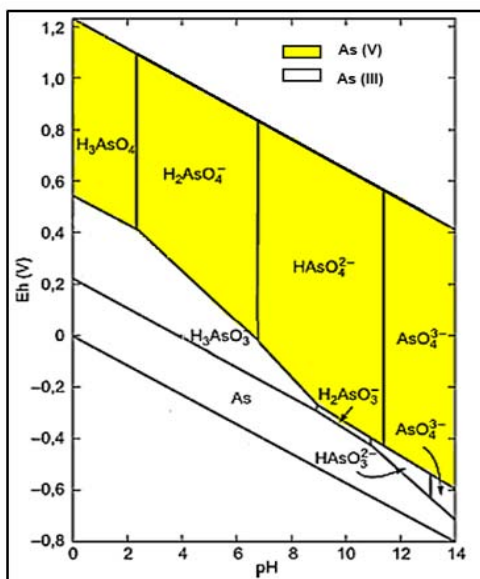


Figura 15. Diagrama de Eh vs pH para las especies de Arsénico. De color amarillo se resaltan las especies de As (V) y de color blanco las especies de As (III). Fuente: Carretero León María Isabel y Rodríguez Pozo Manuel, Mineralogía aplicada: salud y medio ambiente, Editorial Paraninfo 2007, Pág. 275.

Por ultimo estudios experimentales sugieren que el As (III) se oxida lentamente bajo condiciones acidas (pH 5) mientras que a pH 8 -12.5 la reacción se acelera. La velocidad de oxidación del As (III) aumenta con la presencia de óxido de manganeso. (Flora, 2015). En la Figura 15 se muestra el diagrama de Pourbaix donde se aprecia el dominio de las especies del arsénico.

Reacciones acido-base del Arsénico

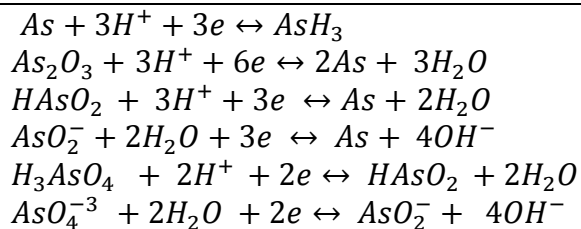
Los equilibrios acido-base que presentan las especies de As (III) y As (V) se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 25 Equilibrios acido-base del Arsénico

Arsenito (As (III))	Arsenato (As (V))
$H_3AsO_3 \leftrightarrow H_2AsO_3^- + H^+$	$H_3AsO_4 \leftrightarrow H_2AsO_4^- + H^+$
$H_2AsO_3^- \leftrightarrow HAsO_3^{2-} + H^+$	$H_2AsO_4^- \leftrightarrow HAsO_4^{2-} + H^+$
$HAsO_3^{2-} \leftrightarrow AsO_3^{3-} + H^+$	$HAsO_4^{2-} \leftrightarrow AsO_4^{3-} + H^+$

Fuente: Flora Swaran Jeet Sing. (2015). *Handbook of arsenic toxicology*. Academic Press. Pág 6.

Las reacciones más comunes del arsénico en el ambiente se muestran en la siguiente tabla

Tabla 26. Reacciones del Arsénico

Fuente: Haynes M. W. (). CRC Handbook of Chemistry and Physics, 92 Edición. Pág. 5-80.

Compuestos de Arsénico

Los *minerales* de arsénico se pueden clasificar en 5 categorías: arsénico elemental, arseniuros, arsenosulfuros, arsenitos y arsenatos. Los arsenitos y arsenosulfuros son los más comunes de encontrar en las rocas ígneas. Cuando estos minerales se ponen en contacto con agua y oxígeno rápidamente se convierten en arsenitos o arsenatos.

Los *arsenosulfuros* más comunes son: arsenopirita (FeAsS), oropimente (As₂S₃) y el rejalgal (AsS/As₄S₄). Estos minerales también se pueden combinar con metales de transición por ejemplo el Co, Ni y Cu formando una gran variedad de sulfuros y sulfosales.

En los *arseniuros* el arsénico se encuentra en un estado de oxidación negativo, entre los más comunes están: Cu₃As, FeAs₂, NiAs, NiAs₂, CoAs₂ y PtAs₂.

En el caso de los *arsenitos* son los compuestos predominantes en condiciones reductoras, sus óxidos son moderadamente solubles en el agua y en el caso de las sales su solubilidad dependerá del tipo de catión que este en el compuesto.

Los *arsenatos* pueden disolverse en el agua y dependiendo de los pH estos se pueden disolver en varias especies, entre ellas: H₃AsO₄, H₂AsO₄⁻, HAsO₄⁻² y AsO₄⁻³. (Flora, 2015)

Los compuestos de arsénico pueden ser metilados por microorganismos, produciendo bajo condiciones oxidativas, ácido monometilarsónico (MMA) y el ácido dimetilarsónico (DMA) y óxido de trimetilaesina (TMAso). Bajo condiciones anaerobias estos pueden ser reducidos a metilarsinas volátiles que son fáciles de oxidar. (Carbonelli, 1995)

7.2 Plomo

Características Generales	
Símbolo	Número Atómico: 82
Pb	Masa Atómica: 207.19
	Densidad: 11.4 g/cm ³
	Punto de Fusión : 337.4°C (28 atm)
	Punto de ebullición : 1770°C
	Configuración electrónica: [Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ²
	Isotopos : Pb ²⁰⁴ , Pb ²⁰⁶ , Pb ²⁰⁷ y Pb ²⁰⁸ (más estables)

El plomo es un metaloide que se encuentra en el grupo IV de la tabla periódica, de acuerdo a su estructura electrónica el Pb es uno de los elementos que pertenece al bloque-p” (metales con su orbital p parcialmente llenos); no presenta olor, es de color grisáceo, con un aspecto brillante cuando se corta y al ser expuesto al aire se oxida rápidamente lo cual se denota a través de un color mate. Es un elemento que representa aproximadamente el 0.002% de la corteza terrestre, es poco móvil y se concentra principalmente en los horizontes superficiales. (Kabata, 2011)

Química del Plomo

El plomo se presenta en dos estados de oxidación: Pb⁺² y Pb⁺⁴. Los compuestos de Pb⁺² son principalmente iónicos mientras que los compuestos de Pb⁺⁴ son covalentes. Entre las especies catiónicas que hay en el suelo están el [PbCl]⁺ y [PbOH]⁺ y como especies iónicas: [PbCl₃]⁻ y [Pb (CO₃)₂]²⁻. En el caso del Pb⁺⁴ solo puede existir bajo condiciones extremas de pH y potencial redox, sin embargo sus compuestos son producidos artificialmente y son descargados al medio. El Pb⁺² es el más estable en el ambiente, sus características se asemejan a los grupos de metales alcalinos divalentes en donde estos poseen la capacidad de remplazar al K, Ba, Sr e incluso al Ca en minerales y sitios de sorción.

Al ser un elemento con una baja movilidad algunos parámetros del suelo como el incremento de la acidez y la formación de los complejos orgánicos del Pb pueden incrementar su solubilidad.

El plomo generalmente se concentra en los horizontes superficiales del suelo debido a la sorción a la materia orgánica y al ser desorbido en la solución del suelo puede moverse fácilmente de los horizontes superficiales a los horizontes bajos

provocando contaminación en aguas subterráneas. El valor de pH desempeña un importante papel en la disponibilidad del plomo, cuanto menor sea el pH mayor cantidad de plomo se encontrara disponible en la solución del suelo mientras que a pH altos es un elemento que precipita como hidróxido, fosfato o carbonato, pudiendo coordinarse también a la materia orgánica. (Kabata, 2011)

El plomo metálico tiene una excelente resistencia a la corrosión en el aire, agua y suelo. Se llevan a cabo reacciones entre el metal y el ambiente, sin embargo, se forma una capa protectora de sales insolubles de plomo. Por ejemplo en presencia de oxígeno, el agua lo ataca, pero si contiene carbonatos y silicatos, se forma una capa protectora de sus derivados y la corrosión se hace muy lenta. Reacciona con ácido nítrico, formando el nitrato soluble en agua. Lo mismo sucede con el ácido acético y otros ácidos orgánicos débiles, formando las sales correspondientes. En el caso del ácido sulfúrico concentrado, se forma sulfato de plomo, el cual es insoluble y forma de igual manera una capa protectora sobre el metal

Con HCl la reacción es muy lenta y el cloruro correspondiente es poco soluble en agua. En la figura 16 se presenta el diagrama de Pourbaix donde se aprecia el dominio de cada una de las especies del plomo.

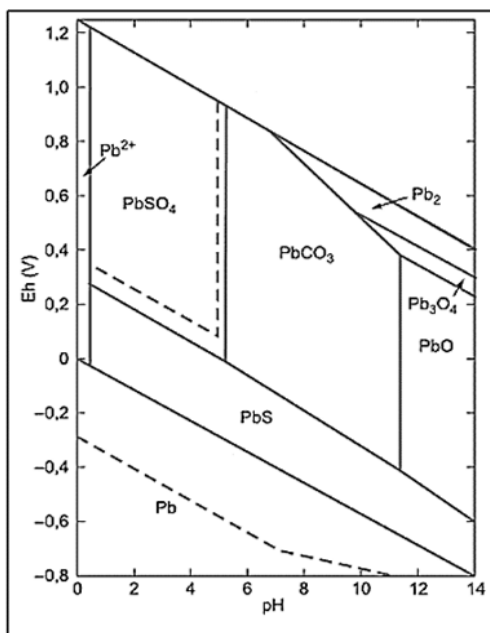
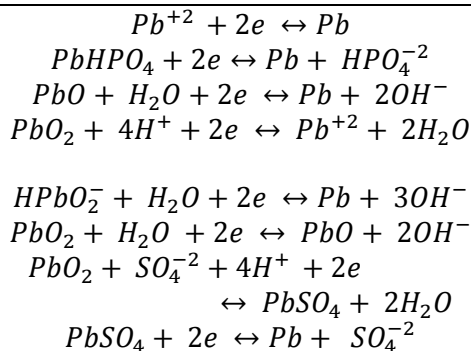


Figura 16. Diagrama de Eh vs pH para las especies de Plomo (Modificado de Brookins, 1988) Fuente: Carretero León María Isabel y Rodríguez Pozo Manuel, Mineralogía aplicada: salud y medio ambiente, Editorial Paraninfo 2007, Pág. 275.

Reacciones de óxido-reducción del Plomo

Las reacciones más comunes del plomo en el ambiente se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 27. Reacciones redox más del Plomo



Fuente: Haynes M. W. (). CRC Handbook of Chemistry and Physics, 92 Edición. Pág. 5-80.

Compuestos de Plomo

Los minerales de plomo son compuestos con estados de oxidación +2, los más comunes son el PbS (galena), PbCO₃ (cerrusita), PbSO₄ (anglesita) entre otros. En el caso de los compuestos con un estado de oxidación +4, únicamente son estables en forma de óxidos, como compuestos organometálicos del plomo. La estabilidad que presenta el Pb⁺² es debido a que los electrones que se usan en la formación de los compuestos de plomo divalentes son los electrones de la capa p mientras que los electrones s permanecen inertes, este efecto suele denominarse “efecto del par inerte”*(Rochow, 1981)

Aunque el plomo es un elemento de ocurrencia natural en el ambiente, la mayor parte de su dispersión se debe a razones antropogénicas, uno de sus mayores usos es en las baterías plomo-ácido, en la formulación de aditivos para combustibles, la producción de municiones, productos metálicos, pinturas, refinación de metales etc.

Entre los compuestos orgánicos del plomo más significativos están el Trimetilo de plomo (TML) y el Tetraetilo de plomo (TEL) los cuales se utilizaban como aditivos en gasolinas. En el caso de los compuestos inorgánicos los más comunes están el monóxido (PbO), el monóxido (PbO₂), el tetroxido (Pb₃O₄), el sesquióxido (Pb₂O₃), el carbonato, el sulfato, los cromatos, el arseniato, el cloruro, el silicato y la azida de plomo. (INE, 2004)

7.3. Análisis Final

A continuación se presentan las tablas 24, 25 y 26 donde se muestra un resumen del análisis de resultados de suelos, fondos y zanjas. Cada tabla contiene los sitios de muestreo que están contaminados por arsénico y plomo con sus respectivos valores de pH y potencial redox, además de una cuarta columna que de acuerdo a los valores de la caracterización y los diagramas de pH vs potencial de estos dos elementos se realizó una hipótesis del estado de oxidación o la especie en la que se pueden encontrar los EPT's que sobrepasaron el límite de concentración de referencia. En el caso del potencial redox, las lecturas que se tomaron se realizaron con referencia al electrodo de Ag/AgCl y el diagrama de pH vs potencial redox esta con respecto al electrodo de hidrogeno por lo tanto a los resultados obtenidos únicamente se les sumo 222mV para la comparación adecuada con dicho diagrama , Para las muestras de suelos (*Tabla 24*) se identificaron 10 y 3 sitios contaminados de arsénico y plomo respectivamente con una concentración promedio de 514. 25 mg/kg para As y 1049.79 mg/kg para Pb. Las muestras se encuentran en un intervalo de pH entre 3 – 5.5 mientras que el potencial redox está en un intervalo de 300mV a 416mV. De acuerdo a la geoquímica y el diagrama pH vs potencial la especie de arsénico que posiblemente se encuentre en los sitios contaminados es un arsenato (As (V)) y en el caso del plomo es posiblemente que este con un estado de oxidación Pb⁺².

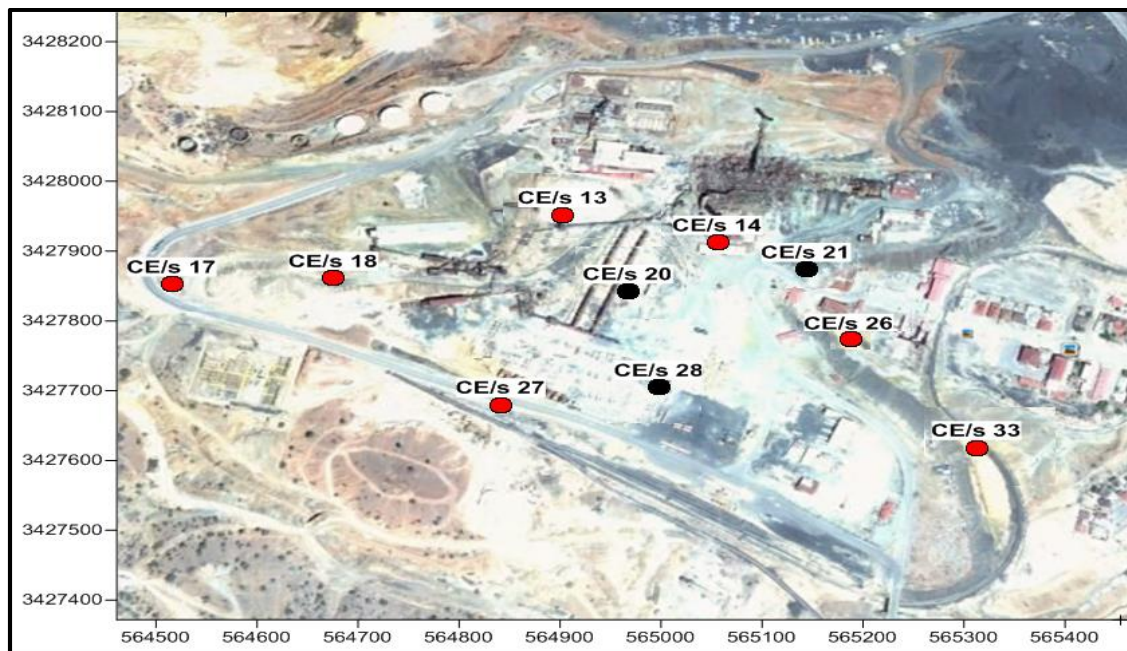
***Efecto del par inerte:** Este efecto se observa especialmente en los grupos 13 y 14 de la tabla periódica, el cual consiste en que los elementos más pesados del grupo tienden a formar compuestos con una valencia dos unidades menor que la valencia esperada para el grupo. Estos elementos proporcionan un electrón desde un nivel s lleno hasta un nivel p

Tabla 28. Sitios de muestreo contaminados para Suelos

Suelos					
Clave del sitio	Concentración de As (mg/kg)	Concentración de Pb (mg/kg)	pH	Potencial Redox (mV)	Especie
CE/s 13	354.616	-	3.43	415.83	As(V)
CE/s 14	679.447	-	4.24	370.3	As(V)
CE/s 17	335.694	-	4.84	336.17	As(V)
CE/s 18	300.117	-	4.93	331.23	As(V)
CE/s 20	872.851	1009.682	4.25	370.85	As(V),Pb (II)
CE/s 21	557.535	1285.089	4.99	327.7	As(V),Pb (II)
CE/s 26	959.573	-	4.81	337.7	As(V)
CE/s 27	429.591	-	4.43	357.33	As(V)
CE/s 28	369.591	854.605	4.95	329.67	As(V),Pb (II)
CE/s 33	283.473	-	5.32	310.5	As(V)
Promedio	514.25	1049.79			

En el mapa 9 se presenta la localización de los sitios de muestreo para suelos que se encuentran contaminados por arsénico y plomo. De color rojo se marcan los sitios contaminados únicamente con arsénico y de color negro se presentan los sitios contaminados que presentan tanto arsénico como plomo.

Se puede observar que la mayoría de los puntos de muestreo contaminados se encuentran localizados del lado Este y Sur del sitio de estudio y únicamente los puntos CEs/17 y CEs/18 que presentan solo contaminación por arsénico se encuentran del lado Oeste.



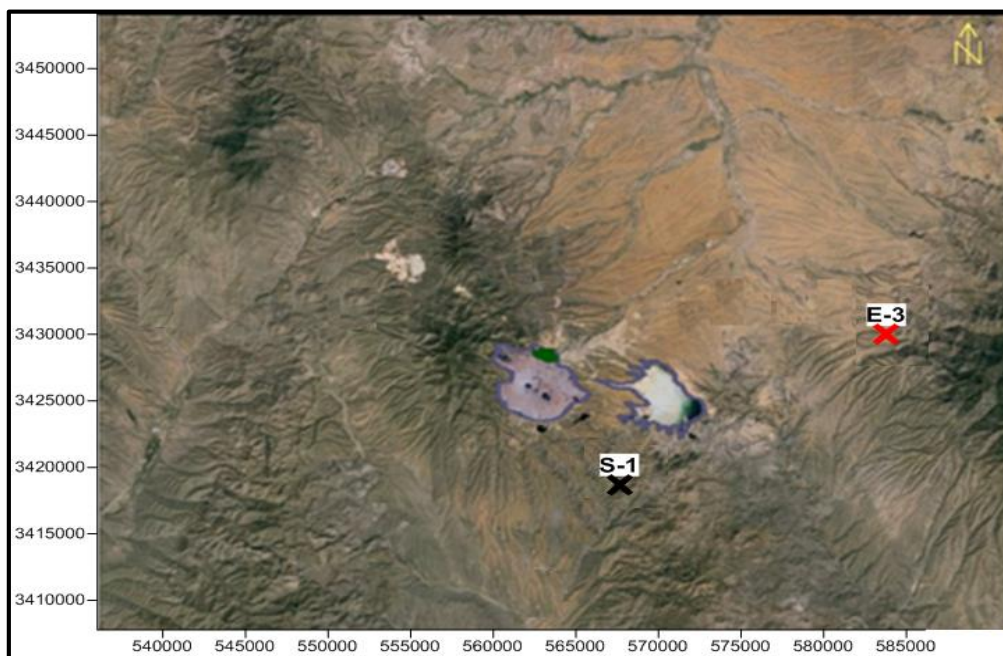
Mapa 9. Localización de los sitios de muestreo de suelo contaminados por arsénico y plomo. De color rojo indican los sitios contaminados únicamente por arsénico y de color negro se indica los sitios de muestreo que contienen arsénico y plomo.

Tabla 29. Sitios de muestreo con concentraciones mayores a las establecidas en la NOM-147 en muestras de fondo.

Fondos					
Clave del sitio	Concentración de As (mg/kg)	Concentración de Pb (mg/kg)	pH	Potencial Redox (mV)	Especie
E-3	389.743	-	6.94	220.33	As(V)
S-1	454.080	1478.124	3.56	408.37	As(V),Pb (II)
Promedio	421.911	1478.124			

Para los fondos (*Tabla 25*) únicamente se cuenta con dos sitios con valores mayores a las concentraciones de referencia de la NOM-147 con una concentración promedio de 421. 911 mg/kg para As y 1478.124 mg/kg para Pb. En el sitio de muestreo E-3 tenemos un pH alcalino con un potencial de 220.33mV; al localizar los valores en el diagrama de pH vs Eh este indica que la especie en la que se puede tener es un As (V). En el caso del punto S-1 donde se tiene tanto la presencia de As como de Pb, se tiene un pH ácido con un potencial de 409mV, se presume la presencia de As (V) y al observar en el diagrama del plomo, este posiblemente se encuentra en un estado de oxidación +2 y el compuesto que se puede tener es el PbSO₄.

En el mapa 10, se visualiza que el punto de muestreo solo por As se encuentra del lado Este del predio, en cambio, para el punto de muestreo presenta contaminación de As y Pb está localizado el Sur del sitio.

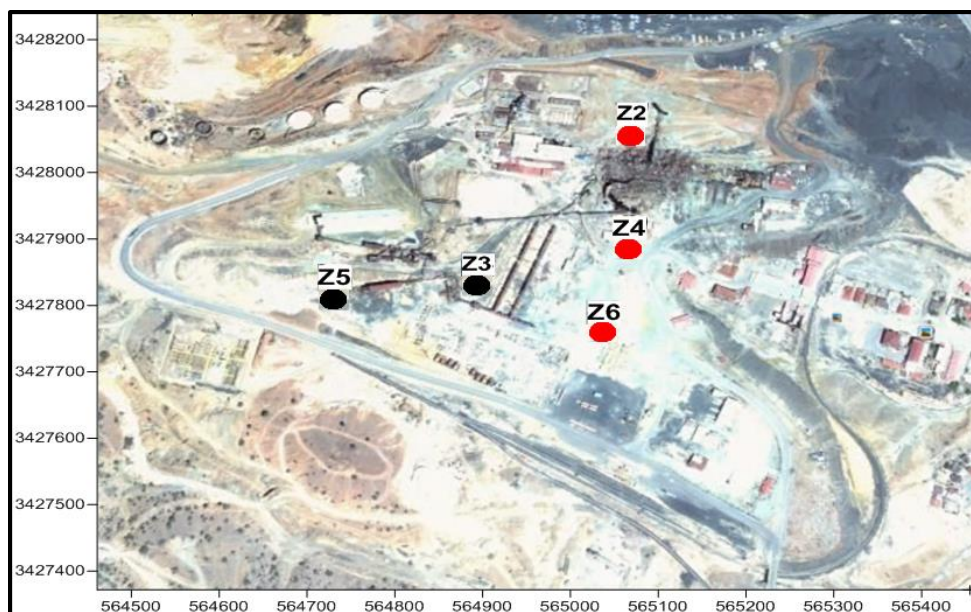


Mapa 10. Localización de los sitios de muestreo de fondos contaminados por arsénico y plomo. De color rojo indican los sitios contaminados únicamente por arsénico y de color negro se indica los sitios de muestreo que contienen arsénico y plomo.

Tabla 30. Sitios de muestreo contaminados para las zanjas

Zanjas					
Clave del sitio	Concentración de As (mg/kg)	Concentración de Pb (mg/kg)	pH	Potencial Redox (mV)	Especie
Zanja 2 (0 -5 cm)	459.50	459.50	4.43	512.33	As(V),Pb (II)
Zanja 3 (0 -5 cm)	858.06	-	3.42	317.53	As(V)
Zanja 3 (5 -50 cm)	884.12	965.35	3.72	609.33	As(V),Pb (II)
Zanja 3 (100- 150 cm)	423.42	-	3.67	607.33	As(V)
Zanja 3 (150 - 200 cm)	465.28	-	4.37	584.7	As(V)
Zanja 3 (250 fondo)	362.17	1338.11	4.5	556.6	As(V),Pb (II)
Zanja 4 (0 -5 cm)	406.26	-	3.59	562.47	As(V)
Zanja 5 (0 -5 cm)	410.40	-	4.41	557.83	As(V)
Zanja 5 (5 -50 cm)	426.21	1287.38	3.86	565.87	As(V),Pb (II)
Zanja 5 (50 - 100 cm)	438.08	816.30	3.13	569.17	As(V),Pb (II)
Zanja 6 (5 -50 cm)	7333.08	-	5.7	480.37	As(V)
Zanja 6 (50 - 100 cm)	7877.65	-	5.06	498.37	As(V)
Zanja 6 (100-120 cm)	3594.91	-	4.71	519.57	As(V)

En las muestras de suelos de las zanjas (*Tabla 26*) se tiene contaminación de arsénico y de plomo a una profundidad que alcanza la contaminación antropogénica que es hasta 250cm en algunos sitios. El intervalo de pH de las muestras esta entre 3.5 – 4.5 mientras que el potencial redox se encuentra entre 500mV -600mV. Al hacer el análisis las especies probables en los sitios de muestreo es As (V) y Pb (II) al igual que para suelos y fondos.



Mapa 11. Localización de los sitios de muestreo de zanjas contaminadas por arsénico y plomo. De color rojo indican los sitios contaminados únicamente por arsénico y de color negro se indica los sitios de muestreo que contienen arsénico y plomo.

En el mapa 11 se observa únicamente en las zanjas 2, 4 y 6 presentan contaminación solamente de arsénico, mientras que para las zanjas 5 y 3 tienen contaminación tanto de arsénico como plomo. Únicamente la zanja 1 no presenta contaminación de As y Pb. Por lo tanto, las posibles especies que están presentes en el sitio de estudio son arsenatos (As (V)) y compuestos de plomo con estado de oxidación +2 (posiblemente PbSO_4). Sin embargo en el caso del arsénico el problema que se presenta es que los arsenatos se pueden reducir a As (III) y acumularse en los tejidos provocando cáncer de piel, hígado etc. En el caso del plomo +2, al tener características parecidas al Ca^{+2} este se llega a acumular en los huesos provocando principalmente deficiencia de calcio. Por lo que se proponen algunas medidas de remediación del suelo para la recuperación del mismo y así reintegrarlo a las actividades que se mencionaron en la introducción.

8. PROPUESTA DE REMEDIACIÓN

Ante la necesidad y dependencia del ser humano por la recuperación del suelo, se han desarrollado técnicas de remediación que tienen como objetivo el disminuir la cantidad de los elementos potencialmente tóxicos por medio de procesos biológicos, fisicoquímicos o térmicos hasta alcanzar los valores de concentración de referencia de acuerdo a lo que indica la NOM- 147.

En este caso, de acuerdo a los resultados obtenidos se logró identificar que el arsénico y plomo son los únicos elementos potencialmente tóxicos con concentraciones por arriba de la concentración de referencia por lo tanto se prosigue con la selección de alguno de los métodos de recuperación del suelo y la forma en que se llevará a cabo dependerá principalmente del costo y del tiempo en que se requería recuperar el suelo impactado.

Al tratarse de arsénico y plomo los contaminantes que se encuentran en la zona de estudio, del conjunto de técnicas de remediación que existen y que se presentan en la **Tabla 8 del Anexo E** se analizaron únicamente las tecnologías de remediación que se han implementado para el tratamiento de los suelos contaminados por metales y metaloides.

Las técnicas se dividen en tres diferentes tratamientos: Aislamiento o Confinamiento, Extracción o Transferencia y Depuración química o biológica, algunas de aplicación habitual y otras todavía en fase experimental, no obstante cada sitio es un reto único, por lo tanto para la selección de las posibles técnicas que pueden satisfacer las necesidades de recuperación que requiere la zona de estudio se consideraron los siguientes factores:

- 1. La técnica de remediación sea aplicable para sitios impactados por metales, para disminuir los niveles de concentración de arsénico y plomo**
- 2. No afecte las propiedades físicas y químicas del suelo, además de que no genere más contaminantes**
- 3. Los costos no sean muy elevados y vayan acorde a la superficie contaminada y tipo de contaminante que se tiene.**

4. El tiempo de remediación no sea muy prolongado.

En las tablas 25, 26 y 27 se presenta un análisis detallado para la selección de las posibles técnicas que se pueden implementar al sitio impactado que se está estudiando mostrando costos, tiempo así como sus ventajas y desventajas

Tabla. 31 Tecnologías de Aislamiento o Confinamiento

AISLAMIENTO O CONFINAMIENTO					
Técnica	Fundamento	Costo	Tiempo	Ventajas	Desventajas
Confinamiento	Consiste en pantallas impermeables que se instalan en el suelo para contener los contaminantes y evitar daños mayores.	400 USD/m ³	9 meses	Permite el aislamiento de la contaminación en corto plazo y con un periodo de efectividad muy largo Elimina los riesgos de exposición directa durante los trabajos de descontaminación.	Requiere de un proceso de control y monitorización a largo plazo.
Vitrificación	Aplicación de una corriente eléctrica al suelo a altas temperaturas (1600 – 2000 °C), formando vidrio estable inmovilizando compuestos inorgánicos	-	-	Se aplica para inmovilizar la mayoría de los contaminantes inorgánicos.	Da lugar a gases tóxicos que deben ser recogidos y tratados antes de ser emitidos a la atmosfera. Es aplicable para tratar contaminaciones poco profundas. El un coste y un consumo energético muy elevado y al modificar el suelo se limita en gran medida su reutilización.
Solidificación/Estabilización	La S/E es un proceso en el que el suelo contaminado se mezcla con aditivos para inmovilizar los contaminantes, disminuyendo o eliminando la lixiviación.	In situ 30-70 USD/m ³ Ex situ 70-200 USD/m ³	10 meses - 2 años	Evita la manipulación, transporte y gestión de los residuos, siendo una tecnología adecuada para la una contaminación altamente toxica y de elevado riesgo.	La distribución de los contaminantes define la viabilidad técnica de operación. A una gran profundidad o bajo nivel freático es difícil la movilización de los contaminantes. Los metales volátiles (Pb, Cd, As, Hg) pueden volatilizarse durante el tratamiento y no es recordable para sitios con más de 25% de metales.

*Los datos de costos y tiempo se tomaron de las Gráficas 1 y 2 del Anexo E

De manera particular, no se muestran los costos para la vitrificación ya que el precio varía en función del costo de energía eléctrica, humedad del sitio y de la profundidad a la que el contaminante.

Tabla. 32 Tecnologías de Extracción o Remoción

EXTRACCIÓN O REMOCIÓN					
Técnica	Fundamento	Costo	Tiempo	Ventajas	Desventajas
Lavado	El suelo previamente tamizado es lavado por extractantes químicos que permitan desorber y solubilizar los contaminantes.	Ex situ 50-340 USD/m ³ In situ 30-150 USD/m ³	10 meses - 3 años	Se puede realizar de manera Ex o In situ. Permite una recuperación rápida y económica,	No elimina contaminantes sino que los transfiere a un nuevo medio acuosa que debe ser tratado, Las partículas arcillosas u orgánicas del suelo reduce el proceso de separación. Los reactivos utilizados pueden generar reacciones no deseados en el subsuelo.
Extracción por solventes o ácidos	Consiste en la mezcla del suelo con un disolvente orgánico o ácido el cual disuelve los contaminantes para removerlos por evaporización o destilación.	100 - 470 USD/m ³	10 meses - 3 años	Permite tratar contaminantes altamente tóxicos, por tipología* o concentración	-El contenido de arcilla, la humedad y la tipología del suelo pueden limitar la eficiencia del proceso. -El solvente usado puede alterar las propiedades fisicoquímicas del suelo limitando su reutilización.
Inundación	Se pasan grandes cantidades de agua con algún aditivo al suelo contaminado favoreciendo así el paso de los contaminantes hacia el agua.	20-200 USD/m ³	10 meses - 3 años	Es una tecnología de corto a mediano plazo.	Es difícil aplicar en suelos de baja permeabilidad. Este proceso debe incluir la extracción y tratamiento de agua contaminada
Electrocinética	Instalación de electrodos por debajo de la superficie del suelo aplicando una corriente directa de baja intensidad provocando movilidad de compuestos orgánicos e inorgánicos (metales)	80-364 USD/m ³	10 meses - 2 años	En suelos de baja permeabilidad contaminados con metales pesados el rendimiento suele ser del 85-95%. El volumen de residuos generados se sitúa entre 0.001-0.005m ³ por metro cubico	Su eficiencia disminuye en medios con un contenido de humedad menor a 10%. Valores extremos de pH ácido y reacciones oxido-reducción pueden disminuir su eficiencia y formar productos inestable. Los electrodos metálicos pueden disolverse parcialmente e introducir en el suelo productos corrosivos.

*Los datos de costos y tiempo se tomaron de las Gráficas 1 y 2 del Anexo E

Tabla. 33 Tecnologías de Depuración Química o Biológica

DEPURACIÓN QUÍMICA O BIOLÓGICA					
Técnica	Fundamento	Costo	Tiempo	Ventajas	Desventajas
Bioaumentación	Consiste en la adición de microorganismos vivos para promover su biodegradación o su biotransformación	40 USD/m ³	1 – 3 años	No implica grandes costos para su implementación además de que no genera más residuos.	Debe realizarse cultivos de enriquecimiento, aislar microorganismos capaces de utilizar el contaminante como fuente de carbono y cultivarlos hasta obtener grandes cantidades de biomasa
Fitorremediación	Proceso que utiliza plantas para remover, transferir, estabilizar, concentrar y/o destruir contaminantes en suelos.	30 - 70 USD/m ³	6 meses - 2 años	Incluye una recuperación con ausencia de tecnología e impacto físico sobre el medio, reduciendo el costo de aplicación y permite el establecimiento de un espacio verde	Solo es efectivo si las raíces de las plantas llegan hasta donde están los contaminantes. Concentraciones elevadas de contaminantes pueden resultar tóxicas e inhibir la actividad biodegradable de las plantas. El proceso es largo y no todas las plantas son factibles para este proceso.
Tratamiento Químico (Redox)	Involucra reacciones redox que reducen químicamente la toxicidad de los contaminantes.	190-600 USD/m ³	10 meses - 2 años	Se puede aplicar in situ o ex situ en suelos, lodos, sedimentos y otros sólidos.	Puede ocurrir una oxidación incompleta o formar compuestos intermediarios desentendiéndose del contaminante. La presencia de aceites y grasas disminuye la eficiencia e incrementa los costos.

*Los datos de costos y tiempo se tomaron de las Gráficas 1 y 2 del Anexo E

En las técnicas de confinamiento (*Tabla 25*), se observa que al aplicar algunos de los métodos: remoción y confinamiento: solidificación/estabilización o vitrificación no se lograría disminuir los niveles de concentración del arsénico y plomo en el sitio de estudio, simplemente se estaría trasladando el problema a otro sitio o se rompe la ruta de dispersión. A pesar de que el tiempo mínimo de remediación es corto, entre 6 a 9 meses, los costos de estas técnicas son altos como se puede apreciar en la tabla y otra desventaja que se presenta es que si el depósito no se encuentra perfectamente aislado una posible lixiviación, biodegradación o fuga provocaría un peligro más para el medio por lo tanto las técnicas de confinamiento se no se recomiendan para este sitio.

En el caso de la segunda categoría, extracción o transferencia (*Tabla 26*), el principio básico de estas técnicas es extraer el contaminante del suelo y transferirlo a un medio fluido, con el fin de hacer factible su tratamiento en el exterior. Si bien los contaminantes, una vez extraídos son tratados de manera *ex situ*, la extracción se realiza utilizando una fase líquida que puede ser agua o una disolución acuosa o un gas

La técnica de lavado de suelos se podría aplicar para la remoción de los elementos potencialmente tóxicos que se tienen presentes en el sitio de estudio. Básicamente la desorción o solubilización de los metales dependerá del agente que se llegue a utilizar. En el caso del arsénico, algunos como Ko et al., 2005 y Moutsastsou., 2006 revelan tener buenos resultados empleando al ácido sulfúrico y ácido fosfórico para la remoción del As del suelo con un 80% de remoción usando H_2SO_4 durante un tiempo de lavado de una hora. Una ventaja que se le puede atribuir a esta técnica es que se puede realizar ya sea de forma *in situ* o *ex situ* dependiendo únicamente del costo, además de que los tiempos de remediación son cortos.

En la técnica de inundación los contaminantes son extraídos del suelo por medio de una corriente de agua o soluciones acuosas, su desventaja es que necesita un sistema de inyección, infiltración biodegradación y pump and traet (bombeo) además de un tratamiento de agua para no generar más residuos. A pesar de que se utiliza para la mayoría de los contaminantes en especial compuestos inorgánicos se requiere una estrecha vigilancia para impedir que los contaminantes migren a otra dirección distinta a la deseada.

La electrocinética se aplica principalmente *in situ* la cual se basa en tres principios fundamentales: electromigración (transporte de iones metálicos por la atracción del electrodo cargado negativamente); la electroósmosis (movimiento de moléculas de agua desde el ánodo al cátodo durante la electrolisis) y la electroforesis (movimiento de partículas cargadas bajo una corriente eléctrica. (Elsayed-Ali *et al.*, 2011). El mecanismo básico que se plantea en este método es la oxidación y reducción, donde

su aplicación se extiende a una gran variedad de metales como son el cadmio, cobre, plomo, zinc, cobalto, cromo y arsénico. Estos experimentos pueden tomar 1 y 10 días (tiempo mínimo) de tratamiento y dependen básicamente de la polaridad del contaminante y del tipo de suelo. Su única desventaja se encuentra en los costos de aplicación los cuáles son elevados y puede incrementar dependiendo del consumo energético que se necesite para lograr la descontaminación del suelo.

La extracción es aplicada de forma *ex situ* y se puede realizar por medio de disolventes o ácidos, como el sitio de estudio se encuentra impactado por arsénico y plomo, se podría utilizar ácido clorhídrico para extraer los contaminantes. Su desventaja es que para su aplicación el suelo necesita un tratamiento previo (tamizado) lo que involucra el contacto directo con el contaminante. Después del tratamiento, se debe neutralizar cualquier resto de ácido que se pueda haber quedado en el suelo con la adición de cal o fertilizantes, además de que su costo es muy elevado, por tal motivo esta técnica de recuperación queda descartada.

Por ultimo para la tercera categoría (*Tabla 27*), se tiene a las técnicas depuración química o biológica las cuales están destinadas a transformar los contaminantes presentes en compuestos inocuos, ya sea por métodos químicos o biológicos, con participación de microorganismos que catalicen las reacciones químicas. Entre las medidas de recuperación, las de depuración biológica son las más baratas a excepción de las químicas las cuales su costo es el más elevado del conjunto de las técnicas de recuperación.

El tratamiento químico por reacciones por oxido –reducción se basa simplemente en la introducción en el terreno contaminado de los oxidantes a través de pozos a diversas alturas sin necesidad de bombear los productos de la oxidación. Su efectividad aumenta si se establece un sistema cerrado lo cual ayuda a que el oxidante se mezcle mejor con el contaminante. Su única desventaja es su costo muy elevado porque su viabilidad es baja para la remediación en este predio.

(Grafica 1, Anexo E)

La bioaumentación se utiliza cuando se requiere un tratamiento inmediato del sitio, o cuando la microflora autóctona es insuficiente en número o su capacidad degradadora. Una de sus desventajas es que antes de realizar este tipo de tratamiento se deben hacer cultivos de enriquecimiento y cultivar grandes cantidades de biomasa. Aunque su costo es relativamente muy bajo ante la necesidad de un tratamiento previo del suelo y por su tiempo de aplicación el cual puede tardar varios meses o incluso años no se le considera una técnica de recuperación eficaz y factible para el sitio de estudio.

Por último, la fitorremediación es una técnica de remediación la cual consiste o se basa principalmente en la ***utilización de plantas conocidas como plantas hiperacumuladoras para transferir, estabilizar, concentrar y/o destruir o eliminar los contaminantes presentes en el suelo y la cual puede aplicarse in situ como ex situ.***

Esta tecnología ambiental ha experimentado un acelerado crecimiento durante la última década. Aunque los primeros reportes datan desde 1993, fue hasta 1996 que empezó su innovación. Los estudios y aplicaciones de la fitorremediación se pueden clasificar en dos grandes grupos: la biorremediación de sustancias orgánicas (hidrocarburos y explosivos como el TNT*) o y el otro grupo están los metales pesados y radioactivos

Dentro de la fitorremediación existen varias técnicas de remediación que se basan en el mismo principio de utilizar plantas como medio de extracción y retención de contaminantes. Entre estas se encuentran: fitovolatilización, fitoestabilización, fitodegradación, rizofiltración y fitoextracción (*Figura 10*) la aplicación de cada una estas dependerá en que parte de la planta se quiere extraer el contaminantes ya sea: en la raíz, tallo o la planta.

El costo y el tiempo que se llevara a cabo para limpiar el terreno dependerán básicamente de la especie vegetal, el número de plantas, clase, cantidad de

contaminantes presentes, el clima, flora y fauna haciendo que esta técnica pueda ser rápida (6 meses) hasta tardar varios años.

Las plantas que se han llegado a utilizar para la remoción de arsénico y plomo son principalmente las siguientes especies (*Tabla 25*)

Tabla 30. Especies vegetales reportadas por su potencial fitorremediador en diferentes estudios para arsénico y plomo.

Especie Vegetal	Contaminante	Familia	Autor
Conyza dioscorides	Zn, Cu y Pb	Asteráceae	Abou-Shanab, et al, 2007
Armeria maritima	Pb, Zn	Brassicaceae	Olko, et al, 2007
Paspalum notatum	Cd, Pb	Poaceae	Xia, 2004
Arabidopsis Halleri	As, Cd, Pb y Zn	Brassicaceae	-
Pteris vittata L.	As	Pteridaceae	Lena Q.,s.f
Pteris cretica	As	Pteridaceae	Lena Q. s.f
Pteris biaurita	As	Pteridaceae	-
Urtica dioica	Zn, Cu, Cd, Pb	Urticaceae	Notten,s.f
Pennisetum glaucum	Cd, Pb	Poaceae	Xia, 2004

Fuente: ^oBarahona Rosales Rolando. (2009). *Informe final del grupo de flora, fauna y fitorremediación. National University of Colombia,*

Una de las desventajas o problemas que se tienen con estas técnicas es que no todas las especies vegetales se pueden utilizar en cualquier tipo de suelo, algunas requieren de condiciones específicas como es el caso de la *Pteris vittata* que de acuerdo a estudios que se han realizado, esta especie logra extraer fácilmente del suelo al As pero solo lo logra si el suelo se encuentra en condiciones alcalinas, además de que prefiere los climas soleados. Por tal motivo, se deben hacer pruebas para encontrar la especie vegetal adecuada que pueda soportar las condiciones del suelo, la toxicidad del metal pesado y sobre todo que logre extraer al contaminante; además los tiempos de remediación con este método son muy largos llegando a prolongarse hasta años.

Por la escasez de las plantas hiperacumuladoras se han desarrollado métodos en donde se emplean agentes quelantes como en el caso de la fitoextracción, en donde se utilizan plantas que puedan soportar la toxicidad del metal y además de que tengan la capacidad de extraerlo del suelo y posteriormente se aplica el agente

quelante (EDTA* o EGTA*) con el propósito de aumentar la disponibilidad de los metales así como la capacidad de la planta de tomarlos del suelo acumulándolos en las partes cosechables de esta. (Salt et al. 1998)

Es claro que las técnicas que involucran la implementación de especies vegetales son parte de las tecnologías más amigables con el ambiente, no generan residuos, no hay contacto con el contaminante, ya que la mayoría del trabajo lo hace la planta además de que no involucra el uso de equipos o procesos industriales y si pueden reemplazar con facilidad las especies vegetales si llega a ocurrir algún desastre natural y sobre todo no tienen un costo elevado.

En conclusión, después de analizar las técnicas de remediación para la recuperación de suelos contaminados con metales y metaloides, de acuerdo a las características del suelo del área de estudio, se propone en primera instancia la posible implementación del lavado de suelos para la remediación de la zona de estudio, la cual se puede realizar ya sea *in situ* o *ex situ*. Otra técnica de remediación que se podría utilizar es la fitorremediación, donde gracias a las raíces de las plantas se puede extraer los contaminantes que se encuentran en la profundidad del suelo y como se mencionó anteriormente, no causa más contaminación.

*EDTA: Ácido etilen diamina tetracético

*EGTA: Etilen glicol acético

9. PROPUESTA: RECUPERACIÓN DE COBRE (Cu) EN SUELOS POR COLUMNAS DE LIXIVIACION

La lixiviación es uno de los pasos fundamentales dentro del conjunto de los procesos de la hidrometalurgia*. Se define a la lixiviación como **el proceso que consiste en la recuperación de metales desde una materia sólida mediante la acción de agentes lixiviantes (disolventes)**, en donde el metal se trasfiere a una fase acuosa permitiendo la separación del metal contenido en la fase sólida y de sus acompañantes no solubles. Existen diferentes tipos de lixiviación, pero la selección del método va a depender principalmente de: las características físicas y químicas de la materia sólida, solubilidad del metal de interés en la fase acuosa, la cinética de la disolución, facilidad de operación; desde una perspectiva industrial: el costo de operación y capital, capacidad de procesamiento y rentabilidad. (Gaces, s.f)

Debido a la presencia de concentraciones totales elevadas de cobre en el sitio de estudio (Tabla 8, Apéndice D) en este apartado de este trabajo de tesis, se evaluó la viabilidad para recuperar el cobre (II) de los suelos impactados antes de su tratamiento por medio de una **lixiviación por columnas**. Se seleccionaron únicamente las muestras de suelos que contienen altas concentraciones de cobre (Tabla 31) y como agente lixiviante el ácido sulfúrico por ser unos de los agentes más utilizados en la lixiviación del cobre, su costo y disponibilidad ya que se puede obtener como un subproducto de otros proceso por ejemplo en la fundición de cobre lo cual permitiría que su costo sea relativamente bajo. Cabe aclarar que este experimento fue a tamaño escala durante solo 24 horas y solo mostró la viabilidad de la extracción del Cu (Gaces, s.f y Muñoz, 2005).

9.1. Parte Experimental

Muestras.: Para esta prueba se utilizaron muestras de suelos; a dichas muestras se les determino la concentración total de cobre (II) por ICP-OES y se seleccionaron únicamente 10 muestras que contenían una concentración mayor de 10,000 mg/kg cobre. (Tabla 31)

***Hidrometalurgia**: Es la rama de la metalurgia que cubre la extracción y recuperación de metales usando soluciones líquidas, acuosas y orgánicas

Tabla 31. Concentración de las 10 muestras de Suelos seleccionadas

Clave de la muestra	Concentración (mg/kg)
CE/s 02	31931.225
CE/s 08	19459.895
CE/s 10	82899.055
CE/s 12	25347.96
CE/s 16	45791.38
CE/s 18	60418.765
CE/s 25	262668.5
CE/s 26	57732.655
CE/s 27	32961.265
CE/s 32	192077.595

Posteriormente por medio de mezclado y cuarteado de estas 10 muestras se elaboró una mezcla compuesta representativa de los suelos del área de estudio obteniendo una mezcla homogénea para la columna.

Montaje del equipo:

Se instalaron dos columnas de lixiviación a tamaño escala (**A** y **B**) de acrílico de altura 20 cm y diámetro 10 cm. En la parte inferior, dentro de la columna se colocó una malla de plástico con un papel filtro encima con el propósito de retener el suelo

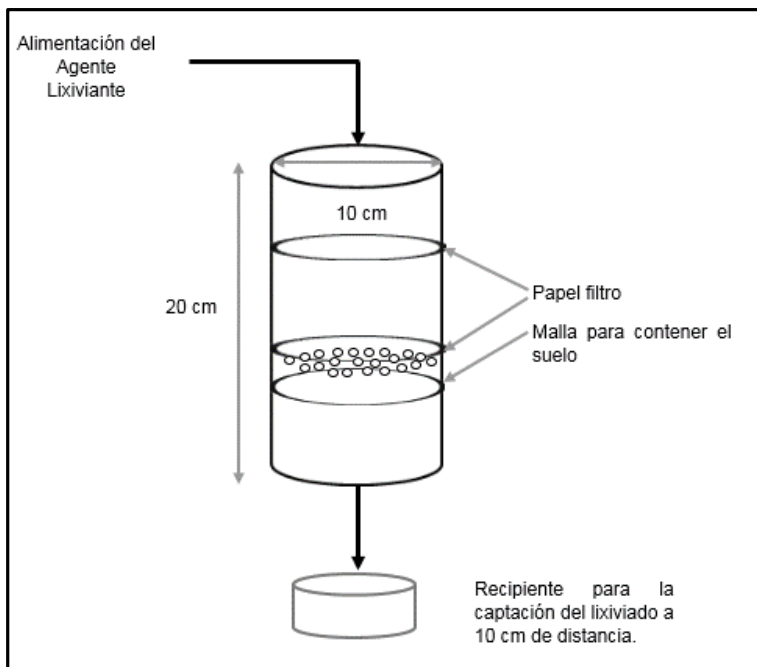


Figura 17. Esquema del montaje del Equipo de las columnas de lixiviación

dentro de la columna, no interrumpir el flujo del lixiviado y así lograr recolectar el lixiviado sin necesidad de filtrarlo. La disolución del agente lixivante, ácido sulfúrico diluido en una relación 1:1 $H_2SO_4:H_2O$ se ubicó a un 1 metro de altura de la columna y se hizo pasar por medio de una manguera de diámetro de 0.5 cm que tenía una llave que permitía

regular el flujo del líquido. En la figura 17 se muestra el esquema de la columna de lixiviación.

Se agregó 900g de la muestra compuesta homogenizada a cada una de las columnas y se le colocó un papel filtro en la parte superior con el propósito de que al gotear el agente lixivante este se expandiera por todo el diámetro de la columna.

A continuación se hizo el cálculo de la velocidad de goteo con la finalidad de que el agente lixivante pasara por toda la columna durante 24 horas. La ecuación que se utilizó fue la siguiente:

$$\text{Flujo} \left(\frac{\text{ml}}{\text{min}} \right) = g \text{ muestras} * \frac{1 \text{ min}}{1 \text{ g}} * \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} \quad \text{Ec. (2)}$$

Columna **A**

$$\text{Flujo} \left(\frac{\text{ml}}{\text{min}} \right) = 905.8 \text{ g} * \frac{1 \text{ min}}{1 \text{ g}} * \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} = 0.629 \text{ ml/min}$$

Columna **B**

$$\text{Flujo} \left(\frac{\text{ml}}{\text{min}} \right) = 903.09 \text{ g} * \frac{1 \text{ min}}{1 \text{ g}} * \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} = 0.627 \text{ ml/min}$$

De acuerdo a los cálculos, se dejó pasar 0.6 ml del agente de lixiviación por minuto en cada columna lo cual equivale aproximadamente a 22-23 gotas por minuto durante 24 horas. Con el lixiviado (Figura 19) obtenido se prepararon 2 diluciones en una relación 1:100 para realizar las pruebas de pH, potencial redox y conductividad eléctrica. De dichas disoluciones se filtraron 20ml para realizar el análisis por ICP-OES y determinar la concentración total de Cu.



Figura 18. Equipo montado de las columnas de lixiviación Columnas de Lixiviación

Figura 19. Lixiviado obtenido

9.2. Resultados y Análisis de Resultados

Los resultados se presentan en la tabla 32 y 33

Tabla 32. Resultados de pH, Potencial Redox y Conductividad Eléctrica

Columna	pH	Potencial Redox (mV)	Conductividad Eléctrica (mS/cm)
A	1.05	317.3	26.7
B	1	320.5	33.5
Media	1.03	318.9	30.1

Tabla 33. Resultados de las Concentración Totales por ICP-EOS.

Columna	As	Ba	Be	Cd	Cr	Cu	Pb	Se	Tl	V	Ni	Ag
mg/L												
LD	0.018	0.02	0.012	0.018	0.017	0.014	0.05	0.021	0.075	0.018	0.014	0.015
A	3.458	<LD	<LD	0.2738	3.647	85.74	0.0874	<LD	<LD	0.1652	114.4	<LD
B	1.553	<LD	<LD	0.107	1.042	69.33	0.0608	<LD	<LD	0.0428	93.5	<LD
Media	2.5055	<LD	<LD	0.1904	2.3445	77.535	0.0741	<LD	<LD	0.104	103.95	<LD

En la tabla 32 se presentan los valores de la caracterización de las soluciones obtenidas de la lixiviación de cada una de las dos columnas. Se observa que en ambas columnas el pH es ácido con un potencial redox y conductividad eléctrica parecidas esperadas para una solución de H_2SO_4 . En el caso de las concentraciones totales que se obtuvieron por ICP-OES, se calculó la media para cada uno de los valores, en donde se observa que el único elemento que presenta una concentración total alta es el cobre con un valor de 77.535 mg/l, esto nos indica que el agente lixivante que se eligió, ácido sulfúrico con agua logro disolver los compuestos de cobre que la muestra de suelo tenía. Se calculó la cantidad recuperada del suelo como se indica a continuación.

DATOS:

20ml de disolución

0.9kg de la muestra que se colocó en cada columna

Columna A se tiene 85.74 mg/l de Cu en el lixiviado

Columna B se tiene 66.33mg/l de Cu en el lixiviado

Columna A:

$$20 \text{ ml de disolucion} \times \frac{85.74 \text{ mg}}{1L} \times \frac{1L}{1000ml} \times \frac{1}{0.9kg} = 1.905 \text{ mg/kg}$$

Columna B:

$$20 \text{ ml de disolucion} \times \frac{66.33 \text{ mg}}{1L} \times \frac{1L}{1000\text{ml}} \times \frac{1}{0.9\text{kg}} = 1.541 \text{ mg/kg}$$

Cálculo el promedio entre las dos columnas:

$$\frac{\left(1.905 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} + 1.541 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}\right)}{2} = 1.723 \frac{\text{mg de Cu}}{\text{kg de suelo}}$$

Porcentaje de recuperación

Promedio de la Concentración total: $(85.74 \text{ mg/kg} + 69.33 \text{ mg/kg}) / 2 = 77.54 \text{ mg/kg}$

$$\% = \frac{1.723 \frac{\text{mg de Cu}}{\text{kg de suelo}}}{77.54 \frac{\text{mg de Cu}}{\text{kg de suelo}}} \times 100 = 2.2 \%$$

De acuerdo a los resultados, se observó que efectivamente se recuperó en promedio 1.723mg Cu/kg de suelo, lo que equivale a un 2.2% de recuperación. En base a los resultados se puede decir que la aplicación de la técnica de lixiviación por columnas para el tipo de suelo que se ha estado estudiando es viable y que se puede recuperar o extraer Cu. Sin embargo si se requiere utilizar esta técnica a nivel industrial es necesario estudiar de manera detallada el tipo de suelo que se tiene, la cantidad de suelo que se va a tratar, la granulometría del suelo, y el tiempo de tratamiento; hacer un estudio en la inversión y los problemas que se pueden presentar en la aplicación de la técnica de columnas

10. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó un diagnóstico ambiental para un sitio utilizado por una empresa minero-metalúrgica el cual se encuentra contaminado por elementos potencialmente tóxicos. Siguiendo los criterios de la NOM- 147 se determinaron los niveles de contaminación mediante una caracterización del suelo para medir concentraciones totales de cada uno de los EPT'S regulados por dicha norma.

De acuerdo a los resultados obtenidos por la caracterización de suelos y fondos, por medio de análisis físicos y químicos además de un análisis estadístico, revelan que el suelo de la zona de estudio tiene un pH menor entre 3 -5.5 clasificándolo como un suelo alcalino degradado los cuales tienen un bajo contenido de sales y niveles de sodio cambiante. En el caso del potencial redox, que se encuentra entre 300mV a 416 mV, en estas condiciones se favorecen las reacciones de oxidación

Para determinar los niveles de concentración total de los EPT'S de suelos y fondos se hizo uso de las técnicas analíticas: Digestión ácida, ICP-OES y Fluorescencia de rayos X. Los resultados indicaron que los elementos que rebasan los límites de concentración de uso industrial que marca la NOM-147 son el arsénico y plomo con una concentración promedio de 514.25 mg/kg y 1049.79mg/kg respectivamente únicamente en 10 puntos de muestreo para suelos y dos en fondos. Con ayuda de Surfer 11 se elaboraron mapas para la localización de los sitios contaminados y se identificó que únicamente en 8 puntos de muestreo se tiene arsénico (CE/s13, CE/s14, CE/s17, CE/s18, CE/s26, CE/s27, CE/s33 y E-3) y en 4 puntos está presentes tanto arsénico como plomo (CE/s20, CE/s21, CE/s28 y S-1).

En el caso de las zanjas, los análisis físicos y químicos revelaron que los elementos potencialmente tóxicos posiblemente alcanzaron una profundidad de 250cm.

Únicamente en las zanjas 5 y 3 se presenta tanto como arsénico y plomo con concentraciones por arriba de las de referencia que marca la NOM-147; en cambio para las zanjas 2, 4 y 6 el arsénico se encuentra con altas concentraciones altas.

CONCLUSIONES

En la zanja 1 todos los ETP's se encuentran entre los límites de concentración de uso agrícola/comercial/residencial y uso industrial.

Con los datos geoquímicos que se consultaron en la literatura y a los resultados experimentales obtenidos, se puede inferir que el arsénico se encuentra como arsenato (As (V)) y el plomo este presente como Pb^{+2} .

El nivel de concentración al cual se debería remediar el suelo contaminado seria al valor de fondos para As y Pb los cuales tienen una concentración promedio es de 185.5 mg/kg y 374.9 mg/kg respectivamente.

Se seleccionaron como posibles técnicas de remediación: lavado de suelos y fitorremediación las dos utilizadas para tratar tantos metales pesados y compuestos inorgánicos.

El lavado de suelos es una técnica donde se utiliza una disolución a base de agua y aditivos químicos para extraer a los contaminantes. Se pueden realizar los lavados necesarios hasta alcanzar la concentración de los valores de fondos; su precio dependerá de la forma en que requiera implementar in situ o ex situ con un costo de 150 USD/m³ y 360USD/m³ respectivamente. Aunque estudios revelan que la implementación de esta técnica en el mismo lugar no se obtiene grandes resultados por las fracciones gruesas y medias que el suelo puede tener, sin embargo el retirar el suelo contaminado y la realización de no solo un lavado de suelo pueden aumentar la eficiencia de esta técnica. Su única desventaja es que si no se tiene un sistema de tratamiento de agua se estarían generando más residuos y por supuesto un daño al ambiente.

La otra técnica de remediación seleccionada: la fitorremediación, es una medida de recuperación que trata únicamente en la utilización de plantas para erradicar o disminuir la concentración de los contaminantes. Su única desventaja es el tiempo que se lleva en su implementación porque se tiene que seleccionar de manera

CONCLUSIONES

adecuada la especie vegetal que logre crecer bajo las condiciones del clima, suelo y principalmente que logre resistir las concentraciones de los contaminantes y posteriormente extraerlos.

Es una técnica que no tiene un gran costo (70 USD/m³) ya que solo se estaría invirtiendo en la compra de las especies vegetales y en su cultivo. La planta al realizar todo el trabajo de recuperación implica que no se tenga un contacto físico con el contaminante además de que no genera más residuos siendo una técnica amigable con el ambiente.

El predio contiene Cr total en concentraciones mayores a las de referencia de la NOM-147, por los datos experimentales se infiere es Cr (III) el cual no está normado sin embargo es necesario determinar la concentración de Cr (VI) por técnicas adecuadas, se propone realizar una digestión alcalina de acuerdo al método 3060a “Alcalina Digestion for Hexavalent Chromium” y finalmente realizar las lecturas correspondientes por medio de Polarografía siguiendo los pasos que marca el método 7198 “Chromium, Hexavalent (Differential Pulse Polarography)” que establece la EPA para determinar en qué estado oxidación de encuentra el cromo y así tomar, de ser necesario, las medidas para una posible remediación de dicho elemento.

Se evaluó la recuperación de Cu (II) de los suelos antes del tratamiento por medio de una lixiviación con H₂SO₄ logrando una recuperación de 1.723 mg Cu /kg de suelo. Se debe evaluar a nivel piloto para estudiar su viabilidad

Únicamente se determinaron las concentraciones totales de los elementos normados por la NOM-147, se propone de acuerdo a los criterios establecidos por dicha norma seguir la línea de investigación y determinar las concentraciones solubles (Geodisponibilidad) de los EPT's para conocer la movilidad en el ambiente y definir su peligrosidad.

11. REFERENCIAS

Normas:

- NMX-AA-132-SCFI-2006, *Muestro de suelos para la Identificación la Cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra*
- NOM 147-SEMARNAT/SSA1-2004, *Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por Arsénico, Bario, Berilio, Cadmio, Cromo Hexavalente, Mercurio, Níquel, Plata, Plomo, Selenio, Talio y/o Vanadio.*

Libros

- Albella J. M, Cintas A. M., Miranda T. y Serratosa J.M, (1993). *Introducción a la ciencia de materiales: técnicas de preparación y caracterización*. España. Editorial CSIC-CIS PRESS.
- Baird Colín. (2001). *Química Ambiental*. Barcelona, Reverte.
- Carbonell Barrachina A.A., Burló Carbonell E.M y Mataix Beneyto J.J. (1995) *Arsénico en el sistema suelo-planta: Significado ambiental*, Universidad de Alicante.
- Casas Flores R. (2011). *El suelo de cultivo y las condiciones climáticas*. España. Ediciones: Paraninfo, S.A. Pág. 42
- Cengage Laerning. (s.f). *Descomposición y disolución de muestras*, Consultado en Abril 2015, Recuperado en: http://latam.cengage.com/skoog/37_cap37_Skoog_OnLine.pdf
- Conde G. (2000). *Técnicas de costes de recuperación de suelos. Regeneración de Suelos*. Tecnoma. S.A. Consultados el 2 de Septiembre del 2015. Recuperado en línea: <http://www.inese.es/html/files/pdf/amb/iq/369/17articulo.pdf>
- Conde G. (2000). *Técnicas de costes de recuperación de suelos. Regeneración de Suelos*. Tecnoma. S.A. Consultados el 2 de Septiembre del 2015. Recuperado en línea: <http://www.inese.es/html/files/pdf/amb/iq/369/17articulo.pdf>
- Cruz Guzmán A.M. (2007). *La contaminación de suelos y aguas. Su prevención con nuevas sustancias naturales*, España. Secretaria de Publicaciones de la Universidad de Sevilla.

REFERENCIAS

- De Jesús Sedas Larios E.E. y Ruiz Saucedo U. (2012). *La remediación de sitios contaminados. Para todo el Público*. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y Deutsche. Pág., 21.
- Doménech X. y Peral Pérez J. (2006), *Química ambiental de sistemas terrestres*. Barcelona. Editorial Reverte. Capítulo 5
- Environmental Protection Agency. (2010). *Toxicological Review of Hexavalent Chromium*. Consultado el 10 de Junio 2015. Recuperado en línea: : <http://www.epa.gov/iris/toxreviews/0144tr.pdf>
- Fassbender Hans W. (1987). *Química de Suelos con énfasis en suelos de América Latina*. San José, Costa Rica. 2^{da} Edición. Editorial Ilica. Pág. 420
- Ferro Orozco M., Contreas E. y Zaritzky N. E. (2009). *Remoción biológica de cromo hexavalente en reactores batch de barros activados: efecto toxico de la concentración del metal en el metabolismo microbiano*. Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos.
- Flora Swaran Jeet Sing. (2015). *Handbook of arsenic toxicology*. Academic Press.
- Gaces I. (s.f). *Metalurgia del Cobre*. Universidad de Antofagasta. Consultado el 5 de Agosto 2015. Recuperado en línea: <http://www.uantof.cl/cobre/pdfs/capitulo%20dos.pdf>
- Galán Huertos E. y Romero Baena A. (2008). *Contaminación de suelos por metales pesados*. Revista de la sociedad española de mineralogía, Universidad de Sevilla, Consultado el 27 de Marzo 2015, http://www.ehu.eus/sem/macla_pdf/macla10/Macla10_48.pdf
- García Fontán M. (2003). Los suelos contaminados y los métodos de recuperación. *Regeneración de Suelos*. Consultado el 2 de Septiembre del 2015. Recuperado en línea: <http://www.inese.es/html/files/pdf/amb/iq/403/13ARTICULOJUN.pdf>
- Gavira Vallejo J.M. y Hernanz G. (2011). *Técnicas fisicoquímicas en medio ambiente*, Madrid, Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- Gonzales Pineda B., Velásquez Manzanares M., Amador Hernández J., Ramírez Fuentes E. y Trujillo Tapia M. N. (s.f) *Efecto de la aplicación del*

REFERENCIAS

- cromo en el crecimiento de producción de maíz*, Instituto de Ecología, México Consultado el 10 de Junio, 2015. Recuperado en: http://www.uaemex.mx/Red_Ambientales/docs/memorias/Extenso/CA/EO/CAO-24.pdf
- Instituto Nacional de Ecología y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2004). *Las sustancias tóxicas persistentes*. México.
 - Jiménez Cisneros B. (2001). *La contaminación ambiental en México causas, efectos y tecnología apropiada*. México. Editorial: Limusa. Colegio de Ingeniería Ambiental de México, Instituto de Ingeniería de la UNAM y FEMISCA. Pág. 48-67
 - Kabata-Pendias A. (2001). *Trace Elements in Soils and Plant*. 4ª Edición.
 - Linares L., Rojas G., Roldán G., Islas E., Martínez G., Hernández R., Reyes R., Flores D. y Ortega J. SEMARNAT. (2006). *Manual de Técnicas de Análisis de Suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados México, D.F.*
 - Moreno Casco J. y Moral Herrero R. (2008). *Compostaje*. Madrid. Mundi-Prensa Libros. Pág. 570
 - Moreno J., Moral R., García J., Pascual A. y Bernal M.P. (2014). *De Residuo a Recurso: El camino hacia la sostenibilidad*. España. Editorial Mundi Prensa, Pág. 290
 - Muñoz S. (2015). *Conceptos de Lixiviación de Minerales*. Consultado el 5 de Agosto 2015. Recuperado en línea: https://www.academia.edu/6896709/Conceptos_de_lixiviaci%C3%B3n_de_minerales
 - Nordberg G. y Sunderman F.W. (s.f). *Metales: Propiedades Químicas y Tóxicas, Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo*. 3ª Edición, Consultado en 10 de Abril 2015. Recuperado de: <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo2/63.pdf>
 - Nova Lex (Ed.). (2008). *Manual para la formación de Medio Ambiente*. España. Pág. 375- 418.

REFERENCIAS

- Ortiz Bernad I., Sanz García J., Dorado Valdiño M., Villar Fernández S., (s.f) *Técnicas de Recuperación de suelos contaminados*. Universidad de Alcala, Dirección General de Universidades e Investigación. Consultado el 1 de Septiembre 2015. Recuperado en línea: <http://www.madrid.org/bvirtual/BVCM001700.pdf>
- Ortiz Bernad I., Sanz García J., Dorado Valdiño M., Villar Fernández S., (s.f) *Técnicas de Recuperación de suelos contaminados*. Universidad de Alcala, Dirección General de Universidades e Investigación. Consultado el 1 de Septiembre 2015. Recuperado en línea: <http://www.madrid.org/bvirtual/BVCM001700.pdf>
- Otero Romaní J. (2009). *Desarrollo de nuevos métodos de extracción en fase sólida para la preconcentración de metales traza en el agua de mar: evaluación de un soporte de C-18 y de polímeros de impronta iónica, Aplicación al estudio de la Ría de Arousa*. (Tesis doctoral). Departamento de Química Analítica, Nutrición e Bromatología. Universidad de Santiago de Compostela.
- Pazos Capeans P. (2007). *Biodisponibilidad de cromo en sedimentos marinos de la Ría de Arousa*, Universidad de Santiago de Compostela.
- Raudes M. y Sagastume, N. (2009). *Manual de conservación del Suelo, Programa para la Agricultura Sostenible en Landeras de América Central. Carrera de ciencia y Producción Agropecuaria*. Consultado el 25 de Marzo del 2015, Recuperado de: http://www.se.gob.hn/media/files/media/Modulo_3_Manual_Conservacion_de_Suelos.pdf
- Rochow E. (1981) *Química Inorgánica descriptiva*. Barcelona, Reverte.
- Sanz Juárez M, Sánchez Andreu J y Sánchez Sánchez A. (2006). *Química del suelo y medio ambiente*, San Vicente del Raspeig. Publicaciones de la Universidad de Alicante. Pág. 9, 16,357-358,440 Capitulo 19
- Sellers, K. *Fundamentals of hazardous waste site remediation*. Lewis Publisher,

REFERENCIAS

- SEMARNAT. (2007). *Suelos*. Consultado el 21 de Marzo del 2015, Recuperado de http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Cap3_suelos.pdf
- Servicio Geológico Mexicano. (2005) *¿Qué es la Geoquímica?* Consultado el 27 Junio 2015, Recuperado en línea: <http://www.sgm.gob.mx/>
- Urbano Terrón P. (1991) *Tratado de fitotecnia general*. España. Mundi-Prensa Libros, Madrid, 1991 .Pág. 895
- Velasco Trejo J. A. y Ramírez I.M. (2009). *Estudio de pruebas piloto para el tratamiento de los residuos peligrosos de cromatos de México mediante la aplicación de sulfuro de sodio*, Dirección general del centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental / Instituto Nacional de Ecología.
- Volke Sepúlveda T. y Velasco Trejo J. A. (2002). *Tecnologías de remediación para Suelos contaminados. México. Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT)*.
- Volke Sepúlveda T., Trejo Velasco J. A., De la Rosa Pérez D. A. (2005) *Suelos contaminados por metales y metaloides: muestro y alternativas para su remediación*, Instituto Nacional de Ecología. Pág. 141
-

Literatura Complementaria:

- Albores A., Quintanilla B, del Razo L. y Cebrián M. (1997). *Introducción a la Toxicología Ambiental*. En Anónimo (eds) OPS, OMS, CPEHSPA. Capítulo 15.
- Guerrero Ruiz A.R., Ortega Cantero E. y Rojas Cervantes M.L. (2011) *Origen y control de los contaminantes*. Universidad Nacional de Educación a Distancia. España.
- Instituto Tecnológico Geomninerio de España. (1991). *Minería Química*. Secretaria general de la energía y Recursos Naturales.
- Litter M.I, Armienta M.A y Farías S.S. (2009). *Metodologías Analíticas para la determinación y especiación del Arsénico en aguas y suelos*. Editado por CYTED, Pág. 242

REFERENCIAS

- Mandal B.K. y Suzuki K.T. (2002). *Arsenic round the world: a review*. Talanta 58, 201-235.
- Martínez S. (2003). *Diccionario de Química*. España. Editorial Complutense.
- Medina Ross J., Vallejo Aguilar S. y Rocha Jiménez M. (2001). *Elementos a considerar para integrar las bases de Política para la prevención de la contaminación del suelo y su remediación*. México, D.F. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Subsecretaria de Gestión para la Protección Ambiental.

Páginas de Internet consultadas:

- www.conabio.gob.mx/
- www.sgm.gob.mx/index
- www.miliarium.com

12. ANEXOS

12.1. Anexo A. Suelos y fondos

Tabla 1. Lecturas de pH, Potencial redox y Conductividad eléctrica de cada muestra de suelo.

SUELOS			
Clave	Lectura de pH	Lectura de Potencial (mv)	Lectura de Conductividad eléctrica (μ S/cm)
CE/s 01	5.00	107.5	478.3
CE/s 02	5.53	76.6	39.9
CE/s 03	5.45	86.0	21.8
CE/s 04	5.20	95.6	1935.0
CE/s 05	5.35	89.1	22.3
CE/s 06	5.49	79.0	39.6
CE/s 07	5.08	102.2	475.0
CE/s 08	6.35	30.2	36.5
CE/s 09	6.83	3.5	21.8
CE/s 10	6.16	41.0	67.9
CE/s 11	6.38	28.5	37.1
CE/s 12	6.51	21.4	40.5
CE/s 13	3.43	195.8	728.0
CE/s 14	4.24	150.3	80.6
CE/s 15	4.73	114.0	325.0
CE/s 16	4.44	138.6	1254.0
CE/s 17	4.84	116.2	317.7
CE/s 18	4.93	111.2	613.7
CE/s 19	5.78	62.7	532.0
CE/s 20	4.25	150.9	2.2
CE/s 21	4.99	107.7	478.0
CE/s 22	3.24	207.6	732.3
CE/s 23	5.31	89.5	1236.3
CE/s 24	3.65	181.4	4.3
CE/s 25	2.88	224.6	1920.0
CE/s 26	4.81	117.7	2060.0
CE/s 27	4.43	137.3	907.0
CE/s 28	4.95	109.7	17.4
CE/s 29	4.79	117.8	1701.7
CE/s 30	3.52	190.5	2783.3
CE/s 31	2.37	257.7	2936.7
CE/s 32	4.09	160.1	1610.0
CE/s 33	5.32	90.5	1924.0
CE/s 34	6.66	14.0	2340.0
CE/s 35	2.89	228.3	6610.0

Tabla 2. Resultados de las concentraciones totales de las muestras de suelos.

Concentración Total de las Muestras de Suelos (Digestión asistida por microondas y espectrometría ICP-OES)												
LD (mg/L)	0.016	0.018	0.003	0.004	0.005	0.003	1.758	0.003	0.009	0.014	0.012	0.004
Clave	Ag	As	Ba	Be	Cd	Cr	Hg	Ni	Pb	Se	Tl	V
CE/s 01	1.591	12.092	129.520	1.097	1.087	615.392	<LD	22.693	22.664	<LD	<LD	62.300
CE/s 02	3.793	5.839	139.948	0.619	0.769	417.449	<LD	8.175	20.553	<LD	<LD	50.499
CE/s 03	4.707	4.437	93.834	0.570	<LD	206.776	<LD	5.757	22.257	<LD	2.858	40.006
CE/s 04	2.828	11.322	62.403	0.456	<LD	161.441	<LD	3.681	27.317	<LD	3.145	28.418
CE/s 05	3.674	4.508	50.397	<LD	<LD	121.847	<LD	2.354	12.860	<LD	3.466	17.478
CE/s 06	11.504	7.420	79.499	5.672	6.441	323.247	<LD	9.127	19.203	<LD	8.548	26.163
CE/s 07	3.210	23.679	149.850	2.044	2.233	454.237	<LD	8.614	53.789	<LD	1.894	39.272
CE/s 08	2.954	19.052	338.024	1.307	1.078	860.379	<LD	13.303	56.377	<LD	<LD	44.172
CE/s 09	2.740	12.216	177.063	0.867	0.837	645.078	<LD	10.891	47.798	<LD	<LD	35.682
CE/s 10	2.544	4.690	87.617	0.938	0.898	436.540	<LD	7.643	30.902	<LD	<LD	51.636
CE/s 11	2.184	<LD	147.117	0.598	0.698	548.175	<LD	7.670	42.609	<LD	<LD	52.164
CE/s 12	4.375	<LD	82.350	<LD	<LD	226.031	<LD	3.677	18.268	<LD	1.744	23.151
CE/s 13	6.295	354.616	113.209	<LD	2.358	303.257	<LD	9.193	367.206	<LD	6.645	47.322
CE/s 14	14.852	679.447	144.960	0.573	14.279	503.162	<LD	52.866	530.830	<LD	8.449	56.601
CE/s 15	7.531	131.043	128.646	6.452	13.184	1537.155	<LD	25.569	301.039	<LD	2.537	37.495
CE/s 16	3.692	78.488	121.990	1.851	4.239	262.488	<LD	11.761	295.622	<LD	4.100	35.602
CE/s 17	4.469	335.694	99.112	0.778	7.063	577.115	<LD	26.187	267.059	<LD	5.996	38.687
CE/s 18	5.876	300.117	107.906	0.631	7.129	581.294	<LD	19.318	517.094	<LD	7.226	43.386
CE/s 19	<LD	210.895	166.342	0.759	8.920	777.724	<LD	171.401	287.062	<LD	3.395	781.907
CE/s 20	33.412	872.851	158.170	0.484	12.310	559.870	<LD	92.501	1009.682	<LD	12.824	39.666
CE/s 21	12.761	557.535	214.414	0.786	8.879	931.913	<LD	35.925	1285.089	<LD	3.464	67.350
CE/s 22	2.777	178.222	89.391	5.674	9.491	193.906	<LD	10.769	437.263	<LD	14.705	28.571
CE/s 23	2.489	41.906	169.255	1.474	3.206	908.303	<LD	15.502	122.760	<LD	<LD	50.617
CE/s 24	3.767	115.707	113.209	5.685	5.106	266.487	<LD	17.416	161.271	<LD	4.586	37.300
CE/s 25	3.028	157.274	123.102	0.440	2.248	150.679	<LD	9.652	385.791	<LD	5.695	18.575
CE/s 26	3.114	959.573	211.220	1.517	9.593	4129.567	<LD	46.197	414.055	<LD	<LD	56.938
CE/s 27	4.691	429.591	93.247	<LD	14.072	587.664	<LD	106.803	625.248	<LD	6.753	35.422
CE/s 28	4.972	369.591	63.220	<LD	15.324	788.110	<LD	65.641	854.605	<LD	6.133	25.635
CE/s 29	<LD	54.899	80.604	0.440	3.599	599.980	<LD	9.378	120.876	<LD	4.429	42.192
CE/s 30	3.943	183.629	107.548	3.754	7.469	273.651	<LD	13.613	315.973	<LD	8.982	29.775
CE/s 31	11.588	116.868	23.443	0.860	6.011	250.247	<LD	33.478	568.519	<LD	13.289	25.658
CE/s 32	2.476	130.266	50.469	<LD	9.193	133.260	<LD	21.352	137.153	<LD	5.540	14.444
CE/s 33	4.077	283.473	169.564	0.649	5.835	1013.189	<LD	20.653	439.948	<LD	<LD	36.041
CE/s 34	4.363	96.456	125.599	0.469	4.113	910.643	<LD	16.114	397.863	<LD	<LD	38.219
CE/s 35	4.092	140.020	74.591	<LD	4.411	279.142	<LD	15.389	246.008	<LD	6.317	14.920

Notas:

*Para cada una de las muestras de suelos y fondos se tomaron tres lecturas de cada Análisis Químico, posteriormente se calculó el promedio con el fin de disminuir errores de medición y obtener un valor más exacto

*Las lecturas del potencial redox se realizaron con referencia al electrodo Ag/AgCl, por lo tanto para utilizar estos datos con referencia al electrodo de hidrogeno se deben sumar 222mV.

*<L/D (Bajo límite de detección): es la concentración mínima de sustancias que se puede detectar con fiabilidad en el equipo ICP-EOS

Tabla 3. Lecturas de pH, Potencial redox y Conductividad eléctrica de las muestras de fondo.

FONDOS			
Clave	Lectura de pH	Lectura de Potencial (mv)	Lectura de Conductividad eléctrica (μS/cm)
N-1	4.04	163.1	5225.0
N-2	5.68	70.0	1423.0
N-3	4.42	141.7	2850.0
E-1	5.10	107.5	3013.3
E-2	6.62	15.6	2330.0
E-3	6.94	-1.7	1031.7
S-1	3.56	186.4	2436.7
S-2	3.57	186.2	4963.3
S-3	5.75	61.0	1843.3
W-1	3.77	172.7	2190.0
W-2	5.91	55.8	3446.7
W-3	5.45	127.9	2323.3

Tabla 4. Resultados de las concentraciones totales de las muestras de fondos.

Concentración Total de las Muestras de Fondos (Digestión asistida por microondas y espectrometría ICP-OES)												
LD (mg/L)	0.016	0.018	0.003	0.004	0.005	0.003	1.758	0.003	0.009	0.014	0.012	0.004
Clave	Ag	As	Ba	Be	Cd	Cr	Hg	Ni	Pb	Se	Tl	V
N-1	3.890	180.294	77.972	<LD	7.105	152.114	<LD	69.954	270.986	<LD	7.065	16.779
N-2	5.354	142.629	100.280	1.308	13.074	275.669	<LD	24.501	138.334	<LD	6.802	33.410
N-3	2.429	228.109	168.333	0.480	4.558	402.739	<LD	19.722	352.359	<LD	8.397	48.601
E-1	2.497	27.427	146.624	0.609	5.394	915.701	<LD	14.003	94.017	<LD	<LD	48.432
E-2	3.366	52.287	66.920	<LD	3.636	384.139	<LD	8.690	101.179	<LD	3.006	22.533
E-3	8.431	389.743	138.296	0.479	16.264	519.357	<LD	35.023	366.194	<LD	8.541	39.773
S-1	<LD	454.080	117.856	<LD	6.385	1291.880	<LD	16.250	1478.124	<LD	2.503	42.146
S-2	<LD	123.356	91.904	<LD	4.151	227.674	<LD	10.481	223.454	<LD	9.166	36.310
S-3	4.497	216.347	171.279	0.465	8.935	675.331	<LD	24.669	551.394	<LD	3.598	35.649
W-1	6.808	213.417	208.333	5.333	10.666	641.946	<LD	29.535	477.671	<LD	10.706	74.691
W-2	<LD	129.302	84.552	0.642	12.765	1326.074	<LD	19.308	290.881	<LD	5.386	30.284
W-3	5.173	69.089	<LD	6.868	4.745	393.441	<LD	19.627	154.107	<LD	1.246	40.770

Notas:

*Para cada una de las muestras de suelos y fondos se tomaron tres lecturas de cada Análisis Químico, posteriormente se calculó el promedio con el fin de disminuir errores de medición y obtener un valor más exacto

*Las lecturas del potencial redox se realizaron con referencia al electrodo Ag/AgCl, por lo tanto para utilizar estos datos con referencia al electrodo de hidrogeno se deben sumar 222mV.

*<L/D (Bajo límite de detección): es la concentración mínima de sustancias que se puede detectar con fiabilidad en el equipo ICP-E

12.2 . Anexo B. Mapas de Suelos y fondos

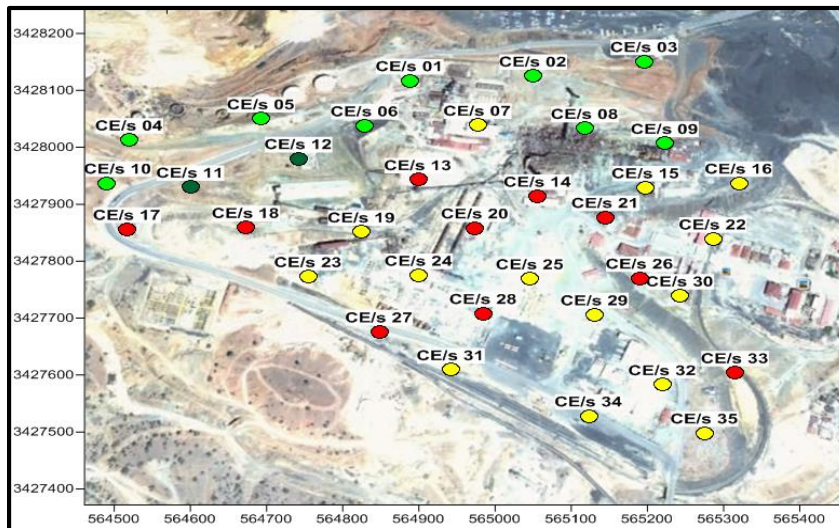
Mapas de suelos de cada elemento potencialmente toxico.

Tabla 5. Niveles de concentración que se determinaron en base a la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

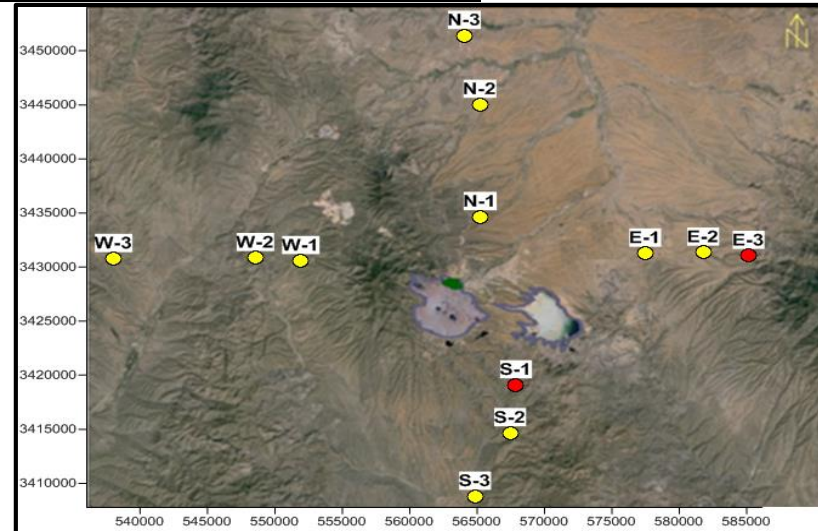
NIVEL	INTERVALO
BAJO	Nivel por debajo del límite de detección
MEDIO	Nivel entre el límite de detección y la concentración de Referencia Totales (CTR) de Uso agrícola/residencial/comercial
INTERMEDIO	Nivel entre la Concentración de referencia de Uso agrícola/residencial/ comercial y Uso industrial
ALTO	Nivel por arriba de la Concentración de referencia

Arsénico

Suelos



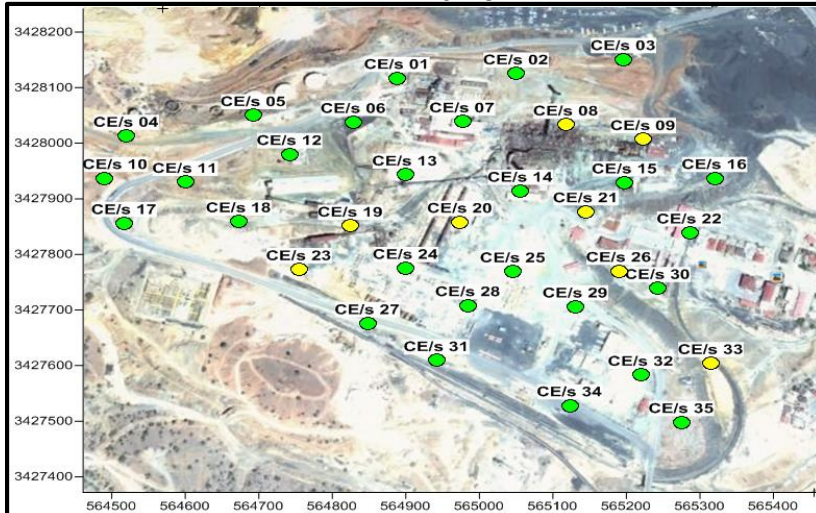
Fondos



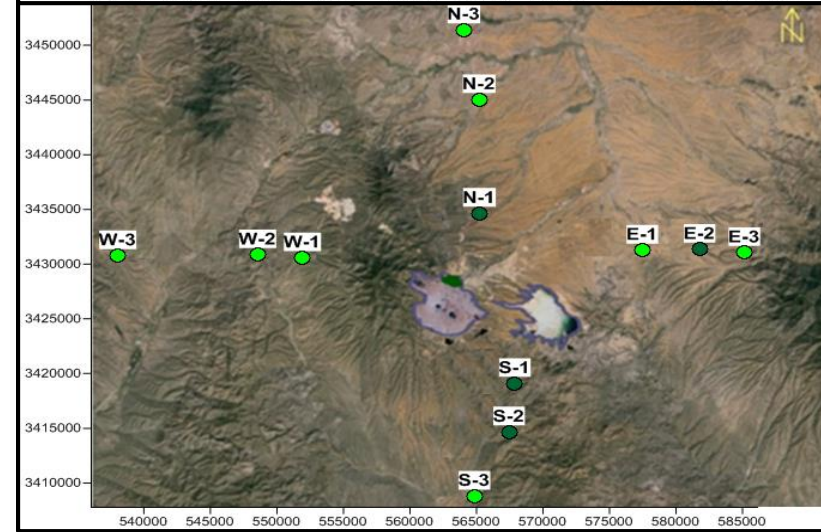
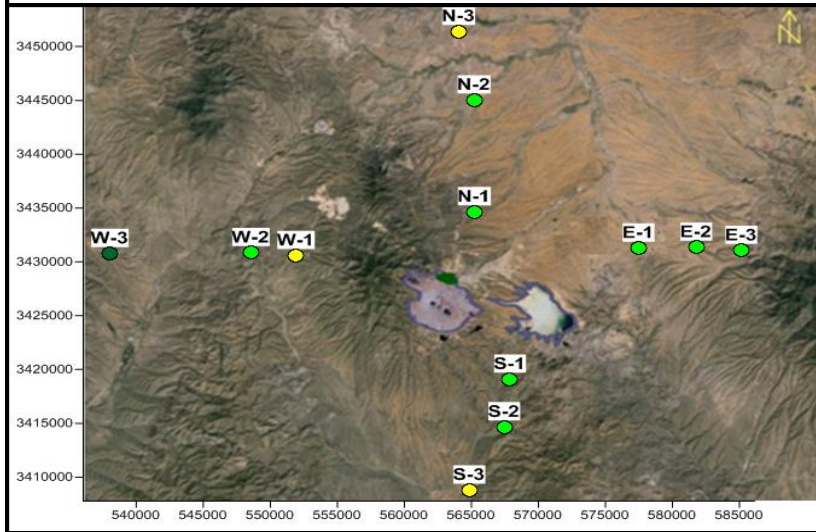
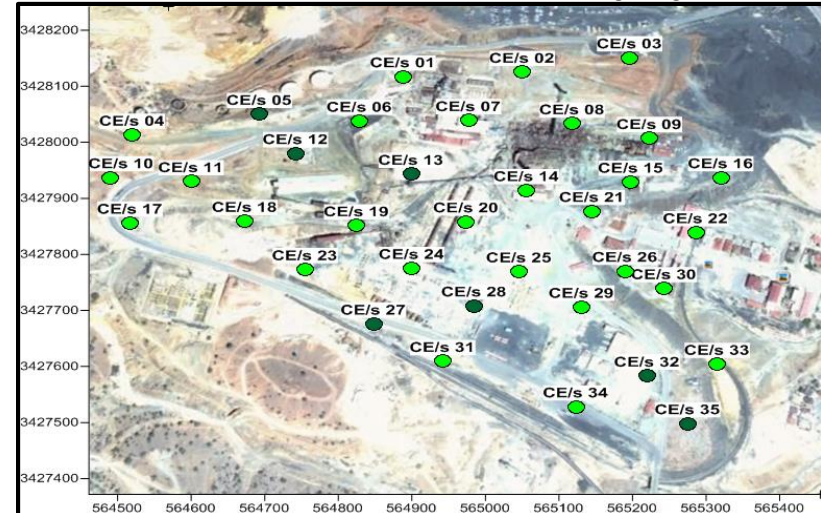
Nivel de Concentración	Intervalos para Arsénico (mg/kg)
Bajo	≤ 0.018
Medio	0.018-22
Intermedio	22-260
Alto	≥ 260

De aquí en adelante los mapas de la parte superior corresponden a los suelos y los mapas de la parte inferior corresponden a fondos

Bario



Berilio

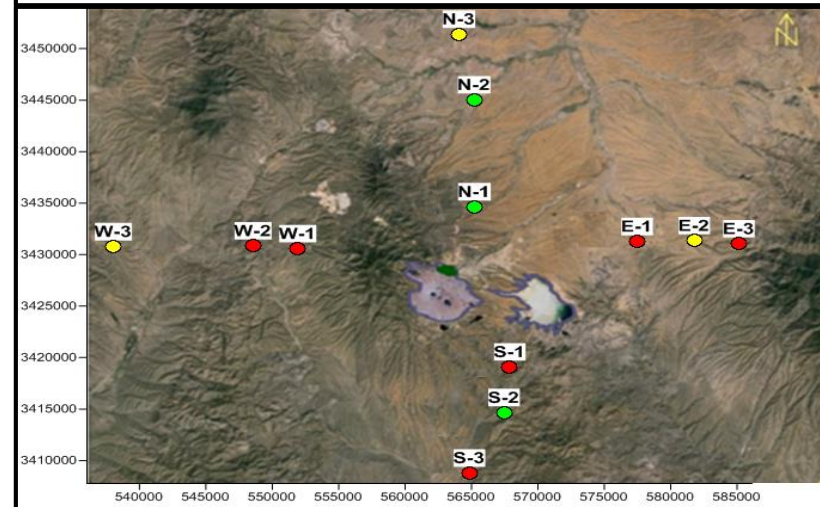
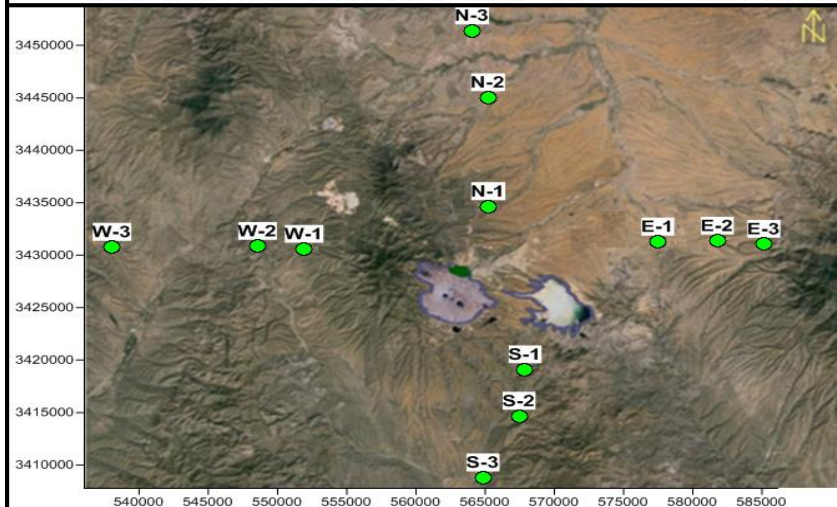
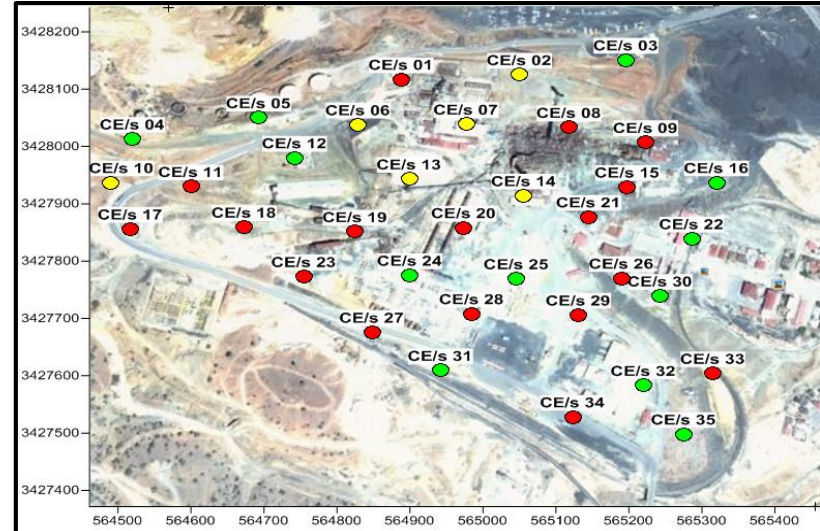


Nivel de Concentración	Intervalos para Bario(mg/kg)
Bajo	≤ 0.003
Medio	0.003- 150
Intermedio	150-1900
Alto	≥ 1900

Nivel de Concentración	Intervalos para Berilio (mg/kg)
Bajo	≤ 0.004
Medio	0.004-5400
Intermedio	5400-67000
Alto	≥ 67000

Cadmio

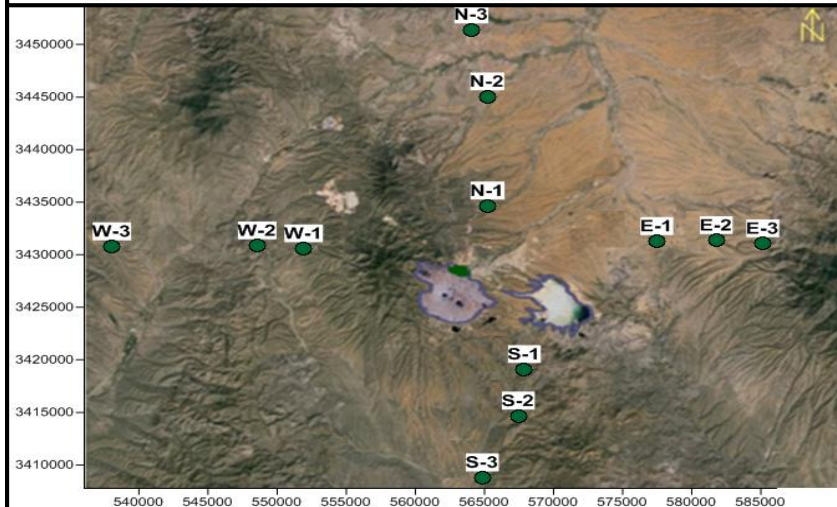
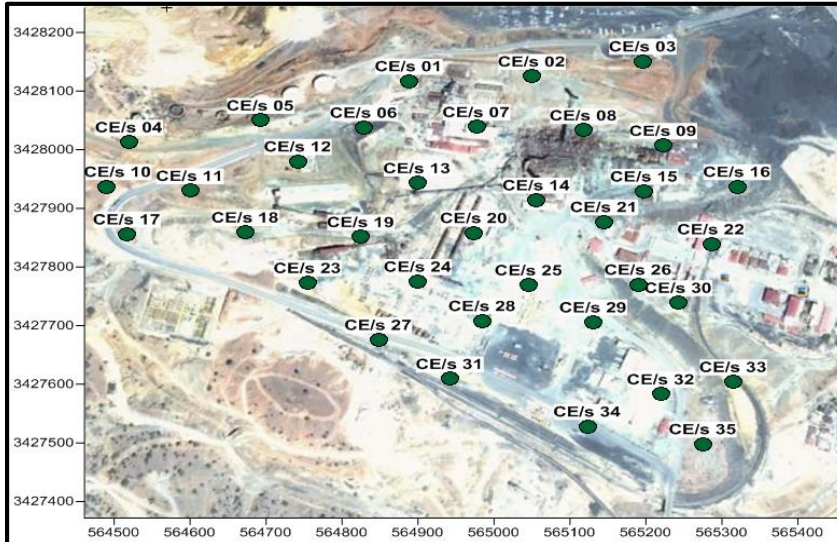
Cromo total



Nivel de Concentración	Intervalos para Cadmio (mg/kg)
Bajo	≤ 0.005
Medio	0.005- 37
Intermedio	37-450
Alto	≥ 450

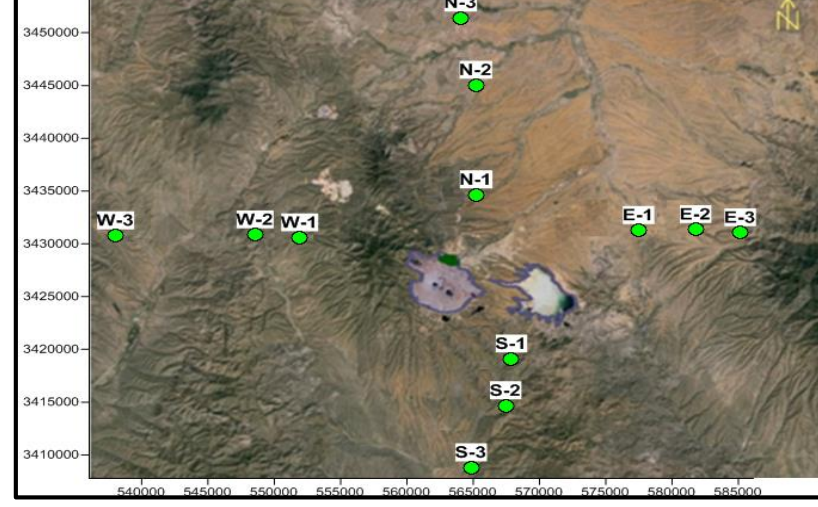
Nivel de Concentración	Intervalos para Cromo (mg/kg)
Bajo	≤ 0.003
Medio	0.003- 280
Intermedio	280-510
Alto	≥ 510

Mercurio



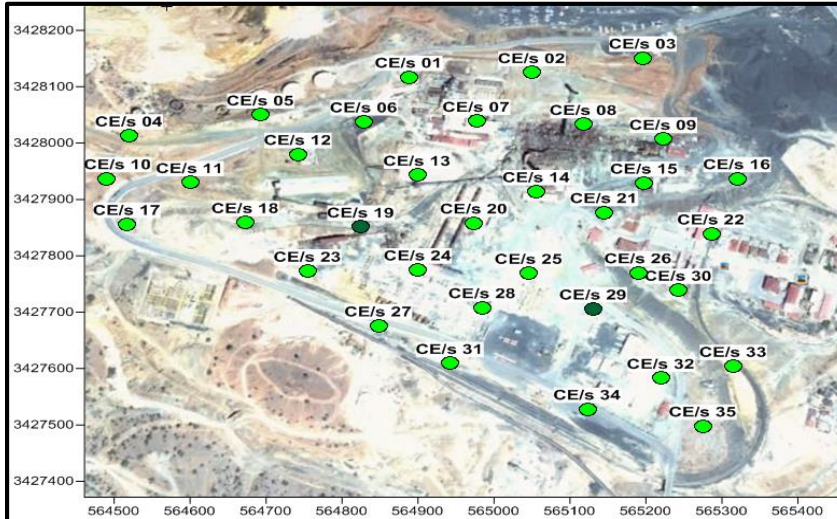
Nivel de Concentración	Intervalos para Mercurio (mg/kg)
Bajo	≤ 1.758
Medio	1.758- 23
Intermedio	23-310
Alto	≥ 310

Níquel

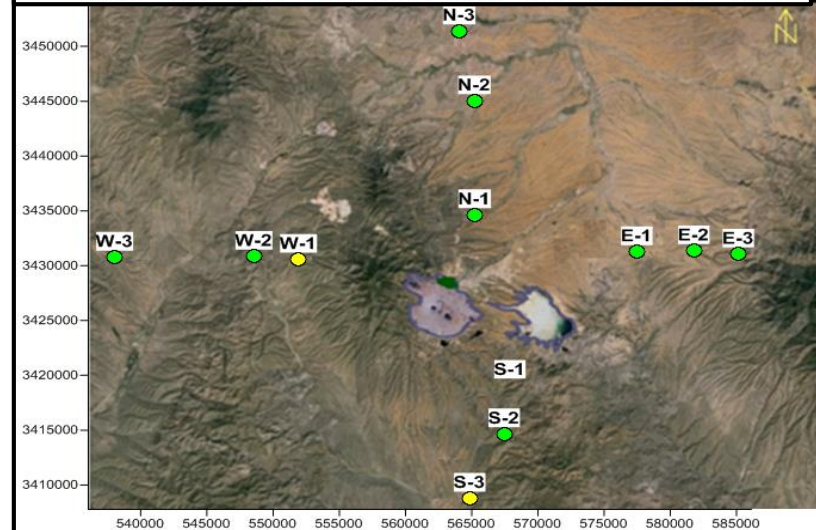
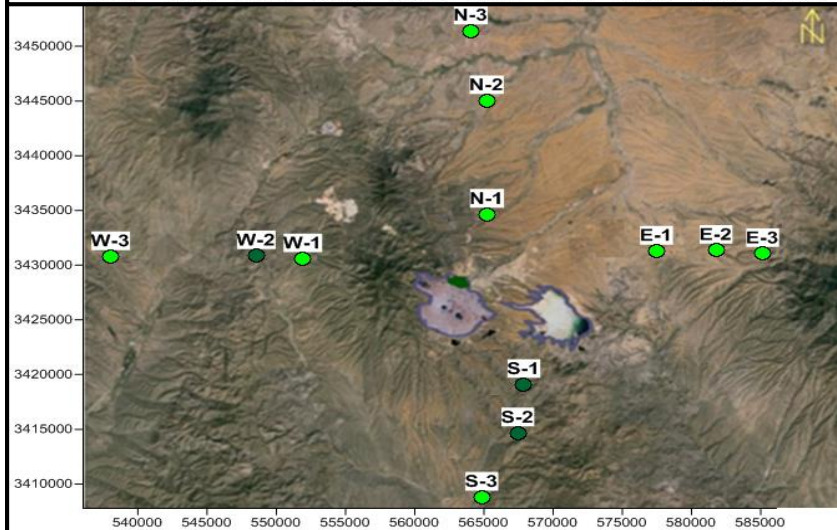
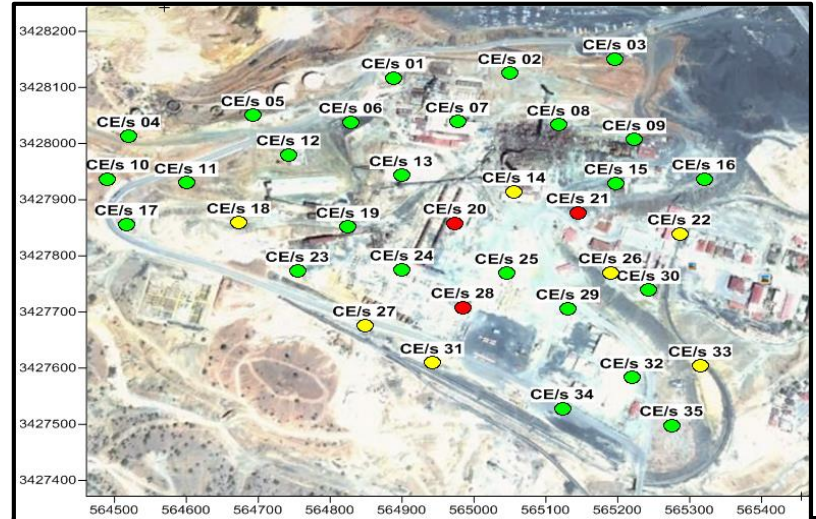


Nivel de Concentración	Intervalos para Níquel (mg/kg)
Bajo	≤ 0.003
Medio	0.003- 1600
Intermedio	1600-20000
Alto	≥ 20000

Plata



Plomo



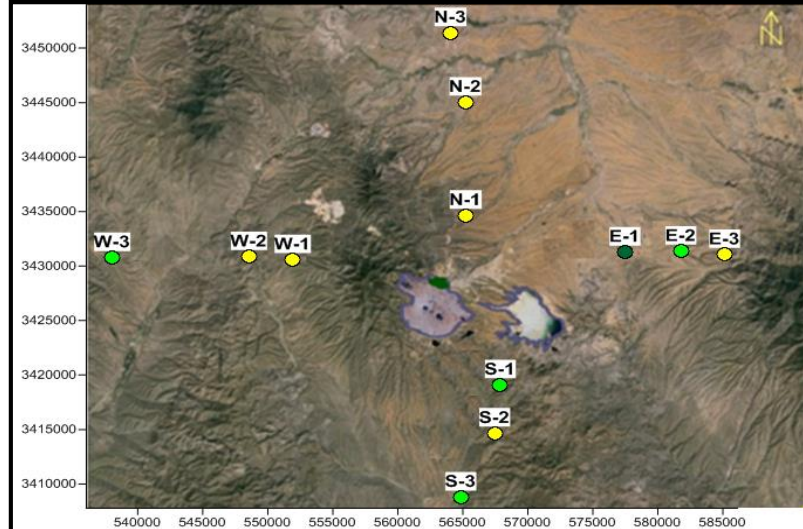
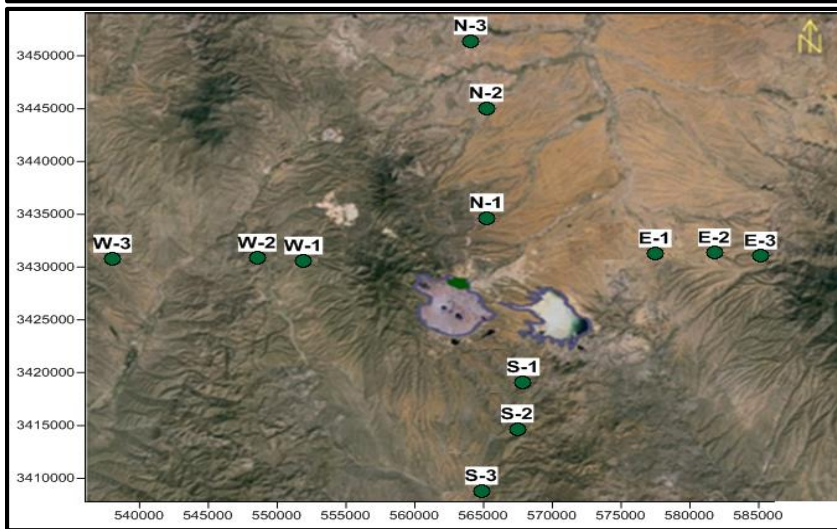
Nivel de Concentración	Intervalos para Plata (mg/kg)
Bajo	≤ 0.016
Medio	0.016- 390
Intermedio	390-5100
Alto	≥5100

Nivel de Concentración	Intervalos para Plomo (mg/kg)
Bajo	≤ 0.009
Medio	0.009- 400
Intermedio	400-800
Alto	≥ 800

Selenio



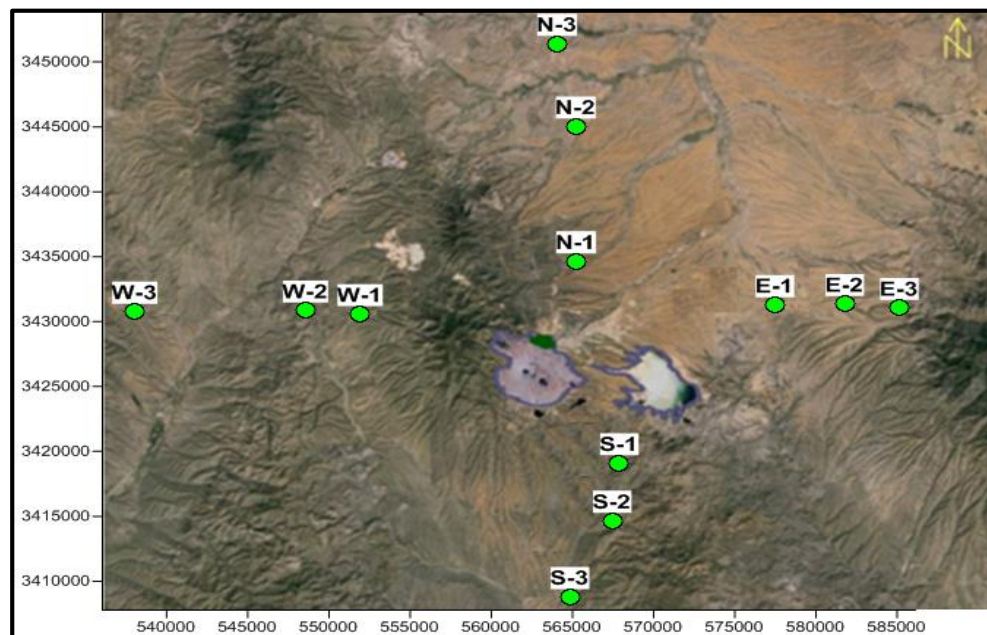
Talio



Nivel de Concentración	Intervalos para Selenio (mg/kg)
Bajo	≤ 0.014
Medio	0.014- 390
Intermedio	390-5100
Alto	≥ 5100

Nivel de Concentración	Intervalos para Talio (mg/kg)
Bajo	≤ 0.012
Medio	0.012- 5.2
Intermedio	5.2 - 67
Alto	≥ 67

Vanadio



Nivel de Concentración	Intervalos para Vanadio (mg/kg)
Bajo	≤ 0.004
Medio	0.004- 78
Intermedio	78- 1000
Alto	≥ 2000

12.3. Anexo C. Zanjas

Tabla 6. Lecturas de pH, Potencial redox y Conductividad eléctrica de cada muestra de zanjas.

Clave de Campo	Lectura de pH	Lectura de Potencial (mv)	Lectura de Conductividad eléctrica ($\mu\text{m/cm}$)
Zanja 2 (0 -5 cm)	4.09	300.0	1362.0
Zanja 2 (5 -50 cm)	4.66	273.9	543.3
Zanja 2 (50 - 100 cm)	5.43	218.3	117.5
Zanja 2 (100- 150 cm)	5.67	218.9	55.7
Zanja 2(150 - 200 cm)	5.71	208.8	52.2
Zanja 2 (200- 250 cm)	4.53	289.5	1089.5
Zanja 2 (250- 300 cm)	4.76	285.5	922.0
Zanja 2 (300- 350 cm)	5.43	246.6	277.3
Zanja 3 (0 -5 cm)	4.88	280.1	527.0
Zanja 3 (5 -50 cm)	5.09	272.2	209.3
Zanja 3 (50 - 100 cm)	5.41	320.4	200.6
Zanja 3 (100- 150 cm)	5.12	321.0	159.6
Zanja 3 (150 - 200 cm)	5.27	301.4	169.4
Zanja 3 (200- 250 cm)	3.42	349.5	3.4
Zanja 3 (250 fondo)	3.72	387.3	1030.0
Zanja 4 (0 -5 cm)	6.01	319.0	648.3
Zanja 4 (5 -50 cm)	3.67	385.6	3.1
Zanja 4(50 - 100 cm)	4.37	362.7	982.7
Zanja 4 (100- 150 cm)	4.59	320.3	1033.3
Zanja 4 (150- 180 cm)	4.50	334.6	2190.0
Zanja 5 (0 -5 cm)	3.59	340.5	986.0
Zanja 5 (5 -50 cm)	5.25	291.1	577.0
Zanja 5 (50 - 100 cm)	5.65	289.8	94.2
Zanja 5 (100- 150 cm)	5.45	262.7	115.2
Zanja 5(150 - 200 cm)	4.80	288.1	113.1
Zanja 5 (200- 250 cm)	4.41	335.8	1901.7
Zanja 5 (250- 300 cm)	3.86	343.9	4900.0
Zanja 5 (300-325cm)	3.13	347.2	3390.0
Zanja 5 (325- 370 cm)	4.18	310.2	1345.0
Zanja 5 (370-400 cm)	5.29	238.5	738.3
Zanja 6 (0 -5 cm)	5.14	241.4	544.3
Zanja 6 (5 -50 cm)	5.70	239.6	557.0
Zanja 6 (50 - 100 cm)	5.67	253.8	601.0
Zanja 6 (100-120 cm)	4.88	282.1	2410.0
Zanja 2 (0 -5 cm)	4.64	310.2	420.8
Zanja 2 (5 -50 cm)	5.47	277.6	819.3
Zanja 2 (50 - 100 cm)	5.70	258.4	3890.0
Zanja 2 (100- 150 cm)	5.06	276.9	4910.0
Zanja 2(150 - 200 cm)	4.71	297.6	4730.0

Notas:

*Para cada una de las muestras de suelos y fondos se tomaron tres lecturas de cada Análisis Químico, posteriormente se calculó el promedio con el fin de disminuir errores de medición y obtener un valor más exacto

*Las lecturas del potencial redox se realizaron con referencia al electrodo Ag/AgCl, por lo tanto para utilizar estos datos con referencia al electrodo de hidrogeno se deben sumar 222mV.

Tabla 7. Concentraciones totales de los elementos normados (NOM-147) determinados por fluorescencia de rayos X

Zanja	Profundidad (cm)	Ag	As	Ba	Cd	Cr	Hg	Ni	Pd	Se	Tl	V
1	5	< L.D	233.692	173.830	< L.D	145.336	< L.D	< L.D	270.86	< L.D	< L.D	101.740
	50	< L.D	204.774	< L.D	< L.D	124.794	< L.D	< L.D	406.67	< L.D	< L.D	95.928
	100	< L.D	107.600	< L.D	< L.D	120.356	< L.D	< L.D	203.70	< L.D	< L.D	115.692
	175	< L.D	74.340	< L.D	< L.D	115.298	< L.D	< L.D	180.36	< L.D	< L.D	88.873
	200	< L.D	126.880	168.570	< L.D	121.724	< L.D	< L.D	427.02	< L.D	< L.D	97.720
2	5	< L.D	459.498	416.652	< L.D	151.304	< L.D	< L.D	494.82	< L.D	< L.D	103.712
	50	< L.D	111.020	345.896	< L.D	125.042	< L.D	< L.D	453.25	< L.D	< L.D	95.980
	100	< L.D	120.150	385.580	< L.D	125.730	< L.D	< L.D	411.71	< L.D	< L.D	92.220
	150	< L.D	182.550	< L.D	< L.D	111.310	< L.D	< L.D	275.15	< L.D	< L.D	90.250
	200	< L.D	105.672	138.830	< L.D	109.376	< L.D	< L.D	194.32	< L.D	< L.D	107.357
	250	< L.D	84.390	164.900	< L.D	119.422	< L.D	< L.D	380.00	< L.D	< L.D	< LOD
	300	< L.D	87.306	1710.828	< L.D	141.582	< L.D	< L.D	650.12	< L.D	< L.D	< L.D
350	< L.D	91.944	374.390	< L.D	132.056	< L.D	< L.D	291.12	< L.D	< L.D	< L.D	
3	5	< L.D	858.062	< L.D	< L.D	136.198	< L.D	< L.D	389.85	< L.D	< L.D	< L.D
	50	< L.D	884.120	254.314	< L.D	123.936	< L.D	< L.D	965.35	< L.D	< L.D	< L.D
	100	< L.D	92.030	337.518	< L.D	136.100	< L.D	< L.D	334.82	< L.D	< L.D	99.054
	150	< L.D	423.418	367.540	< L.D	154.602	< L.D	< L.D	515.32	< L.D	< L.D	99.685
	200	< L.D	465.282	341.242	< L.D	127.366	< L.D	< L.D	734.73	< L.D	< L.D	103.910
	250	< L.D	259.838	271.202	< L.D	127.798	< L.D	< L.D	618.55	< L.D	< L.D	95.650
	250	< L.D	362.168	401.340	< L.D	131.126	< L.D	< L.D	1338.11	< L.D	< L.D	97.608
4	5	< L.D	406.262	241.533	< L.D	150.048	< L.D	< L.D	719.24	< L.D	< L.D	118.182
	50	< L.D	250.254	274.050	< L.D	144.608	< L.D	< L.D	747.62	< L.D	< L.D	99.802
	100	< L.D	122.892	425.023	< L.D	125.728	< L.D	< L.D	65.61	< L.D	< L.D	110.482
	150	< L.D	85.784	319.715	< L.D	127.678	< L.D	< L.D	100.31	< L.D	< L.D	107.130
	180	< L.D	58.864	566.072	< L.D	136.266	< L.D	< L.D	45.47	< L.D	< L.D	98.368
5	5	< L.D	410.400	235.162	< L.D	179.674	< L.D	< L.D	383.80	< L.D	< L.D	98.950
	50	< L.D	426.214	333.180	< L.D	124.794	< L.D	< L.D	283.17	< L.D	< L.D	85.010
	100	< L.D	438.076	431.466	< L.D	104.708	< L.D	< L.D	1287.38	< L.D	< L.D	100.800
	150	< L.D	202.786	398.460	< L.D	131.856	< L.D	< L.D	816.30	< L.D	< L.D	94.286
	200	< L.D	105.388	349.562	< L.D	127.874	< L.D	< L.D	353.15	< L.D	< L.D	97.666
	250	< L.D	104.636	406.662	< L.D	132.796	< L.D	< L.D	369.72	< L.D	< L.D	89.963
	300	< L.D	113.738	461.130	< L.D	131.822	< L.D	< L.D	407.97	< L.D	< L.D	89.460
	325	< L.D	102.422	189.468	< L.D	138.798	< L.D	< L.D	192.18	< L.D	< L.D	90.495
	370	< L.D	< L.D	< LOD	< L.D	145.952	< L.D	< L.D	69.05	< L.D	< L.D	87.158
400	< L.D	< L.D	256.878	< L.D	137.348	< L.D	< L.D	248.57	< L.D	< L.D	91.898	
6	5	< L.D	26.223	276.128	< L.D	146.816	< L.D	< L.D	127.44	< L.D	< L.D	65.664
	50	< L.D	7333.076	< L.D	< L.D	1316.620	< L.D	< L.D	281.18	< L.D	< L.D	105.394
	100	< L.D	7877.646	< L.D	< L.D	774.204	< L.D	< L.D	244.87	< L.D	< L.D	105.305
	120	< L.D	3594.914	< L.D	< L.D	1038.872	< L.D	< L.D	270.85	< L.D	< L.D	< L.D

Nota: Verde fuerte: nivel de contaminación bajo (por debajo del límite de detección de ICP-OES), Verde claro: nivel medio de contaminación (entre el límite de uso agrícola), Amarillo: nivel intermedio (entre el límite de uso agrícola /uso industrial) y Rojo: nivel alto de contaminación (por arriba del límite de uso industrial)

*Por cada muestra se realizaron 5 lecturas en modo suelo, posteriormente se calculó un promedio para obtener un valor más preciso.

12.4. Anexo D. Concentración total de Cobre en las muestras de suelos**Tabla 8. Concentración total de Cobre**

Clave de Muestreo	Cu (mg/kg)
CE/s 01	273.464
CE/s 02	31931.225
CE/s 03	48.721
CE/s 04	94.483
CE/s 05	35.899
CE/s 06	24.006
CE/s 07	165.603
CE/s 08	19459.895
CE/s 09	43.832
CE/s 10	82899.055
CE/s 11	44.075
CE/s 12	25347.960
CE/s 13	2279.177
CE/s 14	31304.348
CE/s 15	<LD
CE/s 16	45971.380
CE/s 17	22865.124
CE/s 18	60418.765
CE/s 19	17217.899
CE/s 20	53546.730
CE/s 21	27593.072
CE/s 22	484.216
CE/s 23	933.194
CE/s 24	<LD
CE/s 25	262668.500
CE/s 26	57732.655
CE/s 27	322961.265
CE/s 28	35797.936
CE/s 29	3220.356
CE/s 30	2929.695
CE/s 31	22157.406
CE/s 32	192077.596
CE/s 33	7661.210
CE/s 34	7457.069
CE/s 35	9951.098

*De color amarillo de resaltan las muestras que se seleccionaron para realizar la propuesta de lixiviación por Columnas

12.5. Anexo E. Conjunto de Técnicas de remediación: Costos y tiempo.

Tabla 9. Conjunto de Técnicas de Remediación

Tipo de tratamiento	Técnica de Remediación	Aplicación	Tipo de Contaminante tratado
Fisicoquímicos	Extracción (por vapores, solventes y ácidos)	In situ	Compuestos orgánicos volátiles, semivolátiles, combustibles, metales, bifenilos policlorados(PCBs), hidrocarburos aromáticos policíclicos, disolventes halogenados y clorados, etc.
	Lavado	In / Ex situ	Compuestos orgánicos semivolátiles, hidrocarburos derivados del petróleo, cianuros y metales
	Electrocinética	In situ	Especialmente metales solubles o complejados
	Inundación (Flushing)	In situ	Todo tipo de contaminantes, especialmente inorgánicos
	S/E	In /Ex situ	Fundamentalmente compuestos inorgánicos como metales pesados, limitada eficacia para contaminantes orgánicos y pesticida
	Tratamiento Químico	In/ Ex situ	Compuestos inorgánicos, compuestos orgánico volátiles y semivolatiles halogenados y no halogenados, gasolinas y pesticidas.
	Separación Física (gravedad, por tamaño y magnética)	Ex situ	Compuesto orgánicos volátiles halogenados y no halogenados, pesticidas, metales pesados, partículas magnéticas
	Inyección de aire comprimido	In situ	Solventes clorados, sustancias volátiles y semivolátiles ligeras como xileno, benceno, tolueno, tetracloruro de carbono, tricloroetano, cloruro de metilo.
Biológicas	Bioventeo	In situ	Hidrocarburos del petróleo de peso mediano, explosivos (DDT, DNT)
	Bioestimulación	In situ	Gasolina, compuestos orgánicos volátiles halogenados y no halogenados, compuestos orgánicos semivolátiles y pesticidas
	Bioaumentación	In situ	Herbicidas, insecticidas, clorofenoles, nitrofenoles ,BCP, HTP,HAP y para desechos con concentraciones altas de metales
	Biolabranza	In situ	Fundamentalmente hidrocarburos del petróleo de peso mediano
	Fitorremediación	In situ	Metales, pesticidas, solventes, explosivos, hidrocarburos aromáticos policíclicos, crudo
	Biorremediación en fase solida (compostaje)	Ex situ	Explosivos (TNT, RDX y HMX), hidrocarburos aromáticos policíclicos, hidrocarburos del petróleo, clorofenoles y pesticidas
	Biorremediación en fase lodos	Ex situ	Compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles no halogenados, explosivos, hidrocarburos del petróleo, petroquímicos, solventes y pesticidas
Térmicas	Biopilas	Ex situ	Derivados del petróleo, compuestos orgánicos volátiles halogenados y no halogenados, compuestos orgánicos semivolátiles y pesticidas
	Desorción térmica	Ex situ	Compuestos orgánicos volátiles no halogenados, combustibles, algunos compuestos orgánicos semivolátiles, hidrocarburos aromáticos policíclicos, PCBs, pesticidas y metales volátiles
	Incineración	Ex situ	Explosivos, hidrocarburos clorados, PCBs y dioxinas
	Vitrificación	In/ Ex situ	Contaminantes inorgánicos (principalmente Hg, Pb, Cd, As, Ba, Cr y cianuros) y algunos orgánicos
	Remoción y Confinamiento	Ex situ	Compuestos orgánicos volátiles, compuestos inorgánicos, dioxinas furanos e hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH)

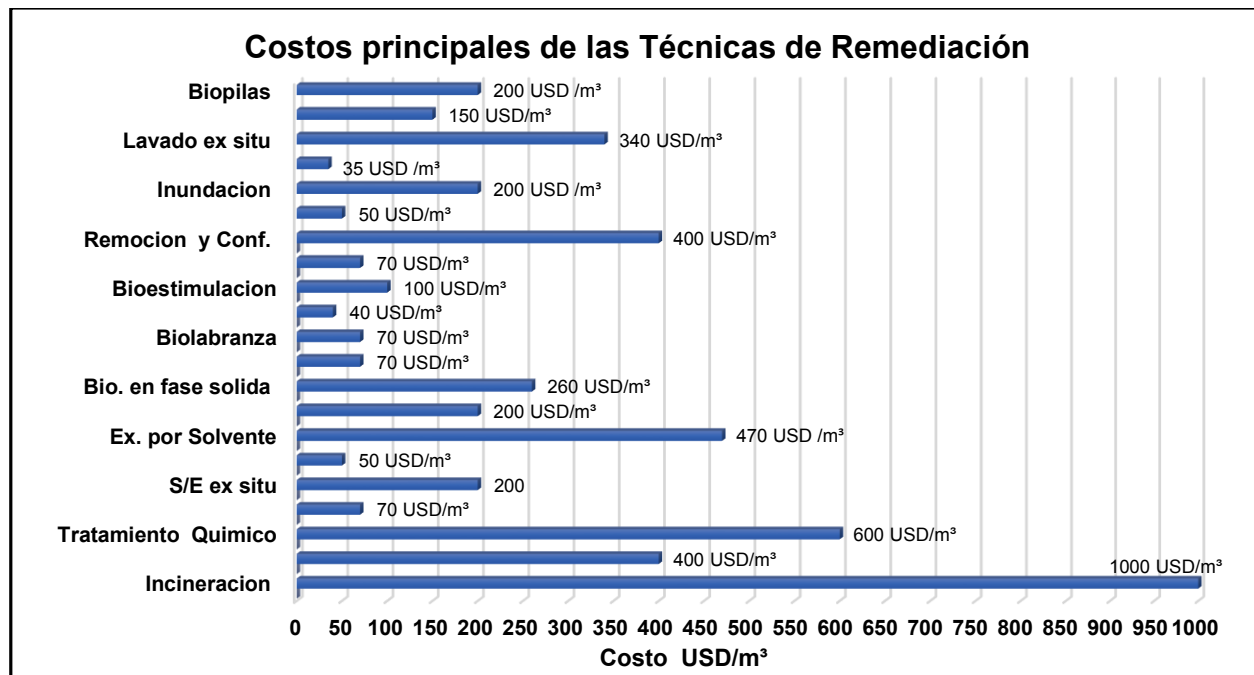
Fuente: Elaboración propia con datos de:

°Volke Sepúlveda T. y Velasco Trejo J. A. (2002). *Tecnologías de remediación para Suelos contaminados. México. Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT).*

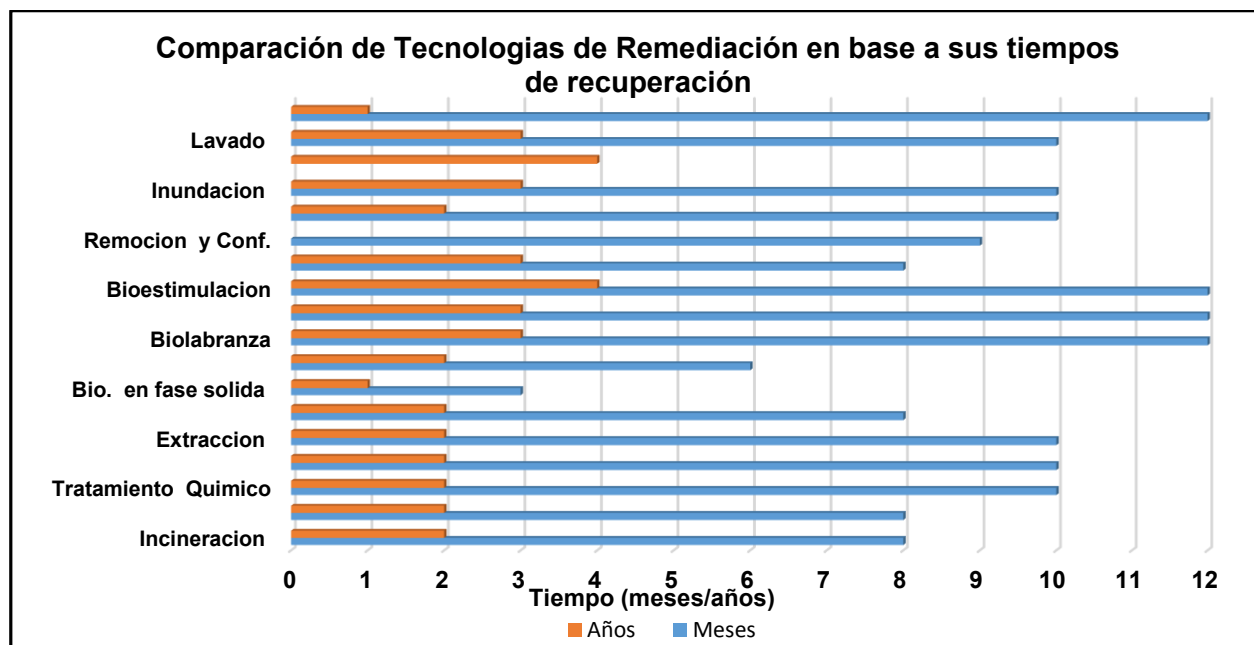
° Conde G. (2000). Técnicas de costes de recuperación de suelos. Regeneración de Suelos. Tecnomá. S.A. Consultados el 2 de Septiembre del 2015. Recuperado en línea: <http://www.inese.es/html/files/pdf/amb/iq/369/17articulo.pdf>

°Ortiz Bernad I., Sanz García J., Dorado Valdiño M., Villar Fernández S., (s.f) Técnicas de Recuperación de suelos contaminados. Universidad de Alcalá, Dirección General de Universidades e Investigación. Consultado el 1 de Septiembre 2015. Recuperado en línea: <http://www.madrid.org/bvirtual/BVCM001700.pdf>

Gráfica 1. Comparación de los costos de las Tecnologías de Remediación



Gráfica 2. Tiempo de Recuperación para cada tecnología de remediación



Fuente. Elaborada con datos de:

°Sellers, K. Fundamentals of hazardous waste site remediation. Lewis Publishers, 1999

° Volke Sepúlveda T. y Velasco Trejo J. A. (2002). Tecnologías de remediación para Suelos contaminados. México. Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT).

*Ortiz Bernad I., Sanz García J., Dorado Valdiño M., Villar Fernández S., (s.f) Técnicas de Recuperación de suelos contaminados. Universidad de Alcalá, Dirección General de Universidades e Investigación. Consultado el 1 de Septiembre 2015. Recuperado en línea: <http://www.madrid.org/bvirtual/BVCM001700.pdf>

