



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL



CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO
INTEGRAL REGIONAL

**DISTRIBUCIÓN DE ARSÉNICO Y PLOMO EN SUELO SUPERFICIAL DE LA
CIUDAD DE DURANGO, Y ESTIMACIÓN DEL RIESGO ASOCIADO.**

PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA
EN CIENCIAS EN GESTIÓN AMBIENTAL

PRESENTA

ING. NIDIA AURORA MORALES MORALES

DIRECTORA DE TESIS

DRA. LAURA SILVIA GONZÁLEZ VALDEZ

CODIRECTORA.

DRA. YOLANDA HERRERA ARRIETA

Victoria de Durango, Dgo., Junio de 2016

DEDICATORIA

A mis padres María de Jesús Morales Álvarez y Jorge Luis Morales Ibáñez que confiaron en mí, me brindaron su apoyo emocional incondicionalmente y me impulsaron a seguir adelante ante las adversidades.

A mi hermana Isela Morales Morales que me demostró que se requieren sacrificios, tiempo y mucha dedicación para lograr todo lo que me proponga.

ÍNDICE

0.1 GLOSARIO	i
0.2 LISTA DE ACRÓNIMOS	ii
0.3 RELACIÓN DE FIGURAS	iii
0.4 RELACIÓN DE CUADROS	iv
0.5 RESUMEN	v
0.6 ABSTRACT	vi
0.7 INTRODUCCIÓN	vii
1. ANTECEDENTES	1
1.1 Recurso Natural: Suelo	1
1.2 Contaminación de suelo por metales y metaloides	2
1.3.- Toxicología de elementos potencialmente tóxicos (EPT)	4
1.3.1 Concentraciones de remediación de Suelos Contaminados por EPT	5
1.4 Arsénico	6
1.4.1. Biotransformación del As	7
1.4.3 Rutas de exposición al As	9
1.4.4 Daños a la salud causados por As	10
1.4.2 Fuentes naturales e industriales del As	8
1.5 Plomo	11
1.5.1 Fuentes antropogénicas o naturales de Pb	11
1.5.2 Fuentes de exposición al Pb	12
1.5.3 Rutas de exposición al Pb	13
1.5.5 Daños a la salud causado por Pb	15
1.6 Estimación de Riesgo por presencia de EPT	15
1.6.1 Peligro	16
1.6.2 Vulnerabilidad	16
1.7 Sistemas de Información Geográfica (SIG)	17
1.7.1 Interpolación espacial	17
2.0 JUSTIFICACIÓN	19
3.0 OBJETIVOS	21
3.1 Objetivos Específicos	21
4.0. MATERIALES Y MÉTODOS	22
4.1 Caracterización de Área de Estudio	22
4.1.1 Ubicación	22
4.1.2 Medio Físico	22
4.1.2.1 Factores climáticos	22
4.1.2.2 Geología	23
4.1.2.3 Edafología	25
4.2 Muestreo y manejo de las muestras	25
4.2.1 Secado y cribado	26
4.3 Medición de pH	27
4.4 Digestión ácida con horno de microondas	28
4.5 Cuantificación de elementos	30

4.5.1 Cuantificación de Pb	30
4.5.1.1 Estadísticas Descriptivas de Pb	31, 32
4.5.2 Cuantificación de As	32
4.6 Estratificación de Peligro y Vulnerabilidad.....	32
4.6.1 Peligro por presencia de As y Pb	33
4.6.2 Variables de Vulnerabilidad.....	33
4.6.2.1 pH.....	33
4.6.3 Matriz de Riesgo	34
4.7 Análisis superficial en SIG	35
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
5.1 Cuantificación de As y Pb	37
5.1.1. Estadísticas Descriptivas	1
5.1.2. Distribución superficial de As y Pb	4
5.2.1 Correlación	6
5.2.2 Agrupamiento.....	8
5.3 Análisis superficial en SIGs.....	10
5.4 Estimación de Riesgo	14
5.4.1 Calculo de Peligro por presencia de As Y Pb	14
5.4.2 Cálculo de vulnerabilidad	17
5.4.2.1 pH en el suelo de la ciudad de Durango.....	17
6. CONCLUSIONES	25
7. REFERENCIAS	27



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Durango, Dgo. siendo las 9:00 horas del día 28 del mes de junio del 2015 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del: CIIDIR-IPN Unidad Durango para examinar la tesis titulada:

Distribución de Arsénico y Plomo en el suelo superficial de la Ciudad de Durango y estimación de riesgo asociado

Presentada por el alumno:

MORALES

MORALES

NIDIA AURORA

Apellido paterno

Apellido materno

Nombre(s)

Con registro:

B	1	4	0	7	4	5
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN GESTIÓN AMBIENTAL

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

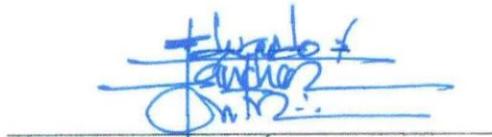
Directores de tesis


DRA. LAURA SILVIA GONZÁLEZ VALDEZ

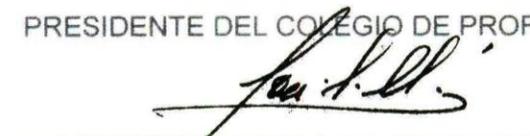

DRA. YOLANDA HERRERA ARRIETA


DR. ISAIÁS CHAÍREZ HERNÁNDEZ


DR. RENE HOMERO LARA CASTRO


DR. EDUARDO SÁNCHEZ ORTIZ

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES


DR. JOSÉ ANTONIO ÁVILA REYES



CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACIÓN PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
C.I.I.D.I.R
UNIDAD DURANGO
I.P.N.



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REGISTRO DE TEMA DE TESIS Y DESIGNACIÓN DE DIRECTORES DE TESIS

México, D.F. a 14 de junio del 2016

El Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CIIDIR-IPN Durango en su sesión permanente No. 2 celebrada el día 20 del mes de mayo conoció la solicitud presentada por el(la) alumno(a):

MORALES	MORALES	NIDIA AURORA							
Apellido paterno	Apellido materno	Nombre (s)							
		Con registro:							
		<table border="1"><tr><td>B</td><td>1</td><td>4</td><td>0</td><td>7</td><td>4</td><td>5</td></tr></table>	B	1	4	0	7	4	5
B	1	4	0	7	4	5			

Aspirante de: Maestría en Ciencias en Gestión Ambiental

1.- Se designa al aspirante el tema de tesis titulado:
Distribución de arsénico y plomo en el suelo artificial de la Ciudad de Durango y estimación de riesgo asociado

De manera general el tema abarcará los siguientes aspectos:

2.- Se designan como Directores de Tesis a los Profesores:
Dra. Laura Silvia González Valdez y Dra. Yolanda Herrera Arrieta

3.- El trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesina será elaborado por el alumno en:
El CIIDIR-IPN Unidad Durango
que cuenta con los recursos e infraestructura necesarios.

4.- El interesado deberá asistir a los seminarios desarrollados en el área de adscripción del trabajo desde la fecha en que se suscribe la presente hasta la aceptación de la tesis por la Comisión Revisora correspondiente:

Directores de Tesis

Laura S. González Valdez
Dra. Laura Silvia González Valdez
Aspirante

Yolanda Herrera Arrieta
Dra. Yolanda Herrera Arrieta
Presidente del Colegio

Aurora
Ing. Nidia Aurora Morales Morales

José Antonio Ávila Reyes
Dr. José Antonio Ávila Reyes
CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACIÓN PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
C.I.I.D.I.R
UNIDAD DURANGO
I.P.N.



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de Durango, Dgo., el día **27** del mes de **junio** del año **2016**, la que suscribe **Nidia Aurora Morales Morales** alumna del Programa de **Maestría en Ciencias en Gestión Ambiental**, con número de registro **B140745**, adscrita al **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Durango. CIIDIR-IPN Unidad Durango**, manifiesta que es la autora intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de la **Dra. Laura Silvia González Valdez** y de la **Dra. Yolanda Herrera Arrieta** y cede los derechos del trabajo titulado **“Distribución de Arsénico y Plomo en el suelo superficial de la Ciudad de Durango y estimación de riesgo asociado”**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso de la autora y/o directores del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones nidia_2523@hotmail.com, lsgv2001@yahoo.com y yolah54@gmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

N.M.

NIDIA AURORA MORALES MORALES

GLOSARIO

Antropogénico: Efectos, procesos o materiales que son el resultado de actividades humanas.

Concentración de referencia total (CRT): masa del elemento químico regulado, expresada en mg, por unidad de masa del suelo en estudio, expresada en kg, base seca, por encima de la cual se considera existe riesgo de que se generen efectos adversos para la salud.

Concentración inicial total (CIT): masa del elemento químico regulado expresada en mg, por unidad de masa del suelo en estudio, expresada en kg, base seca.

Concentración total: masa del elemento químico regulado, expresada en mg, por unidad de masa del suelo en estudio, expresada en kg, base seca, extraído del suelo por digestión (ácida o alcalina) de acuerdo al método especificado en esta Norma.

Límite Máximo Permisible: Nivel de concentración o cantidad de uno o más contaminantes, por debajo del cual no se prevé riesgo para la salud, el bienestar humano y los ecosistemas, que es fijado por la Autoridad Competente y es legalmente exigible.

Mapa de coropletas: representación planimétrica de un modelo de datos tridimensional, en donde se consideran superficies y no puntos

Riesgo esperado: probabilidad de daños (pérdidas de vida e infraestructura).

Suelo: material no consolidado, de origen natural, compuesto por partículas inorgánicas, materia orgánica, agua, aire y organismos, que incluye aquél alterado por actividades antropogénicas.

LISTA DE ACRÓNIMOS

Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR por sus siglas en inglés)

Difracción de Rayos X (DRX)

Distancia Inversa ponderada (IDW)

Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT)

Instituto Nacional de Defensa Civil (INDC)

Límite Máximo Permisible (LMP)

Microscopio Electrónico de Barrido (MEB)

Normativa Oficial Mexicana (NOM)

Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA)

Servicio de Sistemas de Información Geográfica y Teledetección (SIGTE)

Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Transtorno de Déficit de Atención e Hiperactividad (TDAH)

RELACIÓN DE FIGURAS

Figura 1: Perfil General de un Suelo (INECC, 2007)	2
Figura 2: Ciclo del Arsénico (Ramírez, 2013)	7
Figura 3: Cinética del Pb en el organismo humano (Modificado de Vergara, 2014)	14
Figura 4: Ubicación de la ciudad de Durango (Visita Durango,S.F.).....	22
Figura 5: Unión de cartas geológicas en la ciudad de Durango.....	23
Figura 6: Curvas de Nivel en la ciudad de Durango	24
Figura 7: Almacenamiento de muestras.....	25
Figura 8: Secado a temperatura ambiente de las muestras	26
Figura 9: a) Partículas mayores a 2mm, b) Partículas menores a 2mm.	26
Figura 10: a) Pesado de 20g la muestra, b) Mezcla 1:1 de agua desionizada y suelo.	27
Figura 11: a) Agitación magnética en parrillas, b) Potenciómetro.....	27
Figura 12: Armado de los vasos (a) Vaso desmontado, b) Vaso semiarmado, c) Sensor de temperatura para vaso control. d) Sistema giratorio con vasos colocados.	28
Figura 13: a) Pesado de la muestra, b) Adición de HNO ₃ al 65%.....	29
Figura 14: Gráfica del proceso de digestión en horno de microondas	29
Figura 15: a) Filtrado, b) Aforo a 25ml y c) Almacenamiento de soluciones	30
Figura 16: a) Interpolación IDW, b) Interpolación Kriging.	35
Figura 17: a) Interpolación Natural Neighbor, b) Interpolación Spline.....	35
Figura 18: Isolíneas de mg/kg de As en la ciudad de Durango.....	36
Figura 19: Histograma de distribución de datos a) As, b) Pb.....	2
Figura 20: Distribución de As en puntos de muestreo	4
Figura 21: Distribución de Pb en puntos de muestreo	5
Figura 22: Correlación entre Pb y As	6
Figura 23: Dispersión por sitios de muestreo	7
Figura 24: Correlación entre Pb y Elevación	7
Figura 25: Análisis Cluster	8
Figura 26: Mapa de isoconcentración de As	10
Figura 27: Coropletas de distribución de As en la ciudad de Durango	11
Figura 28: Mapa de Isolineas de concentración de Pb.....	12
Figura 29: Coropletas de distribución de Pb.....	13
Figura 30: Estratificación de Peligro por presencia de As en puntos de muestreo	14
Figura 31: Estratificación de Peligro por presencia de Pb en puntos de muestreo	16
Figura 32: Distribución de pH en el suelo de la ciudad de Durango	17
Figura 33: Distribución de Riesgo Ambiental estimado por presencia de As y Pb	24

RELACIÓN DE CUADROS

Tabla 1: Concentraciones de referencia totales (CR_T) por tipo de uso de suelo.....	6
Tabla 2: Condiciones climáticas de la ciudad de Durango	22
Tabla 3: Método de digestión de suelo en horno de microondas.....	29
Tabla 4: Datos espectrales Pb.	31
Tabla 5: Calculo de frecuencias para Pb.....	31
Tabla 6: Datos espectrales As	32
Tabla 7: Calculo de frecuencias para As.....	32
Tabla 8: Estratificación de Peligro por presencia de EPT.....	33
Tabla 9: Niveles de vulnerabilidad de pH para As y Pb respectivamente.	34
Tabla 10: Matriz de Riesgo	34
Tabla 11: Concentraciones totales de As y Pb.....	37
Tabla 12: Recuperación de Pb.....	1
Tabla 13: Recuperación de As.....	1
Tabla 14: Estadística Descriptiva de As y Pb.....	2
Tabla 15: Distribución de frecuencias de Pb	3
Tabla 16: Distribución de frecuencias de As	3
Tabla 17: Análisis de correlación de variables.	6
Tabla 18: Muestras del grupo 1 del análisis Cluster.....	8
Tabla 19: Grupos 2, 3 y 4 del análisis cluster.....	9
Tabla 20: Clasificación de muestras por Peligro de As	15
Tabla 21: Clasificación de muestras por peligro por Pb	16
Tabla 22: Vulnerabilidad de nivel de pH y elevación	18
Tabla 23: Vulnerabilidad de nivel de pH y elevación (continuación).....	19
Tabla 23. Matriz de Riesgo por presencia de As y Pb.....	21

RESUMEN

La ciudad de Durango se encuentra adyacente a un yacimiento de óxidos de hierro; la actividad minera, ladrillera, de construcción y algunas fuentes de combustibles móviles pueden ser las fuentes principales en la dispersión de EPT como As y Pb. Un estudio preliminar mostro presencia de As en la zona Norte que sobrepasa los LMP que marca la NOM, aunque el Pb no rebasa el LMP si presenta concentraciones bioaccesibles en suelo. En el presente estudio se realizó un muestreo según la NMX-AA-132-SCFI-2006 obteniendo 101 muestras de suelo superficial con el fin de cuantificar la presencia de As y Pb por EAA, georreferenciando en SIG para visualizar su distribución e inferir acerca de su relación con el pH del suelo, la elevación de los sitios muestreados y evaluar el riesgo potencial de su presencia. El análisis espacial en Arc-GIS permitió visualizar las concentraciones de As y Pb, presentando en el caso del As una tendencia de menor valor en el Noroeste de la ciudad incrementando hacia valores mayores en la parte Sureste; mientras que el Pb presenta esta misma tendencia de Oeste a Este, encontrándose siempre dentro de los límites de la NOM. Se puede concluir que las concentraciones de Pb están estabilizadas por su afinidad al Fe y el pH ligeramente alcalino del suelo propicia la formación de compuestos, mientras que para las concentraciones de As se sugiere un análisis a profundidad donde se evalúe la movilidad y biodisponibilidad para descartar un riesgo a la salud de la población que habita la ciudad de Durango.

ABSTACT

The city of Durango is located adjacent to an iron oxide deposit; mining, brickmaking, construction activity and some mobile fuel sources may be the main sources in the dispersion of PTE as As and Pb. A preliminary study showed the presence of As in the northern area exceeds LMP marking the NOM, although the Pb does not exceed the LMP if you have bioaccessible concentrations in soil. In the present study sampling was performed according to the NMX-AA-132-SCFI-2006 getting 101 surface soil samples in order to quantify the presence of As and Pb by EAA, georeferencing GIS to visualize the distribution and infer about its relationship with soil pH, elevation of the sampled sites and assess the potential risk of their presence. Spatial analysis in ArcGis can display concentrations of As and Pb, presenting As in the case of a trend of lower value in the northwest of the city increased to higher values in the southeast part; while the Pb presents the same trend from West to East, always being within the limits of NOM. It can be concluded that the concentrations of Pb are stabilized by their affinity to Fe and slightly alkaline soil pH promotes the formation of compounds, whereas for concentrations of As-depth analysis where mobility and bioavailability to rule evaluates suggested a risk to the health of the population living in the city of Durango.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Durango se encuentra adyacente a uno de los yacimientos minerales de Fe más importantes en México llamado Cerro de Mercado (Alva-Valdivia y col., 2001), que forma parte de los depósitos minerales de la cuenca del Pacífico (Morales y col., 2014). La cuenca del Pacífico se extiende desde Canadá hasta Chile, e incluye varios tipos de depósitos minerales ricos en óxidos de hierro; los yacimientos masivos de tipo skarn son numerosos y mejor desarrollados en las partes norte y oeste de la cuenca del Pacífico, con predominio de los depósitos de magnetita-hematita (Morales y col., 2014).

La comparación de la formación del yacimiento Cerro de Mercado con otros yacimientos de Fe con presencia de apatita, bajos en titanio y sistemas volcánicos silícicos sugiere que este su modelo vulcanogénico de formación puede ser aplicable a muchos de ellos. Estos sistemas incluyen los depósitos Precámbrico Kiruna de Suecia, los depósitos de hierro región central de Missouri, y el depósito de Olympic Dam; los depósitos del Jurásico del noreste de Nevada; y los depósitos terciarios de México y Chile (Alva-Valdivia y col., 2001)

Por lo tanto, el estudio de la zona urbana adyacente al yacimiento mineral de óxidos de hierro es importante, dado que puede servir como ejemplo del comportamiento de algunos EPT presentes en el suelo superficial de la ciudad de Durango y ser aplicable a otros depósitos minerales de la cuenca del Pacífico.

La ciudad de Durango se encuentra en constante crecimiento y se están llevando a cabo obras públicas que requieren excavaciones para formar los cimientos, en la administración actual se cimentaron 2.4 millones de metros cuadrados de pavimento asfáltico (Municipio Durango, 2016); se encuentran también registrados en el inventario de bancos de material algunos sitios de extracción de toba riolítica y roca dentro de la zona urbana (SCT, 2014); estas actividades pueden propiciar la liberación de partículas del subsuelo hacia la superficie.

En la ciudad de Durango se realizó un estudio preliminar donde se caracterizó el suelo superficial del perímetro del distrito minero Cerro de Mercado por difracción de rayos X (DRX) y microscopio electrónico de barrido (MEB) en muestras de suelo donde se encontraron partículas de Galena (PbS) con un tamaño de $<5-10\ \mu\text{m}$, así como partículas de Arsenopirita (FeAsS) de tamaños entre 20 y $80\ \mu\text{m}$. Las concentraciones totales en suelo superficial de As variaron desde 55.2 hasta 220.7mg/kg rebasando el LMP de 22 mg /kg que marca la NOM; mientras que para Pb concentraciones totales desde 20 hasta 107 mg/kg, que aunque no sobrepasan el LMP de 400 mg/kg de Pb de la NOM-147-SSA1-2004 las concentraciones bioaccesibles de Pb en las muestras de suelo superficial oscilaron entre 0.84 - 14.14mg/kg y 0.73-16.6 mg/kg, por lo que indicó la necesidad de realizar más análisis en la zona (Morales y col., 2014).

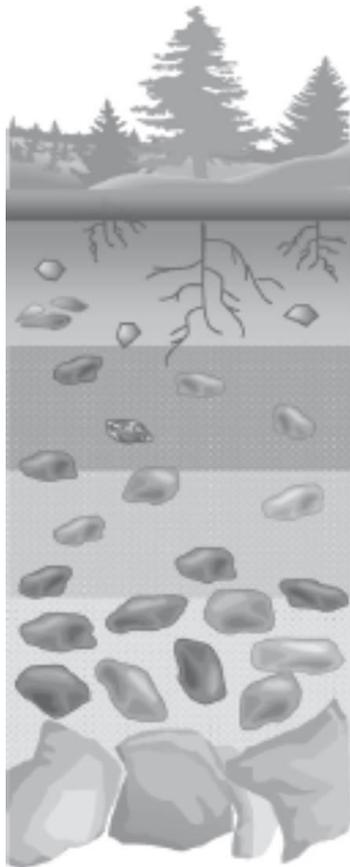
I. ANTECEDENTES

1.1 Recurso Natural: Suelo

El suelo es un cuerpo natural, no consolidado, compuesto por sólidos (material mineral y orgánico), líquidos y gases, que se caracteriza por tener horizontes o capas diferenciales, resultado de las adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de energía y materia a través del tiempo, y cuyo espesor puede ir desde la superficie terrestre hasta varios metros de profundidad. Como elemento filtrante, amortiguador y transformador, tiene la capacidad de regular los ciclos del agua y biogeoquímicos, además de poseer la propiedad de retener sustancias mecánicamente o fijarlas por adsorción, contribuyendo a la protección de aguas subterráneas y superficiales contra la penetración de agentes nocivos (Volke, y col., 2005).

En el suelo, yacimiento de materias primas, se encuentran minerales no metálicos de interés para la construcción como piedra, mármol, caliza, yeso, arena, así como minerales metálicos (blenda, galena, siderita, pirita, entre otros) y combustibles fósiles como el petróleo. La composición química y la estructura física del suelo están determinadas por el tipo de material geológico del que se origina, por la cubierta vegetal, por el tiempo en que ha actuado la meteorización (desintegración por la acción de agentes atmosféricos), por la topografía y por los cambios artificiales resultantes de las actividades humanas ().

Los componentes de los suelos maduros se encuentran dispuestos en una serie de zonas llamadas horizontes (figura 1). El arreglo de estos horizontes en un suelo se conoce como un perfil edáfico o perfil del suelo. Cada horizonte se caracteriza por tener diferentes propiedades como color, textura, estructura, espesor y composición (tipo de minerales y elementos químicos presentes), además de su consistencia y reacción (INECC, 2007).



Perfil General de un Suelo

- **Horizonte O:** Estrato superficial: detritos orgánicos, hojas, materia orgánica parcialmente descompuesta
- **Horizonte A:** Suelo superficial: materia orgánica parcialmente descompuesta (humus), raíces, organismos vivos y minerales
- **Horizonte E:** Zona de lavado (infiltración): capa mineral que representa lixiviación de minerales, arcillas y cationes, además de acumulación de partículas de arena y limo
- **Horizonte B:** Subsuelo: zona de acumulación: capa mineral donde se acumulan arcillas, óxidos de hierro y aluminio, compuestos húmicos y los cationes lixiviados del horizonte A.
- **Horizonte C:** Material parental parcialmente descompuesto (regolita): zona poco afectada por procesos pedogenéticos, compuesta por sedimentos y fragmentos de roca. Presenta acumulación de sílice, carbonatos y yeso
- **Horizonte R:** Material parental: capa compuesta por rocas y por lo tanto difícil de penetrar, excepto por fracturas

Figura 1: Perfil General de un Suelo (INECC, 2007)

La mayoría de los suelos maduros poseen, al menos, tres de los horizontes (A, B y C), pero suelos recientes o poco desarrollados pueden carecer de ellos (Volke, y col., 2005).

1.1 Contaminación de suelo por metales y metaloides

La contaminación del suelo hace referencia a la presencia de un elemento o sustancia en concentración superior a la natural, como resultado de los fenómenos naturales o actividad y que, por lo tanto, tiene un efecto negativo en el medioambiente y sus componentes (Vázquez, 2009).

El destino de los contaminantes dentro del suelo va a depender no solamente de la concentración total de contaminante, sino también de la proporción y naturaleza de formas disponibles (Vázquez, 2009).

Geoquímicamente hablando, un elemento introducido en el suelo puede encontrarse en una o más formas: disuelto en la solución del suelo, retenido en posiciones de intercambio de compuestos orgánicos e inorgánicos, incluido o fijado dentro de los minerales del suelo, precipitado independientemente o con otros compuestos del suelo, e incorporado al material biológico (Vázquez, 2009).

La excavación de minas, la remoción de minerales y el proceso y la extracción de metales puede causar daños ambientales y, en casos extremos, destruir el ecosistema; por ejemplo, se pueden dañar tierras de cultivo, favorecer la erosión y contaminar cuerpos de agua con sales solubles de elementos potencialmente tóxicos (EPT), como As, Se, Pb, Cd y óxidos de S, entre otros (Volke, y col., 2005).

Las industrias especializadas en el proceso de metales (siderurgias y metalúrgicas) pueden emitir partículas de dimensiones micrométricas, que son fácilmente transportables por el viento a grandes distancias y causar problemas en la salud de poblaciones (Volke, y col., 2005).

Existen otras fuentes que generan contaminación por metales y metaloides:

- Drenaje pluvial: Dependiendo del tipo de camino y material de construcción de los mismos, de la cantidad de tráfico, planeación urbanística y uso de suelo.
- Descargas y drenajes industriales: Ciertas industrias pueden generar residuos con concentraciones mayores de metales por las características de sus procesos.
- Drenaje doméstico: Transporta metales desechados por el metabolismo y lixiviados de los materiales de construcción de las tuberías (Cu, Pb, Zn, Cd, Fe, Mn, Cr, Ni, Co, Bo y As).

- Aguas residuales: Los tratamientos remueven hasta 50% de los metales contenidos, dejando una carga considerable de metales en el agua tratada, además de concentrar los metales removidos en los lodos de tratamiento.
- Rellenos sanitarios: El lixiviado que se produce contiene metales como Cu, Zn, Pb y Hg.
- Quema de combustibles fósiles: Es la principal fuente de metales hacia la atmósfera.

Para el año 1995, la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), comenzó la identificación de los sitios abandonados contaminados con residuos peligrosos a nivel nacional; y para el año 1997, el listado preliminar nacional de sitios abandonados contaminados con residuos peligrosos constaba de 59 sitios en 16 entidades federativas de México; para 1999, se contaba con el inventario correspondiente a 17 estados del país, en los cuales se localizaron 105 sitios sin responsable identificado la contaminación de suelos por metales es un problema persistente en muchos sitios del territorio (Volke, y col., 2005).

1.2 Toxicología de elementos potencialmente tóxicos (EPT)

Se denomina a los elementos de importancia ambiental y/o toxicológica como Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) (Volke, y col., 2005). Si este tipo de elementos se encuentran biodisponibles y se movilizan hacia poblaciones cercanas, pueden ocasionar problemas de intoxicación. La forma química de un elemento, tiene influencia directa en su solubilidad, movilidad y toxicidad en el suelo.

Los cationes de varios metales (Ca, Fe, Cu, Na, K, Mg, Zn, Mn y Cr) juegan un papel importante como elementos traza en reacciones bioquímicas y en el metabolismo humano. Otros elementos, como Al, Si, As y Ni también se encuentran en el cuerpo, pero su función exacta no se ha determinado. Elementos como el Hg, As, Sn, Tl y Pb, pueden formar iones órgano-metálicos liposolubles capaces de penetrar membranas y acumularse en las células (Volke, y col., 2005).

Los cationes tri- o tetra-valentes de otros metales (Sn, Ce, Ga, Zr y Th), debido a su baja solubilidad, no poseen influencia biológica. Del resto de los metales, el Fe, Mo y Mn son elementos traza importantes con baja toxicidad; el Zn, Ni, Cu, V, Co, W y Cr son tóxicos con importancia biológica moderada; y elementos como As, Ag, Sb, Cd, Hg, Pb y U, no tienen importancia biológica significativa como elementos traza y se consideran tóxicos (Volke, y col., 2005).

1.2.1 Concentraciones de remediación de Suelos Contaminados por EPT

En la normativa ambiental mexicana se tiene índices de calidad de suelo estipulados en la 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. Cuando las concentraciones de estos elementos en un suelo específico son mayores que las denominadas concentraciones de referencia, se pueden realizar estudios particulares para determinar las concentraciones específicas en suelos, que no representen un riesgo mayor. Estos estudios particulares determinan la movilidad y biodisponibilidad de los elementos normados y los parámetros de exposición reales en el sitio evaluado, a partir de las características propias del suelo en estudio.

Un suelo puede representar un riesgo para la salud de las personas, cuando al menos una de las concentraciones de los elementos regulados en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 se encuentre por arriba de las concentraciones de referencia totales, ($CI_T > CR_T$), establecidas en la Tabla 1. Cuando las concentraciones iniciales sean menores o iguales a las concentraciones de referencia, ($CI_T \leq CR_T$), se considerará que el suelo no requiere de remediación.

Estos elementos pueden estar presentes en el suelo de manera natural o ser el producto de la acumulación de desechos de actividades industriales. La exposición a metales se ha asociado con efectos en la salud, como son: cáncer (arsénico),

problemas gastrointestinales, disfunción del sistema nervioso y daño cerebral (mercurio y plomo) y enfermedades renales y hepáticas (cadmio).

Tabla 1: Concentraciones de referencia totales (CR_T) por tipo de uso de suelo.

Contaminante	Uso agrícola /residencial/comercial (mg/kg)	Uso industrial (mg/kg)
Arsénico (As)	22	260
Bario (Ba)	5400	67000
Berilio (Be)	150	1900
Cadmio (Cd)	37	450
Cromo (Cr) Hexavalente	280	510
Mercurio (Hg)	23	310
Níquel (Ni)	1600	20000
Plata (Ag)	390	5100
Plomo (Pb)	400	800
Selenio (Se)	390	5100
Talio (Ta)	5.2	67
Vanadio (Va)	78	1000

En México, la contaminación del suelo por metales se origina principalmente por la actividad minera e industrial (GeoMexico, 2004); los EPT más comunes derivados de estos procesos, en el caso de México, son Pb, Cd, Zn, As, Se y Hg (Volke, y col., 2005).

1.3 Arsénico

El arsénico (As) de número atómico 33, es un elemento de color gris plateado brillante, quebradizo, amorfo. Sus compuestos tienen conductividad baja; por eso se comporta como metal o como no metal y de ahí su denominación de metaloide. Siempre se le descubre como impureza de otros metales, cobre, plomo, cinc u oro y es raro hallarlo puro en la naturaleza. (Ramírez, 2013).

Es muy tóxico, aunque algunas de sus formas orgánicas intervienen en los procesos metabólicos de varias especies. En el ciclo biogeoquímico del As la mayoría de las

transformaciones ambientales ocurren en el suelo, sedimentos, plantas, animales, y en zonas de actividad biológica oceánica (figura 2) (Ramírez, 2013).

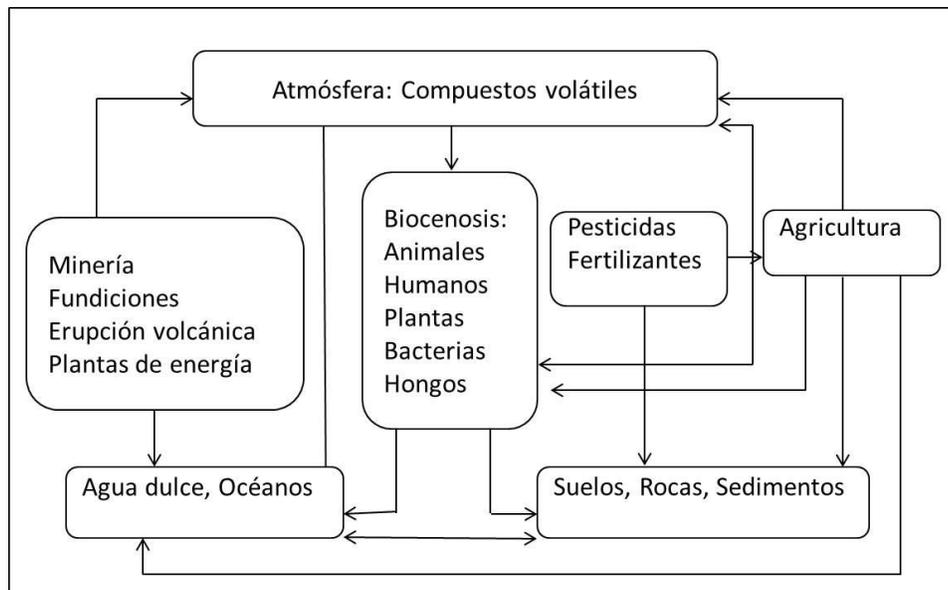


Figura 2: Ciclo del Arsénico (Ramírez, 2013)

La toxicidad de los compuestos arsenicales es compleja y depende de su forma (orgánica o inorgánica), de su valencia, solubilidad, estado físico y pureza, y de sus vías de absorción y de eliminación. Se pueden ordenar de mayor a menor toxicidad, de la siguiente forma (Arsenic, ATSDR, S.F.):

- Compuestos inorgánicos trivalentes
- Compuestos orgánicos trivalentes
- Compuestos inorgánicos pentavalentes
- Compuestos orgánicos pentavalentes
- Arsénico elemental

1.4.1. Biotransformación del As

La metilación es la principal vía de desintoxicación, su capacidad de metilación varía y depende de su forma química, de la dosis, del tiempo de exposición, de una dieta rica en metionina y proteínas y de la especie expuesta (Arsenic, ATSDR, S.F.).

La vida media del As^{+3} en los humanos es de cerca de 10 horas; éste sufre la biometilación en el hígado donde se excreta aproximadamente el 70% del arsénico, principalmente por la orina (Arsenic, ATSDR, S.F.).

Aún no está bien establecida toda la vía metabólica, pero se sabe que su metabolismo ocurre con intervención de procesos secuenciales de metilación oxidativa. Así, la biotransformación del As^{+3} requiere de un primer paso de metilación para obtener ácido monometilarsónico, MMA, y luego en una segunda metilación se alcanza el ácido dimetilarsónico, DMA. La S-adenosinmetionina actuaría como donador de los grupos metilo y el glutatión, un tripéptido no proteínico, como principal agente reductor y detoxificador al donar electrones y transportar al As (Ramírez, 2014).

Después de haber sido absorbido en los pulmones o en el tracto digestivo, el arsénico se distribuye ampliamente por el cuerpo vía el torrente sanguíneo; la mayoría de los tejidos desecha el arsénico, excepto la piel, el pelo y las uñas, es por esto que son buenos indicadores de acumulación de As (Arsenic, ATSDR, S.F.).

1.4.2 Fuentes naturales e industriales del As.

El arsénico se encuentra de manera natural en la corteza terrestre, es liberado al ambiente por volcanes, por erosión de depósitos minerales que contienen arsénico y la gran mayoría de su dispersión en el ambiente se debe a la minería y a procesos comerciales. En la industria, el arsénico es un subproducto del proceso de separación del metal y la roca de diversos minerales metálicos como el Co, Au, Ni, Pb, Zn; y también se debe tomar en cuenta que en el siglo XIX, se usaba el arsénico en pinturas y colorantes para ropa, papel y papel tapiz (Arsenic, ATSDR, S.F.).

Como otras fuentes de As se tienen aleaciones no ferrosas, desecantes utilizados en la cosecha mecánica del algodón, herbicidas, manufactura del vidrio, conservadores de madera, humo de tabaco, y quema de combustibles fósiles que contienen arsénico (Arsenic, ATSDR, S.F.).

El trióxido de arsénico se puede encontrar en los pesticidas y en los defoliantes, así como en el whiskey destilado ilícitamente; hoy en día, el arsénico se usa ampliamente en la industria electrónica como arseniuro de galio y como gas arsina en los componentes de los semiconductores (Arsenic, ATSDR, S.F.).

1.4.3. Rutas de exposición al As

Las principales rutas de entrada del As al cuerpo son la ingestión y la inhalación, aunque es posible que pueda ocurrir la exposición dérmica, ésta no se considera una ruta primaria de exposición (Arsenic, ATSDR, S.F.).

Para una exposición ocupacional la inhalación es la vía de ingreso más importante del As, su absorción está condicionada por el tamaño de las partículas, solubilidad y por la forma química del compuesto.

En el aire del ambiente laboral metalúrgico predomina el iAs^{+3} en forma de partículas, por lo cual las de mayor tamaño se depositan en el tracto respiratorio superior y desde allí pueden ser removidas por las vibrisas o por el moco hacia el exterior o al tubo digestivo en donde son absorbidas dependiendo de su solubilidad. Por ejemplo, en el pulmón, las partículas menores de $7 \mu m$ se absorben entre 75 y 85%, el iAs^{3+} es más soluble en lípidos mientras que el As^{5+} se absorbe mejor por el intestino y la absorción de ambos a lo largo de la vía digestiva, disueltos en agua, llega a 95% (Ramírez, 2014).

La forma en que puede ingerir As es principalmente por consumo de alimentos y en menor cantidad a través de agua potable, aire y suelo; el agua de pozos profundos contiene principalmente arsenitos (As^{+3}), mientras que el agua de superficie contiene predominantemente arseniatos (As^{+4}) (Arsenic, ATSDR, S.F.).

Los niveles elevados de arsénico en suelo (debido ya sea a contaminación natural o a contaminación causada por el ser humano) pueden representar un riesgo de

ingestión, principalmente para niños con comportamiento de pica y para niños que se lleven las manos a la boca al jugar.

No obstante, la biodisponibilidad del arsénico en el suelo es variable, y depende de la forma química en la que se presente. La incorporación de arsénico en las plantas no parece alcanzar niveles que se consideren peligrosos para la salud humana (Arsenic, ATSDR, S.F.).

1.4.4. Daños a la salud causados por As

Las personas con más probabilidad de exposición al As son las personas que laboran en industrias que pueden utilizar compuestos de As a lo que se le llama una exposición ocupacional, sin embargo, existen personas con una exposición no ocupacional cuyo abasto de agua contiene un alto nivel de As ó viven cerca de fuentes que tienen un alto nivel ambiental (en aire) de As (Arsenic, ATSDR, S.F.).

El arsénico afecta a prácticamente todos los aparatos y sistemas del cuerpo, puesto que interfiere con reacciones enzimáticas de amplia distribución. Los efectos más claros de la exposición al arsénico se observan en la piel (Arsenic, ATSDR, S.F.).

Algunos de los efectos fisiológicos de la exposición al arsénico son: hiperqueratosis palmo-plantares y cambios en la pigmentación de la piel; se observa también una mayor fuerza de asociación entre la exposición crónica al arsénico y los cánceres de piel, pulmón y vejiga (Arsenic, ATSDR, S.F.).

Los efectos gastrointestinales (GI) del As generalmente son resultado directo de la ingesta de éste, la principal lesión en el tracto GI consiste en un aumento en la permeabilidad de los vasos sanguíneos pequeños, que lleva a la pérdida de fluidos y a la hipotensión, puede presentarse una inflamación extensiva y una necrosis en la mucosa y submucosa del estómago e intestino, las cuales pueden derivar en la perforación de la pared de la víscera, también puede presentarse una gastroenteritis hemorrágica que provoca diarrea sanguinolenta (Arsenic, ATSDR, S.F.).

La toxicidad aguda al arsénico puede asociarse a una necrosis hepática y a niveles elevados de las enzimas hepáticas; puede incluir una necrosis tubular aguda junto

con una falla renal aguda; también podría provocar una amplia gama de efectos cardiovasculares y una destrucción de los cilindros del axón, lo cual puede conducirlos a sufrir una neuropatía periférica (Arsenic, ATSDR, S.F.).

1.4 Plomo

El plomo (Pb) es un metal suave y de color azul-grisáceo, denso y dúctil; es muy estable y resiste la corrosión; no conduce electricidad pero es un buen escudo protector contra la radiación (Plomo, ATSDR, S.F.).

El plomo es un metal poco móvil a nivel medio ambiental, generalmente se dispersa por fuentes de aire en forma de partículas y es eliminado por acción de la lluvia o depósito gravitacional. En el suelo es poco móvil y generalmente se encuentra en las capas superiores, a excepción de los casos en los que se encuentra de manera natural en las capas profundas de la corteza terrestre. Su baja movilidad en suelo no permite el filtrado al subsuelo o capas subterráneas (Plomo, ATSDR, S.F.).

La interacción del plomo con el suelo es mayor si hay presencia de materia orgánica y coloides inorgánicos. Al aumentar el pH de los suelos y disminuir la interacción con este se hace más móvil (Vergara, 2014).

En agua es muy poco encontrado, debido a que es un metal pesado se decanta y es encontrado más fácilmente en sedimentos. En aguas ácidas adquiere una movilidad un poco mayor (Vergara, 2014).

1.5.1 Fuentes antropogénicas y naturales de Pb

El Pb está ampliamente distribuido y se puede encontrar en el ambiente debido a fuentes antropogénicas o naturales (Vergara, 2014).

A nivel natural el plomo hace parte de la corteza terrestre profunda, sin embargo tras procesos geológicos de elevación, se puede encontrar formando parte de las capas más superficiales del perfil del suelo. También se le encuentra relacionado con emisiones volcánicas y fuentes de agua asociadas a suelos en los que es evidente su presencia. En la corteza terrestre el plomo está asociado o adherido a la parte mineral, siendo la galena (sulfuro de plomo) el mineral más rico en este metal y del que se desprende la fuente principal de su producción comercial. Es un elemento persistente en el medio ambiente y es considerado el primer contaminante del planeta entre los metales (Vergara, 2014).

De las fuentes antropogénicas proviene la mayor acumulación de plomo en el medio ambiente y en consecuencia en los humanos. Entre éstas se incluye la extracción y procesamiento de minerales de plomo en las fundiciones de hierro y acero, la fabricación de baterías, la producción de gasolina, las emisiones de vehículos, la producción tecnológica de cemento, la fabricación y revestimiento de cables, pinturas, barnices, esmaltes, vidrios y cristales (Vergara, 2014)..

1.5.2. Fuentes de exposición al Pb

Las fuentes de exposición al Pb son variadas y pueden ser categorizadas de diferentes maneras (Vergara, 2014).

- Exposición ocupacional: tiene lugar en los sitios de trabajo en los que se desarrollan procesos de producción o manejo con plomo como la metalurgia, la minería extractiva, la plomería, actividades de soldadura, construcción civil, industria cerámica, manufactura de caucho y vidrio, reparación de buques, procesos de cortado del metal, manufactura de plásticos y baterías.
- Exposición ambiental: se puede encontrar plomo en el agua de ríos, lagos y océanos. En el agua de mar por ejemplo se han encontrado concentraciones

de plomo en los peces y otros organismos que habitan en ellas, por lo tanto, incorporan el Pb a la cadena trófica. En el suelo por lo general, áreas cultivables y regiones cercanas a contaminación industrial tienen niveles de Pb más elevados que terrenos baldíos; los terrenos que se utilizan para pastoreo y cultivos deben tener especial cuidado con las concentraciones de plomo presentes, ya que éste podría ingresar en el organismo de plantas y animales de uso alimentario. En el aire el plomo está relacionado con las fuentes de emisión del metal, bien sean naturales o industriales; por esta razón las áreas rurales tienden a presentar menores concentraciones del Pb que las áreas urbanas, especialmente aquellas consideradas zonas industriales; el Pb suspendido en el aire puede reposar sobre los objetos y paredes presentes en las viviendas, lo es considerado polvo contaminado.

- Exposición doméstica: Se puede atribuir como fuentes de contaminación la pintura de paredes con compuestos de plomo, al igual que la pintura de juguetes y el uso de vasijas y utensilios de cocina de cerámica vidriada.

1.5.3. Rutas de exposición al Pb

Las principales vías de exposición al plomo para trabajadores son la inhalación y la ingesta de humo y polvo que contienen plomo (Plomo, ATSDR, S.F.).

Los trabajadores de las industrias de la fundición, refinación y manufactura presentan las exposiciones ocupacionales al plomo más altas y prolongadas. Es importante hacer notar que las exposiciones ocupacionales también pueden traducirse en exposiciones secundarias para las familias de los trabajadores si éstos llevan al hogar polvo contaminado con plomo en su piel, ropas o zapatos (Plomo, ATSDR, S.F.).

La inhalación es la segunda vía principal de exposición al plomo. Casi todo el plomo que es inhalado se absorbe en el cuerpo, comparado con la absorción de entre el 20% y 70% cuando el plomo es ingerido (aunque los niños en general absorben un mayor porcentaje que los adultos) (Plomo, ATSDR, S.F.).

Este elemento tiene la capacidad de bioacumularse por lo que su concentración en los organismos vivos, plantas y animales, se magnifica en la cadena alimentaria, aun cuando no es un elemento esencial para la vida y no debe encontrarse en ninguna concentración en las especies

El plomo puede ingresar al organismo por tres vías: respiratoria, digestiva y dérmica o cutánea (Figura 3). El plomo inorgánico solo puede acceder por las dos primeras, mientras que el plomo orgánico puede penetrar por cualquiera. Por la piel el plomo pasa a través de los folículos pilosos, glándulas sebáceas y sudoríparas directamente al torrente sanguíneo. El grado de absorción de esta vía depende de forma directa de la porción de polvo o tamaño de la partícula respirable, siendo ésta generalmente inferior a $5\mu\text{m}$, y de la frecuencia y volumen respiratorio (Vergara, 2014).

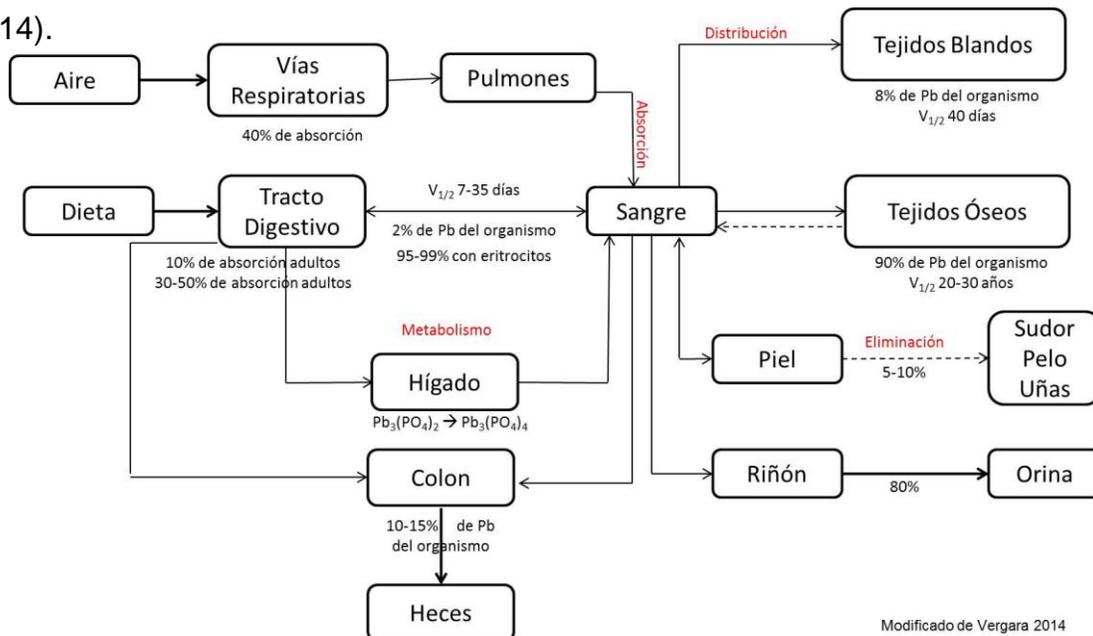


Figura 3: Cinética del Pb en el organismo humano (Modificado de Vergara, 2014)

El plomo tiene muy baja biotransformación, el Pb inorgánico no se metaboliza, se absorbe, se distribuye, se acumula y excreta de forma directa, mientras que el Pb orgánico sufre un proceso de transformación escasa donde pasa a fosfato plumboso y posteriormente a fosfato plúmbico, el cual es menos soluble y por tanto se excreta en menor proporción, lo que aumenta la concentración y acumulación (Vergara, 2014).

1.5.5. Daños a la salud causado por Pb

Entre los efectos en la salud se pueden mencionar alteraciones neurológicas, hematológicas, endocrinas, renales, en la reproducción y desarrollo, riesgos cardiovasculares y procesos de carcinogénesis (Vergara, 2014).

Otros síntomas asociados a la intoxicación por Pb son el trastorno de déficit de atención e hiperactividad (TDAH) y la discapacidad auditiva en los niños, es posible que la exposición al plomo contribuya también a la “gota saturnínica,” que puede presentarse por una hiperuricemia inducida por plomo, debido a una menor excreción renal de ácido úrico (Plomo, ATSDR, S.F.).

1.5 Estimación de Riesgo por presencia de EPT

La Estimación del Riesgo, es el conjunto de acciones y procedimientos que se realizan en un determinado centro poblado o área geográfica, a fin de levantar información sobre la identificación de los peligros naturales y/o tecnológicos así como, el análisis de las condiciones de vulnerabilidad para determinar o calcular el riesgo esperado (probabilidades de daños: pérdidas de vida e infraestructura). (INDC, 2006).

Se estima el riesgo antes de que ocurra el desastre, sólo se puede hablar de riesgo (R) cuando el correspondiente escenario se ha evaluado en función del peligro (P) y

la vulnerabilidad (V), que puede expresarse en forma probabilística, a través de la fórmula siguiente:

$$R = (P \times V)$$

Para cuantificar la gravedad y probabilidad del riesgo, es necesario realizar diversas pruebas, investigaciones y cálculos, (INDC, 2006).

1.5.1 Peligro

El peligro, es la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno natural o inducido por la actividad del hombre, potencialmente dañino, de una magnitud dada, en una zona o localidad conocida, que puede afectar un área poblada, infraestructura física y/o el medio ambiente (INDC, 2006).

El peligro, puede ser clasificado según su origen natural o antropogénico. El peligro de tipo contaminación ambiental es la cantidad de partículas sólidas suspendidas o gases presente en un volumen de aire, partículas disueltas o suspendidas, bacterias y parásitos acumulados en el agua, concentraciones de sustancias incorporadas en los alimentos o acumuladas en un área específica del suelo de medios permeables, que causan daño a los elementos que conforman el ecosistema (INDC, 2006).

1.5.2 Vulnerabilidad

La vulnerabilidad, es el grado de debilidad o exposición de un elemento o conjunto de elementos frente a la ocurrencia de un peligro natural o antrópico de una magnitud dada. Se expresa en términos de probabilidad, en porcentaje de 0 a 100 (INDC, 2006).

Para su análisis, la vulnerabilidad debe promover la identificación y caracterización de los elementos que se encuentran expuestos, en una determinada área geográfica, a los efectos desfavorables de un peligro adverso (INDC, 2006).

La vulnerabilidad de tipo ambiental y ecológica es el grado de resistencia del medio natural y de los seres vivos que conforman un determinado ecosistema, ante el deterioro del medio ambiente (calidad del aire, agua y suelo), la deforestación, explotación irracional de los recursos naturales, exposición a contaminantes tóxicos, pérdida de la biodiversidad y la ruptura de la auto-recuperación del sistema ecológico, los mismos que contribuyen a incrementar la vulnerabilidad (INDC, 2006).

1.6 Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Los SIGs pueden definirse como un conjunto de programas informáticos que permiten la gestión de datos referenciados espacialmente y organizados en bases de datos que pueden ser visualizados mediante mapas. Toda la información se organiza en capas espaciales de información homogénea, georreferenciada o referida a unas coordenadas en el espacio. Las capas de información son introducidas en el SIG de distinta manera: puntos a los que se asocian tablas de datos (estaciones meteorológicas, inmisión de contaminantes); líneas a los que se asocian atributos (red hidrográfica, carreteras); o, zonas susceptibles de ser caracterizadas por distintos atributos (secciones censales, edificios, usos del suelo). Esta vinculación digital entre datos y espacio, entre fenómenos diversos interrelacionados, confiere a los SIGs su máxima potencia de análisis y explicación de los fenómenos estudiados (Rodríguez-Jaume, 2001).

1.6.1 Interpolación espacial

El proceso de interpolación espacial consiste en la estimación de los valores que alcanza una variable en un conjunto de puntos georreferenciados, partiendo de los

valores que adopta esta variable en una muestra de puntos conocidos creando superficies continuas; la estimación de valores fuera del área de estudio constituye una extrapolación. Lo más habitual es partir de medidas puntuales (cotas) o de isolíneas (curvas de nivel), siendo los métodos que se usan en uno u otro caso muy diferentes. Todos los métodos de interpolación se basan en la presunción lógica de que cuanto más cercanos estén dos puntos sobre la superficie terrestre existirá una mayor correlación espacial. Se pueden diferenciar dos métodos generales de interpolación, los métodos globales que asumen la dependencia de la variable a interpolar de otras variables de apoyo y los métodos locales que se basan en la utilización de puntos más cercanos al punto de interpolación para estimar la variable z en este caso (Quiñonero y Sarria, 2007).

Los métodos de interpolación IDW, Kriging, Natural Neighbor y Spline se describen a continuación (ArcMap, S.F):

- IDW (Distancia Inversa ponderada): este método presupone que la variable que se representa cartográficamente disminuye su influencia a mayor distancia desde su ubicación de muestra (es el método más simple, es inversamente proporcional a la distancia).
- Kriging: es un procedimiento geoestadístico avanzado que genera una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos dispersados con valores z , usar la herramienta Kriging en forma efectiva implica una investigación interactiva del comportamiento espacial del fenómeno representado por los valores z antes de seleccionar el mejor método de estimación para generar la superficie de salida (muy empleada en suelos y geología).
- Natural Neighbor: interpola una superficie de ráster a partir de puntos utilizando una técnica de vecinos naturales (útil cuando existen muchos puntos de entrada).

- Spline: utiliza un método de interpolación que estima valores usando una función matemática que minimiza la curvatura general de la superficie, lo que resulta en una superficie suave que pasa exactamente por los puntos de entrada (empleada cuando cuando las superficies varían suavemente).
- Tendencia: es una interpolación polinómica global que ajusta una superficie suave definida por una función matemática (polinómica) a los puntos de muestra de entrada. La superficie de tendencia cambia gradualmente y captura patrones de escala sin detallar en los datos.

II. JUSTIFICACIÓN

La ciudad de Durango se encuentra adyacente a uno de los yacimientos minerales de Fe más importantes en México llamado Cerro de Mercado (Alva-Valdivia y col., 2001), que forma parte de los depósitos minerales de la cuenca del Pacífico (Morales y col., 2014). La cuenca del Pacífico se extiende desde Canadá hasta Chile, e incluye varios tipos de depósitos minerales ricos en óxidos de hierro; los yacimientos masivos de tipo skarn son numerosos y mejor desarrollados en las partes norte y oeste de la cuenca del Pacífico, con predominio de los depósitos de magnetita-hematita (Morales y col., 2014).

La comparación de la formación del yacimiento Cerro de Mercado con otros yacimientos de Fe con presencia de apatita, bajos en titanio y sistemas volcánicos silícicos sugiere que este su modelo vulcanogénico de formación puede ser aplicable a muchos de ellos. Estos sistemas incluyen los depósitos Precámbrico Kiruna de Suecia, los depósitos de hierro región central de Missouri, y el depósito de Olympic

Dam; los depósitos del Jurásico del noreste de Nevada; y los depósitos terciarios de México y Chile (Alva-Valdivia y col., 2001)

Por lo tanto, el estudio de la zona urbana adyacente al yacimiento mineral de óxidos de hierro es importante, dado que puede servir como ejemplo del comportamiento de algunos EPT presentes en el suelo superficial de la ciudad de Durango y ser aplicable a otros depósitos minerales de la cuenca del Pacífico.

La ciudad de Durango se encuentra en constante crecimiento y se están llevando a cabo obras públicas que requieren excavaciones para formar los cimientos, en la administración actual se cimentaron 2.4 millones de metros cuadrados de pavimento asfáltico (Municipio Durango, 2016); se encuentran también registrados en el inventario de bancos de material algunos sitios de extracción de toba riolítica y roca dentro de la zona urbana (SCT, 2014); estas actividades pueden propiciar la liberación de partículas del subsuelo hacia la superficie.

En la ciudad de Durango se realizó un estudio preliminar donde se caracterizó el suelo superficial del perímetro del distrito minero Cerro de Mercado por difracción de rayos X (DRX) y microscopio electrónico de barrido (MEB) en muestras de suelo donde se encontraron partículas de Galena (PbS) con un tamaño de $<5-10\ \mu\text{m}$, así como partículas de Arsenopirita (FeAsS) de tamaños entre 20 y $80\ \mu\text{m}$. Las concentraciones totales en suelo superficial de As variaron desde 55.2 hasta 220.7 mg/kg rebasando el LMP de 22 mg /kg que marca la NOM; mientras que para Pb concentraciones totales desde 20 hasta 107 mg/kg, que aunque no sobrepasan el LMP de 400 mg/kg de Pb de la NOM-147-SSA1-2004 las concentraciones

bioaccesibles de Pb en las muestras de suelo superficial oscilaron entre 0.84 - 14.14mg/kg y 0.73-16.6 mg/kg, por lo que indicó la necesidad de realizar más análisis en la zona (Morales y col., 2014).

Los antecedentes indican que se requiere un estudio donde se determine si existe la presencia de As y Pb distribuido en el suelo superficial de la ciudad de Durango, además, asociar esta distribución a otras variables y estimar un riesgo potencial probabilístico.

III. OBJETIVOS

Determinar la distribución georeferenciada del arsénico y plomo presentes en el suelo superficial de la ciudad de Durango y estimar el riesgo ambiental potencial asociado.

3.1 Objetivos Específicos

- Cuantificar la presencia de As y Pb total en el suelo superficial.
- Visualizar por medio de SIG la distribución de As y Pb.
- Determinar la correlación entre As y el Pb y su asociación con variables ambientales.
- Estimar el riesgo potencial en función de dos variables ambientales.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Caracterización de Área de Estudio

4.1.1 Ubicación

La Ciudad de Durango, se encuentra a 24°02' N y a 104°40' O, forma parte del municipio de Durango y es la capital del Estado del mismo nombre, como se visualiza en la figura 5.1 (Carta Natal Online, S.F.).



Figura 4: Ubicación de la ciudad de Durango (Visita Durango, S.F.)

4.1.2 Medio Físico

4.1.2.1 Factores climáticos

Las condiciones climáticas de la ciudad de Durango se presentan en la tabla 2. (Geografía del Municipio de Durango, INEGI).

Tabla 2: Condiciones climáticas de la ciudad de Durango

Clima	Precipitación anual (mm)	Temperatura media anual(°C)	Vientos predominantes	
			Km/h	Dirección
Semiseco templado	500	17.3	60	Suroeste a noreste

4.1.2.2 Geología

Se unieron cuatro cartas geológicas con SIGs y se delimitó la ciudad de Durango como se observa en la figura 5: la G13D81 denominada Durango Oeste (1), G13D82 Durango Este (2), F13B11 Presa Guadalupe Victoria (3) y finalmente F13B12 Presa Santiago Bayacora (4).

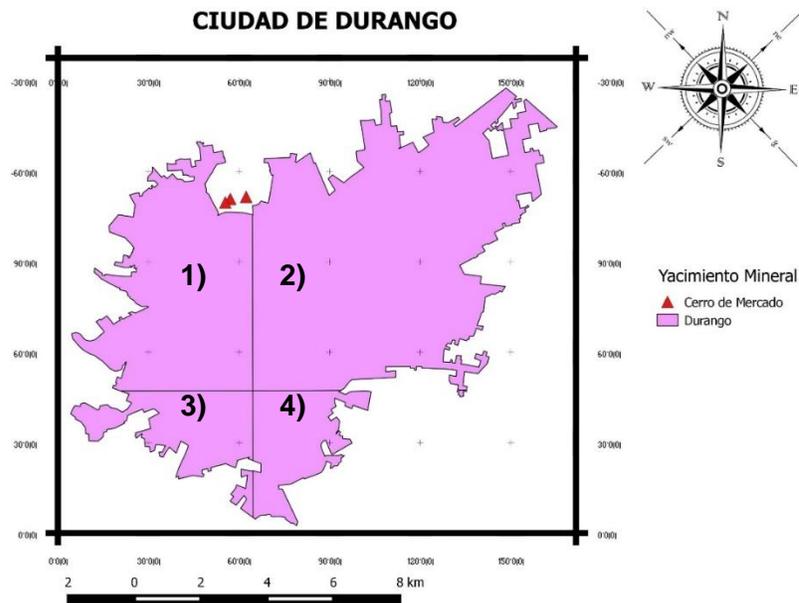


Figura 5: Unión de cartas geológicas en la ciudad de Durango

En el norte de la ciudad de Durango se encuentra adyacente un depósito mineral producto de una variedad de procesos volcánicos subaéreos con un magma de óxido de hierro rico en flúor, cloro, dióxido de carbono y agua conocido como distrito minero Cerro de Mercado (figura 5); en el proceso de enfriamiento grandes volúmenes de hierro ricos en vapores fueron esparcidos en la atmósfera y cristalizaron como hematita pulverulenta de grano fino formando un manto de ceniza que cubrió un área de más de 300 km² (Corona-Esquivel y col., 2012). La mineralogía se componen de magnetita y hematita (titano), con cantidades menores de goethita, apatita, y el cuarzo (Alva-Valdivia y col., 2001)

Los tipos de roca presentes en las zonas altas de la zona norte y noroeste son ígneas extrusivas como la riolita y toba riolítica, aunque se encuentra un poco de

basalto en las zonas altas del noreste de la ciudad (INEGI, 1976); las rocas riolíticas no parecen haber sido afectados por la alteración hidrotermal lo que implica que en su formación los minerales se oxidaron a temperaturas superiores a 300°C. (Alva-Valdivia y col., 2001) El suelo es aluvial formado por depósitos de sedimentos arrastrados por una corriente de agua (INEGI, 1976).

La ciudad presenta una variación de elevación desde los 1870 hasta 2000msnm (figura 6) (INEGI)

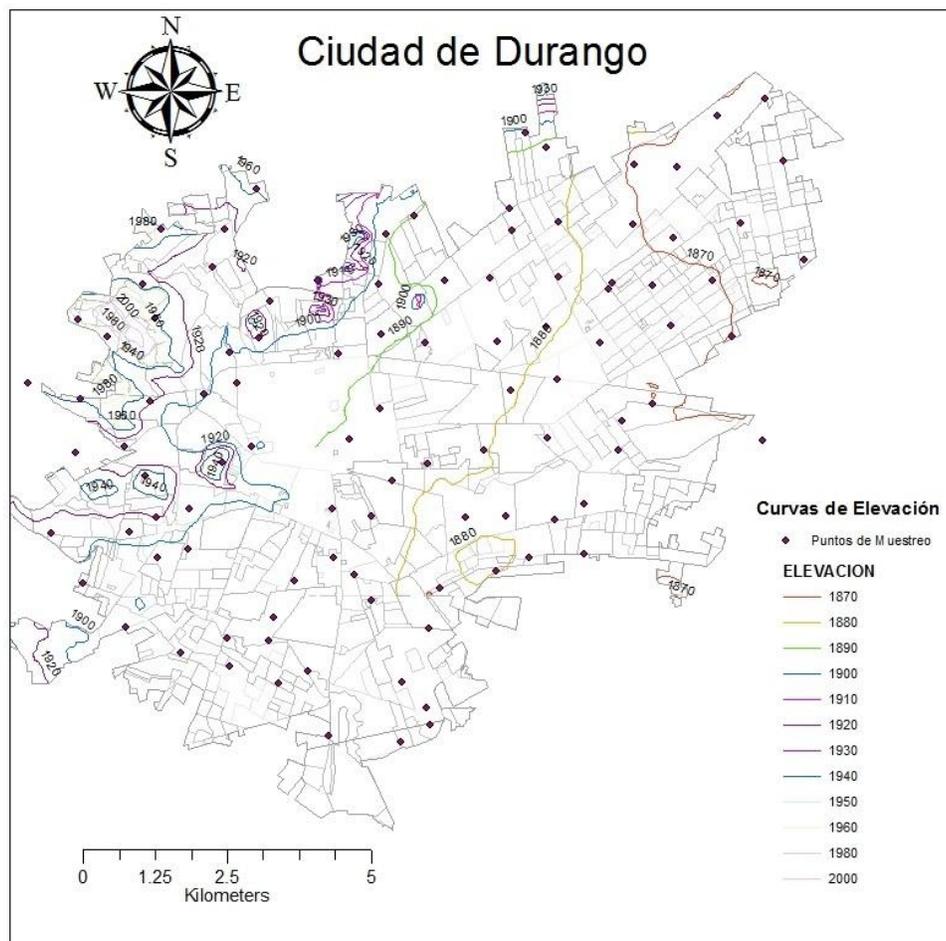


Figura 6: Curvas de Nivel en la ciudad de Durango

4.1.2.3 Edafología

La ciudad de Durango presenta varios tipos de suelo y mezclas de estos, algunos suelos arcillosos como Xerosol, Planosol Eutrico, Vertisol Cromico, Vertisol Pelico; suelos ricos en materia orgánica como Feozem, Castañozem y Regosol; y suelos delgados presentes en las zonas mal altas como el Litosol y Regosol Eutrico (INEGI,1974).

4.2 Muestreo y manejo de las muestras

Se realizó un muestreo de suelo superficial dirigido a 10cm de profundidad, se dividió el territorio de la ciudad de Durango en extensiones de 1 Km², tomando una muestra de cada cuadro siguiendo las indicaciones de la NMX-AA-132-SCFI-2006 de muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra; obteniendo un total 101 muestras de aproximadamente 1 Kg que se almacenaron en bolsas de papel estrasa y bolsas de polipapel para evitar perdida de la muestra (figura 7) .



Figura 7: Almacenamiento de muestras

4.2.1 Secado y cribado

Las muestras se extendieron en cajas de cartón al ambiente para secarse, evitando en todo momento la contaminación de las muestras (figura 8), se puede observar una variedad en los tipos de suelo recolectados por la diferencia de texturas y colores entre las muestras.



Figura 8: Secado a temperatura ambiente de las muestras

Posteriormente se cribaron con tamices de la serie Tyler de acero inoxidable para obtener un tamaño de partícula menor a 2mm según la NMX-AA-132-SCFI-2006.



Figura 9: a) Partículas mayores a 2mm, b) Partículas menores a 2mm.

4.3 Medición de pH

Siguiendo las indicaciones de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, se aplicó un procedimiento electrométrico para medir pH en las muestras de suelo.

Se utilizó una relación 1:1 de 20ml de agua desionizada y 20g de muestra de suelo pesados en una balanza calibrada (figura 10a), se agregó un agitador magnético pequeño a cada una de las mezclas (figura 10b).



Figura 10: a) Pesado de 20g la muestra, b) Mezcla 1:1 de agua desionizada y suelo.

La agitación en una parrilla magnética a 300 rpm duro 5 minuto como marca la norma a temperatura ambiente (figura 11), dejando reposar la mezcla durante 1 hora para hacer la medición de pH con un potenciómetro (figura 12).



Figura 11: a) Agitación magnética en parrillas, b) Potenciómetro

4.4 Digestión ácida con horno de microondas

El método EPA 3051a describe el procedimiento de la extracción total de metales como As y Pb mediante la realización de una digestión ácida de suelo en un horno de microondas (Milestone Ethos or Start labstation); que cuenta con un sistema giratorio con capacidad para 12 vasos de Teflón (politetrafluoroeteno, por sus siglas en ingles PTFE), el vaso denominado como control monitorea la temperatura de una de las muestras, cada vaso necesita su armado especializado.

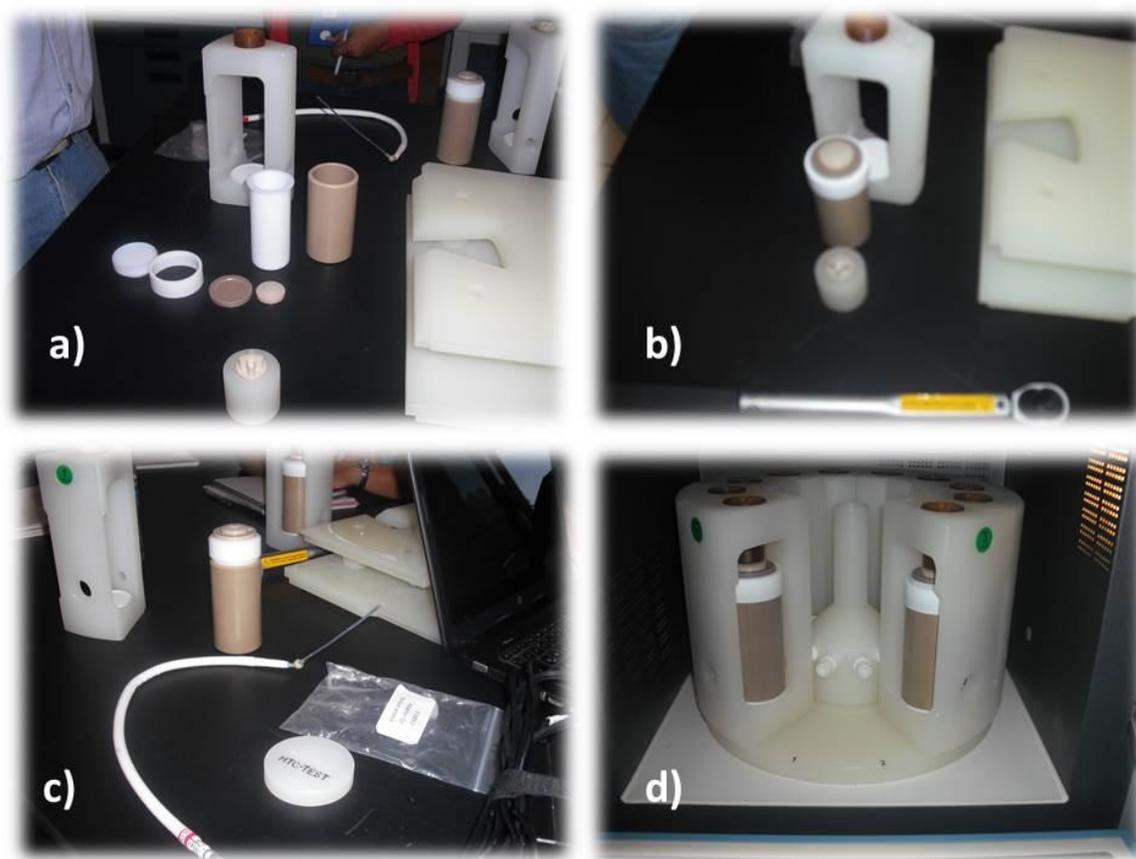


Figura 12: Armado de los vasos (a) Vaso desmontado, b) Vaso semiarmado, c) Sensor de temperatura para vaso control. d) Sistema giratorio con vasos colocados.

Antes de realizar el procedimiento todo el material a utilizar fue lavado con ácido nítrico (HNO_3) al 10%, enjuagado con agua desionizada y secado al ambiente libre de polvo.

Para el llenado de los vasos de teflón se pesó 0.5g de muestra de suelo directamente en el recipiente para evitar pérdida de la muestra, como solución de extracción se añadió HNO₃ al 65%.

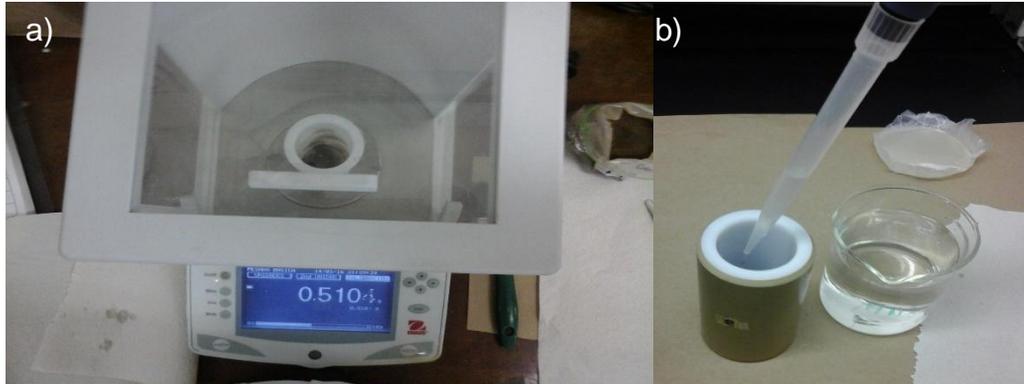


Figura 13: a) Pesado de la muestra, b) Adición de HNO₃ al 65%.

El método utilizado en el horno de microondas se describe en la tabla siguiente:

Tabla 3: Método de digestión de suelo en horno de microondas.

Etapa	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Energía (W)
Rampa de temperatura	10	20-175	1000w
Mantenimiento de la temperatura	15	175	
Enfriamiento	5	175-30	

El equipo mostró una gráfica de cada digestión realizada para verificar que se alcance la temperatura deseada.

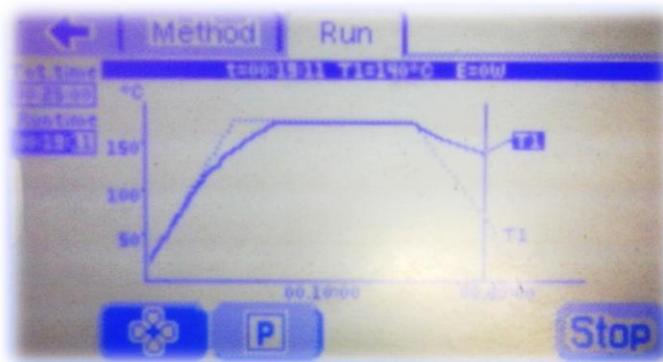


Figura 14: Gráfica del proceso de digestión en horno de microondas

Las soluciones obtenidas fueron filtradas y aforadas a 25ml y almacenadas en envases de plástico (figura 15).

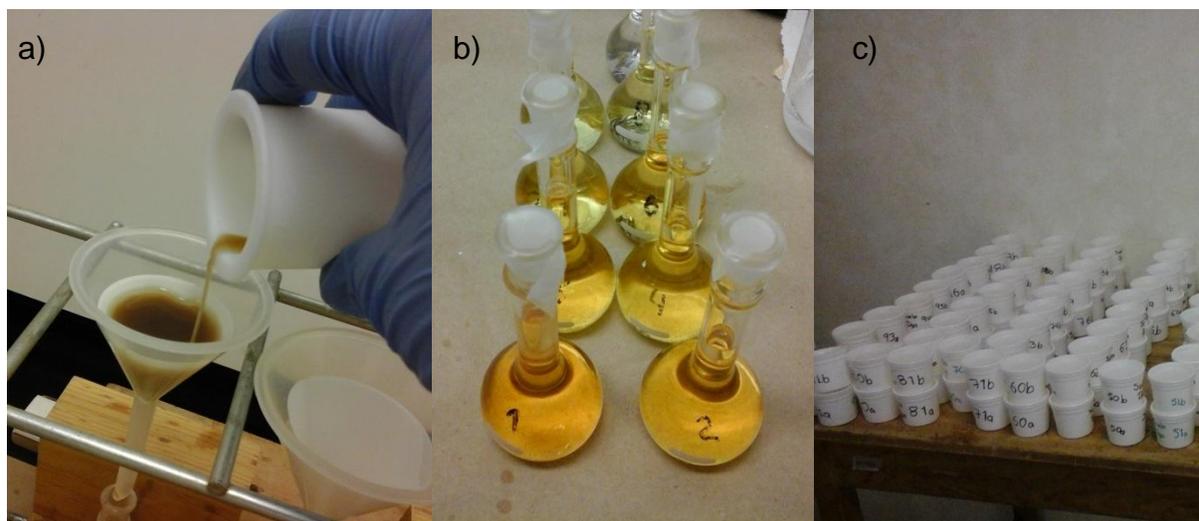


Figura 15: a) Filtrado, b) Aforo a 25ml y c) Almacenamiento de soluciones

Para la validación del método se trabajó cada muestra por duplicado, utilizando blancos reactivos y un suelo de referencia estandarizado (NIST 2710a Montana I Soil) de concentración conocida.

4.5 Cuantificación de As y Pb

La cuantificación de las concentraciones totales obtenidas en las soluciones se realizó por Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA), en el equipo Perkin Elmer AAnalyst 700

4.5.1 Cuantificación de Pb

Se utilizó EAA por Flama para Pb con una curva de calibración de 0.5, 1, 2 y 4 mg/L, los datos espectrales y de validación del método de análisis se muestran en la tabla 4 NIST medidos (tabla). Se realizó el cálculo de mg/L a mg/kg utilizando la fórmula:

$$\text{Concentracion} \left(\frac{mg}{Kg} \right) = \frac{\text{Concentración} \left(\frac{mg}{L} \right) \times \text{Volumen}(L) \times \text{Factor de Dilusión}}{\text{Peso} (Kg)}$$

Tabla 4: Datos espectrales Pb.

Técnica	Slit	λ (Longitud de onda)	L.D.	% Recuperación	Coefficiente de correlación
Flama	0.7 nm	193.7 nm	0.001	82 -118	0.9997

4.5.1.1 Estadísticas Descriptivas de Pb

Se utilizaron los datos de la tabla 5 para calcular los límites de los intervalos de la tabla de frecuencias.

Tabla 5: Calculo de frecuencias para Pb

Clases	Rango		Amplitud
$K=1+3.32\text{Log}n$	Mayor	Menor	$A=R/K$
7.65	134.17	8.3	15.73
8	R=	125.87	

4.5.2 Cuantificación de As

Se utilizó EEA por Horno de Grafito para As con una curva de calibración de 50, 100, 150 y 200 $\mu\text{g/L}$, y los datos espectrales y de validación de análisis (tabla 6). Se realizó el cálculo de mg/L a mg/kg utilizando la fórmula:

$$\text{Concentracion} \left(\frac{\text{mg}}{\text{Kg}} \right) = \frac{\text{Concentración} \left(\frac{\mu\text{g}}{\text{L}} \right) \times \text{Volumen}(\text{L}) \times \text{Factor de Dilusión}}{\text{Peso} (\text{g})}$$

Tabla 6: Datos espectrales As

Técnica	Slit	λ (Longitud de onda)	L.D.	% Recuperación	Coefficiente de correlación
Horno de Grafito	0.7 nm	283.3 nm	0.0001	94 -120	0.9973

4.5.2.1 Estadísticas Descriptivas de As

Se utilizaron los datos de la tabla 7 para calcular los límites de los intervalos de la tabla de frecuencias.

Tabla 7: Calculo de frecuencias para As

Clases	Rango		Amplitud
$K=1+3.32\text{Log}n$	Mayor	Menor	$A=R/K$
7.65	41.59	4.37	4.65
8	R=	37.22	

4.6 Estratificación de Peligro y Vulnerabilidad

4.6.1 Peligro por presencia de As y Pb

Se tomó como nivel de peligro más alto (P=1) las concentraciones de referencia totales (CR_T) por tipo de uso de suelo que marca la NORMA Oficial Mexicana 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; para uso agrícola/residencial/comercial de 22mg/kg para As y de 400mg/kg para Pb; y se estratifico el nivel de peligro como se muestra en la tabla 8.

Tabla 8: Estratificación de Peligro por presencia de EPT

Peligro	Coeficiente	Elemento	mg/kg
Bajo	<0.25	As	<5.50
		Pb	<100
Medio	0.26 a 0.50	As	5.6 a 11
		Pb	101 a 200
Alto	0.51 a 0.75	As	11.1 a 16.5
		Pb	201 a 300
Muy Alto	>0.76	As	16.6 a 22
		Pb	301a 400

4.6.2 Variables de Vulnerabilidad

4.6.2.1 pH.

La estratificación de la vulnerabilidad por distribución de pH se clasifica para As tomando como nivel Muy alto (V=1) valor de pH >8.5, mientras que para Pb se toma el nivel Muy Alto (V=1) valor de pH <5, de acuerdo a las propiedades químicas de los elementos y la clasificación de tipo de suelo según el valor de pH (tabla 9).

Tabla 9: Niveles de vulnerabilidad de pH para As y Pb respectivamente.

pH	Clasificación	V. As		V. Pb	
< 5.0	ácido	Bajo	0 - 0.25	Muy Alto	0.76 - 1
5.1-6.5	Moderadamente ácido			Alto	0.51 - 0.75
6.6-7.3	Neutro	Medio	0.26 - 0.50	Medio	0.26 - 0.50
7.4-8.5	Medianamente alcalino	Alto	0.51 - 0.75	Bajo	0 - 0.25
> 8.5	Fuertemente alcalino	Muy Alto	0.76 - 1		

4.6.3 Matriz de Riesgo

La estimación de riesgo se realizó siguiendo los criterios de la tabla 10 para cada muestra.

Tabla 10: Matriz de Riesgo

P. Muy Alto	Riesgo Alto	Riesgo Alto	Riesgo Muy Alto	Riesgo Muy Alto
P. Alto	Riesgo Medio	Riesgo Medio	Riesgo Alto	Riesgo Muy Alto
P. Medio	Riesgo Bajo	Riesgo Medio	Riesgo Medio	Riesgo Alto
P. Bajo	Riesgo Bajo	Riesgo Bajo	Riesgo Medio	Riesgo Alto
	V. Baja	V. Media	V. Alta	V. Muy Alta

4.7 Análisis superficial en SIGs

Utilizando el programa Arcgis 9.3, se realizó un análisis espacial de interpolación por cuatro métodos Distancia Inversa Ponderada (IDW por sus siglas en inglés), Kriging, Natural Neighbor y Spline; para elegir el más adecuado en concentraciones de mg/kg de As y Pb en la ciudad de Durango. A continuación se presentan los mapas de distribución por interpolación de los diferentes métodos para mg/kg de As (figura 16 y 17).

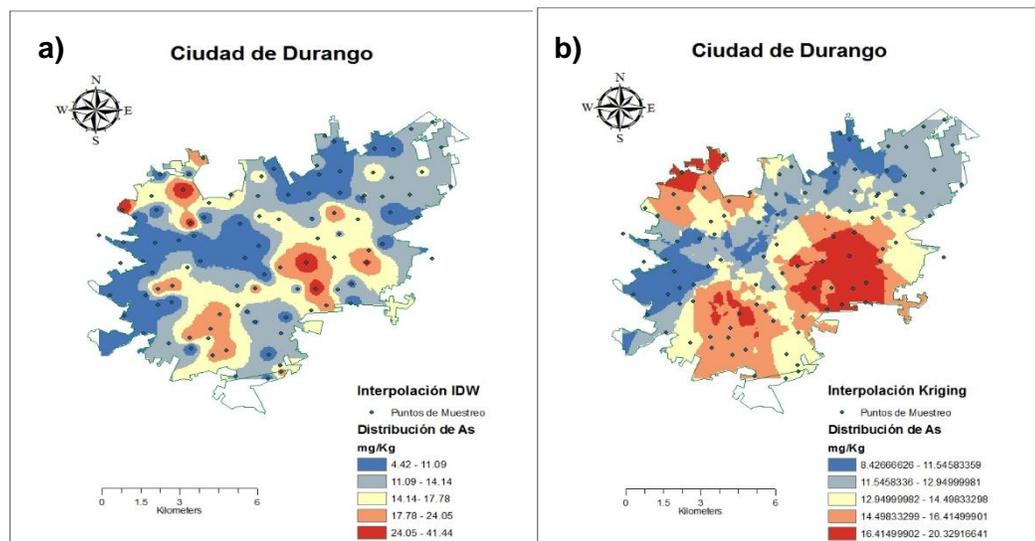


Figura 16: a) Interpolación IDW, b) Interpolación Kriging.

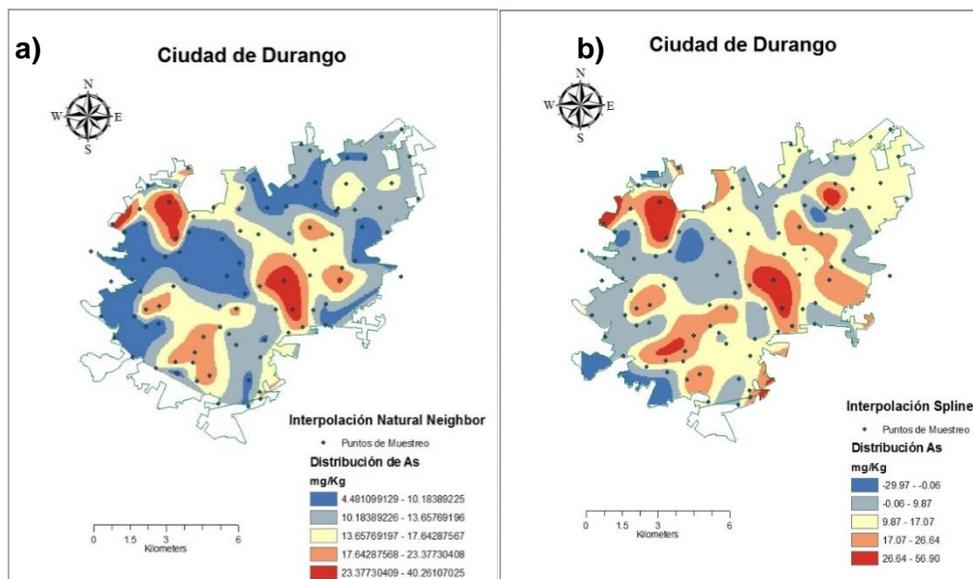


Figura 17: a) Interpolación Natural Neighbor, b) Interpolación Spline

Se definió el método Spline, que estima los valores usando una función matemática que minimiza la curvatura general de la superficie, como método de interpolación de puntos para las concentraciones totales de As y Pb en mg/kg.

Se crearon isólineas de concentración total de As y Pb con un intervalo de 5mg/kg a partir de la capa raster de interpolación creada por el método Spline (figura 26 y figura 28) con la herramienta Contour del análisis espacial de superficie en Arcgis 9.3, finalmente se convirtieron las isólineas a polígonos vectoriales para una mejor presentación visual.

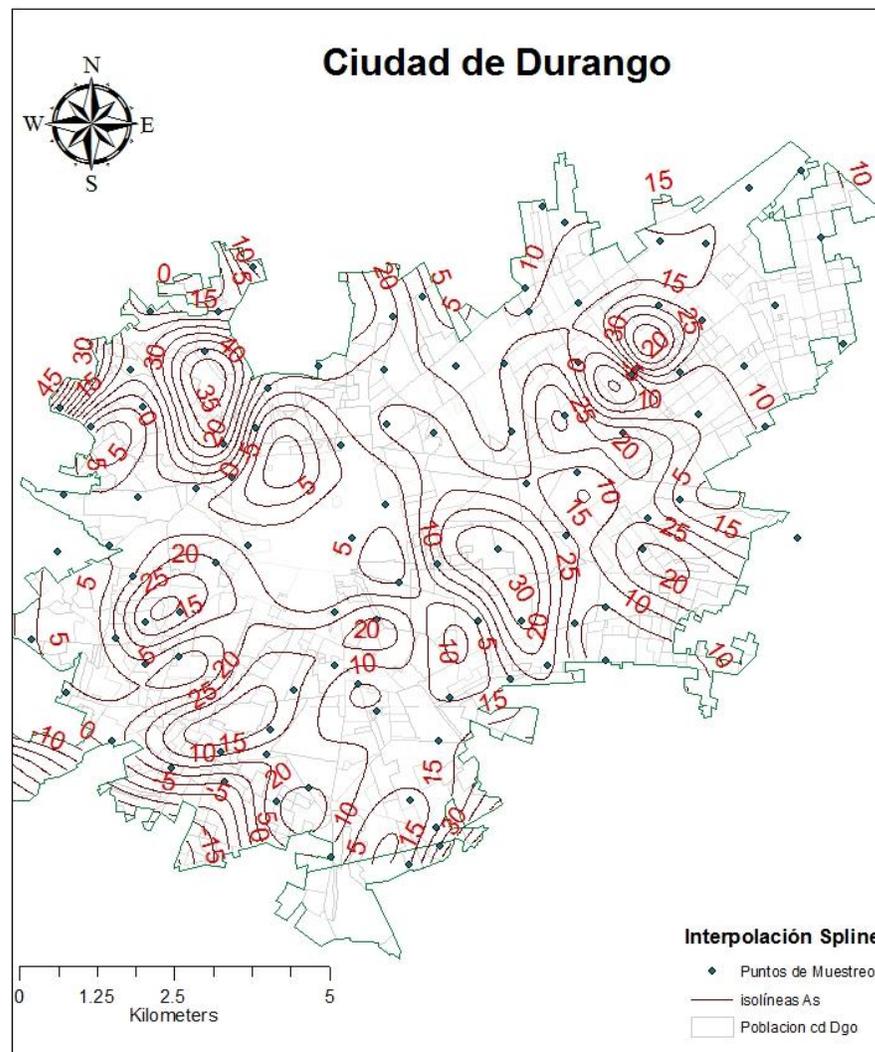


Figura 18: Isólineas de mg/kg de As en la ciudad de Durango

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Cuantificación de As y Pb

Las concentraciones totales en mg/kg de As y Pb encontrados en cada muestra de suelo superficial de la ciudad de Durango se presentan en la tabla 11 y se describen en estadísticas descriptivas.

Tabla 11: Concentraciones totales de As y Pb

ID	mg/kg As	mg/kg Pb	ID	mg/kg As	mg/kg Pb	ID	mg/kg As	mg/kg Pb	ID	mg/kg As	mg/kg Pb
1	36.14	41.55	26	12	41.25	51	10.04	15.42	76	15.94	18.54
2	9.77	49.85	27	15.49	27.33	52	5.93	33.2	77	6.08	26.99
3	21.82	31.03	28	13.65	28.05	53	4.97	37.6	78	8.2	27.54
4	8	31.21	29	9.38	32.55	54	8.6	62.63	79	16.25	26.84
5	17.37	37.07	30	21.42	59.6	55	7.48	26.01	80	10.73	26.31
6	41.59	46.11	31	20.31	50.11	56	6.21	29.12	81	10.29	23.17
7	28.56	29.21	32	10.5	15.59	57	13.51	43.4	82	9.86	41.98
8	7.14	15.35	33	10.78	28.73	58	6.4	81.6	83	10.94	23.24
9	14.76	38.01	34	8.68	19.01	59	7.02	49.97	84	7.15	39.87
10	18.24	26.46	35	9.32	18.23	60	6.66	82.09	85	8.31	41.33
11	17.96	127.08	36	19.91	32.45	61	7.83	57.48	86	12.17	21.25
12	16.38	57.86	37	13.89	21.19	62	5.14	59.74	87	12.05	27.83
13	17.65	28.41	38	13.33	31.63	63	8.53	60.28	88	9.23	20.34
14	24.66	54.67	39	19.95	19.33	64	7.62	63.23	89	12.12	25.13
15	13.52	52.55	40	18.7	36.66	65	7.24	134.17	90	13.83	26.88
16	15.5	49.24	41	16.94	19.67	66	8.29	21.33	91	8.4	28.05
17	33.32	32.69	42	22.04	24.04	67	4.87	19.41	92	9.76	30.47
18	15.69	33.21	43	23.67	53.29	68	6.13	24.67	93	10.76	26.37
19	18.3	58.58	44	21.16	40.29	69	8.53	17.68	94	11.39	31.54
20	25.45	52.84	45	18.19	65.14	70	7.06	8.3	95	14.71	21.84
21	10.01	24.75	46	11.9	37.25	71	6.41	11.08	96	11.53	43.81
22	12.16	45.15	47	14.92	31.8	72	4.37	14.92	97	12.4	26.82
23	7.4	30.37	48	23.94	77.14	73	8.19	16.45	98	12.04	32.51
24	21.45	31.47	49	23.64	27.3	74	15.75	30.04	99	12.33	52.78
25	31.46	53.38	50	9.78	18.62	75	12.63	30.47	100	9.66	81.09
									101	8.05	71.19

La recuperación de los suelos de referencia estandarizados NIST SRM 27101 fue de un 93.55% promedio para Pb siendo su concentración conocida de 5520 mg/kg de Pb (tabla 12) y un 85.72% promedio para As con una concentración conocida de 1540 mg/kg de As (tabla 13).

Tabla 12: Recuperación de Pb

# NIST 2710a	Pb mg/kg	Concentración Estándar mg/kg	% Recuperación
1	5113.73	5520	92.64
2	5007.02		90.71
3	5325.53		96.48
4	5110.17		92.58
5	5264.70		95.38
Promedio=	5164.23	Promedio=	93.55

Tabla 13: Recuperación de As

# NIST	As	Concentración Estándar	% Recuperación
1	1287.84	1540	83.63
2	1272.05		82.60
3	1446.59		93.93
4	1064.23		69.11
5	1529.60		99.32
Promedio=	1320.06	Promedio=	85.72

Estos porcentajes de recuperación indican que el método de extracción de los elementos fue eficiente, además los 6 blancos reactivos no presentaron concentraciones de As ni Pb, por lo que se puede decir que el manejo de los instrumentos y la realización del proceso de digestión ácida en horno de microondas se realizó de acuerdo a las normas correspondientes.

5.1.1. Estadísticas Descriptivas de As y Pb

El resumen del análisis descriptivo de las variables mg/kg As y mg/kg Pb en el programa STATISTICA se presenta en la tabla 14.

Tabla 14: Estadística Descriptiva de As y Pb

VARIABLE	Valid N	Media	Mínimo	Máximo	Desv. Estand.	Curtosis
mg/kg As	101	13.54	4.37	41.59	7.079	2.62
mg/kg Pb	101	37.90	8.30	134.17	21.129	6.02

Los datos presentan un valor de curtosis positivo lo que indica una distribución de apuntamiento leptocúrtica asimétrica (tabla 11), el supuesto de normalidad de los datos de Kolmogorov-Smirnov con un valor de $p < 0.05$ para As y $p < 0.01$ para Pb es rechazada (figura 20), por lo tanto, las concentraciones totales de mg/kg de As y Pb no presentan una distribución normal en el suelo superficial de la ciudad de Durango.

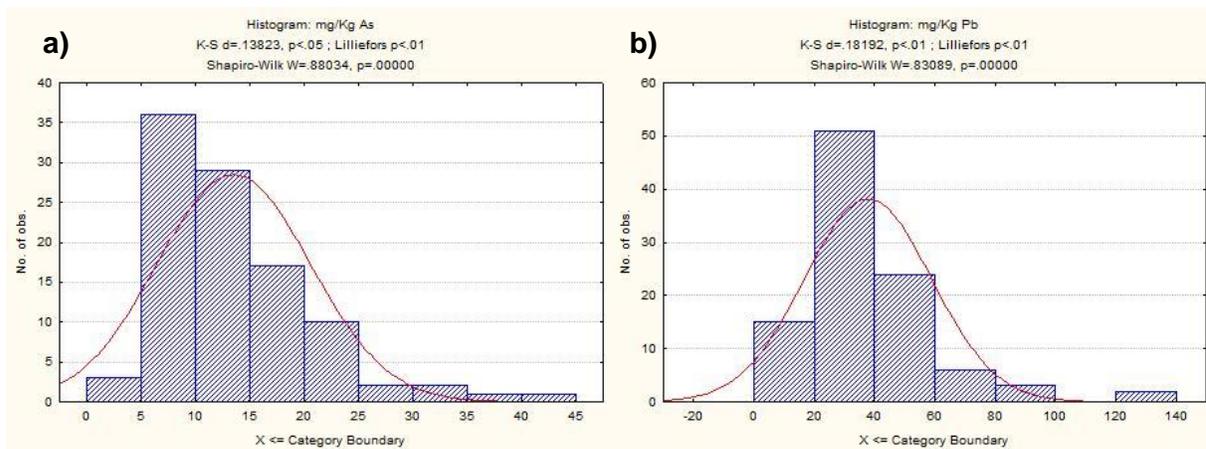


Figura 19: Histograma de distribución de datos a) As, b) Pb

Las concentraciones totales de Pb en el suelo superficial de la ciudad de Durango se distribuyen en 8 clases, desde la concentración mínima de 8.3 mg/kg de Pb hasta una concentración máxima de 134.24 mg/kg de Pb con un rango de 126.87 mg/kg que se muestran en la tabla 11, donde se observa que el 94.06% de las muestras tiene una concentración total <87.01 mg/kg de Pb (tabla 15), siendo todos los valores encontrados menores al límite máximo permisible de 400 mg/kg según la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 para suelo de uso residencial.

Tabla 15: Distribución de frecuencias de Pb

Clases mg/kg Pb		Frecuencia Absoluta	Porcentaje Total (%)
Li	Ls		
8.30	24.03	23	22.77
24.04	39.78	42	41.58
39.79	55.52	20	19.80
55.53	71.27	10	9.90
71.28	87.01	4	3.96
87.02	102.75	0	0.00
102.76	118.50	0	0.00
118.51	134.24	2	1.98
Total		101	100.00

Las concentraciones totales de As en el suelo superficial de la ciudad de Durango se distribuyen en 8 clases, desde la concentración mínima de 4.37 mg/kg de As hasta una concentración máxima de 41.66 mg/kg de As con un rango de 4.65 mg/kg que se muestran en la tabla 11, donde se observa que el 90.1% de las muestras tiene una concentración total <23.01 mg/kg de As (tabla 16), obteniendo solo el 9.9 % de las muestras concentraciones totales mayores al límite máximo permisible de 22 mg/kg según la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 para suelo de uso residencial.

Tabla 16: Distribución de frecuencias de As

Clases mg/kg As		Frecuencia Absoluta	Porcentaje Total (%)
Li	Ls		
4.37	9.02	31	30.69
9.03	13.69	31	30.69
13.70	18.35	20	19.80
18.36	23.01	9	8.91
23.02	27.67	6	5.94
27.68	32.34	2	1.98
32.35	37.00	1	0.99
37.01	41.66	1	0.99
		101	100.00

5.1.2. Distribución superficial de As y Pb

Los puntos de muestreo y su correspondiente concentración total de mg/kg de As se representan en el mapa de la figura 20, donde los intervalos de concentración de As según la tabla 16 de frecuencias presentan simbología graduada desde 4.37 hasta los 41.66mg/kg encontrados en las muestras de suelo superficial en la ciudad de Durango.

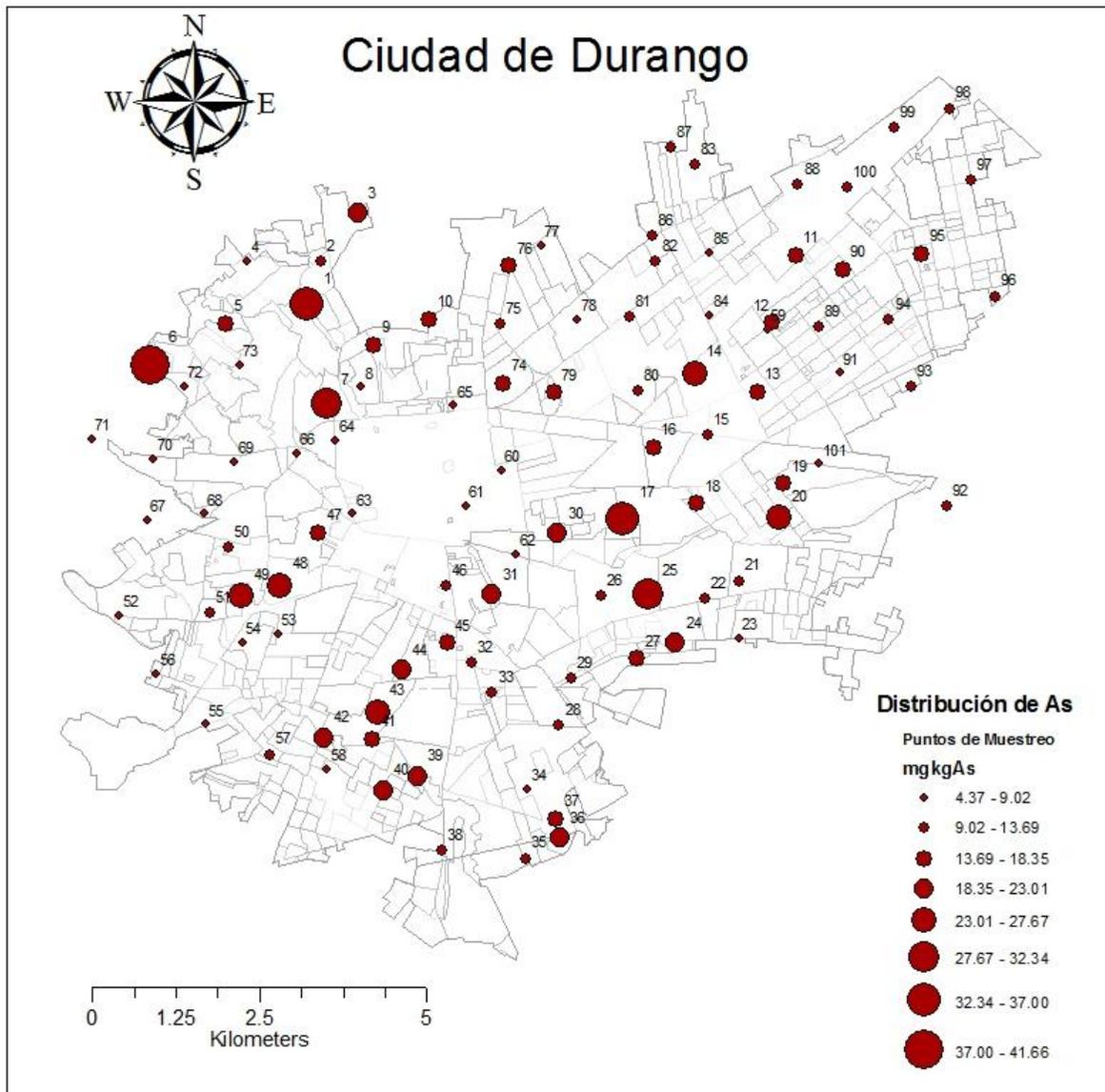


Figura 20: Distribución de As en puntos de muestreo

Los intervalos de concentración total de Pb de la tabla 15 de frecuencias se representan en el mapa de la figura 21 usando simbología graduada desde 8.3 hasta los 134.24 mg/kg encontrados en las muestras de suelo superficial en la ciudad de Durango.

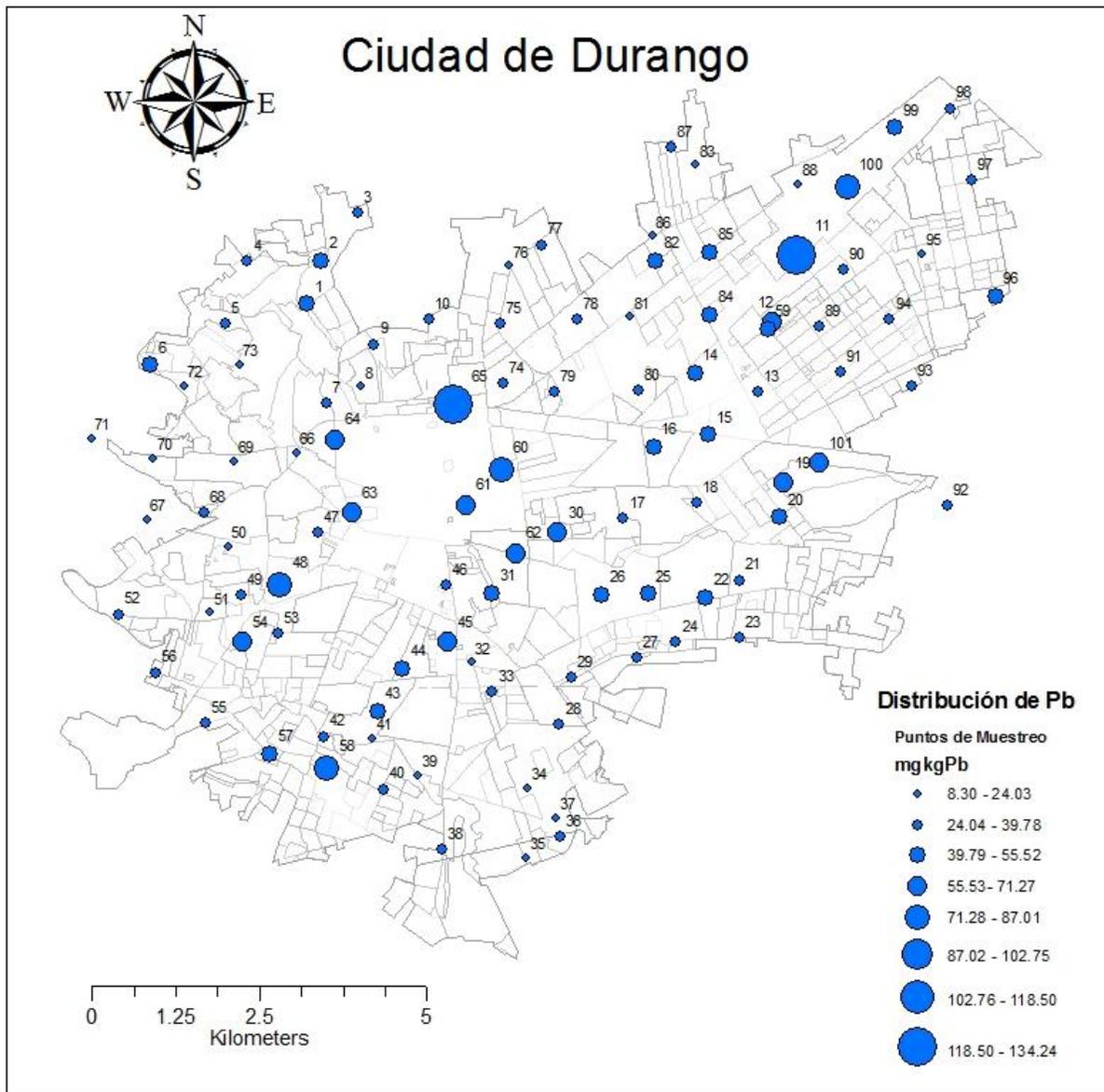


Figura 21: Distribución de Pb en puntos de muestreo

5.2 Análisis Estadístico

5.2.1 Correlación

El análisis de correlación entre las variables pH, elevación, mg/kg As y mg/kg Pb mostro la existencia de una relación significativa entre la presencia de Pb y su elevación dado que $p < 0.05$ (tabla 17), aunque el programa STATISTICA no marca una correlación significativa entre las variables mg/kg As y pH también los coeficientes de correlación son menor a $\alpha = 0.05$.

Tabla 17: Análisis de correlación de variables.

	pH	Elevación	mg/kg As	mg/kg Pb
pH	1.00	-0.01	-0.01	0.00
Elevación	-0.01	1.00	-0.03	-0.23
mg/kg As	-0.01	-0.03	1.00	0.10
mg/kg Pb	0.00	-0.23	0.10	1.00

La grafica de correlación entre la variable mg/kg Pb y mg/kg As muestra un coeficiente $r = 0.10451$ y se puede observar un patrón en el comportamiento en la mayoría de los puntos aunque se pueden visualizar 2 puntos con datos aberrantes que pueden afectar el coeficiente de correlación entre las variables (figura 22).

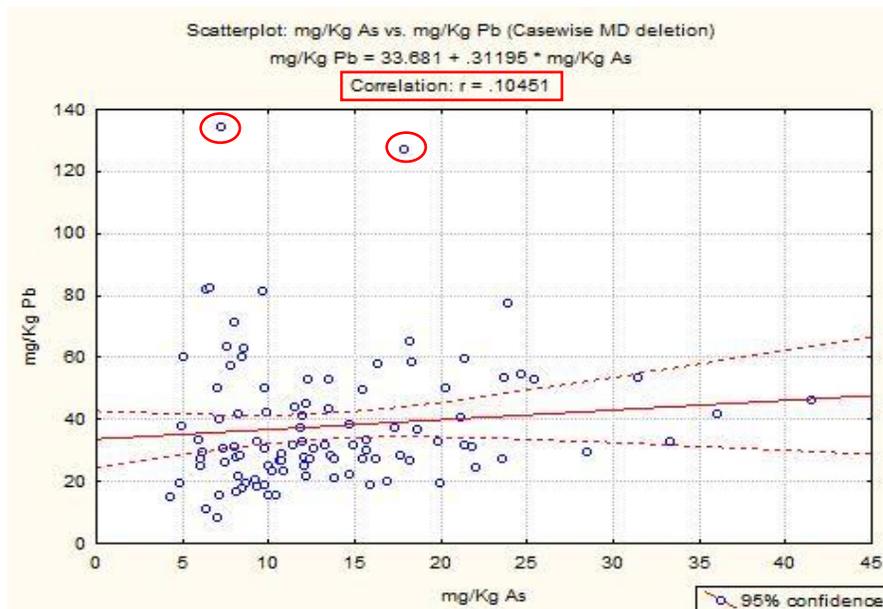


Figura 22: Correlación entre Pb y As

La grafica de dispersión por casos presentan los números de muestra que salen del patrón, la muestra #11 con contenidos de 17.96 mg/kg de As y 127.07mg/kg de Pb, mientras que la muestra #65 tiene 7.24 mg/kg de As 134.16 mg/kg de Pb (figura 23).

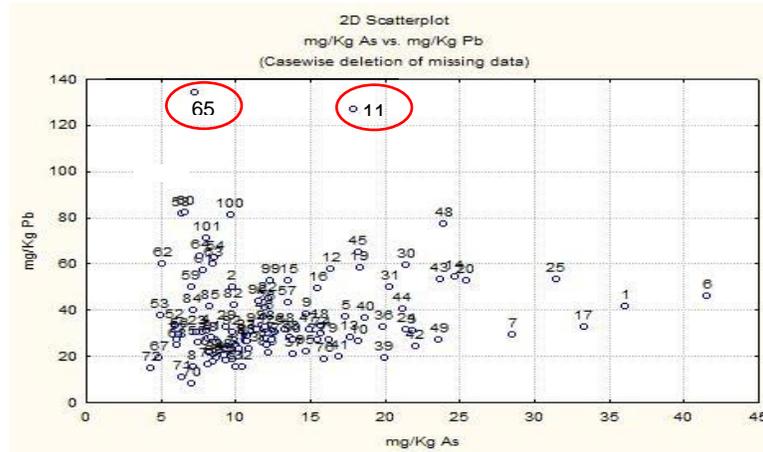


Figura 23: Dispersión por sitios de muestreo

La gráfica de correlación entre la variable mg/kg Pb y la elevación muestra una relación inversa por el coeficiente r con valor negativo (figura 24), lo que significa que a menor elevación hay más cantidad de Pb en la muestra de suelo superficial.

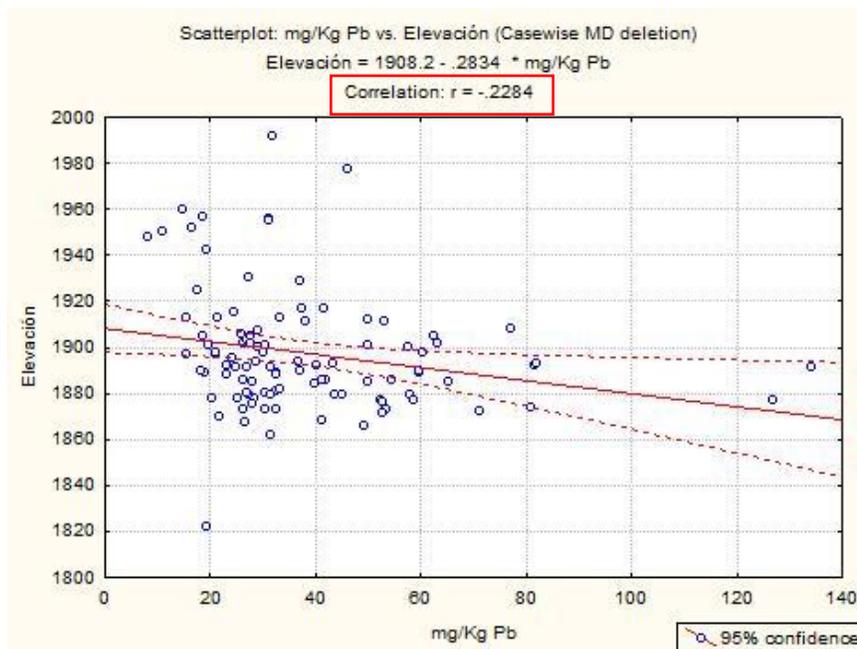


Figura 24: Correlación entre Pb y Elevación

5.2.2 Agrupamiento

El análisis Cluster por el método Ward utilizando las distancias Euclidianas da como resultado 4 agrupaciones principales

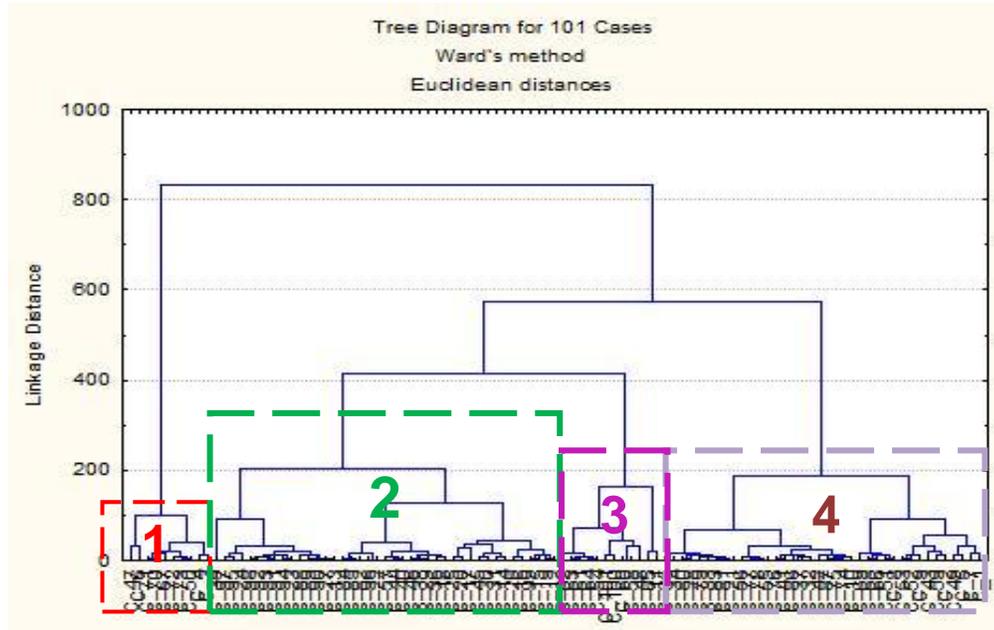


Figura 25: Análisis Cluster

Los cuatro grupos formados según el análisis de agrupamiento se muestran en las tablas 18 y 19:

Tabla 18: Muestras del grupo 1 del análisis Cluster

Grupo 1				
ID	pH	Elev.	As mg/kg	Pb mg/kg
3	7.54	1956	21.82	31.03
4	7.83	1955	8.00	31.21
6	7.19	1977	41.59	46.11
47	7.93	1992	14.92	31.80
50	7.68	1957	9.78	18.62
67	7.14	1942	4.87	19.41
70	7.31	1948	7.06	8.30
71	7.78	1950	6.41	11.08
72	7.93	1960	4.37	14.92
73	7.94	1952	8.19	16.45

Tabla 19: Grupos 2, 3 y 4 del análisis cluster

Grupo 2					Grupo 2 (cont.)					Grupo 4 (cont.)				
ID	pH	Elev.	As	Pb	ID	pH	Elev.	As	Pb	ID	pH	Elev.	As	Pb
12	7.22	1879	16.38	57.86	91	7.32	1875	8.40	28.05	21	7.67	1891	10.01	24.75
13	7.55	1878	17.65	28.41	92	7.48	1873	9.76	30.47	28	7.75	1885	13.65	28.05
14	7.68	1886	24.66	54.67	93	7.96	1873	10.76	26.37	32	7.9	1897	10.50	15.59
15	7.81	1877	13.52	52.55	94	7.26	1879	11.39	31.54	33	7.98	1894	10.78	28.73
16	7.94	1866	15.50	49.24	95	7.58	1870	14.71	21.84	34	7.11	1889	8.68	19.01
17	7.52	1881	33.32	32.69	96	7.72	1879	11.53	43.81	35	7.2	1890	9.32	18.23
18	7.65	1882	15.69	33.21	97	7.95	1867	12.40	26.82	37	7.38	1897	13.89	21.19
19	7.78	1877	18.30	58.58	98	7.68	1873	12.04	32.51	41	7.13	1901	16.94	19.67
20	7.91	1876	25.45	52.84	99	7.81	1871	12.33	52.78	42	7.18	1895	22.04	24.04
22	7.23	1879	12.16	45.15	Grupo 3					43	7.33	1911	23.67	53.29
23	7.55	1880	7.40	30.37	ID	pH	Elev.	As	Pb	49	7.55	1930	23.64	27.30
24	7.85	1862	21.45	31.47	48	7.94	1908	23.94	77.14	51	7.29	1913	10.04	15.42
25	7.41	1873	31.46	53.38	54	7.86	1905	8.60	62.63	52	7.48	1913	5.93	33.20
26	7.94	1868	12.00	41.25	58	7.53	1892	6.40	81.60	53	7.67	1917	4.97	37.60
27	7.73	1879	15.49	27.33	60	7.79	1893	6.66	82.09	55	7.14	1906	7.48	26.01
29	7.61	1889	9.38	32.55	61	7.11	1900	7.83	57.48	56	7.27	1900	6.21	29.12
30	7.55	1889	21.42	59.60	62	7.44	1890	5.14	59.74	59	7.66	1901	7.02	49.97
31	7.82	1885	20.31	50.11	63	7.87	1898	8.53	60.28	66	7.21	1913	8.29	21.33
36	7.29	1888	19.91	32.45	64	7.45	1902	7.62	63.23	68	7.81	1915	6.13	24.67
38	7.47	1891	13.33	31.63	65	7.25	1891	7.24	134.17	69	7.94	1925	8.53	17.68
39	7.56	1822	19.95	19.33	100	7.69	1874	9.66	81.09	74	7.29	1898	15.75	30.04
40	7.65	1894	18.70	36.66	101	7.14	1872	8.05	71.19	75	7.36	1901	12.63	30.47
44	7.48	1892	21.16	40.29	Grupo 4					76	7.67	1905	15.94	18.54
45	7.63	1885	18.19	65.14	ID	pH	Elev.	As	Pb	77	7.71	1903	6.08	26.99
46	7.78	1890	11.90	37.25	1	7.77	1917	36.14	41.55	78	7.55	1905	8.20	27.54
57	7.4	1893	13.51	43.40	2	7.45	1912	9.77	49.85	79	7.19	1891	16.25	26.84
82	7.94	1886	9.86	41.98	5	7.29	1929	17.37	37.07	80	7.56	1886	10.73	26.31
84	7.64	1884	7.15	39.87	7	7.88	1907	28.56	29.21	81	7.55	1892	10.29	23.17
85	7.47	1886	8.31	41.33	8	7.66	1913	7.14	15.35	83	7.28	1888	10.94	23.24
88	7.68	1878	9.23	20.34	9	7.35	1911	14.76	38.01	86	7.85	1898	12.17	21.25
89	7.81	1878	12.12	25.13	10	7.41	1902	18.24	26.46	87	7.14	1902	12.05	27.83
90	7.55	1880	13.83	26.88	11	7.52	1877	17.96	127.08					

5.3 Análisis superficial en SIGs.

La interpolación Spline para las concentraciones de As dio como resultado 78 isólinas que se distribuyen en toda la superficie de la ciudad de Durango (figura 26).

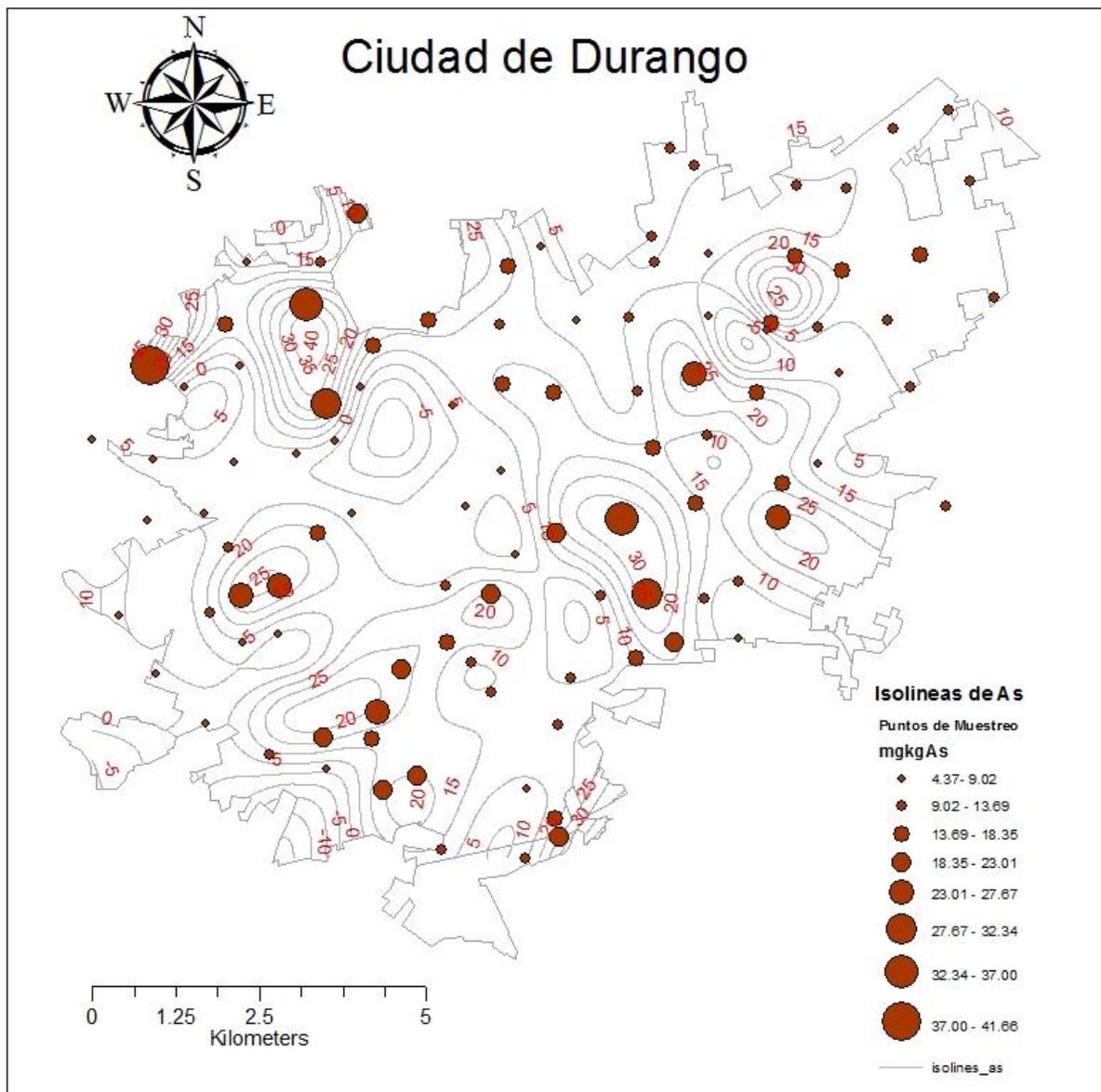


Figura 26: Mapa de isoconcentración de As

La clasificación de los polígonos resultantes de las isolinneas de concentración total de As (figura 26) y Pb (figura 28) en el suelo superficial de la ciudad de Durango, se representaron en mapas de coropletas donde se puede observar en escala de colores la distribución esperada de estos elementos.

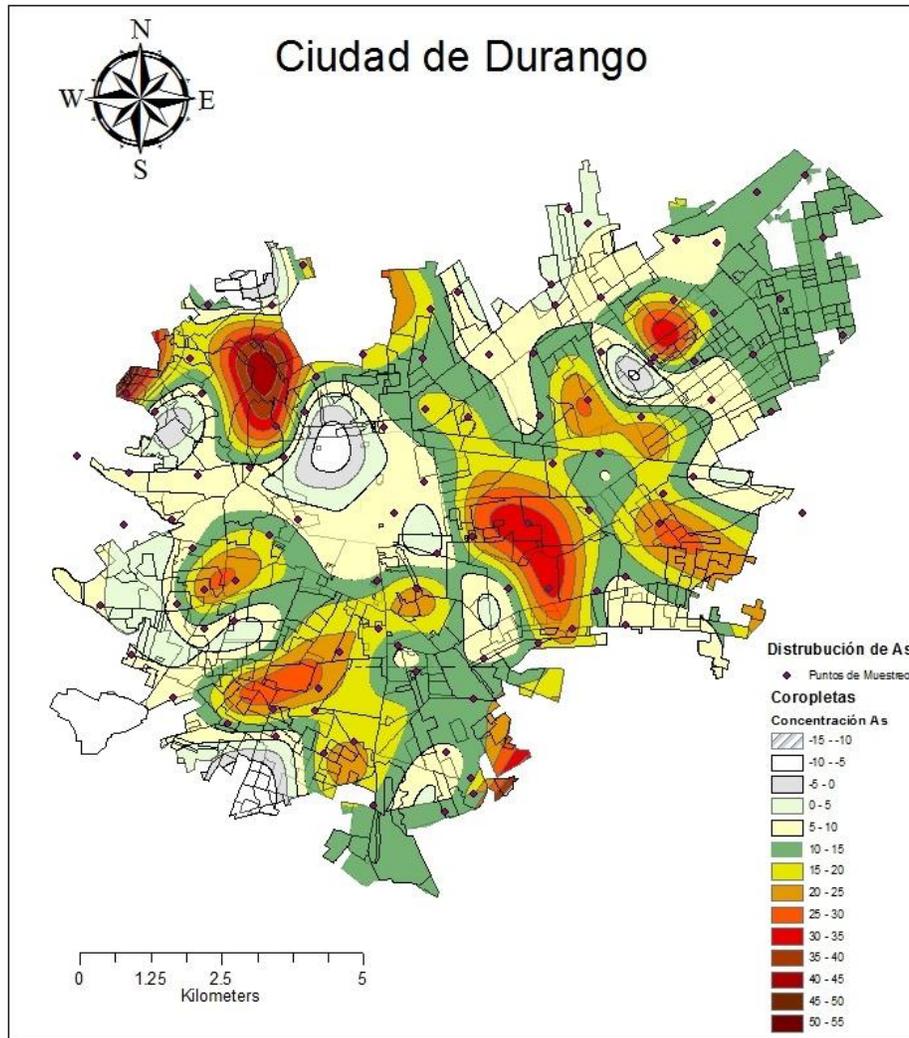


Figura 27: Coropletas de distribución de As en la ciudad de Durango

El análisis espacial indica que las concentraciones de As tienen una tendencia de menor valor al Noroeste (NO) con un incremento hacia mayor valor al Sureste (SE) de la ciudad.

La interpolación Spline para las concentraciones de Pb dio como resultado 240 isólinas que se distribuyen en toda la superficie de la ciudad de Durango (figura 28).

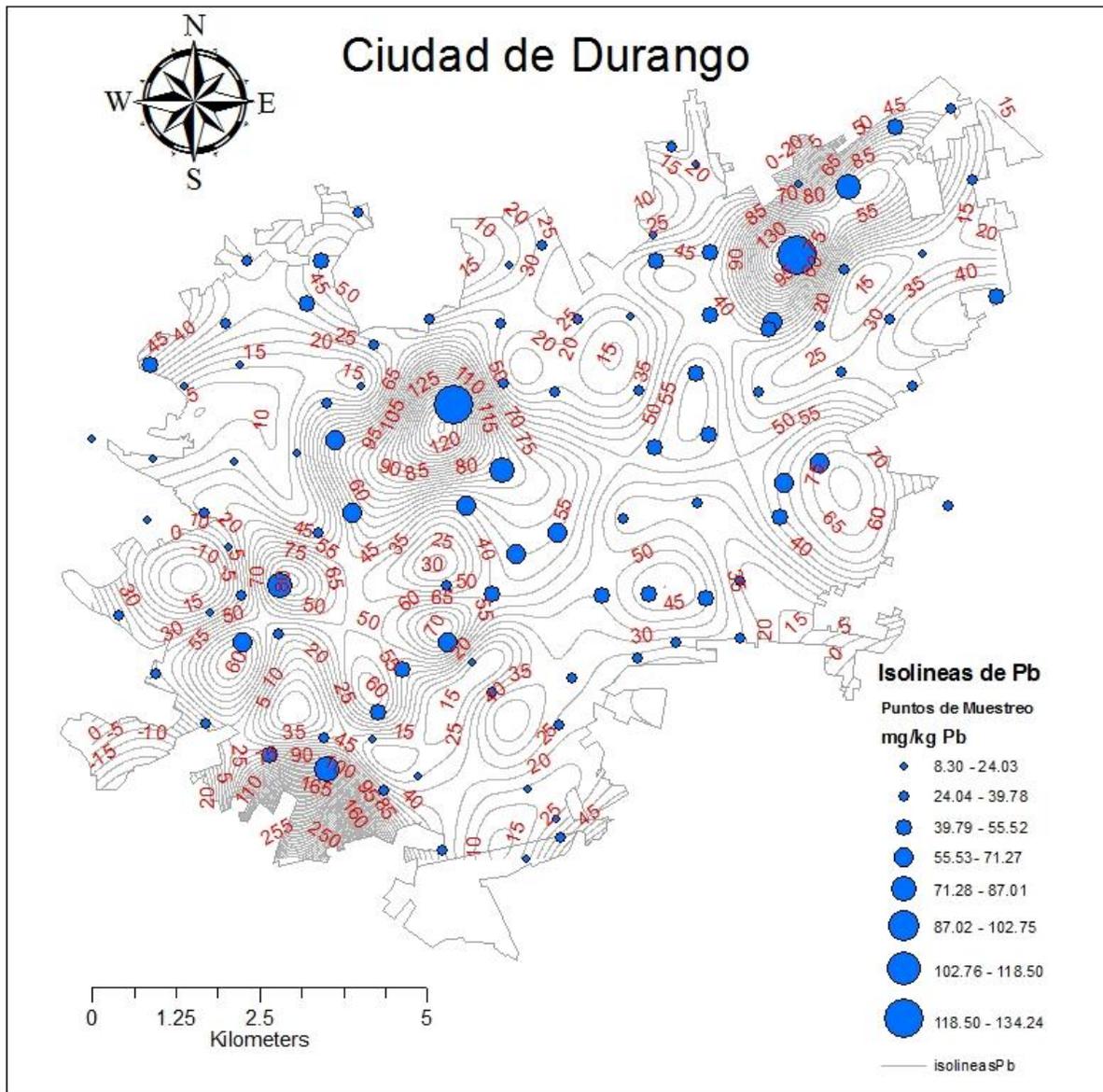


Figura 28: Mapa de Isolíneas de concentración de Pb

La clasificación por coropletas muestra que la mayor superficie al Sureste de la ciudad se encuentra entre las concentraciones de 55 – 60 mg/kg de Pb, mientras que la zona Noroeste presenta los intervalos más bajos con valores <20 mg/kg de Pb (figura 29).

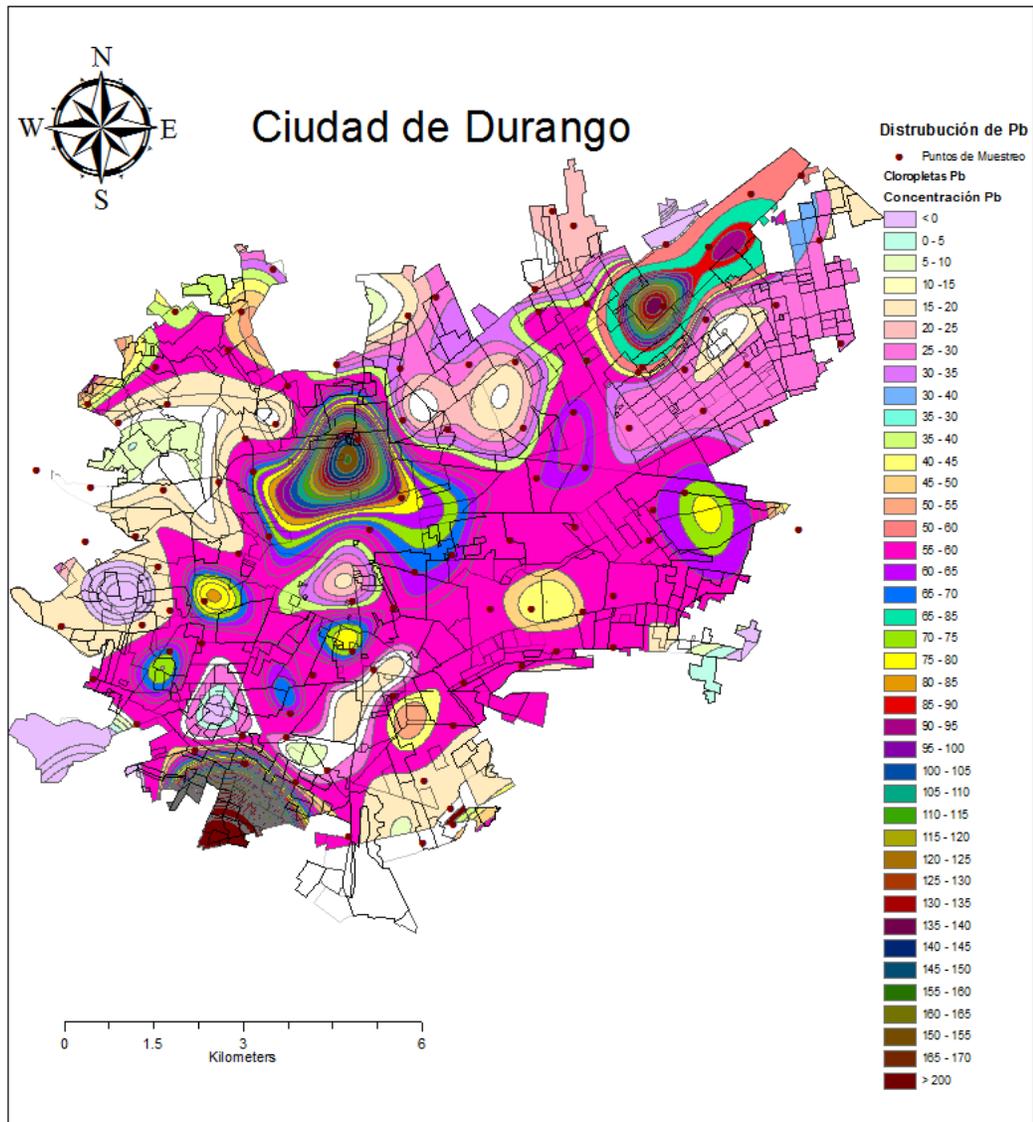


Figura 29: Coropletas de distribución de Pb

El análisis espacial indica que las concentraciones de Pb tienen una tendencia de menor valor al Oeste (O) con un incremento hacia mayor valor al Este (E) de la ciudad.

5.4 Estimación de Riesgo.

5.4.1 Calculo de Peligro por presencia de As y Pb

Los coeficientes de los niveles de peligro de las concentraciones totales de As presentes en las muestras de suelo superficial de la ciudad de Durango se representan en la figura 30, usando como referencia para el nivel de Peligro Más Alto (P=1) el LMP de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 de 22 mg/kg para As

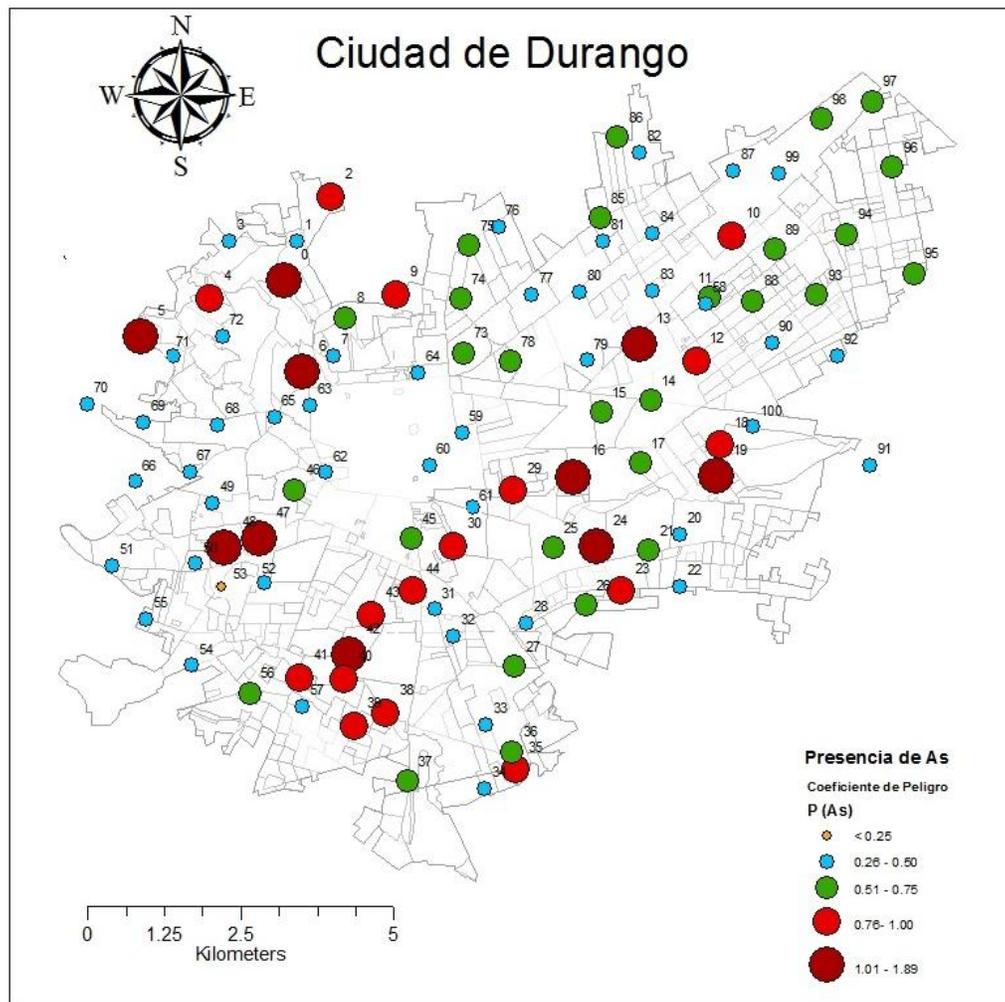


Figura 30: Estratificación de Peligro por presencia de As en puntos de muestreo

La tabla de relación de la concentración de As y el coeficiente de peligro de cada muestra se encuentran en el anexo 1.

En la clasificación de las muestras por nivel de peligro por presencia de As se encontró 1 muestra en nivel bajo, 46 en nivel medio, 29 en nivel alto y 25 en nivel muy alto.

Tabla 20: Clasificación de muestras por Peligro de As

P. Bajo	P. Medio			P. Alto		P. Muy Alto	
<0.25	0.26 - 0.5			0.51 - 0.75		> 0.76	
53	4	58	77	5	75	1	39
	2	59	78	9	76	3	40
	8	60	80	12	79	6	41
	21	61	81	15	86	7	42
	23	62	82	16	87	10	43
	29	63	83	18	89	11	44
	32	64	84	22	90	13	45
	33	65	85	26	94	14	48
	34	66	88	27	95	17	49
	35	67	91	28	96	19	
	50	68	92	37	97	20	
	51	69	93	38	98	24	
	52	70	100	46	99	25	
	54	71	101	47		30	
	55	72		57		31	
	56	73		74		36	
1	46			29		25	Muestras Totales

La estratificación de nivel peligro por presencia de Pb en la ciudad de Durango dado que el nivel de Peligro Más Alto (P=1) es el LMP de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 de 400 mg/kg para Pb, dio como resultado de los 101 puntos de muestreo 99 son clasificados como Peligro Bajo (P<0.25) presentando concentración de Pb <100mg/kg, se muestra en la figura 31 la dispersión de los puntos de bajo peligro y 2 muestras que presentan nivel Medio de Peligro (tabla 18).

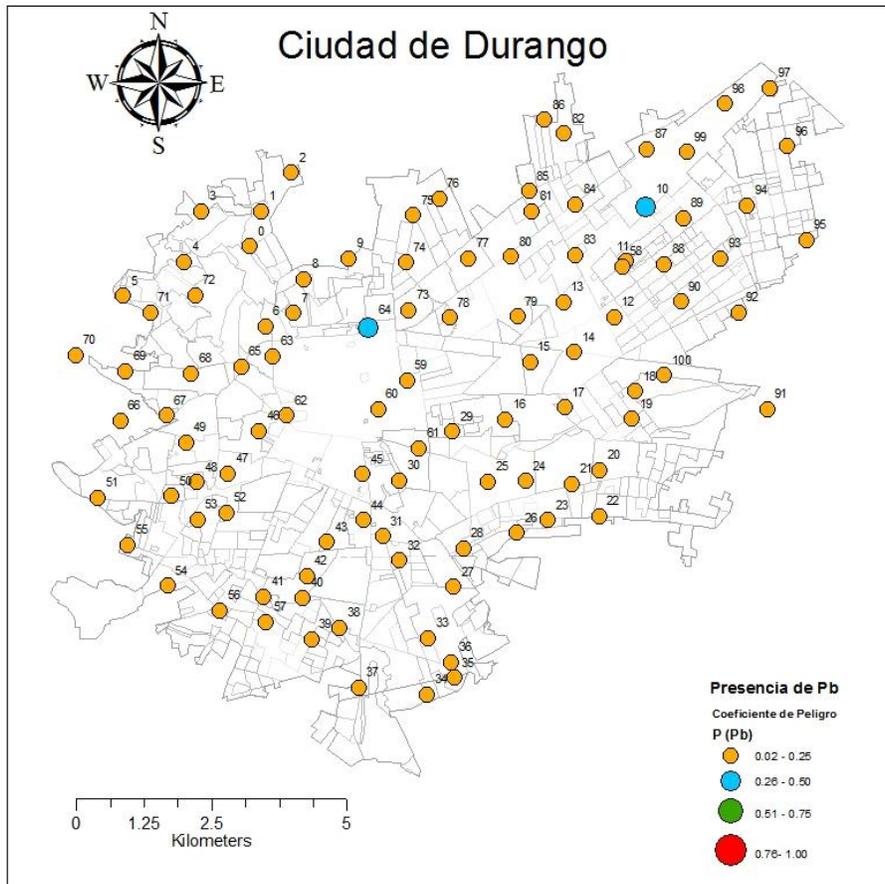


Figura 31: Estratificación de Peligro por presencia de Pb en puntos de muestreo

Tabla 21: Clasificación de muestras por peligro por Pb

P. Bajo										P. Medio	
<0.25										0.26 - 0.50	
1	12	22	32	42	52	62	73	83	93	11	
2	13	23	33	43	53	63	74	84	94	65	
3	14	24	34	44	54	64	75	85	95		
4	15	25	35	45	55	66	76	86	96		
5	16	26	36	46	56	67	77	87	97		
6	17	27	37	47	57	68	78	88	98		
7	18	28	38	48	58	69	79	89	99		
8	19	29	39	49	59	70	80	90	100		
9	20	30	40	50	60	71	81	91	101		
10	21	31	41	51	61	72	82	92			
Total=					99	Total=					2

5.4.2 Cálculo de vulnerabilidad

Las variables para estimar la vulnerabilidad de la presencia de As y Pb fueron el pH de cada sitio de muestreo (figura 32) y su elevación (figura 6).

5.4.2.1 pH en el suelo de la ciudad de Durango

La distribución de los valores detectados de pH en el suelo de la ciudad de Durango se muestra en la figura 32 con valores de entre 7.11 y 7.98, con una media de 7.57 que según la NOM-021-RECNAT-2000 clasifica el suelo como medianamente alcalino.

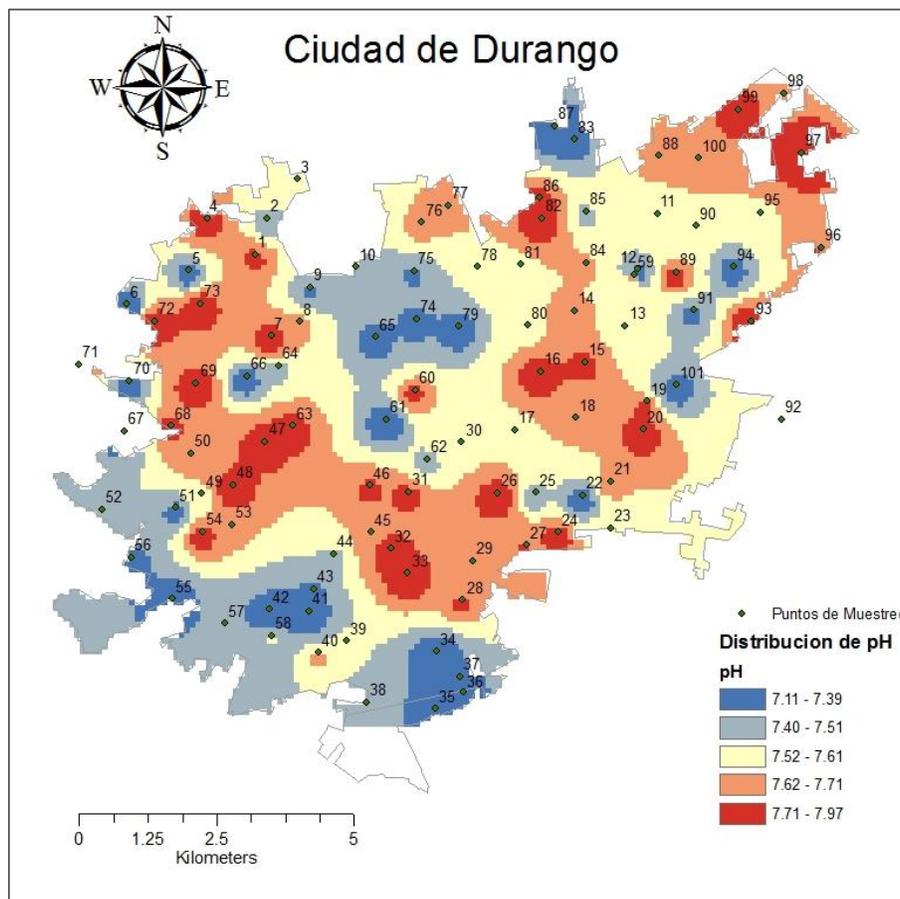


Figura 32: Distribución de pH en el suelo de la ciudad de Durango

La mayor parte de los metales tienden a estar más disponibles a pH ácido, ya que al producirse un descenso del mismo se mejora tanto la solubilidad como su absorción (Roca Fernandez, S.F); excepto As, Mo, Se y Cr, que son más móviles

a pH alcalino (Galán y Romero, 2008). Por lo tanto, la clasificación del nivel de vulnerabilidad de acuerdo al pH y elevación de las muestras por presencia de As y Pb se muestra en la tabla 22.

Tabla 22: Vulnerabilidad de nivel de pH y elevación

ID	Vulnerabilidad de pH					Vulnerabilidad por Elevación				
	pH	As	Nivel	Pb	Nivel	Elev.	por Pb	Nivel	por As	Nivel
1	7.77	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1917	0.63	Alto	0.38	Medio
2	7.45	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1912	0.63	Alto	0.38	Medio
3	7.54	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1956	0.38	medio	0.63	Alto
4	7.83	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1955	0.38	medio	0.63	Alto
5	7.29	0.26 - 0.50	Medio	0 - 0.25	Bajo	1929	0.63	Alto	0.38	Medio
6	7.19	0.26 - 0.50	Medio	0 - 0.25	Bajo	1977	0.13	bajo	0.13	Muy Alto
7	7.88	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1907	0.63	Alto	0.38	Medio
8	7.66	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1913	0.63	Alto	0.38	Medio
9	7.35	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1911	0.63	Alto	0.38	Medio
10	7.41	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1902	0.63	Alto	0.38	Medio
11	7.52	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1877	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
12	7.22	0.26 - 0.50	Medio	0 - 0.25	Bajo	1879	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
13	7.55	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1878	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
14	7.68	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1886	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
15	7.81	0.51 - 0.75	Alto	0.26 - 0.50	Medio	1877	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
16	7.94	0.51 - 0.75	Alto	0.26 - 0.50	Medio	1866	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
17	7.52	0.51 - 0.75	Alto	0.26 - 0.50	Medio	1881	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
18	7.65	0.51 - 0.75	Alto	0.26 - 0.50	Medio	1882	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
19	7.78	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1877	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
20	7.91	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1876	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
21	7.67	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1891	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
22	7.23	0.26 - 0.50	Medio	0 - 0.25	Bajo	1879	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
23	7.55	0.51 - 0.75	Alto	0.26 - 0.50	Medio	1880	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
24	7.85	0.51 - 0.75	Alto	0.26 - 0.50	Medio	1862	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
25	7.41	0.51 - 0.75	Alto	0.26 - 0.50	Medio	1873	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
26	7.94	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1868	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
27	7.73	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1879	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
28	7.75	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1885	0.88	Muy alto	0.13	Bajo

Tabla 23: Vulnerabilidad de nivel de pH y elevación (continuación)

ID	Vulnerabilidad de pH					Vulnerabilidad por Elevación				
	pH	As	Nivel	Pb	Nivel	Elev.	por Pb	Nivel	por As	Nivel
28	7.75	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1885	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
29	7.61	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1889	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
30	7.55	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1889	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
31	7.82	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1885	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
32	7.90	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1897	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
33	7.98	0.51 - 0.75	Alto	0.26 - 0.50	Medio	1894	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
34	7.11	0.26 - 0.50	Medio	0.26 - 0.50	Medio	1889	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
35	7.20	0.26 - 0.50	Medio	0.26 - 0.50	Medio	1890	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
36	7.29	0.26 - 0.50	Medio	0 - 0.25	Bajo	1888	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
37	7.38	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1897	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
38	7.47	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1891	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
39	7.56	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1822	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
40	7.65	0.51 - 0.75	Alto	0.26 - 0.50	Medio	1894	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
41	7.13	0.26 - 0.50	Medio	0 - 0.25	Bajo	1901	0.63	Alto	0.38	Medio
42	7.18	0.26 - 0.50	Medio	0.26 - 0.50	Medio	1895	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
43	7.33	0.51 - 0.75	Alto	0.26 - 0.50	Medio	1911	0.63	Alto	0.38	Medio
44	7.48	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1892	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
45	7.63	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1885	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
46	7.78	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1890	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
47	7.93	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1992	0.13	bajo	0.13	Muy Alto
48	7.94	0.51 - 0.75	Alto	0.26 - 0.50	Medio	1908	0.63	Alto	0.38	Medio
49	7.55	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1930	0.63	Alto	0.38	Medio
50	7.68	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1957	0.38	medio	0.63	Alto
51	7.29	0.26 - 0.50	Medio	0 - 0.25	Bajo	1913	0.63	Alto	0.38	Medio
52	7.48	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1913	0.63	Alto	0.38	Medio
53	7.67	0.51 - 0.75	Alto	0.26 - 0.50	Medio	1917	0.63	Alto	0.38	Medio
54	7.86	0.51 - 0.75	Alto	0.26 - 0.50	Medio	1905	0.63	Alto	0.38	Medio
55	7.14	0.26 - 0.50	Medio	0 - 0.25	Bajo	1906	0.63	Alto	0.38	Medio
56	7.27	0.26 - 0.50	Medio	0.26 - 0.50	Medio	1900	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
57	7.40	0.51 - 0.75	Alto	0.26 - 0.50	Medio	1893	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
58	7.53	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1892	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
59	7.66	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1901	0.63	Alto	0.38	Medio
60	7.79	0.51 - 0.75	Alto	0.26 - 0.50	Medio	1893	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
61	7.11	0.26 - 0.50	Medio	0 - 0.25	Bajo	1900	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
62	7.44	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1890	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
63	7.87	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1898	0.88	Muy alto	0.13	Bajo

Tabla 22: Vulnerabilidad de nivel de pH y elevación (continuación)

ID	Vulnerabilidad de pH					Vulnerabilidad por Elevación				
	pH	As	Nivel	Pb	Nivel	Elev.	por Pb	Nivel	por As	Nivel
64	7.45	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1902	0.63	Alto	0.38	Medio
65	7.25	0.26 - 0.50	Medio	0 - 0.25	Bajo	1891	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
66	7.21	0.26 - 0.50	Medio	0 - 0.25	Bajo	1913	0.63	Alto	0.38	Medio
67	7.14	0.26 - 0.50	Medio	0 - 0.25	Bajo	1942	0.38	medio	0.63	Alto
68	7.81	0.51 - 0.75	Alto	0.26 - 0.50	Medio	1915	0.63	Alto	0.38	Medio
69	7.94	0.51 - 0.75	Alto	0.26 - 0.50	Medio	1925	0.63	Alto	0.38	Medio
70	7.31	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1948	0.38	medio	0.63	Alto
71	7.78	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1950	0.38	medio	0.63	Alto
72	7.93	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1960	0.38	medio	0.63	Alto
73	7.94	0.51 - 0.75	Alto	0.26 - 0.50	Medio	1952	0.38	medio	0.63	Alto
74	7.29	0.26 - 0.50	Medio	0 - 0.25	Bajo	1898	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
75	7.36	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1901	0.63	Alto	0.38	Medio
76	7.67	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1905	0.63	Alto	0.38	Medio
77	7.71	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1903	0.63	Alto	0.38	Medio
78	7.55	0.51 - 0.75	Alto	0.26 - 0.50	Medio	1905	0.63	Alto	0.38	Medio
79	7.19	0.26 - 0.50	Medio	0 - 0.25	Bajo	1891	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
80	7.56	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1886	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
81	7.55	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1892	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
82	7.94	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1886	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
83	7.28	0.26 - 0.50	Medio	0 - 0.25	Bajo	1888	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
84	7.64	0.51 - 0.75	Alto	0.26 - 0.50	Medio	1884	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
85	7.47	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1886	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
86	7.85	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1898	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
87	7.14	0.26 - 0.50	Medio	0 - 0.25	Bajo	1902	0.63	Alto	0.38	Medio
88	7.68	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1878	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
89	7.81	0.51 - 0.75	Alto	0.26 - 0.50	Medio	1878	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
90	7.55	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1880	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
91	7.32	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1875	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
92	7.48	0.51 - 0.75	Alto	0.26 - 0.50	Medio	1873	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
93	7.96	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1873	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
94	7.26	0.26 - 0.50	Medio	0 - 0.25	Bajo	1879	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
95	7.58	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1870	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
96	7.72	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1879	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
97	7.95	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1867	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
98	7.68	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1873	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
99	7.81	0.51 - 0.75	Alto	0 - 0.25	Bajo	1871	0.88	Muy alto	0.13	Bajo
100	7.69	0.51 - 0.75	Alto	0.26 - 0.50	Medio	1874	0.88	Muy alto	0.13	Bajo

Tabla 22: Vulnerabilidad de nivel de pH y elevación (final)

ID	Vulnerabilidad de pH					Vulnerabilidad por Elevación				
	pH	As	Nivel	Pb	Nivel	Elev.	por Pb	Nivel	por As	Nivel
101	7.14	0.26 - 0.50	Medio	0.26 - 0.50	Medio	1872	0.88	Muy alto	0.13	Bajo

El promedio de los peligros por presencia de As y Pb así como el promedio de los niveles de vulnerabilidad por pH y elevación, dieron como resultado la siguiente matriz para estimar el riesgo final (Tabla 23).

Tabla 24. Matriz de Riesgo por presencia de As y Pb

ID	Peligro (P)				Vulnerabilidad (V)				Riesgo (R)
	As	Pb	Total	Nivel	As	Pb	Total	Nivel	P* V
1	1.64	0.10	0.87	Muy Alto	0.51	0.38	0.44	Medio	Alto
2	0.44	0.12	0.28	Medio	0.51	0.38	0.44	Medio	Medio
3	0.99	0.08	0.53	Alto	0.63	0.26	0.44	Medio	Medio
4	0.36	0.08	0.22	Bajo	0.63	0.26	0.44	Medio	Bajo
5	0.79	0.09	0.44	Medio	0.38	0.38	0.38	Medio	medio
6	1.89	0.12	1.00	Muy Alto	0.25	0.13	0.19	Bajo	Alto
7	1.30	0.07	0.69	Alto	0.51	0.38	0.44	Medio	Alto
8	0.32	0.04	0.18	Bajo	0.51	0.38	0.44	Medio	Bajo
9	0.67	0.10	0.38	Medio	0.51	0.38	0.44	Medio	Medio
10	0.83	0.07	0.45	Medio	0.51	0.38	0.44	Medio	Medio
11	0.82	0.32	0.57	Alto	0.38	0.51	0.44	Medio	Medio
12	0.74	0.14	0.44	Medio	0.25	0.51	0.38	Medio	Medio
13	0.80	0.07	0.44	Medio	0.38	0.51	0.44	Medio	Medio
14	1.12	0.14	0.63	Alto	0.38	0.51	0.44	Medio	Medio
15	0.61	0.13	0.37	Medio	0.38	0.63	0.50	Medio	Medio
16	0.70	0.12	0.41	Medio	0.38	0.63	0.50	Medio	Medio
17	1.51	0.08	0.80	Muy Alto	0.38	0.63	0.50	Medio	Alto
18	0.71	0.08	0.40	Medio	0.38	0.63	0.50	Medio	Medio
19	0.83	0.15	0.49	Medio	0.38	0.51	0.44	Medio	Medio
20	1.16	0.13	0.64	Alto	0.38	0.51	0.44	Medio	Medio
21	0.46	0.06	0.26	Medio	0.38	0.51	0.44	Medio	Medio
22	0.55	0.11	0.33	Medio	0.25	0.51	0.38	Medio	Medio
23	0.34	0.08	0.21	Bajo	0.38	0.63	0.50	Medio	Bajo
24	0.97	0.08	0.53	Alto	0.38	0.63	0.50	Medio	Medio
25	1.43	0.13	0.78	Muy Alto	0.38	0.63	0.50	Medio	Alto

26	0.55	0.10	0.32	Medio	0.38	0.51	0.44	Medio	Medio
27	0.70	0.07	0.39	Medio	0.38	0.51	0.44	Medio	Medio
28	0.62	0.07	0.35	Medio	0.38	0.51	0.44	Medio	Medio
29	0.43	0.08	0.25	Bajo	0.38	0.51	0.44	Medio	Bajo
30	0.97	0.15	0.56	Alto	0.38	0.51	0.44	Medio	Medio
31	0.92	0.13	0.52	Alto	0.38	0.51	0.44	Medio	Medio
32	0.48	0.04	0.26	Medio	0.38	0.51	0.44	Medio	Medio
33	0.49	0.07	0.28	Medio	0.38	0.63	0.50	Medio	Medio

Tabla 23: Matriz de Riesgo por presencia de As y Pb (Continuación)

ID	Peligro (P)				Vulnerabilidad (V)				Riesgo (R)
	As	Pb	Total	Nivel	As	Pb	Total	Nivel	P* V
34	0.39	0.05	0.22	Bajo	0.25	0.63	0.44	Medio	Bajo
35	0.42	0.05	0.23	Bajo	0.25	0.63	0.44	Medio	Bajo
36	0.90	0.08	0.49	Medio	0.25	0.51	0.38	Medio	Medio
37	0.63	0.05	0.34	Medio	0.38	0.51	0.44	Medio	Medio
38	0.61	0.08	0.34	Medio	0.38	0.51	0.44	Medio	Medio
39	0.91	0.05	0.48	Medio	0.38	0.51	0.44	Medio	Medio
40	0.85	0.09	0.47	Medio	0.38	0.63	0.50	Medio	Medio
41	0.77	0.05	0.41	Medio	0.38	0.38	0.38	Medio	Medio
42	1.00	0.06	0.53	Alto	0.25	0.63	0.44	Medio	Medio
43	1.08	0.13	0.60	Alto	0.51	0.50	0.50	Medio	Medio
44	0.96	0.10	0.53	Alto	0.38	0.51	0.44	Medio	Medio
45	0.83	0.16	0.49	Medio	0.38	0.51	0.44	Medio	Medio
46	0.54	0.09	0.32	Medio	0.38	0.51	0.44	Medio	Medio
47	0.68	0.08	0.38	Medio	0.38	0.13	0.25	Bajo	Bajo
48	1.09	0.19	0.64	Alto	0.51	0.50	0.50	Medio	Medio
49	1.07	0.07	0.57	Alto	0.51	0.38	0.44	Medio	Medio
50	0.44	0.05	0.25	Bajo	0.63	0.26	0.44	Medio	Bajo
51	0.46	0.04	0.25	Bajo	0.38	0.38	0.38	Medio	Bajo
52	0.27	0.08	0.18	Bajo	0.51	0.38	0.44	Medio	Bajo
53	0.23	0.09	0.16	Bajo	0.51	0.50	0.50	Medio	Bajo
54	0.39	0.16	0.27	Medio	0.51	0.50	0.50	Medio	Medio
55	0.34	0.07	0.20	Bajo	0.38	0.38	0.38	Medio	Bajo
56	0.28	0.07	0.18	Bajo	0.25	0.63	0.44	Medio	Bajo
57	0.61	0.11	0.36	Medio	0.38	0.63	0.50	Medio	Medio
58	0.29	0.20	0.25	Bajo	0.38	0.51	0.44	Medio	Bajo
59	0.32	0.12	0.22	Bajo	0.51	0.38	0.44	Medio	Bajo
60	0.30	0.21	0.25	Bajo	0.38	0.63	0.50	Medio	Bajo
61	0.36	0.14	0.25	Bajo	0.25	0.51	0.38	Medio	Bajo

Tabla 23: Matriz de Riesgo por presencia de As y Pb (continuación)

ID	Peligro (P)				Vulnerabilidad (V)				Riesgo (R)
	As	Pb	Total	Nivel	As	Pb	Total	Nivel	P* V
62	0.23	0.15	0.19	Bajo	0.38	0.51	0.44	Medio	Bajo
63	0.39	0.15	0.27	Medio	0.38	0.51	0.44	Medio	Medio
64	0.35	0.16	0.25	Bajo	0.51	0.38	0.44	Medio	Bajo
65	0.33	0.34	0.33	Medio	0.25	0.51	0.38	Medio	Medio
66	0.38	0.05	0.22	Bajo	0.38	0.38	0.38	Medio	Bajo
67	0.22	0.05	0.13	Bajo	0.50	0.26	0.38	Medio	Bajo
68	0.28	0.06	0.17	Bajo	0.51	0.50	0.50	Medio	Bajo
69	0.39	0.04	0.22	Bajo	0.51	0.50	0.50	Medio	Bajo
70	0.32	0.02	0.17	Bajo	0.63	0.26	0.44	Medio	Bajo
71	0.29	0.03	0.16	Bajo	0.63	0.26	0.44	Medio	Bajo
72	0.20	0.04	0.12	Bajo	0.63	0.26	0.44	Medio	Bajo
73	0.37	0.04	0.21	Bajo	0.63	0.38	0.50	Medio	Bajo
74	0.72	0.08	0.40	Medio	0.25	0.51	0.38	Medio	Medio
75	0.57	0.08	0.33	Medio	0.51	0.38	0.44	Medio	Medio
76	0.72	0.05	0.39	Medio	0.51	0.38	0.44	Medio	Medio
77	0.28	0.07	0.17	Bajo	0.51	0.38	0.44	Medio	Bajo
78	0.37	0.07	0.22	Bajo	0.51	0.50	0.50	Medio	Bajo
79	0.74	0.07	0.40	Medio	0.25	0.51	0.38	Medio	Medio
80	0.49	0.07	0.28	Medio	0.38	0.51	0.44	Medio	Medio
81	0.47	0.06	0.26	Medio	0.38	0.51	0.44	Medio	Medio
82	0.45	0.10	0.28	Medio	0.38	0.51	0.44	Medio	Medio
83	0.50	0.06	0.28	Medio	0.25	0.51	0.38	Medio	Medio
84	0.33	0.10	0.21	Bajo	0.38	0.63	0.50	Medio	Bajo
85	0.38	0.10	0.24	Bajo	0.38	0.51	0.44	Medio	Bajo
86	0.55	0.05	0.30	Medio	0.38	0.51	0.44	Medio	Medio
87	0.55	0.07	0.31	Medio	0.38	0.38	0.38	Medio	Medio
88	0.42	0.05	0.24	Bajo	0.38	0.51	0.44	Medio	Bajo
89	0.55	0.06	0.31	Medio	0.38	0.63	0.50	Medio	Medio
90	0.63	0.07	0.35	Medio	0.38	0.51	0.44	Medio	Medio
91	0.38	0.07	0.23	Bajo	0.38	0.51	0.44	Medio	Bajo
92	0.44	0.08	0.26	Medio	0.38	0.63	0.50	Medio	Medio
93	0.49	0.07	0.28	Medio	0.38	0.51	0.44	Medio	Medio
94	0.52	0.08	0.30	Medio	0.25	0.51	0.38	Medio	Medio
95	0.67	0.05	0.36	Medio	0.38	0.51	0.44	Medio	Medio
96	0.52	0.11	0.32	Medio	0.38	0.51	0.44	Medio	Medio
97	0.56	0.07	0.32	Medio	0.38	0.51	0.44	Medio	Medio
98	0.55	0.08	0.31	Medio	0.38	0.51	0.44	Medio	Medio

Tabla 23: Matriz de Riesgo por presencia de As y Pb (final)

ID	Peligro (P)				Vulnerabilidad (V)				Riesgo (R)
	As	Pb	Total	Nivel	As	Pb	Total	Nivel	P* V
99	0.56	0.13	0.35	Medio	0.38	0.51	0.44	Medio	Medio
100	0.44	0.20	0.32	Medio	0.38	0.63	0.50	Medio	Medio
101	0.37	0.18	0.27	Medio	0.25	0.63	0.44	Medio	Medio

Se representa en la figura 33 la distribución de los niveles de riesgo en los sitios de muestreo; se puede ver que los puntos cercanos a las vías férreas, corrientes y cuerpos de agua presentar riesgos entre bajo y medio, excepto el sitio #6 con un nivel de riesgo alto por su concentración de As localizado al lado de un cuerpo de agua al NO de ciudad; se localizan tres puntos de riesgo alto cercanos a zonas ladrilleras: #1 al N, #17 y #25 en la parte sureste de la ciudad de Durango. De las 101 muestras de la zona E 33 muestras presentaron riesgo de nivel bajo, 63 muestras distribuidas en toda la ciudad un riesgo medio por sus contenidos de As y 5 muestras riesgo Alto.

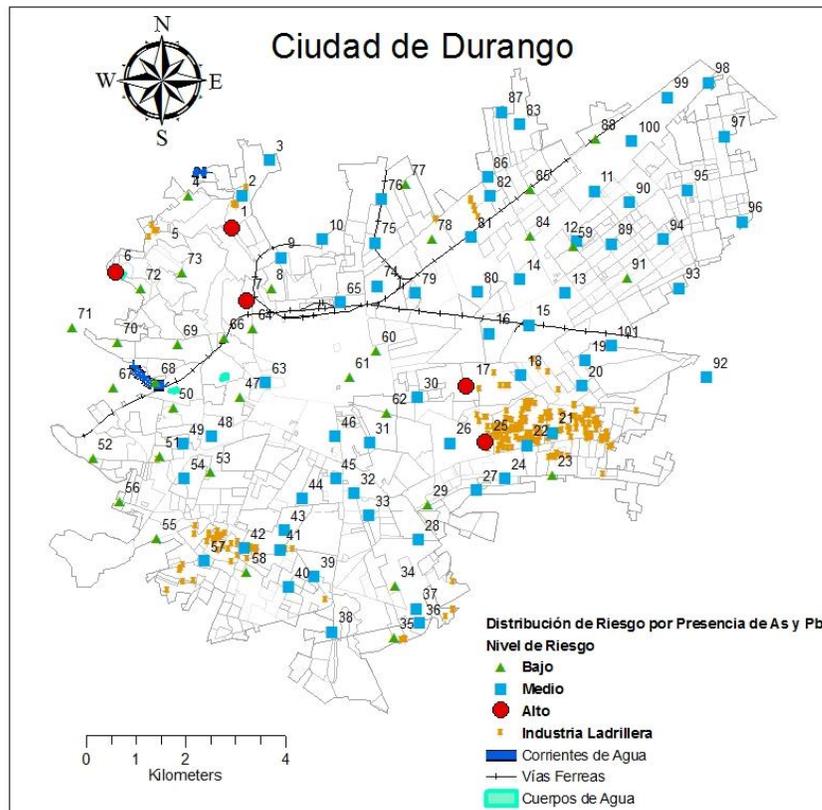


Figura 33: Distribución de Riesgo Ambiental estimado por presencia de As y Pb.

VI. CONCLUSIONES

Se encontraron concentraciones totales de Pb distribuidas en todo el suelo superficial de la ciudad de Durango con una concentración mínima de 8.3 mg/kg de Pb hasta una concentración máxima de 134.24 mg/kg que no sobrepasan el LMP de 400 mg/kg según la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 para suelo de uso residencial, la estabilización química del Pb puede deberse a la afinidad química del Pb por los minerales de Fe de origen natural presentes en la zona de estudio, a la clasificación del tipo de suelo de la ciudad clasificado como ligeramente alcalino con un pH de 7.57 promedio. La distribución de Pb en el suelo no es normal, pero los análisis espaciales presumen una tendencia de menor valor al Oeste (O) con un incremento hacia mayores valores al Este (E) de la ciudad, presentando una correlación inversa entre la elevación de cada sitio de muestreo y presencia de Pb, por lo tanto, a menor elevación existe mayor presencia de Pb.

Además, se encontraron concentraciones totales de As distribuidas en todo el suelo superficial de la ciudad de Durango con una concentración mínima de 4.37 mg/kg de As hasta una concentración máxima de 41.66 mg/kg de As, donde solo 10 de las 101 muestras sobrepasa el LMP de 22 mg/kg según la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 para suelo de uso residencial, esto puede deberse a que el pH ligeramente alcalino presente en el suelo favorece la movilidad del elemento. La distribución de As en el suelo no es normal, pero los análisis espaciales presumen una tendencia de menor valor al Noroeste (NO) con un incremento hacia mayores valores al Sureste (SE) de la ciudad. No se encontró una correlación significativa entre la presencia de Pb y de As total en el suelo superficial de la ciudad de Durango.

Los niveles de Peligro por presencia de As y Pb, y los niveles de Vulnerabilidad ambiental de pH del suelo y la elevación e cada punto de muestreo, dieron como resultado Niveles de Riesgo Ambiental por presencia de As y Pb estratificados en bajo para 33 muestras, medio para 63 muestras y alto únicamente para 5

muestras de suelo; siendo los contenidos de As la variable de mayor peso en esta estimación.

Debido a que algunas concentraciones totales encontradas de As en el suelo superficial de la ciudad de Durango sobrepasan el LMP de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 para suelo de uso residencial y las condiciones ambientales del sitio favorecen la acumulación y dispersión de partículas de suelo con concentraciones de As y Pb, se sugiere un estudio más detallado donde se determine la movilidad, la fracción biodisponible y bioaccesible de estos elementos en el suelo de la zona de estudio, que puedan estimar el riesgo a la salud de las personas que habitan la ciudad de Durango.

REFERENCIAS

- Alva-Valdivia L.M., Goguitchaichvili A, Urrutia-Fucugauchi J, Caballero-Miranda C, Vivallo W. 2001. Rock-magnetism and ore microscopy of the magnetite-apatite ore deposit from Cerro de Mercado, Mexico. *EarthPlanetsSpace* 53(3):181–192.
- ArcMap. S. F. Arcgisfor Desktop. Comparar Métodos de Interpolación. Recuperado el 10/04/16 de: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/comparing-interpolation-methods.htm>
- Arsenic, ATSDR. Sin Fecha. Estudio de caso en medicina ambiental (CSEM). La toxicidad del arsénico. Recuperado el 2/12/14 de: http://www.atsdr.cdc.gov/es/csem/arsenic/docs/Arsenic_CSEM_Spanish.pdf
- Carta Natal Online. Ciudades de Durango, México. (S.F.) Recuperado el 2/12/14 de: <http://carta-natal.es/ciudades/Mexico/Durango-11>
- Corona-Esquivel, R., Tapia-Zuñiga, C., Bueno-Rocha, J., y Acuña, P. 2012. Yacimiento de Cerro de Mercado Durango: Situación Actual (Estudio del 2003). Recuperado el 04/06/15 de : <http://mineriaenlinea.com/2012/10/yacimiento-de-cerro-de-mercado-durango-situacion-actual/>
- Durango Gobierno Municipal. Geografía del Municipio de Durango. Clima. (S.F.) Recuperado el 2/12/14 de: http://www.2010-2013.municipio.durango.gob.mx/de/geografia_mpio
- EPA. 2007. Method 3051a. Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils. (Recuperado el 2/12/14 de : <http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/pdfs/3051a.pdf>
- GeoMexico, 2004. <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/448/12.pdf>

INDC, 2006. Manual Básico para la Estimación del Riesgo. Lima, Perú. Instituto Nacional de Defensa Civil. Pág. 11-26.

INECC. 2007. Capítulo Primero. Suelo. Recuperado el 28/03/16 de:
<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/459/cap1.html>

INEGI. 1973. Cartas geológicas Durango. Escala 1:50000. Geología.

INEGI. 1974. Cartas edafológicas Durango. Escala 1:50000. Recursos Naturales. Geografía.

INEGI. Datos Vectoriales. Escala 1:50000. Topografía.

Morales, N., Martínez, D., García-Meza, J., Labastida, I., Armienta, M., Razo, I., Lara, R. (2014). Total and bioaccessible arsenic and lead in soils impacted by mining exploitation of Fe-oxide-rich ore deposit at Cerro de Mercado, Durango, Mexico Environ. Earth Sci. DOI 10.1007/s12665-014-3617-7.

Municipio Durango. 2016. Pavimentación de Durango se mantiene con paso firme: Carlos Contreras. Recuperado el 29/05/16 de:
http://www.municipiodurango.gob.mx/es/publicaciones/pavimentacion_de_durango_se_mantiene_con_paso_firme_carlos_contreras

NMX-AA-132-SCFI-2006. Norma Oficial Mexicana que establece los criterios para la realización de muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra. Diario Oficial de la Federación del 5 de septiembre de 2006.

NOM-025-SSA1-1993. Norma Oficial Mexicana "salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a las partículas menores de 10 micras (pm10). Valor permisible para la concentración de partículas menores de 10 micras (pm10) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población". Diario Oficial de la Federación 23 de diciembre de 1994.

NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004. Norma oficial mexicana 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. Diario Oficial de la Federación del 2 de marzo de 2007, pág. 8.

Plomo, ATSDR. Estudio de caso en medicina ambiental (CSEM). La toxicidad del Plomo. (S.F.). Recuperado el 2/12/14 de:
<http://www.atsdr.cdc.gov/es/csem/plomo/docs/plomo.pdf>

Quiñonero, J.M. y Sarria, F.A. 2007. Creación de Modelos Digitales de Elevaciones a partir de diferentes métodos de interpolación para la determinación de redes de drenaje. I Jornadas de SIG libre. SIGTE. Girona, España. Pág. 2.

Ramírez, A. 2013. Exposición ocupacional y ambiental al arsénico. Actualización bibliográfica para investigación científica. An. Fac. Med. Vol. 74, núm. 3, pág. 237-247.

Rodríguez-Jaume, M.J. 2001. Los Sistemas de Información Geográfica: una herramienta de análisis en los Estudios de Impacto Ambiental (EIA). Universidad de Alicante. Departamento de Sociología I y Teoría de La Educación. Sociología ambiental. Grupo Editorial Universitario. Granada. ISBN 84-8491-109-8.

SCT. 2014. Inventario de Bancos de Materiales. Recuperado el 28/06/16 de:
http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Banco_de_Materiales_2014/DGO_INBM_2014.pdf

Vázquez, I. 2009. Estudio Geoquímico de suelos y aguas como base para evaluar la contaminación: Relación roca-suelo-agua. Tesis Doctoral. Departamento de Edafología. Facultad de Farmacia. Universidad Complutense de Madrid. Madrid.

Vergara, A. (2014). Evaluación del efecto genotóxico y la susceptibilidad individual por exposición a plomo ambiental en la vereda La Bonga, Atlántico, Colombia. Tesis de Maestría en Toxicología. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Medicina. Bogotá D.C. Pág. 19-27.

Visita Durango. Ubicación geográfica. Mapa. (2009). Recuperado el 2/12/14 de:
<http://viisiithadurangooo.blogspot.mx/>