



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“ANÁLISIS DE FUENTES DE METALES PESADOS
EN SUELOS DE UNA COMUNIDAD RURAL
ALEDAÑA AL LAGO DE CUITZEO, USANDO
SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y
ESTADÍSTICA MULTIVARIADA”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
INGENIERO QUÍMICO**

P R E S E N T A:

P. I. Q. ALEJANDRA DAMAYANTI AGUILAR ESPINOSA

ASESOR:

DR. MARCO ANTONIO MARTÍNEZ CINCO



MORELIA, MICHOACÁN. AGOSTO 2019

Agradecimientos

Agradezco a mis padres, **Gregorio Aguilar Aguilar** y **Alejandra Espinosa Suárez**, por haberme forjado con los valores que me hicieron la persona que soy en la actualidad.

Agradezco a **Jaime Cerda Flores**, por su apoyo incondicional a lo largo de este proyecto, y a su familia, por hacer mi estadía en Morelia más agradable.

Agradezco al **Dr. Marco Antonio Martínez Cinco**, por la buena disposición y asesoramiento en este trabajo, y al **Dr. Ezequiel García Rodríguez**, por su apoyo durante este trayecto.

A mi familia, especialmente a mis padres y hermanos, por cada día creer y confiar en mí.

CONTENIDO

RESUMEN.....	5
ABSTRACT.....	6
CAPÍTULO 1.....	7
1.1 INTRODUCCIÓN	7
1.2 ANTECEDENTES.....	9
1.3 JUSTIFICACIÓN	11
1.4 OBJETIVOS	12
1.4.1 OBJETIVO GENERAL	12
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
1.5 HIPÓTESIS.....	13
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	14
2.1 ZONA GEOTÉRMICA	14
2.2 TOXICOLOGÍA DE METALES PESADOS	15
2.3 DISTRIBUCIÓN DE FUENTES.....	19
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	20
3.1 TÉCNICA DE MUESTREO.....	20
3.2 ANÁLISIS X-RAY FLUORESCENCIA	22
3.3 ANÁLISIS DE FACTORES.....	22
3.4 USO DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) PARA LA REPRESENTACIÓN GEOESPACIAL DE LOS EPT EN LA ZONA DE ESTUDIO	24
3.5 INTERPOLACIÓN KRIGING	25
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	27
4.1 ANÁLISIS FACTORIAL	27
4.2 DESPLIEGUE DE MAPAS POR PATRONES SIMILARES	30
4.3 ANÁLISIS GEOESPACIAL	35
CAPÍTULO 5. CONCLUSIÓN	37
RECOMENDACIÓN.....	37
ANEXOS	38
ANEXO 1.....	39
ANEXO 2.....	40
ANEXO 3.....	41
REFERENCIAS.....	42

RESUMEN

Los metales pesados son sustancias peligrosas que se encuentran en muchos medios a los que los seres humanos tienen acceso o con los que se tiene contacto. Es posible que se encuentren en el aire, agua, suelo y alimentos; además en muchos productos como pinturas, tejidos, cosméticos, pesticidas, etc. La ingesta de metales pesados en seres humanos representa un riesgo para la salud, ya que puede derivar en el desarrollo de diferentes tipos de enfermedades crónicas y, en casos extremos, cáncer.

El presente estudio tiene como objetivo el análisis de elementos potencialmente tóxicos (EPT) en los polvos contenidos en el suelo de la comunidad de Araró, municipio de Zinapécuaro, Michoacán, México; para el uso de técnicas de análisis de fuentes (source apportionment) para la identificación de posibles fuentes y patrones geoespaciales. Para este fin, se utilizó la técnica de estadística multivariada de análisis de factores y el desarrollo de mapas usando Sistemas de Información Geográfica (SIG) que permitieron visualizar la distribución geoespacial de los EPT en la zona de Araró, para así determinar el origen de los mismos.

Los EPT analizados fueron: As, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb, V y Zn. La técnica de análisis factorial determinó que el Mn, Fe, V y Co se agruparon en el primer factor, mostrando un origen natural; de la misma manera, los mapas de distribución geoespacial, generados por medio de interpolación Kriging Ordinaria, presentan patrones similares de estos elementos. En el segundo factor del análisis de fuentes se agruparon el Pb, Hg y Zn, indicando fuentes antropogénicas asociadas a la contaminación vehicular.

Palabras clave

Metal pesado, distribución geoespacial, estadística multivariada, Sistemas de Información Geográfica, fuente antropogénica.

ABSTRACT

Heavy metals are dangerous substances that are found in many mediums to which human beings have access or with which they are in contact. They may be found in the air, water, soil and food; as well as in many products such as paints, fabrics, cosmetics, pesticides, etc. The intake of heavy metals in humans represents a health risk, since it can lead to the development of different types of chronic diseases and, in extreme cases, cancer.

This study aims to analyze potentially toxic elements (PTE) in the dust contained in the soil of the community of Araró, municipality of Zinapécuaro, Michoacán, México; for the use of source apportionment techniques for the identification of possible sources and geospatial patterns. For this end, the multivariable statistics technique of factor analysis and the development of maps using Geographic Information Systems (GIS) that allowed the visualization of the geospatial distribution of the PTE in the Araró area were used, in order to determine their origin.

The PTE analyzed were: As, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb, V and Zn. The factor analysis technique determined that the Mn, Fe, V and Co were grouped into the first factor, showing a natural origin; likewise, the geospatial distribution maps, generated by means of Ordinary Kriging interpolation, present similar patterns of these elements. In the second factor of the source apportionment the Pb, Hg and Zn were grouped together, indicating anthropogenic sources associated with vehicular contamination.

Key Words

Heavy metal, geospatial distribution, multivariate statistics, Geographic Information Systems, anthropogenic source.

CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUCCIÓN

El suelo es un componente ambiental que por su origen, formación y evolución no puede ser aislado del entorno que lo circunda, representando, en la mayoría de ecosistemas terrestres, el medio físico-químico en el que se desarrolla la vida. Es frágil, de difícil y larga recuperación, y de extensión limitada. Por ello, un uso inadecuado del mismo puede contribuir a la degradación de este recurso natural no renovable a corto plazo (Roca Fernández, 2019).

La presencia en los suelos de concentraciones nocivas de algunos elementos químicos y compuestos (contaminantes) es un tipo especial de degradación que se denomina contaminación. El contaminante está siempre en concentraciones mayores a las habituales (anomalías) y en general tiene un efecto adverso sobre algunos organismos (Galán Huertos & Romero Baena, 2008).

Un contaminante es cualquier sustancia en el medio ambiente, que causa efectos objetables, perjudica el bienestar del medio ambiente, reduce la calidad de vida y puede causar la muerte (Duruibe, Ogwuegbu, & Ekwurugwu, 2007). Los metales pesados se presentan como componentes naturales de la corteza terrestre y son contaminantes ambientales persistentes, ya que no pueden degradarse ni destruirse. En pequeña medida, ingresan al sistema corporal a través de los alimentos, el aire y el agua y se acumulan durante un período de tiempo (Lenntech, Water Treatment and Air Purification, 2004).

Se pueden distinguir diferentes fuentes de contaminación de los suelos por metales pesados dependiendo de su origen. En ocasiones, la propia naturaleza del material originario y su alteración son los responsables de la contaminación; en este caso, se denomina contaminación endógena. Otras veces los aportes contaminantes son externos, frecuentemente como resultado de actividades antropogénicas, denominándose contaminación exógena. Otras causas que contribuyen a la contaminación del suelo por aporte directo, son el uso inadecuado de fertilizantes minerales y productos fitosanitarios, el vertido de los residuos que se generan (estiércol, purines, residuos sólidos urbanos, lodos de

estaciones depuradoras de aguas residuales), y la utilización de aguas de calidad inadecuada para uso agrícola (Roca Fernández, 2019).

Existen más factores naturales que causan contaminación en suelos, pero la aportación al suelo de algunos de éstos, como la geodisponibilidad de las rocas, es insignificante en comparación con los factores derivados de las acciones antropogénicas (Galán Huertos & Romero Baena, 2008). Las principales concentraciones anormales de EPT proceden en su mayoría de la extracción de recursos minerales, sobre todo de menas metálicas, como sulfuros y óxidos. Las actividades mineras han generado grandes beneficios e inclusive han supuesto el desarrollo industrial y social de sus entornos, en algunos casos. Sin embargo, estas extracciones también son conocidas mundialmente por causar efectos nocivos al medio ambiente, que principalmente se asocian a la deposición de grandes volúmenes de residuos (Belmonte Serrato *et al.*, 2010).

Los metales pesados, como el cadmio, cobre, plomo, cromo y mercurio, son contaminantes ambientales importantes, particularmente en áreas con alta presión antropogénica. La acumulación de metales pesados en los suelos es motivo de preocupación en la producción agrícola debido a los efectos adversos sobre la inocuidad y comercialización de los alimentos, el crecimiento de los cultivos debido a la fitotoxicidad y la salud ambiental de los organismos del suelo (Nagajyoti, Lee, & Sreekanth, 2010).

En las últimas décadas, se ha prestado mucha atención al problema de la contaminación urbana del suelo con EPT para evitar un mayor deterioro ambiental y examinar los métodos aplicables de remediación del suelo. Los metales pesados en los suelos han sido considerados como trazadores poderosos para monitorear el impacto de las actividades humanas (Kelly *et al.*, 1996; Manta *et al.*, 2002).

1.2 ANTECEDENTES

La aplicación de la tecnología del Sistema de información geoespacial (SIG) también ha sido propuesta por otros investigadores para identificar la distribución espacial de elementos traza y fuentes de contaminación (Maleki, Amini, Nazmara, & Mahvi, 2014). Por ejemplo, la investigación de Afshin Maleki y colaboradores, por medio de métodos de análisis geoespacial, muestra que las concentraciones de los metales pesados estudiados en suelo y en agua de Sanandaj en Kurdistan, Irán, están por debajo de las normas de la FAO y de la OMS, mientras que los vegetales de esta región estaban contaminados por cromo y plomo (Maleki, Amini, Nazmara, & Mahvi, 2014).

En un estudio realizado por Guanghui Guo y colaboradores se expresa que la distribución espacial del índice de contaminación integrado mostró que las áreas urbanas más nuevas de la ciudad de Yibin, en la provincia de Sichuan, mostraban una contaminación por metales pesados relativamente más baja en comparación con las áreas urbanas más antiguas (Guo, Wu, Xie, & Zhang, 2011).

Se han realizado numerosos estudios en países desarrollados (Geagea et al., 2008; Imperato et al., 2003; Pen-Mouratov et al., 2008; Zhang, 2006); sin embargo, las diferencias entre ciudades como la densidad de población y las actividades industriales, así como la densidad del tráfico pueden tener cierta influencia en los resultados de los estudios individuales (Guo, Wu, Xie, & Zhang, 2011).

El uso de la estadística multivariada y técnicas de distribución de fuentes, como CA (Cluster Analysis) y PCA (Principal Component Analysis), ha sido de gran importancia en estudios de contaminación de suelos (Pan, Lu, & Lei, 2017), ya que permitió explorar las relaciones y las fuentes potenciales de metales pesados en suelos de carretera en Xi'an, China.

En la República Mexicana también se han realizado estudios en donde se mide la concentración de EPT en suelos. García Rico y colaboradores (2015), hicieron una investigación de contaminación en suelos de Hermosillo, Sonora, en donde se concluye que las principales fuentes de concentraciones anormales de As, Cr y Pb están relacionadas con actividades antropogénicas. En un estudio sobre la contaminación de suelos urbanos de

Morelia (Delgado *et al.*, 2018) se analizó la distribución espacial de Fe, Li, Mn, Pb, V y Zn para identificar las zonas de mayor concentración, concluyendo que en el centro y este de la ciudad existe la mayor contaminación de los EPT estudiados.

Aunque la mayoría de los estudios sobre contaminantes en suelos pertenecen a ciudades grandes, no significa que comunidades rurales no industrializadas se encuentren exentas de presentar estos problemas. En 2015 se realizó un estudio en la región de Araró (Vázquez, Cortés, & Alfaro, 2015) en donde se encontraron valores de concentraciones de Arsénico que exceden las regulaciones mexicanas en agua que los habitantes usan para consumo propio, indicando así un riesgo potencial para la salud.

La exposición a los metales puede ocurrir a través de diferentes rutas: pueden inhalarse como polvo o humo (partículas pequeñas), algunos pueden vaporizarse e inhalarse; los metales también pueden ser ingeridos involuntariamente a través de alimentos y bebidas. La cantidad que realmente se absorbe del tracto digestivo puede variar ampliamente, ya que depende de la forma química del metal y la edad y el estado nutricional del individuo (Hu, 2002).

La toxicidad de los metales afecta más comúnmente al cerebro y al riñón, pero se producen otras manifestaciones, y algunos metales, como el arsénico, son claramente capaces de causar cáncer. La exposición continua a metales a un nivel suficientemente alto como para causar efectos de toxicidad crónica (como hipertensión en personas expuestas al plomo y toxicidad renal en personas expuestas al cadmio) también puede ocurrir en personas que no tienen síntomas (Hu, 2002).

La zona de Araró presenta una alta actividad geotérmica (Pacheco Ibarra, 2019), que puede aumentar la concentración de EPT de manera natural en diferentes matrices, como agua, suelo (polvos), partículas respirables y alimentos. No existe información reportada en la literatura al momento de la publicación de esta investigación.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Como se ha mencionado, los estudios sobre la contaminación por metales pesados en suelos urbanos, ayudan a desarrollar estrategias para proteger los entornos urbanos y la salud humana contra la acumulación a largo plazo de metales pesados y, de acuerdo a estudios pasados, la abundancia de Arsénico en manantiales en la región de Araró es un indicador de que, debido a la actividad geotérmica, la concentración de EPT también sea significativa y puede ser un potencial de riesgo a la salud para los habitantes de dicha zona. Debido a lo anterior, el estudio de las fuentes de estos ETP puede proporcionar información estratégica para los tomadores de decisiones.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluación de las fuentes de EPT en polvos de una comunidad rural aledaña al Lago de Cuitzeo, con el uso de estadística multivariada y SIG que permitan visualizar la distribución geoespacial de los EPT, para así determinar la fuente de los mismos.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer las asociaciones de metales pesados, basados en el análisis de suelos de la campaña de campo en Araró, mediante la técnica estadística Análisis de Factores.
- Generar mapas de distribución espacial de metales pesados en la región de Araró utilizando el software ArcGIS.
- Realizar comparaciones de las distribuciones de metales para la identificación de patrones en los mismos y posibles fuentes.

1.5 HIPÓTESIS

Las fuentes de los metales pesados en la comunidad de Araró, Municipio de Zinapécuaro Mich., tienen un origen natural.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 ZONA GEOTÉRMICA

Las muestras con las que se trabajaron para la base de datos de esta investigación fueron tomadas del poblado de Araró, el cual se encuentra en municipio de Zinapécuaro en el estado de Michoacán, México. Dicha zona rural se encuentra a una distancia de 40 km del noreste de la ciudad de Morelia en el mismo estado, aproximadamente 30 km al noreste del campo geotérmico de Los Azufres, y al oriente del Lago de Cuitzeo (Pacheco Ibarra, 2019); es una región lacustre rodeada de montes, lagunas y aguas termales, tierra propicia para la agricultura y extracción de sal (Sánchez Núñez, Velázquez Serna, & Serrano Flores, 2009).

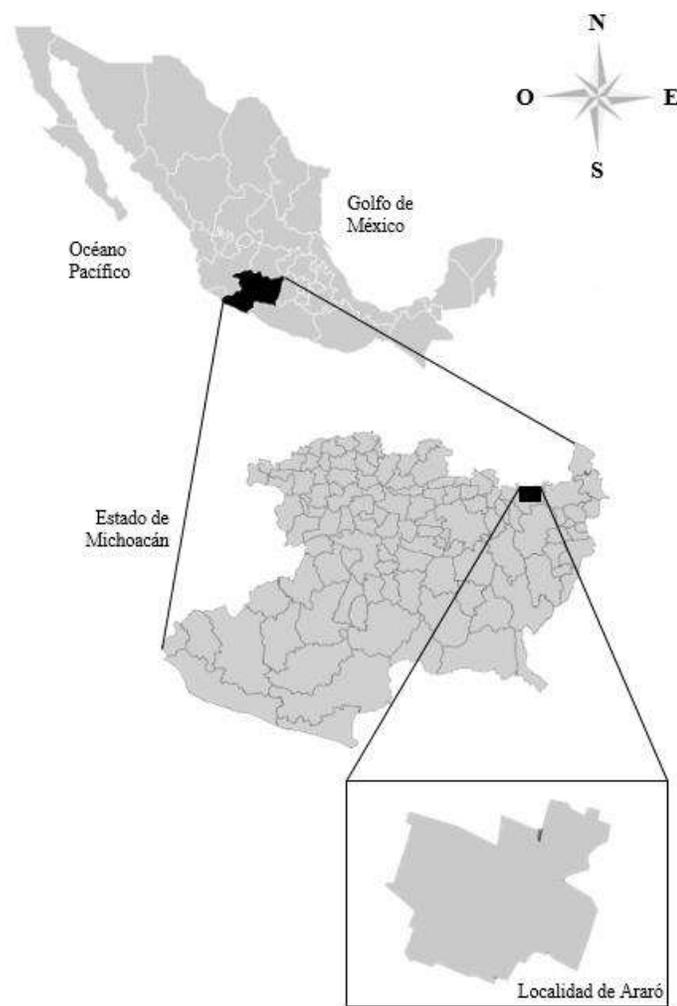


Figura 2.1. Ubicación de la localidad de Araró en Michoacán, México.

Aunque no se trata de una región de giro industrial o con una población extensa, el municipio de Zinapécuaro no se encuentra exento de los problemas de la disposición de los Residuos Sólidos Urbanos generados por más de 14000 habitantes, ya que dichos residuos se depositan en un área que no cuenta con las especificaciones técnicas de un sitio de deposición, lo que genera alteraciones al medio como contaminación visual y de suelo, malos olores, generación de fauna nociva y degradación del recurso hídrico, entre otros (Sánchez Núñez, Velázquez Serna, & Serrano Flores, 2009).

México cuenta con abundantes recursos geotérmicos, contando actualmente con una base de datos que incluye 2,332 manifestaciones geotérmicas distribuidas en 27 de los 32 estados mexicanos (Pacheco Ibarra, 2019). En particular, dentro de las zonas que cuentan con potencial geotérmico tanto de media como de baja temperatura, se encuentra Araró, localidad que yace en la parte oriental del sector central de la provincia de la Faja Volcánica Mexicana. Además, este poblado se encuentra al interior de una depresión tectónica de dirección general este-oeste, conocida como Graben de Cuitzeo-Maravatío. Las fallas más relevantes, conocidas como Falla Huingo y Falla Araró-Zimirao, actúan como conductos para el movimiento de los fluidos hidrotermales, con temperaturas superficiales entre los 31 y 98°C. La actividad volcánica más reciente está representada por lavas y conos cineríticos de composición andesítica y basáltica, con edades entre los 0.6 y 0.7 millones de años (Pacheco Ibarra, 2019).

2.2 TOXICOLOGÍA DE METALES PESADOS

Los efectos biotóxicos de los EPT se refieren a los efectos nocivos de los mismos para el cuerpo cuando se consumen por encima de los límites recomendados. Las medidas cuantitativas de la toxicidad de una sustancia que se utilizan en la evaluación de riesgos a través de la ruta de exposición de ingestión son la dosis de referencia oral (RfDo), para las sustancias tóxicas no cancerígenas, y el factor de pendiente oral (SFo) para las sustancias cancerígenas (Comunidad de Madrid, 2011). El SFo representa la potencia carcinogénica de una sustancia química y se basa en datos sobre los efectos del cáncer crónico y en el efecto adverso para la salud más sensible relevante para los humanos por exposición oral. La Tabla

2.1 presenta los límites máximos de los factores mencionados publicados por la Agencia del Medio Ambiente de Estados Unidos de los EPT en estudio.

Tabla 2.1. Factor de pendiente oral y dosis de referencia oral.

Analito	SFo (mg/kg-día)⁻¹	RfD_o (mg/kg-día)
As	1.5E+00	3.0E-04
Co	-	3.0E-04
Cr	5.0E-01	3.0E-03
Cu	-	4.0E-02
Fe	-	7.0E-01
Hg (Cloruro de Mercurio)	-	3.0E-04
Mn	-	1.4E-01
Pb (Acetato de Plomo)	8.5E-03	-
V	-	5.0E-03
Zn	-	3.0E-01

En la Tabla 2.2 se presentan las concentraciones de referencia totales (CR_T) de los EPT en estudio que se manejan en la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, para suelos de uso agrícola, residencial o comercial. El CR_T es la masa del elemento químico regulado por unidad de masa del suelo en estudio, por encima del cual se considera existe un riesgo de que se generen efectos adversos para la salud.

Tabla 2.2. Concentraciones de referencia totales para suelo de uso agrícola/residencial/comercial.

Contaminante	CR_T (mg kg⁻¹)
Arsénico	22
Cromo Hexavalente	280
Mercurio	23
Plomo	400
Vanadio	78

El Arsénico se puede presentar en variantes orgánicas, producidas por acción del metabolismo de microorganismos, plantas y mamíferos, pero principalmente éste se presenta

en formas inorgánicas como el arsenato y la arsenita (Prohaska & Stingender, 2005). Algunos de los síntomas que se manifiestan debido a la ingestión crónica de As son cambios en la coloración de piel, arterosclerosis, fallas renales, efectos neurológicos, enfermedades cardiovasculares, esterilidad y cáncer en piel, pulmones, hígado y riñones (Singh & Ma, 2006).

El Cobalto se encuentra disperso ampliamente en el ambiente, por lo que los humanos pueden estar expuestos a éste por respirar aire, beber agua e ingerir comida que esté contaminada con este elemento. Este elemento no está a menudo disponible libremente en el ambiente, pero cuando las partículas del metal no se unen a las partículas del suelo o sedimento, la ingesta por las plantas y animales es mayor, por lo que puede darse lugar a su acumulación. La toma de altas concentraciones de Co puede tener efectos en la salud, tales como náuseas, vómito, daño del tiroides y problemas de visión y de corazón (Pérez, 2011).

Dependiendo de su estado de oxidación, el Cromo puede presentarse en estado líquido, sólido o gaseoso. Sus formas químicas más comunes son: Cr (0), Cr (III) y Cr (VI), siendo este último la forma más tóxica (ATSDR, ToxFAQs for Chromium, 2012). La ingesta de altas cantidades de cromo hexavalente puede ocasionar problemas intestinales, enfermedades gástricas y hepáticas (Covarrubias & Peña Cabriales, 2017).

El Cobre es una sustancia esencial a la vida humana, pero en altas dosis puede causar anemia, daño del hígado y del riñón, y la irritación del estómago e intestino. Las personas que padecen la enfermedad de Wilson tienen mayor riesgo para los efectos en su salud por la constante exposición al este elemento (Pérez, 2011).

El Mercurio puede llegar al ambiente a través de procesos naturales como la actividad volcánica, depósitos minerales, incendios forestales, emisiones oceánicas y desgasificación de la corteza terrestre (Ruelas, Páez, Ruiz, & Zamora, 2011). Sin embargo, el mayor aporte proviene de las actividades antropogénicas, principalmente la minería y la combustión industrial (Covarrubias & Peña Cabriales, 2017). Los altos niveles de exposición al Hg pueden provocar lesiones mortales en los pulmones y el sistema neurológico. A niveles de exposición menores, pero más crónicos, surge una constelación típica de hallazgos, denominada eretismo, con temblor de manos, excitabilidad, pérdida de memoria, insomnio, timidez y, a veces, delirio (Hu, 2002). Incluso niveles relativamente moderados de exposición

ocupacional al Hg se han asociado con disminuciones medibles en el rendimiento en las pruebas neuroconductuales de la velocidad motora, el escaneo visual, la memoria verbal y visual y la coordinación visomotora (Echevarría *et al.*, 1995).

Uno de los tres elementos traza tóxicos esenciales es el Manganeseo, lo cual significa que no es sólo necesario para la supervivencia de los humanos, sino que es también tóxico para los mismos cuando está presente en elevadas concentraciones. Este metal es un compuesto muy común que puede ser encontrado en todas partes en la tierra. Sus efectos mayormente ocurren en el tracto respiratorio y en el cerebro, los síntomas por envenenamiento con Mn son alucinaciones, olvidos y daños en los nervios, puede causar Parkinson, embolia en los pulmones y bronquitis (Pérez, 2011).

El Plomo es un metal natural que se encuentra en pequeñas cantidades en la corteza terrestre. Los efectos de este elemento son los mismos si se ingresa al cuerpo por inhalación o por ingestión. La exposición a dosis elevadas de dicho metal puede ocasionar una serie de efectos adversos a la salud, que incluyen daño cerebral severo e incluso la muerte. El sistema nervioso es el objetivo principal de la toxicidad del Pb en adultos y niños. La exposición a largo plazo puede resultar en una disminución del aprendizaje, la memoria y la atención y debilidad en los dedos, muñecas o tobillos, puede causar anemia y daño a los riñones. En mujeres embarazadas puede provocar aborto, mientras que en hombres altera la espermatogénesis (ATSDR, 2019).

El Vanadio es un metal ampliamente distribuido tanto en la naturaleza como en los sistemas biológicos y es uno de los elementos traza presente en los combustibles de tipo fósil. Por esta razón, la combustión de estos materiales es la fuente más importante de V en el ambiente (Rodríguez & Altamirano, 2006). Si la ingesta es muy alta, dicho elemento puede tener un número de efectos sobre la salud humana; cuando es acumulado a través del aire, puede causar bronquitis y neumonía. Los efectos graves del V son irritación de pulmones, garganta, ojos y cavidades nasales (Lenntech, 2019).

El Zinc tiene un valor alimenticio como elemento traza, sus funciones incluyen principalmente procesos enzimáticos y réplica de ADN. Se ha reportado que el Zn en altas dosis causa los mismos síntomas que el Plomo, y puede ser fácilmente confundido por envenenamiento con Pb. Los síntomas incluyen náuseas, vómitos, diarreas, cólicos y fiebre,

y, en la mayor parte de los casos, estos síntomas se dan tras consumos de 4-8 g del metal (Pérez, 2011).

2.3 DISTRIBUCIÓN DE FUENTES

La asignación cuantitativa de una fracción de un problema de visibilidad completo a una o más fuentes se denomina distribución de la fuente. Por lo general, no es práctico llevar a cabo un estudio de distribución de fuentes experimentando con todas las principales fuentes de contaminación en una región grande, lo que requeriría un costoso programa de control sólo para observar sus efectos. En cambio, se han desarrollado métodos analíticos y modelos predictivos basados en computadora para cuantificar la conexión entre las emisiones contaminantes (National Research Council, 1993).

Entre las técnicas estadísticas para la distribución de fuentes se encuentra el Análisis Factorial, el cual sigue un método de reducción de datos que es de gran utilidad para encontrar grupos homogéneos de variables a partir de un conjunto numeroso de variables.

A diferencia de lo que ocurre en otras técnicas, como el análisis de varianza o el de regresión, en el análisis factorial todas las variables cumplen el mismo papel: todas ellas son independientes en el sentido de que no existe *a priori* una dependencia conceptual de unas variables sobre otras. El objetivo principal de este método es simplificar la información que nos da una matriz de correlaciones para hacerla interpretable con mayor facilidad (Fuente Fernández, 2011).

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1 TÉCNICA DE MUESTREO

Para este trabajo de investigación, se tomaron datos de concentraciones determinados por Sebastián Mejía Calderón, Noé Grano y Arturo Rangel Gonce, mismos que llevaron a cabo el proceso, comenzando con la campaña de muestreo en el suelo en Araró, seguido por el tamizado de las muestras obtenidas y, finalmente, el análisis de las mismas, llevado a cabo en Sonora, México, en el laboratorio de Geología Ambiental dirigido por la Dra. Diana Meza Figueroa.

La Norma Oficial Mexicana NMX-AA-132-SCFI-2006 establece las especificaciones técnicas para la obtención y el manejo de muestras, que permitan la caracterización de suelos en el sitio de estudio, a través de la identificación y cuantificación de metales y metaloides, así como criterios generales para la obtención y manejo de muestras de suelos potencialmente contaminados con los siguientes EPT: arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y vanadio, por lo que se siguieron los lineamientos de dicha norma para los muestreos de la zona.

En los apartados 4, 5 y 6 de la norma presentada se establece el contenido del plan de muestreo, técnicas para la recolección de muestras y el procedimiento para el manejo y control de las mismas, respectivamente. En el numeral 7 se señalan consideraciones generales para la preparación de las muestras y los procedimientos para la recepción, registro, secado, cribado, homogeneizado y cuarteo de las muestras, así como el almacenamiento de los finos. En él se establecen recomendaciones para evitar la contaminación de las muestras. El numeral 8 establece los diferentes tipos de muestreo, así como los métodos para determinar la localización y distribución de los puntos de muestreo. En él se incluyen especificaciones para obtener las muestras de suelo representativas para establecer la distribución horizontal de los metales y metaloides, y valorar su posible migración vertical a través de un muestreo preliminar denominado exploratorio. Asimismo, se establecen especificaciones para el muestreo de detalle, con el cual se deberá delimitar el área y estimar el espesor del suelo

contaminado. El numeral 8 también establece especificaciones para la toma de muestras de fondo y para realizar el muestreo de comprobación posterior a la remediación.

El material y equipo que se utilizó para la colecta de muestras se lista a continuación:

- a. Herramienta para la colecta de muestras de suelo en campo, fácil de limpiar, resistente al desgaste y que no contamine las muestras con impurezas.
- b. Envases con capacidad para contener al menos 500 g de muestra.
- c. Plumas, marcadores y etiquetas.
- d. Flexómetro.
- e. Cámara fotográfica.
- f. Libreta de campo.
- g. Plano de la zona de muestreo, con la ubicación tentativa de los puntos de muestro.
- h. Instrumento que permite saber la ubicación de los puntos de muestreo.

Las muestras se recolectaron durante los meses de junio y julio del 2018; se eligieron 40 puntos de la zona de Araró y cercanías y se tomaron muestras de cada uno de ellos, depositando las mismas en bolsas de plástico para determinar sus composiciones elementales. Posteriormente, cada muestra se tamizó hasta una malla 325, equivalente a un tamaño de partícula de 45 μg , y se empacaron en bolsas plásticas para su posterior análisis.

Se recolectaron las muestras de suelo mediante un muestreo superficial y uno vertical; el primero se realizó con una cuchara o espátula de acero inoxidable o plástico, para evitar la contaminación de la muestra, mientras que la técnica vertical se efectuó a través de pozos que permitieron obtener muestras para determinar el perfil del suelo a la profundidad proyectada con la precaución de utilizar perforadoras en buen estado que no provocaran contaminación.

Se tomaron consideraciones para realizar una buena técnica de recolección, como limpiar el equipo de muestreo con una brocha o cepillo entre muestra y muestra para evitar contaminación entre las mismas.

En el muestreo vertical se identificaron los diferentes horizontes que forman el suelo en función de su aspecto físico (color, textura, grado de compactación, entre otros). Para horizontes con espesor menor a 30 cm, se tomó una muestra de canal vertical abarcando todo

el espesor del mismo; por otro lado, para horizontes mayores a 30 cm, se tomaron tantas muestras de 30 cm como fueron necesarias para cubrir el espesor total.

3.2 ANÁLISIS X-RAY FLUORESCENCIA

Las muestras de suelo se analizaron con un Analizador Portátil de Fluorescencia de Rayos X, marca *Niton XL3t Analyzer*, ThermoScientific, Inc., MA, USA, conforme al método 6200 “Field portable x-ray fluorescence spectrometry for the determination of elemental concentrations in soil and sediment” de la EPA (Agencia del Medio Ambiente de Estados Unidos). El equipo arrojó la concentración elemental, en unidades de $\mu\text{g/g}$ de muestra (ppm) de los siguientes elementos: Mo, Zr, Sr, U, Rb, Th, Pb, As, Hg, Zn, W, Cu, Co, Fe, Mg, Cr, V, Ti, Sc, Ca, K, S, Sb, Cd, Y, Ag y Nb. Debido a que este estudio está enfocado a los metales pesados con interés toxicológico, solamente se presentarán los siguientes: Pb, As, Hg, Zn, Cu, Mn, Cr, Co, Fe y V.

3.3 ANÁLISIS DE FACTORES

Esta técnica de distribución de fuentes tiene como propósito elemental definir la estructura que subyace entre las variables que se están analizando. El análisis factorial (también llamado análisis de factores) provee las herramientas para el estudio de la estructura de las correlaciones entre un gran número de variables mediante factores, los cuales son grupos de variables altamente relacionadas entre sí (Martínez *et al.*, 2012).

A continuación, se describe el método estadístico de la técnica en cuestión. En la ecuación 3.1 se muestra que el modelo clásico del análisis factorial se asume que las variables están linealmente relacionadas a un número de factores.

$$X_1 - \mu_1 = \ell_{11}F_1 + \ell_{12}F_2 + \dots + \ell_{1m}F_m + \varepsilon_1$$

$$X_2 - \mu_2 = \ell_{21}F_1 + \ell_{22}F_2 + \dots + \ell_{2m}F_m + \varepsilon_2$$

$$X_p - \mu_p = \ell_{p1}F_1 + \ell_{p2}F_2 + \dots + \ell_{pm}F_m + \varepsilon_p \quad (3.1)$$

donde:

X_p = los valores de n variables aleatorias en el sistema para la j -ésima muestra

F_m = los valores de los m factores comunes a todas las variables de la j -ésima muestra

ℓ_{ij} = es la carga de la i -ésima variable sobre el j -ésimo factor

ε_p = el valor de un factor específico para cada variable X

La notación matricial se muestra en la ecuación 3.2.

$$\mathbf{X} = \boldsymbol{\mu} + \mathbf{L} \mathbf{F} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (3.2)$$

$(px1) \quad (px1) \quad (pxm)(mx1) \quad (px1)$

donde:

μ_i = media de la variable i

ε_i = i -ésimo factor específico

F_j = j -ésimo factor común

ℓ_{ij} = cargas de la i -ésima variable sobre el j -ésimo factor

\mathbf{X} es una variable aleatoria formada de p observaciones X_1, X_2, \dots, X_p . La matriz de factores de carga está representada por \mathbf{L} , mientras que \mathbf{F} y $\boldsymbol{\varepsilon}$ son la matriz de factores comunes y la matriz de errores o factores específicos, respectivamente. Estas dos últimas matrices tienen ciertas relaciones en la covarianza que se muestran en la ecuación 3.3.

$$E(\mathbf{F}) = \mathbf{0}, \quad \text{Cov}(\mathbf{F}) = E[\mathbf{F}\mathbf{F}'] = \mathbf{I}$$

$(mx1) \quad (mxm) \quad (3.3)$

$$E(\boldsymbol{\varepsilon}) = \mathbf{0}, \quad \text{Cov}(\boldsymbol{\varepsilon}) = E[\boldsymbol{\varepsilon}\boldsymbol{\varepsilon}'] = \boldsymbol{\psi}$$

$(mx1) \quad (pxp)$

En donde $\boldsymbol{\psi}$ es una matriz diagonal y \mathbf{F} y $\boldsymbol{\varepsilon}$ son independientes, por lo que:

$$\text{Cov}(\boldsymbol{\varepsilon}, \mathbf{F}) = E(\boldsymbol{\varepsilon}\mathbf{F}') = \mathbf{0} \quad (3.4)$$

El modelo $\mathbf{X} - \boldsymbol{\mu} = \mathbf{L}\mathbf{F} + \boldsymbol{\varepsilon}$ es lineal para los factores comunes y la respuesta de \mathbf{X} está relacionada con los factores cuando se cumple la suposición de linealidad en el modelo de análisis de factores. La varianza de la i -ésima variable aleatoria X o $\text{Var}(X_i) = \sigma_{ii}$, se divide

en dos fracciones. La porción de la varianza debida a los m factores comunes se le llama la i -ésima comunalidad. La porción debida al factor específico se le llama unicidad o varianza específica. Lo anterior puede ser representado por medio de la ecuación 3.5.

$$\underbrace{\sigma_{ii}}_{\text{Var (Xi)}} = \underbrace{r^2_{i1+} + r^2_{i2+} + \dots + r^2_{im+}}_{\text{Comunalidad}} + \underbrace{\psi_i}_{\text{Varianza específica}} \quad (3.5)$$

La i -ésima comunalidad es la suma de los cuadrados de las cargas de la i -ésima variable sobre m factores comunes (Johnson & Wichern, 2002). En base a la dependencia de las variables sobre los factores, como se indica con los coeficientes F_{ij} , se realiza la interpretación de los mismos. Estos coeficientes se pueden considerar como los coeficientes de correlación entre la variable y el factor. De esta manera, al examinar las variables que son influenciadas por un factor dado, es posible hacer inferencias sobre su naturaleza (Hopke, 1985).

3.4 USO DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) PARA LA REPRESENTACIÓN GEOESPACIAL DE LOS EPT EN LA ZONA DE ESTUDIO

Los mapas geoquímicos de EPT se obtuvieron utilizando la extensión del software del analista geoestadístico del Sistema de Información Geográfica (GIS) (Arc GIS, versión 10.3), el cual permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica. En éste, se introdujeron los datos para crear el mapa de la localidad de Araró y sus carreteras. Una vez que generado dicho mapa, se agregaron los puntos de muestro de la zona en coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator), el cual es un sistema utilizado para referenciar cualquier punto de la superficie terrestre, utilizando para ello un tipo particular de proyección cilíndrica para representar la Tierra sobre el plano (AristaSur, 2019). Las coordenadas UTM de los puntos de muestreo se dan en la Tabla A.1 (ver Anexo 1).

En la Figura 3.1 se representan las coordenadas visualmente en el mapa generado en ArcGIS 10.3, numerando cada punto de muestreo conforme a los datos de su tabla correspondiente.

Simbología

-  Puntos de muestreo
-  Calles
-  Localidad

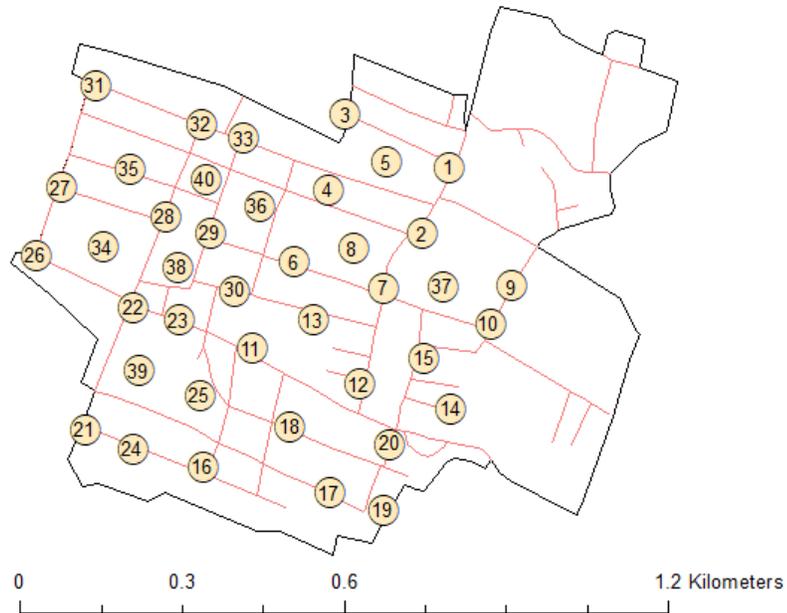


Figura 3.1. Puntos de muestreo en la localidad de Araró.

3.5 INTERPOLACIÓN KRIGING

La interpolación es un procedimiento utilizado para predecir los valores de las celdas o espacios en ubicaciones que carecen de puntos muestreados. Se basa en el principio de autocorrelación espacial o dependencia espacial, mismo que mide el grado de relación entre objetos cercanos y distantes (Childs, 2004).

Dos de los procedimientos de interpolación geográfica de más uso son: distancia inversa ponderada (IDW, por sus siglas en inglés) y el método Kriging ordinario (KO) (Ibarra Castillo *et al.*, 2009). El primero es una técnica determinística que se basa en el grado de similitud de las celdas, mientras que técnicas de interpolación geoespacial, tales como Kriging son basados en estadísticas y se utilizan modelos de superficie de predicción que también determinan una medida de la certeza o precisión de las predicciones (Childs, 2004). En una investigación (Brus *et al.*, 1996), se comparó la eficiencia de seis métodos de

interpolación geográfica para la estimación de propiedades de suelos en puntos no muestreados, y los resultados mostraron que el método Kriging Ordinario fue el más consistente y confiable.

El estudio de distribución geoespacial de metales pesados en suelos de áreas rurales es de gran utilidad para identificar zonas con altas concentraciones de metales pesados y evaluar las posibles fuentes de dicha contaminación. Los mapas de distribución geoespacial de los elementos en estudio se generaron utilizando la interpolación Kriging Ordinaria con ArcGIS 10.3.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1 ANÁLISIS FACTORIAL

Para la asignación de fuentes, se recurrió a la técnica multivariada de análisis de factores, misma que se utilizó con los datos de las concentraciones obtenidas de los muestreos, presentados en la Tabla A.2 (ver Anexo 2). Con la técnica empleada se espera obtener asociaciones entre la concentración de los elementos muestreados para identificar posibles fuentes de emisión, denominadas “factores”.

Se utilizó el software MiniTab (versión 14) para llevar a cabo el análisis. La Figura 4.1 representa los valores obtenidos para 10 factores principales. Como se puede observar, a partir del componente 5, los demás componentes tienen un efecto despreciable en la varianza total. Se seleccionaron entonces los primeros 5 factores que representan un cambio significativo en la varianza. Cada uno de los factores representa una posible fuente de emisión a la que se le debe asignar su adecuada interpretación.

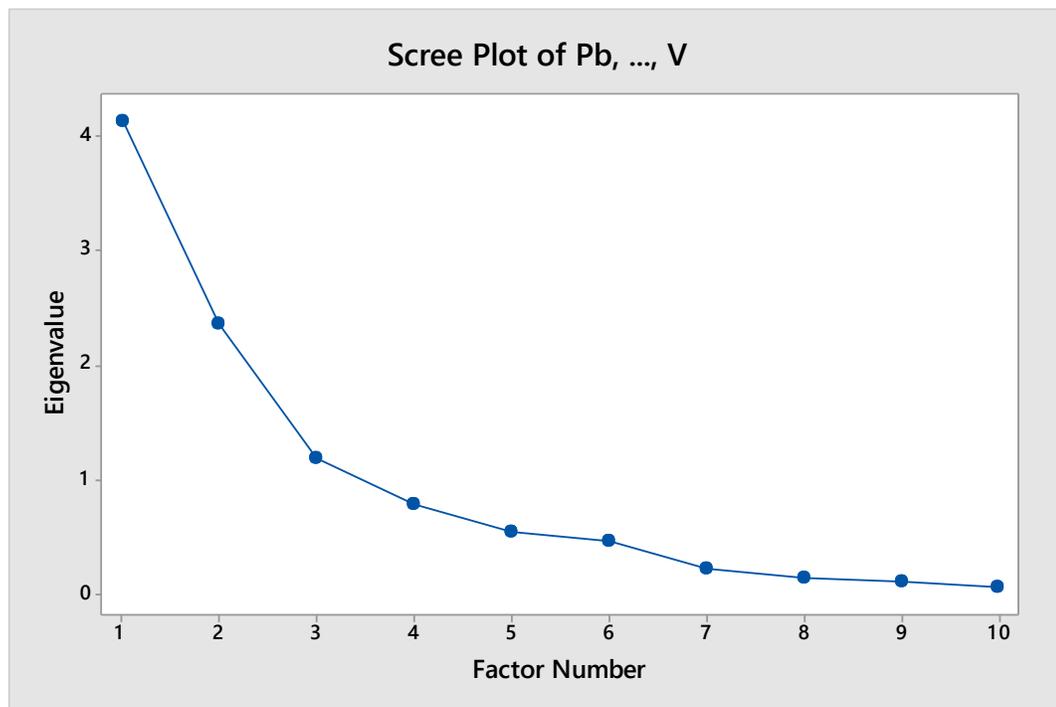


Figura 4.1. Gráfica de sedimentación.

En las Tablas 4.1 y 4.2 se muestran las cargas de análisis de factores sin rotación y con rotación varimáx, respectivamente. Se analizaron los 10 EPT y se remarcan con color rojo los valores absolutos mayores a 0.7 y, con azul, los valores absolutos entre 0.5 y 0.7.

Tabla 4.1. Cargas resultantes del análisis de factores sin rotación varimáx.

Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Comunalidad
Pb	-0.473	-0.660	-0.049	0.353	-0.053	0.789
As	0.106	-0.411	-0.721	-0.499	-0.173	0.978
Hg	-0.200	-0.758	-0.321	0.218	0.219	0.813
Zn	-0.306	-0.846	0.256	0.009	-0.213	0.92
Cu	-0.345	-0.428	0.664	-0.467	-0.047	0.963
Co	0.869	-0.195	0.114	0.168	-0.205	0.877
Fe	0.896	-0.261	0.048	0.22	-0.122	0.936
Mn	0.897	-0.140	-0.057	-0.209	-0.121	0.886
Cr	0.645	-0.392	0.095	-0.165	0.591	0.955
V	0.927	-0.049	0.155	0.061	-0.032	0.89
Varianza	4.1241	2.3596	1.1823	0.7896	0.5503	9.0059
% Var	0.412	0.236	0.118	0.079	0.055	0.901

Tabla 4.2. Cargas resultantes del análisis de factores con rotación varimáx.

Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Comunalidad
Pb	-0.193	-0.847	-0.136	0.026	-0.120	0.789
As	0.06	-0.164	0.044	-0.972	0.046	0.978
Hg	-0.064	-0.831	0.041	-0.237	0.245	0.813
Zn	0.038	-0.732	-0.607	-0.075	-0.096	0.92
Cu	-0.167	-0.113	-0.955	0.070	0.077	0.963
Co	0.932	0.028	0.058	0.015	0.055	0.877
Fe	0.948	-0.056	0.126	-0.002	0.138	0.936
Mn	0.832	0.237	0.013	-0.307	0.206	0.886
Cr	0.494	-0.054	-0.078	-0.070	0.835	0.955
V	0.886	0.217	0.074	0.051	0.223	0.89
Varianza	3.563	2.0952	1.3324	1.1129	0.9025	9.0059
% Var	0.356	0.21	0.133	0.111	0.09	0.901

La diferencia entre las dos tablas presentadas es la rotación varimáx; esta rotación mantiene la independencia entre los factores y produce una matriz de carga (Balasubramanian & Qian, 2004).

En el primer factor de la Tabla 4.2 se explica el 35.6% de la varianza total; en éste se agrupan todos aquellos elementos (Co, Fe, Mn y V) que tienen un posible origen natural. El segundo factor está generalmente asociado a fuentes antropogénicas; la técnica empleada muestra que el Pb, Hg y Zn está agrupado en dicho factor. En la Figura 4.2 se grafican los valores del factor 2 contra factor 1 con rotación varimáx, mostrados en la Tabla 4.2, indicando la agrupación de los EPT en el primer factor en la elipse superior derecha, y los EPT del segundo, en la elipse inferior izquierda, confirmando las relaciones entre los elementos de un mismo origen; esto es, un origen natural para el Mn, V, Co y Fe, mientras que el Pb, Hg y Zn provienen de actividad antropogénica.

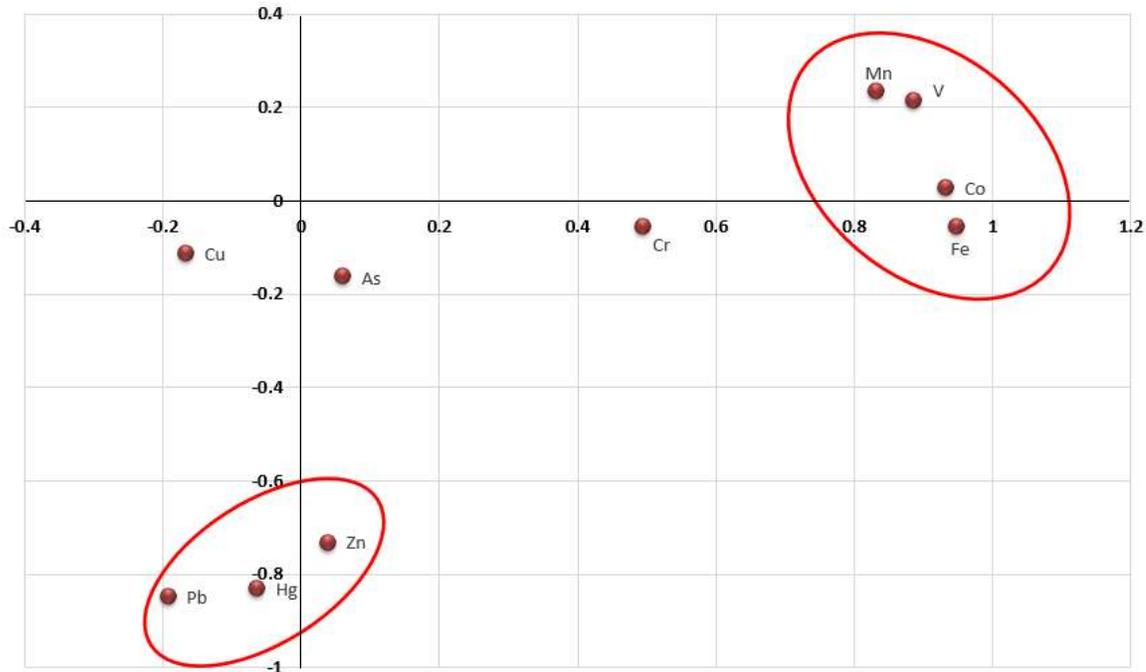


Figura 4.2. Factor 2 vs Factor 1

4.2 DESPLIEGUE DE MAPAS POR PATRONES SIMILARES

Grupo 1

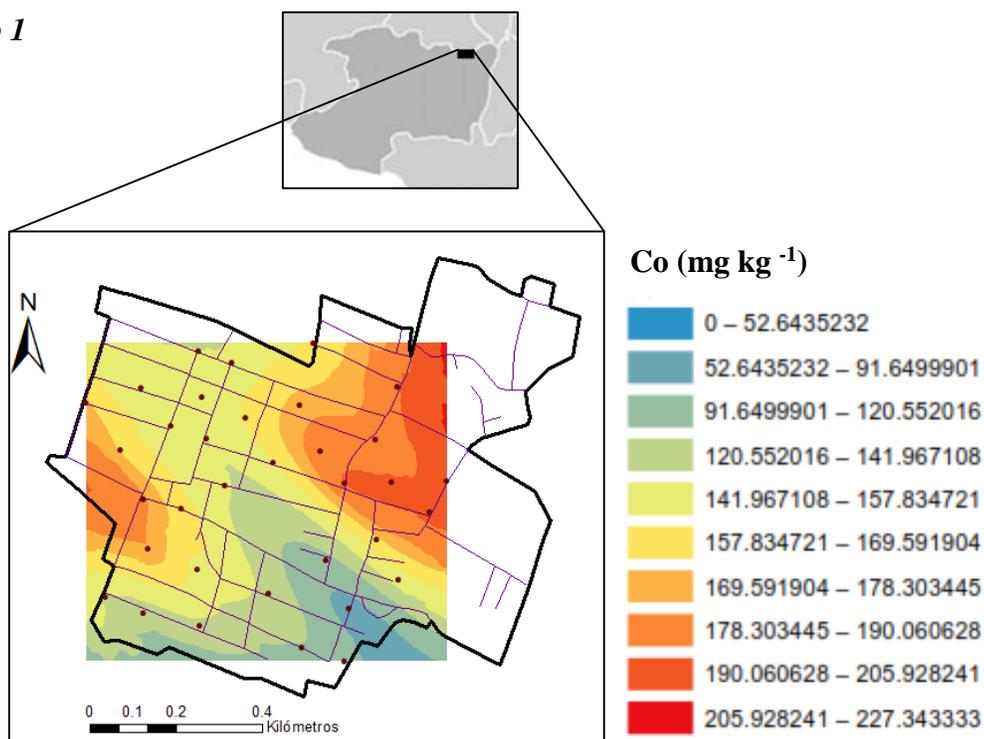


Figura 4.3. Distribución geoespacial de Cobalto.

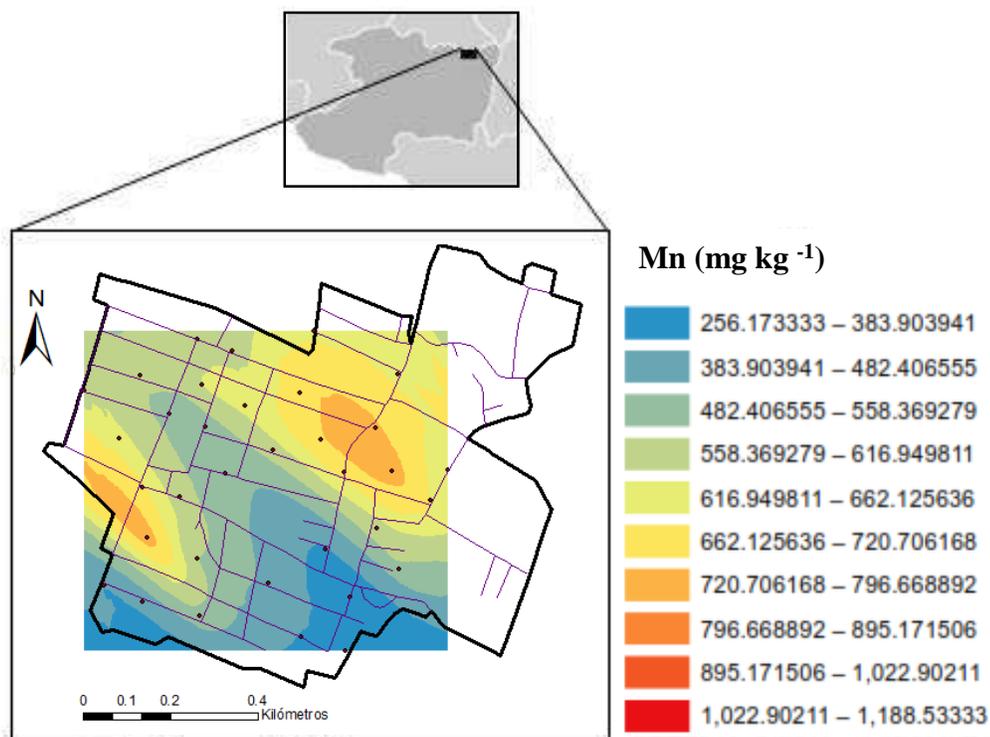


Figura 4.4. Distribución geoespacial de Manganeso.

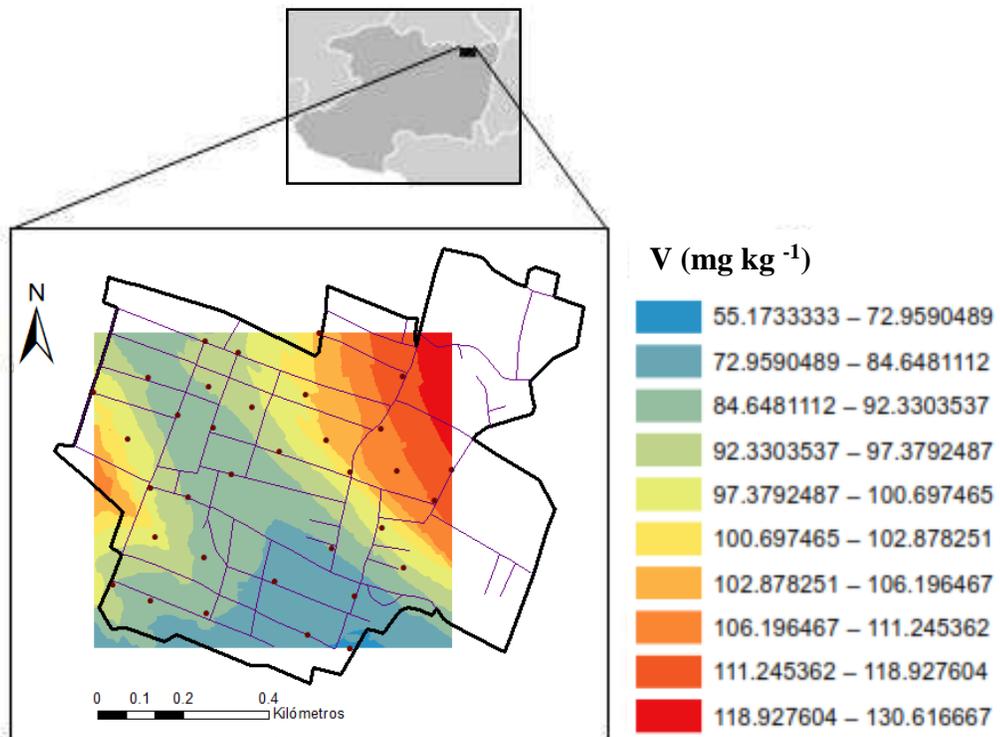


Figura 4.5. Distribución geoespacial de Vanadio.

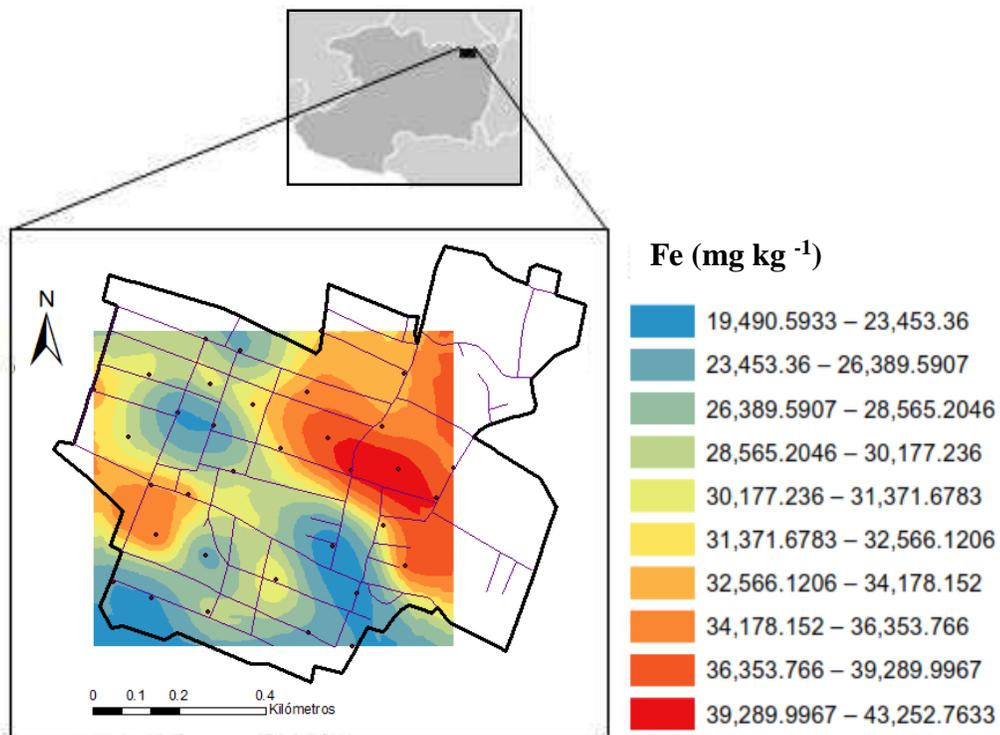


Figura 4.6. Distribución geoespacial de Hierro.

Grupo 2

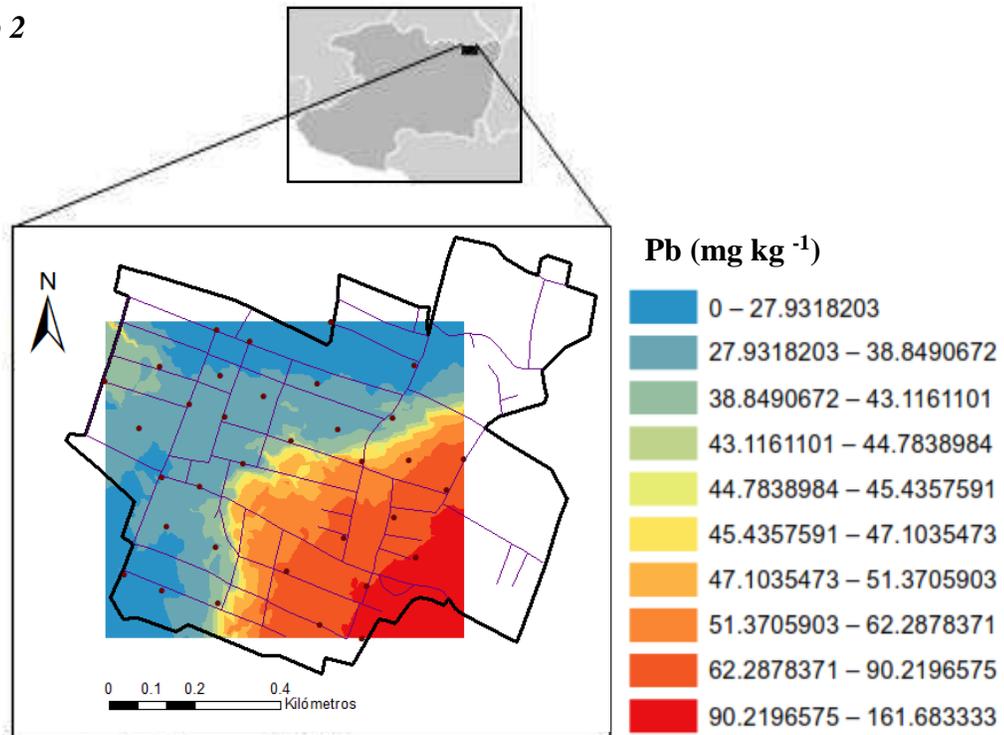


Figura 4.7. Distribución geoespacial de Plomo.

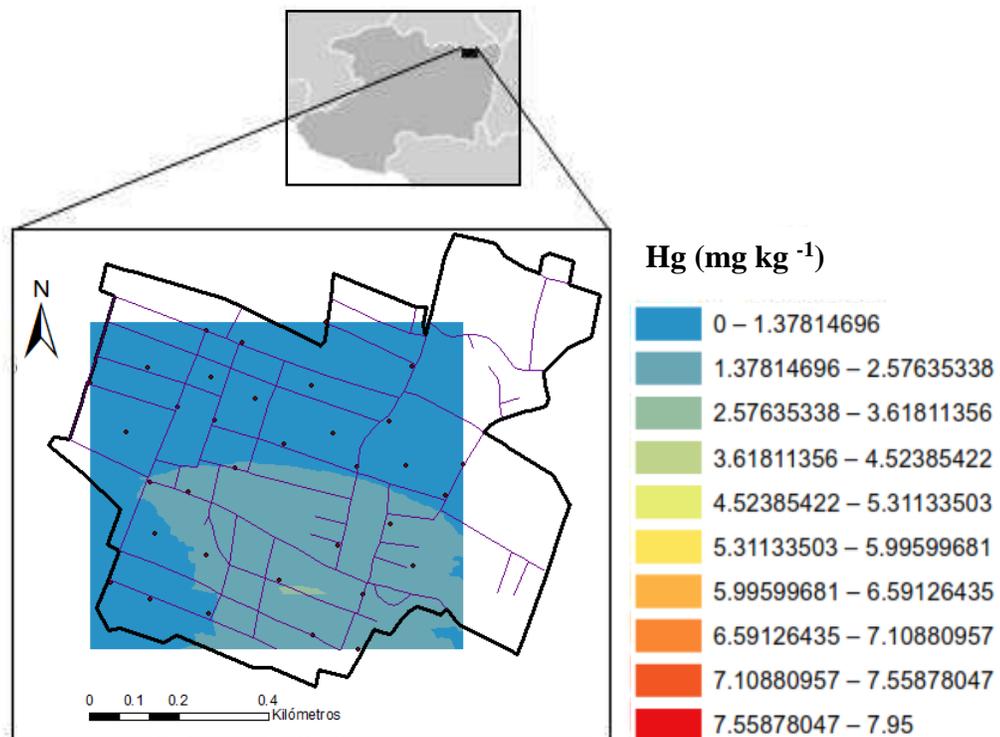


Figura 4.8. Distribución geoespacial de Mercurio.

Grupo 3

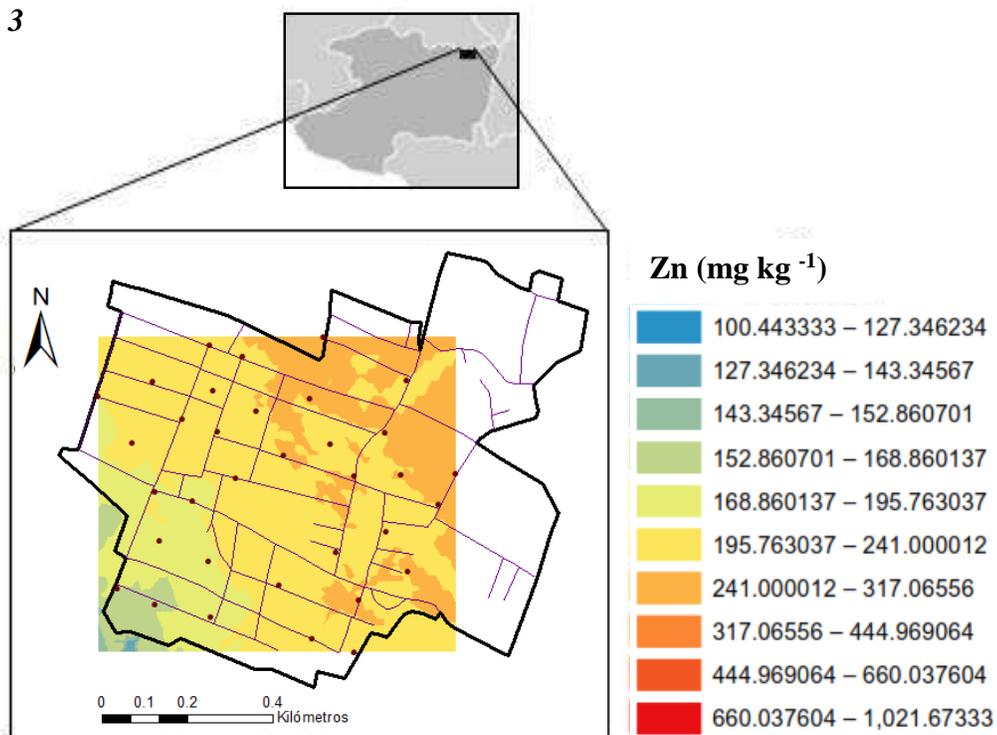


Figura 4.9. Distribución geoespacial de Zinc.

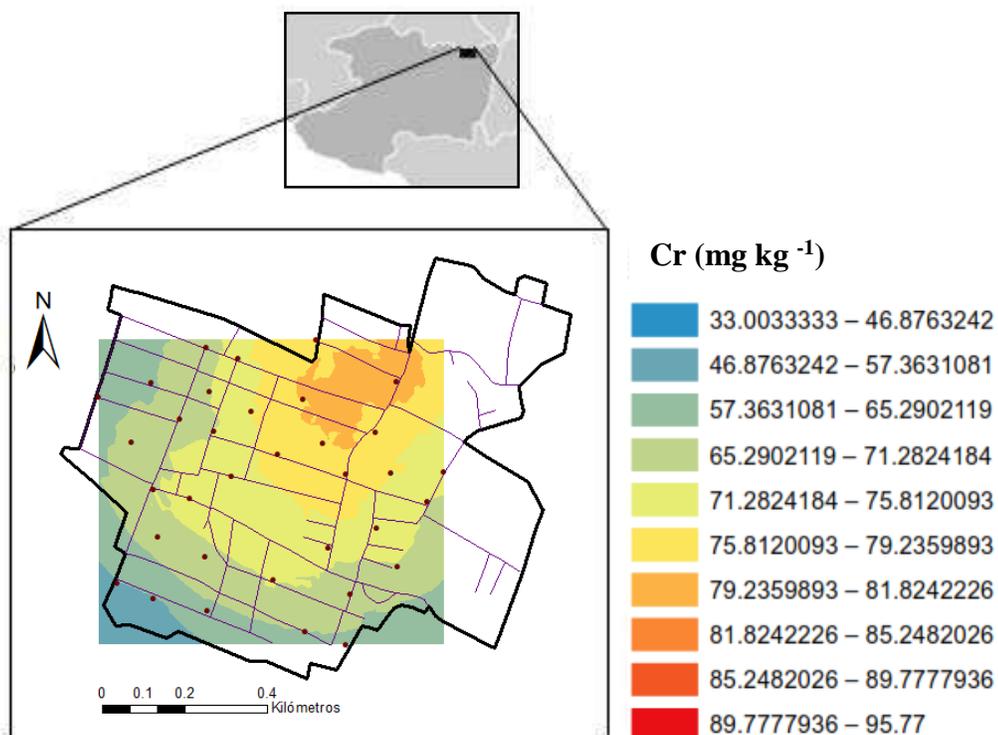


Figura 4.10. Distribución geoespacial de Cromo.

Patrones particulares

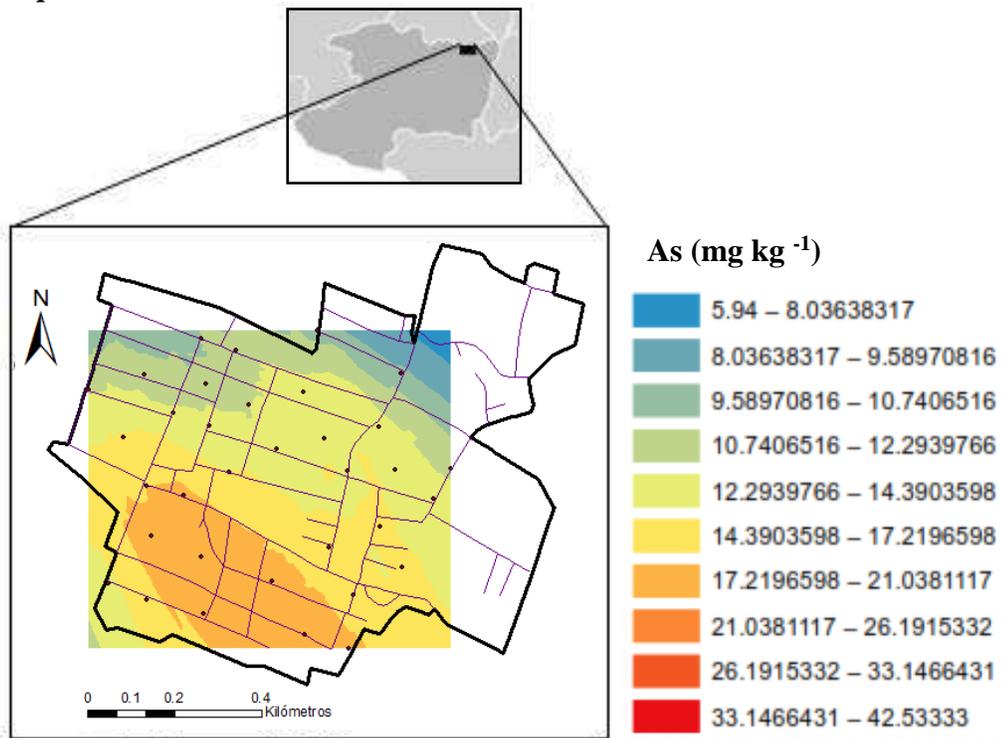


Figura 4.11. Distribución geoespacial de Arsénico.

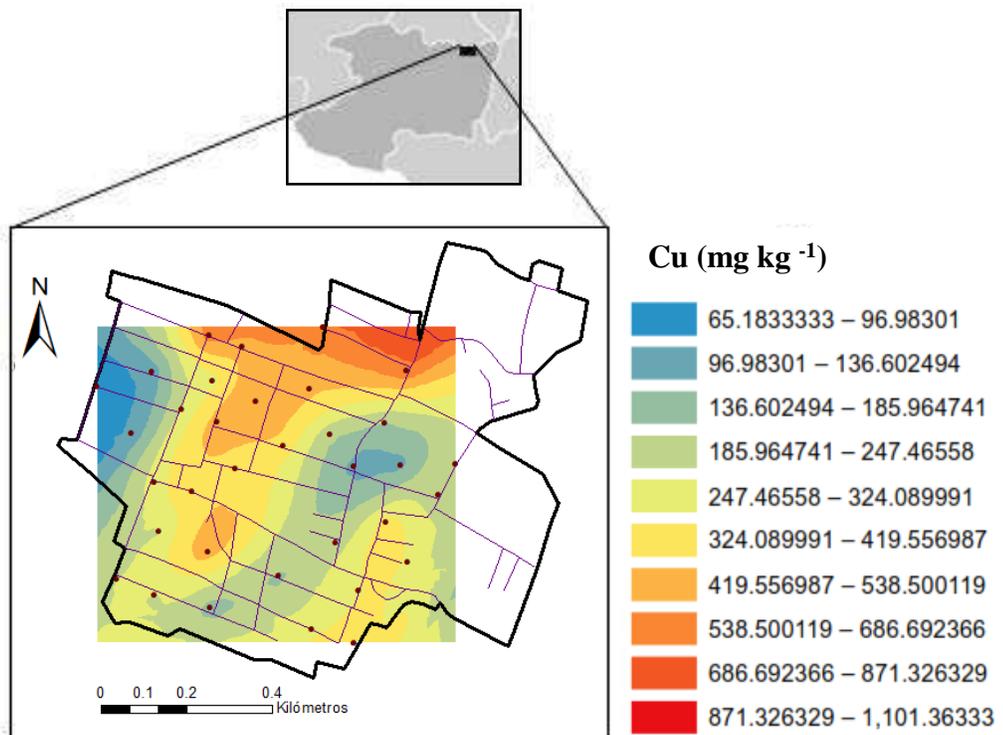


Figura 4.12. Distribución geoespacial de Cobre.

4.3 ANÁLISIS GEOESPACIAL

En el primer grupo de metales, que incluye al Co, Mn, V y Fe (mismos elementos agrupados en el factor 1 de la Tabla 4.2), se observa que existe una relación fuerte tanto en el análisis de factores como en los mapas geoespaciales, distribuyéndose con una concentración mayor hacia los extremos este y oeste; de la misma manera, en la Figura 4.2 se observa una agrupación de estos EPT, con lo que se puede confirmar una fuente natural de dichos elementos.

Los patrones de distribución en los mapas indican que el Pb y el Hg (grupo 2) se relacionan al tener sus mayores concentraciones al sureste de la zona; no obstante, el Zn también podría tener el mismo origen, debido a que en el análisis factorial se agrupó en el factor 2, indicando un posible origen antropogénico. Por su parte, el Pb aumenta considerablemente al dirigirse del centro al sureste del poblado y, al estar comúnmente asociado con el escape de vehículos (Chan *et al.*, 1997), su distribución se vincula con la carretera Guadalajara-Atlacomulco, ubicada al sur de Araró (ver Anexo 3).

En la siguiente relación de mapas (grupo 3), conformado por Zn y Cr, se muestra una concentración mayor en dirección al noreste, mientras que, hacia el suroeste, dichas concentraciones parecen ir disminuyendo. A su vez, el Zn, al igual que el plomo, se asocian comúnmente con emisiones de vehículos (Chan *et al.*, 1997).

Sin embargo, no fue posible encontrar asociaciones para todos los elementos estudiados; las Figuras 4.11 y 4.12 muestran las distribuciones de los EPT que presentan un patrón único, As y Cu, asociándolos por esta razón a un origen natural.

En la Figura 4.13 se hizo un análisis de todos los EPT en conjunto, en donde el símbolo de cada uno de ellos representa la ubicación (o ubicaciones) en donde se encuentra la mayor concentración de cada metal en la zona.

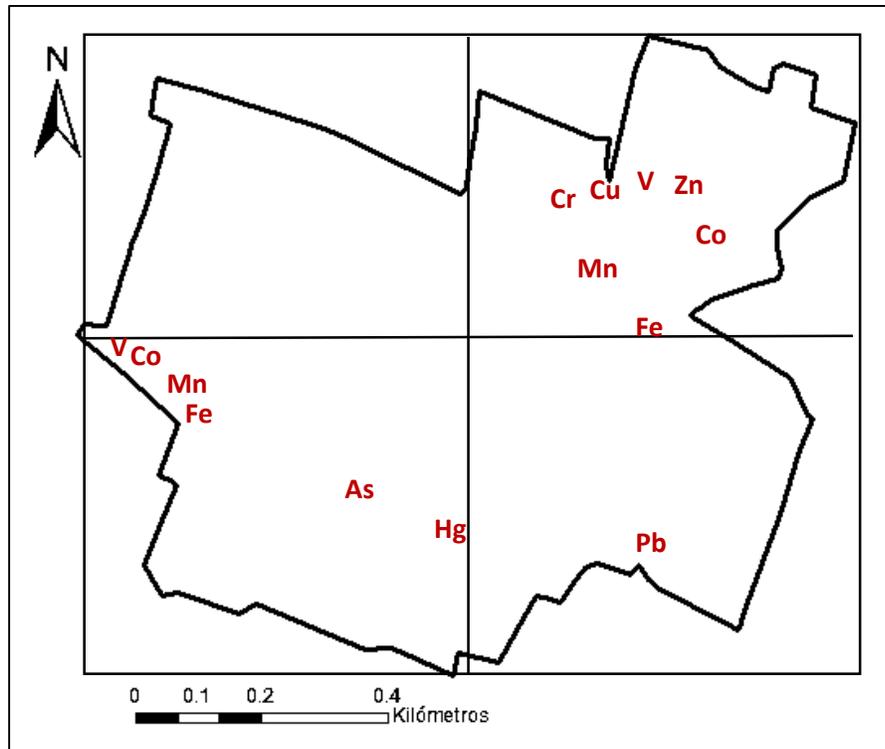


Figura 4.13. Concentraciones mayores de cada EPT representadas por su símbolo.

Se puede observar que las zonas con mayor saturación de EPT se encuentran en el noreste y el oeste del poblado. Por otra parte, si bien no se percibe ningún símbolo en las zonas central y noroeste de Araró en la figura, no significa que éstas se encuentren libres de contaminantes, sino que éstos tienen menores concentraciones de los mismos.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIÓN

Las concentraciones de los EPT se analizaron mediante una técnica de estadística multivariada: el análisis factorial. Gracias a éste, fue posible diferenciar dos fuentes de los EPT, fuentes naturales y antropogénicas. En la técnica mencionada se obtuvieron 5 factores de acuerdo a la gráfica de sedimentación; el primer factor, asociado con fuentes naturales, englobó al Mn, Fe, V y Co; el segundo, relacionado comúnmente a la actividad antropogénica, agrupó al Pb, Hg y Zn; mientras que el Cu, As y Cr se dispersaron entre los factores restantes, asociándolos así a fuentes naturales.

El análisis estadístico se complementó con sistemas de información geoestadística, que permitieron elaborar mapas para visualizar la distribución espacial de los EPT e identificar puntos de concentraciones altas en los mismos. Éstos confirmaron en cierta medida lo concluido del análisis de factores, pues se relacionaban en gran parte los mismos elementos.

El Mn, Fe, V y Co derivan de fuentes naturales, al igual que el As y Cu; el Pb y Zn provienen de actividades antropogénicas, como las emisiones de los automóviles.

RECOMENDACIÓN

A partir de los resultados obtenidos, realizar un análisis de riesgo y salud a la población de Araró, para determinar si se está en peligro de contracción de enfermedades por exposición a polvos.

ANEXOS

ANEXO 1

Tabla A.1. Coordenadas UTM de los puntos de muestreo.

Punto de muestreo	UTM Este	UTM Norte	Zona UTM
1	309331.12	2202915.02	14Q
2	309281.2	2202791.33	14Q
3	309137.64	2203014.32	14Q
4	309106.15	2202872.61	14Q
5	309212.59	2202924.6	14Q
6	309043.56	2202739.44	14Q
7	309208.26	2202690.05	14Q
8	309152.94	2202764.71	14Q
9	309446.03	2202695.44	14Q
10	309406.52	2202625.12	14Q
11	308963.9	2202578.33	14Q
12	309165.3	2202513.03	14Q
13	309077.56	2202630.9	14Q
14	309333.82	2202467.59	14Q
15	309283.92	2202559.47	14Q
16	308875.14	2202359.96	14Q
17	309109.59	2202310.7	14Q
18	309034.48	2202434.18	14Q
19	309209.37	2202279.72	14Q
20	309220	2202401.17	14Q
21	308655.65	2202428.11	14Q
22	308744.81	2202653.56	14Q
23	308830.34	2202632.37	14Q
24	308743.73	2202390.62	14Q
25	308869.55	2202492.22	14Q
26	308564.06	2202749.63	14Q
27	308611.1	2202876.99	14Q
28	308806.24	2202823.61	14Q
29	308889.16	2202793.15	14Q
30	308933.02	2202685.61	14Q
31	308673.9	2203066.41	14Q
32	308871.25	2202995.4	14Q
33	308949.5	2202968.75	14Q
34	308689.92	2202767.64	14Q
35	308738.91	2202911.03	14Q
36	308979.22	2202841.66	14Q
37	309318.88	2202693.16	14Q
38	308826.16	2202729.51	14Q
39	308755.18	2202538.08	14Q
40	308880.27	2202890.68	14Q

ANEXO 2

Tabla A.2. Base de datos de concentraciones (ppm) obtenidas de los muestreos.

Muestra	Pb	As	Hg	Zn	Cu	Co	Fe	Mn	Cr	V
1	44.8366667	6.73666667	0	381.9	941.473333	185.303333	33080.7967	594.143333	94.1633333	112.2633333
2	0	42.5333333	0	119.273333	159.793333	168.276667	33843.63	727.936667	79.2466667	102.5766667
3	0	9.37	0	248.486667	491.703333	163	32822.5067	678.943333	79.3666667	109.6666667
4	0	11.3566667	0	214.373333	404.143333	184.375	34948.6933	668.923333	87.7766667	105.5533333
7	61.2933333	9.96333333	0	219.2	97.4166667	227.343333	42481.1233	619.606667	66.91	111.6566667
8	91.5233333	14.75	0	147.11	136.283333	184.49	38549.9667	827.793333	89.2733333	101.8533333
9	69.8333333	15.07	0	326.366667	373.536667	190.806667	34549.44	549.1	63.2566667	109.1266667
10	82.22	5.94	0	190.546667	137.846667	187.97	39399.4033	590.293333	64.3466667	108.8666667
12	49.4133333	10.8966667	0	100.443333	166.253333	109.39	19490.5933	267.43	67.9533333	86.5866667
14	44.8233333	12.98	0	236.97	351.726667	186.293333	38439.23	797.72	84.5133333	130.6166667
15	161.683333	24.7666667	7.95	1021.67333	603.743333	149.91	31270.4367	507.643333	76.8433333	88.6566667
16	38.0133333	12.33	0	155.893333	105.103333	158.655	30663.3933	695.133333	73.48	98.95
17	59.8566667	19.48	6.215	189.16	237.296667	126.31	25486.09	405.493333	66.7733333	84.24
18	42.8333333	19.26	5.785	153.796667	155.72	154.98	33540.82	497.273333	83.98	103.4166667
19	140.503333	24.5833333	0	261.853333	405.816667	134.6	23668.1067	326.676667	67.5266667	64.15333333
20	84.5766667	14.15	0	199.82	310.063333	0	20770.37	256.173333	58.29	55.17333333
21	36.86	6.68333333	0	138.173333	308.31	127.93	23117.6033	283.036667	67.3133333	78.11666667
22	41.7033333	21.5666667	0	178.43	312.806667	201.086667	33839.08	699.82	76.6166667	92.61666667
23	119.086667	28.2466667	7.52	562.246667	512.616667	168.17	34387.3167	587.423333	80.5033333	87.82333333
24	0	18.3866667	0	184.93	195.553333	110.08	21748.7133	359.96	33.0033333	80.99666667
25	43.4533333	18.5633333	0	352.886667	853.09	120.13	23554.0367	411.633333	50.6466667	77.89333333
27	0	9.27666667	0	137.1	65.1833333	180.513333	33976.2467	634.606667	64.34	115.5033333
28	68.64	8.59333333	0	331.773333	300.546667	116.576667	21732.34	399.186667	65.28	65.29666667
30	0	9.87	0	158.356667	218.09	160.866667	29681.2167	616.34	74.95	91.39666667
32	54.54	11.8633333	0	457.49	1101.36333	140.793333	29130.2733	635.083333	71.4	96.59333333
33	49.3566667	14.1766667	0	275.123333	389.37	130.79	24805.2633	488.393333	62.1233333	87.84
34	41.4066667	16.1	0	155.5	79.8766667	144.916667	29852.65	563.556667	76.3	102.4366667
35	0	17.1433333	0	117.263333	69.3866667	176.13	31226.93	726.98	55.1833333	99.60333333
37	43.1833333	15.3166667	0	276.426667	76.6733333	199.125	43252.7633	984.783333	73.6533333	114.9566667
38	0	10.2766667	0	166.17	212.663333	203.486667	40682.1567	661.65	79.5466667	131.3233333
39	0	37.9966667	0	151.6	164.66	203.66	38994.11	1188.53333	95.77	127.7633333
40	0	10.24	0	158.453333	206.383333	173.595	31505.2767	739.04	83.8333333	107.6966667
29-32	64.69	11.2066667	0	345.073333	566.256667	119.396667	22044.7367	398.976667	53.5766667	72.20333333
36-6	0	10.6533333	0	229.833333	533.6	152.103333	32436.6567	619.186667	79.6666667	98.49666667

ANEXO 3



Figura A.1. Ubicación de la localidad de Araró con respecto a la carretera Guadalajara-Atacomulco.

REFERENCIAS

- Alemán Torres, J. (2013). Evaluación de la emisión de partículas menores a diez micrómetros (PM10) como producto de la erosión eólica en áreas agrícolas de Morelia y zonas aledañas. *División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química*.
- AristaSur. (14 de Febrero de 2019). *Sistema de Coordenadas Geográficas: UTM*. Obtenido de <https://www.aristasur.com/contenido/sistema-de-coordenadas-geograficas-utm>
- ATSDR. (2012). *ToxFAQs for Chromium*. Obtenido de Agency for Toxic Substances and Disease Registry: <http://www.atsdr.cdc.gov/toxfaqs/tfacts7.pdf> 18/09/2016
- ATSDR. (Mayo de 2019). *ToxFAQs for Lead*. Obtenido de Agency for Toxic Substances and Disease Registry: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxfaqs/tfacts13.pdf>
- Balasubramanian, R., & Qian, W. B. (2004). Characterization and source identification of airborne trace metals in Singapore. *Journal of Environmental Monitoring*, 813-818.
- Belmonte Serrato, F., Romero Díaz, A., Alonso Sarría, F., Moreno Brotóns, J., & Rojo López, S. (2010). Afección de suelos agrícolas por metales pesados en áreas limítrofes a explotaciones mineras del sureste de España. *Papeles de Geografía*, 45-54.
- Brus, D. J., De Gruijter, J. J., Marsman, B. A., Visschers, R., Bregt, A. K., Breeuwsma, A., & Bouma, J. (1996). The performance of spatial interpolation methods and choropleth maps to estimate properties at points: A soil survey case study. *Environmetrics*.
- Chan, Y. C., Simpson, R. W., McTanish, G. H., Vowles, P. D., Choen, D. D., & Bailey, G. M. (1997). Characterisation of chemical species in PM2.5 and PM10 aerosols in Brisbane, Australia. *Atmos. Environ.*, 3773-3785.
- Childs, C. (2004). Interpolating Surfaces in ArcGIS Spatial Analyst. *Education Services*.
- Covarrubias, S. A., & Peña Cabriales, J. J. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*.
- Delgado, C., Israde Alcántara, I., Bautista, F., Gogichaishvili, A., Márquez, C., Cejudo, R., . . . González, I. (2018). Distribución espacial de Fe, Li, Pb, Mn, V, y Zn en suelos urbanos de Morelia, Michoacán, México. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 427-440.
- Duruibe, J., Ogwuegbu, M., & Egwurugwu, J. (2007). Heavy metal pollution and human biotoxic effects. *International Journal of Physical Sciences*.
- Echevarría, D., Heyer, N., Martin, M., Naleway, C., Woods, J., & Bittner, A. (1995). Behavioral effects of low-level exposure to Hg among dentists. *Neurotoxicology and Teratology*, 161-168.
- Ferner, D. (2001). Toxicity, heavy metals.

- Fuente Fernández, S. (2011). Análisis Factorial. *Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales*.
- Galán Huertos, E., & Romero Baena, A. (2008). *Contaminación de suelos por metales pesados*.
Obtenido de http://www.ehu.es/sem/macla_pdf/macla10/Macla10_48.pdf
- Galán Huertos, E., & Romero Baena, A. (2008). Contaminación de suelos por metales pesados.
Macla, 48-60.
- García Rico, L., Meza Figueroa, D., Jay Gandolfi, A., Del Río Salas, R., Romero, F., & Meza Montenegro, M. M. (2015). Dust–Metal Sources in an Urbanized Arid Zone: Implications for Health-Risk Assessments. *Arch Environ Contam Toxicol*.
- Geagea, M. L., Gauthier-Lafave, F., & Millet, M. (2008). Tracing of industrial aerosol sources in an urban environment using Pb, Sr and Nd isotopes. *Environment Science and Technology*.
Obtenido de Environment Science and Technology.
- Guo, G., Wu, F., Xie, F., & Zhang, R. (2011). *Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in urban soils from southwest China*.
- Hopke, P. K. (1985). *Receptor modeling in environmental chemistry*. John Wiley & Sons.
- Hu, H. (2002). Human Health and Heavy Metals Exposure. En *Life Support: The Environment and Human Health*. Michael McCally.
- Ibarra Castillo, D., Ruiz Corral, J. A., González Eguiarte, D. R., Flores Garnica, J. G., & Díaz Padilla, G. (2009). Distribución espacial del pH de los suelos agrícolas de Zapopan, Jalisco, México. *Agricultura Técnica en México*.
- IDAE. (2008). *Manual de geotermia*. Madrid: IDAE.
- Imperato, M., Adamo, P., Naimo, D., Arienmo, M., & Stanzione, D. (2003). Spatial distribution of heavy metals in urban soils of Naples City (Italy). *Environmental Pollution*.
- Johnson, R. A., & Wichern, D. W. (2002). *Applied multivariate statistical analysis*. Upper Saddle River, NJ: Prentice hall.
- Lenntech. (2004). *Water Treatment and Air Purification*. Obtenido de www.excelwater.com/thp/filters/Water-Purification.htm
- Lenntech. (Consultado en: 2019). *Efectos del Vanadio sobre la salud*. Obtenido de <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/v.htm>
- Madrid, C. d. (Julio de 2011). *Instrucciones Técnicas para el Análisis de Riesgos para la Salud Humana en el Ámbito del Real Decreto 9/2005 del 14 de Enero en la Comunidad de Madrid*. Obtenido de http://www.comunidad.madrid/sites/default/files/doc/medio-ambiente/it_guia_final_2011_nologo_corregida_0.pdf
- Maleki, A., Amini, H., Nazmara, S., & Mahvi, A. H. (14 de Noviembre de 2014). *Spatial distribution of heavy metals in soil, water, and vegetables of farms in Sanandaj, Kurdistan, Iran*. Obtenido de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4245762/>

- Martínez, M. A., Caballero, P., Carrillo, O., Mendoza, A., & Mejía, G. M. (2012). Chemical characterization and factor analysis of PM2.5 in two sites of Monterrey, México. *Journal of the Air & Waste Management Association*.
- Nagajyoti, P. C., Lee, K. D., & Sreekanth, T. V. (Septiembre de 2010). *Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review*. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.1007/s10311-010-0297-8>
- National Research Council. (1993). *Protecting Visibility in National Parks and Wilderness Areas*. Washington, DC: The National Academies Press.
- Pacheco Ibarra, J. (Enero de 2019). *Evaluación de tecnologías para la maximización de extracción de energía de yacimientos geotérmicos de mediana y baja entalpía*. Obtenido de CEMIEGEO: <http://www.cemiegeo.org/index.php/proyectos/desarrollos-tecnologicos-para-explotacion/p31/9-linea-de-investigacion/proyecto/36-p31>
- Pan, H., Lu, X., & Lei, K. (2017). A comprehensive analysis of heavy metals in urban road dust of Xi'an, China: Contamination, source apportionment and spatial distribution. *Science of the Total Environment*.
- Pen-Mouratov, S., Shukurov, N., & Steinberger, Y. (2008). Influence of industrial heavy metal pollution on soil free-living nematode population. *Environmental Pollution*.
- Pérez, R. (2011). Efectos de los metales pesados en el medio ambiente y la salud humana. *Pinar del Río. Cuba: Departamento de Geología, Universidad de Pinar del Río, Hermanos Saíz Montes de Oca*.
- Prohaska, T., & Stingender, G. (2005). Speciation of arsenic. En R. Cornelis, & J. Caruso, *Handbook of elemental speciation II*. Chicester, Reino Unido: John Wiley and Sons Ltd.
- Roca Fernández, A. (Consultado en: 2019). *Contaminación de suelos por metales pesados*. Obtenido de http://www.infoagro.com/abonos/contaminacion_suelos_metales_pesados.htm
- Rodríguez Mercado, J. J., & Altamirano Lozano, M. A. (2006). Vanadio: contaminación, metabolismo y genotoxicidad. *Revista internacional de contaminación ambiental*.
- Ruelas, J., Páez, F., Ruiz, A. C., & Zamora, N. (2011). Health Risk Associated to Dietary Intake of Mercury in Selected Coastal Areas of Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 180-188.
- Sánchez Núñez, J. M., Velázquez Serna, J., & Serrano Flores, M. E. (Diciembre de 2009). *Criterios ambientales y geológicos básicos para la propuesta de un relleno sanitario en Zinapécuaro, Michoacán, México*. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222009000300002&lang=es
- Singh, N., & Ma, L. Q. (2006). Arsenic speciation, and arsenic and phosphate distribution in arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. and non-hyperaccumulator *Pteris ensiformis*. *Environmental Pollution*, 238-246.

- Vázquez, M., Cortés, R., & Alfaro, R. (2015). Arsenic occurrence and water quality in recreational thermal springs at Araro, Mexico. *International Journal of Science and Technology*.
- Zhang, C. S. (2006). Using multivariate analyses and GIS to identify pollutants and their spatial patterns in urban soils in Galway, Ireland. *Environmental Pollution*.