



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

## LICENCIATURA EN GEOCIENCIAS

Escuela Nacional de Estudios Superiores,  
Unidad Morelia

Identificación de áreas vulnerables de la zona metropolitana de Guadalajara, Jalisco por acumulación de elementos potencialmente tóxicos en suelo (EPTs)

# TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADO EN GEOCIENCIAS

P R E S E N T A

MARÍA DE LA LUZ GÓMEZ RIVERA

Director de TESIS: Dr. Fredy Rubén Cejudo Ruiz.

Morelia, Michoacán, México (ENES Morelia)

NOVIEMBRE, 2023



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



ESCUELA  
NACIONAL  
de ESTUDIOS  
SUPERIORES  
**mm**  
UNIDAD MORELIA

**10**  
años  
(2011-2021)

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES UNIDAD MORELIA  
SECRETARÍA GENERAL  
SERVICIOS ESCOLARES

**MTRA. IVONNE RAMÍREZ WENCE**  
DIRECTORA  
DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
**PRESENTE**

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 22-10 del Comité Académico de la Licenciatura en Geociencias** de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES), Unidad Morelia, celebrada el día **18 de enero de 2023**, se acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional de la alumna **María de la Luz Gómez Rivera** de la Licenciatura en **Geociencias**, con número de cuenta **416056956**, con el trabajo titulado: **"Identificación de áreas vulnerables de la Zona Metropolitana de Guadalajara, Jalisco por acumulación de Elementos Potencialmente Tóxicos en suelo (EPTs)"**, bajo la dirección como tutora del **Dr. Fredy Rubén Cejudo Ruiz**.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

<b>Presidente:</b>	Dra. María del Sol Hernández Bernal
<b>Vocal:</b>	Dr. Gabriel Vázquez Castro
<b>Secretario:</b>	Dr. Fredy Rubén Cejudo Ruiz
<b>Suplente:</b>	M. en C. José Antonio Navarrete Pacheco
<b>Suplente:</b>	Dr. Rafael García Ruiz

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Morelia, Michoacán a 05 de octubre de 2023.

**DRA. YUNUEN TAPIA TORRES**  
SECRETARIA GENERAL

**CAMPUS MORELIA**

Antigua Carretera a Pátzcuaro N° 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta  
58190, Morelia, Michoacán, México. Tel: (443)689.3500 y (55)5623.7300, Extensión Red UNAM: 80614  
[www.enesmorelia.unam.mx](http://www.enesmorelia.unam.mx)



**ENES** 10 años  
**MORELIA** (2011-2021)



**GEOCIENCIAS**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
 ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES UNIDAD MORELIA  
 COORDINACIÓN DE LA LICENCIATURA EN GEOCIENCIAS**

**Comité Académico  
 OFICIO: CALGC/ 039-2022  
 ASUNTO: Asignación de jurado**

**MÉD. MÓNICA CORTÉS GONZÁLEZ  
 JEFA DEL DEPARTAMENTO DE SERVICIOS ESCOLARES  
 ENES, Unidad Morelia  
 P R E S E N T E**

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria** 22-10 del **Comité Académico de la Licenciatura en Geociencias** de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES), Unidad Morelia celebrada el día 18 de enero del 2023 se acordó **APROBAR** la **Asignación de jurado** para el examen profesional por parte de la **alumna** María de la luz Gómez Rivera con **número de cuenta** 416056956 adscrita a la Licenciatura en Geociencias con el trabajo titulado "Identificación de áreas vulnerables de la Zona Metropolitana de Guadalajara, Jalisco por acumulación de Elementos Potencialmente Tóxicos en suelo (EPTs)" teniendo como **tutor al** Dr. Fredy Rubén Cejudo Ruiz

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

**Presidente: Dra. María del Sol Hernández Bernal**  
**Vocal: Dr. Gabriel Vázquez Castro**  
**Secretario: Dr. Fredy Rubén Cejudo Ruiz**  
**Suplente 1: M. en C. José Antonio Navarrete Pacheco**  
**Suplente 2: Dr. Rafael García Ruiz**

Asimismo, informo a usted y a los honorables miembros del jurado, que el Comité Académico aprobó un plazo de hasta 30 días hábiles para recibir la revisión del manuscrito correspondiente a la opción de titulación seleccionada, y en su caso, el voto aprobatorio.

Sin más por el momento me despido y aprovecho para enviarle un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**

**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPIRITU"**

Morelia, Michoacán a 23 de enero del 2023

**Dr. Orlando Hernández Cristóbal**  
**Representante del Comité Académico**  
**Licenciatura en Geociencias**



ESCUELA  
 NACIONAL  
 de ESTUDIOS  
 SUPERIORES  
 UNIDAD MORELIA

**LICENCIATURA  
 EN GEOCIENCIAS  
 COORDINACIÓN**

C.c.p. Dra. María del Río Francos, Coordinadora del Área de Ciencias Físicas, Matemáticas y de las Ingenierías, ENES Unidad Morelia.



## **Agradecimientos**

Al Dr. Rubén Cejudo Ruíz y estimados docentes de la ENES-Morelia. Es con gran emoción y gratitud que expreso mis más sinceros agradecimientos a cada uno de ustedes. su dedicación, paciencia y apoyo incondicional han sido fundamentales en el desarrollo y culminación de esta tesis.

Dr. Rubén Cejudo Ruíz, su compromiso y asesoramiento han sido invaluable. Agradezco profundamente cada momento dedicado a resolver mis dudas y brindarme orientación en cada etapa de esta investigación. Su confianza en mis capacidades y su motivación constante han sido un motor fundamental en mi camino. Aprecio enormemente su paciencia y apoyo, especialmente en los momentos más desafiantes. Sus enseñanzas perdurarán en mí y me siento honrada de haber sido recibida como su tesista. Agradezco sinceramente su invaluable amistad.

A cada uno de los docentes de la ENES-Morelia, quiero expresar mi agradecimiento por su confianza y apoyo. su presencia en mi formación académica ha sido fundamental. Su sabiduría y conocimiento compartido, tanto en el campo como en las diversas técnicas desarrolladas, han enriquecido mi aprendizaje de manera significativa. Agradezco su dedicación y paciencia al transmitirme el conocimiento, guiándome en cada paso del proceso académico. Gracias por depositar su confianza en mí ha sido un impulso invaluable y me ha dado la confianza necesaria para completar mi proceso académico.

Al Honorable Consejo Técnico de la institución, les agradezco sinceramente por el apoyo económico brindado sin cuestionamientos. su generosidad ha facilitado mi camino y ha permitido que me enfoque plenamente en mi investigación. Además,

agradezco la confianza que me han otorgado para llevar a cabo este proyecto académico. Su contribución ha sido fundamental en mi proceso y estoy profundamente agradecida.

Por último, quiero expresar mi gratitud al equipo de servicios escolares. Su amabilidad y recordatorios constantes sobre los procesos burocráticos de la institución han sido de gran ayuda. Agradezco sinceramente la atención prestada y la resolución de problemas administrativos que han surgido en el camino. Su gran profesionalismo ha hecho que mi experiencia sea más fluida y gratificante.

En resumen, mi corazón rebosa de gratitud hacia cada uno de ustedes. su presencia y apoyo han sido una bendición en mi vida académica. Agradezco profundamente sus enseñanzas, su confianza y su amistad. Sin su ayuda, este logro no habría sido posible.

Con profunda gratitud

***María de la luz Gómez Rivera***

*Como expresó la dra. Marie Curie  
"La vida no es fácil, para ninguno de  
nosotros. Pero... ¡qué importa! Hay  
que perseverar y, sobre todo, tener  
confianza en uno mismo. Hay que  
sentirse dotado para realizar  
alguna cosa y que esa cosa hay que  
alcanzarla, cueste lo que cueste."*

## **Dedicatoria**

A un extraordinario ser humano mi gran abuelito, el Sr. Darío Rivera Hoy, con profunda emoción y gratitud, dedico estas palabras a ti, quien desde el cielo me cuidarás y guiarás en cada paso de mi vida. Aunque ya no te encuentras físicamente junto a mí, tu presencia sigue siendo una fuerza inspiradora en mi corazón. Este logro en mi vida, la culminación de mi tesis, es un tributo a tu legado de fortaleza y determinación.

Desde muy pequeña, escuché las historias de tus hazañas y la sabiduría que compartías con tus palabras. Fuiste la persona que me enseñó a no rendirme, a luchar incansablemente por mis sueños y a enfrentar los desafíos con valentía hasta el último momento de tu existencia. Aunque no puedo abrazarte físicamente, siento tu amor y guía en cada paso que doy.

A ti, mi madre y mis hermanos, quiero expresar mi amor y gratitud. Su presencia en mi vida ha sido un pilar fundamental. Gracias por su constante apoyo, consejos sabios y amor incondicional me han dado la fuerza y la determinación para superar cualquier obstáculo en mi camino. Sin ustedes, mi familia, no habría logrado llegar hasta aquí.

En cada momento de convivencia, he aprendido lecciones valiosas que atesoro en mi corazón. Nuestra unión, amor y apoyo mutuo han sido un ejemplo para mí, recordándome la importancia de la familia y del amor desinteresado. La vida ha sido generosa al colocarlos a mi lado, y agradezco cada instante compartido juntos.

Este logro en mi vida no solo me pertenece a mí, sino también a cada uno de ustedes. Cada éxito alcanzado es un reflejo de su amor, dedicación y confianza en mí. Aunque físicamente no estés aquí, abuelito, sé que sigues siendo mi protector y mi guía desde el cielo, y llevas una parte importante de este logro en mi vida.

los admiro y los amo con todo mi ser. Siento su presencia, aún en la distancia, ha sido mi fortaleza y mi refugio. Gracias por siempre estar ahí, por creer en mí y por ser mi familia.

Con amor y gratitud eterna

*María de la luz Gómez Rivera*

## Resumen

La contaminación del aire es un problema que afecta la atmósfera y todos los ecosistemas de la superficie terrestre. Las principales fuentes de contaminación aérea son las emisiones de material particulado que provienen de los centros urbanos y en menor medida de las fuentes naturales (ceniza volcánica, tormenta de arena).

En el suelo, la depositación del material particulado (PM) enriquece la concentración natural de elementos, ya que el PM transporta elementos potencialmente tóxicos (EPTs), tales como el cromo (Cr), cobre (Cu), níquel (Ni), plomo (Pb), vanadio (V) y zinc (Zn).

El origen del MP puede ser de fuentes antrópicas (vehículos e industrias) y naturales (ceniza volcánica e incendios), su depositación decrece con respecto de la distancia de la fuente de emisión. Por ello, las áreas urbanas que presentan una mayor actividad antrópica de las zonas metropolitanas son fuentes importantes de MP, y como consecuencia, sus suelos suelen presentar concentraciones altas de EPTs.

En México, existe escasa información de la concentración de elementos potencialmente tóxicos en suelos urbanos de las zonas metropolitanas, por lo que se desconoce los niveles de concentración y la exposición a la que pueda estar sujeta la población en general y la población vulnerable.

La presente investigación proporciona información de las áreas vulnerables de la zona metropolitana de Guadalajara, Jalisco que es afectada por la acumulación de elementos potencialmente tóxicos en el suelo.

La zona metropolitana de Guadalajara (ZMG) es una de las tres zonas más pobladas de México (5,268,642 habitantes) y presenta varios problemas de

contaminación. La presente investigación aborda una evaluación de tipo diagnóstico para determinar el contenido de elementos potencialmente tóxicos en suelos urbanos del ZMG y un análisis espacial que permita identificar las áreas de mayor concentración de elementos que podrían representar un riesgo para las personas.

El estudio está basado en el análisis de 140 muestras de suelo superficial del área urbana de la ZMG, a las que se les determinó la concentración de EPTs (Cr, Cu, Ni, Pb, V y Zn) mediante espectroscopia de fluorescencia de rayos x (FRX).

Se hizo un análisis estadístico univariado para determinar la distribución de las concentraciones de los elementos de la ZMG. Adicionalmente, se hizo un análisis de varianza con los diferentes usos de suelo, con el fin de determinar la concentración de fondo total o valor umbral para ZMG. El análisis de distribución espacial para cada elemento se hizo con la finalidad de identificar las zonas de mayor acumulación. Para identificar las áreas de riesgo para la población se cruzó la información del índice de carga de contaminación con el índice sociodemográfico en la ZMG.

Los resultados de la concentración de EPTs en el suelo superficial de la ZMG mostraron que las mayores concentraciones corresponden al Zn (238 mg/kg), Pb (28 mg/kg), V (35 mg/kg) y Cu (22 mg/kg) y en menor concentración Ni (10 mg/kg) y Cr (15 mg/kg). Por otra parte, la concentración de referencia total obtenida mediante el análisis de varianza fue: Cr: 14 mg/kg; Cu: 19 mg/kg; Ni: 9 mg/kg; Pb: 28 mg/kg y Zn: 203 mg/kg. Este resultado concuerda con la concentración en suelos similares y con material lítico cerca del área de Guadalajara.

La distribución espacial de la concentración de elementos reveló que, existe una contaminación considerable en el 28 % (correspondiente al PLI) del área de estudio, la

cual afecta aproximadamente 1.3 millones de personas y se encuentra localizada en la parte central de la ciudad de Guadalajara, muy próxima a las zonas industriales que están en los municipios de Guadalajara, San Pedro Tlaquepaque y Zapopan.

El área localizada con mayor concentración de elementos potencialmente tóxicos, coincide con las zonas que registran un índice de rezago social alto, lo que es preocupante, por lo que se recomienda hacer análisis de tipo elemental y social en el área de estudio con una ventana de muestreo más estrecha.

## **Abstract**

Air pollution is a problem that affects the atmosphere and all ecosystems on the earth's surface. The main sources of air pollution are emissions of particulate matter from urban centers, and to a lesser extent from natural sources (volcanic ash, sandstorms). In the soil, the deposition of particulate matter (PM) enriches the natural concentration of elements, since PM carries potentially toxic elements (PTE), such as chromium (Cr), copper (Cu), nickel (Ni), lead (Pb), vanadium (V) and zinc (Zn).

The origin of PM can be from anthropogenic sources (vehicles and industries) and natural sources (volcanic ash and fires), and its deposition decreases with distance from the emission source. Therefore, urban areas with greater anthropogenic activity in metropolitan areas are important sources of PM, and as a consequence, their soils tend to have high concentrations of EPTs.

In Mexico, there is little information on the concentration of potentially toxic elements in urban soils of metropolitan areas, so the concentration levels and exposure



to which the general population and vulnerable populations may be subjected are unknown.

This research provides information on the vulnerable areas of the Metropolitan Zone of Guadalajara, Jalisco that are being affected by the accumulation of Potentially Toxic Elements in soil.

The Guadalajara Metropolitan Zone (ZMG) is one of the three most populated areas in Mexico (5,268,642 inhabitants) and presents several contamination problems. The present investigation addresses a diagnostic evaluation to determine the content of potentially toxic elements in urban soils of the ZMG and a spatial analysis to identify the areas with the highest concentration of elements that could represent a risk to people. The study is based on the analysis of 140 surface soil samples from the urban area of the ZMG, to which the concentration of EPTs (Cr, Cu, Ni, Pb, V and Zn) was determined by X-Ray Fluorescence Spectroscopy (XRF).

A univariate statistical analysis was performed to determine the distribution of the concentrations of the elements in the ZMG. Additionally, an analysis of variance was performed with the different land uses, in order to determine the total background concentration or threshold value for ZMG. The spatial distribution analysis for each element was made in order to identify the areas of greatest accumulation, to identify the areas of risk for the population, the information of the pollution load index was crossed with the sociodemographic index in the Metropolitan Area of Guadalajara (AMG).

The results of the concentration of EPTs in the surface soil of the ZMG showed major concentrations of Zn (238 mg/kg), Pb (28 mg/kg), V (35 mg/kg) and Cu (22 mg/kg) and in lower concentration Ni (10 mg/kg) and Cr (15 mg/kg). On the other hand, the total

reference concentration obtained by analysis of variance was: Cr: 14 mg/kg; Cu: 19 mg/kg; Ni: 9 mg/kg; Pb: 28 mg/kg and Zn: 203 mg/kg, this result agrees with the concentration in similar soils and with lithic material near the Guadalajara area.

The spatial distribution of the concentration of elements revealed that there is considerable contamination in 28 % (corresponding to the PLI) of the study area, which affects approximately 1.3 million people and is located in the central part of the city, very close to the industrial zones in the municipalities of Guadalajara, San Pedro Tlaquepaque and Zapopan.

The localized area with the highest concentration of potentially toxic elements coincides with the areas with a high social backwardness index, which is a cause for concern; therefore, it is recommended that elemental and social analyses be conducted in the study area with a narrower sampling window.

# Índice de cuadros

## Capítulo I Generalidades

Cuadro 1.1 Concentraciones de referencia totales (CRT) por tipo de uso de suelo.....	5
--	---

## Capítulo III Metodología

Cuadro 3.1 Esquema metodológico utilizado para definir las áreas de contaminación por elementos potencialmente tóxicos (EPTs) en SU del ZMG.....	30
Cuadro 3.2 Clasificación del factor de enriquecimiento (FC) encontrado en suelo de la zona metropolitana de Guadalajara .....	39
Cuadro 3.3 Clasificación del índice de carga contaminante (PLI) en suelo de la zona metropolitana de Guadalajara.....	40
Cuadro 3.4 Esquema de la estructura de los grupos desfavorecidos potencialmente vulnerables.....	41
Cuadro 3.5 Métodos para integrar la información sociodemográfica en la ZMG (población total, división por sexo, niños de 0 a 14 años, adultos mayores a 65 años, población sin derechohabiencia).....	43
Cuadro 3.6 Esquema metodológico para la generación de la capa base con índice de rezago social.....	44
Cuadro 3.7 Esquema metodológico para crear mapa de riesgo.....	44

## Capítulo IV Resultados

Cuadro 4.1 Estadística descriptiva de los EPTs en muestras de suelo de la ZMG.....	45
Cuadro 4.2 Resumen estadístico, de la concentración elemental de Cr por los distintos usos de suelo de la ZMG. ....	48

Cuadro 4.3 Resumen estadístico, de la concentración elemental de Cu por los distintos usos de suelo de la ZMG.....	49
Cuadro 4.4 Resumen estadístico, de la concentración elemental de Ni por los distintos usos de suelo de la ZMG .....	50
Cuadro 4.5 Resumen estadístico, de la concentración elemental de Pb por los distintos usos de suelo de la ZMG .....	51
Cuadro 4.6 Resumen estadístico, de la concentración elemental de V por los distintos usos de suelo de la ZMG .....	52
Cuadro 4.7 Resumen estadístico, de la concentración elemental de Zn por los distintos usos de suelo de la ZMG .....	53
Cuadro 4.8 Análisis exploratorio de datos con distribución normal de los EPTs en muestras de suelo de la ZMG.....	54
Cuadro 4.9 Estadística de los semivariogramas de concentración de Cr, Cu, Ni, Pb, V, Zn y PLI en 140 muestras de suelo de la ZMG .....	58
Cuadro 4.10 Estadística de validación cruzada de modelo de interpolación.....	59
Cuadro 4.11 Estadística de habitantes en el área de estudio de la ZMG .....	62
Cuadro 4.12 Estadística de habitantes por áreas de acumulación de Cr en suelo de la ZMG .....	63
Cuadro 4.13 Estadística de habitantes por áreas de acumulación de Cu en suelo de la ZMG .....	63
Cuadro 4.14 Estadística de habitantes por áreas de acumulación de Ni en suelo de la ZMG .....	64
Cuadro 4.15 Estadística de habitantes por áreas de acumulación de Pb en suelo de la ZMG .....	65
Cuadro 4.16 Estadística de habitantes por áreas de acumulación de Zn en suelo de la ZMG .....	65
Cuadro 4.17 Estadística de habitantes por áreas de acumulación de PLI en suelo de la ZMG .....	66

## **Capítulo V Discusión**

Cuadro 5.1 Concentraciones de elementos potencialmente tóxicos en suelos urbanos (mg/kg) y rocas ácidas.....	67
Cuadro 5.2 Comparativo de la norma mexicana (NOM-147 SEMARNAT/SSA1-2004) y norma canadiense (CCME 2007).....	68

# Índice de figuras

## Capítulo I Generalidades

Figura 1.1	Mapa del de la ZMG .....	9
Figura 1.2	Esquema de distribución litológica de la ZMG.....	10
Figura 1.3	Mapa litológico del de la ZMG, modificado de INGI (escala 1:50 000, claves F13D55, F13D56, F13D65 y F13D66) y SGM (escala 1:50 000, claves F13D55, F13D56, y F13D65).....	11
Figura 1.4	Mapa edafológico de la ZMG, modificado de INGI (escala 1:50 000, claves F13D55, F13D56, F13D65 y F13D66).....	12

## Capítulo III Metodología

Figura 3.1	Mapa de la ZMG. Los pentágonos verde son los sitios de muestreo en SU.....	31
Figura 3.2	Elementos de un variograma (Mejia, 2006) .....	36

## Capítulo IV Resultados

Figura 4.1	Concentración de elementos potencialmente tóxicos en suelo de la zona metropolitana de Guadalajara. ....	46
Figura 4.2	Gráfica box-plot de la concentración de Cr en los diferentes usos de suelo de la ZMG.....	47
Figura 4.3	Gráfica box-plot de la concentración de Cu en los diferentes usos de suelo de la ZMG.....	48
Figura 4.4	Gráfica box-plot de la concentración de Ni en los diferentes usos de suelo de la ZMG.....	49
Figura 4.5	Gráfica box-plot de la concentración de Pb en los diferentes usos de suelo de la ZMG. ....	50
Figura 4.6	Gráfica box-plot de la concentración de V en los diferentes usos de suelo de la ZMG .....	51
Figura 4.7	Gráfica box-plot de la concentración de Zn en los diferentes usos de suelo de la ZMG.....	52

Figura 4.8	Histograma y curva de distribución normal de datos no transformados (izquierda), histograma y curvas de distribución normal de datos transformados para Cr, Cu (transformación logarítmica) y Ni (transformación inversa) .....	55
Figura 4.9	Histograma y curva de distribución normal de datos no transformados (izquierda), histograma y curvas de distribución normal de datos transformados para Pb, Zn, V y PLI (transformación logarítmica).....	56
Figura 4.10	Variogramas obtenidos para la concentración de Cr, Cu, Ni, Pb, V, Zn y PLI de muestras de suelo de la ZMG.....	57
Figura 4.11	Mapa de la distribución poblacional a nivel AGEB´s urbanos de la ZMG.....	60
Figura 4.12	Mapa de variables sociodemográficas de la ZMG.....	61

## Capítulo V Discusión

Figura 5.1	Mapa de evaluación de peligro por concentración de Cr en suelos de la ZMG .....	70
Figura 5.2	Mapa de evaluación de peligro por concentración de Cu en suelos de la ZMG .....	72
Figura 5.3	Mapa de evaluación de peligro por concentración de Ni en suelos de la ZMG .....	74
Figura 5.4	Mapa de evaluación de peligro por concentración de Pb en suelos de la ZMG .....	77
Figura 5.5	Mapa de evaluación de peligro por concentración de Zn en suelos de la ZMG.....	80
Figura 5.6	Mapa de probabilidad de distribución de PLI en los suelos de la ZMG.....	82



# Índice

Agradecimientos .....	iv
Dedicatoria.....	vi
Resumen.....	vii
Abstract.....	ix
Índice de cuadros .....	xii
Índice de figuras.....	xiv
Índice .....	xvi

## Capítulo I Generalidades

1.1 Introducción .....	1
1.2 Planteamiento del problema .....	6
1.3 Justificación .....	7
1.4 Objetivos particulares .....	8
1.5 Área de estudio .....	9
1.6 Contexto geológico .....	10
1.7 Contexto edafológico .....	12

## Capítulo II Antecedentes

2.1 Elementos potencialmente tóxicos (EPTs) y sus efectos en la salud humana.....	13
2.1.1 Cromo (Cr) .....	14
2.1.2 Cobre (Cu).....	15
2.1.3 Níquel (Ni).....	17
2.1.4 Plomo (Pb).....	19
2.1.5 Vanadio (V).....	21
2.1.6 Zinc (Zn).....	23
2.2 Vulnerabilidad .....	25
2.2.1 Vulnerabilidad social .....	25
2.2.2 Grupos desfavorecidos potencialmente vulnerables .....	26

2.2.3 Amenaza.....	26
2.2.4 Riesgo.....	27
2.2.5 Exposición.....	27
2.3 Índices sociodemográficos.....	27
2.4 Índice de rezago social (IRS).....	27
2.5 Uso de suelo.....	28
2.6 Área geoestadística básica urbanas (AGEB´s urbanos).....	29

### Capítulo III Metodología

<b>3.1 Etapa 1 “amenaza”</b> .....	30
<b>3.1.1 Fase 1</b> .....	30
3.1.1.1 Muestreo .....	30
3.1.1.2 Preparación de muestras.....	32
3.1.1.3 Análisis multi-lemental por fluorescencia de rayos x (FRX).....	33
3.1.1.4 Valor de concentración de fondo total ( $V_{fon}$ ).....	34
3.1.1.5 Factor de enriquecimiento (CF).....	34
3.1.1.6 Índice de carga de contaminación (PLI).....	34
<b>3.1.2 Fase 2</b> .....	35
3.1.2.1 Análisis exploratorio de datos (AED).....	35
3.1.2.2 Análisis de relación espacial o estructural.....	35
<b>3.1.3 Fase 3</b> .....	39
3.1.3.1 Delimitación de las zonas con concentración elemental.....	39
<b>3.2 Etapa 2 “integración”</b> .....	40
3.2.1 Integración de la información geográfica.....	40
3.2.2 Distribución de la población vulnerable.....	41
3.2.3 Capa de parámetros sociodemográficos (CPS_1).....	43
3.2.4 Capa del índice de rezago social (CIRS_2).....	43
<b>3.3 Etapa 3 “Riesgo”</b> .....	44

## **Capítulo IV Resultados**

4.1 Estadística descriptiva.....	45
4.2 Concentración elemental por uso de suelo.....	46
4.3 Análisis exploratorio de datos.....	53
4.4 Análisis estructural.....	54
4.5 Relación espacial.....	57
4.6 Validación cruzada .....	59
4.7 Integración espacial de capa de parámetros sociodemográficos (CPS_1)...	60
4.8 Integración espacial de capa del índice de rezago social (CIRS_2).....	61
4.9 Población en la ZMG.....	62
4.10 Habitantes en las áreas de acumulación de Cr.....	62
4.11 Habitantes en las áreas de acumulación de Cu.....	63
4.12 Habitantes en las áreas de acumulación de Ni.....	64
4.13 Habitantes en las áreas de acumulación Pb.....	64
4.14 Habitantes en las áreas de acumulación de Zn.....	65
4.15 Habitantes en las áreas contaminadas evaluados con el índice de carga contaminante.....	66

## **Capítulo V Discusión**

5.1 Evaluación de peligro por concentración de Cr en suelos de la ZMG.....	68
5.2 Evaluación de peligro por concentración de Cu en suelos de la ZMG.....	71
5.3 Evaluación de peligro por concentración de Ni en suelos de la ZMG.....	73
5.4 Evaluación de peligro por concentración de Pb en suelos de la ZMG.....	75
5.5 Evaluación de peligro por concentración de Zn en suelos de la ZMG.....	79
5.6 Evaluación de peligro por PLI en suelos de la ZMG .....	81

## **Capítulo VI**

Conclusiones.....	83
-------------------	----

## **Capítulo VII**

Referencias .....	85
-------------------	----

## Capítulo I Generalidades

### 1.1 Introducción

La contaminación ambiental es una alteración en la concentración natural de los elementos que constituyen el medio ambiente. Según los informes de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2015), la exposición de las personas a ambientes contaminados provoca el desarrollo de más de 100 enfermedades.

La OMS (2021) afirma que, en 2019, el 90% de las personas respiraba aire contaminado a diario, además reporta que hay 7 millones de defunciones prematuras por año debido a la contaminación atmosférica.

La mala calidad del aire y la contaminación del suelo, contienen un componente en común: el material particulado (MP), el cual, es una mezcla compleja de sustancias en estado líquido o sólido (EPA, 2022).

El Material Particulado (MP) se clasifica en primario (emitido directamente de la fuente) y secundario (resultante de interacciones con el medio). Puede tener origen natural (como actividad volcánica) o antrópico (como emisiones industriales). Se categoriza por su diámetro aerodinámico en partículas gruesas o  $PM_{10}$  cuando su diámetro se encuentra entre  $2.5 \mu m$  y  $10 \mu m$ , y partículas finas o  $PM_{2.5}$  cuando su diámetro es  $\leq 2.5 \mu m$  (Secretaría de Salud, 2020; DOF, 2021).

El MP está constituido de polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento, polen, silicatos y aluminatos, metales pesados, entre otros, que al estar en el aire provocan una mala calidad del aire ya que altera la composición natural de la atmósfera,

cuando el MP se deposita sobre la superficie de las ciudades (en las banquetas, calles, avenidas y la superficie del suelo) genera un polvo urbano, el cual enriquece el sedimento depositado previamente en la superficie y también enriquece la concentración natural de los suelos urbanos (Kim et al., 2007; Xia et al., 2008; Bucko et al., 2010; Aguilar et al., 2012).

Las ciudades son precursoras de grandes cantidades de MP, debido a los residuos que se generan por las actividades antrópicas (industria e infraestructura asociada al transporte). Las características químicas del MP suspendido en el aire y depositado en cada ciudad tiene una relación directa con las principales fuentes emisoras (Lezama, 2010).

Los componentes más peligrosos en el MP son aquellos que portan elementos, tales como: arsénico (As), plata (Ag), boro (B), bario (Ba), berilio (Be), cadmio (Cd), cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu), flúor (F), mercurio (Hg), manganeso (Mn), molibdeno (Mo), níquel (Ni), plomo (Pb), antimonio (Sb), selenio (Se), estaño (Sn), talio (Tl), vanadio (V) y zinc (Zn). El término “elementos potencialmente tóxicos” (EPTs), se refiere a los elementos esenciales y no esenciales que requieren los organismos para el desarrollo de sus funciones vitales. Sin embargo, si estos elementos rebasan un nivel de concentración pueden generar síntomas de toxicidad e inhibir las funciones de los organismos por lo que son considerados EPTs (González, 2005; González et al., 2018).

La planificación urbana es muy importante para mitigar la emisión de material particulado, ya que la optimización en los traslados de personas disminuye el uso de automóviles y la ubicación de las áreas industriales en puntos estratégico podría

disminuir considerablemente la emisión de MP. Sin embargo, la mayor parte de las ciudades carecen de esta planeación.

El crecimiento de la zona urbana ocurre alrededor de centros urbanos antiguos, que no tienen una planificación urbana, lo cual provoca una densidad de población alta, congestión vehicular e incremento de actividades industriales, actividades que favorece la emisión de MP con EPTs (Gutiérrez, 2003).

Estudios hechos por la OMS en 2021, revelan que 55% de la población mundial vive en zonas urbanas, en donde se encuentran expuestas a diversos contaminantes, tales como material particulado y en suelo enriquecido con elementos potencialmente tóxicos (WHO, 2021).

Los EPTs más investigados en suelo, son: arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), hierro (Fe), manganeso (Mn), níquel (Ni), plomo (Pb), vanadio (V), y zinc (Zn), debido a su alta toxicidad, bioacumulación y su permanencia en los ecosistemas (Sobolov y Begonia, 2008; Rangel, 2017)

De acuerdo con la evidencia científica, hay una relación directa entre la contaminación de EPTs y enfermedades diversas: cerebrovasculares, cardiovasculares, respiratorias, cancerígenas, neumopatías crónicas y agudas (ATSDR, 2003; Draghici et al., 2010; Khlifi et al., 2010; Rangel, 2017).

La presencia y gravedad de estas enfermedades dependen de la cantidad y duración de exposición a EPTs, así como de las formas en que entran en contacto con el cuerpo, ya sea a través de ingestión, inhalación o absorción dérmica (OMS, 2021; NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004; Aitio et al., 2007; Peterson, 2007; Tchounwou et al., 2012; Witkowska et al., 2021).



La investigación sobre la intoxicación por EPTs en seres humanos ha demostrado que los grupos más vulnerables son los niños, los adultos mayores y las mujeres embarazadas. Por este motivo, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha proporcionado recomendaciones para el seguimiento de contaminantes y directrices para reducir la exposición de estas poblaciones (Chheang et al., 2021; OMS, 2021).

En el caso de material particulado, la OMS recomienda un valor límite para la exposición de partículas  $PM_{2.5}$  de  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como media anual y  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de media en 24 h. Por otra parte, para las partículas  $PM_{10}$  se establece un valor límite de exposición de  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como media anual y  $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$  media en 24 h. En México, la norma oficial en calidad del aire establece un límite para  $PM_{2.5}$  de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como media anual y  $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en 24 h y para  $PM_{10}$  de  $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como promedio anual y  $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en 24 h (NOM- 025-SSA1-2014, WHO, 2021).

El desarrollo de las diferentes actividades en los centros urbanos ha contribuido a la emisión de MP con compuestos potencialmente tóxicos que, bajo ciertas condiciones y concentraciones, puede afectar a la salud de la población y el ambiente. En México existe Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 que establece un método para determinar la concentración de EPTs en un suelo contaminado, donde se destaca la importancia de obtener una concentración de referencia o concentraciones de fondo para evaluar el estado de contaminación del suelo (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004).

Dado que el suelo contiene una concentración natural de elementos y en ocasiones puede alcanzar niveles de concentración tóxicas para la población, es necesario establecer un nivel de concentración de referencia total (CRT) que permita

identificar un suelo contaminado. La norma NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 establece los límites permisibles para la remediación de suelos contaminados por arsénico (As), bario (Ba), berilio (Be), cadmio (Cd), cromo hexavalente Cr (VI), mercurio (Hg), níquel (Ni), plata (Ag), plomo (Pb), selenio (Se), talio (Tl) y vanadio (V) para uso agrícola-residencial-comercial e industrial (Cuadro 1.1).

**Cuadro 1.1** Concentraciones de referencia totales (CRT) por tipo de uso de suelo.

Contaminante	Uso agrícola/residencial o comercial (mg/kg)	Uso industrial (mg/kg)
Arsénico	22	260
Bario	5 400	67 000
Berilio	150	1900
Cadmio	37	450
Cromo Hexavalente	280	510
Mercurio	23	310
Níquel	1 600	20 000
Plata	390	5 100
Plomo	400	800
Selenio	390	5 100
Talio	5,2	67
Vanadio	78	1000

Fuente: SEMARNAT 2010, NOM-025-SSA2 1994

La norma NOM-147 señala que el valor de referencia se tomará en función del uso de suelo predominante; en caso de que el uso de suelo no está establecido en los programas de ordenamiento ecológico y de desarrollo urbano, se tomará como referencia el valor residencial.

El Inventario Nacional de Emisiones de México (INEM) publicado en 2013 por la SEMARNAT y que considera los datos de 2008, reporta una emisión anual de 58.99 millones de toneladas de contaminantes atmosféricos, de los cuales 21% provienen de fuentes naturales y 79% de fuentes antropogénicas. De este último destacan las fuentes móviles, donde se incluyen a los autos particulares, camionetas y autobuses con una

emisión anual de 27.03 millones de toneladas. Sin embargo, no existe un registro de la concentración de EPTs en suelo a nivel nacional, estatal o municipal, ni mucho menos para las 59 zonas metropolitanas (ZM) del país (INEGI 2013; INEM 2019).

En el año 2019, en estado de Jalisco se hizo una evaluación de la calidad del aire del 2016 a 2019, en donde, se observó un incumplimiento con la norma de salud ambiental para la cantidad de material particulado PM<sub>10</sub> suspendido. A nivel de toda la zona metropolitana, se superó el límite normado de 24 horas y el límite anual. Las concentraciones más elevadas del PM<sub>10</sub> se presentaron entre los meses de diciembre y febrero. Mientras que, para PM<sub>2.5</sub> no existen datos. Dadas las condiciones de una saturación de material particulado suspendido en el aire, es muy probable que exista un enriquecimiento del suelo urbano de Guadalajara (INEC, 2020).

## **1.2 Planteamiento del problema**

La zona metropolitana de Guadalajara (ZMG) tiene una mala calidad del aire; se estima que el 65% de la polución proviene de fuentes antrópicas (automóviles e industria). La ineficiente planeación urbana, el crecimiento acelerado de la población y su flota vehicular agravan los problemas de contaminación año con año (SEMARNAT 2014; IQAIR 2020).

La ZMG es la tercera zona metropolitana más grande y la segunda área industrial y económica más importante de México. En el censo de población (2020) y económico (2019), se contabilizó una población de 5,300,000 habitantes y 367,000 industrias (70% de las industrias de Jalisco) dedicadas a la producción manufacturera, comercio y servicio; el número de unidades vehiculares en circulación fue de 2,514,679 unidades, que representa el 67 % de automotores en el estado (INEGI, 2020).

En 2015, el informe sobre partículas suspendidas en la ZMG indicó que los vehículos en movimiento fue la principal fuente de contaminación de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, emitiendo 1,166 toneladas al año. Estas partículas pueden permanecer en la atmósfera durante días o semanas antes de depositarse, ya sea en forma seca debido al viento o en forma húmeda por la lluvia. Además, el contenido de ETPs aumenta la concentración de estos elementos en el suelo y el polvo urbano (Manzanares et al., 2011; Garreaud et al., 2006; Blanco et al., 2015).

La constante emisión de PM en la ZMG podría estar dando lugar a la formación de zonas de acumulación en suelos urbano. Estos depósitos podrían alcanzar niveles de concentración de sustancias tóxicas perjudiciales para la salud humana. En este sentido, se hace necesario llevar a cabo un estudio de diagnóstico para establecer si hay áreas de acumulación de EPTs en la ZMG que puedan representar una amenaza para los humanos.

### **1.3 Justificación**

La ZMG presenta varios problemas de contaminación, entre ellos, la mala calidad del aire asociada a las emisiones vehiculares e industriales, que ha provocado un incremento de EPTs en suelo y polvo urbano por la depositación de material particulado.

Los reportes disponibles sobre la concentración de EPTs están focalizados en suelos de tipo agrícolas y en la presencia de metales pesados en cuerpos de agua de algunas zonas de la ZMG (Legarreta et al., 2016; Castillo et al., 2021).

Desde 1993, el Gobierno del Estado de Jalisco ha implementado una red automática de monitoreo de la ZMG. Los resultados de este monitoreo indican que los niveles de material particulado superan los límites establecidos por la Organización

Mundial de la Salud en 2019 (15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  anual; 45  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  diaria) y la normativa oficial mexicana (36  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  anual; 70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  diaria). Esto sugiere un alto riesgo para la salud de los habitantes de la zona debido a la alta concentración de partículas en el aire.

Para ampliar la información con respecto a los niveles de concentración de EPTs en el suelo del área urbana de la ZMG, se llevó a cabo esta investigación, cuyos objetivos son: a) determinar la concentración y distribución espacial de los elementos (Cr, Cu, Ni, Pb, V, y Zn) potencialmente tóxicos en el suelo urbano de la ZMG mediante el índice de carga de contaminación y b) identificar las áreas de riesgo para la población por concentración de EPTs.

#### **1.4 Objetivos particulares**

- Identificación de concentraciones de ETPs en distintos usos de suelo en el área urbana de la ZMG.
- Establecer los valores de concentración de referencia local o concentración fondo para Cr, Cu, Ni, Pb, V, y Zn presente en los suelos urbanos de la ZMG y determinar su pertinencia como umbral de contaminación.
- Establecer el índice de carga de contaminantes para suelo urbano de la ZMG y determinar las áreas con mayor acumulación de estos elementos.
- Compilar rasgos demográficos de población total, sexo, edad e índice de rezago social, de las personas que habitan la ZMG y conocer la distribución espacial de los grupos vulnerables.
- Desarrollar un modelo espacial integral que combine el índice de carga contaminante y los indicadores demográficos para identificar y mapear las áreas en la ZMG que presenten una mayor vulnerabilidad debido a la concentración de elementos

potencialmente tóxicos, con el objetivo de identificar áreas vulnerables y proponer medidas adecuadas de mitigación y prevención.

### 1.5 Área de estudio

La zona metropolitana de Guadalajara (ZMG) la constituyen diez municipios: Acatlán de Juárez, Guadalajara, Ixtlahuacán de los Membrillos, Juanacatlán, El Salto, Tlajomulco de Zúñiga, Tlaquepaque, Tonalá, Zapopan y Zapotlanejo.

La zona de estudio comprende seis municipios, en donde se concentra la mancha urbana, estos son: San Pedro Tlaquepaque, Tonalá, Zapopan, Tlajomulco de Zúñiga, El Salto, Acatlán de Juárez y Zapotlanejo (ver figura 1).

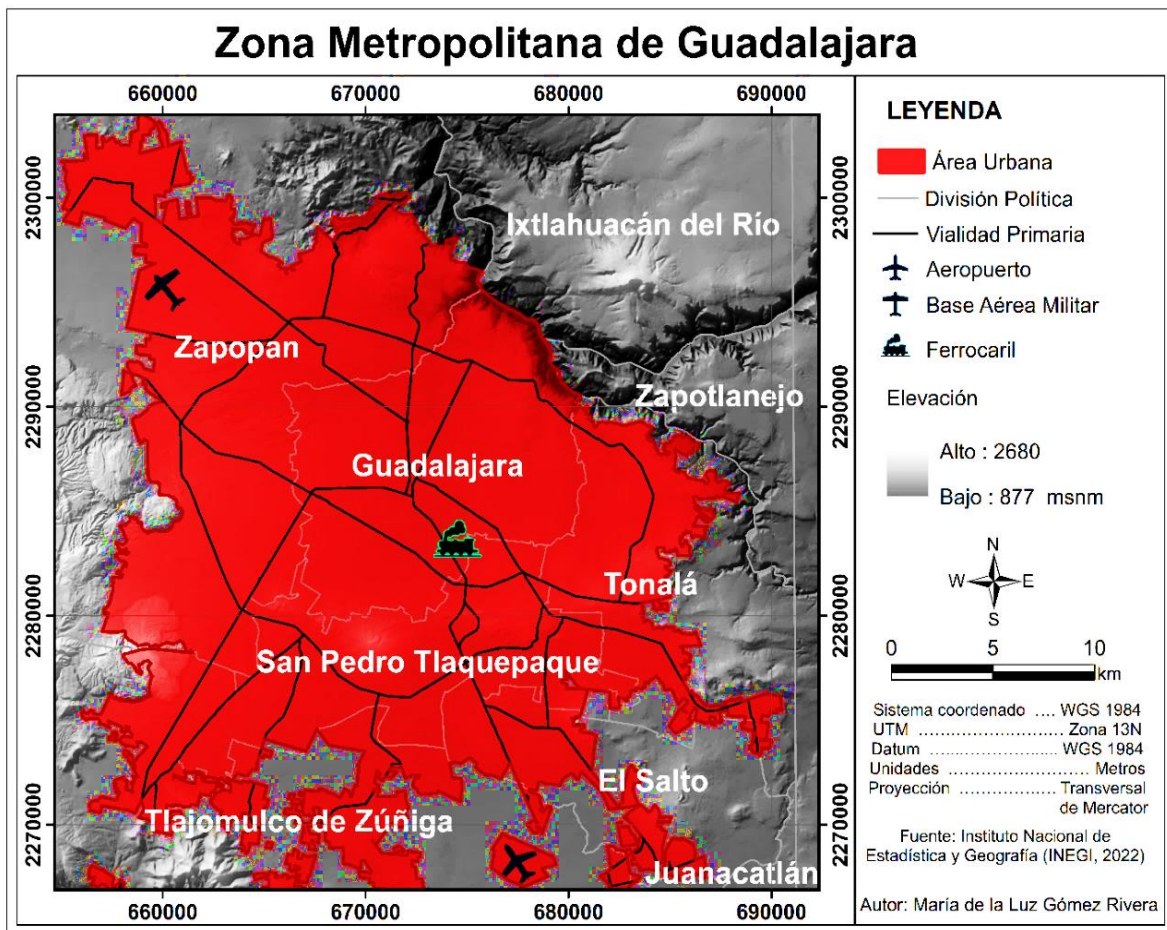


Figura 1.1 Mapa de la ZMG.



Que se ubican en la región central del estado de Jalisco, dentro del Valle de Atemajac, entre la latitud 20°45'34.28" N a 20°28'50.59" N y longitud -103°31'57.15" E a -103°13'14.80" E, su altitud promedio es de 1566 msnm y con un área estimada de 1,564 km<sup>2</sup>

El censo de 2020 indicó que la ZMG concentra a 5,266,642 habitantes, de los cuales 2,684,675 (51.0 %) son mujeres y 2,583,967 son hombres. Los municipios en donde se concentra la mayor población son: Zapopan (1,476,491 habitantes), Guadalajara (1,385,629 habitantes), Tlajomulco de Zúñiga (727,750 habitantes) y San Pedro Tlaquepaque (687,127 habitantes) (IIEG, 2020)

### 1.6 Contexto geológico

El 47 % del área de estudio está construida sobre litología correspondiente a rocas del período Neógeno y el resto del periodo Cuaternario. Figura 1.2 esquema de distribución litológica de la ZMG.

Las rocas del período Neógeno son depósitos de brecha-basalto (Tpl Q) que se encuentran al NNE, y depósitos de basaltos (Tpl Q (b)) que se encuentran en la parte NE, E y S de la ZMG (ver figura 1.2 y 1.3).

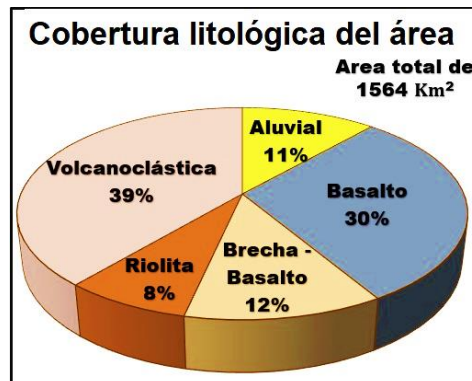
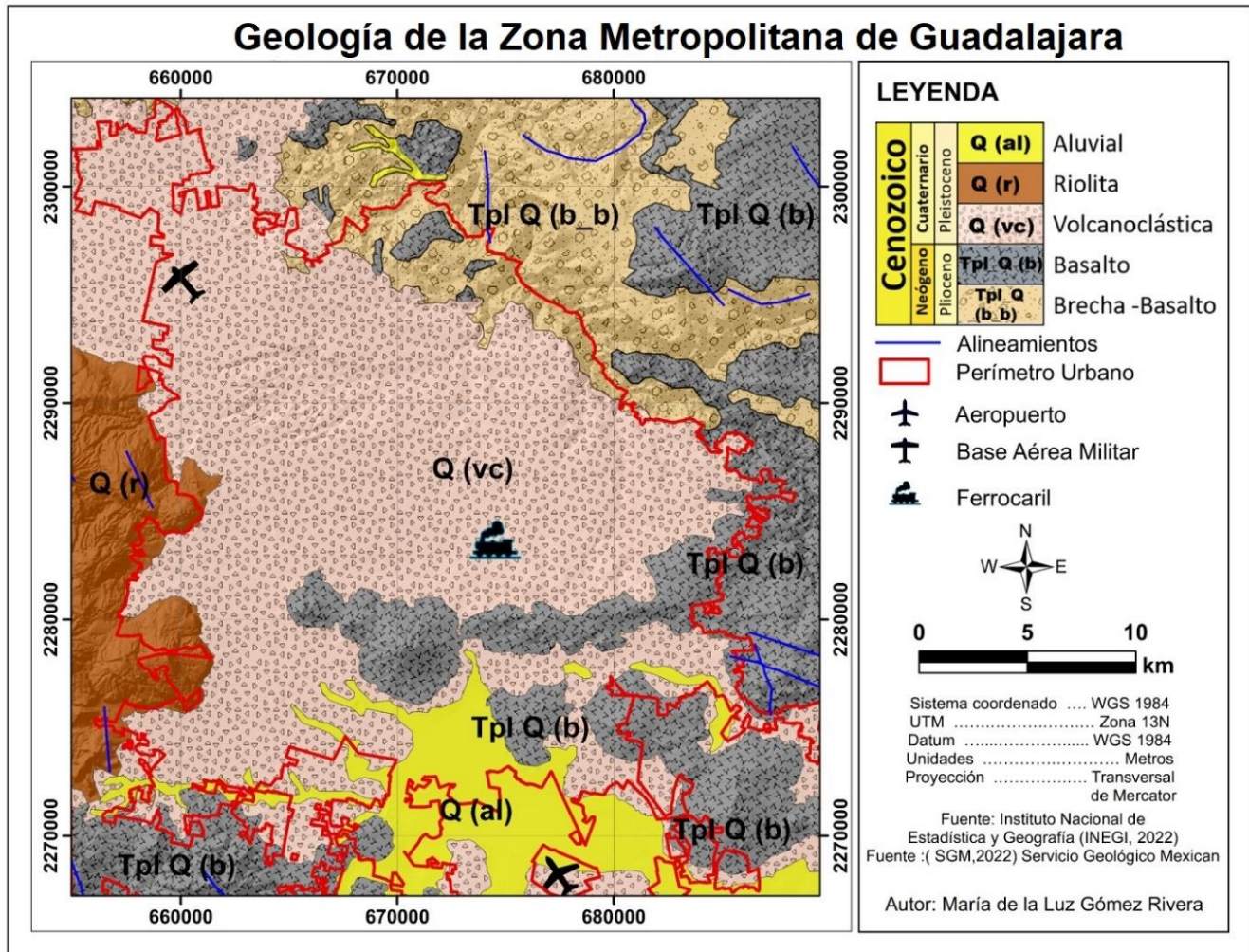


Figura 1.2 Esquema de distribución litológica de la ZMG.

Las rocas del período Cuaternario son depósitos volcanoclásticos (Q (vc)), que se ubican en la parte central de la ZMG y se extienden hacia el noroeste y sureste. Mientras que, las riolitas (Q (r)) se encuentran al oeste y los depósitos aluviales (Q (al)) se encuentran al sur-sureste del área de estudio (ver figura 1.2 y 1.3).

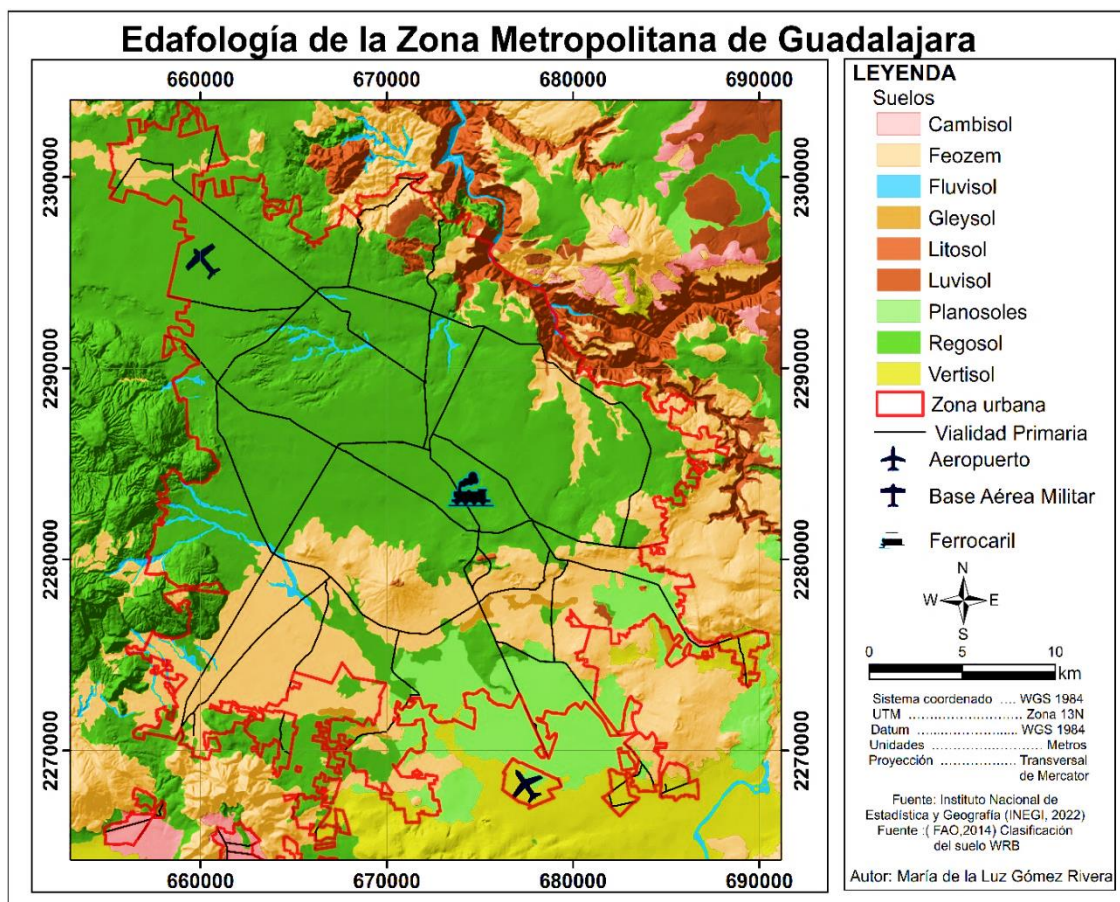


**Figura 1.3** Mapa litológico del de la ZMG, modificado de INGI (escala 1:50 000, claves de INEGI F13D55, F13D56, F13D65 y F13D66) y SGM (escala 1:50 000, claves F13D55, F13D56, y F13D65).

## 1.7 Contexto edafológico

Aproximadamente, el 75 % de la ZMG está sobre suelos del tipo regosol, que se ubican en la parte central y se extienden hacia el noroeste (ver figura 1.4), estos suelos se caracterizan por ser muy jóvenes, poco profundos, pobre contenido de materia orgánica y presentan baja capacidad de retención de humedad. Las propiedades de este tipo de suelos dificultan la infiltración y favorece la escorrentía superficial, así como la erosión (FAO, 2015).

En la zona suroeste, se encuentra suelo tipo feozem que es rico en materia orgánica, textura media y buen drenaje; en general son suelos poco profundos y cubre un 8% del área de estudio (INEGI, 2022).



**Figura 1.4** Mapa edafológico de la ZMG, modificado de INGI (escala 1:50 000, claves de INEGI F13D55, F13D56, F13D65 y F13D66).

## **Capítulo II Antecedentes**

### **2.1 Elementos potencialmente tóxicos (EPTs) y sus efectos en la salud humana**

La corteza terrestre contiene metales pesados y metaloides (arsénico, cadmio, cobalto, cromo, cobre, mercurio, níquel, plomo, estaño, zinc, etc.) cuya concentración puede variar de un lugar a otro. Las rocas interactúan en forma diferente con el clima, biota de cada región y el producto de esta interacción es la formación del suelo, que contiene metales pesados derivados de la roca madre. Sin embargo, las actividades antrópicas provocan variaciones en su concentración (Rodríguez, 2017).

Algunos metales pesados y metaloides son necesarios para el desarrollo y funcionamiento de los organismos (Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, V y Zn) y no provocan problemas en los organismos. Sin embargo, cuando sobrepasan cierto umbral de concentración se vuelven tóxicos, por tal motivo, son considerados elementos potencialmente tóxicos (EPTs).

Los humanos se exponen a EPTs por sus actividades ocupacionales y por su entorno, en donde las vías de exposición a los EPTs son por vía oral, respiratoria o por contacto; una vez que los metales pesados están dentro del cuerpo, estos son absorbidos, aunque algunos son eliminados mediante la excreta y la orina. Sin embargo, una cantidad permanece y se acumula en el organismo causando un daño (Martínez et al., 2015; Rodríguez 2017; Bustamant et al., 2018; Secretaría de Salud Gobierno 2020).

La exposición a EPTs representa riesgos para la salud. Sin embargo, sus efectos van a depender de la dosis, la duración y el tipo de vía de exposición.

### 2.1.1 Cromo (Cr)

El Cr es metal pesado, se ubica en el lugar número 24 de la tabla periódica, tiene un peso atómico de 51.996 u. El Cr es un elemento natural que se encuentra en rocas, animales, plantas y el suelo. Las tres formas principales de Cr son: Cr (0), Cr (III) y Cr (VI). Los compuestos de cromo no tienen ningún sabor u olor especial.

El Cr en rocas se encuentra en la cromita o piedra de Cr y hierro, que es cromito ferroso  $\text{FeOCr}_2\text{O}_3$  (Cuberos et al., 2009). La cromita puede obtenerse de minas subterráneas o a cielo abierto y se usa principalmente en la producción de aleaciones anticorrosivas de gran dureza y resistentes al calor, tales como recubrimientos para galvanizados. Varias de las aleaciones de Cr se combinan con hierro, níquel, titanio, niobio, cobalto, cobre y otros metales para formar aleaciones con fines específicos (Cuberos et al., 2009).

El Cr se usa en procesos de manufactura, por lo que es posible encontrarlo en diferentes productos de uso común, tales como: madera tratada con dicromato de cobre, cuero curtido con sulfato crómico, artículos de cocina de acero inoxidable, prótesis (ATSDR, 2020).

Las emisiones industriales (galvanizadoras, producción de textiles, curtidos de piel, etc.) pueden emitir Cr durante sus procesos, al igual que, los combustibles tales como: gas natural, carbón o petróleo también producen emisiones con Cr. En el suelo, el Cr puede interactuar con el manto freático y contaminar los cuerpos de agua.

El cromo hexavalente (Cr (VI)) es más tóxico y carcinogénico, se encuentra combinado con el oxígeno formando iones de cromato o dicromato  $\text{CrO}_4^{2-}$  y  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  respectivamente (Cervantes et al., 2001). Mientras que, el cromo (III) está en forma de



óxidos, hidróxidos o sulfato  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$  respectivamente, presenta menor movilidad y está presente en la materia orgánica en ambientes acuáticos y en suelos (Cervantes et al., 2001; Codd et al., 2001; Molina et al., 2010).

La intoxicación de Cr por vía respiratoria se presenta por inhalación de partículas de procesos industriales, quema de hidrocarburos y humo de cigarrillo. El Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (CIIC) de la Organización Mundial de la Salud (WHO) clasifica el Cr (VI) como carcinógeno. La exposición a este isótopo muestra una relación con la aparición de reacciones alérgicas, erupciones cutáneas, irritación y sangrado de la nariz, debilitamiento del sistema inmune, daño en los riñones e hígado, problemas respiratorios, alteración del material genético, malestar de estómago y úlceras, cáncer de pulmón y muerte (Molina et al., 2010; Rodríguez et al., 2017).

El cromo III es un nutriente esencial para los humanos. Sin embargo, la falta o exceso de este puede ocasionar trastornos metabólicos, diabetes, erupciones cutáneas y daños al corazón. (ATSDR 2004, 2012; Rodríguez et al., 2017).

### **2.1.2 Cobre (Cu)**

El Cu es un metal, su número atómico es 29 y tiene un peso atómico de 63.546 u. El Cu se halla en rocas, suelo, alimentos y es un nutriente para los seres humanos. Tiene dos isótopos estables: Cu, que son:  $^{63}\text{Cu}$  y  $^{65}\text{Cu}$ .

En los suelos se halla en una abundancia promedio de 50 ppm, en rocas se halla como sulfuros (covelita ( $\text{CuS}$ ), calcocina, calcopirita y bornita. También se pueden encontrar en forma de carbonato, silicatos y sulfatos: (malaquita, crisocola y calcantita (Feoktistova y Feoktistova, 2018).

El Cu es un excelente conductor del calor y la electricidad por lo que se usa en la industria eléctrica, en la fabricación de cañerías, utensilios de cocina, equipos químicos, pigmentos y aleaciones de latón, estaño, níquel, aluminio, oro, plomo, cadmio, cromo, berilio, silicón o fósforo, entre otros usos (ATSDR, 2020).

Es importante mencionar que este metal es esencial para el metabolismo del ser humano, pues es considerado como un micronutriente que se encuentra en diversos órganos, tales como el hígado, el cerebro, los riñones y el corazón (Arcaya et al., 2013).

El Cu se libera de fuentes naturales: suelo, roca o de la vegetación en descomposición, y de las actividades humanas como; desechos de sólidos y la quema de combustible fósil. El Cu en el suelo puede ser absorbido por las plantas en cuerpos de agua es absorbido por los organismos (ATSDR, 2020).

La ingestión excesiva de Cu provoca malestares a corto plazo como son: el dolor abdominal, diarrea y vómitos, pero si la ingestión se prolonga puede ocasionar la irritación de la piel y escleróticas amarillas (ictericia). Si existe contacto con grandes cantidades de este metal, puede ocasionar una pigmentación del color verdoso en el cabello y la piel. En cambio, si el Cu fuese inhalado puede enfermar de síndrome de fiebre por vapores metálicos (FVM) sus síntomas son: dolor en el pecho, escalofríos, tos, fiebre, debilidad muscular, dolor de cabeza, sabor metálico en la boca (ATSDR 2020).

Los niveles altos de cobre pueden producir daño del hígado, riñones y puede causar la muerte. Actualmente, no se ha determinado que el cobre pueda producir cáncer en seres humanos (ATSDR, 2020).

### 2.1.3 Níquel (Ni)

El Ni es un elemento natural muy abundante, se ubica en el lugar número 28 de la tabla periódica, tiene un peso atómico de 58.71 u. El Ni es un elemento abundante en la naturaleza, existen cinco isótopos estables  $^{58}\text{Ni}$ ,  $^{60}\text{Ni}$ ,  $^{61}\text{Ni}$ ,  $^{62}\text{Ni}$  y  $^{64}\text{Ni}$ , siendo el más ligero el más abundante (68,077%) (ATSDR, 2005).

El Ni se encuentra en suelos, en emisiones volcánicas, meteoritos y en el piso oceánico. El níquel y sus compuestos no tienen olor ni sabor característicos. Muchos de sus compuestos se disuelven en agua y toman un color verde. Los compuestos de Ni se usan para colorear cerámicas, fabricar baterías y son usados como catalizadores para las reacciones de hidrogenación (Nordberg et al., 2007; 2013).

El acero inoxidable y otras aleaciones de Ni-Cr-Fe se usan para la fabricación de equipo resistente a la corrosión, tanto en arquitectura como para utensilios de cocina. Existen más de 3000 aleaciones de Ni, algunas de estas se utilizan para la fabricación de monedas y en la maquinaria de las industrias de alimentación y lácteas, así como para la fabricación de imanes y la producción de catalizadores. También, se utilizan en elementos de calefacción, turbinas de gas, motores de reacción y en la combustión de combustibles fósiles, junto con sus derivados (Nordberg et al., 2007, 2013).

El níquel es liberado a la atmósfera por industrias que usan níquel o sus compuestos. La quema de combustibles fósiles como petróleo o carbón o incineradores de basura que también emiten partículas con contenido de Ni (ATSDR, 2003).

En el aire, las partículas de polvo con Ni permanecen suspendidas hasta que algún factor (lluvia o nieve) provocan una precipitación hacia el suelo. El níquel liberado



en el desagüe de industrias termina en el suelo o en el sedimento, en donde se adhiere fuertemente a partículas que contienen hierro o manganeso (ATSDR, 2005).

La entrada de Ni al organismo del ser humano ocurre por las tres principales vías de exposición: absorción dérmica, inhalación e ingestión; esta última es la más común.

La ingesta de los alimentos con Ni como: agua, chocolate, nueces, avena, y vegetales que son regados con aguas residuales produce afectaciones al organismo (Nordberg et al., 2007,2013).

La exposición de Ni por adsorción con la piel suele ocasionar reacciones alérgicas que puede ocasionar, diversas enfermedades de forma transitorias o crónicas, esto depende del tiempo, así como de la concentración en la fuente de exposición y del grado de intoxicación del individuo (ATSDR, 2005).

Si la exposición es a corto o mediano plazo, suelen producir fallos respiratorios, así como la rinitis, sinusitis, asma; también provoca problemas cardiovasculares y embolias pulmonares. Si la exposición es continua y de largo tiempo puede provocar enfermedades crónicas, tales como: el cáncer pulmonar y bronquitis crónica (ATSDR, 2005).

El Ni es esencial para el organismo humano en pequeñas cantidades, pero cuando es consumido en altas cantidades es peligroso para la salud humana (Nordberg et al., 2007, 2013).

#### 2.1.4 Plomo (Pb)

El Pb es un elemento que se ubica en el lugar número 82 de la tabla periódica y tiene una masa atómica de 207.2 u. El plomo tiene cuatro isótopos estables:  $^{204}\text{Pb}$ ,  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$  y  $^{208}\text{Pb}$ .

El plomo es un metal pesado presente en la naturaleza y generalmente se encuentra combinado con otros elementos formando compuestos de plomo. El principal mineral de extracción de Pb es la galena, que es un sulfuro de plomo.

El Pb es usado para fabricar láminas y tuberías, revestimiento de cables, soldaduras, pilas, barnices, entre otros, y antiguamente el tetraetilo de plomo y tetrametilo de plomo fueron usados como aditivos para aumentar el octanaje de la gasolina. El Pb se puede encontrar en todas partes de nuestro medioambiente, como el aire, el agua y el suelo (ATSDR, 2020).

El uso generalizado de Pb ha dado lugar a una importante contaminación ambiental, a la exposición humana y a graves problemas de salud pública en muchas partes del mundo. Las principales vías de exposición del Pb es inhalación e ingestión y en menor medida, a través de la piel (WHO, 2022).

La intoxicación por Pb, se produce en el entorno ocupacional o ambiental por la inhalación o ingesta de partículas de Pb que se generan por la combustión de materiales que contienen este metal, por ejemplo, durante actividades de fundición, reciclaje o decapado de pintura con Pb, o al emplear combustible que contiene Pb. La ingesta de Pb puede llevarse a cabo por beber agua o comer alimentos contaminados con Pb, por ejemplo, agua canalizada a través de tuberías de Pb o alimentos envasados en recipientes con esmalte de Pb o recipientes soldados con este metal (ATSDR, 2020).

En México, se puede ingerir medicamentos tradicionales y productos cosméticos a base de galena molida (Pb) que son de uso no controlado y producir una intoxicación de Pb (WHO, 2022).

El Pb en el organismo humano no es metabolizado, más bien se absorbe, se distribuye y se excreta directamente, la absorción dependerá de la forma química o física del Pb y de las características fisiológicas de la persona expuesta, dependiendo de su edad y estado nutricional (ATSDR, 2022).

Dentro del organismo, el Pb se distribuye en tres compartimentos, el primero es en la sangre, el cual, tiene una vida estimada de 35 días, el segundo son los tejidos blandos (riñón, médula ósea, hígado y cerebro) donde tiene una vida estimada de 40 días y el tercero es el tejido mineralizado (huesos y dientes) donde su vida estimada es de 20 a 30 años (Nava y Méndez, 2011).

En el hueso, el Pb se intercambia rápidamente con la sangre, cuando el organismo se encuentra en condiciones fisiológicas de estrés, como durante el embarazo, la lactancia o una enfermedad crónica provocando un aumento en los niveles de Pb en sangre (Nordberg et al., 2007).

Los síntomas por intoxicación de Pb a corto plazo son: dolor de cabeza, irritabilidad, dolor abdominal y otros relacionados con el sistema nervioso central, mientras que en intoxicaciones agudas y prolongadas con frecuencia desarrolla torpeza, irritabilidad, falta de atención, constipación epigástrica, vómito, convulsiones y en ocasiones hasta la muerte (Nava y Méndez, 2011).

En niños expuestos a Pb se presentan problemas de encefalopatía, letargo, torpeza, vómito, irritabilidad y anorexia, en casos graves se presentan disminución en la

función cognitiva, memoria y disminución en el aprendizaje, con un incremento en los desórdenes de desarrollo, en especial agresividad, psicosis, confusión y déficit mental (Nava y Méndez, 2011).

El Instituto de Sonometría y Evaluación Sanitaria de Estados Unidos estimó que, en 2019, la exposición al Pb causó 900 000 defunciones en todo el mundo, también, en ese mismo año estiman que ocasionó el 62,5% de la carga mundial de insuficiencia del desarrollo intelectual sin causa evidente, así como el 8,2% de la carga mundial de la cardiopatía hipertensiva, el 7,2% de la carga mundial de la cardiopatía isquémica y el 5,65% de la carga mundial de accidentes cerebrovasculares (WHO, 2022).

### **2.1.5 Vanadio (V)**

El V es un metal que se ubica en el lugar número 23 de la tabla periódica, tiene un peso atómico de 50.942 u. y tiene veintiséis isótopos estables entre el  $^{40}\text{V}$  a  $^{65}\text{V}$ .

El V se encuentra de forma natural en las rocas, en depósitos de petróleo y asociado a minerales de hierro (Rodríguez y Altamirano, 2006).

Los principales minerales que se utilizan para su explotación son la cuprodescloicita, descloicita, patronita, roscoelita, vanadinita, carnotita, corvuosita y fernandinita.

El V se usa en la industria para la producción de aleaciones de acero de alta resistencia a la corrosión, el sulfato de vanadio ( $\text{VSO}_4$ ) y el tetracloruro de vanadio ( $\text{VCl}_4$ ) se utilizan para fijar los colores en los productos textiles en tintorerías; los silicatos de vanadio como catalizadores; el dióxido ( $\text{VO}_2$ ) y el trióxido de vanadio ( $\text{V}_2\text{O}_3$ ) en la industria metalúrgica, el pentóxido de vanadio se usa en cerámicas, como catalizador y

en la producción de imanes superconductores y el sulfato de vanadio y el metavanadato de sodio se han usado como suplementos dietéticos (Nordberg,2013).

El compuesto de V más preocupante es el pentóxido de vanadio, ya que representan un riesgo para la salud humana debido a que es cancerígeno (Nordberg, 2013).

El V es un metal ampliamente distribuido en los sistemas biológicos y es uno de los elementos traza presente en los combustibles de tipo fósil. Los petróleos de América son los que contienen más vanadio. El crudo de Venezuela presenta concentraciones de 282 a 1,180  $\mu\text{g/g}$ . Por otra parte, el crudo de Canadá y México muestran contenido de V entre 640 y 243  $\mu\text{g/g}$ , respectivamente. En cenizas, residuos sólidos u hollín se pueden encontrar de 600 a 700  $\mu\text{g/g}$  (Baroch 1983; IPCS 1988; Crans et al., 1998; Rodríguez Y Altamirano 2006).

La entrada de V al organismo del ser humano ocurre por las tres principales vías de exposición: absorción dérmica, ingestión e inhalación; la primera es mínima. Sin embargo, las últimas dos pueden producir efectos tóxicos graves en el tracto gastrointestinal y el sistema respiratorio, ya que, representan el 10 % del V ingerido y el 25 % por inhalación, respectivamente, la gravedad del sujeto depende de la disponibilidad de los compuestos de V y de la duración de la exposición, otra vía de exposición del V son las amalgamas, usadas en ortodoncia, ortopedia, en válvulas cardiovasculares y en distintos materiales biomédicos (Daley et al., 2004; Gioka et al., 2004; Narayan 2005).

Una vez que el V ha ingresado al organismo, se acumula exclusivamente como  $\text{V}^{\text{IV}}$  ( $\text{VO}^{2+}$ ). Los órganos que lo acumulan son hígado, riñón, hueso y bazo. Mientras que,

los pulmones y testículos lo concentran en menor cantidad. También, se ha detectado su presencia en corazón, tiroides, cerebro, músculo esquelético, médula ósea y tejido graso. Los órganos que no remueven con facilidad el metal son el hueso, músculos y pulmón, donde permanece por tiempo prolongado (Sharma et al., 1987; Alessio et al., 1988; Elinder et al., 1988; French y Jones, 1993).

Por otra parte, los síntomas por intoxicación de V por inhalación a corto plazo generan lagrimeo, sensación de ardor conjuntiva, rinitis serosa o hemorrágica, dolor de garganta, tos, bronquitis, expectoración y dolor torácico. Mientras que los síntomas a largo plazo pueden generar bronquitis crónica con o sin enfisema, la lengua puede sufrir una alteración del color, tornándose verdosa. Una exposición intensa puede producir neumonía, con resultados fatales; ahora bien, si la exposición ocurre una sola vez, suele observarse una recuperación completa en 11 a 22 semanas.

### **2.1.6 Zinc (Zn)**

El Zn es un elemento común en la corteza terrestre. Se encuentra en el aire, el suelo y el agua, y está presente en los alimentos. El Zn puro es un metal brillante blanco azulado, su número atómico es 30, tiene un peso atómico de 65.38 u. La principal fuente de explotación es un sulfuro llamado esfalerita, seguida por la explotación del mineral nombrado hemimorfita, frecuentemente conocido como calamina, este es un mineral del grupo de los silicatos, subgrupo de los sorosilicatos. También, se puede encontrar en forma de carbonato y óxidos de Zn (Nordberg et al., 2007).

El Zn metálico sirve para la fabricación de piezas de automóviles, equipos eléctricos, herramientas de maquinaria ligera, equipos informáticos, juguetes, artículos ornamentales, se puede laminar para la obtención de planchas destinadas a tejados y

cubiertas, forros de pilas secas, placas de fotograbado, etc. Sin embargo, su principal uso es la galvanización del hierro o acero, puesto que evita la corrosión de estos materiales. En la industria marítima, se usan planchas de Zn para la protección catódica de los cascos de buques, tanques enterrados, etc. El zinc se usa en aleaciones, tales como la de cobre, la cual produce latón, otras aleaciones comunes se fabrican con níquel, aluminio y magnesio (Nordberg et al., 2007).

Los compuestos de Zn son ampliamente usados en la industria para fabricar pinturas, caucho, preservativos para maderas y ungüentos. También se usa en distintos usos textiles durante el teñido, estampado y apresto de los tejidos, etc. (ATSDR, 2005)

El Zn dentro del organismo se suele acumular en los siguientes órganos: hígado, páncreas, riñones, huesos y músculos, además se puede acumular en los ojos, próstata, espermatozoides, piel, pelo, dientes y uñas. La principal vía de exposición es a través de la ingestión e inhalación de partículas de óxido de zinc, y en segundo lugar mediante la exposición dérmica (Rubio et al., 2007).

La entrada más común de Zn al organismo humano, ocurre por el consumo de agua contaminada o al consumir alimentos o bebidas ácidas que están contenidos en un envase galvanizado. El Zn que entra por ingesta, suele tardar entre 3 a 4 días, para manifestar los primeros síntomas, como son: irritación en el estómago, náuseas, vómitos, dolor abdominal y diarrea. Por otra parte, la intoxicación crónica puede causar convulsiones, presión arterial baja, Shock, desmayo, además puede provocar una deficiencia de cobre y daño nervioso (ATSDR, 2005).

El óxido de zinc que se inhala, puede causar una enfermedad de corta duración conocida como fiebre de los vapores metálicos (temblores del zinc); esta enfermedad

es generalmente reversible, una vez que la exposición cesa. Los principales síntomas son: fiebre, disnea, náuseas, fatiga y mialgias, es importante mencionar que no hay antídotos disponibles para combatir la intoxicación por Zn, solo queda esperar que se deseche por las vías urinarias y heces (ATSDR, 2005).

## **2.2 Vulnerabilidad**

La vulnerabilidad se define como la susceptibilidad o propensión de un agente afectable a sufrir daños o pérdidas ante la presencia de un agente perturbador, determinado por factores físicos, sociales, económicos y ambientales (Ley General de Protección Civil 2014).

En este contexto, se define "áreas vulnerables" como aquellas regiones específicas que tienen una mayor probabilidad de sufrir la influencia de un agente perturbador, ya sea de origen humano o natural, y que afecta a grupos de población que son especialmente susceptibles. Según la Ley General de Protección Civil de 2014, se propone que la evaluación del riesgo (R) debe tener en cuenta la exposición al peligro (P) de los elementos vulnerables (V), y esto se puede calcular mediante la fórmula  $R = P \cdot V$ . Además, se considera la sensibilidad de los elementos vulnerables ante el peligro, así como su capacidad de adaptación y respuesta ante situaciones de riesgo Turner 2003.

### **2.2.1 Vulnerabilidad social**

La vulnerabilidad social se refiere a cómo ciertas condiciones de servicios sociales, económicos y políticos, tales como la pobreza, la raza y la etnicidad, el género, la edad, la salud, la capacidad física y las condiciones de vivienda explican el nivel de riesgo para las poblaciones humanas (Laska et al., 2008).



### **2.2.2 Grupos desfavorecidos potencialmente vulnerables**

Son grupos de personas que, debido a factores que normalmente se consideran ajenos a su control, no tienen las mismas oportunidades que otros grupos más afortunados de la sociedad (Glosario de términos utilizados para la Evaluación de Impacto en la Salud (OPS, 2013; OMS, 2013).

### **2.2.3 Amenaza**

La amenaza involucra cualquier factor externo con potencial para provocar daños sociales, ambientales y económicos en una comunidad vulnerable durante un periodo de tiempo en un área geográfica específica y que puede diferir en su intensidad, los valores de la amenaza usualmente se emplean para trazar acciones a periodos cortos de tiempo ante el riesgo (IMEPLAN 2021).

Como en la mayor parte de las grandes ciudades de México, el desarrollo de la zona metropolitana de Guadalajara, no ha considerado explícitamente el incremento del riesgo que resulta de su proceso de crecimiento y urbanización. Se ha creado un instrumento para identificar algunas amenazas en la ZMG con el fin de reducir el riesgo, tal como el Atlas Metropolitano de Riesgos. Sin embargo, en este atlas no se incluye la amenaza asociada a la concentración de elementos peligrosos, por lo que aún falta una cartografía para evaluar el riesgo, la exposición, la vulnerabilidad y los posibles impactos a la población. La información disponible de concentración de metales pesados o elementos potencialmente tóxicos en la AMG está dada en: cuerpos de agua para riego (Mancilla et al., 2012; Bonilla et al., 2014; Mancilla et al., 2017).

#### **2.2.4 Riesgo**

El riesgo se define como una combinación de dos factores principales: el peligro y la vulnerabilidad. El riesgo al que se encuentra expuesta una comunidad es una combinación de todas las condiciones preexistentes que han sido construidas socialmente (vulnerabilidad) y de la probabilidad de que un evento natural extremo ocurra en un periodo de tiempo determinado en una zona geográfica determinada (Whittow 1988; Ley de protección civil 2014).

#### **2.2.5 Exposición**

La población expuesta es el grupo de personas que están localizadas dentro de la zona que presenta un nivel de amenaza potencial a sufrir un daño (Morales, 2009; Ley de Protección Civil 2014).

### **2.3 Índices sociodemográficos**

Los Índices Sociodemográficos son generados por sistemas gubernamentales por lo general. En México la institución que se encarga de estos parámetros es el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el cual proporciona investigaciones y herramientas útiles en la obtención de esta información, entre otros productos, basándose en las fuentes regulares de información: censos, encuestas y registros administrativos (INEGI, 2022).

#### **2.4 Índice de rezago social (IRS)**

El CONEVAL calcula el Índice de Rezago Social (IRS), el cual evalúa la parte económica y sociológica de la preparación laboral de una persona y de la posición económica y social, individual o familiar, en relación a otras personas, es una medida ponderada que resume cuatro indicadores de carencias sociales que son: Indicador

educativo, salud, servicios básicos y espacios en la vivienda en un solo índice que tiene como finalidad ordenar a las unidades de observación según sus carencias sociales (CONEVAL, 2020).

Se clasifica a las unidades de observación en cinco estratos (grados de rezago social), haciendo uso de la técnica de estratificación de Dalenius-Hodges, la cual permite que dentro de cada estrato las unidades sean lo más homogéneas posibles. Los cinco estratos o grados de rezago social se distribuyen de acuerdo al Índice, como: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto rezago social (CONEVAL, 2020).

## **2.5 Uso de suelo**

El Uso de Suelo se refiere a la planificación de la ocupación del espacio geográfico con propósitos urbanos específicos. La clasificación de los usos de suelo puede variar de un estado a otro, pero generalmente se agrupan en seis categorías principales:

1. Residencial: Destinado a la construcción de viviendas.
2. Actividades productivas: Incluye diversos tipos de industrias y actividades comerciales.
3. Equipamiento: Comprende instalaciones que proporcionan productos y servicios a la comunidad.
4. Infraestructura: Hace referencia al conjunto de obras públicas, edificaciones, instalaciones, sistemas y redes.
5. Espacio público: Se refiere a territorios en los que cualquier individuo tiene el derecho de estar y transitar libremente.
6. Áreas verdes: Espacios designados para la vegetación y la recreación (INEGI, 2020).

## **2.6 Área geoestadística básica urbana (AGEB´s Urbanos)**

De acuerdo con INEGI, una AGEB urbana es un área geográfica ocupada por un conjunto de manzanas perfectamente delimitadas por calles, avenidas, andadores o cualquier otro rasgo de fácil identificación en el terreno y cuyo uso del suelo es principalmente habitacional, industrial, de servicios, comercial, etcétera, y sólo son asignadas al interior de las zonas urbanas con población mayor o igual a 2,500 habitantes y en las cabeceras municipales (CONEVAL, 2022).

### **Capítulo III Metodología**

La investigación se desarrolló en tres etapas: amenaza, integración y Riesgo. En cada etapa se establecieron objetivos específicos, los cuales se alcanzaron mediante técnicas y procedimientos analíticos específicos.

En la primera etapa (amenaza), se hizo un análisis de la concentración de EPTs en el suelo urbano (SU) de la ZMG, en donde se determinó la concentración de referencia total, que permitió evaluar el factor de enriquecimiento e índice de concentración de carga. Posteriormente, se hizo un análisis espacial con el fin de obtener el mapa de amenaza asociado a la distribución de EPTs.

En la segunda etapa (integración), se hizo un estudio geoespacial de aspectos sociodemográficos de la población en ZMG, con el fin de obtener indicadores poblacionales y evaluar el índice de rezago socioeconómico. La información obtenida fue vaciada en mapas.

En la tercera etapa (Riesgo), se obtuvieron los mapas de riesgo asociados a la concentración de EPTs de la zona metropolitana de Guadalajara (ZMG), los cuales integran los resultados de la etapa 1 y 2.

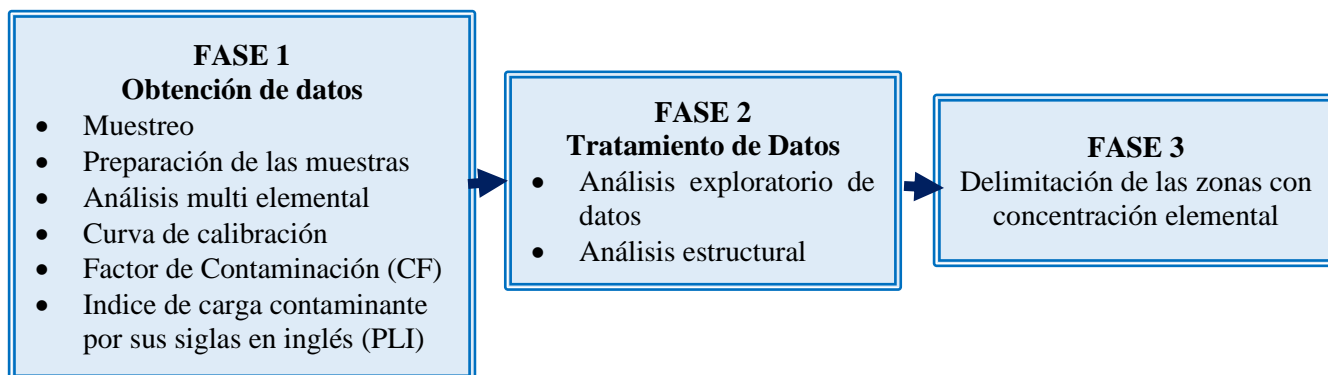
Los métodos y procedimientos que fueron aplicados en cada una de las etapas de esta investigación, son descritos a continuación:

### 3.1 Etapa 1 “amenaza”

#### 3.1.1 Fase 1

La obtención de los modelos espaciales de la amenaza por concentración de EPTs en suelo urbano (SU) en la ZMG, fueron hechos en 3 fases: 1) obtención de datos; 2) tratamiento de datos y 3) delimitación de las zonas con concentración elemental (cuadro 3.1).

**Cuadro 3.1** Esquema metodológico utilizado para definir las áreas de contaminación por elementos potencialmente tóxicos (EPTs) en SU del ZMG.

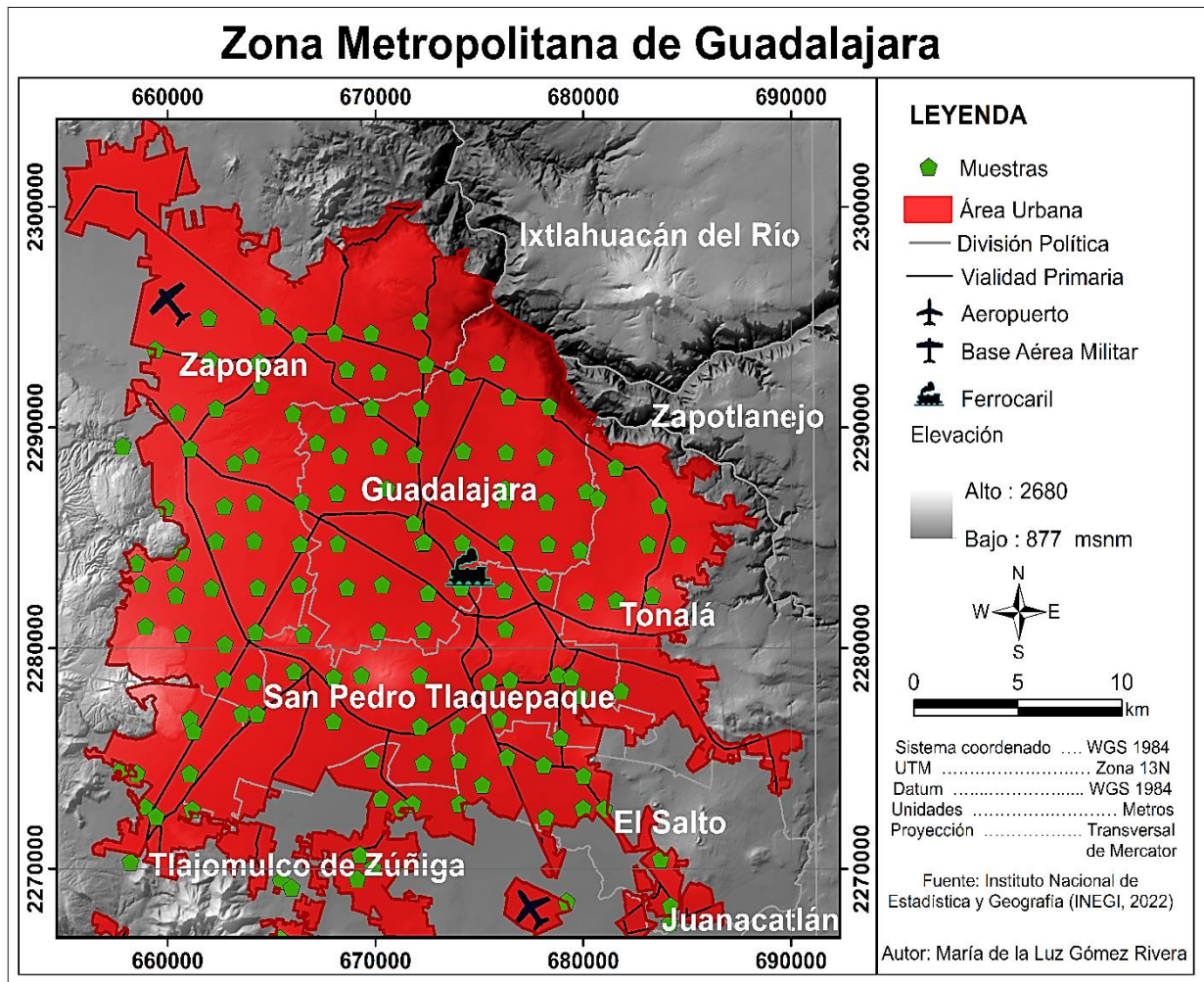


##### 3.1.1.1 Muestreo

El muestreo de suelos urbanos en la ZMG, se hizo durante una campaña de campo, el 23 de marzo del año 2015, empleando un arreglo de muestreo sistemático por rejilla y con una separación entre sitio de muestreo de 0.6 km (Figura 3.1).

Se recolectaron 140 muestras de SU de aproximadamente 50 g de suelo urbano y 5 muestras de control (áreas verdes con baja o nula actividad antrópica). Cada muestra de suelo urbano fue obtenida bajo el siguiente protocolo: Se retiró la cubierta vegetal de un área de 10 x 10 cm, se colocó un extractor o nucleador de muestras cilíndrico de PVC

(10 cm de largo y 5 cm de diámetro) perpendicular a la superficie del suelo. El extremo superior del tubo fue tapado con un trozo de madera de 10 x 10 cm, para posteriormente



**Figura 3.1** Mapa de la ZMG. Los pentágonos verde son los sitios de muestreo en SU.

ser golpeado por medio de un martillo para que se introduzca en el suelo.

Una vez introducido a 5 cm de profundidad en el suelo el cilindro nucleador, se extrae con cuidado, con ayuda de la pala de jardinería o en su defecto se empleará la cuchara de plástico para extraer el material al interior del nucleador.

El suelo extraído se depositó dentro de una bolsa de polipropileno de 20X30 cm con cierre, con el propósito de evitar su contaminación y transportarlo al laboratorio.

Cada bolsa fue rotulada con los siguientes datos: Número del sitio, ciudad, datos de georreferencia, tipo de uso de suelo, vialidad, persona que hizo el levantamiento, fecha y hora, los datos también son colectados en una libreta de campo.

El sistema de coordenadas geográficas utilizado en sistema de posicionamiento global (GPS) fue: UTM zona 13 N con datum WGS84. La clasificación del uso de suelo en cada sitio de extracción, fue elaborada con base en la clasificación oficial del Ayuntamiento de Guadalajara (POTmet, 2016), clasificándose en cinco categorías: áreas verdes (áreas con extensión  $> 200\text{m}^2$  con cubierta vegetal nativo), comercio y servicios (áreas que tienen mercados, plazas comerciales), equipamiento (escuelas, centros de recreación, áreas deportivas, iglesias, hospitales), industrial (áreas con fábricas) y habitacional (viviendas).

### **3.1.1.2 Preparación de muestras**

Las muestras fueron preparadas en el Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental, Campus Morelia para análisis de fluorescencia de rayos X. La preparación de cada muestra fue hecha en 3 etapas (Recepción, Secado y Tamizado):

#### **1) Recepción de muestra**

Cada muestra fue inventariada en el laboratorio, en donde se le asignó un identificador (ID): como ZMG ###, donde ZMG es por zona metropolitana de Guadalajara y ###: número de muestra. A las muestras control, se les asignó una consonante B después del número. Toda la información se registró de forma digital en una tabla.

#### **2) Secado**

Cada una de las muestras fue sacada de la bolsa de polipropileno y colocada en una charola de plástico, en donde el material fue extendido sobre su superficie hasta una

altura máxima de 2.5 cm (medido con respecto del fondo), durante el proceso se retiró manualmente los restos visibles de material orgánico y los fragmentos de roca. Posteriormente, las charolas fueron colocadas en estantes a temperatura <35 °C por dos semanas y en ausencia de luz, con el fin de secar la muestra y disminuir los posibles cambios químicos.

### 3) Tamizado

Pasado el tiempo, el material seco fue colocado en un mortero de madera, donde se le destruyeron los agregados. Posteriormente, el material fue pasado por tres tamices, con redes plásticas de distinto tamaño: ASTM n° 10 (ISO: 2 mm), ASTM n° 40 (ISO: 0.425 mm), ASTM n° 200 (0.075 mm), con el fin de homogenizar el tamaño de partícula a 0.075 mm. Este procedimiento se lleva a cabo bajo la NORMA MEXICANA NMX-Y-357-SCFI-2011.

#### **3.1.1.3 Análisis multi-elemental por fluorescencia de rayos X (FRX)**

La medición de la concentración de elementos de las 145 muestras se hizo con un espectrómetro de fluorescencia de rayos X (FRX) portátil modelo Genius 9000.

El procedimiento de medición consistió en colocar 3 g de material tamizado dentro de un portamuestras cilíndrico, el cual estaba sellado en uno de sus extremos con una película de poliéster (mylar) especial para mediciones de FRX. El obturador del espectrómetro fue colocado perpendicularmente a la muestra, a una distancia < 0.5 cm.

Las mediciones se hicieron tres veces, bajo la siguiente configuración del espectrómetro: tiempo de exposición de 30 s, voltaje de 45 keV, corriente de 40 µA y temperatura de 32.7 °C.



Se hizo una curva de calibración para cada elemento (Cr, Cu, Pb, Ni, V y Zn) empleando cuatro estándares que pertenecen a la serie reportada por Lozano y Bernal, 2005 de las muestras (IGLs-1, IGLa-1, IGLsy-2 y IGLgb-3). Las curvas de calibración mostraron un coeficiente de correlación (CC) entre 0.85 hasta 0.9 (Lozano y Bernal, 2005; Zamora et al., 2018).

#### **3.1.1.4 Valor de concentración de fondo total ( $V_{fon}$ )**

El valor de concentración de fondo total o referencia local la ZMG se determinó mediante un análisis de varianza ANOVA, en donde se identificó el valor del primer cuartil (Q1) del uso de suelo que mostró los valores de concentración bajos.

#### **3.1.1.5 Factor de enriquecimiento (CF)**

El factor de enriquecimiento (CF) se determinó mediante el cociente expresado de la siguiente forma:

$$CF = \frac{C_m}{v_{fon}}$$

Donde,  $C_m$  es la concentración del elemento en la muestra y  $V_{fon}$  es el valore de concentración local o fondo (Ihl et al., 2015).

#### **3.1.1.6 Índice de carga de contaminación (PLI)**

El índice de carga de contaminación (PLI) se calcula multiplicando los cocientes de los factores de contaminación (CF) y luego se aplica una raíz en función del número de coeficientes correspondientes a la muestra, como:

$$PLI = \sqrt[n]{CF1 * CF2 * CF3 * CFn}$$

Donde,  $PLI$  significa el factor de contaminación de los elementos tóxicos, mientras que  $n$  representa el número de elementos analizados. La interpretación del índice según Tomlinson et al. (1980) declara que  $PLI \in 0$  a  $1$  son las zonas óptimas (sin contaminación) y  $PLI > 1$  exhibe una degradación del sitio (contaminación).

### 3.1.2 Fase 2

La fase 2 contempla un análisis geoestadístico, con el fin de determinar su distribución espacial. Este análisis contempla dos etapas internas (análisis exploratorio de datos, análisis estructural) y la generación de modelos de interpolación (Kriging ordinario) mediante los sistemas de información geográfica (SIG).

#### 3.1.2.1 Análisis exploratorio de datos (AED)

Se integró la base de datos georreferencia con los datos de concentración de cada elemento para cada muestra. Posteriormente, se hizo un análisis para determinar los parámetros de tendencia central (Media, Moda, Mediana) y de dispersión (sesgo, curtosis), así como pruebas de normalidad (Kolmogorov-Smirnov) con el fin de diferenciar si el conjunto de datos se ajusta o no a una distribución normal (Diaz, 2002).

En la geoestadística, cuando los datos presentan normalidad, el Kriging ordinario (KO) es el mejor predictor lineal. Cuando los resultados del análisis exploratorio de datos no presentaron una normalidad se realizó una transformación de datos (logarítmicas, inversas, de raíz cuadrada etc) que permita tener un mejor ajuste y proceder con el análisis estructural. El procesamiento de AED se hizo con el software Statgraphic XVII.

#### 3.1.2.2 Análisis de relación espacial o estructural

El análisis de la relación estructural busca estudiar la relación espacial entre los datos. De esta forma se calculan los estimadores espaciales que permiten obtener los modelos de interpolación.

Por medio del uso del variograma se identifica la relación espacial entre los datos, el estimador de varianza más común está dado por:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2$$

Donde,  $N(h)$  es el número de pares de  $Z(x_i)$  y  $Z(x_i+h)$  separados a una distancia  $h$ ,  $Z(x_i)$  y  $Z(x_i+h)$  son los valores de la variable en la posición  $x_i$ .

Los pares de las observaciones se agrupan de acuerdo con la distancia dentro de un intervalo con una tolerancia y en una dirección que tiene una dirección angular. Los valores estimados para cada intervalo son graficados contra la distancia promedio entre los pares y se obtiene un gráfico, conocido como variograma experimental. Por medio de una función, se obtiene un semivariograma teórico que permite obtener una estimación de la varianza para cualquier distancia dada (Diaz, 2002).

Las partes de un semivariogramas son: el modelo, meseta o sill, nugget o efecto pepita y rango o alcance que permite hacer una descripción de la relación espacial entre los datos.

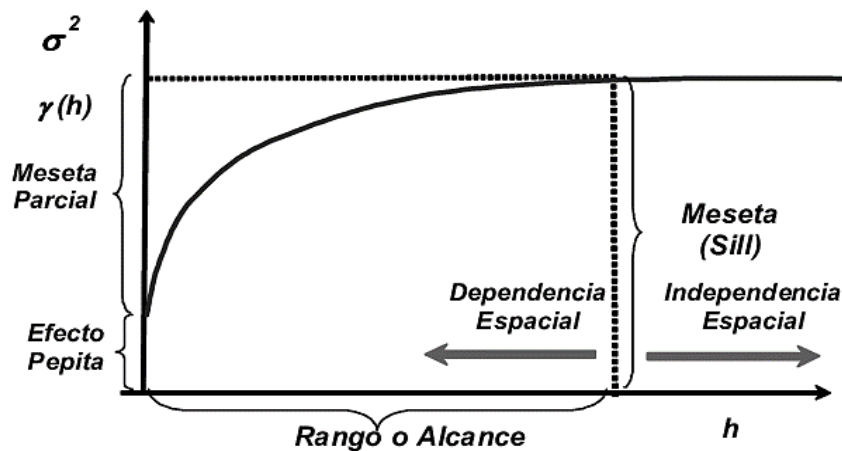


Figura 3.2 Elementos de un variograma (Mejía, 2006)

## Modelo

El modelo permite cuantificar el grado y escala de variación espacial, los más comunes son: modelo esférico, modelo exponencial, modelo gaussiano, lineal, entre otros.

### **Meseta o Sill**

Sill ( $C_0+C$ ) es el límite superior de cualquier modelo de variograma que tenga dicho límite, el semivariograma es una función monótona creciente, que puede alcanzar un valor límite y es equivalente a la varianza de población, es decir, que tiende a "nivelarse" a grandes distancias en el límite del semivariograma cuando la distancia ( $h$ ) tiende a infinito (Díaz, 2002).

### **El Nugget o efecto pepita**

El nugget ( $C_0$ ) es la ordenada al origen del semivariograma, y se calcula como la intercepción con el eje Y, ya que la varianza de dos puntos separados por 0 metros (la intercepción con el eje Y) debería ser cero. Es por ello que esta varianza indica la variabilidad a una escala inferior a la muestreada o un error experimental (Gallardo, 2006).

### **Rango o alcance**

El rango es la distancia a la que la semivarianza deja de aumentar. Este parámetro indica la distancia a partir de la cual las muestras son espacialmente independientes unas de otras; también se interpreta como la zona de influencia de un punto o distancia promedio. Si el semivariograma no tiende asintóticamente hacia la semivarianza, es decir que no existe un sill, significa que el rango es superior a la distancia máxima representada. (Paramá, 2006; Niño, 2008).

### **Validación del modelo**

La evaluación de los modelos de interpolación de tipo Kriging, se puede hacer al comparar el valor observado con el valor estimado, que es conocido como validación cruzada. Generando un mapa de la diferencia entre el valor real ( $Z(x_i)$ ) y el valor estimado

( $Z^*(x_i)$ ) se puede observar la precisión del modelo espacial. Si el modelo de variograma reflejó adecuadamente la estructura espacial de los datos, entonces los valores estimados son similares a los valores observados. De esta forma, si el valor promedio del residual o el promedio del residual cuadrático son próximos a cero el modelo espacial está bien representado por el estimador obtenido del modelo estructural (Díaz, 2002, Ramírez et al., 2002).

La evaluación del valor promedio del residual o error medio está dado como:

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z(x_i) - Z^*(x_i)]$$

Y el valor del promedio del residual cuadrático (SS) como:

$$RMC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z(x_i) - Z^*(x_i)]^2$$

Los cuales deben mostrar valores cercanos a cero o ( $RS \approx 0$ ) con valores muy pequeños ( $SS \rightarrow 0$ ) para modelos de interpolación adecuado.

Es posible el empleo de la raíz de error cuadrado medio (RMSE) como indicador del rendimiento de un modelo predictivo:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [Z(x_i) - Z^*(x_i)]^2}{n}}$$

El error cuadrático medio normalizado es un estimador de las desviaciones en general entre los valores previstos y medidos. Se calcula como:

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [z(x_i) - z(x_i)]^2}{n}}}{z(x_{max}) - z(x_{min})}$$

### 3.1.3 Fase 3

#### 3.1.3.1 Delimitación de las zonas con concentración elemental

La identificación de las zonas de enriquecimiento por elementos potencialmente tóxicos se delimitó mediante el factor de enriquecimiento (CF), empleando los valores de referencia de concentración total que se obtuvo por el análisis de varianza y evaluando el índice de carga contaminante (PLI).

El valor del factor de enriquecimiento CF para cada elemento fue clasificado en cuatro intervalos: el primero es  $\leq 1$  que se le consideró bajo (color verde); el segundo con valores  $> 1$  pero  $\leq 2$ , considerado medio (color amarillo); el tercero con valores  $> 2$  pero  $\leq 3$ , se le considera alto (color rojo); el cuarto con valores  $> 3$ , se le considera muy alto (color guinda). El resumen de clasificación se presenta en el cuadro 3.2

**Cuadro 3.2** Clasificación del factor de enriquecimiento (FC) calculado en suelo de la zona metropolitana de Guadalajara.

Valor de FC	Clasificación	Color en mapas
$\leq 1$	Bajo o sin enriquecimiento	Verde
(1-2]	Medio	Amarillo
(2-3]	Alto	Rojo
$>3$	Muy alto	Guinda

En el caso del PLI, se considera la clasificación de Tomlinson et al., 1980, obteniendo 4 rangos:  $PLI \leq 1$  es Bajo,  $1 < PLI \leq 2$  es Medio,  $2 < PLI \leq 3$  es Alto y  $3 < PLI$  es Muy Alto, estas categorías representan el deterioro progresivo en la calidad del suelo, a su vez, se relacionan cuatro colores según el grado de peligrosidad, verde, amarillo,

rojo y guinda de forma respectiva. El resumen de clasificación se presenta en el cuadro 3.3 :

**Cuadro 3.3** Clasificación del índice de carga contaminante (PLI) en suelo de la zona metropolitana de Guadalajara

Valor de PLI	Clasificación	Color en mapas
< 1	Bajo	Verde
(1-2]	Medio	Amarillo
(2-3]	Alto	Rojo
>3	Muy alto	Guinda

### 3.2 Etapa 2 “integración”

#### 3.2.1 Integración de la información geográfica

Para analizar la distribución de la población se generaron varios mapas: distribución de la población total, distribución de grupos vulnerables (población entre 0 a 12 años y población > 65 años) distribuida por Área Geoestadística Básica urbana (AGEBs). Adicionalmente, se hizo una integración de los aspectos de la geografía física (roca, suelo y altimetría). Los insumos para la elaboración de cada mapa fueron obtenidos del Instituto de Información Estadística y Geográfica del Estado de Jalisco (IIEG, 2020) y del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2022).

Las cartas topográficas y datos vectoriales escala 1:20,000 utilizados fueron: F13D55e, F13D55f, F13D56d, F13D65c, F13D65b, F13D65e, F13D65f, F13D66a, F13D66b, F13D66d, y F13D66e, curvas de nivel escala 1: 20,000 con cotas cada 10 metros y la planimetría a nivel AGEB’s Urbanos del área urbana de la ZMG a escala 1:20,000 del año 2020 (IIEG, 2020; INEGI, 2020).

Adicionalmente, se emplearon los resultados del censo de población y vivienda del 2020 que proporciona el INEGI en formato Excel: Tabla de datos totales del Censo de Población y Vivienda 2020 INEGI a nivel AGEB's Urbanos (INEGI, 2020).

La información asociada al índice de rezago social fue obtenida del Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (Coneval, 2020): Tabla total de Índice de rezago social 2020 a nivel municipal.

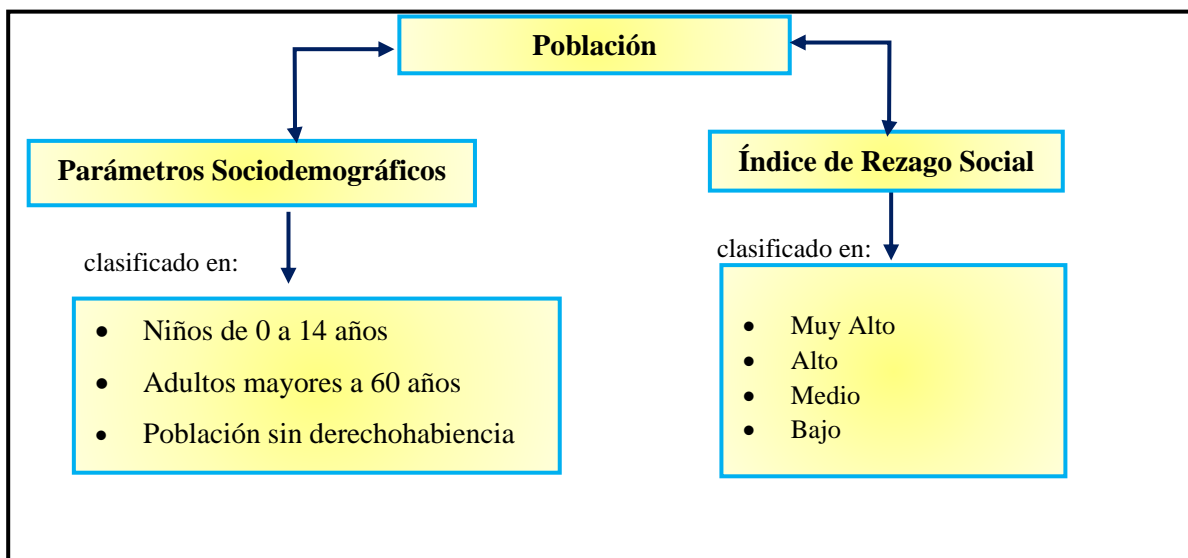
La generación, presentación e integración de la información cartográfica fue elaborada con el software arcgis.

### 3.2.2 Distribución de la población vulnerable.

La población expuesta de la ZMG fue clasificada bajo dos criterios: parámetros sociodemográficos y por el índice de rezago social (Cuadro 3.4).

En este trabajo la población es considerada con propiedades espaciales fijas, es decir, no se toma en cuenta la movilidad que pueda tener la población o individuos.

**Cuadro 3.4** Esquema de la estructura de los grupos desfavorecidos potencialmente vulnerables.





A continuación, se describen los grupos desfavorecidos potencialmente vulnerables:

- Niños de 0 a 14 años.

Los niños son más susceptibles que los adultos dado que, en relación con su masa, inhalan más aire e ingieren mayores cantidades de suelo que los adultos, además, la interacción mano-boca, tan común durante la infancia, facilita la ingesta de polvo (Flores R. et al., 2012, OMS, 2016)

- Adultos mayores a 65 años.

“En México, los adultos mayores están más expuestos a problemas de acceso a los servicios de salud. La consecuencia directa es el retraso en el tratamiento y el agravamiento de la salud del anciano, así como la pérdida de ingresos (pérdida de patrimonio, endeudamiento) que agravan las situaciones de vulnerabilidad ante nuevos riesgos” (Corbett, 1989 In Sánchez D y Egea C, 2011).

- Población sin derechohabencia.

Busso (2001) considera a la protección social como una de las variables relevantes en el análisis de la vulnerabilidad social, además, Hurst, 2008 sustenta que la desigualdad social en salud refiere a la diferencia sistemática y estructural en la salud al interior de los grupos sociales. Por esta razón se puede inferir que la población sin derechohabencia es más vulnerable a enfrentar riesgos y sus atributos socioeconómicos la mantiene proclive a desigualdades (Granados, 2017).

- Índice de Rezago social.

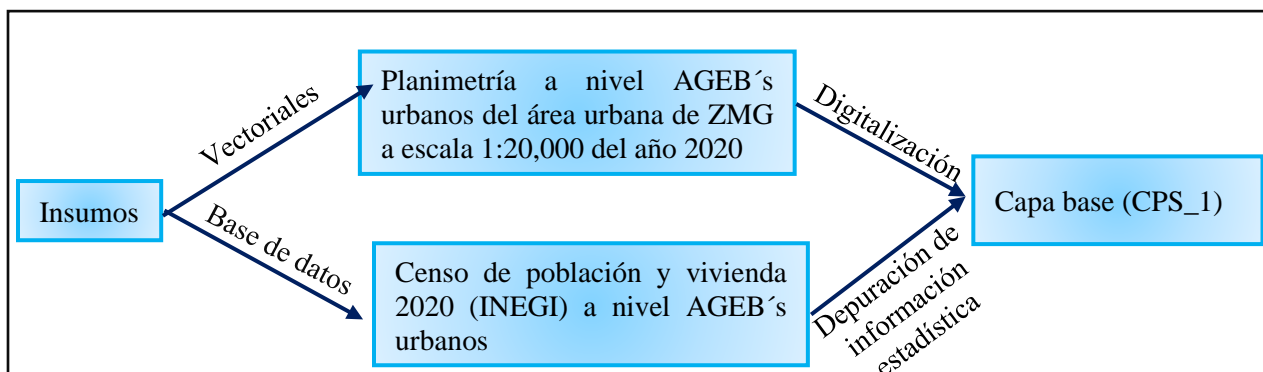
La medición de la pobreza multidimensional se basa en la premisa de que esta abarca a la población en situación de vulnerabilidad, como se señala en los informes del Coneval

en 2014 (citado en Rosas y Sánchez, 2019). Esta metodología evalúa cuatro dimensiones de carencias sociales: el rezago educativo, el acceso a servicios de salud, la disponibilidad de servicios básicos en la vivienda y la calidad de los espacios de la vivienda (Coneval, 2020).

### 3.2.3 Capa de parámetros sociodemográficos (CPS\_1)

Para hacer un análisis de los parámetros sociodemográficos en la ZMG, se hizo una integración de la información espacial de los datos AGEB's con los datos del Censo de Población y Vivienda 2020, a escala 1:20,000 del año 2020; como resultado, se obtiene una capa (**CPS\_1**) que proporciona información de la distribución de la población en la ZMG (ver Cuadro 3.5).

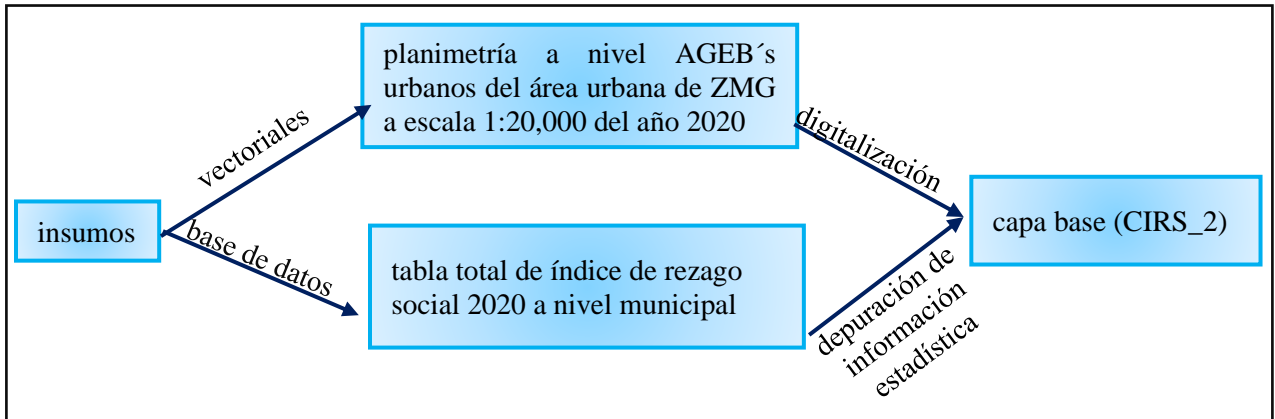
**Cuadro 3.5** Esquema metodológico para integrar la información sociodemográfica en la ZMG (población total, división por sexo, niños de 0 a 14 años, adultos mayores a 65 años, población sin



### 3.2.4 Capa del índice de rezago social (CIRS\_2)

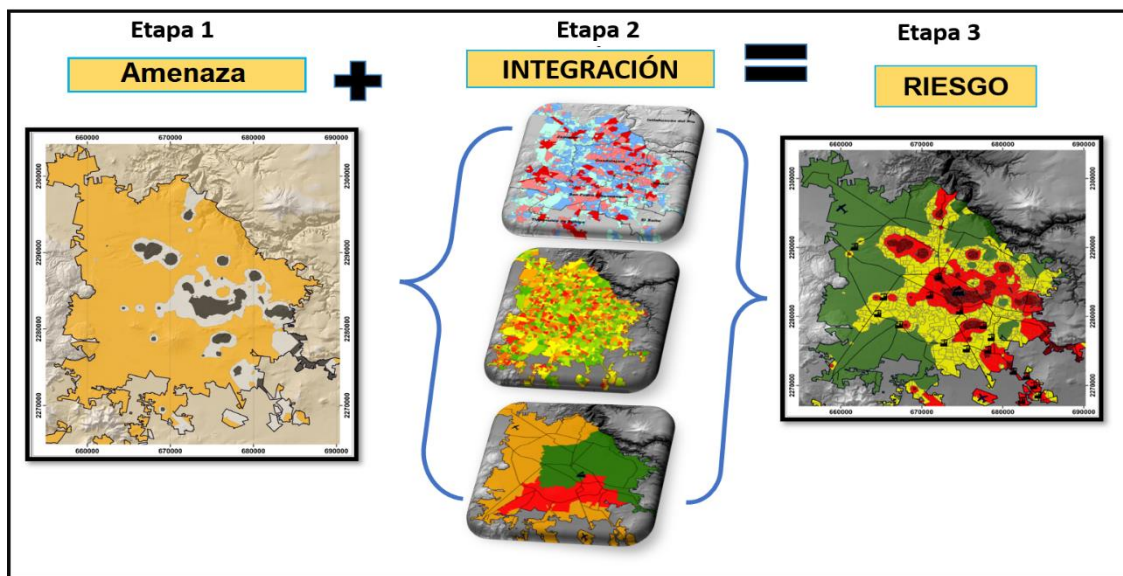
Se integró el índice de rezago social con la planimetría a nivel municipio de la ZMG a escala 1:20,000 para año 2020 con el fin de identificar las zonas en donde habitan las personas con alto y muy alto rezago social (Cuadro 3.6).

**Cuadro 3.6** Esquema metodológico para la generación de la capa base con índice de rezago social



### 3.3 Etapa 3 “Riesgo”

Para determinar las áreas de riesgo en la ZMG, se empleó un álgebra de mapas, con el fin de integrar los mapas de acumulación de elementos e índice de carga contaminante con los mapas de distribución de las poblaciones, índice de rezago social por AGEB’s (Cuadro 3.7).



**Cuadro 3.7** Esquema metodológico para crear mapa de riesgo.

## Capítulo IV Resultados

### 4.1 Estadística descriptiva

Los resultados de la concentración de los EPTs en 140 muestras de suelo urbano de la ZMG se muestran resumidos en un cuadro de estadística descriptiva (Cuadro 4.1).

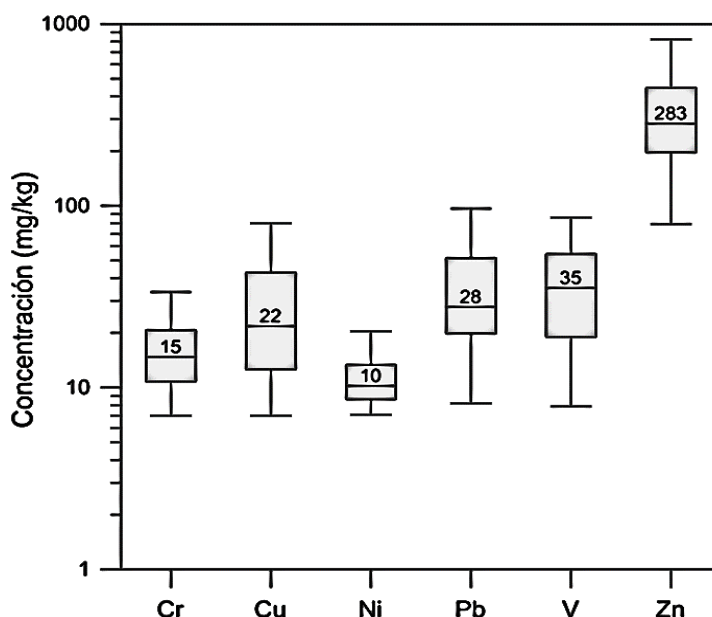
**Cuadro 4.1** Estadística descriptiva de los EPTs en muestras de suelo de la ZMG

Párametro	Cr mg/kg	Cu mg/kg	Ni mg/kg	Pb mg/kg	V mg/kg	Zn mg/kg	PLI
n	106	110	103	138	42	140	140
Prom	17	47	11	56	41	367	1.9
Med	15±7	22±5	10±2	28±3	35±9	283±4	1.4
Min	07±7	07±5	7±2	08±3	08±9	80±4	0.6
Max	63±7	682±5	46±2	531±3	123±9	1768±4	4
$\sigma$	9	90	5	75	26	264	3.4
CV (%)	54	190	41	134	64	72	177
Q1	11	13	9	20	20	194	1.0
Kurtosis	2.2	31.4	26.3	13.4	0.7	6.6	116
Asimetría	7.3	5.3	4.1	3.3	0.9	2.2	50
NOM-147 Agr.	280	N/A	1600	4000	78	N/A	N/A
NOM-147 Ind.	510	N/A	20,000	8000	1000	N/A	N/A

n: número de muestras Prom: promedio; Med: mediana;  $\sigma$ : Desviación estándar; CV: Coeficiente de variación; Min: Mínimo; Max: Máximo; Q1: Primer cuartil y Cr, Cu, Ni, Pb, V y Zn en mg/kg. NOM-147: Norma Oficial Mexicana 147: Valores umbrales de suelo contaminado; Agr: Uso de suelo agrícola e Ind: uso de suelo industrial.

Los resultados generales de EPTs en el suelo de la ZMG mostraron que el Zn es el elemento más abundante, con valor promedio de 367±264 mg/kg y mediana de 283±4 mg/kg; la concentración de Cu (promedio 47±90 mg/kg y mediana de 22±5 mg/kg), Pb (promedio de 56±76 mg/kg y mediana de 28±3 mg/kg) y V (promedio de 41±26 mg/kg y mediana de 35±9 mg/kg) fueron similares. Mientras la concentración de Cr (promedio de

17±09 mg/kg y mediana de 15±7 mg/kg) y Ni (promedio de 11±5 mg/kg y mediana de 10±2 mg/kg) fueron de las más bajas en el suelo de la ZMG (Figura 4.1).



**Figura 4.1** Concentración de elementos potencialmente tóxicos en suelo de la zona metropolitana de Guadalajara.

El índice de carga de contaminación (PLI) evaluado con los 6 EPTs para las 140 muestras, expuso un valor promedio de 2 y mediana de 1.4, valores que indican una contaminación por EPTs en los suelos de la ZMG.

#### 4.2 Concentración elemental por uso de suelo

Se presentan los resultados del análisis de varianza (ANOVA) que determinan la concentración de referencia total o valor de fondo añadiendo el uso de suelo de ZMG para cada elemento.

## Cromo

El valor de concentración de fondo ( $V_{fon}$ ) para Cr se propone de 14 mg/kg, valor que proviene del uso de suelo del tipo áreas verdes (Figura 4.2).

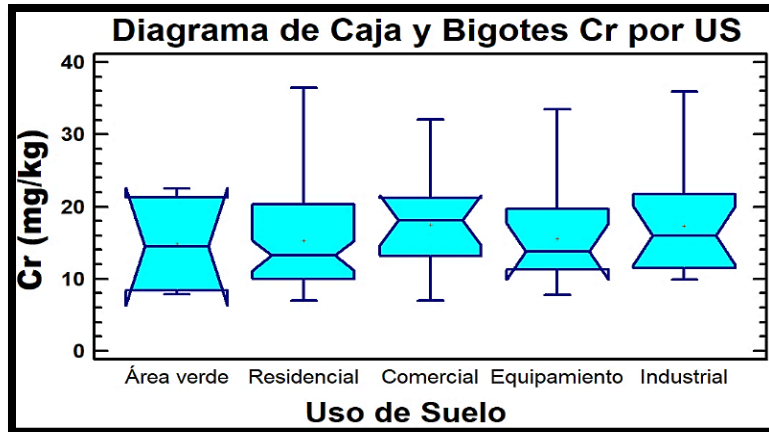


Figura 4.2 Gráfica box-plot de la concentración de Cr en los diferentes usos de suelo de la ZMG.

Los diferentes usos de suelo mostraron concentraciones variables de Cr, el área verde mostró concentraciones de Cr entre 8 mg/kg a 22 mg/kg, con valor de mediana de 14 mg/kg; el de tipo residencial registró concentraciones de 7 mg/kg a 63 mg/kg, con valor de mediana de 59 mg/kg; el de tipo comercial reportó valores de 7 mg/kg a 32 mg/kg, con valor de mediana de 13 mg/kg; el de tipo equipamiento, reportó valores entre 8 mg/kg a 55 mg/kg, con valor de mediana de 14 mg/kg y el uso de suelo industrial mostró concentraciones entre 10 mg/kg a 41 mg/kg, con valor de mediana de 16 mg/kg (Cuadro 4.2).

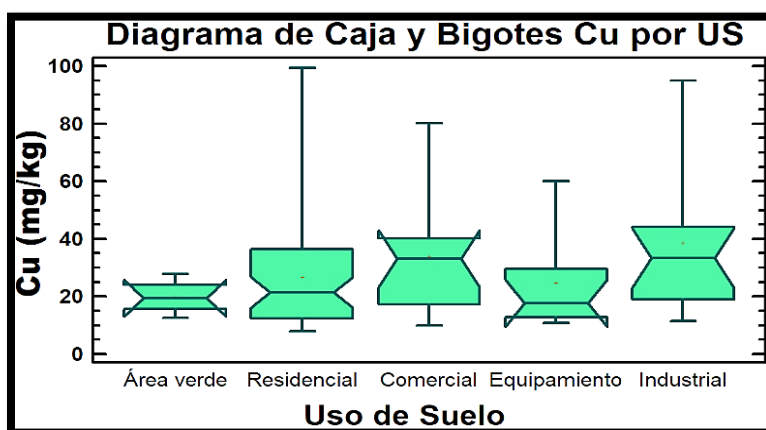
**Cuadro 4.2** Resumen estadístico de la concentración elemental de Cr por los distintos usos de suelo de la ZMG.

Var.	Suelo	n	Med.	Min.	Max.
					mg/kg
Cr	Área verde	6	14	8	22
	Residencial	59	13	7	63
	Comercial	13	18	7	32
	Equipamiento	12	14	8	55
	Industrial	16	16	10	41

Var: variable; n: número de muestras; Med: mediana; Min: Mínimo; Max: Máximo; Cr en mg/kg.

## Cobre

El valor de concentración de fondo ( $V_{fon}$ ) para Cu se propone de 19 mg/kg, valor que proviene del uso de suelo del tipo áreas verdes (Figura 4.3).



**Figura 4.3** Gráfica box-plot de la concentración de Cu en los diferentes usos de suelo de la ZMG.

Los diferentes usos de suelo mostraron concentraciones variables de Cu, el área verdes mostró concentraciones de Cu entre 7 mg/kg a 28 mg/kg, con una mediana de 19 mg/kg; el de tipo residencial registró concentraciones de 7 mg/kg a 159 mg/kg, con una mediana de 59 mg/kg; el de tipo comercial reportó valores de 7 mg/kg a 80 mg/kg, con

una mediana de 27 mg/kg; el de tipo equipamiento, reportó valores entre 7 mg/kg a 166 mg/kg, con una mediana de 18 mg/kg y el uso de suelo industrial mostró concentraciones entre 11 mg/kg a 682 mg/kg, con una mediana de 44 mg/kg (Cuadro 4.3).

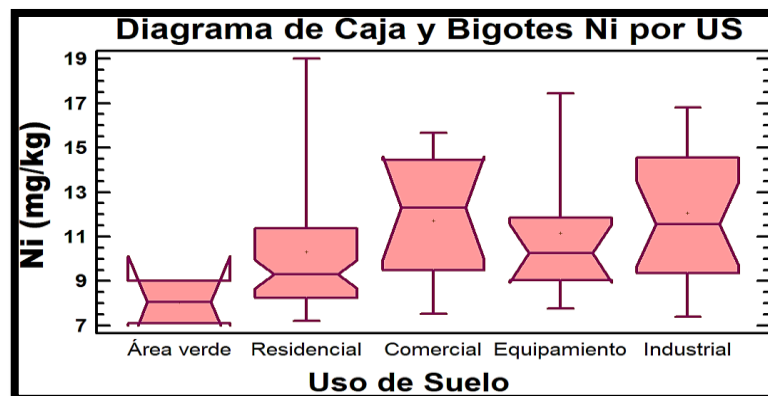
**Cuadro 4.3** Resumen estadístico de la concentración elemental de Cu por los distintos usos de suelo de la ZMG.

Var.	Suelo	n	Med	Min	Max
	Área verde	5	19	7	28
	Residencial	59	19	7	159
Cu	Comercial	14	27	7	80
	Equipamiento	12	18	7	166
	Industrial	20	44	11	682

Var: variable; n: número de muestras; Med: mediana; Min: Mínimo; Max: Máximo; Cu en mg/kg.

## Níquel

Debido a la escasa recopilación de datos en las muestras del área verde (Figura 4.4), se sugiere establecer un valor de concentración de fondo ( $V_{fon}$ ) para el níquel de 9 mg/kg, que es el promedio típico en suelos residenciales.



**Figura 4.4** Gráfica box-plot de la concentración de Ni en los diferentes usos de suelo de la ZMG.

Los diferentes usos de suelo mostraron concentraciones variables de Ni, el área verde mostró concentraciones de Ni entre 7 mg/kg a 9 mg/kg, con una mediana de 8



mg/kg; el de tipo residencial registró concentraciones 7 mg/kg a 22 mg/kg, con una mediana de 9 mg/kg; el de tipo comercial reportó valores de entre 8 a 16 mg/kg, con una mediana de 12 mg/kg; el de tipo equipamiento, reportó valores entre 8 mg/kg a 46 mg/kg, con una mediana de 10 mg/kg y el uso de suelo industrial mostró concentraciones entre 7 mg/kg a 20 mg/kg, con una mediana de 12 mg/kg. (Cuadro 4.4).

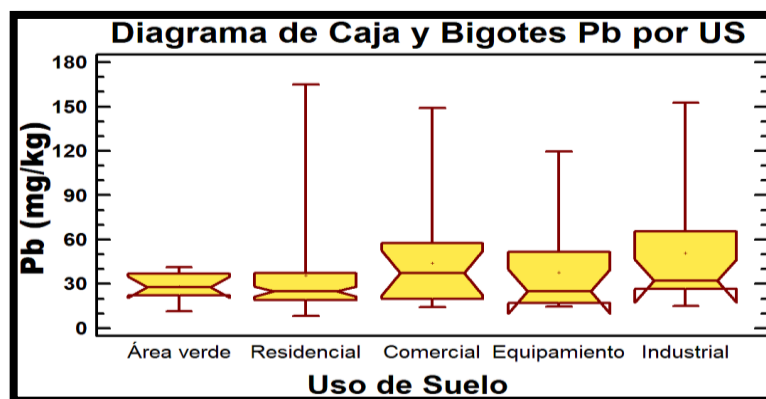
**Cuadro 4.4** Resumen estadístico de la concentración elemental de Ni por los distintos usos de suelo de la ZMG.

Var. mg/kg	Suelo	n	Med	Min	Max
Ni	Área verde	2	8	7	9
	Residencial	59	9	7	22
	Comercial	11	12	8	16
	Equipamiento	12	10	8	46
	Industrial	19	12	7	20

Var: variable; n: número de muestras; Med: mediana; Min: Mínimo; Max: Máximo; Ni en mg/kg.

### Plomo

El valor de concentración de fondo ( $V_{fon}$ ) para Pb, se propone de 28 mg/kg, valor de la media de uso de suelo de las áreas verdes (Figura 4.5).



**Figura 4.5.** Gráfica box-plot de la concentración de Pb en los diferentes usos de suelo de la ZMG.

Los diferentes usos de suelo mostraron concentraciones variables de Pb, el áreas verdes mostró concentraciones de Pb entre 11 mg/kg a 41 mg/kg, con una mediana de

28 mg/kg; el de tipo residencial registró concentraciones 8 mg/kg a 305 mg/kg, con una mediana de 26 mg/kg; el de tipo comercial reportó valores de 14 mg/kg a 149 mg/kg, con una mediana de 37 mg/kg; el de tipo equipamiento, reportó valores entre 14 mg/kg a 330 mg/kg, con una mediana de 28 mg/kg y el uso de suelo industrial mostró concentraciones entre 15 mg/kg a 531 mg/kg, con una mediana de 46 mg/kg. (Cuadro 4.5).

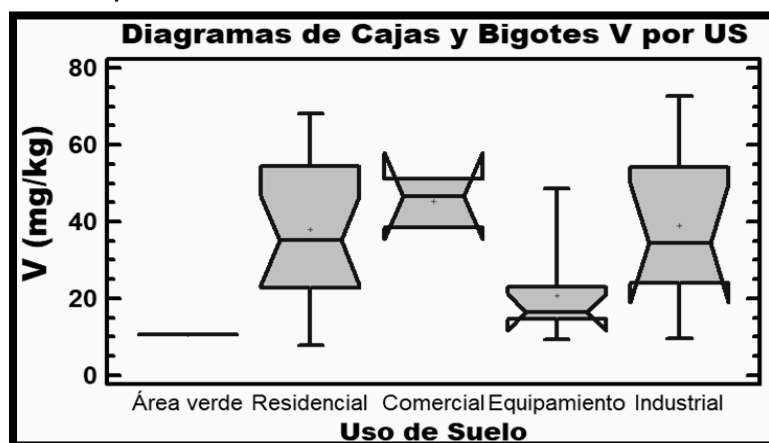
**Cuadro 4.5** Resumen estadístico de la concentración elemental de Pb por los distintos usos de suelo de la ZMG.

Var. mg/kg	Suelo	n	Med	Min	Max
Pb	Área verde	10	28	11	41
	Residencial	77	26	8	305
	Comercial	15	37	14	149
	Equipamiento	16	28	14	330
	Industrial	20	46	15	531

Var: variable; n: número de muestras; Med: mediana; Min: Mínimo; Max: Máximo; Pb en mg/kg.

## Vanadio

Debido a la limitada información recopilada en el área verde (Figura 4.6), se establece un valor de concentración de fondo ( $V_{fon}$ ) para el elemento V de 38 mg/kg, que corresponde al promedio típico en suelos residenciales.



**Figura 4.6.** Gráfica box-plot de la concentración de V en los diferentes usos de suelo de la ZMG.

Las concentraciones de V varían según los diferentes tipos de uso del suelo. En las áreas verdes, se registró una concentración de 11 mg/kg. En áreas residenciales, las concentraciones oscilaron entre 8 mg/kg y 123 mg/kg, con una mediana de 38 mg/kg. En áreas comerciales, los valores se encontraron en el rango de 38 mg/kg a 51 mg/kg, con una mediana de 47 mg/kg. Para áreas de equipamiento, se reportaron valores que variaban entre 9 mg/kg y 49 mg/kg, con una mediana de 16 mg/kg. Finalmente, en zonas industriales, las concentraciones se situaron entre 10 mg/kg y 86 mg/kg, con una mediana de 48 mg/kg (Cuadro 4.6).

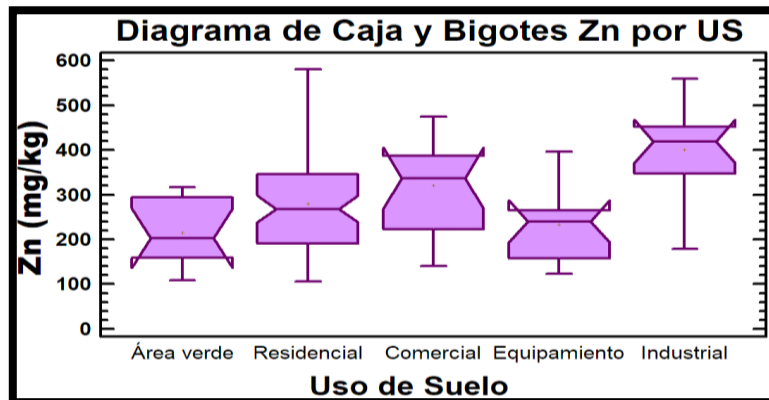
**Cuadro 4.6** Resumen estadístico de la concentración elemental de V por los distintos usos de suelo de la ZMG

Var.	Suelo	n	Med	Min	Max
	Áreas verdes	1	11	11	11
	Residencial	20	38	8	123
V	Comercial	3	47	38	51
	Equipamiento	7	16	9	49
	Industrial	11	48	10	86

Var: variable; n: número de muestras; Med: mediana; Min: Mínimo; Max: Máximo; V en mg/kg.

## Zinc

El valor de concentración de fondo ( $V_{fon}$ ) para Zn se propone de 203 mg/kg, valor de la mediana de uso de suelo áreas verdes (Figura 4.7).



**Figura 4.7.** Gráfica box-plot de la concentración de Zn en los diferentes usos de suelo de la ZMG.

Los usos de suelo mostraron concentraciones variables de Zn, la clase áreas verdes se registró una concentración entre 109 mg/kg a 316 mg/kg, con valor de mediana de 203 mg/kg; residencial con valores entre 79 mg/kg a 1215 mg/kg, con una mediana de 270 mg/kg; comercial con valores de 140 mg/kg a 716 mg/kg, con una mediana de 368 mg/kg; el de tipo equipamiento, reportó valores entre 123 mg/kg a 1348 mg/kg, con una mediana de 244 mg/kg y el uso de suelo industrial mostró concentraciones entre 178 mg/kg a 1768 mg/kg, con una mediana de 556 mg/kg. (Cuadro 4.7).

**Cuadro 4.7** Resumen estadístico de la concentración elemental de Zn por los distintos usos de suelo de la ZMG.

Var. mg/kg	SUELO	n	Med	Min	Max
Zn	Área verde	10	203	109	316
	Residencial	79	270	79	1215
	Comercial	15	368	140	716
	Equipamiento	16	244	123	1348
	Industrial	20	556	178	1768

Var: variable; n: número de muestras; Med: mediana; Min: Mínimo; Max: Máximo; Zn en mg/kg.

### 4.3 Análisis exploratorio de datos

Para obtener los valores que permitan hacer modelos de estimación de la concentración de los EPTs, se hizo un análisis exploratorio de datos a 140 muestras. La estadística descriptiva de los datos normalizados se presenta en el cuadro 4.8.

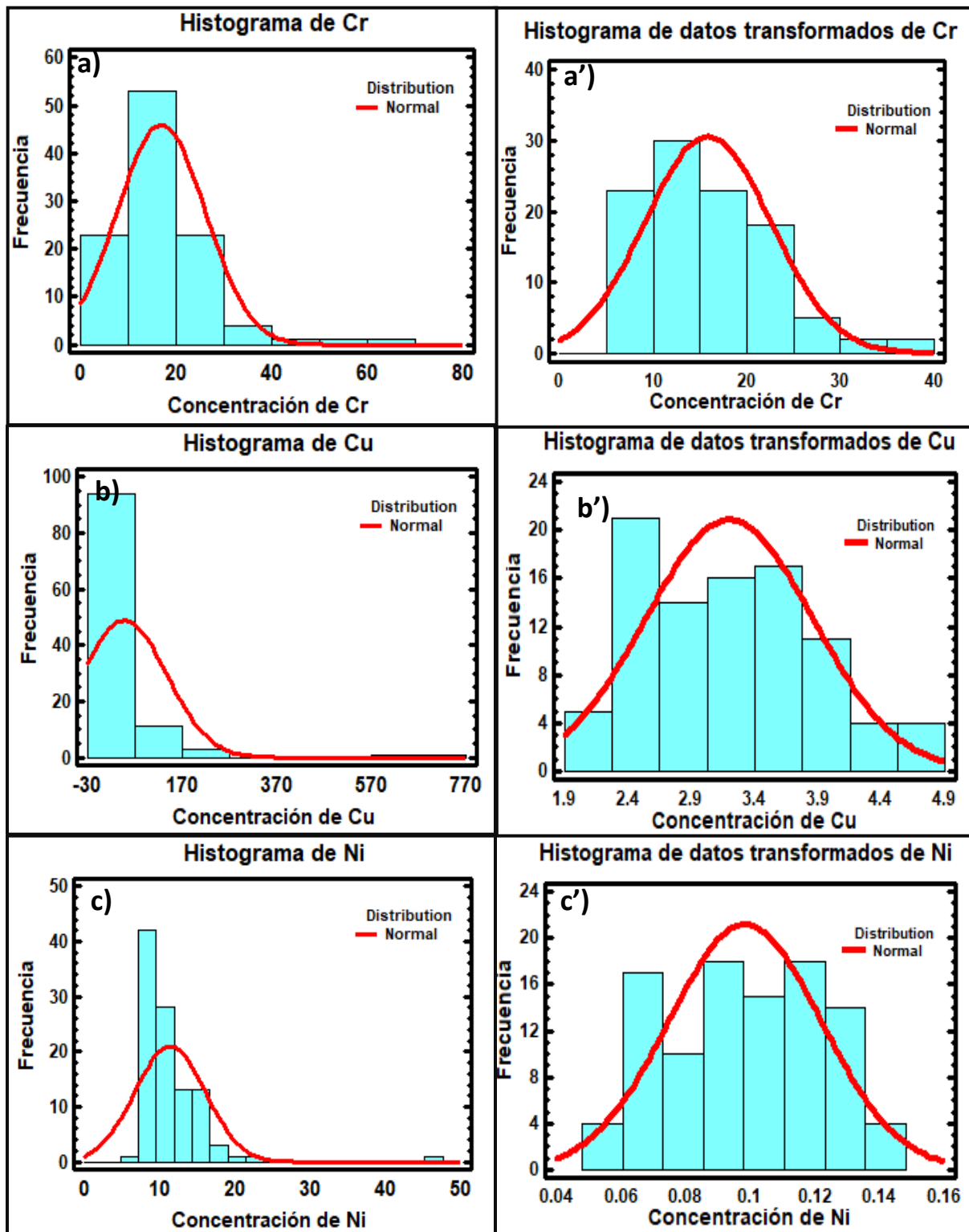
**Cuadro 4.8** Análisis exploratorio de datos con distribución normal de los EPTs en muestras de suelo de la ZMG.

Var mg/kg	Cr	Cu	Ni	Pb	V	Zn	PLI
n	103	92	100	128	38	123	132
Prom	2.7	3.2	9.8E <sup>-02</sup>	3.4	35.0	5.6	0.8
Med	2.7	3.1	9.8E <sup>-02</sup>	3.3	33.0	5.6	0.8
Min	1.9	2.0	0.05	2.1	7.9	4.6	0.3
Max	3.6	4.7	0.14	5.1	72.7	6.5	1.7
Dsvt	0.4	0.7	2.4 E <sup>-02</sup>	0.6	19.6	0.5	0.3
Cv (%)	15.4	20.7	24.0	19.2	56.1	8.2	37.2
V <sub>fon</sub>	14	19	9	28	38	203	N/A
Kurtosis	-0.75	-0.69	-1.03	0.15	0.70	0.22	-0.38
Asimetría	0.11	0.36	-0.08	0.67	0.92	0.85	0.41

Var: variable; n: número de muestras Prom: promedio; Med: mediana; Dsvt: Desviación estándar; CV: Coeficiente de variación; N/A: No aplica; Min: Mínimo; Max: Máximo y Cr, Cu, Ni, Pb, V y Zn en mg/kg.

#### 4.4 Análisis estructural

Para obtener un modelo de distribución normal fue necesario aplicar una transformación logarítmica a los datos del Cr, Cu, Pb, Zn y PLI, mientras que, para el mismo fin, se aplicó una transformación inversa a los datos del Ni (Figura 4.8).



**Figura 4.8** Histograma y curva de distribución normal de datos no transformados (izquierda), histograma y curvas de distribución normal de datos transformados para Cr, Cu (transformación logarítmica) y Ni (transformación inversa).

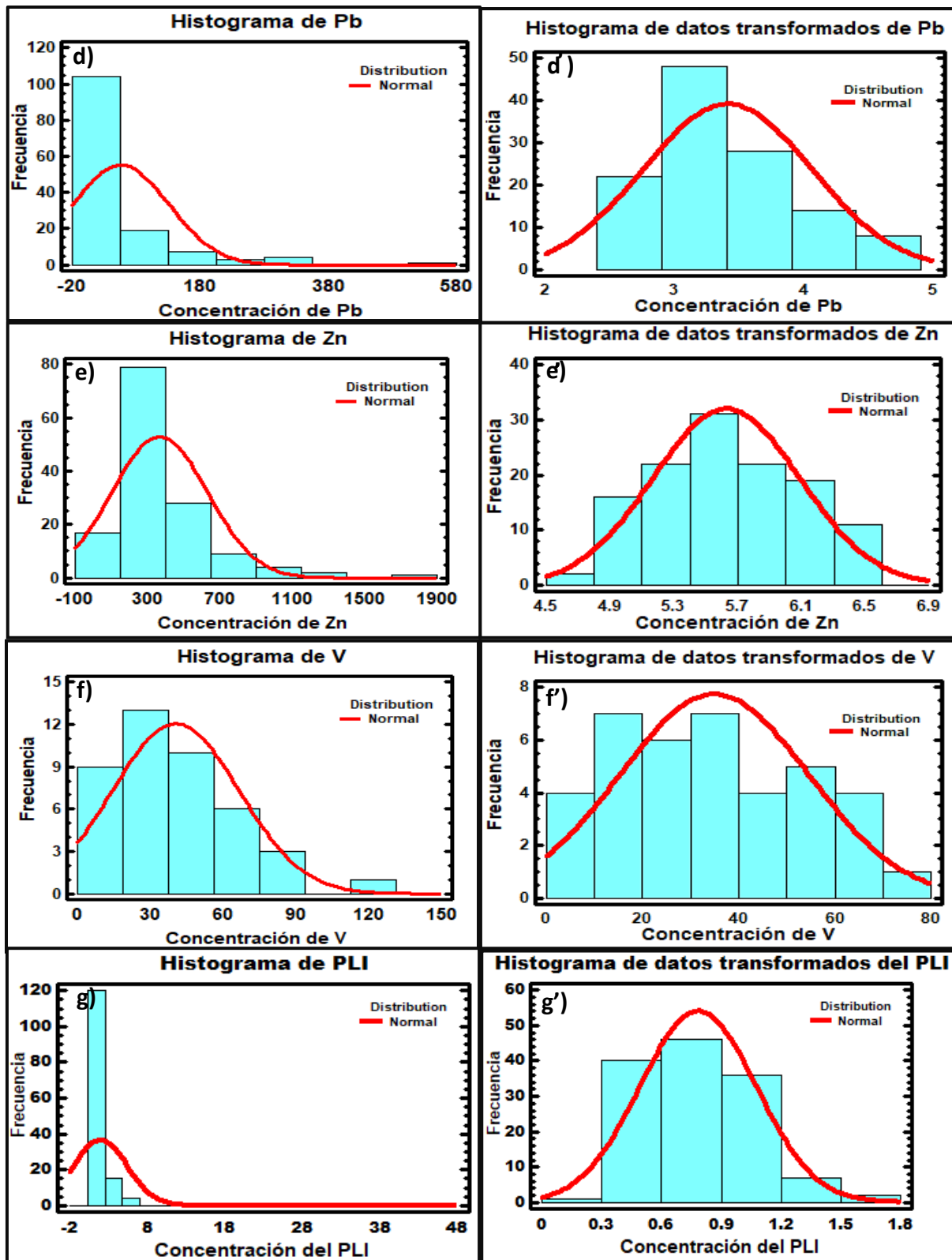
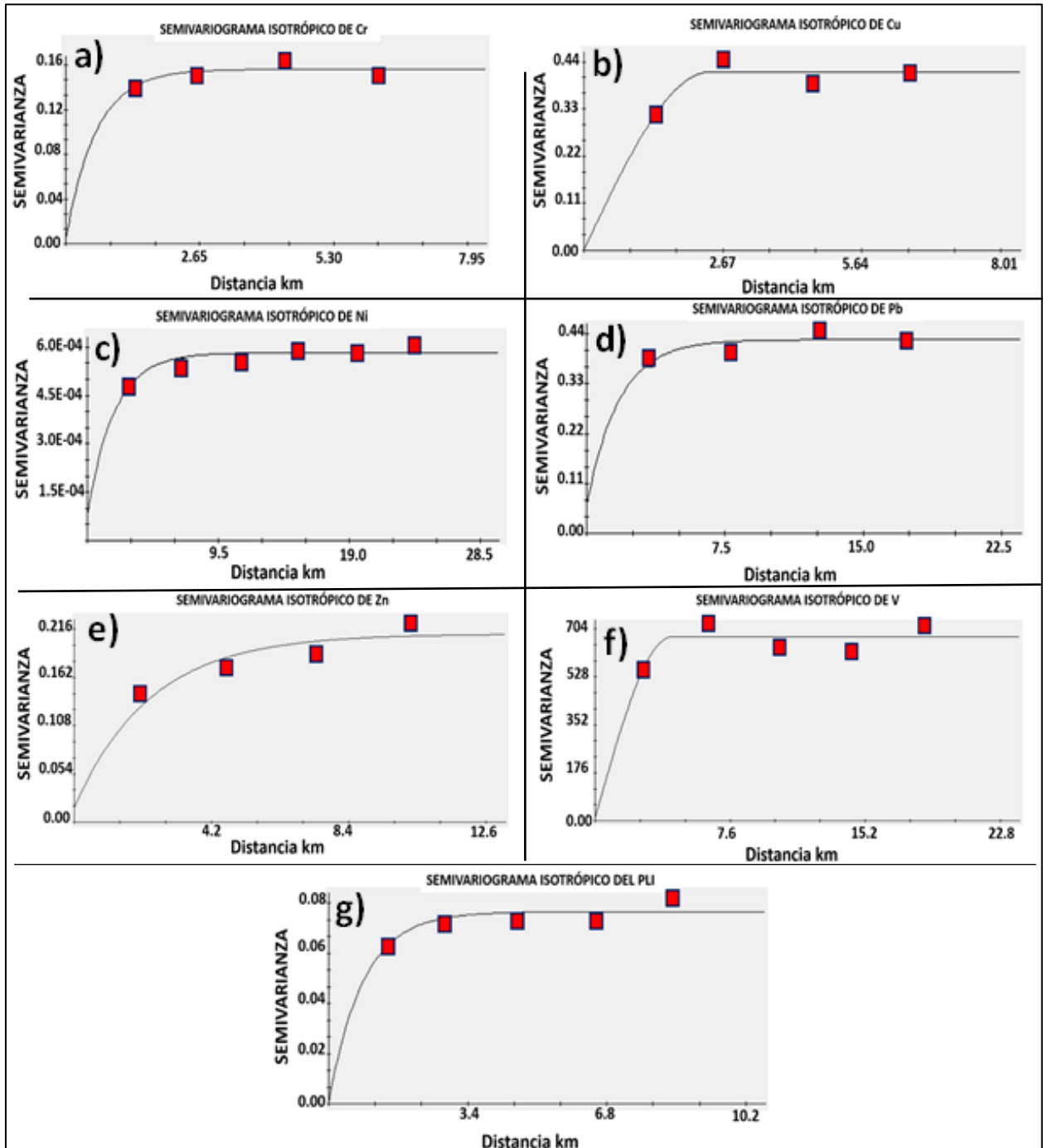


Figura 4.9 Histograma y curva de distribución normal de datos no transformados (izquierda), histograma y curvas de distribución normal de datos transformados para Pb, Zn, V y PLI (transformación logarítmica).

## 4.5 Relación espacial

Semivariogramas, (Figura 4.9) generados a partir de los datos de concentración de EPTs en 140 muestras de SU de la ZMG obtenidos con FRX.



**Figura 4.10** Variogramas obtenidos para la concentración de Cr, Cu, Ni, Pb, V, Zn y PLI de muestras de suelo de la ZMG.



Los resultados de los semivariogramas teóricos para la concentración de EPTs y PLI del suelo urbano de la ZMG se presentan en el cuadro 4.9.

**Cuadro 4.9** Estadística de los semivariogramas de concentración de Cr, Cu, Ni, Pb, V, Zn y PLI en 140 muestras de suelo de la ZMG

Var. mg/kg	Mod.	Sill	Cq+C	Nugget Co	Rango m	r <sup>2</sup>	RE
Cr	Exponencial	2.2 X10 <sup>-2</sup>		1.0 X10 <sup>-4</sup>	1,860	0.85	8.42 X10 <sup>-7</sup>
Cu	Esférico	0.46		1.0 X10 <sup>-3</sup>	2,410	0.88	1.02 X10 <sup>-3</sup>
Ni	Exponencial	5.9 X10 <sup>-4</sup>		8.0 X10 <sup>-5</sup>	5,850	0.91	7.76 X10 <sup>-10</sup>
Pb	Exponencial	4.5 X10 <sup>-2</sup>		6.6 X10 <sup>-2</sup>	5,280	0.83	4.09 X10 <sup>-4</sup>
V	Esférico	678.2		10.0	4,290	0.81	2815
Zn	Exponencial	21.2X10 <sup>-2</sup>		1.6 X10 <sup>-2</sup>	7,020	0.95	1.92 X10 <sup>-4</sup>
PLI	Exponencial	7.7 X10 <sup>-2</sup>		4.0 X10 <sup>-4</sup>	2,520	0.88	1.82 X10 <sup>-5</sup>

Var: variable Mod: Modelación Cq+C: Sill Co: Nugget, rango, r: Correlación lineal, RE: Error residual y Cr, Cu, Ni, Pb, V y Zn en mg/kg.

Los semivariogramas teóricos fueron: para Cr fue de tipo exponencial, con Sill de 2.2 X10<sup>-2</sup>, nugget: 1.0 X10<sup>-4</sup>, Rango: 1,860 m, r de 0.85 y RE: 8.42 X10<sup>-7</sup>; para Cu de tipo esférico, con un Sill de 0.46, nugget: 1.0 X10<sup>-3</sup>, rango: 2,410 m, r de 0.88 y RE: 1.02 X10<sup>-3</sup> para Ni de tipo exponencial, con un Sill de 5.9 X10<sup>-4</sup>, nugget: 8.0 X10<sup>-5</sup>, rango: 5,850 m, r de 0.91 y RE: 7.76 X10<sup>-10</sup>; para Pb fue de tipo exponencial, con un Sill: 4.5 X10<sup>-2</sup>, nugget: 6.6 X10<sup>-2</sup>, rango: 5,280 m, r de 0.83 y RE: 4.09 X10<sup>-4</sup>; para Zn fue de tipo exponencial, con un Sill de 21.2X10<sup>-2</sup>, nugget: 1.6 X10<sup>-2</sup>, rango: 7,020 m, r de 0.95 y RE: 1.92X10<sup>-4</sup>; para PLI de tipo exponencial, con un Sill: 7.7X10<sup>-2</sup>, nugget: 4.0 X10<sup>-4</sup>, rango: 2,520 m, r de 0.88 y RE: 1.82X10<sup>-5</sup>.

Para V, su modelo teórico fue de tipo esférico, con un Sill de 678.2, nugget: 10, rango: 4,290 m, r de 0.81 y RE: 2815, dado el valor alto que exhibió el error residual, no fue recomendado hacer una representación espacial para este elemento.

## 4.6 Validación cruzada

Para evaluar los modelos de interpolación espacial se hizo una validación cruzada, los resultados se presentan en el cuadro 4.10.

**Cuadro 4.10** Estadística de validación cruzada de modelo de interpolación

Var	$r^2$	ME	RMSE	NRMSE
Cr	$5.0 \times 10^{-03}$	$8.7 \times 10^{-02}$	$95.0 \times 10^{-03}$	$5.8 \times 10^{-02}$
Cu	$1.4 \times 10^{-02}$	$5.0 \times 10^{-03}$	$24.0 \times 10^{-02}$	$9.1 \times 10^{-02}$
Ni	$-1.4 \times 10^{-19}$	$2.4 \times 10^{-03}$	$36.2 \times 10^{-03}$	$3.7 \times 10^{-02}$
Pb	$1.0 \times 10^{-02}$	$1.8 \times 10^{-03}$	$24.7 \times 10^{-02}$	$8.2 \times 10^{-02}$
Zn	$6.3 \times 10^{-02}$	$1.3 \times 10^{-03}$	$11.3 \times 10^{-02}$	$6.1 \times 10^{-02}$
PLI	$7.4 \times 10^{-03}$	$-2.7 \times 10^{-03}$	$41.3 \times 10^{-03}$	$3.0 \times 10^{-02}$

Var: variable  $r^2$ : coeficiente de correlación de Pearson de la regresión entre valor medido y el valor estimado, ME: El error promedio, RMSE: La raíz cuadrada del error medio, NRMSE: Normalización de la raíz cuadrada del error medio.

Para Cr se reportó un valor de  $r^2$  de  $5.0 \times 10^{-3}$  y ME de  $8.7 \times 10^{-2}$ ; para Cu se reportó un valor de  $r^2$  de  $1.4 \times 10^{-2}$  y ME de  $5.0 \times 10^{-3}$ ; para Ni se reportó un valor de  $r^2$  de  $-1.4 \times 10^{-19}$  y ME de  $3.4 \times 10^{-4}$ ; para Pb se reportó un valor de  $r^2$  de  $1.0 \times 10^{-2}$  y ME:  $1.8 \times 10^{-3}$ ; para Zn se reportó un valor de  $r^2$  de  $6.3 \times 10^{-2}$  y ME:  $1.3 \times 10^{-3}$ ; para PLI se reportó un valor de  $r^2$  de  $7.4 \times 10^{-3}$  y ME de  $-2.7 \times 10^{-3}$ .

Los ME mostrados en la validación cruzada fueron cercanos a 0, lo que es un indicador de que los modelos de interpolación tienen un alto grado de exactitud en su estimación.

#### 4.7 Integración espacial de capa de parámetros sociodemográficos (CPS\_1)

Un ejemplo de la integración de la información estadística de las variables de población total, población por sexo, grupos etarios con mayor vulnerabilidad, población sin seguro social, y la planimetría a nivel AGEB's Urbanos de la ZMG, se presenta en la figura 4.10.

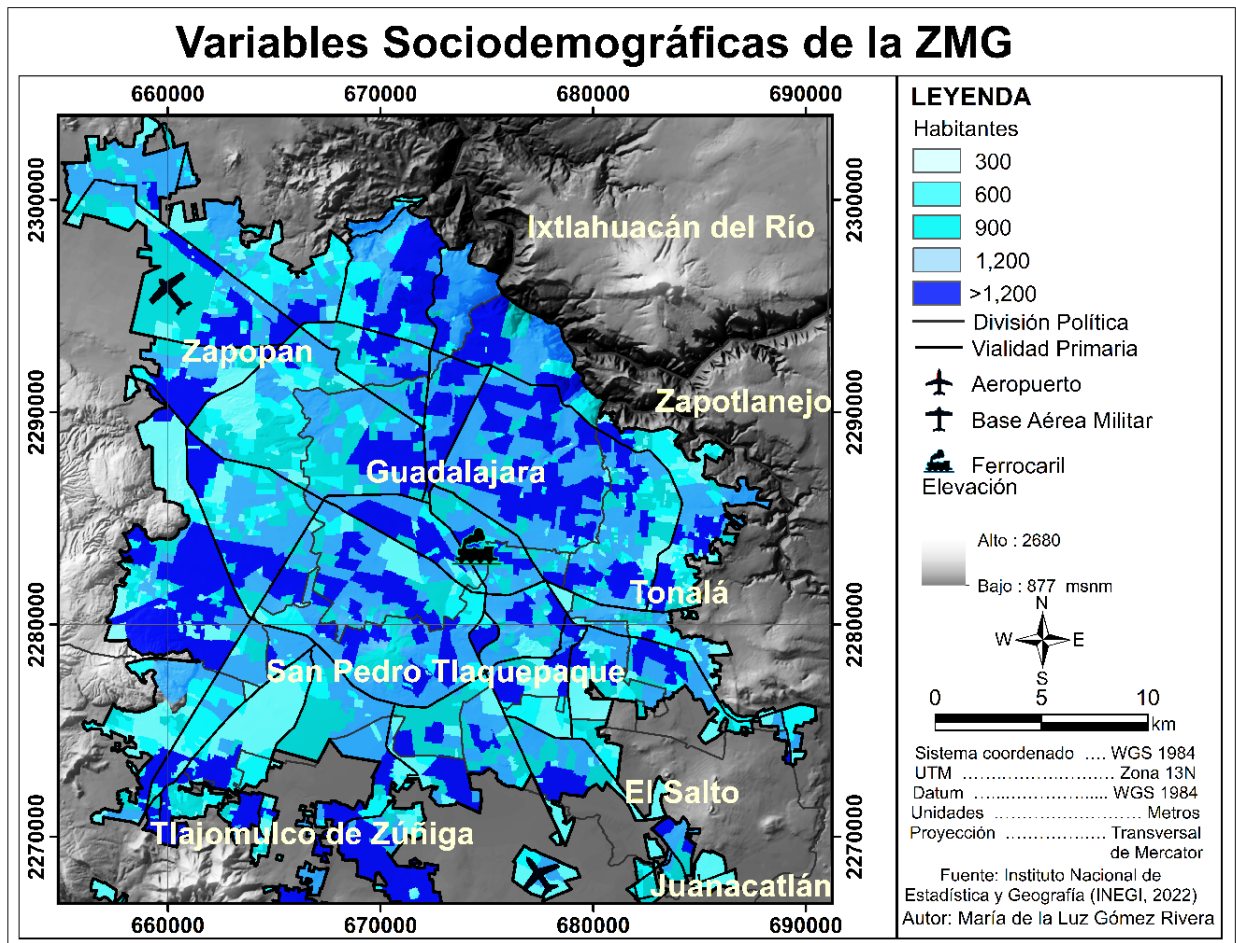


Figura 4.11 Mapa de la distribución poblacional a nivel AGEB's Urbanos de la ZMG.

#### 4.8 Integración espacial de capa del índice de rezago social (CIRS\_2)

La integración del Índice de Rezago Social (IRS) y la planimetría es colocada en un mapa a nivel municipio de la ZMG que se muestra en la figura 4.11. El índice de rezago social es clasificado en tres grupos, alto rezago social, bajo rezago social y muy bajo rezago social (ver figura 4.12).

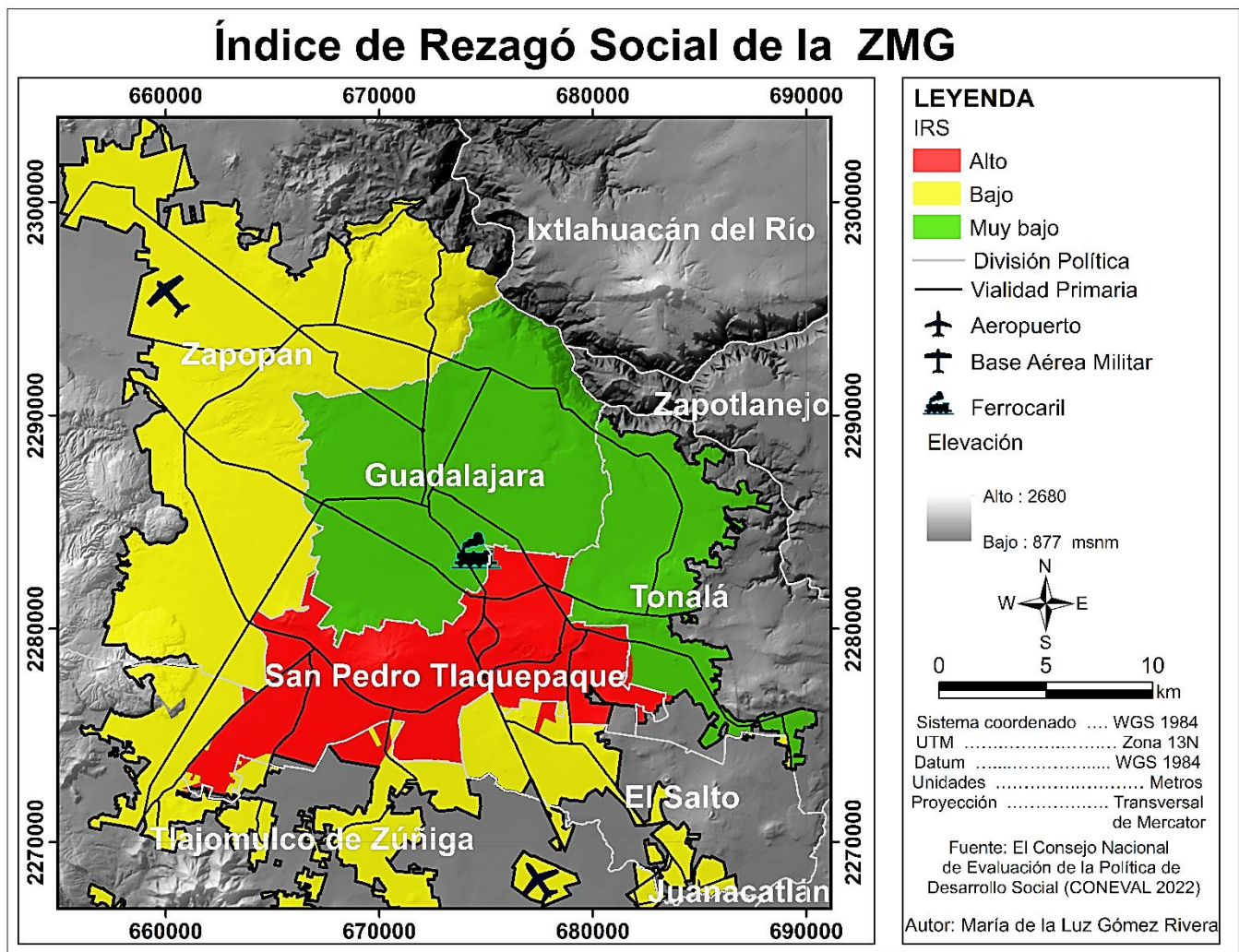


Figura 4.12 Mapa de variables sociodemográficas de la ZMG.

#### 4.9 Población en la ZMG

Los habitantes totales del área de estudio de la ZMG son: 4,672,242 habitantes, de estos el 51% son mujeres y el 49 % son hombres. De acuerdo al Censo de Población y Vivienda del 2020 hay 1,087,164 infantes menores a 14 años y 371,682 adultos mayores a 65 años; este mismo revela que hay 1,392,913 habitantes que no cuentan con ningún tipo de asistencia de salud (sin derechohabiencia) (Ver cuadro 4.11).

**Cuadro 4.11** Estadística de habitantes en el área de estudio de la ZMG

Var	Población Total	Población. Femenina	Población. Masculina	Población 0-14 años	Población $\geq$ 65 años	Población SS	IRS-A	Área km <sup>2</sup>
	4,672,242	2,382,340	2,283,849	1,087,164	371,682	1,392,913	681,676	557

Var: Variable, Pobl: población, SS: sin derechohabiencia y IRS: índice de rezago social, A: Alto.

El único municipio de la ZMG, con un índice de rezago social alto (IRS-A) es San Pedro Tlaquepaque según reporta el CONEVAL en el 2020. En este municipio hay 681,676 habitantes.

#### 4.10 Habitantes en las áreas de acumulación de Cr

Con el fin de facilitar la descripción de los datos, en este trabajo se considera como concentración máxima ( $C_{max}$ ) a los rangos de concentración altas y muy altas. De forma análoga, los rangos de concentración medias y bajas se le considera como concentración mínima ( $C_{min}$ ).

En el caso específico del Cr el área asociada a  $C_{max}$  es de 196 km<sup>2</sup> donde viven 1,714,135 habitantes, de estos, 259,320 habitantes tienen un índice de rezago social alto. También, 521,469 habitantes no cuentan con ningún tipo de asistencia de salud (sin derechohabiencia). Además, 387,731 habitantes son infantes menores a 14 años, así como 148,522 son adultos mayores a 65 años.

En el cuadro 4.12 se presenta un resumen estadístico de habitantes por áreas de acumulación de Cr.

**Cuadro 4.12** Estadística de habitantes por áreas de acumulación de Cr en suelo de la ZMG.

Elem.	R de con.	Pobl.	Pobl. Femenina	Pobl. Masculina	Pobl. 0-14 años	Pobl. 65 y Más años	Pobl SS	IRS-A	Área km <sup>2</sup>	
Cr	C <sub>max</sub>	Muy Alto	545,586	276,552	268,304	117,966	50,086	168,657	90,947	61
		Alto	1,168,549	597,584	569,301	269,765	98,436	352,812	168,373	135
		<b>Total</b>	<b>1,714,135</b>	<b>874,136</b>	<b>837,605</b>	<b>387,731</b>	<b>148,522</b>	<b>521,469</b>	<b>259,320</b>	<b>196</b>
Cr	C <sub>min</sub>	Medio	1,658,206	845,598	810,487	394,118	131,748	498,489	299,978	188
		Bajo	1,299,902	662,605	635,757	305,315	91,412	372,955	122,378	174
		<b>Total</b>	<b>2,958,108</b>	<b>1,508,203</b>	<b>1,446,244</b>	<b>699,433</b>	<b>223,160</b>	<b>871,444</b>	<b>244,756</b>	<b>362</b>

Var: Variable; R: Rango de concentración elemental; Pobl: población, SS: sin derechohabencia; IRS-A: índice de rezago social Alto, C<sub>max</sub>: Concentración máxima, C<sub>min</sub>: Concentración mínima y Cr: Cromo.

#### 4.11 Habitantes en las áreas de acumulación de Cu

Las áreas con acumulación de Cu en suelo asociados a C<sub>max</sub> es de 195 km<sup>2</sup>. En ellas habitan alrededor de 1,834,466 habitantes, de estos, 265,803 habitantes tienen un índice de rezago social alto y 547,740 habitantes no cuentan con ningún tipo de asistencia de salud (sin derechohabencia). Además 402,427 habitantes son infantes menores a 14 años y 173,725 habitantes son adultos mayores a 65 años. En el cuadro 4.13 se presenta un resumen estadístico de habitantes por áreas de acumulación de Cu.

**Cuadro 4.13** Estadística de habitantes por áreas de acumulación de Cu en suelo de la ZMG.

Elem.	Var.	R de con.	Pobl.	Pobl. Femenina	Pobl. Masculina	Pobl. 0-14 años	Pobl. 65 y Más años	Pobl SS	IRS-A	Área km <sup>2</sup>
Cu	C <sub>max</sub>	Muy Alto	663,920	338,346	324,791	138,036	68,275	200,853	94,199	65
		Alto	1,170,546	598,870	570,268	264,390	105,450	346,887	171,604	130
		<b>Total</b>	<b>1,834,466</b>	<b>937,216</b>	<b>895,059</b>	<b>402,427</b>	<b>173,725</b>	<b>547,740</b>	<b>265,803</b>	<b>195</b>
Cu	C <sub>min</sub>	Medio	1,436,303	733,051	701,364	335,940	110,119	423,464	94,199	177
		Bajo	1,401,473	712,072	687,426	348,797	87,838	421,710	171,604	185
		<b>Total</b>	<b>2,837,776</b>	<b>1,445,124</b>	<b>1388,790</b>	<b>684,737</b>	<b>197,957</b>	<b>845,173</b>	<b>265,803</b>	<b>362</b>

Var: Variable, R: Rango de concentración elemental; Pobl: población, SS: sin derechohabencia; IRS-A: índice de rezago social Alto, C<sub>max</sub>: Concentración máxima, C<sub>min</sub>: Concentración mínima y Cu: Cobre.

#### 4.12 Habitantes en las áreas de acumulación de Ni

El área con  $C_{max}$  de Ni fue de 178 km<sup>2</sup>, en donde viven 1,419,553 habitantes. De estos, 353,372 habitantes están en zonas con un índice de rezago social alto y 411,988 habitantes no cuentan con ningún tipo de asistencia de salud (sin derechohabiencia). La población vulnerable en esta área es de 402,427 habitantes con edades menores o iguales a 14 años y 173,725 habitantes tienen 65 años o más (Cuadro 4.14).

**Cuadro 4.14** Estadística de habitantes por áreas de acumulación de Ni en suelo de la ZMG.

Elem.	Var.	R de con.	Pobl.	Pobl. Femenina	Pobl. Masculina	Pobl. 0-14 años	Pobl. 65 y Más años	Pobl SS	IRS-A	Área Km <sup>2</sup>
Ni	$C_{max}$	Muy Alto	352,281	176,286	175,610	84,842	26,366	102,490	126,091	52
		Alto	1,067,272	547,211	518,932	239,491	97,234	309,499	227,281	126
		<b>Total</b>	<b>1,419,553</b>	<b>723,497</b>	<b>694,542</b>	<b>324,333</b>	<b>123,600</b>	<b>411,988</b>	<b>353,372</b>	<b>178</b>
	$C_{min}$	Medio	1,673,147	855,532	815,409	380,117	143,275	512,474	169,957	189
		Bajo	1,579,542	803,310	773,898	382,714	104,807	468,450	158,348	190
		<b>Total</b>	<b>3,252,689</b>	<b>1,658,843</b>	<b>1,589,307</b>	<b>762,831</b>	<b>248,082</b>	<b>980,925</b>	<b>328,304</b>	<b>379</b>

Var: Variable, R de con: Rango de Concentración elemental; Pobl: población, SS: sin derechohabiencia; IRS-A: índice de rezago social Alto,  $C_{max}$ : Concentración máxima,  $C_{min}$ : Concentración mínima y Ni: Níquel.

#### 4.13 Habitantes en las áreas de acumulación Pb

El área con  $C_{max}$  de Pb fue de 179 km<sup>2</sup>, en donde viven 1,686,467 habitantes. De estos, 108,759 habitantes están en zonas con un índice de rezago social alto y 487,082 habitantes, no cuentan con ningún tipo de asistencia de salud (sin derechohabiencia). La población vulnerable en esta área es de 351,913 habitantes con edades menores o iguales a 14 años y 173,915 habitantes tienen 65 años o más (Cuadro 4.15).



**Cuadro 4.15** Estadística de habitantes por áreas de acumulación de Pb en suelo de la ZMG.

Elem.	Var.	R de con.	Pobl.	Pobl. Femenina	Pobl. Masculina	Pobl. 0-14 años	Pobl. 65 y Más años	Pobl SS	IRS-A	Área Km <sup>2</sup>
Pb	C <sub>max</sub>	Muy Alto	541,387	279,664	261,072	110,554	58,147	156,514	20,592	59
		Alto	1,145,080	589,575	554,056	241,359	115,768	330,568	88,167	120
		<b>Total</b>	<b>1,686,467</b>	<b>869,239</b>	<b>815,128</b>	<b>351,913</b>	<b>173,915</b>	<b>487,082</b>	<b>108,759</b>	<b>179</b>
Pb	C <sub>min</sub>	Medio	1,449,386	739,619	707,983	338,046	112,734	422,431	170,931	176
		Bajo	1,536,390	773,482	760,738	397,205	85,033	483,400	401,986	202
		<b>Total</b>	<b>2,985,775</b>	<b>1,513,101</b>	<b>1,468,721</b>	<b>735,251</b>	<b>197,767</b>	<b>905,831</b>	<b>572,917</b>	<b>378</b>

Var: Variable, R de con: Rango de Concentración elemental; Pobl: población, SS: sin derechohabiencia; IRS-A: índice de rezago social Alto, C<sub>max</sub>: Concentración máxima, C<sub>min</sub>: Concentración mínima y Pb: Plomo.

#### 4.14 Habitantes en las áreas de acumulación de Zn

El área con C<sub>max</sub> de Zn fue de 221 km<sup>2</sup>, en donde viven 2,335,277 habitantes. De estos, 326,138 habitantes están en zonas con un índice de rezago social alto y 680,559 habitantes, no cuentan con ningún tipo de asistencia de salud (sin derechohabiencia). La población vulnerable en esta área es de 496,885 habitantes con edades menores o iguales a 14 años y 234,389 habitantes tienen 65 años o más (Cuadro 4.16).

**Cuadro 4.16** Estadística de habitantes por áreas de acumulación de Zn en suelo de la ZMG.

Elem.	Var.	R de con.	Pobl.	Pobl. Femenina	Pobl. Masculina	Pobl. 0-14 años	Pobl. 65 y Más años	Pobl SS	IRS-A	Área Km <sup>2</sup>
Zn	C <sub>max</sub>	Muy Alto	595,925	307,795	287,358	124,465	66,030	172,476	108,035	57
		Alto	1,739,352	891,160	846,239	372,421	168,359	508,083	218,103	164
		<b>Total</b>	<b>2,335,277</b>	<b>1,198,954</b>	<b>1,133,598</b>	<b>496,885</b>	<b>234,389</b>	<b>680,559</b>	<b>326,138</b>	<b>221</b>
Zn	C <sub>min</sub>	Medio	1,614,168	818,229	793,884	393,746	104,114	484,485	233,187	220
		Bajo	722,796	365,157	356,367	196,532	33,179	227,869	122,351	116
		<b>Total</b>	<b>2,336,965</b>	<b>1,183,386</b>	<b>1,150,251</b>	<b>590,279</b>	<b>137,293</b>	<b>712,354</b>	<b>355,538</b>	<b>336</b>

Var: Variable, R de con: Rango de Concentración elemental; Pobl: población, SS: sin derechohabiencia; IRS-A: índice de rezago social Alto, C<sub>max</sub>: Concentración máxima, C<sub>min</sub>: Concentración mínima y Zn: Zinc.



#### 4.15 Habitantes en las áreas contaminadas evaluados con el índice de carga contaminante

El área con  $C_{max}$  para PLI con valores  $>2$  fue de 142 km<sup>2</sup>, en donde viven 1,322,211 habitantes. De estos, 247,546 habitantes están en zonas con un índice de rezago social alto y 385,939 habitantes, no cuentan con ningún tipo de asistencia de salud (sin derechohabiencia). La población vulnerable en esta área de 288,096 habitantes con edades menores o iguales a 14 años y 131,225 habitantes tienen 65 años o más (Cuadro 4.17).

**Cuadro 4.17** Estadística de habitantes por áreas de acumulación de PLI en suelo de la ZMG.

Elem.	Var.	N de CC.	Pobl.	Pobl. Femenina	Pobl. Masculina	Pobl. 0-14 años	Pobl. 65 y Más años	Pobl SS	IRS-A	Área Km <sup>2</sup>
	$C_{max}$	Muy Alto	189,277	97,283	91,759	40,276	20,422	53,667	55,836	25
		Alto	1,132,934	582,401	549,099	247,820	110,803	332,272	191,710	117
		<b>Total</b>	<b>1,322,211</b>	<b>679,684</b>	<b>640,858</b>	<b>288,096</b>	<b>131,225</b>	<b>385,939</b>	<b>247,546</b>	<b>142</b>
PLI	$C_{min}$	Medio	1,825,153	929,616	893,187	413,736	152,392	541,452	201,658	208
		Bajo	1,524,878	773,040	749,804	385,332	88,065	465,522	232,472	207
		<b>Total</b>	<b>3,350,031</b>	<b>1,702,656</b>	<b>1,642,991</b>	<b>799,068</b>	<b>240,457</b>	<b>1,006,974</b>	<b>434,130</b>	<b>415</b>

Var: Variable, N de con: nivel de Carga de Contaminación; Pobl: población, SS: sin derechohabiencia; IRS-A: índice de rezago social Alto,  $C_{max}$ : Concentración máxima,  $C_{min}$ : Concentración mínima y PLI: índice de carga de contaminación.

## Capítulo V Discusión

Los valores de fondo propuestos son comparables con otras concentraciones reportadas en suelos urbanos alrededor del mundo y rocas (Goldschmidt 1954; Fassbender 1987; Kabata y Pendias, 1992; Sierra M, 2005).

Los valores de fondo propuestos para Cr, Cu, Ni y Pb en SU de Guadalajara, son más bajos en comparación con lo reportado en otros suelos del mundo. Por otra parte, el valor de Zn fue superior a lo reportado en otras partes del mundo (Cuadro 5.1).

**Cuadro 5.1** Concentraciones de elementos potencialmente tóxicos en suelos urbanos (mg/kg) y rocas ácidas.

Elemento mg/kg	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	
<b>V(fon)</b>	<b>14</b>	<b>19</b>	<b>9</b>	<b>28</b>	<b>203</b>	<b>Este estudio</b>
Beijing	36	24	28	29	66	Zheng et al., 2008
Guangzhou	-	63	26	109	169	Lu et al., 2007
Shanghai	108	59	31	71	301	Shi et al., 2008
Changsha	121	51	-	89	276	Xi et al., 2008
Hong Kong	23	23	12	95	125	Li et al., 2004
Qingdao	54	55	17	62	201	Yao et al., 2008
Luoyang	71	85	-	66	216	Lu et al., 2007
Wenzhou	-	35	-	65	169	Chen et al., 2007
Nanjing	85	66	-	107	163	Lu et al., 2003
Cincinnati	37	26	19	41	60	Turer et al., 2001
Syria	57	34	39	17	103	Moller et al., 2005
France	42	20	14	43	43	Hernandez et al., 2003
Spain	-	57	-	53	596	Rodrguez et al., 2009
Iran	64	60	38	47	94	Sayadi and Rezaei, 2014
Turku, Finland	59	23	24	17	90	Salonen and Korkka-Niemi, 2007
Roca ácida	25	30	15	24	60	Sierra M, 2005

En el área de estudio, el 80% del territorio se sitúa sobre rocas vulcano-sedimentarias de composición riolítica.

La comparación de los valores de referencia propuestos para los EPTs con la NOM-147 SEMARNAT/SSA1-2004 mostró una diferencia importante. La concentración de Cr, Pb, Ni es 14 veces más baja del valor propuesto por la norma para suelo contaminado de uso residencial propuesto por la NOM-147 (Cuadro 5.2).

**Cuadro 5.2** Comparativo de la norma mexicana (NOM-147 SEMARNAT/SSA1-2004) y norma canadiense (CCME 2007).

Elemento	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Mexicana	280*-510**	N/A	1600-20,000	400-800	N/A
Canadiense	64	63	50	140	200
EUA	210	3100	1600	400	23000
<b>Este estudio</b>	<b>14</b>	<b>19</b>	<b>9</b>	<b>28</b>	<b>203</b>

Vfon: valor de fondo, R.Ácidas: propuestas por Goldschmidt, 1954; Fassbender, 1987 y Kabata-Pendias y Pendias, 1992; EUA: límites máximos permitidos (in Delgado C. et al. 2019), Sierra M, 2005; NOM-147 \* Uso residencial-agrícola; NOM-147\*\* Uso de suelo residencial.

En México existe una escasa información del contenido de elementos potencialmente tóxicos en suelo urbanos y los datos disponibles corresponden a información generada en otros países. Esta información es usada para postular normas, las cuales no corresponden siempre con los diferentes tipos de suelos (Alarcón, 2005; CCME2007).

### 5.1 Evaluación de peligro por concentración de Cr en suelos de la ZMG

La Organización Mundial de la Salud (OMS) clasifica el Cr (VI) como carcinógeno para el hombre, así como debilitamiento del sistema inmune, daño en los riñones e hígado, entre otros (Molina et al., 2010; Rodríguez et al., 2017).

El límite máximo permitido en suelos urbanos de Cr en EUA (Delgado et al., 2019) es de 210 mg/kg. De acuerdo con la norma mexicana: NOM 147- SEMARNAT/SSA1-

2004 (SEMARNAT 2007) las concentraciones permitidas fluctúan entre 280-510 mg/kg, mientras que, en la norma canadiense se encuentra entre 64 y 87 mg/kg (CCME, 1999).

La concentración mayor medida en este trabajo es de 63 mg/kg, por lo que, todas las concentraciones obtenidas están por debajo de los límites determinados por las normas mexicana y estadounidense. En consecuencia, se puede considerar que la ZMG no tiene una contaminación significativa de Cr y no representa un riesgo para la población expuesta.

Sin embargo, los valores más altos reportados en este trabajo se encuentran próximos a los límites permisibles de la norma canadiense para los usos de suelo agrícola, residencial y comercial. Además, es 4.5 veces mayor que el valor de fondo propuesto en este trabajo (14 mg/kg).

El rango de mayor concentración medido de Cr fluctúa entre 43 y 63 mg/kg. Su área suma una extensión de 61 km<sup>2</sup>, donde viven alrededor de 545,586 habitantes, de estos el 30 % no cuentan con ningún tipo de asistencia de salud (sin derechohabiencia) y 16.6% tienen un alto índice de rezago social. Estas áreas se ubican principalmente en la zona centro y noreste del municipio de Guadalajara y en menor proporción en los municipios de Tonalá, el salto y San Pedro Tlaquepaque (Figura 5.1).



# Evaluación del Peligro por concentración de Cr en la ZMG

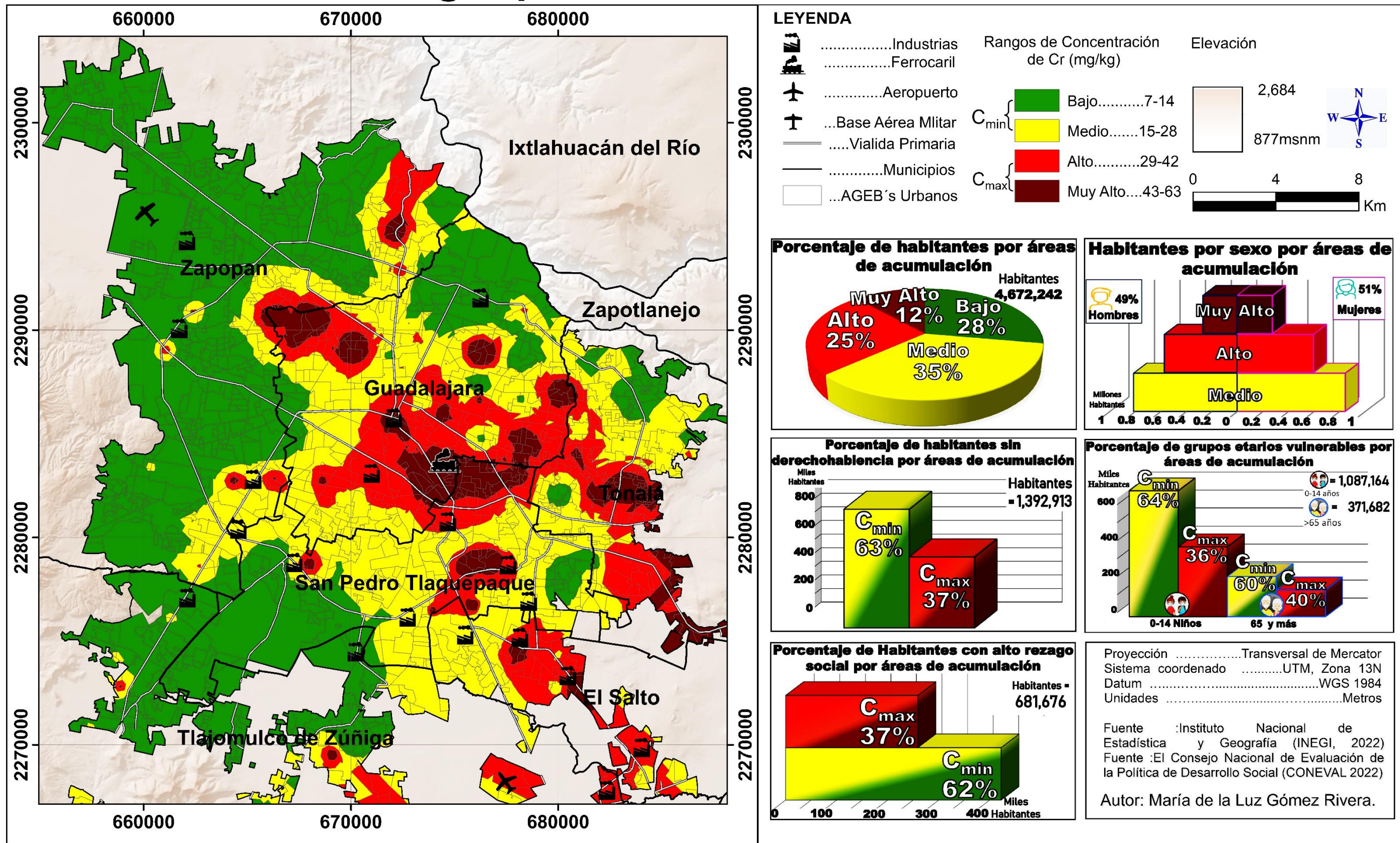


Figura 5.1 Mapa de evaluación de peligro por concentración de Cr en suelos de la ZMG



## 5.2 Evaluación de peligro por concentración de Cu en suelos de la ZMG

Los niveles altos de Cu pueden producir cáncer o daño del hígado, riñones, y en ocasiones causar la muerte. A pesar de que es un elemento altamente tóxico, en México no existe una norma reguladora en torno a la concentración en suelos. Por esta razón se toma como referencia el límite de concentración máxima permitida para suelo de EUA, de 3100 mg/kg (Delgado et al., 2019) o la concentración de la norma canadiense que tiene valores entre 63-91 mg/kg (CCME 1999; ATSDR 2004).

El rango de mayor concentración medido en este trabajo, fluctúa entre 57 y 682 mg/kg, este se encuentra dentro de lo permitido en suelos urbanos de EUA. Sin embargo, se encuentra superior a la norma canadiense. Comparando el valor de concentración de referencia, se encontraron sitios que rebasan hasta 35 veces este valor.

El área de influencia abarca una extensión de 65 km<sup>2</sup>, donde viven alrededor de 663,920 habitantes. De estos, el 21% son infantes de 0 a 14 años, además 10% son adultos mayores a 65 años. Asimismo, 200,853 habitantes no tienen ningún tipo de asistencia de salud (sin derechohabiencia) y 94,199 habitantes presentan un alto índice de rezago social, esta área se distribuye principalmente en Guadalajara y San Pedro Tlaquepaque y en menor proporción en los municipios del Salto, Tlajomulco de Zúñiga y Zapopan.

El área de influenciada es de 130 km<sup>2</sup>, donde viven 1,170,546 habitantes. De estos, 346,887 no tienen ningún tipo de asistencia de salud (sin derechohabiencia) y 171,604 habitantes presentan un alto índice de rezago social (ver figura 5.2).



# Evaluación del Peligro por concentración de Cu en la ZMG

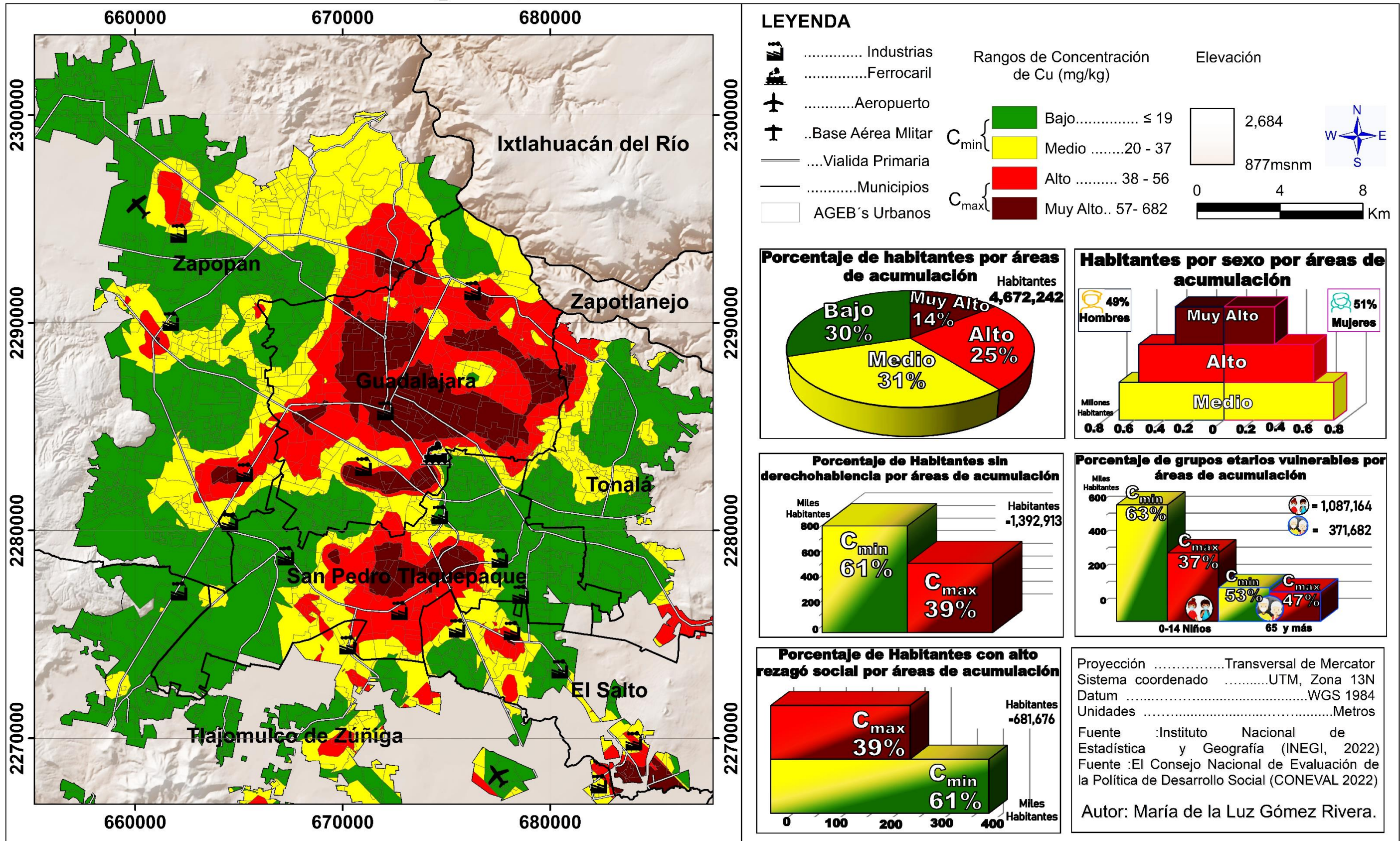


Figura 5.2 Mapa de evaluación de peligro por concentración de Cu en suelos de la ZMG



### **5.3 Evaluación de peligro por concentración de Ni en suelos de la ZMG**

La exposición a altas concentraciones de Ni puede producir reacciones alérgicas, fallos respiratorios, problemas cardiovasculares, embolias pulmonares, cáncer pulmonar, y bronquitis crónica (ATSDR, 2005).

En cuanto a la concentración Ni en suelo urbanos, existe una discrepancia entre la norma canadiense, mexicana y estadounidense, siendo estas dos últimas las que fluctúan entre 1600-20,000 mg/kg, mientras que la norma canadiense varía entre 45 y 89 mg/kg (CCME, 2015).

Usando la concentración de referencia canadiense y EUA, se encontró que las concentraciones obtenidas están por debajo de los límites, por lo que se estima que el suelo de la ZMG no tiene una contaminación importante y no representa un riesgo para la población expuesta. Sin embargo, se encontró concentraciones de hasta 4.5 veces mayor que el valor de fondo (9 mg/kg).

Las mayores concentraciones medidas de Ni varían entre 28 y 46 mg/kg. Su extensión geográfica es de 52 km<sup>2</sup>, donde viven 352,280 habitantes. De estos, el 29 % no cuentan con ningún tipo de asistencia de salud (sin derechohabencia) y 36% tiene un alto índice de rezago social. Las áreas se distribuyen principalmente dentro de los municipios de Guadalajara, San Pedro Tlaquepaque y El Salto, con una menor proporción en Zapopan y Tlajomulco de Zúñiga (ver figura 5.3).



# Evaluación del Peligro por concentración de Ni en la ZMG

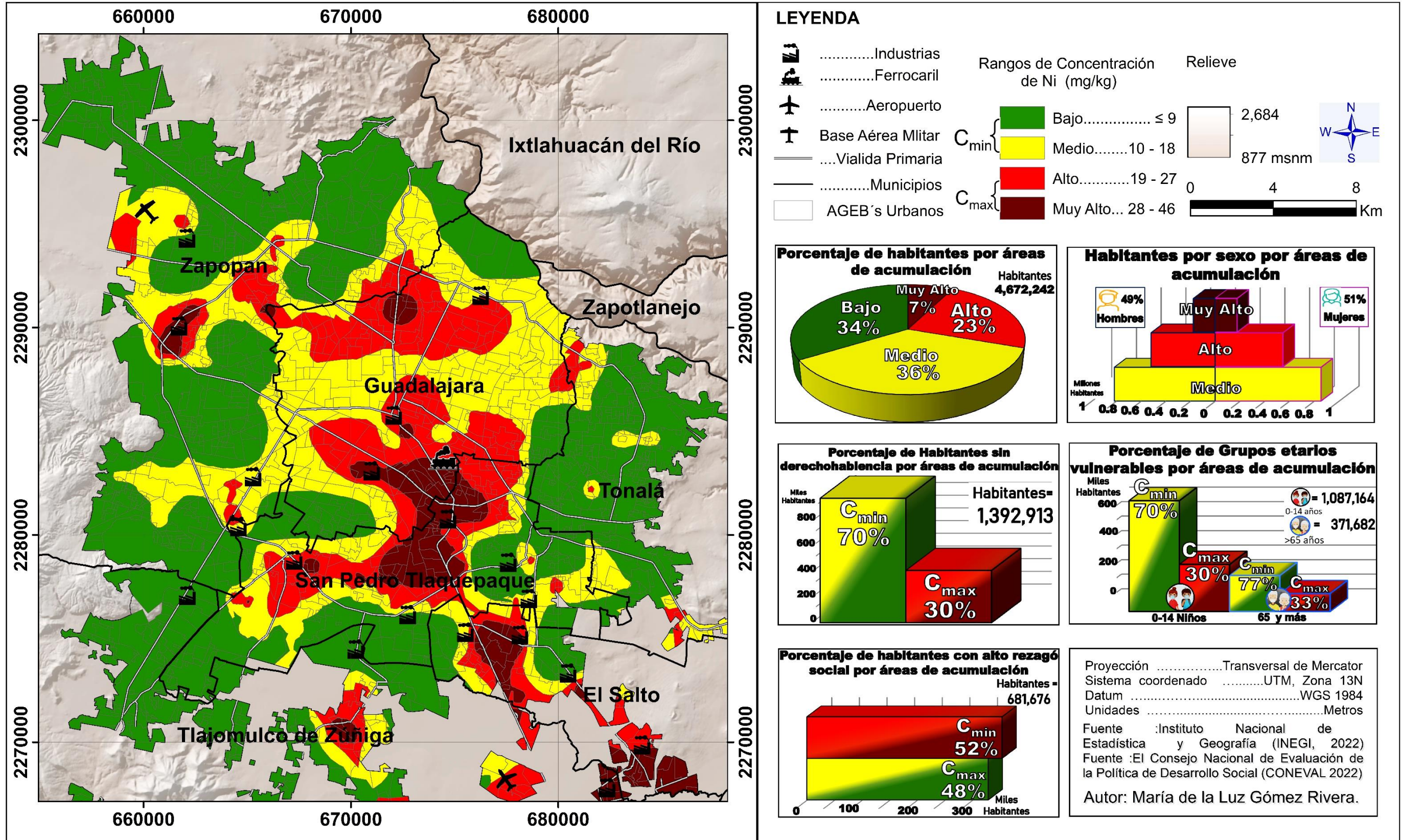


Figura 5.3 Mapa de evaluación de peligro por concentración de Ni en suelos de la ZMG



#### **5.4 Evaluación de peligro por concentración de Pb en suelos de la ZMG**

El Pb es altamente tóxico para los seres humanos ya que puede causarle afectaciones neuronales, en la sangre, en tejidos blandos y tejido mineralizado, además afecta el crecimiento en embriones y durante las primeras etapas del desarrollo humano (Nava y Méndez, 2011).

Las concentraciones permitidas en los suelos urbanos de EUA es igual que el límite permitido en el uso de suelo agrícola, residencial y comercial decretado en la norma mexicana de 400 mg/kg, mientras que para el uso de suelo industrial de esta norma es de 800 mg/kg. En cuanto a la norma canadiense los límites permitidos varían entre 70 y 600 mg/kg (CCME, 1999).

El rango de mayor concentración reportado fluctúa entre 84 y 530 mg/kg, y se encuentra próximo a los límites de dichas normas. Tomando en cuenta la concentración de Pb medida y las normas ya mencionadas, se considera que el área no está contaminada y no representa un riesgo para la población expuesta. Sin embargo, esta concentración se encuentra 18.9 veces por encima del valor de fondo propuesto en este trabajo (28 mg/kg). Por esta razón es importante que se monitoree el área influenciada, puesto que abarca una extensión de 59 km<sup>2</sup>, donde viven alrededor de 541,387 habitantes. De estos, el 20% son infantes de 0 a 14 años, además 11% son adultos mayores a 65 años. Asimismo, 156,514 habitantes no tienen ningún tipo de asistencia de salud (sin derechohabencia) y 20,592 habitantes presentan un alto índice de rezago social.

Los principales municipios afectados son Guadalajara y Zapopan, existen zonas que presenta fuentes puntuales en los municipios de Tlajomulco de Zúñiga, San Pedro Tlaquepaque y el salto (ver figura 5.4).

Las concentraciones altas de Pb en suelo pueden atribuirse a la acumulación gradual del metal a través del tiempo por la combustión de gasolina con plomo, ya que hasta 1991 se introdujo el convertidor catalítico en los automóviles en México como resultado de una concertación entre las autoridades gubernamentales ambientales y las empresas de automóviles, a la vez que la agencia paraestatal PEMEX introdujo la gasolina sin plomo Magna Sin. En la actualidad las gasolinas con plomo han salido del mercado (Reyes Escalante y Matas, 2010), sin embargo, el mayor aporte de este elemento al ambiente provino principalmente de escapes de automóviles (ATSDR, 1996).

Por otro lado, las concentraciones de Pb en suelo también están sujetas a la combustión de materiales que contengan el mismo, en industrias de fundición, industrias de reciclaje o decapado de pintura con Pb, a través de la industria del hierro y acero, quema de carbón, petróleo o desechos, manufactura de municiones y baterías, así soldaduras de Pb y uso de plaguicidas (ATSDR, 2020).



# Evaluación del Peligro por concentración de Pb en la ZMG

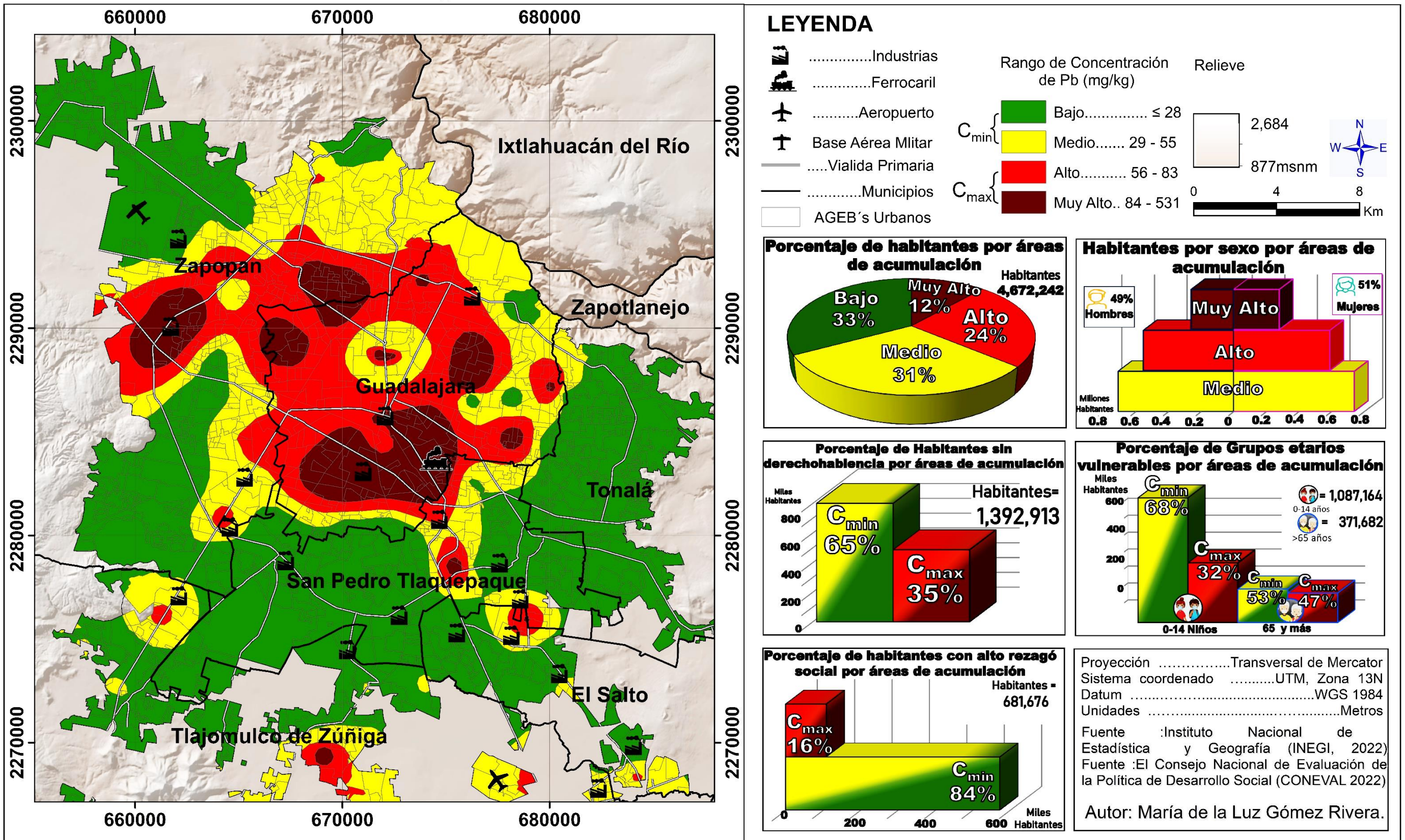


Figura 5.4 Mapa de evaluación de peligro por concentración de Pb en suelos de la ZMG



## 5.5 Evaluación de peligro por concentración de Zn en suelos de la ZMG

La exposición del ser humano al Zn en altas dosis y prolongadas puede ser perjudicial para la salud. Produce problemas en el hígado, páncreas, riñones, huesos y músculos (Rubio et al., 2007).

En México no existe una norma reguladora en torno a la concentración Zn en suelos. Por esta razón se toma como referencia el límite de concentración máxima permitida para suelo de EUA de 23,000 mg/kg (Delgado et al., 2019), aunque es discrepante con respecto a los límites de la norma canadiense, los cuales varían entre 250 a 410 mg/kg (CCME, 1999).

La concentración mayor medida en este trabajo es de 1768 mg/kg, por lo que, todas las concentraciones obtenidas están por debajo del límite de concentración máxima permitidos en los suelos de EUA. Sin embargo, el 40% del área mostró niveles de concentraciones altas con base en la norma canadiense. Además, se encuentra 8 veces por encima del valor de fondo establecido en este trabajo (203 mg/kg). Por lo anterior, esta área fue considerada potencialmente contaminada.

El primer rango de concentración afectado oscila entre 407 y 609 mg/kg y tuvo un área de 164 km<sup>2</sup>, donde viven alrededor de 1,739,352 habitantes. De estos, 508,083 habitantes no tienen ningún tipo de asistencia de salud (sin derechohabiencia) y 218,103 habitantes presentan un alto índice de rezago social. Los principales municipios afectados son Guadalajara, y Zapopan San Pedro Tlaquepaque (ver figura 5.5).

El rango de mayor concentración reporta valores entre 610 y 1768 mg/kg y presentó una extensión de 57 km<sup>2</sup>, en donde viven alrededor de 595,925 habitantes. De estos, el 21% son infantes de 0 a 14 años, además 11% son adultos mayores a 65 años.

Asimismo, 172,476 habitantes no tienen ningún tipo de asistencia de salud (sin derechohabiencia) y 108,035 habitantes presentan un alto índice de rezago social. Los principales municipios afectados son Guadalajara, Zapopan y San Pedro Tlaquepaque y con una menor proporción en áreas puntuales en los municipios del Salto y Tlajomulco de Zúñiga (ver figura 5.5).

Las altas concentraciones de Zn en suelo pueden atribuirse a la acumulación gradual del metal a través del tiempo, generada principalmente por la fricción de llantas con el pavimento ya que este elemento es parte de los constituyentes de los neumáticos, (INECC, 2020; SEMARNAT, 2015). En la ZMG concentra el 64.3 % del total del parque vehicular del estado de Jalisco (IIEG, 2020). Así mismo, puede provenir de la actividad industrial presente en el área o a la quema de llantas utilizadas como combustible para la elaboración artesanal de ladrillo (INECC y SEMARNAT, 2015).



# Evaluación del Peligro por concentración de Zn en la ZMG

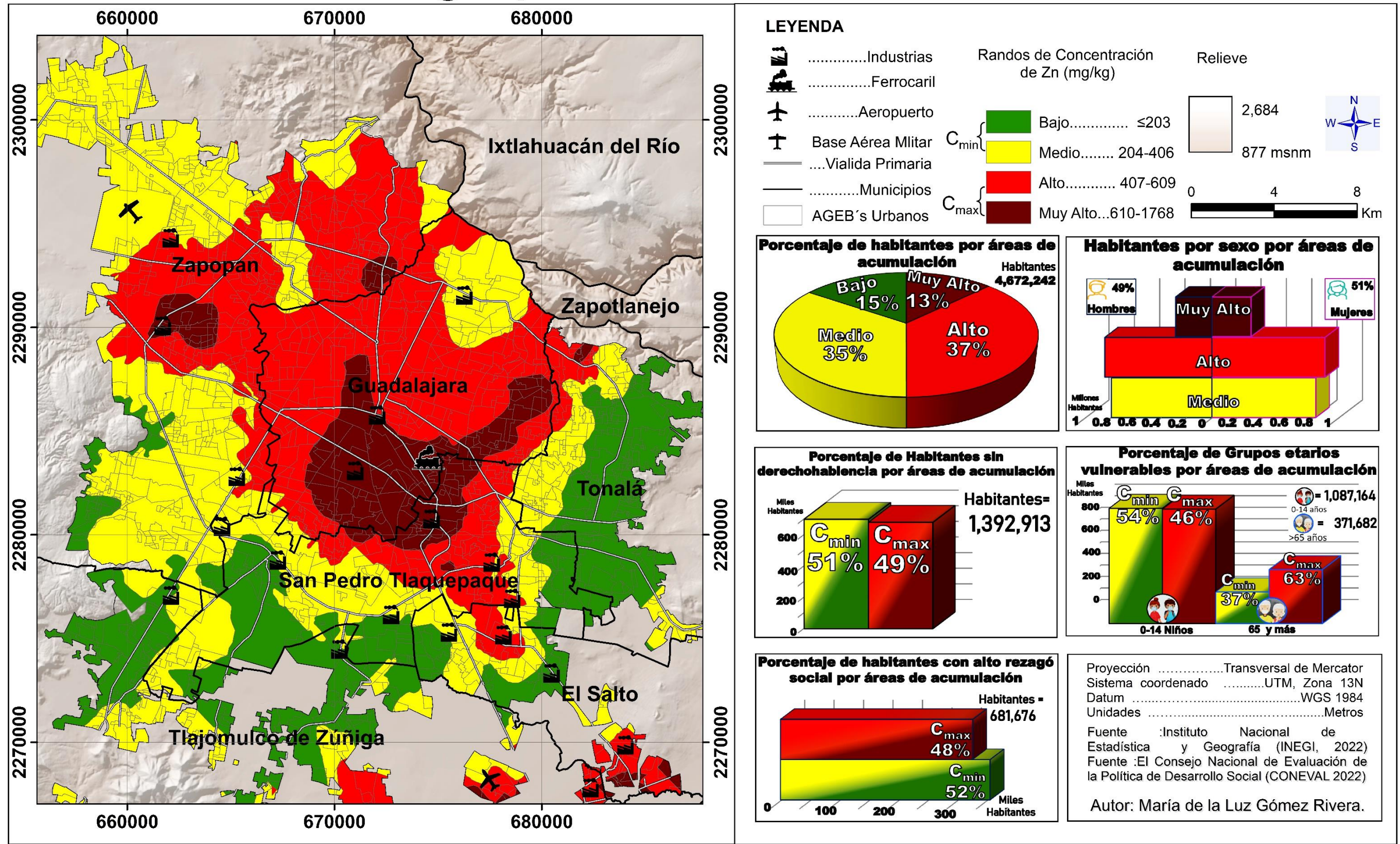


Figura 5.5 Mapa de evaluación de peligro por concentración de Zn en suelos de la ZMG



## **5.6 Evaluación de peligro por PLI en suelos de la ZMG**

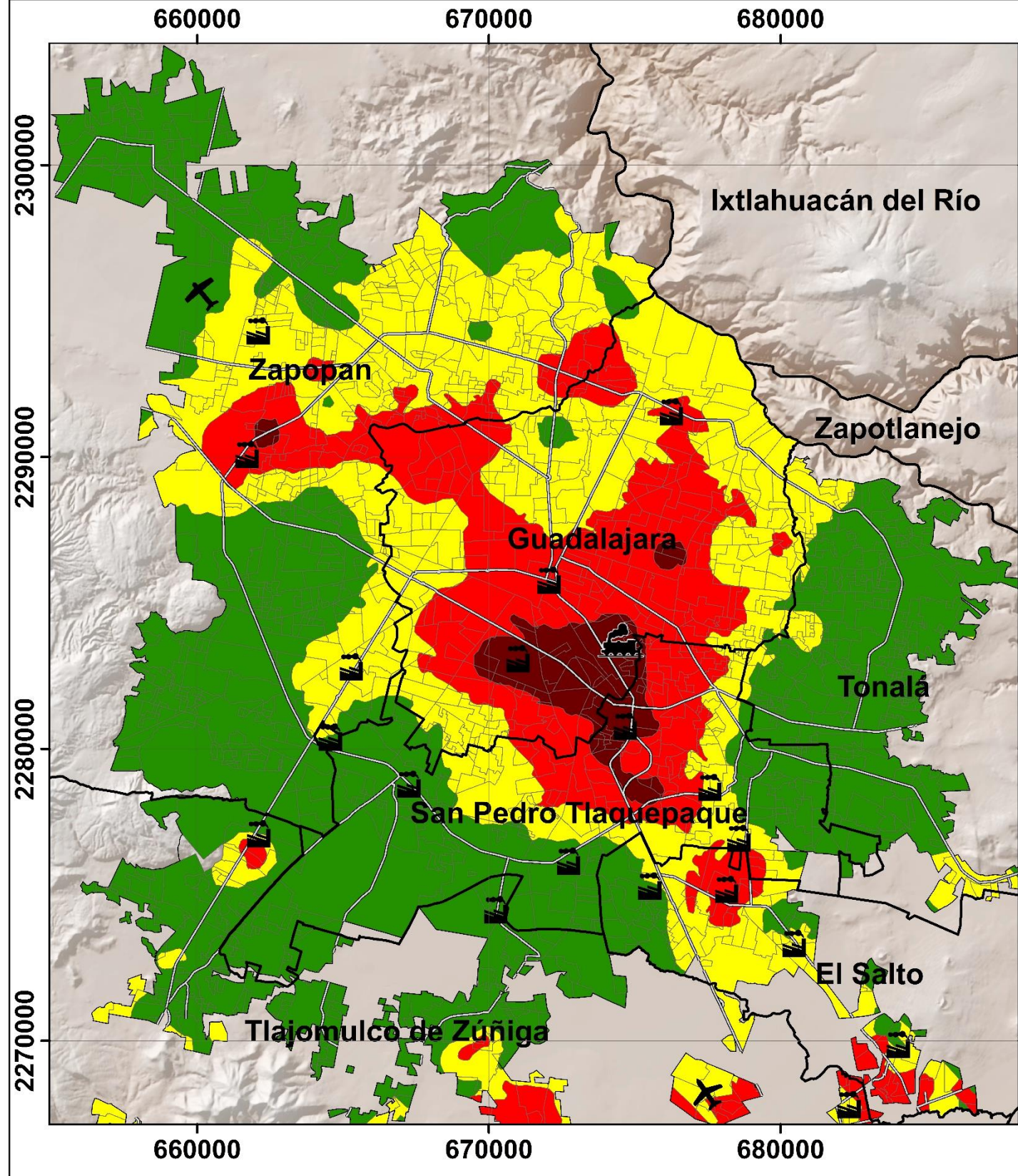
El empalme de la información demográfica con la concentración de valores de PLI, permitió caracterizar un área de 117 km<sup>2</sup>, donde viven alrededor de 1,132,934 habitantes. De estos, 247,820 son infantes de 0 a 14 años, además 110,803 son adultos mayores a 65 años. Asimismo, 332,272 habitantes no tienen ningún tipo de asistencia de salud (sin derechohabiencia) y 191,710 habitantes presentan un alto índice de rezago social.

El nivel con carga de concentración muy alta (PLI > 3) cubrió un área de 25 km<sup>2</sup>, en donde viven alrededor de 189,277 habitantes. De estos, el 21% son infantes de 0 a 14 años, además 11% son adultos mayores a 65 años. Asimismo, 53,667 habitantes no tienen ningún tipo de asistencia de salud (sin derechohabiencia) y 55,836 habitantes presentan un alto índice de rezago social.

Las áreas con carga de concentración alta y muy alta (PLI entre 2 y 3) se encuentran afectando los municipios de Guadalajara, San Pedro Tlaquepaque y Zapopan, y áreas puntuales en los municipios de Tlajomulco de Zúñiga y El Salto (ver figura 5.6).



# Evaluación del Peligro por Índice de Carga de Contaminación en la ZMG



**LEYENDA**

- Industrias
- Ferrocarril
- Aeropuerto
- Base Aérea Militar
- Vialidad Primaria
- Municipios
- AGEB's Urbanos

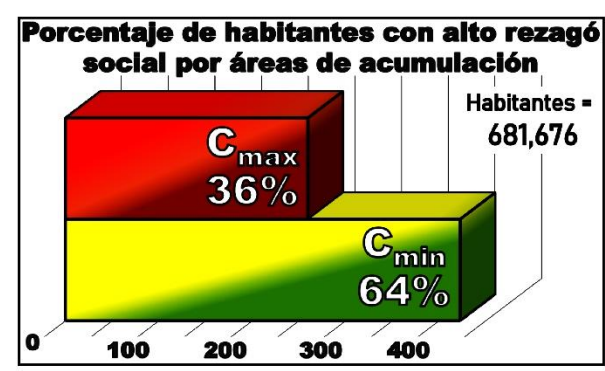
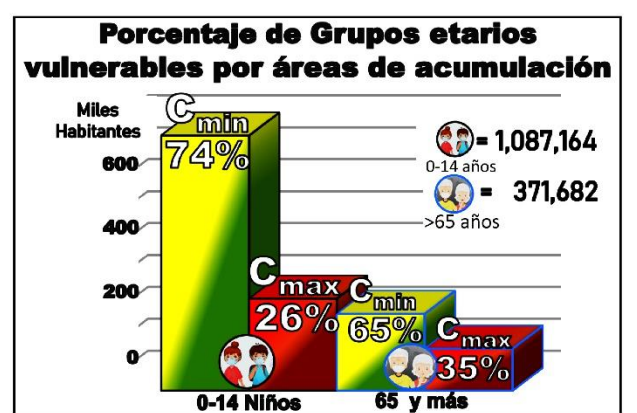
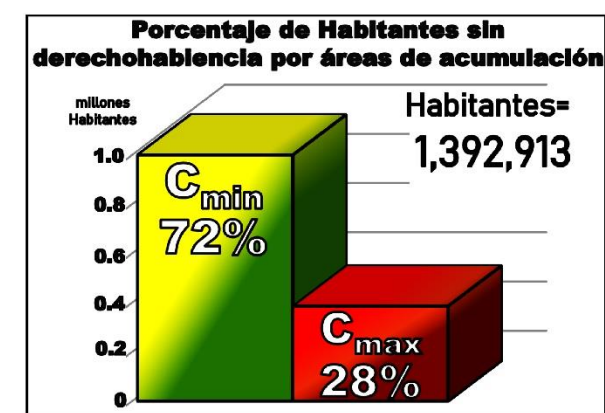
**Índice de carga de contaminación**

- Bajo  $0 \leq C_{min}$
- Medio  $1 < C_{min} \leq 2$
- Alto  $2 < C_{min} \leq 3$
- Muy Alto  $3 < C_{min} \leq 40$

**Relieve**

- 2,684
- 877 msnm

0 4 8 Km



Proyección ..... Transversal de Mercator  
 Sistema coordenado ..... UTM, Zona 13N  
 Datum ..... WGS 1984  
 Unidades ..... Metros

Fuente : Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2022)  
 Fuente : El Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL 2022)

Autor: María de la Luz Gómez Rivera.

Figura 5.6 Mapa de probabilidad de distribución de PLI en los suelos de la ZMG



## **CAPÍTULO VI CONCLUSIONES**

Establecer los valores de referencia locales de los elementos potencialmente tóxicos para las zonas urbanas en México, son importantes para enfrentar problemas de riesgo a la salud pública ya que las evaluaciones futuras podrán hacer estudios más integrales.

En este trabajo, se propuso una metodología para encontrar un valor de referencia local para seis elementos potencialmente tóxicos en la zona metropolitana de Guadalajara (ZMG), que podrán ayudar a identificar sitios que presentan

un enriquecimiento o disminución en la concentración de elementos. Los valores de concentración de referencia propuestos para seis elementos potencialmente tóxicos en Guadalajara exhiben diferencias considerables con los valores que están regulados por la norma mexicana.

Considerando los nuevos valores de concentración propuestos para la zona metropolitana de Guadalajara se obtiene que hay áreas que muestran un enriquecimiento de elementos, por lo que, hay posibilidades de que existan personas en riesgo a una exposición de niveles altos de concentración de elementos, principalmente Cu, Pb, V y Zn.

Los valores propuestos para la concentración de elementos en los suelos de Guadalajara son Cr: 14 mg/kg; Cu: 19 mg/kg; Ni: 9 mg/kg; Pb: 28 mg/kg; V: 38 mg/kg y Zn: 203 mg/kg.

Los mapas de evaluación del riesgo por elemento y el índice de peligro local (PLI) ofrecen una ventaja clave al permitir la visualización de datos a nivel de Áreas Geoestadísticas Básicas Urbanas (AGEB's urbanos). Esto, a su vez, posibilita la

formulación de estrategias preventivas contra la exposición continua a la concentración de EPTs. En consecuencia, esta investigación tiene un alto potencial de impacto social, ya que se centra en evaluar las condiciones de vulnerabilidad frente a la contaminación por EPTs.

Las áreas con mayores concentraciones de elementos fueron localizadas en los municipios de Guadalajara, San Pedro Tlaquepaque y El Salto, y con menor afectación en Zapopan y Tlajomulco de Zúñiga. El área de mayor afectación cubre 70 km<sup>2</sup>, en donde se estima una población afectada de 663,920 habitantes, y existe población vulnerable (infantes y adultos mayores), la cual no tienen acceso a la asistencia sanitaria.

Los valores más altos de concentración se encontraron en las proximidades del suelo de tipo industrial y en la proximidad del patio de maniobras del tren, por lo que es evidente que el aumento de concentración elemental es causa de actividades antrópicas.

Por último, este estudio representa una valiosa contribución al proceso de gestión del riesgo con miras a prevenir desastres relacionados con la contaminación de suelos urbanos por EPTs en la ZMG. Además, se sugiere realizar estudios más detallados en las áreas de acumulación para evaluar con mayor precisión la calidad de los suelos urbanos en la zona metropolitana de Guadalajara, y poder establecer directrices preventivas para proteger la salud de la población.

## CAPÍTULO VII REFERENCIAS

- Aitio A., Bernard A., Fowler B & Nordberg G. (2007). Biological monitoring and biomarkers. In: Handbook on the Toxicology of Metals, Nordberg, G.F., et al. (Eds.), 65-78, Academic Press/Elsevier, 3rd ed., ISBN 0-123694132, USA.
- Aguilar B., Cejudo R., Martinez J., Bautista F., Goguitchaichvili A., Carvallo C., Morales J., 2012, Ficus benjamina leaves as indicator of atmospheric pollution: a reconnaissance study: Studia Geophysica et Geodaetica, 56, 879-887
- Alessio L., Marinoni M. Y Dell'Orto A. (1988). Biological Monitoring of Vanadium. En: Biological Monitoring of Toxic Metals. (W.T.Clarkson, L.Friberg, F. Nordberg Y R. Sanger, Eds.) Plenum Press, Nueva York, 427-436
- Alarcón H. y Flores T. (2005). Plantas tolerantes al arsénico y al plomo. Agrofaz. 5, 751-754.
- Arcaya J., Tejeda C., Salazar U., Silva E., Urdaneta K., & Varela K. (2013). La Intoxicación con Cobre Disminuye la Sobrevida e Induce Alteraciones Neurológicas en Drosophila Melanogaster. Invest Clin 2013, vol. 54, 47–57.
- ATSDR. (1996). Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. Reseña Toxicológica de la Gasolina de Automóvil. Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU., Servicio de Salud Pública
- ATSDR. (2020). Agencia para Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades División de Toxicología Y Medicina Ambiental. "Toxicological Profile for Lead". (2020, Agosto). Division of Toxicology and Human Health Sciences, Atlanta, GA. <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp13-p.pdf>
- ATSDR. (2003). Resumen de Salud Pública, Departamento de Salud Y Servicios Humanos de los EE.UU., Servicio de Salud Pública Agencia para Sustancias Tóxicas Y el Registro de Enfermedades Recuperado de <https://www.atsdr.cdc.gov/es>
- ATSDR. (2004). Resumen de Salud Pública Cobre. enero ,2022, de Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU., Servicio de Salud Pública

- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, sitio Web:  
[https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs132](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs132)
- ATSDR. (2005). Resumen de Salud Pública Níquel. febrero 05, 2022, de Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU., Servicio de Salud Pública Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, sitio web: [https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs15](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs15).
- ATSDR. Agencia para Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades (2020). ToxFAQs™ - Cromo (Chromium) Hoja informativa, consultado 17/01/2023: [https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es\\_tfacts7.html](https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts7.html).
- ATSDR. Agencia para Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades (2020). ToxFAQs™ - Cobre (Cooper) Hoja informativa, consultado 17/01/2023: [https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es\\_tfacts132.html](https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts132.html).
- Bacon J. Y Dinev N. (2005). Caracterización Isotópica de Plomo en Suelos Contaminados de las Inmediaciones de una Fundición de Metales no Ferrosos cerca de Plovdiv, Bulgaria. *Reinar. Contaminar* 134, 247-255
- Baroch E. (1983). Vanadium and Vanadium Alloys. en: *Encyclopaedia of Chemical Technology*. Wiley, Nueva York, 673-710
- Blanco R., Y Mora E., (2015). El Cromo Como Elemento Esencial en los Humanos. *Revista Costarricense de Ciencias Médicas*, vol. 23, 55-68.
- Blanco S., Mizohata A., Jiménez B., Aguilar G., Pablo M., Benítez M. y Altúzar F. (2015). Evaluación de Partículas Suspendidas PM2.5 en el Área Metropolitana de la Ciudad de Guadalajara. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). México. 42
- Bolt B., Horn W., Macdonald G. y Scott R. (1977). *Geological Hazards: Earthquakes - Tsunamis - Volcanoes - Avalanches*. Springer-Verlag New York Heidelberg Berlín: Springer, ISBN 0387069488, 328
- Bonilla M., Silva S., Toxtle J., Santamaría J., 2014. Concentraciones de metales pesados totales en aguas residuales vertidas a ecosistemas acuáticos por dos parques industriales en Puebla, México. *Revista Iberoamericana de Producción Académica y Gestión Educativa*. 1, 2, 1-26.
- Busso G., (2001), "Vulnerabilidad Social: Nociones e Implicancias de Políticas para Latinoamérica a Inicios del Siglo XXI", Seminario Internacional las

Diferentes Expresiones de la Vulnerabilidad Social En América Latina y el Caribe, 20 y 21 de junio de 2001, Santiago de Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe.

Bustamante L., Flores J., Isaac K., Hernández M., Campuzano M. y Ramírez N. (2018). Estudio Exploratorio Sobre la Asociación de Metales Pesados y la Nefropatía de Etiología Desconocida en el Poniente del Estado de México. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 34 555-564.

Bucko, M., Magiera T., Pesonen L., Janus B., 2010, Magnetic, geochemical, and microstructural characteristics of road dust on roadsides with different traffic volumes— Case study from Finland: *Water Air Soil Pollut*, 209, 295-306.

Castillo E. (2021). La población en riesgo y la calidad del agua al sur de la zona metropolitana de Guadalajara (Jalisco, México). © Universidad de Jaén (España). Seminario Permanente Agua, Territorio y Medio Ambiente (CSIC), (Agua y Territorio, 17), 55-76

Castillo M., Kinney P., Southerland V., Arno C., Crawford K., van Donkelaar, A., et al. (2021). Estimating intra-urban inequities in PM<sub>2.5</sub>-attributable health impacts: A case study for Washington, DC. *GeoHealth*, 5, e2021GH000431.

CCME. (1997 y 1999). Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health, CHROMIUM total Chromium 1997 Hexavalent Chromium (VI) 1999. Canada.

CCME. (1999). Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health, Copper. Canada Human Health Soil Ingestion Guidelines for Threshold Contaminants are Derived Using TDI for the Most Sensitive Receptor Designated for a Land use. for Copper, a Provisional TDI Is Used in Place of a Conventional TDI

CCME (1999). Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health, LEAD. Canada.

CCME (2007). Soil quality guidelines for the protection of environmental and human health, agricultural, residential/parkland, commercial, industrial. Summary table. Canadian Council of Ministers of the Environment [en línea]. <http://ceqg-rcqe.ccme.ca/en/index.html> 25/06/2022

- CCME (2018). Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health, Zinc. Scientific Criteria Document for the Development of the Canadian Soil Quality Guidelines for Zinc: Protection of Environmental and Human Health. CCME, Winnipeg, MB. Cornfield, A.H. 1977. Effects of Addition of 12 Metals on Carbon Dioxide Release During Incubation of an Acid Sandy Soil. *Geoderma* 19 199–203. Canada
- CCME (2015). Canadian Soil Quality Guidelines for Nickel: Protection of Environmental and Human Health Scientific Supporting Document. CCME. Winnipeg, MB.
- Cervantes C., Campos J., Devars S., Gutiérrez F., Loza H., Torres J. Y Moreno R. (2001). Interactions of Chromium with Microorganisms and Plants, *FEMS Microbiol. Rev.* 25, 335-347
- Chheang, L.; Thongkon, N.; Sriwiriyarat, T.; Thanasupsin, S.P. Contaminación por Metales Pesados e Implicaciones para la Salud Humana en el Embalse de Chan thnal, Camboya. *Sostenibilidad* 2021, 13, 13538. <https://doi.org/10.3390/Su132413538>
- Codd R., Dillon C., Levina T. Y Lay P., (2001) Studies on the Genotoxicity of Chromium: From the test tube to the Cell, *Coord. Chem. Rev.:* 216, 537-582
- CONEVAL (2014), (Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social), Metodología para la Medición Multidimensional de la Pobreza en México, Ciudad de México: Coneval
- CONEVAL (2020), Índice de Rezago Social, Medición de la Pobreza. Gobierno de México, [https://www.coneval.org.mx/Medicion/IRS/Paginas/Indice\\_Rezago\\_Social\\_2020.aspx](https://www.coneval.org.mx/Medicion/IRS/Paginas/Indice_Rezago_Social_2020.aspx)
- CONEVAL (2022), Medición de la Pobreza. Rezago Social a Nivel zonas Urbanas (AGEB URBANAS). Gobierno de México, [https://www.coneval.org.mx/Medicion/IRS/Paginas/Rezago\\_Social\\_AGEB\\_2010.aspx](https://www.coneval.org.mx/Medicion/IRS/Paginas/Rezago_Social_AGEB_2010.aspx)
- Corbett J., 1989, "Poverty and Sickness: The High Costs of Ill-Health", *end IDS Bulletin*, vol. 20, 2.

- Crans D., Amin S. Y Keramidas A. (1998). Chemistry of Relevance to Vanadium in the Environment. en: Vanadium in the Environment. Primera 92 parte: Chemistry and Biochemistry (J.O. Nriagu, Ed.). Wiley, Nueva York, 73–96.
- Cuberos E., Rodríguez A. Y. Prieto E. (2009). Niveles de Cromo y Alteraciones de Salud en una Población Expuesta a las Actividades Decurtiembres en Bogotá, Colombia. Rev. Salud Pública, vol. 11.
- Daley B., Doherty A., Fairman B. y Case C. (2004). Wear Debris from Hip or Knee Replacements Causes Chromosomal Damage in Human Cells in Tissue Culture. J. Bone Joint. Surg. Br. 86, pág 598-606
- Delgado C., Bautista F., Gogichaishvili A., Cortés J., Quintana P., Aguilar D. Y Cejudo R., (2019). Identificación de las zonas contaminadas con metales pesados en el polvo urbano de la Ciudad de México. Rev. Int. Contam. Ambie. 81-100, 2019 Doi: 10.20937/Rica
- Díaz M. (2002). Geoestadística Aplicada. Instituto de Geofísica, UNAM, Instituto de Geofísica y Astronomía, CITMA, Cuba. (<http://mmc2.geofisica.unam.mx/>).
- Draghici C., Coman G., Jelescu C., Dima C. & Chirila E. (2010). Heavy metals determination in environmental and biological samples, In: Environmental Heavy Metal Pollution and Effects on Child Mental Development- Risk Assessment and Prevention Strategies, NATO Advanced Research Workshop, Sofia, Bulgaria, 28 April-1 May 2010
- DOF Diario Oficial de la Federación, (2021). NORMA Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a las partículas suspendidas PM10 y PM2.5. Valores normados para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población, Diario Oficial de la Federación, México, 27 de octubre 2021.
- Elinder C., Gerhardsson L. Y Oberdoerster G. (1988). Biological Monitoring of Toxic Metals-Overview. en: Biological Monitoring of Toxic Metals (W.T. Clarkson, L. Friberg, F. Nordberg Y R. Sanger, Eds.). Plenum Press, Nueva York, 1-71
- EPA (2022), Conceptos Básicos Sobre el Material Particulado. 14/Junio/2022, Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, sitio web:



<https://Espanol.Epa.Gov/Espanol/Conceptos-Basicos-Sobre-El-Material-Particulado-Pm-Por-Sus-Siglas-En-Ingles>.

FAO (1974). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (1974). Portal de Suelos de la FAO. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/leyenda-de-la-fao/leyendas-para-las-unidades-de-suelo-de-la-fao/es/>.

FAO y GTIS. (2015). Estado Mundial del Recurso Suelo (EMRS) – Resumen Técnico. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura y Grupo Técnico Intergubernamental del Suelo, Roma, Italia

FAO, Rodríguez N., McLaughlin, M. y Pennock, D. 2019. La contaminación del suelo: una realidad oculta. Roma

Fassbender, H. Y Bounemisze, E (1987). “Química de Suelos.” ed. IICA. de la OEA. Costa Rica. 420.

Feoktistova L. y Feoktistova Y. El Metabolismo del Cobre. Sus Consecuencias para la Salud Humana. Medisur. Rev. en Internet. 2018, 8

Flores R., Rico E., Núñez J., García E., Carrizale L., Llizaliturri C. Y Díaz F. (2012). Exposición Infantil al Plomo en Sitios Contaminados. México.: Salud Pública de México, vol. 54, 4

French R. y Jones J. (1993). Role of Vanadium in Nutrition: Metabolism, Essentiality and Dietary Considerations. *lif. sci.* 52, 339-346.

Gallardo A. (2006). Geostadística. México: Ecosistemas, vol.15, 48-58.

Garreaud, R., Rutllant, J., Merino M., Gallardo L., Leiva M., Morales L., Pérez P., Gutiérrez L., Jorquera H., Pérez R., Palma W., Oyarzún M. y Morales R. (2006). Contaminación atmosférica urbana. Episodios críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago. Universitaria, Chile. 331.

Gioka C., Bourauel C., Zinelis S., Eliades T., Silikas N. y Eliades G. (2004). Titanium Orthodontic Brackets: Structure, Composition, Hardness and Ionic Release. *Dent. Mater*, vol.20, 693-700

Goldschmidt, V., (1954). “Geochemistry.” Oxford University Press. Oxford.

González, Ma., (2005). Recuperación de suelos contaminados con metales pesados utilizando plantas y microorganismos rizosféricos. Sociedad Mexicana de la

Ciencia del Suelo, A.C. México, Terra Latinoamericana, 23, núm. 1, PP 29-37.

González V., Valle S., Nirchio M., Olivero J., Tejeda L., Valdemar J., Pesantes F. y González K. (2018). "Evaluación del riesgo de contaminación por metales pesados (Hg y Pb) en sedimentos marinos del estero Huaylá, Puerto Bolívar, Ecuador". Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica 21 (41): 75-82.

Google Imagen Satelital (Landsat/Copernicus 2015, Vista el 28 de julio de 2022) que Muestra la Ubicación y el Entorno General de las Áreas de Estudio.

Granados A. (2017). Vulnerabilidad y Acceso Desigual a Servicios de Salud: Revisión Espacial para el Estado de México, Instituto de Investigaciones Económicas de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Gutiérrez (2003). Recuperación de suelos contaminados con metales pesados utilizando plantas y microorganismos rizosféricos. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. México, Terra Latinoamericana, 23, núm. 1, PP 29-37.

Hurst A. (2008), "Vulnerability in Research and Health Care; Describing the Elephant in The Room?", Revista, Bioethics, vol. 22, Ginebra.

IIEG Instituto de Información Estadística y Geográfica de Jalisco (2020). Análisis General del Área Metropolitana de Guadalajara. Gobierno del Estado de Jalisco, 1-42 p.

IIEG (2020). Instituto Nacional de Estadística y Geografía de Jalisco. Análisis de los Principales Resultados del Censo 2020 de las Áreas Metropolitanas de Jalisco, 2010-2020. México

IMEPLAN Instituto Metropolitano de Planeación (2018). Plan de ordenamiento territorial metropolitano del AMG.

IMEPLAN Instituto de Planeación y Gestión del Desarrollo del Área Metropolitana de Guadalajara, UNAM. 2021. "Atlas Metropolitano de Riesgos. Área Metropolitana de Guadalajara. Versión de divulgación", Guadalajara, Jalisco, México.

INECC y SEMARNAT (2015) Blanco S., Mizohata A., Jiménez B., Aguilar G., Pablo M., Benítez M.A Y Altúzar F. Evaluación de Partículas Suspendidas PM2.5

- en el Área Metropolitana de la Ciudad de Guadalajara. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). México. 42
- INECC (2020) Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático 2020. Informe Nacional de la Calidad del Aire 2019, México. Ciudad de México: Coordinación
- INEM (2013). Inventario Nacional de Emisiones de Contaminantes Criterio. México. Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales.
- INEM (2019). Inventario Nacional de Emisiones de Contaminantes Criterio. México. Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales Recuperado de <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-contaminantes-criterio>
- INECC (2020) Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2020). Informe Nacional de la Calidad del Aire 2019, México. Ciudad de México: Coordinación
- INEGI (2010). Censo de Población y Vivienda 2010. 2021, de Instituto Nacional de Estadística y Geografía, sitio web: [https://www.inegi.org.mx/rnm/index.php/catalog/71/related\\_materials?idpro](https://www.inegi.org.mx/rnm/index.php/catalog/71/related_materials?idpro)
- INEGI (2013). Delimitación de las zonas metropolitanas de México. Consejo Nacional de Población, 32 p.
- INEGI (2019). Censos Económicos. <https://www.inegi.org.mx/programas/ce/201>
- INEGI (2020). Censo de Población y Vivienda 2020. 2021, de Instituto Nacional de Estadística Y Geografía, sitio web: <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- INEGI (2022). Censo de Población y Vivienda 2020. 2021, de Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Glosario sitio web: <https://www.inegi.org.mx/apag/glosario/default.html?P=ENEU>
- IPCS (1988). International Programme on Chemical Safety. Vanadium. Environmental Health Criteria, World Health Organisation, Ginebra, No. 81
- IQAIR (2021). Mapa global interactivo de concentraciones de PM2.5 en 2021 por ciudad. EE. UU. Report V11 Recuperado de <file:///C:/Users/viviab/Downloads/world-air-quality-report-2021-en.pdf>

- Kabata A. y Pendías H. (1992) "Trace Elements in Soils and Plants." Edition CRC Press. Pag. 365.
- Kim W., Doh S., Park Y., Yun S., (2007). Two-year magnetic monitoring in conjunction with geochemical and electron microscopic data of roadside dust in Seoul, Korea: Atmospheric Environment, 41, 7627-7641.
- Khelifi R. y Hamza A. (2010). Cáncer de cabeza y cuello debido a la exposición a metales pesados a través del tabaquismo y la exposición profesional: una revisión. Toxicología y farmacología aplicada, 248, 71–88.
- Laska, Shirley, Betty Hearn Morrow, Beth Willinger y Nancy Mock (2008), "Gender and Disasters: Theoretical Considerations".
- Legarreta A, Corra A, Delgado M, Torres J, Flores J. (2016). Material particulado y metales pesados en aire en ciudades mexicanas. Culcyt/ /Medio Ambiente, (No 56, Especial 1), 234-245.
- Ley general de Protección Civil (2014). LEY GENERAL DE PROTECCIÓN CIVIL Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de junio de 2012. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. 1-32
- Lezama, J., La contaminación del aire. En: Lezama, J.L. y B. Graizbord. 2010. Los grandes problemas de México. Colmex. México.
- Lozano R. y Bernal J. (2005). Characterization of a New Set of Eight Geochemical Reference Materials for XRF, Major and Trace Element Analysis. Rev. Mex. Cienc. Geo, vol.22, 329-344.
- Mancilla O., Ortega H., Ramírez C., Uscanga E., Ramos R., Reyes A. (2012). Metales pesados totales y arsénico en el agua para riego de Puebla y Veracruz, México. Revista Internacional de Contaminacion Ambiental, 28, 1, 39-48.
- Mancilla O., Fregoso B., Hueso E., Guevara R., Palomera C., Olguín J., Ortega H., Medina E., Flores Héctor. (2017). Concentración iónica y metales pesados en el agua de riego de la cuenca del río Ayuquila-Tuxcacuesco-Armería. Idesia (Arica), 35(3), 115-123.
- Manzanares L., Echániz G., López M., Pérez I. y Garibay V. 2011. Guía metodológica para la estimación de emisiones de PM2.5. INE, México, 103.

- Martínez G., Gutiérrez M., Martínez A., Villalobos R Y Arteaga T. (2015). Concentración Total Y Geodisponible de Elementos Potencialmente Tóxicos en Suelos Volcánicos con uso Agrícola del Nevadod Toluca, México. México: Rev. Int. Contam. Ambie. 31, 113-125
- Molina N., Aguilar P., Cordovez C. (2010). Plomo, Cromo III Y Cromo VI y sus Efectos Sobre la Salud Humana. Ciencia y Tecnología para la Salud Visual y Ocular, vol. 8, 77–88.
- Mejia O., Betancur T., Londoño L., (2007). Apliaciones de técnicas geoestadísticas en la hidrología del bajo cauca antioqueño, Dyna, 74, 152. 137-149.
- Narayan R., (2005). Nanostructured Diamondlike Carbon Thin Films Medical Applications. Materials Sci. Engin, vol. 25, 405-416.
- Nava C., Méndez M. (2011). Efectos Neurotóxicos de Metales Pesados (Cadmio, Plomo, Arsénico y Talio). Arch Neurocien (Mex), vol. 16, 140–147.
- Niño L., (2008). Uso de la función semivariograma y estimación kriging en el análisis espacial de un indicador entomológico de *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae). Biomédica 28, 4, 578-586.
- Nordberg G., Fowler B., Nordberg M., Friberg L., (2007). Handbook on the Toxicology of Metals. Academic Press, Elsevier, Third Edition, 975 p.
- Nordberg G., 2013. Metales: Propiedades Químicas y Toxicidad. In Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo. Tomo 2. Capítulo 63. Ed. Stellman J., Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales Subdirección General de Publicaciones, Madrid, España.
- OMS Y OPS, (2013). Organización Panamericana de la Salud y Organización Mundial De La Salud, Conceptos y Guía de Análisis de Impacto en Salud para la Región de las Américas. sitio web: <https://www.paho.org/hq/dmdocuments/2013/Evaluacion-Impacto>
- OMS (2016). Informe de la OMS, Cada Año Mueren 12,6 Millones de Personas a Causa de la Insalubridad del Medio Ambiente,15/Marzo/2016, de Organización Mundial de la Salud, sitio web: <https://www.who.int/es/news/item/15-03-2016-an-estimated-12-6-million-deaths-each-year-are-attributable-to-unhealthy-environments>

- OMS (2021). Informe de la OMS señala que los niños menores de 5 años representan casi un tercio de las muertes por enfermedades de transmisión alimentaria. 22/noviembre/2021, de Organización Mundial de la Salud, Sitio web: <https://www.who.int/es/news/item/03-12-2015-who-s-first-ever-global-estimates-of-foodborne-diseases-find-children-under-5-account-for-almost-one-third-of-deaths>.
- OMS (2021). Informe de la encuesta mundial sobre la salud y el cambio climático de la OMS de 2021. Ginebra: Organización Mundial de la Salud;2021. Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- OMS, Neira. M. (2021). Muchos países están dando prioridad a la salud y a la lucha contra el cambio climático, pero carecen de fondos para actuar. 8/11/2021, de Organización Mundial de la Salud Sitio web: <https://www.who.int/es/news/item/08-11-2021-many-countries-are-prioritizing-health-and-climate-change-but-lack-funds-to-take-action>
- OMS (2021). Compendio y otras orientaciones de las Naciones Unidas sobre salud y medio ambiente. Ginebra: Organización Mundial de la Salud; 2021 (OMS / HEP / ECH / EHD / 21.02). Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- OMS (2021). Salud urbana, de Organización Mundial de la Salud Sitio web: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/urban-health>
- OMS (2021). Directrices sobre la calidad del aire a nivel mundial. Material particulado (PM2.5 y PM10), ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono. Ginebra: Organización Mundial de la Salud. Licencia: CCBY NC-SA3.0IGO.
- OMS (2021). Contaminación del aire ambiente (exterior). Organización Mundial de la Salud Sitio web: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).
- PAOT (2003). Informe Anual Apéndice Temático Documentos de Referencia. uso de Suelo. Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial de la CDMX, sitio web: [https://Paot.Org.Mx/Centro/Paot/Informe 2003/Temas /Suelo.Pdf](https://Paot.Org.Mx/Centro/Paot/Informe%202003/Temas/Suelo.Pdf)

- Paramá R. (2006). Heterogeneidad Espacial de Nutrientes del Suelo en Ecosistemas Terrestres. tesis doctoral. Universidad de Vigo.
- Peterson P. (2007) Assessment of Exposure to Chemical Pollutants in Food and Water, In: Mineral Components in Foods, Szefer P. And Nriagu J.O. (Eds), 413-431, Taylor & Francis Group, ISBN
- POTmet (2016). Plan de Ordenamiento Territorial Metropolitano del AMG. México: Gobierno del Estado de Guadalajara.
- Ramírez J., González J., Ocete R., López M, (2002). Descripción geoestadística de la distribución espacial de los huevos del mosquito verde *Jacobiasca lybica* (Bergenin & Zanon) (Homoptera: Cicadellidae) en viñedo: modelización y mapeo., (Bol. San. Veg. Plagas, 28. Pág87-95)
- Rangel R. (2017). Metales tóxicos en alimentos. Revista del Instituto Nacional de Higiene, Vol. 48, 1-2
- Reyes O., Escalante R. y Matas A. (2010). La Demanda de Gasolinas en México: Efectos y Alternativas ante el Cambio Climático. México: Economía: Teoría y Práctica, vol. 32
- Rodríguez D. (2017). Intoxicación ocupacional por metales pesados. MEDISAN, (vol. 21, núm. 12, 2017), 7003-7016
- Rodríguez J., Y Altamirano, M. (2006). Vanadio: Contaminación, Metabolismo y Genotoxicidad. Rev. Int. Contam. Ambient, vol.22 (4) 173-189.
- Rosas J. Y Sánchez A. (2019). El Alcance de los Enfoques de Vulnerabilidad y Pobreza para la definición de la Población, objetivo en Programas Sociales. México, vol. XXVIII, 351-376
- Rubio C., González D., Izquierdo R., Rodríguez I., Revert C. y Hardisson A. (2007) El Zinc: Oligoelemento Esencial. Nutr Hosp. 101-107.
- Sánchez D. Y Egea C. (2011). Enfoque de Vulnerabilidad Social para Investigar las Desventajas Socioambientales. Su Aplicación en el Estudio de los Adultos Mayores. Papeles de Población. 182-185
- Secretaría de Salud Gobierno del Estado. (2020). PERFIL NACIONAL DE RIESGOS. Secretaría de Salud Subsecretaría de Prevención y Promoción de la Salud Dirección General de Epidemiología, Vol1, 133 a 142.

- Servicio Geológico de mexicano. (2022). Índice de Cartas Esc. 50,000. México. Gobierno Federal de México Recuperado de <https://www.sgm.gob.mx/CartasDisponibles/>
- SEMARNAT/SSA1-2004, NORMA Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente y criterios para su evaluación
- SEMARNAT/SSA1-2004, NORMA Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, (2007). 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. Estados Unidos Mexicanos. - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- SEMARNAT (2014). ProAire Jalisco 2014 - 2020. Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial, SEMARNAT, BIENESTAR, Gobierno del Estado de Jalisco, 257.
- SEMARNAT (2020). ProAire Jalisco 2014 - 2020. México. Gobierno de Jalisco. Poder Ejecutivo. Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial. Estados Unidos Mexicanos. Recuperado de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/418381/13\\_ProAire\\_Jalisco.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/418381/13_ProAire_Jalisco.pdf)
- SGM (2022). Geoinfomex en 3D. Servicio Geológico Mexicano, sitio web: [whttps://www.gob.mx/sg](https://www.gob.mx/sg) Geoinfomex en 3D. (2022, 22 De junio). Servicio Geológico Mexicano. <https://www.gob.mx/sg>. M.
- Sharma R., Flora J., Drown D. y Oberg S. (1987). Persistence of Vanadium Compounds in Lungs After Intracheal Instillation in Rats. Toxicol. Vol. 3, 321-329
- Sierra M. (2005). Niveles de Metales Pesados y Elementos Asociados en Suelos de la Provincia de Almería. Parámetros que los Afectan y Riesgos de Contaminación. Granada, Tesis para obtener el Grado de Dr. En Farmacias.
- Sobolev D. y Begonia M. (2008) Effects of Heavy Metal Contamination upon Soil Microbes: Lead-Induced Changes in General and Denitrifying Microbial



- Communities as Evidenced by Molecular Markers. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 5, 450-456.  
<http://dx.doi.org/10.3390/ijerph5050450>
- Software: Arcgis [Software GIS]. Version 10.5 Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute, Inc., (2010)
- Tchounwou, P., Yedjou, C., Patlolla, A., Sutton, D. (2012). Heavy metal toxicity and the environment. *Experientia supplementum*, 101, 133–164.
- Tomlinson D., Wilson J., Harris C. y Jeffrey D. (1980). Problems in the Assessment of Heavy Metal Levels In Estuaries and the Formation of a Pollution Index. *Helgolander Meeresun.* 33, 566-575.
- Turner B., Kaspersonb R., Matson P., Mccarthy J., Corell R., Christensen L., Eckley N., Kasperson J., Luers A., Martello M., Polsky C., Pulsipher A., y Schiller A. (2003). a Framework for vulnerability analysis in Sustainability Science. *PNAS*, vol. 100.
- Whittow, J. (1988). *Diccionario de Geografía Física*. Madrid: Alianza. Diccionario, 442
- WHO. (2021). WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide, Geneva: World Health Organization; 2021. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- WHO (2022) Directriz de la OMS para el tratamiento clínico de la exposición al plomo [WHO guideline for the clinical management of exposure to lead]
- Witkowska D., Słowik J., y Chilicka K, (2021). Heavy Metals and Human Health: Possible Exposure Pathways and the Competition for Protein Binding Sites. Instituto de Ciencias de la Salud, Universidad de Opole, 68 Katowicka St., (<https://www.mdpi.com/journal/molecules>), 45-060.
- Xia D., Chen F., Bloemendal J., Liu X., Yu Y., Yang L. (2008), Magnetic properties of urban dustfall in Lanzhou, China, and its environmental implications: *Atmospheric Environment*, 42, 2198-2207.
- Zamora O. Lozano R. Samayoa H. Velázquez M y Prado B. Adecuabilidad y Comparación de Técnicas Espectroscópicas para el Análisis de Muestras de Origen Geológico. *Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 35, 65-79, Universidad Nacional Autónoma De México.