

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

DIAGNÓSTICO DE LÍNEA BASE DE LA
GEODISPONIBILIDAD Y BIOACCESIBILIDAD
GÁSTRICA E INTESTINAL DE METALES
ASOCIADOS A ESTRÉS OXIDATIVO EN
POLVO URBANO Y PARQUES DE
HERMOSILLO, SONORA.

TESIS

Que para obtener el Grado de:
Maestro en Ciencias-Geología.



PRESENTA:

UZI RAXEL CASTILLO MORALES.

Hermosillo, Sonora a Noviembre de 2013.

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



“El saber de mis hijos
hará mi grandeza”



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

Financiamiento

Este trabajo recibió financiamiento del Proyecto de Ciencia Básica CONACYT *Caracterización espacio-temporal de trazadores geoquímicos en partículas para identificación de fuentes geogénicas y de tráfico en zonas áridas y relación con biomarcadores de daño genotóxico: Hermosillo, Sonora.*

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por otorgarme la beca de manutención durante el curso de mi maestría en el período de Julio de 2011 a Julio de 2013, con número de Becario/Registro: 290673/412960.

A la Universidad de Sonora, por de nueva cuenta abrirme sus puertas y permitirme ser parte de su excelente formación académica.

Al Departamento de Geología de la Universidad de Sonora por la disponibilidad de interacción entre disciplinas ya que en mi caso que soy Químico Biólogo Clínico pude sentirme parte del área.

Al laboratorio de Geoquímica y Cristalografía de la Universidad de Sonora por ser la columna vertebral de este proyecto.

Al Departamento de Ingeniería Química y el Laboratorio de Metrología por la realización de análisis en sus instalaciones.

A la Estación Regional del Noroeste (ERNO) perteneciente a la Universidad Autónoma de México por su apoyo académico así como en el trabajo de laboratorio.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, específicamente al Laboratorio de Geoquímica Ambiental y al Laboratorio de Física de Suelos del Instituto de Geología por su disponibilidad en la realización de diversos análisis.

Al Servicio Geológico Mexicano, por permitir el acceso a sus equipos de laboratorio.

A mi directora de tesis, la Dra. Diana María Meza Figueroa, por mostrarme la Geología y darme participación en su proyecto, sus conocimientos transmitidos y la guianza en todo momento. Sin duda, un honor; Gracias Siempre.

Al Dr. Agustín Gómez Álvarez por su gran apoyo a lo largo del desarrollo de este trabajo, su vasta experiencia fue y es un ejemplo a seguir.

Al Dr. Rafael Del Río Salas por el apoyo extendido y disposición en toda actividad de mi tesis, así como su agradable amistad.

Al M. C. Francisco Grijalva Noriega por aceptar ser parte de mi trabajo y sus aportaciones al beneficio de la tesis en cuestión.

Al Dr. Francisco Romero por mostrarme análisis de gran nivel y aceptar participar en este proyecto, así como a su equipo de trabajo de laboratorio: Fabiola Vega, Inés Ramos, Dra. Lucy Mora, René Alcalá, Isabel Pérez, Daniel Ramos y Francisco Ziegler.

DEDICATORIAS

Al Infinito Dios. Juan 15:16.

A mi adorada Andrea y mi adorado Mariano, nunca estaré lo suficientemente agradecida por ser mis padres por elección; en definitiva todo lo que soy es por ellos y para ellos.

A mis padres biológicos Carmen y José, siempre habré de llevarlos conmigo y también dedicarles mis logros, un amor diferente pero bien recibido. A mis hermanos: Caty, Idriss, Sharon, Michelle, Idriss y Beto; aunque los sentimientos sean a distancia siempre serán parte de mi ser y corazón. A mis tios-hermanos: Mario, Demetrio, Lussy, Ramón, Jorge y Dan, por cada enseñanza, palabra y muestra de amor. Los quiero mucho.

A mis tias-cuñadas: Sandra, Ana, Luz. Mis primitos-sobrinitos, por cada momento grato.

A Yolanda Camacho, un Ángel a mi vida, no hay mejor definición.

A mis hermosas compañeras de equipo de trabajo: Belem, Vero y Karina, invaluable amistad.

A mis amigos: Arturo Barrón, Alejandra Gómez y Yolanda Aguilar, por prestarme atención y ayuda a la hora de necesitar conocimientos relacionados con sus áreas de Geología e Ingeniería Química.

A mis compañeros de maestría por su agradable amistad: Jesé, Marcus, Elizard, George, Santino, Genaro, Alex Saiz, Absalon, Santa, Ángel Olguín, Emmanuel Mendoza.

A mis amigos de licenciatura de Geología, Ingeniería de Minas, Arquitectura, Maestría en Polímeros, Maestría en ingeniería Química (Dedicatoria generalizada para no omitir nombres).

Roxana y Sergio, los mejores doblemente Ingenieros que conozco.

A las amigas más especiales y divertidas que tengo: Cendy, Marisol y Karina.

A las familias Zaragoza López, González Cruz, Ramírez Preciado y Lerma Jaloma por crearme una mejor estancia aquí en Hermosillo. Además Sra. Mireya y Sr. Nicolás Valle que me han acompañado.

A Victor Emilio, una amistad solo de Bendición.

RESUMEN

Se realizó un estudio sobre la distribución espacial de Cu, Mn, Pb, Cd y Zn en muestras de polvo urbano (calles y parques) de la ciudad de Hermosillo, Sonora, con el objetivo de identificar niveles de contaminación y origen (geogénico vs antropogénico) así como los riesgos posibles a la salud humana asociados a la concentración total y bioaccesible de metales posiblemente causantes de estrés oxidativo.

El estudio se enfocó a tres fracciones granulométricas: menor a 0.044 mm (considerada respirable), de 0.044 mm (posible vía de ingestión), y 0.072 mm (geofagia, pica). En las tres fracciones se estudió i) la concentración total de los metales de estudio, ii) la bioaccesibilidad en fluidos gástricos e intestinales, en función de la granulometría, iii) la asociación a distintos grupos mineralógicos por medio de la técnica de extracción química secuencial de Tessier: intercambiable, carbonatos, sulfatos y materia orgánica, óxidos de hierro y manganeso y fracción residual. Adicionalmente se estimó la capacidad de intercambio catiónico y se realizó un estudio textural en cuatro muestras representativas de zonas con alta y baja incidencia de Diabetes Mellitus en la ciudad de Hermosillo (datos de epidemiología espacial reportados en literatura). Para evaluar el nivel de contaminación se utilizó el Índice de Contaminación considerando valores de fondo geoquímico locales, los cuales fueron verificados con valores de estándares como la corteza superior, promedios de suelos a nivel mundial y datos de rocas locales. La identificación de un origen geogénico o antropogénico se realizó a partir del cálculo del Factor de Enriquecimiento.

En todos los metales estudiados, el contenido total se incrementa a medida que el tamaño de partícula disminuye, sin embargo las pruebas de bioaccesibilidad indican un comportamiento variable. El cobre presenta los mayores porcentajes de bioaccesibilidad, principalmente en las muestras tomadas en zonas de alto tráfico, con valores de 29% en fluido gástrico y hasta 36.4% en fluido intestinal. El zinc también presenta altos niveles de bioaccesibilidad con porcentajes variables para fase gástrica de 5.2 a 18.1% y de 0.1 a 21.7% en fase intestinal. El plomo presenta alta variación en bioaccesibilidad con rangos de 2.6 a 11.3 % en fase gástrica y 0.3 a 8.8 % en fase intestinal. El porcentaje de bioaccesibilidad para manganeso no excede el 6% en fase gástrica y el 4.6% en fase

intestinal. El cadmio no presenta niveles de bioaccesibilidad superiores al límite de detección del equipo por lo que se puede considerar poco o no bioaccesible.

El estudio de extracción química de Tessier muestra los siguientes resultados: El Cu se asocia a carbonatos en porcentajes mayores al 95% en la muestra más impactada por tráfico (calles con límites de velocidad de 60 kph), mientras que se asocia a fracción residual en un 32% y materia orgánica/sulfuros en un 80% en muestras ubicadas en zonas con tráfico intermedio (límite de velocidad de calle de 50 kph). El Cd se asocia principalmente a carbonatos en porcentajes que exceden el 90% para todas las muestras estudiadas, en las dos fracciones granulométricas, considerando que los valores de Cd en las pruebas de bioaccesibilidad en fluido gástrico e intestinal no excedía el límite de detección del equipo, se recomienda el repetir la prueba de bioaccesibilidad utilizando un ICP-MS con límites de detección mucho menores que el equipo usado (ICP-OES). En el caso del plomo las muestras que presentan mayor bioaccesibilidad corresponden con las muestras que en el estudio de extracción química secuencial de Tessier muestran un alto porcentaje de asociación a fase de carbonatos y óxidos de Fe/Mn. El manganeso se asocia con más de 49% a la fase residual por lo que se considera poco biodisponible.

La distribución espacial de los metales posiblemente causantes de estrés oxidativo en la zona urbana es la siguiente: las mayores concentraciones de plomo en parques se concentra en la parte centro-norte de la ciudad, con los máximos valores reportados hacia el centro-este. El cobre en parques presenta alta concentración en gran parte de la mancha urbana, principalmente en el oeste, noreste y sureste de la ciudad. Manganeso no presenta valores muy por encima del fondo geoquímico, sin embargo zinc en parques tiene la misma distribución espacial y nivel de contaminación que el cobre. Los metales estudiados en calles presentan similar distribución espacial que los parques, sin embargo las áreas de influencia son más extendidas y los niveles de contaminación son significativamente más altos. De acuerdo a los resultados del Índice de Contaminación, el cobre, plomo, zinc y cadmio presentan niveles de contaminación extremadamente altos, tanto para parques como para calles, lo que puede representar un riesgo a la salud, principalmente en las zonas de incidencia de enfermedades cuyos efectos asociados a los tratamientos son potenciados por el estrés oxidativo (diabetes, cardiovasculares y neoplasmas). En comparación con parques

y calles de otras ciudades del mundo, un resultado significativo de esta investigación es que Hermosillo presenta niveles de contaminación similares a las megaciudades o ciudades con alta industrialización como Hong Kong, Urumqi en China, y Newcastle en Inglaterra.

ABSTRACT

A study was conducted on the spatial distribution of Cu, Mn, Pb, Cd and Zn in dust samples (streets and parks) of the city of Hermosillo, Sonora, with the objective of identifying levels of pollution and origin (geogenic vs anthropogenic) as well as the possible risks to human health associated with the total concentration and bioaccessible fraction of metals that possibly cause oxidative stress.

The study focused on three particle size fractions: less than 0,044 mm (considered breathable), of 0,044 mm (possible route of ingestion), and 0,072 mm (geophagy, pica). The following studies were conducted for the three granulometric fractions i) the total concentration of the metals, (ii) the bioaccessibility in gastric and intestinal fluids, iii) the association to different mineralogical groups by means of the technique of sequential chemical extraction of Tessier: interchangeable, carbonates, sulfates and organic matter, iron and manganese oxides, and residual fraction. In addition the cation exchange capacity was obtained and a textural study of four representative samples of areas with high and low incidence of diabetes mellitus in the city of Hermosillo (spatial epidemiology data reported in literature). To assess the contamination level the index values of pollution were estimated, considering local geochemical background, which were verified with values of standards such as the upper crust, average of soils worldwide and data from local rocks. The identification of a origin (anthropogenic vs geogenic) was conducted from the calculation of the enrichment factor.

In all the studied metals, the total content increases as the particle size decreases, however, the evidence of the bioaccessibility study indicate a variable behavior. Copper has the highest percentages of bioaccessibility, mainly in the samples taken in areas of high traffic, with values of 36.4 % in gastric fluid and up to 6.1 % in intestinal fluid. Zinc also presents high levels of bioaccessibility with varying percentages for gastric phase of 5.2 to 18.1 % and from 0.1 to 21.7 % in intestinal phase. Lead has a high variation in bioaccessibility with ranges from 2.6 to 11.3 % in gastric phase and 0.3 to 8.8 % in intestinal phase. The study of chemical extraction of Tessier shows the following results: Cd is mainly associated with carbonates in percentages that exceed 90% for all samples studied, in the two particle

size fractions. Cu is associated with carbonates in higher percentages to 95% in the sample more heavily impacted by traffic (streets with speed limits of 60 kph), while Cu is associated with residual fraction in a 32% and organic matter/sulfides in a 80% in samples located in areas with intermediate traffic (speed limit of 50 kph street).

In the case of lead samples that show the highest bioaccessibility correspond with the samples that the study of sequential chemical extraction of Tessier show a high percentage of association to carbonates (bioavailable).

The spatial distribution of metals possibly causing oxidative stress in the urban area is the following: the highest concentrations of lead in parks is concentrated in the part center-north of the city, with the highest values reported towards the middle-east. The copper in parks has a high concentration in a large part of the urban area, mainly in the west, northeast and southeast of the city. Manganese does not present values well above the geochemical background, however zinc in parks has the same spatial distribution and level of contamination that copper. The metals studied in streets present similar spatial distribution to the parks, however the areas of influence are more widespread and the pollution levels are significantly higher. According to the results of the index of pollution, copper, lead, zinc and cadmium contamination levels are extremely high for both parks and streets, which can represent a risk to health, primarily in the areas of incidence of diseases whose effects associated with the treatments are enhanced by the oxidative stress (diabetes, cardiovascular, and neoplasms). In comparison with parks and streets of other cities in the world, a significant outcome of this research is that Hermosillo shows contamination levels similar to mega-cities with high level of industrialization as Hong Kong, Urumqi in China, and Newcastle in England.

Tabla de Contenidos

	Página
AGRADECIMIENTOS.....	i
DEDICATORIA.....	ii
RESUMEN.....	iii
ABSTRACT.....	vi
TABLA DE CONTENIDOS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	xv
LISTA DE TABLAS.....	xi
OBJETIVOS.....	xv
Objetivo General.....	xv
Objetivos específicos.....	xv
I. INTRODUCCION.....	1
II. ANTECEDENTES.....	5
II.1. Metales y estrés oxidativo.....	5
II.1.1. Cadmio (Cd).....	6
II.1.2. Cobre (Cu).....	6
II.1.3. Manganeso (Mn).....	7
II.1.4. Plomo (Pb).....	8
II.1.5. Zinc (Zn).....	9
II.2. Fuentes geogénicas.....	9
II.3. Fuentes antropogénicas.....	10
II.4. Riesgos a la salud por exposición a metales.....	11
II.4.1. Edad.....	12
II.4.2. Relación entre estado de nutrición y exposición a contaminantes ambientales.....	13
II.4.3. Condiciones de salud pre-existentes.....	14
II.4.4. Nivel socio-económico.....	14
II.5. Biodisponibilidad y bioaccesibilidad.....	14
II.6. Estrés oxidativo asociado a fuentes de tráfico, enfermedades cardiovasculares y diabetes.....	16
III. AREA DE ESTUDIO.....	17
IV. METODOLOGIA DE MUESTREO Y TECNICAS ANALITICAS.....	19
IV.1. Muestreo de polvo urbano en parques y calles.....	19
IV.1.1. Muestreo de parques.....	19
IV.1.2. Muestreo de calles.....	21
IV.2. Técnicas analíticas.....	22
IV.2.1. Análisis granulométrico (caracterización física).....	23
IV.2.2. Metales.....	24
IV.2.2.1. Equipo portátil de espectrometría de fluorescencia de rayos X.....	24
IV.2.2.2. Extracción química secuencial (Método de Tessier).....	26
IV.2.2.3. Bioaccesibilidad: PBET (Physiologically Based Extraction Test).....	27
V. RESULTADOS Y DISCUSION.....	29
V.1. Distribución de metales en parques.....	29
V.2. Distribución de metales en calles.....	37
V.3. Comparación de concentración de metales y fondo geoquímico.....	45
V.4. Índice de contaminación.....	47
V.5. Factor de enriquecimiento.....	48
V.6. Bioaccesibilidad de metales en fase gástrica e intestinal.....	51
V.7. Extracción secuencial de Tessier: asociación de metales a fases minerales con distinta solubilidad.....	56
V.7.1. Metales en las fracciones geoquímicas.....	63
V. 8. Distribución espacial de algunas enfermedades en Hermosillo, Sonora, cuyos síntomas son potenciados por la exposición a metales causantes de estrés oxidativo.....	80

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	83
REFERENCIAS	86
ANEXO 1	
Tabla descriptiva del área de muestro de parques de la ciudad de Hermosillo, Sonora y coordenadas de los puntos de recolección realizados en este trabajo (Dato WGS 84, Zona UTM 12R).....	93
ANEXO 2	
Tabla descriptiva del área de muestro de calles de la ciudad de Hermosillo, Sonora y coordenadas de los puntos de recolección realizados en este trabajo (Datum WGS 84, Zona UTM 12R).....	95

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Modelo de interacción entre nutrientes y tóxicos. Modificada de Kordaset <i>al.</i> (2007).....	13
Figura 2. Representación esquemática de bioreactividad y biosolubilidad de varios geomateriales. Muchos tipos de materiales como los jales y suelos contienen una variedad de minerales con distintas solubilidades y bioreactividades, de tal manera que la posición de un material en la figura debe considerarse una aproximación (Figura modificada del Capítulo 9.07, Vol. 9, Treatise of Geochemistry)	15
Figura 3. Mapa de localización de Hermosillo, Sonora. Se indican las calles que tienen límites máximos de velocidad de 60 kilómetros por hora, así como los sitios de muestreo para el estudio de bioaccesibilidad y extracción secuencial química.....	18
Figura 4. Mapa con los puntos de muestreo de suelos de parques en Hermosillo, Sonora. La zona urbana está delimitada por la línea blanca.....	20
Figura 5. Mapa con los puntos de muestreo de polvo en calles de Hermosillo, Sonora. La zona urbana está delimitada por la línea blanca.....	22
Figura 6. Concentración total de cobre en muestras de polvo y estándares analizados por equipos portátiles de fluorescencia de rayos X del Laboratorio del Servicio Geológico Mexicano y del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México.....	25
Figura 7. Concentración total de plomo en muestras de polvo y estándares analizados por equipos portátiles de fluorescencia de rayos X del Laboratorio del Servicio Geológico Mexicano y del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México.....	26
Figura 8. Concentración total de zinc en muestras de polvo y estándares analizados por equipos portátiles de fluorescencia de rayos X del Laboratorio del Servicio Geológico Mexicano y del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México.....	26
Figura 9. Imagen del equipo utilizado para la determinación de bioaccesibilidad gástrica e intestinal de metales establecido por Ruby et al., 1993.	
Figura 10. Distribución espacial de cobre en muestras de parques para la ciudad de Hermosillo, Sonora.....	32
Figura 11. Estadística de contenido de Cu en mg.kg ⁻¹ en fracción menor a 0.044 mm y de 0.044 mm, de parques de la ciudad de Hermosillo.....	33
Figura 12. Distribución espacial de Mn en muestras de parques.....	34
Figura 13. Distribución espacial de Zn en parques.....	35
Figura 14. Distribución espacial de Pb en parques.....	36
Figura 15. Distribución espacial de Cu en calles.....	41
Figura 16. Distribución espacial de Mn en calles.....	42
Figura 17. Distribución espacial de Pb en calles.....	43
Figura 18. Distribución espacial de Zn en calles.....	44
Figura 19. Contenido de Cu en muestras de parques y calles, comparación con el fondo geoquímico de Zn en Hermosillo.....	46
Figura 20. Contenido de Pb en muestras de parques y calles, comparación con el fondo geoquímico de Zn en Hermosillo.....	46
Figura 21. Contenido de Zn en muestras de parques y calles, comparación con el fondo geoquímico de Zn en Hermosillo.....	47
Figura 22. Índice de contaminación para muestras de parques y calles.	48
Figura 23. Factor de enriquecimiento para cobre en muestras de parques y calles.....	49
Figura 24. Factor de enriquecimiento para manganeso en muestras de parques y calles.....	50

Figura 25. Factor de enriquecimiento para plomo en muestras de parques y calles.....	50
Figura 26. Factor de enriquecimiento para plomo en muestras de parques y calles de Hermosillo, Sonora.....	51
.....	
Figura 27. Distribución de cobretotal en función del tamaño de partícula.....	54
Figura 28. Distribución de plomo en función del tamaño de partícula (tamaño en mm).....	54
Figura 29. Distribución de zinc en función del tamaño de partícula (tamaño en mm).....	55
Figura 30. Mapa de localización de muestras estudiadas para las pruebas de bioaccesibilidad y extracción secuencial de Tessier <i>et al.</i> (1979).....	57
Figura 31. Distribución de metales en las fracciones geoquímicas estudiadas, tamaño granulométrico de 0.044 mm.....	66
Figura 32. Distribución de metales en las fracciones geoquímicas estudiadas, tamaño granulométrico menor a 0.044 mm.....	67
Figura 33. Distribución de metales en las fracciones residual y no residual para los tamaños granulométricos de 0.044 mm y menor a 0.044 mm.....	68
Figura 34. Distribución del Cu en las fracciones geoquímicas en función del tamaño granulométrico (0.044 mm y menor a 0.044 mm).....	70
Figura 35. Distribución del Pb en las fracciones geoquímicas en función del tamaño granulométrico (0.044 mm y menor a 0.044 mm).....	72
Figura 36. Distribución del Zn en las fracciones geoquímicas en función del tamaño granulométrico (0.044 mm y menor a 0.044 mm).....	74
Figura 37. Distribución del Cd en las fracciones geoquímicas en función del tamaño granulométrico (0.044 mm y menor a 0.044 mm).....	76
Figura 38. Distribución del Mn en las fracciones geoquímicas en función del tamaño granulométrico (0.044 mm y menor a 0.044 mm).....	78
Figura 39. Distribución espacial de incidencia de Diabetes, Neoplasmas y Enfermedades del Sistema Circulatorio.....	81
Figura 43. Distribución espacial de metales asociados a estrés oxidativo en función de sus fracciones geoquímicas y porcentaje de bioaccesibilidad.....	82

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Concentración promedio de metales en materiales de la corteza continental (rocas, suelos, sedimentos lacustres, sedimentos marinos. Todas las concentraciones son en mg.kg^{-1}	10
Tabla 2. Producción primaria global y emisiones de metales en los setentas y ochentas. Fuente: Nriagu (1979).....	11
Tabla 3. Especificaciones según la NMX-AA-132-SCFI-2006 para el muestreo de suelos en parques urbanos.....	19
Tabla 4. Concentraciones de referencia totales (CR_T) por tipo de uso de suelo.....	21
Tabla 5. Concentración de cobre en dos fracciones estudiadas: <0.044 mmy 0.075 mm, analizadas por la misma metodología (duplicados) en los laboratorios de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y del Servicio Geológico Mexicano (SGM).....	24
Tabla 6. Concentración de metales (mg.kg^{-1}) en muestras de parques analizados por equipos portátiles de Fluorescencia de Rayos X correspondiente al tamaño de partícula <0.044mm.....	29
Tabla 7. Concentración de metales (mg.kg^{-1}) en suelos de parques urbanos de varias ciudades. nr: no reportado.....	31
Tabla 8. Concentración de metales en muestras de calles fracción menor a 0.044 mm. Concentraciones expresadas en mg.kg^{-1}	37
Tabla 9. Concentración de metales (mg.kg^{-1}) en polvo de calle (urbandust) de varias ciudades. Abreviación nr: no reportado.....	40
Tabla 10. Concentración de metales (mg.Kg^{-1}) en muestras correspondientes al fondo geoquímico del área de estudio.....	45
Tabla 11. Datos de bioaccesibilidad de metales en polvo de calles de la ciudad de Hermosillo, Sonora, fase gástrica basado en el método PBET (Ruby <i>et al.</i> , 1992).....	52
Tabla 12. Datos de bioaccesibilidad de metales en polvo de calles de la ciudad de Hermosillo, Sonora, fase intestinal basado en el método PBET (Ruby <i>et al.</i> , 1992).....	52
Tabla 13. Concentración total de metales en muestras con granulometría menor a 0.044 mm.....	53
Tabla 14. Concentración total de metales en muestras con granulometría equivalente a 0.044 mm....	53
Tabla 15. Concentración total de metales en muestras con granulometría equivalente a 0.075 mm....	53
Tabla 16. Porcentaje de bioaccesibilidad de metales en fluidos gástricos e intestinales, fracción menor a 0.044 mm, 0.044 mm y 0.072 mm. No se reportan datos para Cd ya que los valores reportados están por debajo del límite de detección. Nr: valores por debajo del límite de detección, por lo que no se reportan. G: Fase gástrica, I: Fase intestinal.....	55
Tabla 17. Selección de muestras para estudio de fraccionación química, considerando zonas de diferencia nivel de incidencia de Diabetes Mellitus y Exposición a Tráfico Vehicular. * La incidencia de Diabetes Mellitus fue tomada de Freire De Carvalho (2009).....	57
Tabla 18 . Concentración de metales (mg.kg^{-1}) en las fracciones geoquímicas de muestras de polvos de calles de Hermosillo, Sonora con tamaño de partícula de 0.044mm.....	59
Tabla 19. Distribución porcentual de metales potencialmente tóxicos en las fracciones geoquímicas de muestras de polvos de calles de Hermosillo, Sonora con tamaño de partícula de 0.044mm.....	60
Tabla 20. Concentración de metales ($\mu\text{g/g}$) en las fracciones geoquímicas de muestras de polvos de calles de Hermosillo, Sonora con tamaño de partícula menor de 0.044mm.....	61
Tabla 21. Distribución porcentual de metales potencialmente tóxicos en las fracciones geoquímicas de muestras de polvos de calles de Hermosillo, Sonora con tamaño de partícula menor de 0.044mm.....	62

Continuación TABLAS.

	Página
Tabla 24. Análisis textural de las muestras de polvo seleccionadas para estudios de bioaccesibilidad.....	86

OBJETIVOS

Objetivo general

Identificar la distribución espacial de metales en polvo urbano que posiblemente aumenten el estrés oxidativo, así como su bioaccesibilidad y asociación a fracciones geoquímicas.

Objetivos específicos

- Identificar la distribución espacial y el nivel de contaminación de metales que posiblemente aumenten el estrés oxidativo.
- Evaluar la bioaccesibilidad y geodisponibilidad de metales relacionados al estrés oxidativo a partir del análisis de suelos de parques y polvo de calles de la ciudad de Hermosillo, Sonora.
- Identificar las zonas urbanas de mayor riesgo en complicación de tratamientos de enfermedades cuyos efectos son potenciados por estrés oxidativo, en particular Diabetes Mellitus, Neoplasmas y Enfermedades del Sistema Circulatorio.

I.INTRODUCCIÓN

La exposición crónica a contaminantes ambientales es un problema que se ha incrementado a nivel global, afectando de manera adversa la calidad de vida de gran parte de la población. Kordas *et al.* (2007) sugieren que las conexiones entre nivel nutricional, nutrientes y contaminantes ambientales derivados de fuentes geogénicas y antropogénicas no son triviales, sin embargo las interacciones entre estos factores no han sido investigados a la fecha. Metales como el cobre (Cu), plomo (Pb), cadmio (Cd), zinc (Zn) y arsénico (As) han sido obtenidos de zonas mineras de manera intensiva a partir de la Revolución Industrial. Nriagu(1988) ha estimado que aproximadamente cerca de 0.5 (Cd) y 310 (Cu) millones de toneladas de estos metales han sido minadas y depositadas en la biósfera. Según Adriano (1986), en muchos casos, las contribuciones antrópicas de estas fuentes de metales exceden a las fuentes naturales como las erupciones volcánicas, intemperismo de rocas, incendios forestales, etc. Estos elementos tienen baja volatilidad, por lo que su emisión a la atmósfera en el pasado no era significativa, sin embargo con los procesos de fundición en la industria minera, los procesos de combustión en la industria general, el tráfico vehicular, la agricultura y las plantas generadoras de electricidad, se ha incrementado su tasa de emisión a la atmósfera de manera exponencial (Adriano, 1986). Se ha documentado que problemas de salud pública están asociados a la emisión de algunos de estos metales, por ejemplo el daño neurológico debido a exposición crónica a bajos niveles de Pb (Laidlaw y Filipelli, 2008), la enfermedad de Itai-Itai por exposición a Cd (Inaba *et al.*, 2005), y la carcinogénesis asociada a la exposición a Cr y Ni.

La evaluación de la dispersión de contaminantes por fuentes de tráfico es muy complicada en las zonas áridas debido a varios factores como: dirección del viento, humedad, presión atmosférica, distribución de edificios como barreras, topografía, escorrentía y zonas de inundación, tipo de rocas y suelos, etc. La caracterización y distribución espacio-temporal del material particulado de origen geogénico y su distinción de aquel de

origen antropogénico permite entender mejor el comportamiento de las fuentes de área y realizar una estimación del riesgo¹ más adecuada (exposición al tráfico).

La deposición de partículas previamente suspendidas y la erosión del suelo son las dos principales fuentes de polvo en las calles. Es común que otros materiales se integren a este polvo urbano, como los desechos industriales, las emisiones del tráfico vehicular y de los sistemas de calefacción, el material producto del deterioro, construcción y renovación de edificios, la corrosión de estructuras metálicas galvanizadas, desgaste de pinturas y esmaltes, etc. (Faiz *et al.*, 2009).

Hermosillo, Sonora es una ciudad que se ha caracterizado por su acelerado crecimiento urbano (tasa anual de 3.1%). Alcanzando una población de cerca del millón de habitantes. La ciudad cuenta con 12 parques industriales, 26 compañías manufactureras importantes y más de 100 compañías manufactureras de pequeña a mediana escala (Meza-Figueroa *et al.*, 2007; Del Río-Salas *et al.*, 2012), cuyos productos son principalmente del rubro automotriz, electrónico, químico, textil, y derivados del petróleo. Otra actividad económica importante en la región es la agricultura, ya que la Costa de Hermosillo ocupa el tercer lugar en volumen de producción en Sonora, después de los valles agrícolas del Yaqui y del Mayo (Liverman, 1990). El clima es seco con temperaturas mínimas en invierno de 14 °C y máximas en verano de 49 °C y lluvias entre 75 a 300 mm concentradas principalmente durante la época de verano (Meza-Figueroa *et al.*, 2007; Del Río-Salas *et al.*, 2012; Ramírez-Leal *et al.*, 2007). En los últimos años se ha generado una importación masiva a la ciudad de vehículos procedentes en su mayoría de los Estados Unidos y que representan un parque vehicular de más de diez años de antigüedad en promedio. La combinación de todos elementos aparentemente es el catalizador para un deterioro en la calidad del aire en la ciudad, ya que se ha documentado que la erosión natural de los suelos y la acción del tráfico representa la mayor contribución a la resuspensión del polvo. (De la Parra, 2008; Meza-Figueroa *et al.*, 2007; Del Río-Salas, 2012). Estudios previos indican una

¹Se define como riesgo a la probabilidad de un daño ó pérdida y puede considerarse como un producto de la probabilidad y la severidad de consecuencias específicas. El riesgo ambiental a la salud se define como la posibilidad de que los humanos sufran efectos adversos a su salud como consecuencia de una exposición aguda o crónica a un contaminante ambiental.

concentración elevada de V, Zn, Pb, Cr y Cd en la zona centro sur de la ciudad con respecto a la zona norte. La zona centro sur se caracteriza por ser zona de alto tráfico vehicular (Meza-Figueroa *et al.*, 2007). A la fecha se desconoce el impacto de la actividad de tráfico vehicular en la distribución espacial de metales y su posible efecto en la salud. Para poder evaluar esto, es necesario conocer la geodisponibilidad y la biodisponibilidad de los metales. Las enfermedades del corazón, diabetes mellitus y enfermedades cerebrovasculares son las tres principales causas de muerte en Sonora y México, para ambos sexos, pero Sonora tiene un incremento notable en la tasa de mortalidad debido a enfermedades del corazón en comparación con los niveles nacionales. Sonora tiene la mayor tasa de mortalidad por enfermedades cerebrovasculares, cardíacas y diabetes mellitus entre los estados del noroeste (Baja California, Baja California Sur y Sinaloa). El alto consumo de grasas, bajo consumo de vitaminas, y los altos índices de sobrepeso en la población sonorenses pueden ser factores importantes para incidencias de neoplasmas. Se ha reportado que la mortalidad por cáncer mamario es mayor en Hermosillo (20 muertes por 100 000 mujeres por año) en comparación con el resto del estado (13 muertes por 100 000 mujeres por año). A la fecha se realizan varios proyectos simultáneos para entender la incidencia de cáncer y diabetes mellitus en Sonora, sin embargo, se tiene poca información sobre la posible influencia de los factores ambientales en el desarrollo de estas enfermedades. Un estudio de Freire de Carvahlo (2009) basado en datos de 4420 muertes geocodificadas en Hermosillo, muestra que las tres principales causas de muerte son isquemia miocárdica (28%), neoplasmas (20%) y enfermedades del sistema endocrino, incluyendo diabetes mellitus (14%). De acuerdo con este estudio, la mayor tasa de mortalidad se encontró en la parte central de la ciudad, que es también la más antigua y con la población de mayor edad. Estos datos corresponden espacialmente con la distribución elevada de metales reportada por Meza-Figueroa *et al.*, (2007).

Se ha documentado (Rioux *et al.*, 2011; Parker *et al.*, 2002) que la respuesta a la exposición de metales por tráfico vehicular de pacientes diagnosticados con Diabetes Tipo 2 que son insulino dependientes varía en comparación con pacientes que reciben medicamentos tipo OHAs (medicamentos hipoglicemicos orales: metformina). Entre estos dos grupos, se ha probado que los diabéticos insulino dependientes son más vulnerables a los efectos de

exposición a tráfico (Rioux *et al.*, 2011), sin embargo se desconoce si la respuesta es modificada por la medicación o existen otras causas que favorezcan los efectos anti-inflamatorios de los medicamentos tipo OHA con respecto a la insulina. En México, los tumores malignos ocupan el tercer lugar entre las principales causas de muerte, por debajo de los decesos por enfermedades cardiovasculares y las enfermedades endocrinas, nutricionales y metabólicas (Freire de Carvahlo, 2009). Existe información publicada que muestra que el tratamiento antineoplásico incrementa el nivel de estrés oxidativo y la formación de carbonilos ² (Fuchs-Tarlovsky *et al.*, 2011). Lyons y Jenkins (1997) propusieron al estrés carbonílico como un mecanismo patogénico relevante en el envejecimiento fisiológico, y en patologías como Diabetes Mellitus, insuficiencia renal y síndrome de Alzheimer. Los metales Cu, Mn, Pb, Cd, y Zn se asocian a fuentes de tráfico y son causantes ó potenciadores de estrés oxidativo. Entender si existe una asociación espacial entre estos metales y la distribución de diabetes mellitus, neoplasmas y enfermedades del sistema circulatorio en Hermosillo es importante para asegurar una correcta respuesta a los tratamientos de atención de estas enfermedades. Para ello es fundamental no solo identificar la distribución espacial de estos metales causantes/potenciadores de estrés oxidativo sino además entender los siguientes aspectos: i) si su origen es geogénico ó es antropogénico, ii) su geodisponibilidad, iii) su bioaccesibilidad.

El uso de trazadores geoquímicos para identificación de fuentes de tráfico es una herramienta muy útil en la evaluación del impacto antropogénico vs. geogénico. Para este trabajo se propone trabajar con suelos totales y la fracción equivalente a la PM₅₀ (fracción que se resuspende fácilmente y de tamaño 0.044 mm) de parques y calles distribuidos en la ciudad. Se busca evaluar la bioaccesibilidad de los metales Cd, Cu, Pb, y Zn en muestras de polvo urbano y su geodisponibilidad mediante el uso de técnicas de extracción química secuencial para entender la relación de los metales asociados al estrés oxidativo con distintas fases minerales como carbonatos, sulfuros, y silicatos. La distribución espacial de la información obtenida se comparará con la incidencia de diabetes mellitus, neoplasmas y

²El término carbonización o formación de carbonilos se refiere a una modificación no-enzimático irreversible de las proteínas. Los carbonilos pueden ser generados directamente en la proteína al reaccionar esta con las especies reactivas de oxígeno.

enfermedades del sistema circulatorio en la ciudad para identificar áreas geográficas donde puede incrementarse el estrés oxidativo y que pueden, eventualmente, representar un mayor riesgo para los tratamientos de estas enfermedades.

II. ANTECEDENTES

II.1. Metales y estrés oxidativo

El estrés oxidativo en el cuerpo es aquel causado por el daño acumulativo por la formación de radicales libres que no son neutralizados por antioxidantes (Valko *et al.*, 2005). El estrés oxidativo puede ser causado por múltiples causas, entre las que se incluye la exposición a algunos metales que promueven la formación de estos radicales libres³ (Gutiérrez, 2002). Entre los metales que causan estrés oxidativo están: hierro (Fe), cromo (Cr), vanadio (V), y cobalto (Co) que intervienen en reacciones oxido-reducción. Un segundo grupo de metales: mercurio (Hg), cadmio (Cd) y níquel (Ni), sigue una ruta primaria para su toxicidad basada en la unión de grupos de proteínas ligadas a sulfhidratos. El arsénico (As) se liga directamente a tioles críticos así como a la formación de peróxido de hidrógeno bajo condiciones fisiológicas. El factor que tienen en común estos metales en términos de su toxicidad es la generación de especies reactivas de oxígeno y nitrógeno (Gutiérrez, 2002). Se ha documentado que el manganeso (Mn) y el plomo (Pb) pueden causar daño oxidativo a la membrana de las células (Xu *et al.*, 2013; Gurer-Orhan *et al.*, 2004). Por otro lado, se reportó que el zinc (Zn) juega un papel muy importante en mantener la integridad del ADN en la prevención del estrés oxidativo Gutiérrez, (2002).

El estrés oxidativo es factor clave de riesgo en varias reacciones indeseables en organismos biológicos y daño celular, ya que está implicado en procesos de algunas enfermedades incluyendo a la diabetes mellitus y enfermedades neurodegenerativas. Las células pancreáticas beta son susceptibles al daño por estrés oxidativo y puede causarles apoptosis

³Desde el punto de vista químico, los radicales libres son todas aquellas especies químicas, cargadas o no, que en su estructura atómica presentan un electrón impar en el orbital externo que les da una configuración espacial generadora de gran inestabilidad, señalado por el punto situado a la derecha del símbolo. Poseen una estructura birradicálica, son muy reactivos, tienen vida media corta por lo que son difíciles de dosificar. Desde el punto de vista molecular son pequeñas moléculas ubicuitarias y difusibles que se producen por diferentes mecanismos entre los que se encuentran la cadena respiratoria mitocondrial y las reacciones de oxidación, por lo que producen daño celular (oxidativo) al interactuar con las principales biomoléculas del organismo (Gutiérrez, 2002).

por lo que se le atribuye que es un potencializador de la diabetes. Se ha documentado que la exposición crónica al cobre puede resultar en problemas con el hígado y enfermedades neurológicas (Uriu-Adams y Keen, 2005).

II.1.1. Cadmio (Cd)

El cadmio (Cd) tiene el número atómico de 48. En muchos aspectos el Cd es similar al Zn, de hecho en los depósitos minerales están comúnmente asociados. El Cd es dúctil, con un punto de fusión de 321 °C. Es de afinidad calcófila, al igual que el Zn. El Cd suele ocurrir en material particulado por sorción⁴, principalmente en arcillas. A pHs mayores a 8 la especie dominante es Cd²⁺. Tiene aplicaciones industriales en aleaciones, galvanizado, pigmentos de colorantes, baterías recargables, etc. En humanos las principales fuentes de exposición a Cd son agua y alimentos contaminados, contaminantes industriales y humo de cigarro. La bioacumulación de Cd en humanos puede provocar mayor incidencia de enfermedades como la disfunción renal, hepatotoxicidad, osteoporosis, cáncer, diabetes (Madeddu, 2005), ya que los principales órganos donde se acumula son: hígado, riñón, hueso y páncreas, siendo este último, usualmente, el más afectado. Estudios “in vivo” han demostrado que la bioacumulación de Cd en las células beta del páncreas causa un efecto dañino, inhibiendo la secreción de insulina, aumento en la intolerancia a la glucosa y tiene efectos diabetogénicos (se refiere a la disfunción de los islotes de Langerhans y un desequilibrio en la glicemia). La toxicidad del Cd a riñones lleva a una degradación del metabolismo de la vitamina D, lo que lleva a osteoporosis (Madeddu, 2005).

II.1.2. Cobre (Cu)

El cobre (Cu) tiene el número atómico 29. Iones de cobre existen en forma oxidada como cúprico (Cu²⁺) y en forma reducida como cuproso (Cu⁺). Funciona como cofactor y es necesario para la formación de propiedades estructural y catalítica de algunas enzimas importantes que participan en diversos procesos biológicos de desarrollo y crecimiento. Las principales fuentes de obtención al cuerpo son los alimentos y el agua. La absorción de cobre en el organismo depende de ciertos factores químicos así como de la presencia de

⁴El proceso de sorción puede definirse como la interacción de una fase líquida con una sólida y comprende en el detalle tres mecanismos: adsorción, precipitación superficial y absorción (Taylor y Ashcroft, 1972).

otros componentes nutricionales. Cerca del 30-50% de cobre ingerido es mayormente Cu^{2+} , el cual es absorbido en el intestino delgado y otra menor cantidad en el estómago. Una vez digerido en el intestino delgado es transportado a torrente sanguíneo por medio de la albumina y transcupreina, de tal manera que cuando llega al hígado es almacenado en los hepatocitos, secretado al plasma y excretado por la bilis. En el hígado es donde se concentra y sintetizado a cuproenzimas, por lo que en pequeñas cantidades es considerado un elemento esencial para las células y tejidos. El hígado normal de un adulto contiene de 18-45 $\mu\text{g Cu/g}$, mientras que la sangre contiene cerca de 6 mg de Cu. Según la Organización Mundial de la Salud los requerimientos necesarios de cobre en las mujeres es de 0.6 mg/day y 0.7mg/día para el hombre, por lo tanto, como puede notarse, las cantidades necesarias para el metabolismo son relativamente bajas, mismas que pueden presentarse en exceso cuando se tiene exposición accidental, exposición ocupacional, contaminación ambiental, etc. (Gaetke y Chow, 2003).

II.1.3. Manganese (Mn)

El manganeso (Mn) tiene el número atómico 25 y ocurre naturalmente en muchos tipos de rocas y suelos. El Mn es un elemento traza necesario para la salud, se utiliza en la industria siderúrgica para mejorar las propiedades mecánicas del acero. Se puede encontrar asociado a suplementos nutricionales, materiales de pirotecnia, baterías, fertilizadores, pinturas, cosméticos. También se agrega a la gasolina para incrementar el octanaje. La valencia del Mn mineral y el tipo de suelo determinan que tan rápido se mueve o es retenido en el suelo. En el agua, el Mn tiende a unirse a material particulado suspendido o a incorporarse a los sedimentos. Por otro lado, el manganeso de los aditivos de la gasolina puede degradarse en el ambiente rápidamente cuando es expuesto a la luz solar, liberándose al medio ambiente. No hay información toxicológica que vincule al Mn con la incidencia de cáncer. El manganismo es una enfermedad detectada en trabajadores de la industria siderúrgica expuestos a concentraciones de Mn que exceden en millones la concentración normal en la corteza terrestre. Exposición a muy elevadas concentraciones de Mn (más de 5 mg/m^3), puede resultar en problemas en riñones, tracto urinario y daño al sistema nervioso central. El consumo adecuado del Mn es de 2 a 5 mg por día para adultos (ATSDR, 2013).

II.1.4. Plomo (Pb)

El plomo (Pb) tiene el número atómico 82, es un metal azul-blancuecino de lustre brillante, suave, muy maleable, dúctil y un pobre conductor de la electricidad. Debido a estas propiedades y a su bajo punto de fusión (327 °C), así como su resistencia a la corrosión, el Pb ha sido usado en la manufactura de productos metálicos. La toxicidad del Pb también depende de su valencia y tiene dos estados de oxidación, +2 y +4. En el estado tetravalente el Pb es un poderoso agente oxidante pero no es común en la superficie terrestre, por otro lado, el Pb^{2+} es el más común y es ligeramente soluble. Los minerales de plomo más abundantes en la superficie terrestre son: galena (PbS), anglesita ($PbSO_4$), y cerusita ($PbCO_3$). Las fuentes antropogénicas más importantes de Pb son: gasolina (fuente menor, representa un pasivo ambiental del pasado, producto del uso de gasolina con tetraetilo de plomo), fundidoras, fábricas de pilas, combustión de carbón, incineración de basura (Keogh y Boyer, 2001). La toxicidad de Pb es mayor en la forma de tetraetilo de plomo (derivado de gasolinas con plomo ó de pasivo de gasolina con plomo en suelos) que el plomo inorgánico (mineral). La ruta de exposición a plomo es principalmente por ingestión y por inhalación. En el caso de la ruta de inhalación, la absorción (como el compuesto de Pb se hace soluble en fluidos corporales) es vía vapores ricos en plomo (combustión), compuestos volátiles orgánicos, o partículas con Pb que son solubles (Keogh y Boyer, 2001). Considerando la ingestión como ruta de exposición, la absorción es determinada por la forma, tamaño de partícula, absorción de hierro y calcio. El transporte bioquímico del plomo es a través de los glóbulos rojos, en complejos con hemoglobina, compuestos intracelulares de bajo peso molecular y proteínas de las membranas. Se distribuye principalmente a huesos, dientes, hígado, pulmones, riñones y cerebro. Sustituye al calcio en los huesos y puede ser re-movilizado a partir de ellos. Esto es importante porque precisamente esta sustitución de Pb^{2+} por Ca^{2+} (mímica del Pb por Ca en procesos bioquímicos) suele afectar a niños en crecimiento y adultos mayores, ambos grupos de población con requerimientos de calcio importantes: los primeros en crecimiento y los últimos por descalcificación (Keogh y Boyer, 2001). La excreción del Pb es a través de los riñones en la orina y en la bilis. La toxicidad del Pb afecta la concentración de los neurotransmisores (Lanphear *et al.*, 2000), interfiere con los procesos bioquímicos en el sistema nervioso central involucrando el calcio y también interfiere con otras funciones

renales (Keogh y Boyer, 2001). La exposición crónica a Pb en bajas concentraciones puede causar problemas de lento aprendizaje.

II.1.5. Zinc (Zn)

El zinc (Zn) tiene el número atómico 30, es un metal blanquecino, relativamente blando, con un punto de fusión de 419.6 °C, tiene una afinidad con el azufre (calcófilo). Los minerales de Zn más comunes son la esfalerita(ZnS), wurtzita(ZnS), smithsonita (ZnSO₃), willemita(Zn₂(SiO₄)) y zincita (ZnO) (Reinman y de Caritat, 1998). La ruta de ingestión favorece la absorción del Zn en el intestino, mientras que la ruta de inhalación favorece la absorción del Zn a través de las células epiteliales de los alveólos (Goyer y Clarkson, 2001). El Zn se une a la albúmina en el plasma sanguíneo a partir del cual se libera a otros tejidos, en donde el principal almacenamiento ocurre en el hígado, páncreas, hueso, riñón y músculos. La síntesis de la metalotioneína de Zn se estimula en el hígado lo que facilita la retención del Zn por los hepatocitos. El Zn en hueso es muy difícil de movilizar. El Zn se excreta en las heces vía la bilis y fluidos pancreáticos (Goyer y Clarkson, 2001). La excreción del Zn es muy lenta (vida media de 300 días). Se presentan efectos gastrointestinales si es ingerido; se asocia a irritación en el tracto respiratorio, dermatitis, y enfermedades degenerativas del sistema nervioso (Goyer y Clarkson, 2001).

II.2. Fuentes geogénicas

La principal fuente natural de metales en la naturaleza es la corteza continental, ya sea a partir de i) procesos de intemperismo (principalmente por el elemento agua) como los procesos de erosión (material particulado transportado por viento o por agua) en la superficie terrestre, ó ii) por emisiones a partir de actividad volcánica. Estas dos fuentes representan el 80% de todas las fuentes naturales. Los incendios forestales y las fuentes biogénicas representan el 10%. [Se estiman las siguientes cantidades emitidas por actividades antrópicas, por metal Pb: 12000 ton.año⁻¹, Zn: 1400 ton.año⁻¹, Cr: 43000 ton.año⁻¹, Cu: 28000 ton.año⁻¹ y Ni: 29000 ton.año⁻¹]. A partir de estos datos (Nriagu, 1979) es claro que las fuentes geogénicas son importantes en la emisión de metales a la atmósfera, sin embargo la toxicidad de los metales dependerá de su biodisponibilidad y no necesariamente de la cantidad en la que ocurre. Para comprender cuando la concentración

de metales representa una contaminación es necesario establecer una comparación con los valores promedio de la corteza o considerados como naturales (Tabla 1).

Tabla 1. Concentración promedio de metales en materiales de la corteza continental (rocas, suelos, sedimentos lacustres, sedimentos marinos. Todas las concentraciones son en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Material	Pb	Zn	Cd	Cu	Fuente
Corteza	14.8	65	0.10	25	Wedepohl (1995)
Granito	18.2	50	0.15	15	Adriano (1986)
Basalto	8	100	0.2	50	Drever (1988)
Lutita	23	100	1.4	50	Drever (1988)
Arenisca	10	16	<0.03	2	Drever (1988)
Caliza	9	29	0.05	4	Drever (1988)
Suelos	30	66	0.35	25	Kabata-Pendias (2000)
Sedimentos de arroyo	51	132	1.57	39	Drever (1988)
Sedimentos lacustres	22	97	0.6	34	Drever (1988)
Particulado en ríos	68	250	1.2	34	Drever (1988)
Sedimentos marinos someros	23	111	0.2	43	Li (2000)
Sedimentos marinos profundos (arcillas)	80	170	0.4	250	Drever (1988)

II.3. Fuentes antropogénicas

Los metales tienen múltiples fuentes antropogénicas, la principal de éstas es la actividad minera, en particular los procesos de fundición. La liberación de metales en zonas mineras es directamente a los ambientes fluviales, en particular a partir de los relaves o jales mineros, y hacia la atmósfera como polvo enriquecido en estos (Adriano, 1986). La fundición emite metales como resultado de los procesos de refinación a temperaturas muy elevadas. En la industria minera metálica ocurren las siguientes emisiones: beneficio de plomo, emite Pb-Cu-Zn-Cd; beneficio de cobre y níquel: Co-Zn-Pb-Mn, así como Cu-Ni; beneficio de zinc: Zn, Cd, Cu, Pb.

Se ha documentado que las emisiones de metales a la atmósfera liberadas de los procesos de fundición en la industria minero-metalúrgica está en un intervalo de dos veces (Cu, Ni), cinco veces (Zn, Cd) y treinta y tres veces (Pb) más que las emisiones naturales de fuentes geogénicas (Nriagu, 1979). Otra fuente importante de metales a la atmósfera incluye los procesos de quema de combustibles fósiles (carbón), incineración de basura municipal, producción de cemento, y minería de fosfatos (Nriagu y Pacyna, 1988). Otras fuentes

incluyen las aguas residuales, el uso de plaguicidas y fertilizantes y los desechos de animales. La Tabla 2 muestra que globalmente las emisiones de metales a los suelos fueron más importantes en cuanto a cantidad, también a su vez, el suelo es una fuente de emisión de material particulado a la atmósfera a partir de procesos de re-suspensión.

Tabla 2. Producción primaria global y emisiones de metales en los setentas y ochentas. Nriagu (1979).

Metal	Producción de metales		Emisiones a la atmósfera		Emisiones al suelo	Emisiones al agua
	1970s	1980s	1970s	1980s	1980s	1980s
Pb	3,400	3,100	449	332	796	138
Zn	5,500	5,200	314	132	1,372	226
Cd	17	15	7.3	7.6	22	9.4
Cr	6,000	11,250	24	30	896	142
Cu	6,000	7,700	56	35	954	112
Ni	630	760	47	56	325	113

II.4. Riesgos a la salud por exposición a metales

La importancia del estudio de contaminación por metales es atribuida al potencial riesgo para la salud pública asociados con la exposición a elementos potencialmente tóxicos. Las fuentes de contaminación de metales en el medio ambiente son principalmente derivadas de actividades antropogénicas que incluyen: emisiones de tráfico (partículas de escape de los vehículos, partículas de desgaste de neumáticos, degradado de partículas de calle, las partículas de desgaste de los frenos de automóvil, las emisiones industriales (centrales eléctricas de combustión de carbón, la industria metalúrgica, taller de reparación de automóviles, plantas químicas, etc). La estimación del riesgo a la salud humana incluye el entendimiento de la fuente de emisión de metales y de su forma de transporte. Las rutas de transporte de los contaminantes son muy variables y distintas para el medio acuoso (líquidos) o para el material particulado (sólidos).

Una vez que el contaminante entra en contacto con el humano (exposición) la bioaccesibilidad depende no solo de la composición y estructura del mineral o contaminante sino que además dependerá de la composición del fluido corporal con el que entra en contacto. En el caso de los minerales, debido a que tienen un amplio rango de composición, incluyendo pH y Eh, morfología y tamaño, la solubilidad de esto se

comportará muy diferente dependiendo de la ruta de exposición (inhalación, ingestión, contacto dérmico), del fluido corporal con el que entran en contacto y finalmente del resultado del fluido corporal una vez que el mineral es disuelto total o parcialmente (Ruby *et al.*, 1992, 1993).

Las pruebas de laboratorio de bioaccesibilidad se han utilizado para entender y medir la solubilidad a corto plazo de minerales en fluidos simulados parecidos al medio gástrico, intestinal y pulmonar (Ruby *et al.*, 1992, 1993). Adicionalmente a la toxicidad del material contaminante y a la ruta de exposición, existen factores que generan una condición de vulnerabilidad en la población y que se relacionan con aspectos de nutrición y socio-económicos. Los principales factores de riesgo por exposición a metales se enlistan a continuación:

II.4.1. Edad

Se considera que las poblaciones más vulnerables a la bioacumulación de metales son las personas mayores de 65 años y los niños menores de 9 años. En el caso de los adultos mayores, la edad tiene efectos importantes en numerosos órganos, principalmente en los riñones. Dentro del riñón, los cambios como la hipertrofia, glomeruloesclerosis y fibrosis tubulointerstitial llevan a alteraciones fisiológicas como cambios en la tasa de filtración glomerular y flujo renal plasmático. Estos cambios pueden afectar significativamente la función renal haciendo al riñón más vulnerable a la exposición a contaminantes, en especial los nefrotóxicos como el cadmio y el mercurio (Bridges y Zalups, 2013). Berglund *et al.* (2011) reporta diferencias significativas en la excreción de metales en orina de acuerdo a diferencias en el género, edad, uso de tabaco, estatus socioeconómico.

El grupo de personas mayores a 65 años se considera población vulnerable al riesgo ambiental porque son más susceptibles al daño por sustancias tóxicas al tener un sistema inmunodeprimido, una eventual presencia de enfermedades asociadas a la edad y la bioacumulación de agentes tóxicos por exposición crónica. En el caso particular de la contaminación atmosférica, aunque la exposición es general, se ha discutido que los grupos poblacionales no son igualmente vulnerables y que la edad es el factor más importante. Estudios publicados refieren un riesgo más elevado de mortalidad en adultos mayores e

infantes debido a exposición a niveles altos de material particulado en la atmósfera. (Makri y Stilianakis, 2008).

II.4.2. Relación entre estado de nutrición y exposición a contaminantes ambientales.

Kordas *et al.* (2007) determinó que la comida es uno de los principales vehículos para transportar elementos potencialmente tóxicos (Figura 1). Una segunda ruta de exposición es el estado nutricional de la persona, lo que puede facilitar o no la absorción del contaminante causando ya sea su retención o su biodisponibilidad. La tercera ruta de exposición considera que una vez dentro del cuerpo, los nutrientes y el metabolismo de los nutrientes pueden interactuar con el contaminante afectando así la salud del individuo (Figura 1). Otros factores a considerar son la edad y el género ya que también afectan el estado nutricional, por ejemplo las prácticas de los niños pequeños de llevarse a la boca todo objeto, comer tierra (pica ó geofagia), nutrición deficiente ya sea por malos hábitos alimenticios ó por pobreza, etc. En el caso de los adultos mayores también deben considerarse deficiencias nutricionales, osteoporosis y osteopenia, condiciones de pobreza, etc.

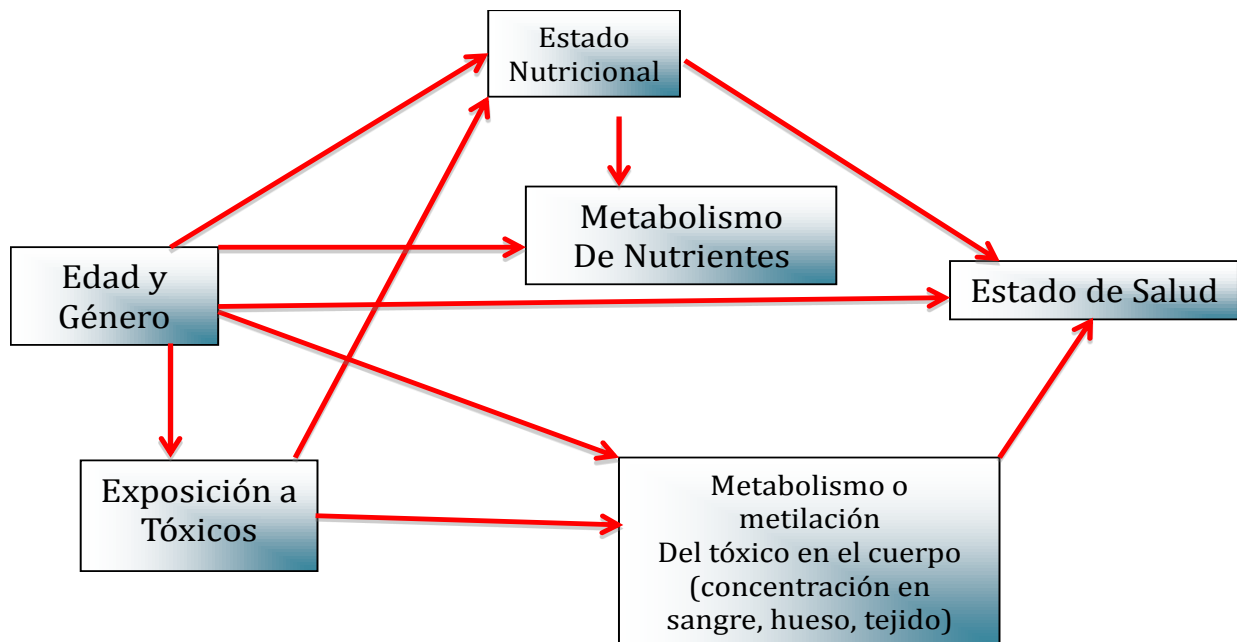


Figura 1. Modelo de interacción entre nutrientes y tóxicos. Modificada de Kordas *et al.* (2007)

II.4.3. Condiciones de salud pre-existent.

Los contaminantes atmosféricos pueden potenciar enfermedades pre-existentes como el asma y las alergias al verse aumentado el efecto inflamatorio sobre las vías respiratorias, la reactividad aérea aumentada, incremento de reactividad bronquial. Para el caso de individuos prenatales y de vida temprana existe una importante asociación entre la exposición a los contaminantes atmosféricos asociados a fuentes de tráfico y una sensibilización alérgica (Rioux *et al.*, 2011; Dijkema *et al.*, 2011).

II.4.4. Nivel socio-económico.

El sector de población más vulnerable a presentar afecciones en el organismo causadas por metales, es el de menor nivel socio-económico, ya que tiene mayor propensión a vivir y trabajar en lugares con mayor contaminación (fábricas, basureros, lugares de descarga de aguas residuales, etc.), con menor acceso a servicios médicos, con problemas de nutrición y falta de educación (Glorennec *et al.*, 2012).

II.5. Biodisponibilidad y bioaccesibilidad

Un suelo se considera contaminado con elementos tóxicos cuando las concentraciones totales superan las concentraciones de fondo o las concentraciones de referencia, dictadas por las autoridades ambientales. Sin embargo, cuando un suelo está contaminado no necesariamente implica que exista un peligro para la salud humana; ya que se requiere que los contaminantes estén en formas minerales disponibles, lo que depende de su solubilidad para ser absorbidos por los humanos (bioaccesibilidad⁵) (NOM 147 Semarnat /SSA1-2004). (Figura 2).

Conocer las concentraciones totales de los elementos a los que se está expuesto no es suficiente para conocer el riesgo a la salud sino que es necesario realizar estudios de bioaccesibilidad. De acuerdo a Ruby *et al.* (1992), la bioaccesibilidad absoluta de los

⁵La biodisponibilidad es la fracción soluble del contaminante ingerido que alcanza la circulación sistémica, hallándose así disponible para actuar en el organismo receptor. La bioaccesibilidad es la relación entre la concentración bioaccesible o soluble en fluidos corporales de un contaminante y la concentración total del mismo en la muestra total.

elementos potencialmente tóxicos es definida como la fracción de metales ingeridos y que es absorbida dentro del sistema circulatorio. El término es utilizado para definir la fracción de metales potencialmente tóxicos disueltos en el estómago y que están disponibles para la absorción durante su tránsito a través del intestino delgado (Ruby *et al.*, 1992). Los minerales bioreactivos son aquellos que tienen componentes con metales alcalinos solubles, como el cemento y el concreto, o bien, tienen componentes ácidos como los gases volcánicos o sales eflorescentes generadas en relaves mineros. Los minerales menos bioreactivos son principalmente algunos silicatos como anfíboles y cuarzos (Figura 2). La bioaccesibilidad aumenta a medida que el tamaño de los minerales disminuye, la morfología cristalina también es un factor importante en la bioaccesibilidad ya que cuando los cristales tienen menor grado de cristalinidad, o presentan texturas botroidales, framboidales o masivas, la bioaccesibilidad aumenta. Los carbonatos de Pb, Zn, Cu, Cd, Ni, y Ba son más bioaccesibles que los carbonatos de Mg o de Fe y Mn. Los sulfuros son menos bioaccesibles que los carbonatos mencionados y que los sulfatos (Plumlee y Ziegler, 2003).

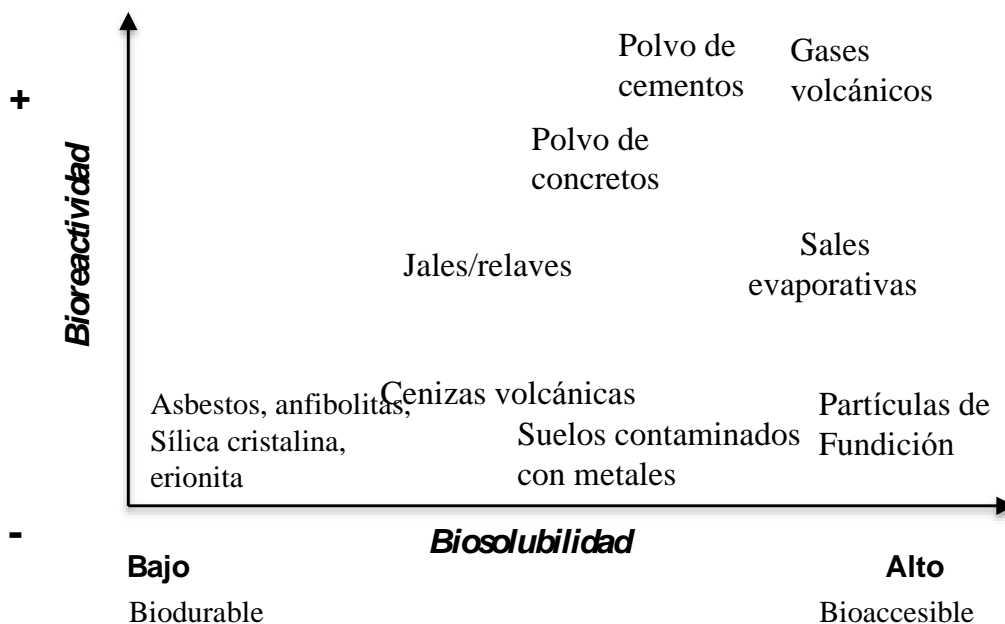


Figura 2. Representación esquemática de bioreactividad y biosolubilidad de varios geomateriales. Muchos tipos de materiales como los jales y suelos contienen una variedad de minerales con distintas solubilidades y

bioreactividades, de tal manera que la posición de un material en la figura debe considerarse una aproximación (Figura modificada del Capítulo 9.07, Vol. 9, Treatise of Geochemistry⁶).

II.6. Estrés oxidativo asociado a fuentes de tráfico, enfermedades cardiovasculares y diabetes.

Diabetes Mellitus (DM) es un conjunto de trastornos metabólicos que afecta diferentes órganos y tejidos durante toda la vida y se caracteriza por un aumento en los niveles de glucosa en la sangre. En la DM el páncreas no produce o produce muy poca insulina (DM tipo I) o las células del cuerpo no responden normalmente a la insulina que se produce (DM tipo II), esto evita o dificulta la entrada de glucosa en la célula aumentando sus niveles en la sangre (hiperglucemia). La hipoglucemia por otro lado, es la complicación más aguda de la DM, generalmente ocurre como una reacción a la insulina administrada a diabéticos. Factores de predisposición genética y factores ambientales son importantes en el desarrollo de DM. Antecedentes familiares, inactividad física, consumo excesivo de calorías, infecciones virales y medicamentos, han sido identificados como los principales factores de riesgo a padecer la enfermedad (Parker *et al.*, 2002).

La relación entre metales asociados a estrés oxidativo y efectos negativos en los tratamientos de la Diabetes Mellitus y neoplasmas fue reportada por Viktorinova *et al.*, (2009). El estrés oxidativo es factor importante de contribución en la patogénesis de varias enfermedades incluida la DM. Existe la contribución de otros factores como alteración en la homeostásis de algunos elementos traza que ayudan en el desarrollo y progresión de esta enfermedad. El Cu y Zn tienen un rol importante en el mecanismo oxidante/antioxidante y el desequilibrio de estos conduce a un incremento en la susceptibilidad de los tejidos hacia el daño causado por el estrés oxidativo, lo cual aporta complicaciones en la DM. El cobre actúa como pro-oxidante y puede participar en la formación de radicales libres. Por otro lado, Cu y Zn son componentes estructurales y catalíticos de algunas metaloenzimas. Por ejemplo, el cobre es necesario para la actividad catalítica de algunas

⁶Capítulo 9.07. The Medical Geochemistry of Dusts, Soils, and Other Earth Materials. G.S. Plumlee and T.L. Ziegler. Tratado de Geoquímica.

enzimas como Cu/Zn superóxido dismutasa, la cual actúa como protección a las células del radical superóxido. El Zn actúa como un agente antioxidante y protege a los grupos sulfidrilos y enzimas del ataque de los radicales libres en el cuerpo. Algunos investigadores proponen la hipótesis de que algunas proteínas glucosiladas se unen a metales como Cu y Fe y forman un importante rol en la etiología de la disfunción vascular periférica y neuropatías periféricas en la Diabetes Mellitus (Viktorinova *et al.*, 2009). La contribución de la exposición ambiental a metales potenciadores de estrés oxidativo no ha sido documentada (Viktorinova *et al.*, 2009), la mayoría de los estudios vinculan al estrés oxidativo con asociación espacial a zonas de alto tráfico, sin embargo no hay estudios detallados que indiquen si el origen de los metales es natural ó antrópico y el nivel de bioaccesibilidad de los metales.

III. AREA DE ESTUDIO

Hermosillo, Sonora se localiza en el paralelo 29° 05' de latitud Norte y el meridiano 110° 57' de longitud Oeste de Greenwich, a una altitud de 282 metros sobre el nivel del mar (Figura 3), y a 270 kilómetros de la frontera con los Estados Unidos. De acuerdo a INEGI (2010), la ciudad cuenta con 715, 061 habitantes. La ciudad de Hermosillo está rodeada por actividades de tipo industrial y agrícola, caracterizándose por un rápido índice de crecimiento. El clima en Hermosillo en su mayoría es cálido-seco, con temperaturas de 38°-42°C, durante el verano y con inviernos fríos llegando alcanzar 7° C (Meza-Figueroa *et al.*, 2007; Del Río-Salas *et al.*, 2012). Los suelos en Hermosillo están compuestos principalmente por limo y material calcáreo residual producto de la cobertura, con un pH de 7 a 8, estos suelos son clasificados como arcilla arenosa basados en el análisis textural (arena: 52.2%; arcilla: 31.2 %; limo: 16.36 %). La geología de Hermosillo puede simplificarse en cuatro dominios (1) calizas del Mesozoico, (2) intrusiones graníticas del Laramídico (90 a 40 Ma), (3) Flujos volcánicos del Mioceno, y (4) cubierta del Cuaternario Rocas sedimentarias y metamórficas (calizas, mármoles con wollastonita, corneanas) afloran en el Cerro de la Campana. (Del Río-Salas *et al.*, 2012).

La ciudad de Hermosillo cuenta con una superficie total de calles de 24, 661, 639 m², de los cuales un total de 18, 890, 821 tienen algún tipo de cubierta asfáltica o de concreto hidráulico, estimando un total de 79.96% de calles pavimentadas (<http://www.cocef.org>). De acuerdo al sitio www.cenapra.salud.gob.mx, Hermosillo contaba con un parque vehicular aproximado de 274,637 vehículos en el 2008. De ese parque vehicular, 183,749 se clasificaron como automóviles, 1077 camiones para pasajeros, 4242 motocicletas y 85,569 camiones y camionetas de carga. De acuerdo a los datos de población (INEGI 2010), el parque vehicular registrado establece que un 25.7% de la población tiene vehículo. La Figura 3 muestra las calles principales con límites máximos de velocidad de 60 kilómetros por hora, esto se consideró un indicador cualitativo de alto tráfico, al no contar con datos de aforo vehicular para toda la ciudad.

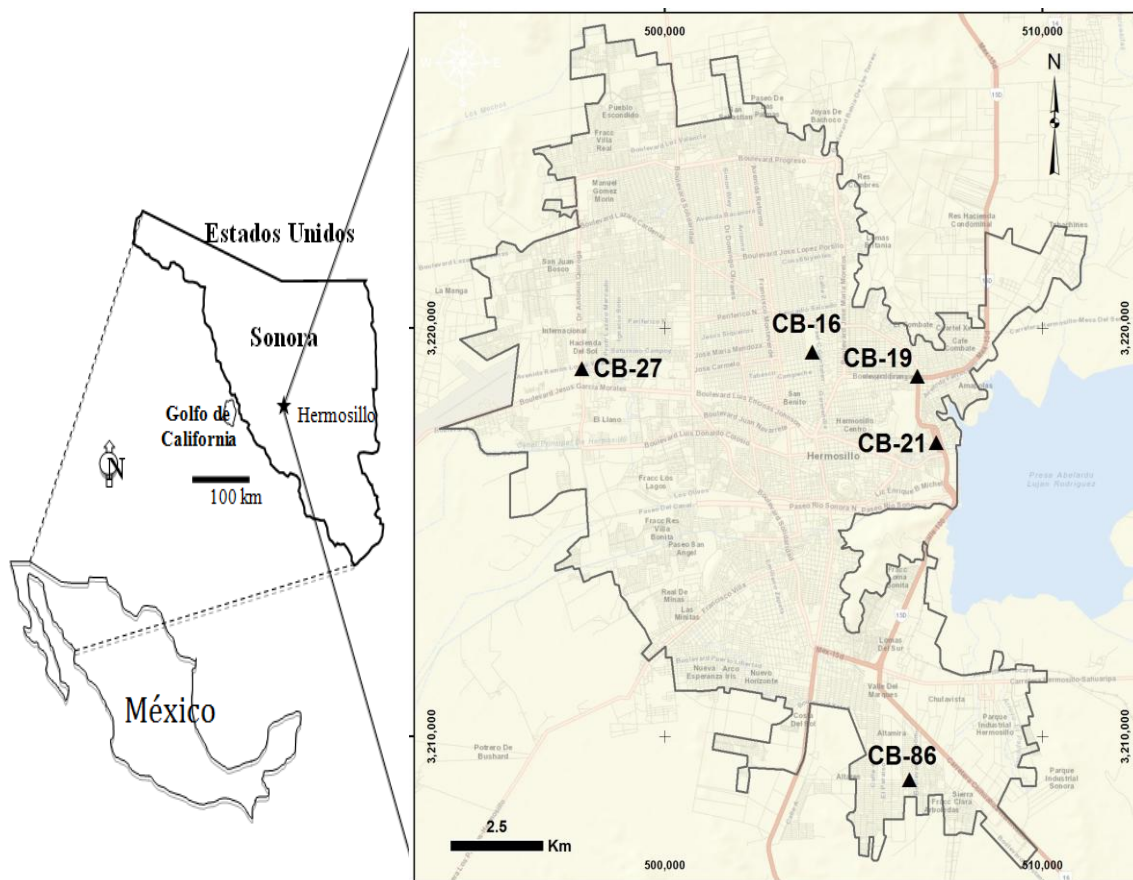


Figura 3. Mapa de localización de Hermosillo, Sonora. Se indican las calles que tienen límites máximos de velocidad de 60 kilómetros por hora, así como los sitios de muestreo para el estudio de bioaccesibilidad y extracción secuencial química.

IV. METODOLOGIA DE MUESTREO Y TECNICAS ANALITICAS

IV. 1. Muestreo de polvo urbano en parques y calles

IV.1.1. Muestreo de parques.

El muestreo de suelos se realizó de acuerdo a la norma oficial mexicana NMX-AA-132-SCFI-2006, Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra. Esta norma establece las especificaciones generales para el muestreo de suelos cuyo contenido de metales y metaloides requiere ser identificado y cuantificado en el sitio en estudio. Para la toma de muestra se utilizó una espátula de acero inoxidable y contenedores de plástico con polietileno de alta densidad bajo la técnica de muestreo en tresbolillo, la cual se basa en una muestra compuesta con cinco muestras simples, distribuidas uniformemente; la profundidad a la que se tomó la muestra no superó los cinco centímetros, de acuerdo a los criterios para muestreo superficial establecidos en la norma mencionada. Posteriormente se sigue un proceso de homogeneización utilizando bolsas de polietileno y haciendo girar la muestra en todas direcciones. Una vez etiquetadas y envasadas las muestras se llevaron al laboratorio para secado y tamizado. El secado de la muestra se realizó sobre charolas con profundidad inferior a 2.5 cm y a no más de 35 °C. Posteriormente las muestras se tamizaron a las mallas -200 (tamaño de partícula que pasa la malla es de 0.075 mm) y malla-325 (tamaño de partícula que pasa la malla es <0.044 mm).

El muestreo de suelos de parques en áreas urbanas se realizó de acuerdo a la Tabla 3, colectándose 64 muestras distribuidas en toda la ciudad (Figura 4). (en el anexo 1 se encuentra la descripción de los puntos de recolección y coordenadas de las muestras).

Tabla 3. Especificaciones según la NMX-AA-132-SCFI-2006 para el muestreo de suelos en parques urbanos.

Tipo de punto de muestreo	Equivalencia de muestras
Parques y jardines	La muestra equivale a una muestra compuesta que se formará con el número de muestras simples adecuado en función de la superficie del terreno.
Jardines de menos de 0.1 hectáreas	Tomar una muestra compuesta
Jardineras, cajetes y banquetas no cubiertas y calles no pavimentadas.	La muestra equivale a una muestra compuesta que se formará de 6 muestras simples tomadas en 100 metros lineales.

La norma oficial mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, 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 vanadio. Cuando el suelo que se presume contaminado tiene una superficie menor o igual a 1 000 m², el responsable procederá a remediar a las concentraciones de referencia totales (CR_T) señaladas en la Tabla 4.

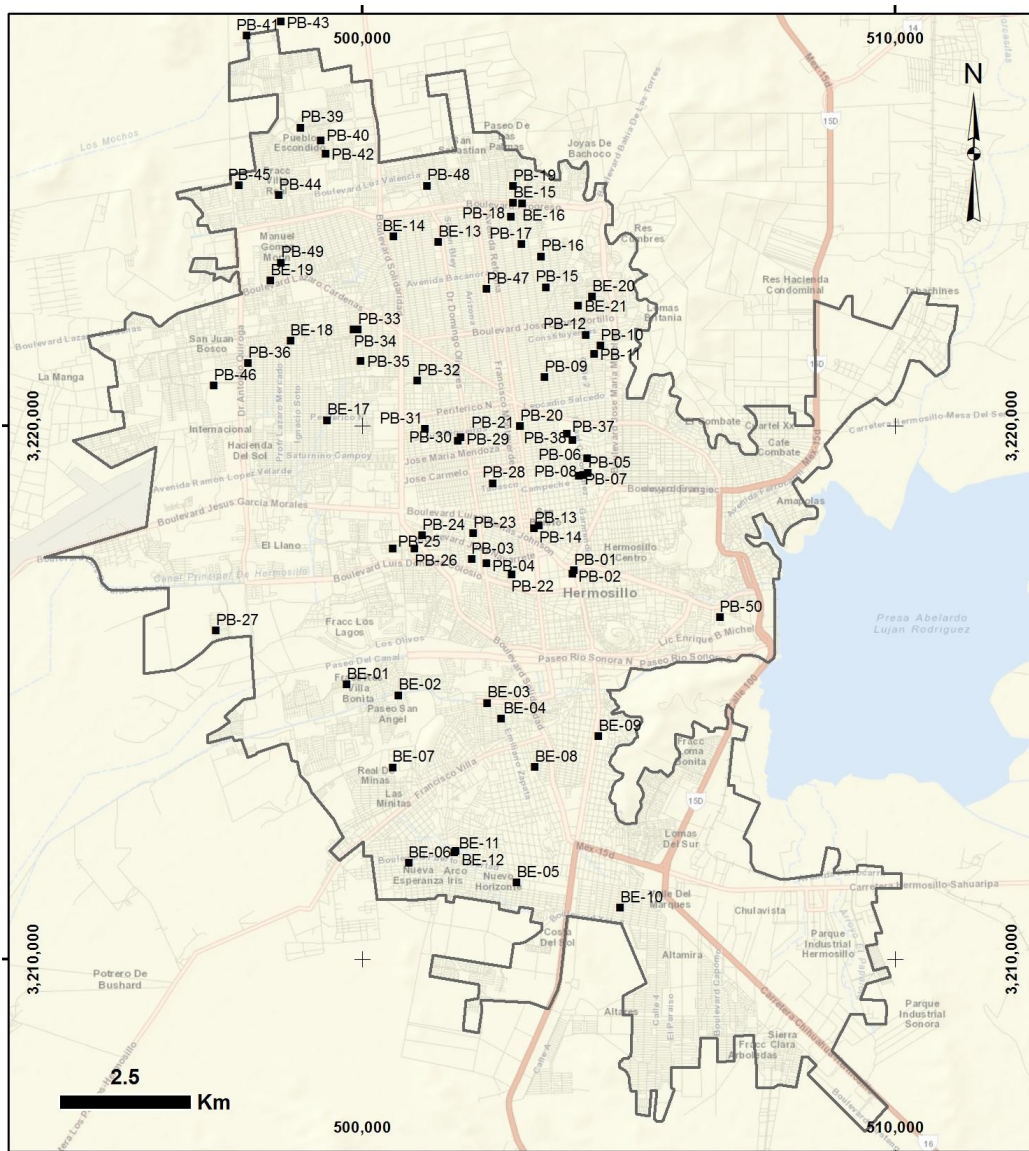


Figura 4. Mapa con los puntos de muestreo de suelos de parques en Hermosillo, Sonora. La zona urbana está delimitada por la línea blanca.

El suelo puede representar un riesgo para la salud de las personas, cuando al menos una de las concentraciones de los elementos regulados (CI_T) en esta norma se encuentre por arriba de las concentraciones de referencia totales (CR_T), ($CI_T > CR_T$), establecidas en la Tabla 4. Cuando las concentraciones iniciales sean menores o iguales a las concentraciones de referencia, ($CI_T \leq CR_T$), se considerará que el suelo no requiere de remediación.

Tabla 4. Concentraciones de referencia totales (CR_T) por tipo de uso de suelo.

Contaminante	Uso agrícola/residencial/comercial mg.kg ⁻¹	Uso Industrial mg.kg ⁻¹
Arsénico	22	260
Bario	5400	67000
Berilio	150	1900
Cadmio	37	450
Cromo Hexavalente	280	510
Mercurio	23	310
Níquel	1600	20000
Plata	390	5100
Plomo	400	800
Selenio	390	5100
Talio	52	67
Vanadio	78	1000

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

IV.1.2. Muestreo de calles

El muestreo de polvo de calles (polvo urbano) se llevó a cabo utilizando escobetillas y barriendo un área de 2m x 2m para colectarlo en contenedores esterilizados de polietileno de alta densidad, de acuerdo a los procedimientos sugeridos por Del Río-Salas *et al.* (2012) y DeOcampo *et al.* (2012). Se colectaron 107 muestras de polvo de calles, las muestras fueron secadas a menos de 40° C y posteriormente tamizadas a la malla 325. (en el anexo 2 se encuentra la descripción de los puntos de recolección y coordenadas de las muestras).

La distribución espacial del muestreo se indica en la Figura 5, la densidad de éste, está relacionada con la densidad de calles pavimentadas y afluencia de tráfico (en particular el transporte público aumenta su circulación en esta zona) en la ciudad, siendo mayor hacia la zona centro de la mancha urbana, la que coincide con una zona comercial importante, incluyendo a la Universidad de Sonora.

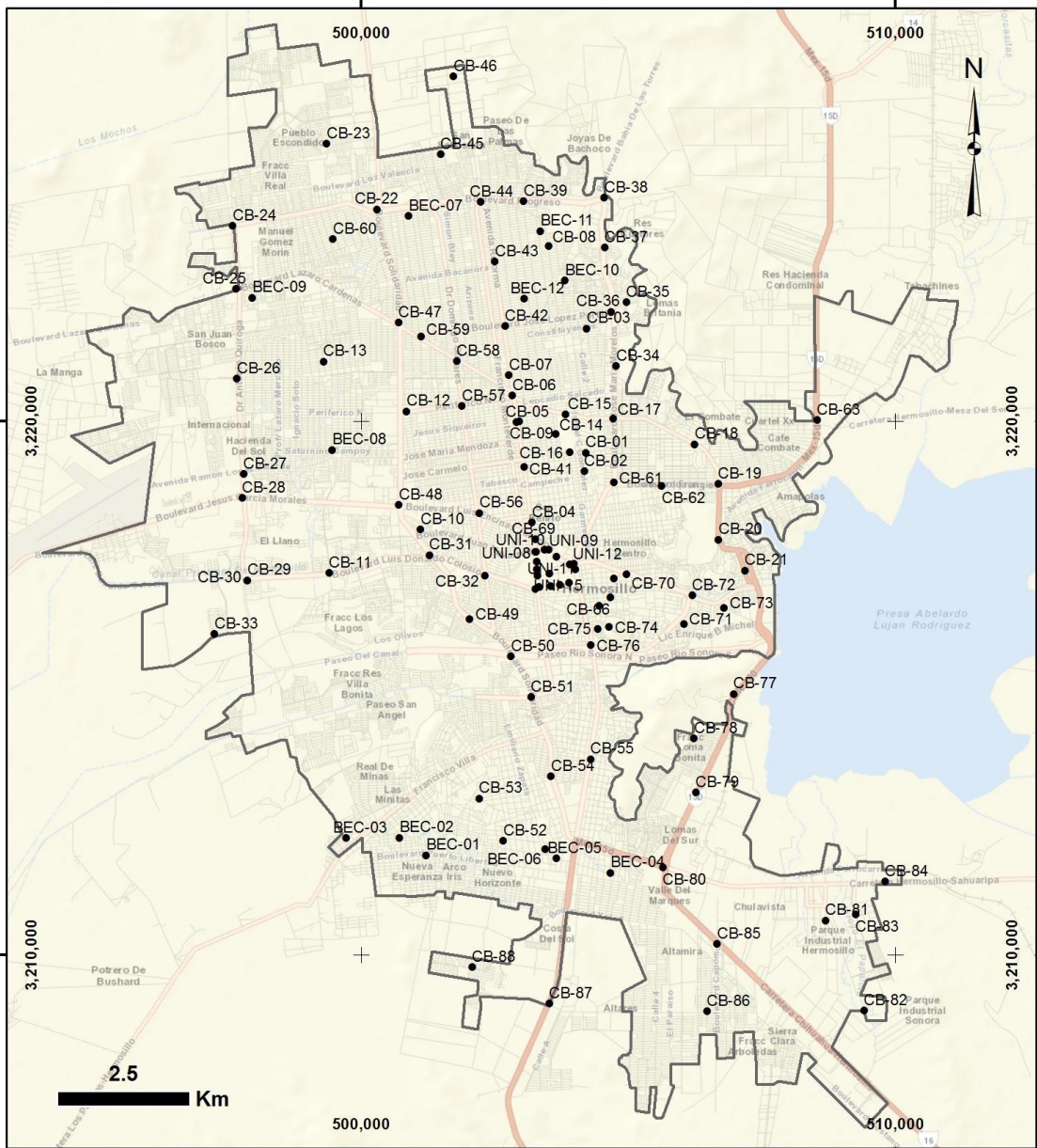


Figura 5. Mapa con los puntos de muestreo de polvo en calles de Hermosillo, Sonora. La zona urbana está delimitada por la línea blanca.

IV. 2. Técnicas analíticas

Las pruebas y análisis de laboratorio se realizaron en los siguientes laboratorios de la Universidad Nacional Autónoma de México: Laboratorio de Geoquímica Ambiental, Laboratorio de Análisis Físicos y Químicos del Ambiente, Facultad de Química, Laboratorio de Edafología Ambiental, Instituto de Geología y Laboratorio de Física del Suelo. También se utilizó el Laboratorio de ICP-OES del Departamento de Geología, el

Laboratorio de Metalurgia, Departamento de Ingeniería Química, todos de la Universidad de Sonor, así como el Laboratorio de Geoquímica del Servicio Geológico Mexicano. Adicionalmente se realizaron análisis en Analítica del Noroeste en Hermosillo y en ALS Chemex en Vancouver, Canadá.

IV. 2.1. Análisis granulométrico (caracterización física)

La caracterización física de los suelos tiene como objetivo principal establecer la respuesta del suelo a las prácticas asociadas en los diferentes sistemas de producción, así como evaluar la susceptibilidad de los suelos a sufrir algún proceso de degradación. No existe una estandarización de todos los métodos de caracterización física, sin embargo, la metodología utilizada para evaluar las muestras correspondientes a este estudio es la que se presenta en el Manual de Procedimientos Analíticos del Laboratorio de Física de Suelos del Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de México, mismo que está documentado en el Laboratorio de Levantamiento del Suelo del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Burt, 2004), y en la Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (Dane y Topp, 2002).

Se utilizó el método de pipeteo, el cual cuantifica las partículas minerales del suelo en forma gravimétrica, considerándose el método más exacto en la determinación granulométrica; éste método se describe a continuación:

Pesar 20 g de la muestra de suelo seco y tamizado en malla de 2 mm de abertura (malla 10), después se realizan los tratamientos previos para la destrucción de los carbonatos, sales solubles, materia orgánica y óxidos de hierro/manganeso por la metodología descrita en el Manual de procedimientos analíticos del Departamento de Edafología (Instituto de Geología UNAM). Posteriormente se realiza la separación de las fracciones (arena, limo y arcilla) tal y como se describe en el manual antes mencionado.

El peso de la muestra tratada se utiliza como base para calcular las fracciones de las partículas. El peso total seco puede ser expresado como: $W_t = W_s + W_p + W_r$, donde:

W_t = Peso total de la muestra tratada

W_s = Peso seco a 105°C de las arenas

W_p = Peso seco a 105°C corregido de las muestras de suelo pipeteadas

W_r = Peso seco a 105°C corregido de limo y arcilla residual

IV.2.2. Metales

IV.2.2.1. Equipo portátil de espectrometría de fluorescencia de rayos X

Se realizó una previa molienda de las muestras homogenizadas para después analizar las concentraciones totales de metales mediante equipos portátiles de Fluorescencia de Rayos X en dos laboratorios: i) En el laboratorio de Geoquímica Ambiental del Instituto de Geología de la UNAM utilizando un analizador portátil NITTON XLt3 de Thermo Scientific, y ii) en el laboratorio del Servicio Geológico Mexicano utilizando un analizador portátil NITTON XLt3 en Hermosillo, Sonora. Los procedimientos de calibración y control de calidad se realizaron de acuerdo a la norma de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos US-EPA 6200⁷.

El control de calidad de los análisis utilizando el analizador portátil incluyó el análisis de blancos, material de referencia (exactitud) y duplicados (precisión). Un blanco fue analizado cada 5 muestras de los suelos estudiados y la concentración de los elementos analizados fue inferior al límite de detección. Los límites de detección (LD) fueron: As = 10 mg·kg⁻¹, Pb = 7 mg·kg⁻¹, Cd = 22 mg·kg⁻¹, Cu = 26 mg·kg⁻¹, Zn = 60 mg·kg⁻¹, y Fe = 0.01%. Los resultados se presentan en las Tabla 5.

Muestra	Cu (ppm) <0.044mm		Cu (ppm) 0.044mm		Cu (ppm) 0.075mm		Incidencia Diabetes
	SGM	UNAM	SGM	UNAM	SGM	UNAM	
CB-16	51.25	44.78	36.64	32.66	-	<LOD	Bajo
CB-19	1231.49	1314.89	204.43	377.98	-	52.94	Alto
CB-21	2119.55	2023.87	1037.96	699.71	-	238.45	Intermedio
CB-27	139.79	158.06	83.11	41.63	-	<LOD	Alto
CB-86	6857.01	7038.8	2854.77	3186.87	-	643	Bajo

Tabla 5. Concentración de cobre en dos fracciones analizadas: <0.044 mm y 0.075 mm, analizadas por la misma metodología (duplicados) en dos laboratorios. La incidencia de Diabetes es tomada de Freire da Carvalho (2009).

Para verificar la exactitud se determinó la concentración de los elementos estudiados en muestras internacionales certificadas: NIST 2711, Montana Soil y RTS 3:, Sulphide ore Mill Tailing.

Se determinaron las concentraciones de estos estándares certificados y se compararon con los valores certificados reportados. El valor de exactitud fue determinado a través de la siguiente fórmula:

$$\%Error = \frac{\text{Valor certificado} - \text{Valor determinado}}{\text{Valor certificado}} \times 100$$

$$\%Exactitud = 100 - \%Error$$

Para este trabajo se indica una exactitud de la técnica de análisis que varía entre 92 y 99%, lo cual muestra un grado de exactitud analíticamente aceptable.

Además, para valorar la precisión de los análisis, al 100% de las muestras se les determinó la concentración total de los metales por triplicado y se calculó el Coeficiente de Variación a través de la siguiente fórmula:

$$\%CV = \frac{\text{Desviación estándar}}{\text{Media}} \times 100$$

Los resultados indican valores de Coeficiente de Variabilidad (%CV) entre 1 y 20%, los cuales indican un grado de precisión analíticamente aceptable.

Las Figuras 5, 6 y 7 muestran los datos por duplicados obtenidos en el laboratorio de la UNAM y el del Servicio Geológico Mexicano.

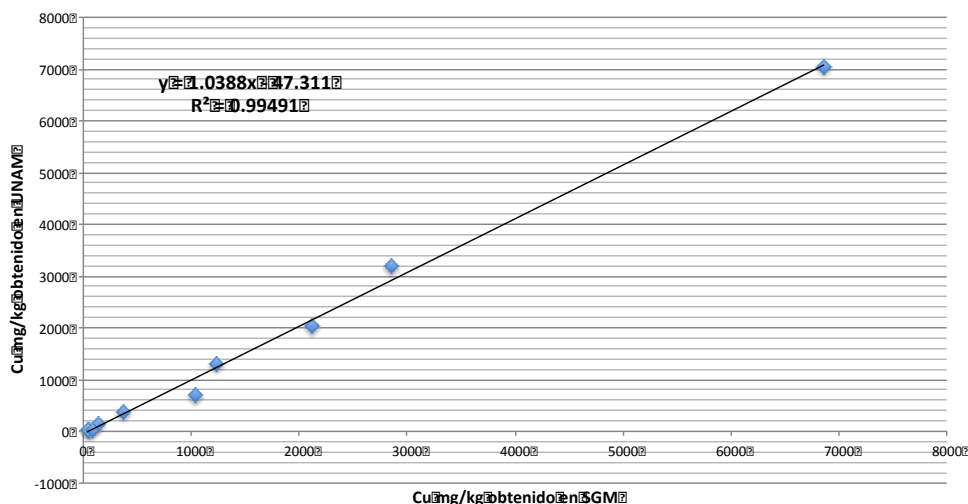


Figura 6. Concentración total de cobre en muestras de polvo y estándares analizados por equipos portátiles de fluorescencia de rayos X del Laboratorio del Servicio Geológico Mexicano y del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México

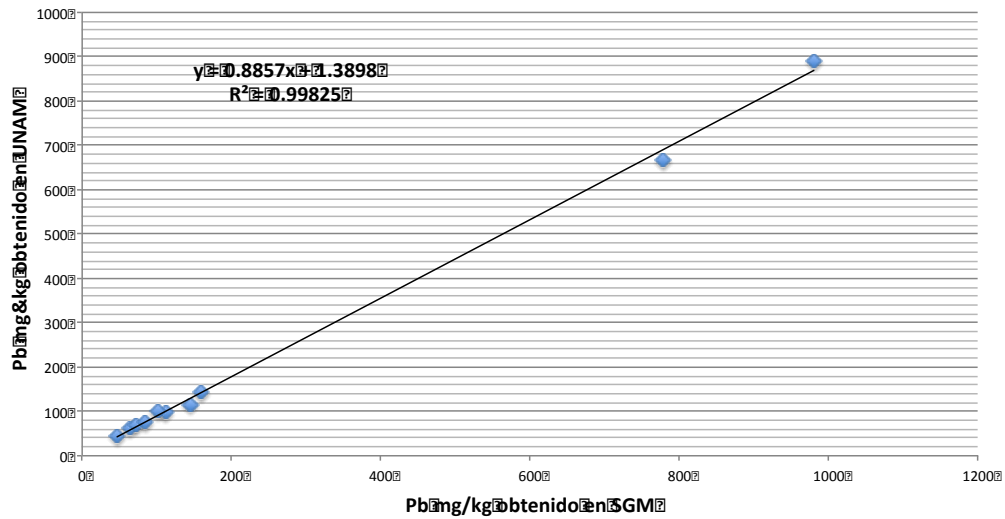


Figura 7. Concentración total de plomo en muestras de polvo y estándares analizados por equipos portátiles de fluorescencia de rayos X del Laboratorio del Servicio Geológico Mexicano y del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México.

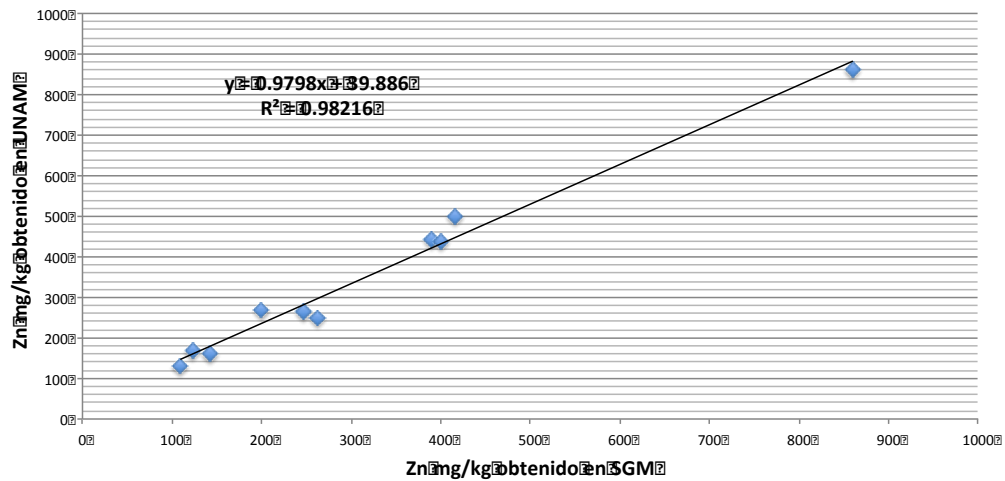


Figura 8. Concentración total de zinc en muestras de polvo y estándares analizados por equipos portátiles de fluorescencia de rayos X del Laboratorio del Servicio Geológico Mexicano y del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México.

IV.2.2.2. Extracción química secuencial (Método de Tessier)

La metodología de especiación secuencial química propuesta por Tessier *et al.* (1979) se basa en un intento de reproducir las condiciones fisicoquímicas sobre matrices ambientales, considerando cinco fases que definen asociaciones de los metales a los diversos constituyentes mineralógicos con distintas energías de enlace; dicho método se aplica de

forma secuencial sobre la misma porción de muestra. Los resultados obtenidos corresponden a: Fracción I metales intercambiables, Fracción II metales unidos a carbonatos, Fracción III metales unidos a óxidos de hierro y manganeso, Fracción IV metales unidos a materia orgánica y sulfuros, y Fracción V Residual o metales unidos a silicatos. La tres primeras fracciones son las que representan un mayor riesgo para la biota y son denominadas fases biodisponibles. La Fracción IV puede o no estar asociada a un origen geogénico y la Fracción V es definitivamente asociada a un origen geogénico.

IV.2.2.3. Bioaccesibilidad: PBET (Physiologically Based Extraction Test).

La determinación de concentración bioaccesible de metales en muestras de suelo de acuerdo al método PBET consiste en dos fases, la primera es simulación de condiciones gástricas y la segunda condiciones intestinales:

Para la simulación de fase gástrica, las muestras se secan en estufa a una temperatura < 40°C y se tamizan a malla < 250. Se usa este tamaño de partícula porque es el representativo de la que se adhiere en las manos de los niños y que pueden ser ingeridas. Se determina la concentración total de los metales de interés en las muestras tamizadas (diámetro < 0.044 mm y de 0.044 mm, respectivamente), a la que se denomina “concentración en sólido” (mg/kg) y que se usa para el cálculo de la bioaccesibilidad gástrica e intestinal. Las concentraciones totales de los metales estudiados se realizaron mediante la técnica de equipo portátil de Fluorescencia de Rayos X.

El fluido gástrico sintético es una mezcla de agua desionizada con pepsina, ácido cítrico, ácido málico, ácido láctico y ácido acético. Se ajusta el pH con HCl 12 N hasta valores de pH = 1.3. En un reactor (embudos de separación) se colocan 150 ml del fluido gástrico sintético y 1.5 g de la muestra. Cada muestra se sumerge en baño de agua a una temperatura controlada de 37°C y se permite burbujear argón (1 L/min) para remover el oxígeno disuelto. Después de 1 hora de agitación de las muestras con flujo de argón, se extrae una alícuota de 10 ml y se filtra con membrana de 0.45 µm. Se determina la concentración de metales en el extracto gástrico a la que se denomina “concentración del extracto gástrico in vitro”, mg/L; que se usa para el cálculo de la bioaccesibilidad gástrica. La concentración de metales en el extracto se determinó por medio de la técnica de Espectroscopia de

Emisión Atómica Inductivamente Acoplada a Plasma (ICP-AES). Se calcula la bioaccesibilidad gástrica utilizando la fórmula siguiente :

$$\text{Bioaccesibilidad gástrica} = \frac{\text{Concentración del extracto gástrico in vitro, mg/L} \times 0,1 \text{ L}}{\text{Concentración en sólido, mg/kg} \times 0,001 \text{ kg}}$$

Para simular las condiciones intestinales, la mezcla suelo/fluido gástrico fue neutralizada hasta valores de pH = 7, agregando NaHCO₃. Una vez que el pH alcanzó el valor de 7.0, se agregaron 260 mg de sales biliares porcinas y 75 mg de pancreatina porcina. Esta nueva mezcla se agita durante 3 horas mediante flujo de argón. Se extrae una alícuota de 10 ml y se filtra con membrana de 0.45 µm. Se determinó la concentración de metales en el extracto intestinal a lo que se denominó “concentración del extracto intestinal in vitro”, mg/L; que se usa para el cálculo de la bioaccesibilidad intestinal. La concentración de los metales en el extracto se determinó por medio de la Espectroscopia de Emisión Atómica Inductivamente Acoplada a Plasma (ICP-AES). (Ruby *et al.*, 1993)

La bioaccesibilidad intestinal de metales se basa en la siguiente fórmula:

$$\text{Bioaccesibilidad intestinal} = \frac{\text{Concentración del extracto intestinal in vitro, mg/L} \times 0,1 \text{ L}}{\text{Concentración en sólido, mg/kg} \times 0,001 \text{ kg}}$$

La figura 9 muestra el equipo que se utiliza para la técnica de determinación de la bioaccesibilidad.



Figura 9. Imagen del equipo utilizado para la determinación de bioaccesibilidad gástrica e intestinal de metales establecido por Ruby *et al.*, 1993.

V. RESULTADOS Y DISCUSION

V.1. Distribución de metales en parques.

La Tabla 6 muestra la concentración de Cd, Cu, Mn, Pb y Zn en mg.kg^{-1} en muestras de parques para la fracción granulométrica menor a 0.044 mm. Los resultados indican valores máximos de 214.9 mg.kg^{-1} para el Cu, 9.14 mg.kg^{-1} para el Cd, 752.5 mg.kg^{-1} para el Mn, 176.2 mg.kg^{-1} para el Pb, y 230.3 mg.kg^{-1} para el Zn. De los elementos estudiados, solamente el Pb y el Cd están contemplados en la normatividad mexicana, con máximos permisibles de 400 mg.kg^{-1} y de 37 mg.kg^{-1} respectivamente. En ambos casos, éstos metales no sobrepasan los límites máximos permisibles, sin embargo, es importante evaluar Cu, Mn y Zn, y comparar estos valores con el fondo geoquímico del área para establecer si son valores anómalos o no. Los valores del Cd están por debajo del límite de detección del equipo a excepción de dos muestras.

Tabla 6. Concentración de metales (mg.kg^{-1}) en muestras de parques analizados por equipos portátiles de Fluorescencia de Rayos X correspondiente al tamaño de partícula <0.044mm.

Muestra	Cd N=64	Cu N=64	Mn N=64	Pb N=64	Zn N=64
BE-01	< LOD	50.85	620.73	65.4	230.32
BE-02	< LOD	41	731.06	40.24	87.65
BE-03	< LOD	35.89	515.7	53.37	113.42
BE-04	< LOD	49.63	595.94	42.01	99
BE-05	< LOD	42.72	553.4	49.17	115.8
BE-06	< LOD	39.1	466.17	29.59	88.58
BE-07	< LOD	66.33	745.79	39.02	116.49
BE-08	< LOD	31.17	421.89	43.69	103.81

Continuación

Tabla 6

Muestra	Cd N=64	Cu N=64	Mn N=64	Pb N=64	Zn N=64
BE-09	< LOD	56.23	603.65	40.58	99.36
BE-10	< LOD	55.77	616.58	110.76	163.87
BE-11	< LOD	41.98	469.54	38.89	90.82
BE-12	< LOD	52.85	566.21	39.87	96.87
BE-13	< LOD	< LOD	651.4	176.14	96.38
BE-14	< LOD	36.85	610.75	49.22	133.27
BE-16	< LOD	79.72	582.78	39.94	112.64

BE-17	< LOD	54.1	675.5	57.65	120.54
BE-18	< LOD	62.51	516.57	62.1	117.06
BE-19	< LOD	55.84	467.9	37.51	80.57
BE-20	< LOD	55.47	629.71	52.52	127.35
BE-21	< LOD	41.01	636.4	30.12	127.96
P-9	< LOD	53.46	466.57	90.06	153.88
PB-01	< LOD	42.37	500.97	84.15	141.74
PB-02	< LOD	< LOD	551.68	85.95	160.86
PB-03	8.43	54.52	642.46	40.26	131.95
PB-04	< LOD	38.98	472.5	68.79	145.82
PB-05	< LOD	60.89	652.83	66.82	174.61
PB-06	< LOD	105.6	622.61	116.78	201.11
PB-07	< LOD	39.33	505.92	102.62	168.08
PB-08	< LOD	56.16	598.35	107.2	145.68
PB-10	< LOD	48.42	554.83	45.78	139.39
PB-12	< LOD	58.9	729.86	15.23	90.6
PB-13	< LOD	45.99	605.12	57.66	105.65
PB-14	< LOD	57.32	534.38	54.86	128.66
PB-16	< LOD	48.06	524.85	52.74	94.12
PB-17	< LOD	48.75	588.48	176.21	137.57
PB-18	< LOD	47.05	671.52	53.31	176.7
PB-19	< LOD	32.63	573.66	34.96	102.85
PB-21	< LOD	31.9	645.56	63.75	101.31
PB-22	< LOD	46.4	524.23	49.49	101.2
PB-24	< LOD	35	661.38	40.36	101.93
PB-26	< LOD	44	752.5	53.37	119
PB-27	< LOD	99.5	474.37	33.51	97.45
PB-28	< LOD	72.74	592.41	84	210.21
PB-29	9.14	44.53	491.21	82.63	128.65
PB-30	< LOD	33.77	518.78	38.67	141.53
PB-31	< LOD	139.72	445.05	131.66	453.61

*Continuación
Tabla 6.*

Muestra	Cd N=64	Cu N=64	Mn N=64	Pb N=64	Zn N=64
PB-32	< LOD	59.6	685.05	51.22	126.18
PB-33	< LOD	< LOD	641.06	42.89	116.52
PB-38	< LOD	44.61	624.26	30.67	98.97
PB-39	< LOD	49.3	576.14	31.34	111.74
PB-40	< LOD	47.08	675.38	41.58	115.97
PB-41	< LOD	< LOD	518.29	19.22	65.59
PB-42	< LOD	71.23	635.53	37.88	119.51

PB-43	< LOD	54.17	679.85	24.42	69.15
PB-44	< LOD	< LOD	546.18	51.17	88.78
PB-45	< LOD	< LOD	409.15	37.1	66.24
PB-47	< LOD	52.96	781.62	37.68	122.91
PB-48	< LOD	32.53	641.23	29.8	103.47
PB-49	< LOD	51.47	532.19	26.67	73.37
PB-50	< LOD	46.19	594.96	62.84	136.13
PB-51	< LOD	214.94	503.68	154.96	345.3

(<LOD: debajo del Límite de Detección)

Los niveles de metales detectados en este trabajo se comparan con valores reportados para parques de otras ciudades del mundo (Tabla 7). En el caso del Cu, los valores máximos encontrados para las muestras estudiadas de Hermosillo son menores a los reportados para Beijing, China y de París, Francia, mientras que son superiores a los encontrados en Hong Kong y Pakistán. El Cd excede significativamente los valores máximos reportados para Pakistán y de Francia, mientras que los valores de Pb son en general menores que los de Hong Kong, Pakistán, China y Francia. Los valores de Zn solo son inferiores a los reportados en Hong Kong, pero superiores a los demás. Es importante señalar que todas las ciudades utilizadas para comparación tienen un grado de desarrollo urbano superior a la de nuestra área estudiada con crecimiento demográfico de: Hong Kong, 7 millones; Islamabad, Pakistán, 1 millón; Beijing, China con 20.18 millones; París, Francia con 2.2 millones de habitantes, todas en comparación con los casi 720 000 habitantes de Hermosillo, Sonora.

Tabla 7. Concentración de metales (mg.kg⁻¹) en suelos de parques urbanos de varias ciudades.

Ciudad	Referencia	Cd	Cu	Mn	Pb	Zn
Hong Kong	Li <i>et al.</i> (2001)	<LD-9.1	31.9-214.9	nr	19.2-176	65.6-453.6
Islamabad, Pakistan	Iqbal <i>et al.</i> (2012)	1.3±0.3	40±7.1	550±55	27.5±4.8	87.2±13.1
Beijing, China	Chen <i>et al.</i> (2005)	Nr	24.1-457.5	Nr	25.5-207.5	25.7-196.9
Paris, Francia	Glorennec <i>et al.</i> (2012)	1-3	5-609	64-2932	6-3225	Nr
Mínimos-Máximos	Este trabajo	9.14-14	25-215	409.2-752.5	15.3-176.2	65.6-453.6
Promedio	Este trabajo	12	52.3	583.3	57.9	128.9

(Nr: no reportado).

En la figura 10 se muestra la distribución espacial de Cu en muestras de parques analizadas en este trabajo. Se observa una concentración mayor en la parte oeste de la ciudad con algunos clusters asociados a zonas de alto tráfico, principalmente en el norte y en la parte sur este de la ciudad. Al parecer existe una asociación directa con nivel de tráfico vehicular,

ya que los mayores contenidos de Cu se asocian espacialmente con las principales calles (arterias) de la ciudad, lo que confirma la hipótesis que el Cu sería un buen marcador de actividad de tráfico vehicular.

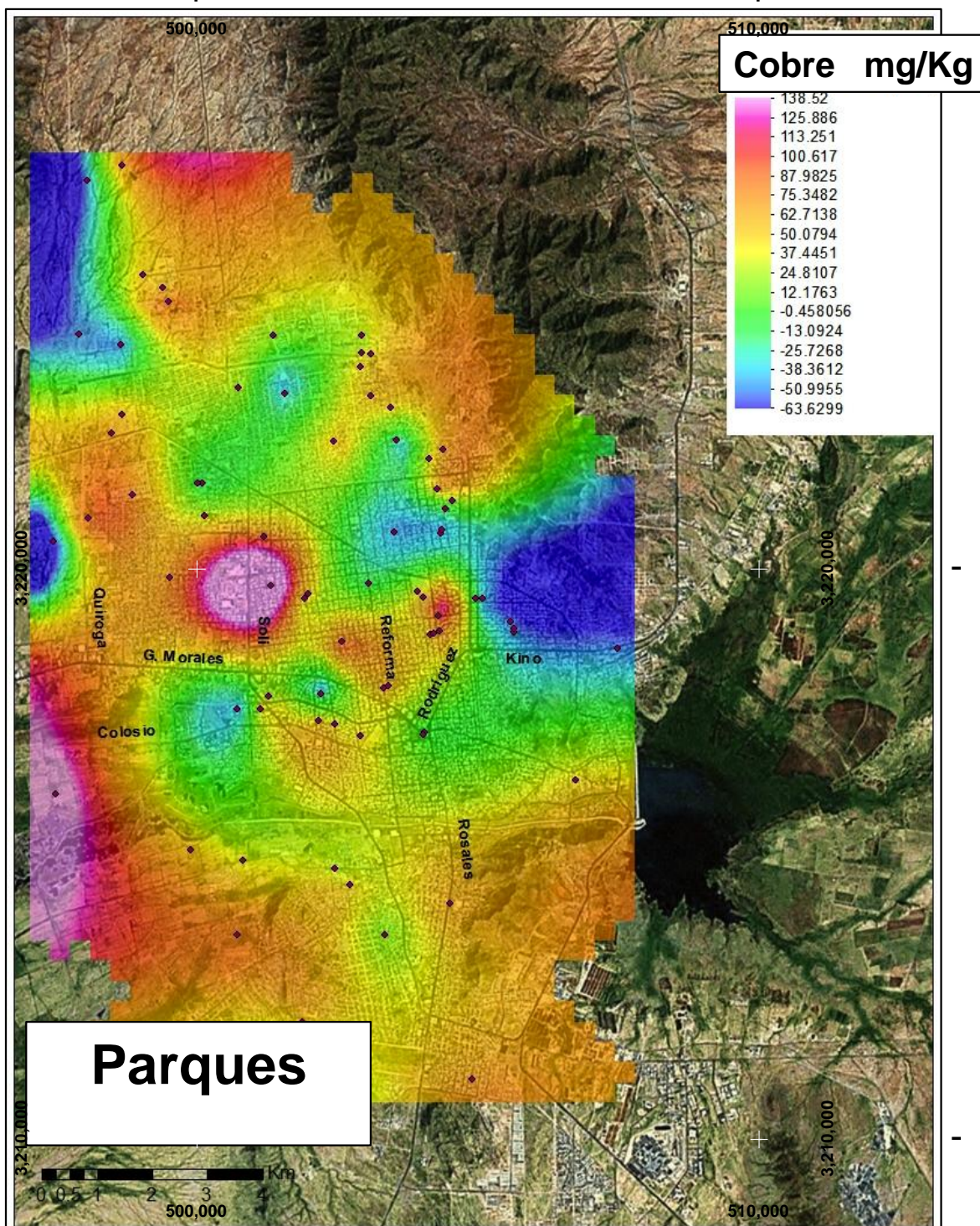


Figura 10. Distribución espacial de cobre en muestras de parques en la ciudad de Hermosillo, Sonora.

El contenido de cobre en la fracción menor a 0.044 mm de polvos de parques es menor en su valor máximo, mínimo y media en comparación con los valores de la fracción de 0.044 mm (más gruesa). Esto es contrario a lo reportado en la literatura y en los polvos de calle, ya que en general se ha reportado una mayor concentración de metales en las fracciones con una granulometría más fina. En el caso de los parques, el riesgo por ingestión de polvo, tanto en la fracción menor a 0.044 mm como en la de 0.044 mm es alto debido a que los niños tienden a ingerir polvo (pica) a partir del contacto con el suelo(Figura 11).

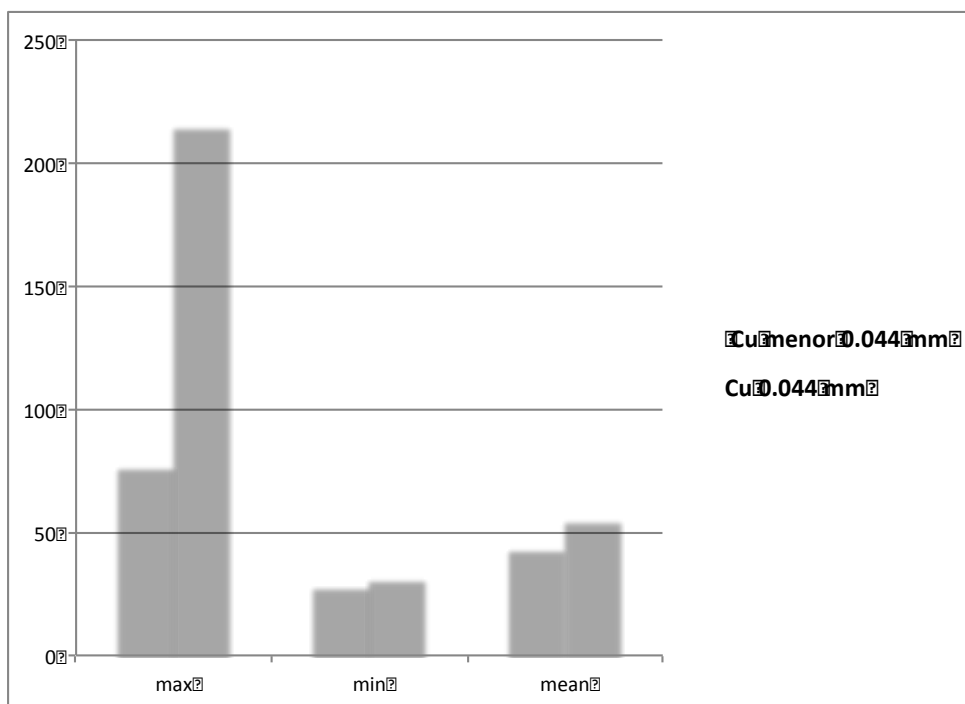


Figura 11. Estadística de contenido de Cu en mg.kg⁻¹ en fracción menor a 0.044 mm y de 0.044 mm, de parques de la ciudad de Hermosillo.

La figura 12 muestra la distribución espacial de manganeso en los parques estudiados y se observa que es relativamente homogénea, con valores menores en la zona central de la ciudad.

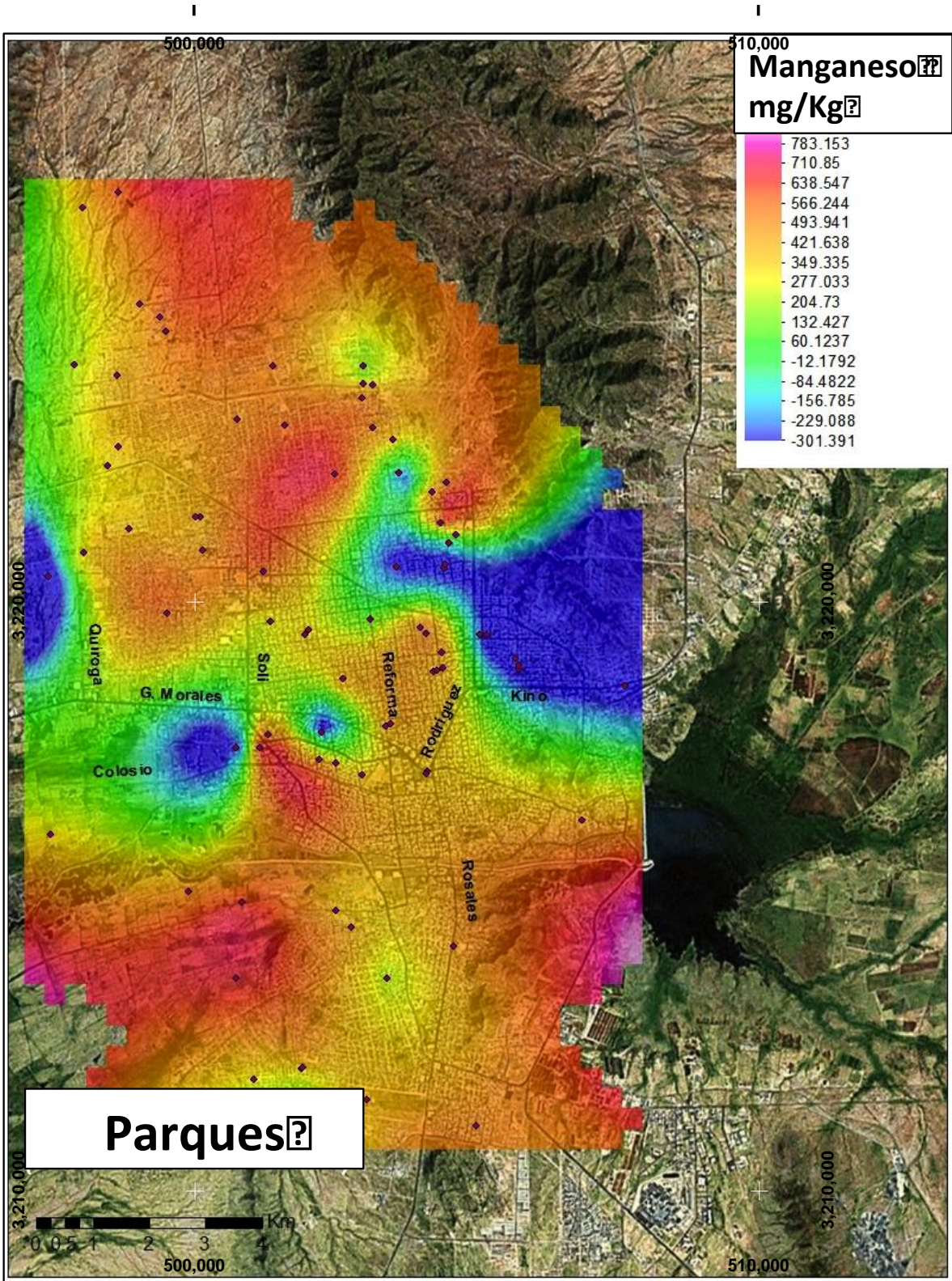


Figura 12. Distribución espacial de manganeso en muestras de parques.

La Figura 13 muestra la distribución espacial de Zn en parques, el cual presenta dos tendencias de anomalías altas en la ciudad, la primera hacia la parte central (parques entre dos principales arterias del tráfico de la ciudad) y la segunda es de la zona agrícola localizada al SW de la ciudad.

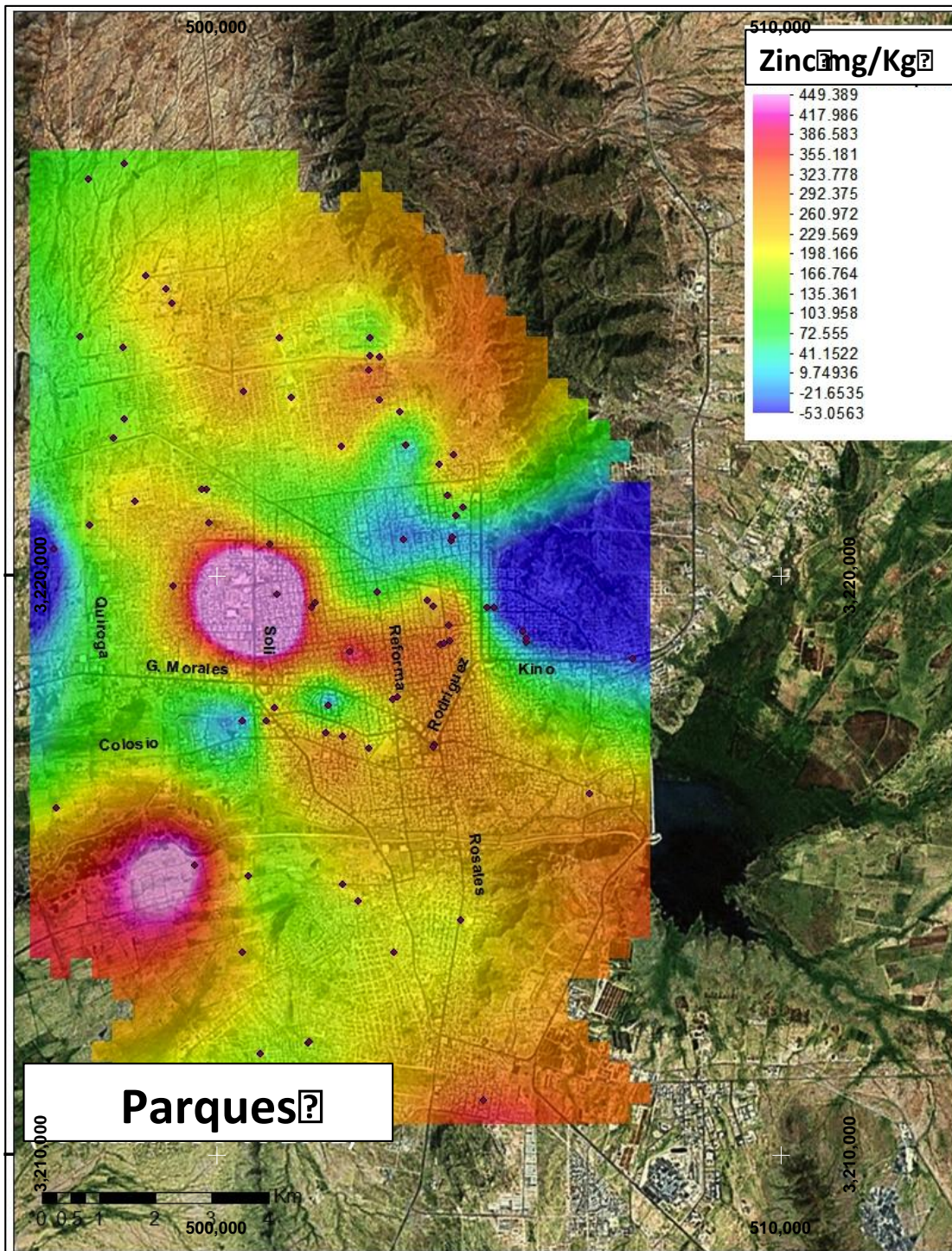


Figura 13. Distribución espacial de Zn en parques.

La Figura 14 muestra la distribución espacial de Pb en parques, en donde las concentraciones más elevadas se asocian espacialmente al centro histórico de la ciudad (zona de mayor antigüedad), en un patrón espacial que se ha descrito en la literatura como “bull’s eye” ó ojo de buey (Filippelli y Laidlaw, 2010).

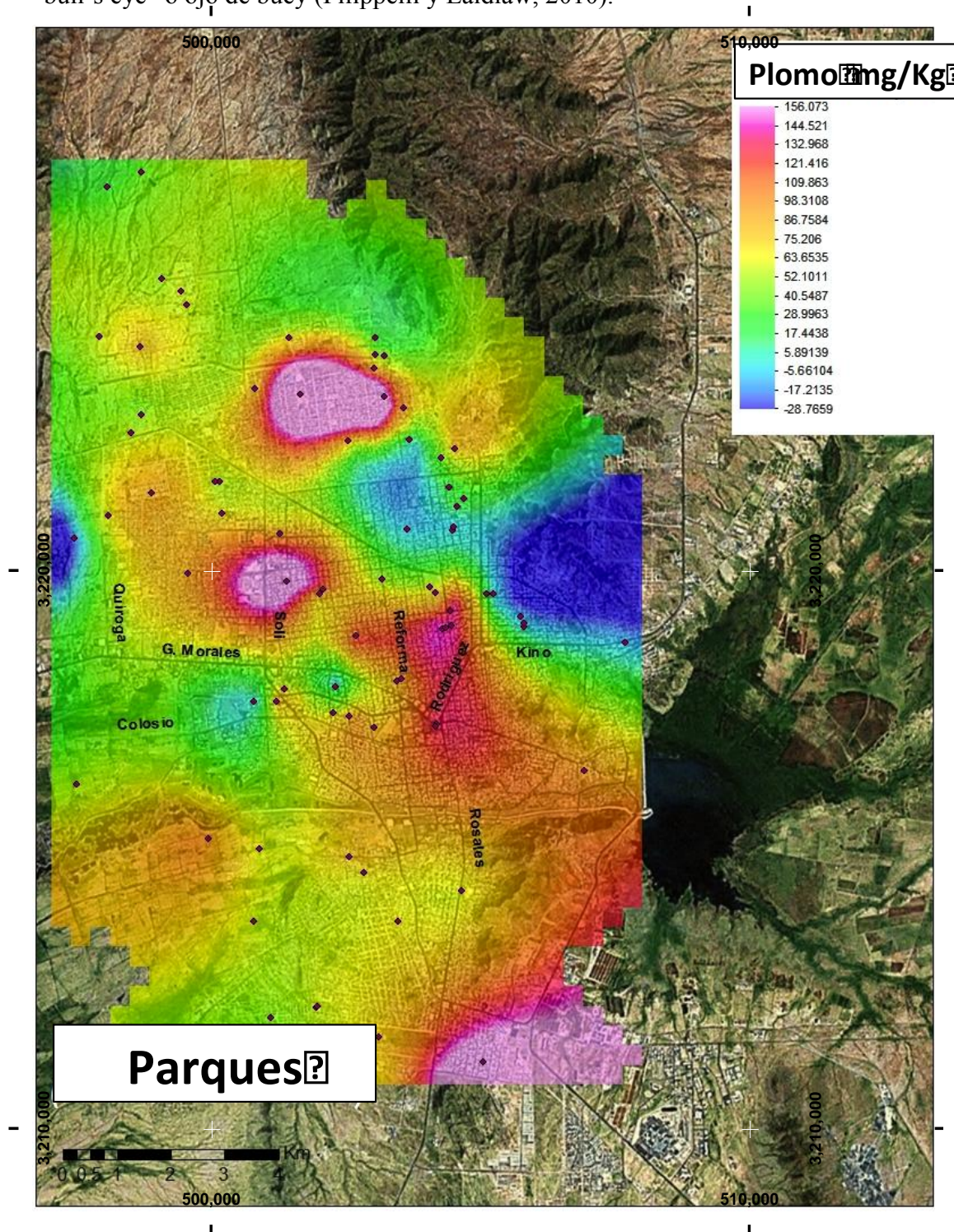


Figura 14. Distribución espacial de Pb en parques.

V. 2. Distribución de metales en calles.

Los resultados del análisis de polvo urbano colectado en varias calles de la ciudad se presentan en la Tabla 8. El orden descendiente de la concentración de los elementos es: Cu>Zn>Pb>Mn>Cd (Tabla 8).

Tabla 8. Concentración de metales en muestras de calles fracción menor a 0.044 mm. Concentraciones expresadas en mg.kg⁻¹

Muestra	Cd N=107	Cu N=107	Mn N=107	Pb N=107	Zn N=107
BEC-01	< LOD	37.09	< LOD	22.22	91.74
BEC-02	< LOD	< LOD	376.97	21.68	72.13
BEC-03	< LOD	34.71	347.8	27.31	70.53
BEC-04	< LOD	286.97	482.65	63.35	245.63
BEC-05	< LOD	124.55	504.41	106.81	212.35
BEC-06	< LOD	32.99	404.73	26.1	115.5
BEC-07	< LOD	45.47	506.16	57.76	128.97
BEC-08	< LOD	94.61	477.79	104.38	248.96
BEC-09	< LOD	60.48	366.31	44.37	82.33
BEC-10	< LOD	43.41	590.98	30	71.91
BEC-11	< LOD	< LOD	494.03	40.37	114.67
BEC-12	< LOD	47.14	446.77	39.02	110.63
CB-01	< LOD	68.88	436.97	136.04	217.05
CB-02	< LOD	72.41	559.79	57.38	187.95
CB-03	< LOD	87.54	514.34	57.85	250.77
CB-04	< LOD	134.74	491.96	158.06	327.16
CB-05	< LOD	205.89	713.05	174.28	383.91
CB-07	< LOD	59.7	549.26	95.99	271.61
CB-08	< LOD	66.21	< LOD	50.64	118.77
CB-09	< LOD	65.19	508.23	70.54	217
CB-10	< LOD	99	422.03	68.97	238.18
CB-12	< LOD	75.98	665.49	87.66	286.66
CB-13	< LOD	54.21	462.9	43.7	144.57
CB-14	< LOD	89.58	577.9	152.39	408.99
CB-15	< LOD	446.64	399.97	94.52	321.52
CB-16	< LOD	51.25	488.69	144.76	122.94
CB-17	< LOD	125.58	583.13	106.14	302.44
CB-18	9.2	546.66	656.77	131.79	485.85
CB-19	< LOD	1231.49	574.23	979.86	388.75
CB-20	< LOD	5362.64	564.35	136.27	722.25
CB-21	< LOD	2119.55	619.17	111.58	400.16

Continuación
Tabla 8

muestra	Cd N=107	Cu N=107	Mn N=107	Pb N=107	Zn N=107
CB-22	< LOD	143.19	742.63	68.63	283.5
CB-23	< LOD	106.15	565.14	44.94	155.58
CB-24	<LOD	292.44	553.94	178.49	128.41
CB-25	< LOD	101.39	531.27	128.27	181.85
CB-26	10.07	443.5	416.18	75.08	214.99
CB-27	< LOD	139.79	492.47	63.55	247.06
CB-28	< LOD	< LOD	725.06	30.61	63.55
CB-29	< LOD	121.06	569.66	95.31	297.24
CB-30	< LD	137.31	499.58	149.87	323.82
CB-32	< LOD	205.47	598.56	361.03	403.42
CB-33	< LOD	119.27	800.09	32.87	166.89
CB-34	< LOD	224.84	675.04	152.8	311.96
CB-36	< LOD	124.89	485.5	76.63	334.66
CB-37	14.77	380.61	< LOD	128.2	350.4
CB-38	9.35	843.07	589.04	75.62	550.79
CB-40	< LOD	90.72	550.58	192.2	287.33
CB-41	10.63	116.89	559.09	210.15	393.07
CB-42	< LOD	169.73	569.52	105.12	237.12
CB-45	< LOD	42.08	652.09	55.17	165.38
CB-47	< LOD	138.58	571.22	101.61	237.67
CB-48	< LOD	189.81	465.66	192.42	348.81
CB-49	13.07	476.93	608.34	160.92	435.77
CB-50	< LOD	531.69	635.58	174.18	337.89
CB-52	< LOD	145.29	547.94	208.82	215.76
CB-53	< LOD	58.71	539.72	35.26	87.13
CB-54	8.89	532.96	589.66	124.2	337.28
CB-55	< LOD	135.87	625	78.82	302.99
CB-56	< LOD	140.04	670.83	131.81	431.06
CB-57	< LOD	134.16	544.66	237.23	310.67
CB-58	< LOD	180.76	537.22	217.36	467.56
CB-59	< LOD	125.85	526.27	137.23	314.69
CB-60	< LOD	65.37	442.94	51.86	152.29
CB-61	10.97	101.58	539.85	138.23	250.62
CB-62	< LOD	13264.39	682.27	227.1	1054.87
CB-63	11.78	181.97	680.53	152.29	315.5
CB-64	13.69	5001.73	975.79	382.99	1283.74
CB-65	8.5	128.63	444.98	119.02	387.94
CB-66	< LOD	120.73	626.92	89.25	319.21
CB-67	< LOD	164.42	676.57	129.69	388.7

Continuación
Tabla 8

muestra	Cd N=107	Cu N=107	Mn N=107	Pb N=107	Zn N=107
CB-68	< LOD	117.38	616.52	139.68	256.84
CB-69	13.25	195.84	562.52	412.36	441.63
CB-70	< LOD	125.77	534.87	129.99	371.37
CB-71	< LOD	153.62	565.18	65.8	308.37
CB-72	< LOD	126.2	531.42	207.17	336.8
CB-73	< LOD	227.41	395.93	230.46	435.75
CB-74	< LOD	38.52	567.81	24.84	81.19
CB-75	< LOD	50.75	345.06	48.38	308.3
CB-76	11.48	224.77	660.51	139.7	318.4
CB-77	< LOD	494.56	663.35	82.02	220.19
CB-78	< LOD	168.45	558.13	63.82	261.65
CB-79	10.86	3381.81	< LOD	142.79	872.73
CB-80	< LOD	1644	398.44	100.46	457.24
CB-81	< LOD	198.03	647.21	207.28	451.71
CB-82	< LOD	40.97	343.13	33.56	76.41
CB-83	< LOD	161.08	470.88	129.02	436.89
CB-84	13.9	249.82	529.77	215.79	751.71
CB-85	12.22	1016.3	626.95	131.32	563.1
CB-86	< LOD	6857.01	529.17	159.5	859.51
CB-87	< LOD	1693.79	489.79	98.8	348.41
CB-88	< LOD	67.09	416.75	51.35	159.9
CB-X	9.71	134.78	521.7	73.97	294.33
UNI-02	10.35	148.28	559.14	113.96	324.73
UNI-03	< LOD	162.7	583.88	97.48	294.39
UNI-04	< LOD	100.31	534.28	105.26	225.19
UNI-05	< LOD	149.29	554.55	97.68	251.74
UNI-06	< LOD	107.66	617.06	109.78	267.7
UNI-07a	< LOD	159.5	663.44	132.95	248.62
UNI-07b	< LOD	71.56	497.53	87.86	191.5
UNI-08	< LOD	95.43	552.96	118.64	253.95
UNI-09	< LOD	107.33	494.11	204	307.61
UNI-10	< LOD	160.34	553	129.24	345.12
UNI-11	< LOD	199.97	523.96	210.34	455.78
UNI-12	< LOD	111.59	507.34	110.93	359.45
UNI-13	< LOD	185.83	703.54	123.46	481.94
UNI-14	< LOD	132.97	559.71	94.21	315.57
UNI-15	< LOD	147.99	524.17	196.87	304.65

<LOD: debajo del Límite de Detección

Los valores detectados en muestras de polvo de calles de Hermosillo en comparación con datos reportados para polvo de calles de otras ciudades en el mundo, se muestra en la tabla 9. En el caso del Cd, las muestras de Hermosillo exceden en magnitud considerable a los valores reportados para Tehran (Irán) y para Newcastle (Inglaterra). El Cu en el polvo urbano de Hermosillo también aparece muy enriquecido en comparación con ciudades de China, Estados Unidos, Inglaterra e Irán, mientras que los valores de Mn son equivalentes a los resultados presentados para polvos urbanos en ciudades de Estados Unidos y en Irán. Las muestras estudiadas por Pb para Hermosillo muestran niveles comparables con polvos urbanos de Inglaterra y tienen valores superiores a los reportados en China, Hong Kong, e Irán. En el caso del Zn, los valores máximos para Hermosillo exceden a los valores máximos reportados para las otras ciudades indicadas en la Tabla 9.

Tabla 9. Concentración de metales (mg.kg^{-1}) en polvo de calle (urban dust) de varias ciudades.

Ciudad	Referencia	Cd	Cu	Mn	Pb	Zn
Urumqi, China	Wei et al. (2009)	Nr	94.5	Nr	53.5	294.7
Hong Kong	Li et al. (2001)	Nr	173	Nr	181	1450
Atlanta, Georgia	Deocampo et al. (2012)	Nr	20-226	Nr	25-278	63-789
Fenway, Somerville y Greenfield, MA	Apeagyei et al. (2011)	Nr	0-2130	89-1191	0-1639	35-1208
Tehran, Iran	Saedi et al. (2012)	10.7	203	1176	190	791
Newcastle England	Okorie et al. (2012)	1	132	Nr	992	421
Mínimos-Máximos	Este trabajo	9.2-14.8	32.9-13264.4	343.1-975.8	21.6-979.9	70.5-1054.8
Promedio	Este trabajo	12	531.6	550.5	126.9	314.8

Nr: no reportado.

La distribución espacial de Cu en las calles de Hermosillo se muestra en la Figura 15. La mayor concentración de cobre es hacia la parte este, en la cercanía de la presa Abelardo L. Rodríguez. En particular los valores más elevados de Cu se asocian a la vía de tráfico pesado (antigua ruta a Nogales) y del ferrocarril.

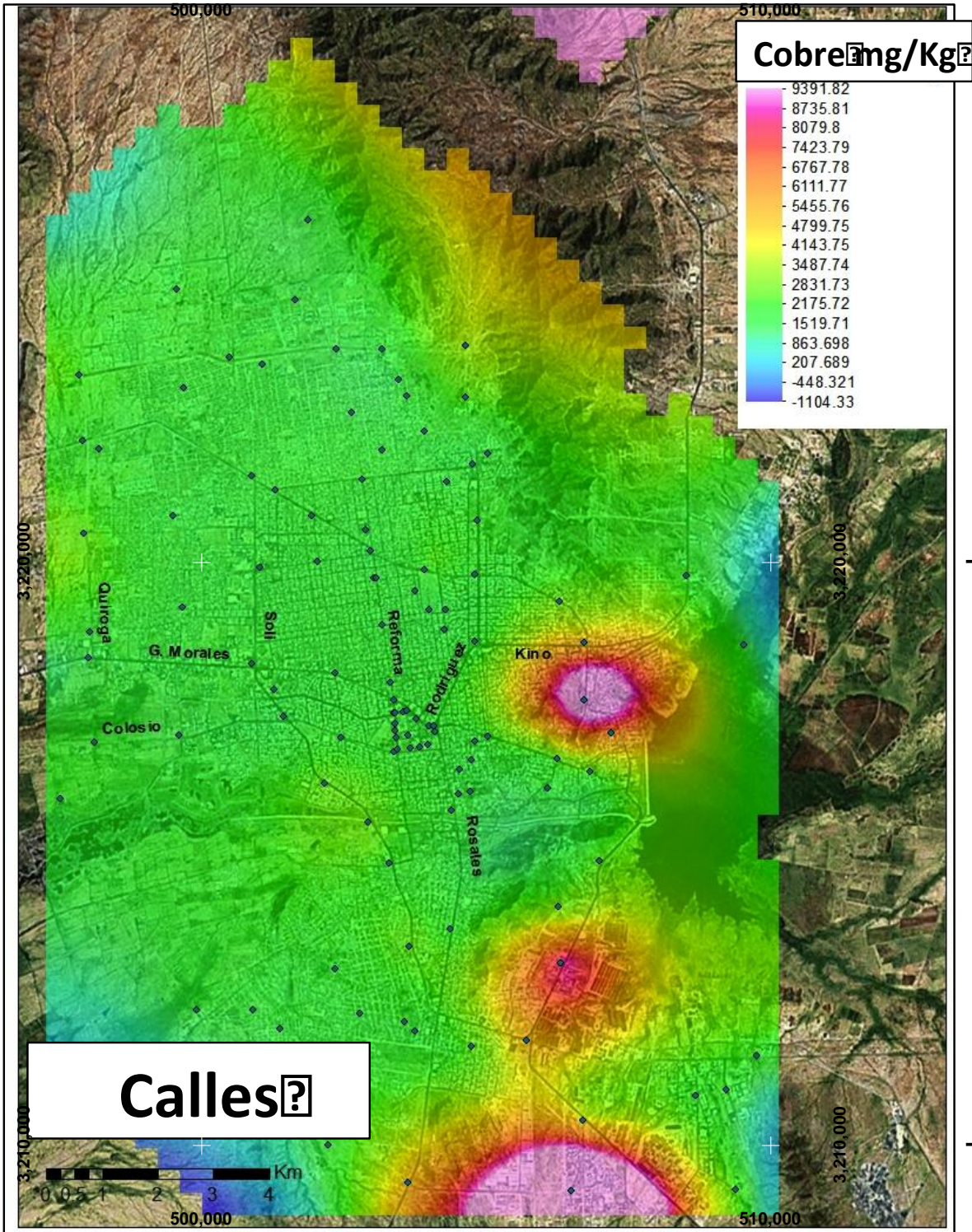


Figura15. Distribución espacial de Cu en calles de Hermosillo, Sonora.

La distribución espacial de Mn se muestra en la Figura 16, el cual presenta una distribución preferencial con mayores valores desde el este, partiendo de la zona norte de la presa hacia el centro-norte de la ciudad.

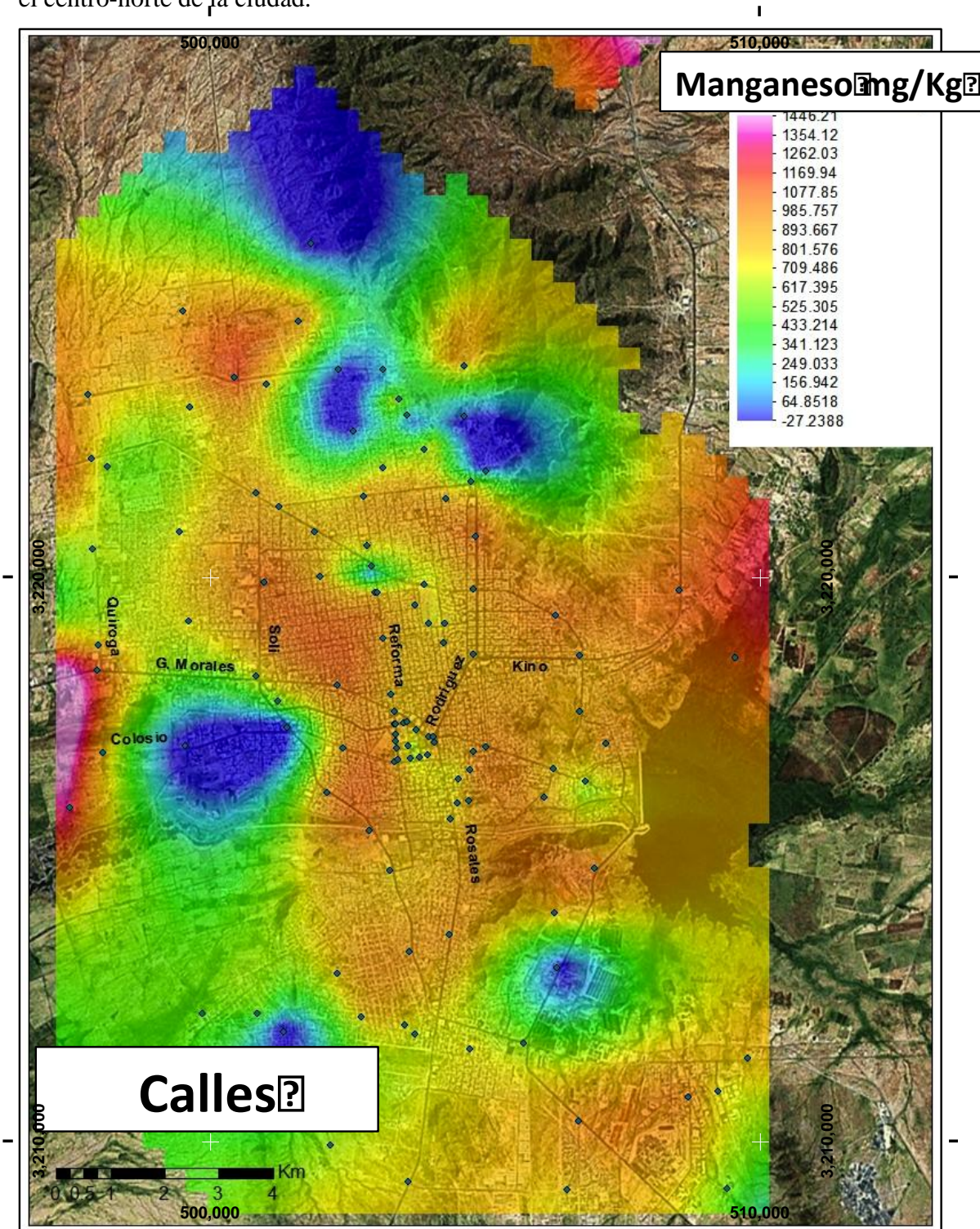


Figura 16. Distribución espacial de Mn en calles.

La Figura 17 muestra la distribución espacial de Pb en calles. Se reconoce un patrón espacial aparente en dirección preferencial este a oeste, desde la presa y vía principal de tráfico pesado de la ciudad.

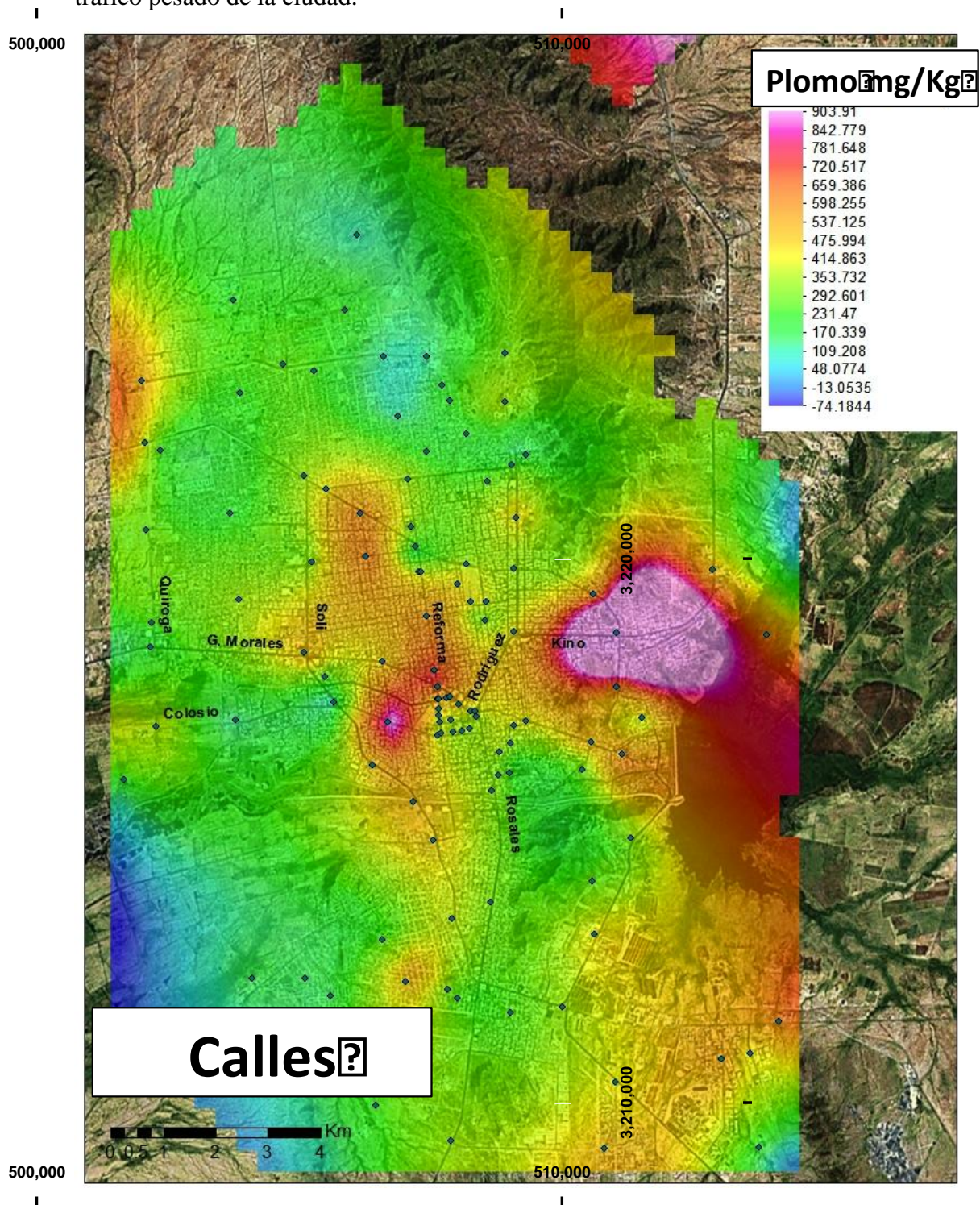


Figura 17. Distribución espacial de Pb en calles.

La Figura 18 muestra la distribución espacial del Zn en calles. El Zn muestra una distribución similar al Cu con una asociación a la vía de tráfico pesado (antigua ruta a Nogales) y del ferrocarril.

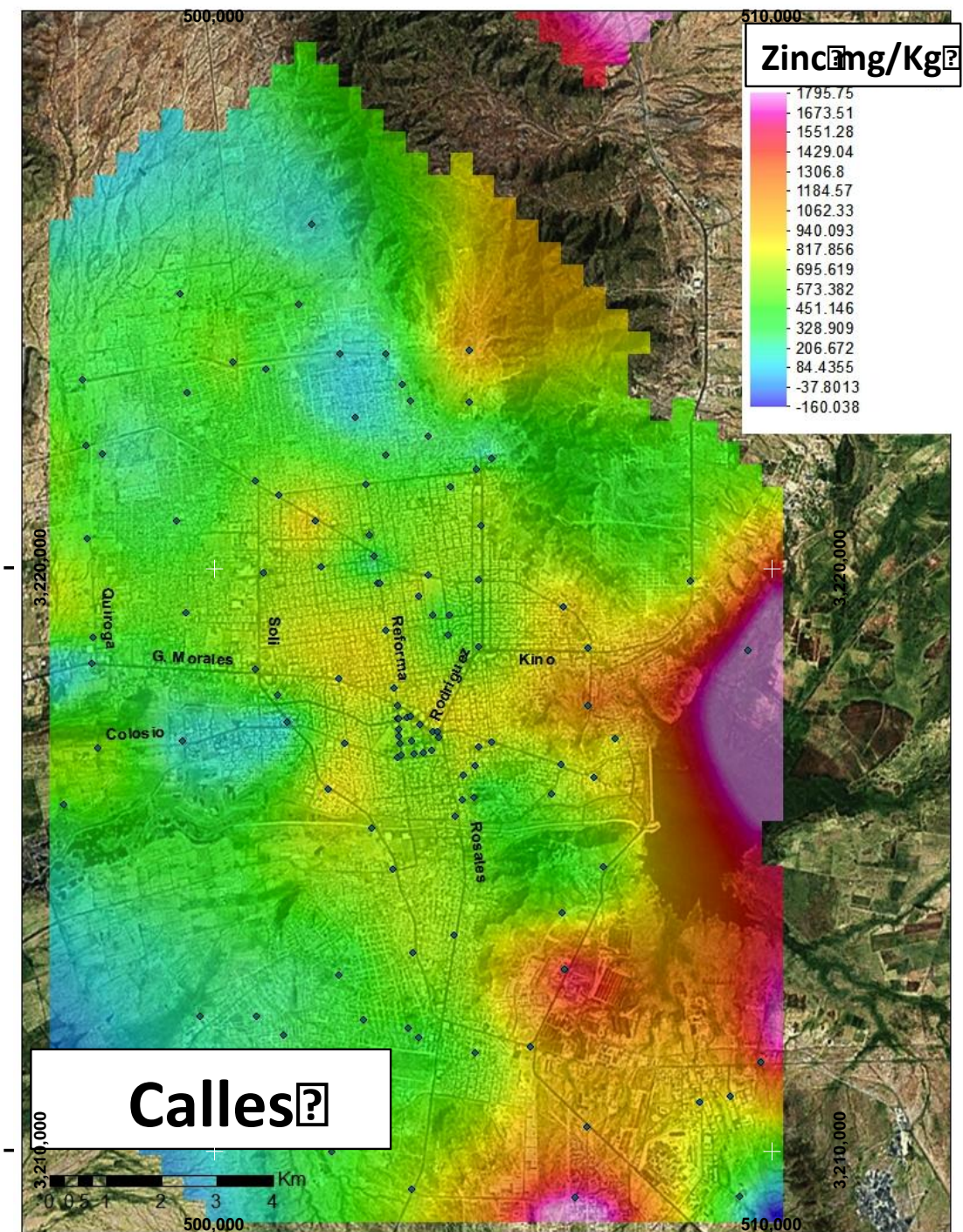


Figura 18. Distribución espacial de Zn en calles de Hermosillo, Sonora.

Aunque la distribución del Zn es similar al Cu, la dispersión hacia el oeste es menor, mientras que el Zn aparece preferencialmente concentrado en la zona de la presa Abelardo L. Rodríguez y asociado a la ruta principal de tráfico pesado y de ferrocarril de la ciudad.

V. 3. Comparación de concentración de metales y fondo geoquímico.

La línea geoquímica básica de un suelo representa el fondo geoquímico. Establecer el fondo geoquímico es complicado en las zonas urbanas debido a que es difícil encontrar áreas con suelos que no hayan sido impactados por actividades del hombre. Existen varios indicadores para identificar el origen geogénico, antropogénico o el nivel de contaminación de un material, ya sea polvo o suelo. Para poder identificar el impacto antropogénico es necesario establecer la comparación con el fondo geoquímico del área de estudio. La Tabla 10 muestra el promedio de diez muestras de suelos no impactados, dicho promedio es considerado como fondo geoquímico en este trabajo.

Tabla 10. Concentración de metales (mg.Kg⁻¹) en muestras correspondientes al fondo geoquímico del área de estudio.

Fondo Geoquímico					
Muestra	Cu	Mn	Cd	Pb	Zn
	mg.Kg ⁻¹	mg.Kg ⁻¹	mg.Kg ⁻¹	mg.Kg ⁻¹	mg.Kg ⁻¹
Media (n=10)	16.9	562	0.5	25	86.4

Las figuras 19, 20 y 21 muestran la comparación de los valores para Cu, Pb y Zn, respectivamente, entre las muestras tomadas en parques y el fondo geoquímico natural (obtenido en este trabajo). En los tres casos se observa que un significativo número de muestras excede el valor geoquímico de fondo lo que indica un eventual aporte antropogénico de estos metales a los parques estudiados. En el caso del contenido de metales en polvo de calles, éste siempre es mucho mayor que el contenido reportado para los parques.

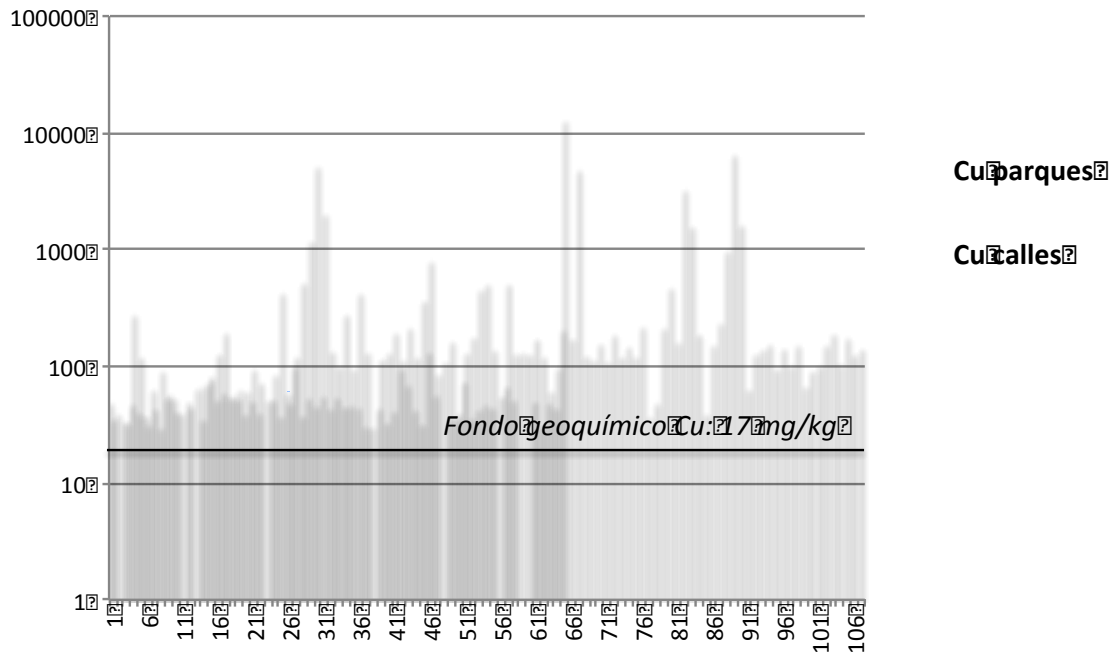


Figura 19. Contenido de Cu en muestras de parques y calles y comparación con el fondo geoquímico de Cu en Hermosillo.

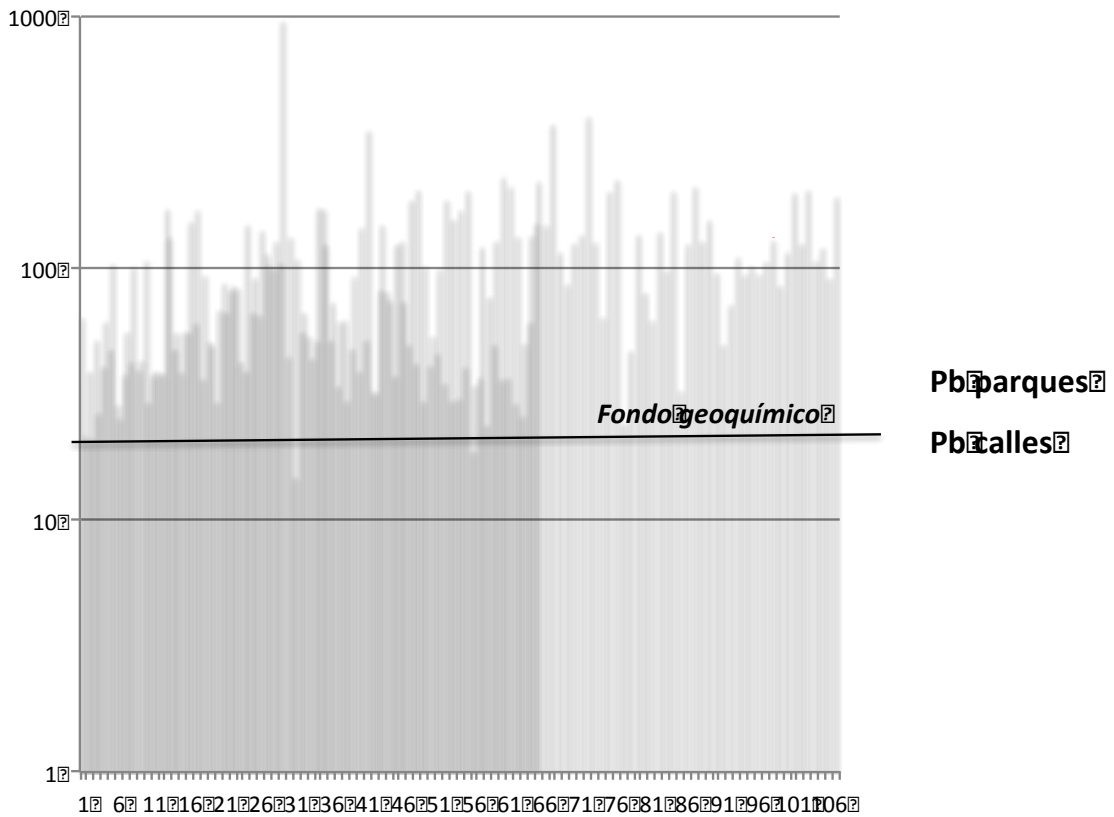


Figura 20. Contenido de Pb en muestras de parques y calles y comparación con el fondo geoquímico de Pb en Hermosillo.

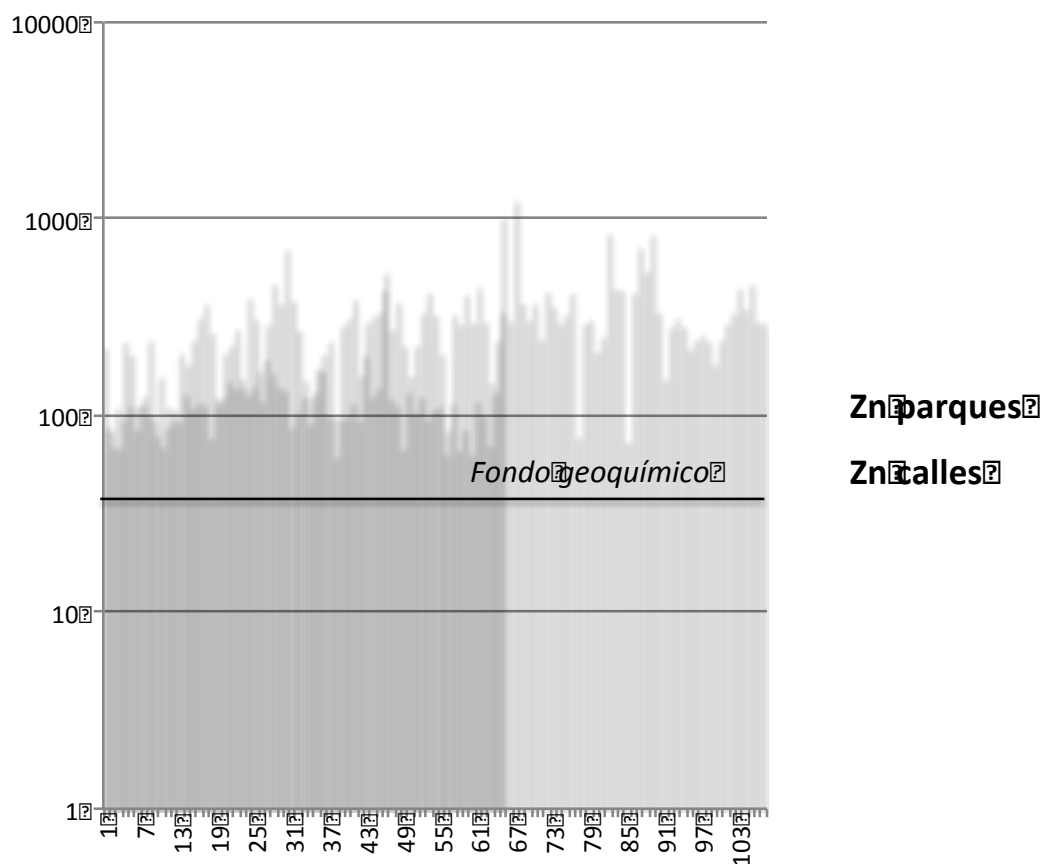


Figura 21. Contenido de Zn en muestras de parques y calles, comparación con el fondo geoquímico de Zn en Hermosillo.

V. 4. Índice de contaminación

El índice de contaminación (PI) de metales potencialmente tóxicos se define como la relación de la concentración de un metal en el área de estudio con la concentración del metal en el fondo geoquímico del área, de acuerdo a la siguiente ecuación: $PI_i = C_i / B_i$, donde C_i es la concentración del metal en el ambiente, B_i es el valor del fondo geoquímico tomado de i) fondo geoquímico del área de estudio y ii) valor promedio mundial de suelos. El PI se clasifica como: si $PI \leq 1$, bajo; $1 < IPI \leq 2$, nivel moderado de contaminación; $2 < IPI \leq 5$, nivel alto de contaminación; $PI > 5$, nivel extremadamente alto de contaminación (Wei *et al.*, 2009).

La Figura 22 muestra el índice de contaminación para las muestras estudiadas de parques y de calles. Con la excepción del manganeso, todos los metales estudiados aparecen en el

nivel de $PI > 5$, extremadamente alto nivel de contaminación. El patrón de distribución para los metales estudiados es el mismo para calles y parques, con la excepción del Cd que es más alto con comparación con el Cu en los parques, con respecto al mismo patrón en las calles. Sin embargo para poder estimar si existe un riesgo a la salud por exposición a estos metales es necesario hacer pruebas de bioaccesibilidad que están relacionadas con la solubilidad en fluidos corporales de las fases minerales o cristalinas a las que se asocian estos metales.

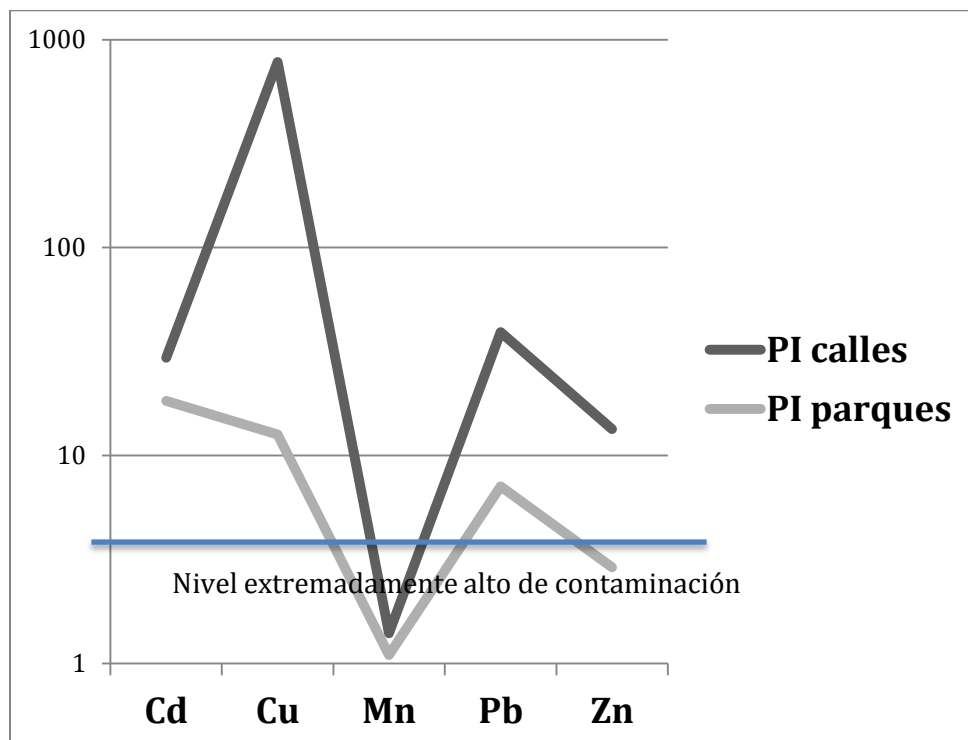


Figura 22. Índice de contaminación para muestras de parques y calles.

V.5. Factor de Enriquecimiento.

Para poder determinar si el origen de los metales es natural (geogénico) ó producto de las actividades humanas (antropogénico) es necesario estimar el Factor de Enriquecimiento (FE). El FE se estima en base a la fórmula:

$$EF = [C_n / C_{ref}] / [B_n / B_{ref}]$$

Donde:

C_n = contenido del elemento estudiado

C_{ref} = contenido del elemento de referencia en la muestra estudiada

B_n = contenido del elemento en el fondo geoquímico

B_{ref} = contenido del elemento de referencia en el fondo geoquímico

El elemento de referencia puede ser uno con baja variabilidad y que esté presente en el medio ambiente en cantidades traza. También se puede utilizar un elemento con distribución homogénea en la zona de estudio y que no represente una anomalía geoquímica, en el caso de este estudio se utilizó el aluminio como elemento de referencia.

Se reconocen cinco categorías en base al FE:

FE<2: empobrecimiento ó enriquecimiento mínimo

FE=2-5: enriquecimiento moderado

FE= 5-20: enriquecimiento significativo.

FE= 20-40: enriquecimiento muy elevado

FE>40: enriquecimiento extremadamente elevado.

La Figura 23 muestra que el Cu en calles tiene un enriquecimiento extremadamente elevado por lo que el origen para el Cu en ciertas calles es antrópico. El factor de enriquecimiento de Cu en las muestras de los parques indica un origen natural (geogénico).

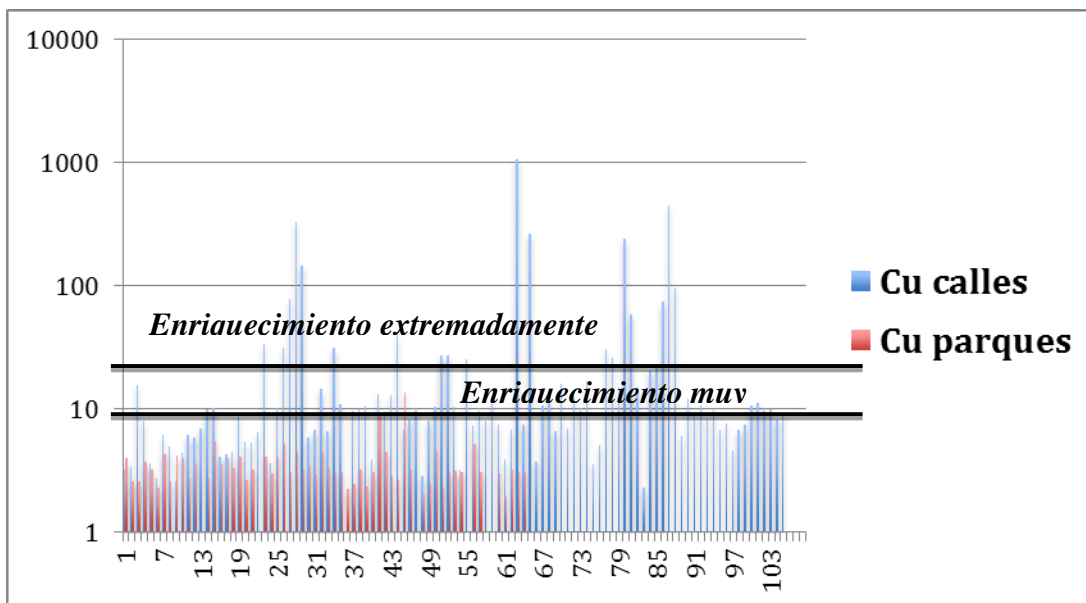


Figura 23. Factor de enriquecimiento para cobre en muestras de parques y calles.

El FE de Mn en parques y calles indica un origen natural (mínimo enriquecimiento, Fig. 24).

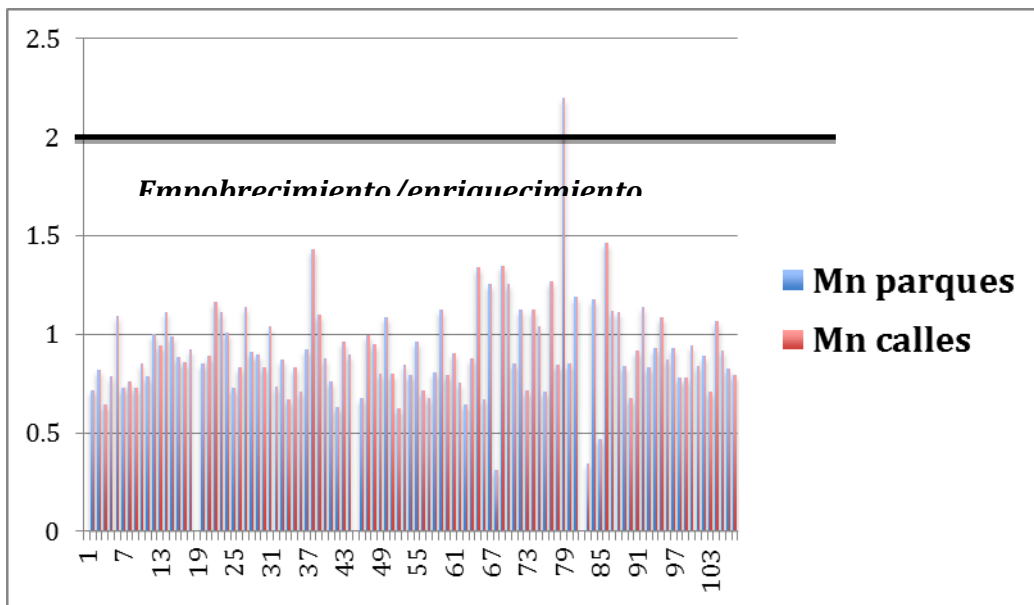


Figura 24. Factor de enriquecimiento para manganeso en muestras de parques y calles.

El Pb en calles tiene un enriquecimiento significativo con algunas muestras alcanzando FE superiores a 20 (enriquecimiento muy elevado) y una muestra con FE superior a 40 (enriquecimiento extremadamente elevado). El FE para Pb en parques es inferior a 10 (Figura 25) lo que indica que es geogénico.

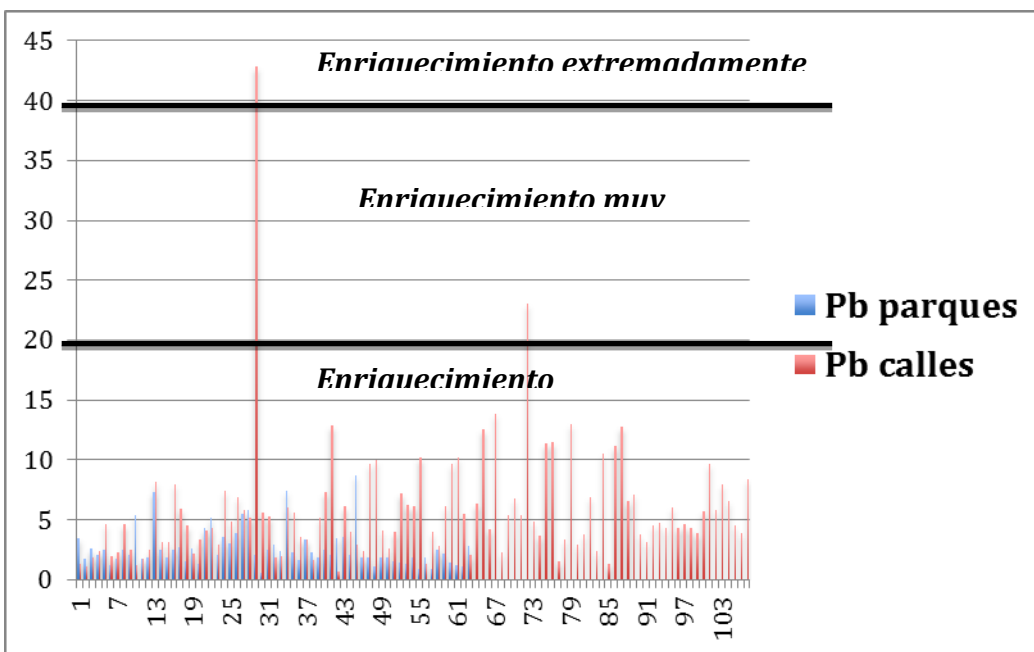


Figura 25. Factor de enriquecimiento para plomo en muestras de parques y calles.

De acuerdo a la Figura 26, algunas muestras de polvo de calles muestran un enriquecimiento significativo en Zn. Los FE's para Zn en parques indica un origen natural.

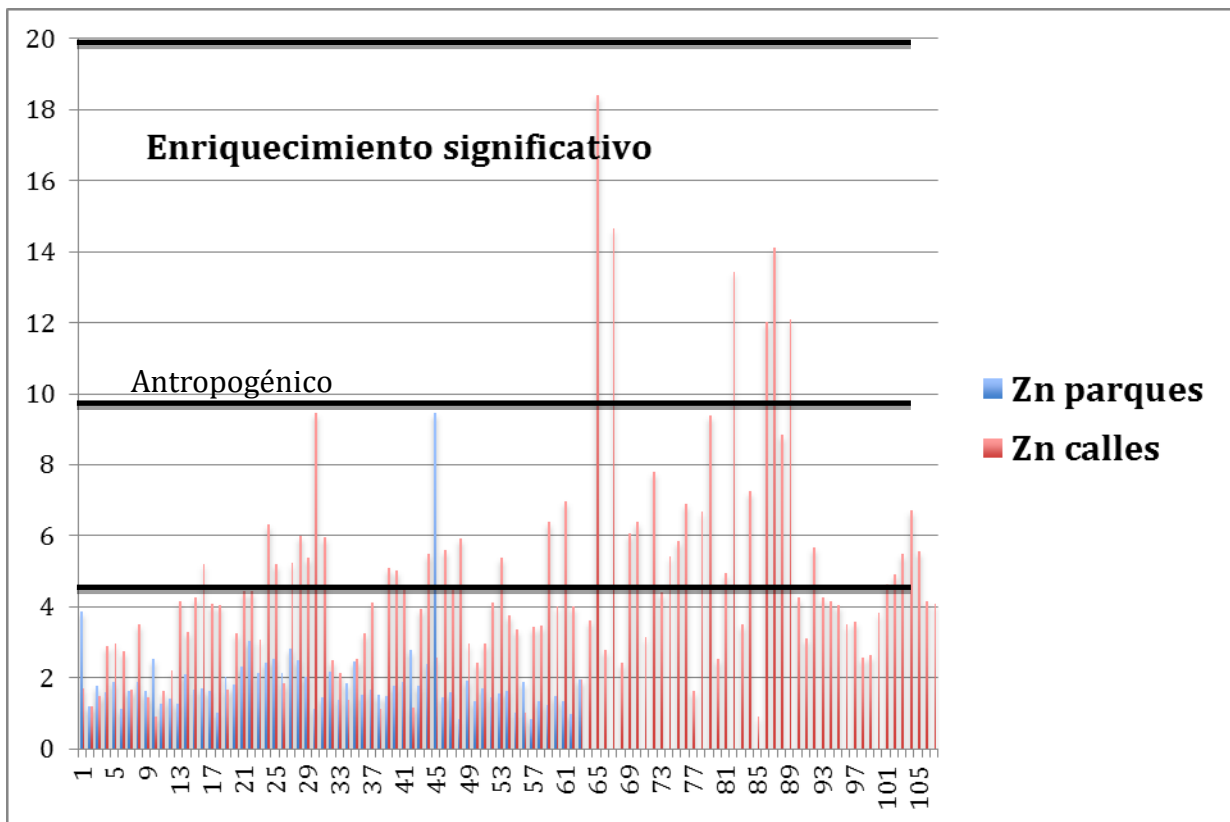


Figura 26. Factor de enriquecimiento para plomo en muestras de parques y calles de Hermosillo, Sonora.

V. 6. Bioaccesibilidad de metales en fase gástrica e intestinal

La bioaccesibilidad del As, Cu y Pb en suelos se basa en el método de extracción secuencial que simula las condiciones gástricas e intestinales de humanos, propuesto por Ruby *et al.* (1992, 1993) y que se conoce como método PBET (Physiologically based extraction test) por sus siglas en inglés. La selección de las muestras para analizar la bioaccesibilidad de metales se hizo bajo los siguientes criterios: se seleccionaron áreas geográficas de Hermosillo con contenidos elevados de Cu total en polvo y baja, alta incidencia de Diabetes Mellitus, así como áreas geográficas representativas con menor contenido de Cu total en polvo y baja, alta incidencia de Diabetes Mellitus.

Los resultados sin procesar para muestras de polvo de calles se presentan en las Tablas 11 y 12.

Tabla 11. Datos de bioaccesibilidad de metales en polvo de calles de la ciudad de Hermosillo, Sonora, fase gástrica basado en el método PBET (Ruby *et al.*, 1992).

Muestra	Tamaño de partícula (mm)	Cd mg.L ⁻¹	Cu mg.L ⁻¹	Mn mg.L ⁻¹	Pb mg.L ⁻¹	Zn mg.L ⁻¹
CB-16	<0.044	<0.020	<0.122	<0.007	<0.03	0.20
CB-16	>0.044	<0.020	<0.122	0.17	0.10	0.23
CB-16	0.075	<0.020	<0.122	<0.007	<0.03	0.11
CB-19	<0.044	<0.020	0.011	<0.007	0.53	0.40
CB-19	>0.044	<0.020	<0.122	0.18	0.16	0.29
CB-19	0.075	<0.020	<0.122	0.13	<0.03	0.16
CB-21	<0.044	<0.020	0.13	0.24	0.11	0.39
CB-21	>0.044	<0.020	<0.122	0.17	<0.03	0.27
CB-21	0.075	<0.020	<0.122	0.12	<0.03	0.20
CB-27	<0.044	<0.020	<0.122	0.27	<0.03	0.23
CB-27	>0.044	<0.020	<0.122	0.18	<0.03	0.19
CB-27	0.075	<0.020	<0.122	0.12	<0.03	0.16
CB-86	<0.044	<0.020	0.24	0.27	0.12	0.45
CB-86	>0.044	<0.020	0.14	0.18	<0.03	0.34
CB-86	0.075	<0.020	<0.122	0.12	<0.03	0.20

Tabla 12. Datos de bioaccesibilidad de metales en polvo de calles de la ciudad de Hermosillo, Sonora, fase intestinal basado en el método PBET (Ruby *et al.*, 1992).

Muestra	Tamaño de partícula (mm)	Cd mg.L ⁻¹	Cu mg.L ⁻¹	Mn mg.L ⁻¹	Pb mg.L ⁻¹	Zn mg.L ⁻¹
CB-16	<0.044	<0.020	<0.122	<ld	<0.03	<0.007
CB-16	>0.044	<0.020	<0.122	0.17	<0.03	<0.007
CB-16	0.075	<0.020	<0.122	<ld	<0.03	<0.007
CB-19	<0.044	<0.020	<0.122	<ld	<0.03	<0.007
CB-19	>0.044	<0.020	<0.122	0.18	<0.03	<0.007
CB-19	0.075	<0.020	<0.122	0.13	<0.03	<0.007
CB-21	<0.044	<0.020	0.12	0.24	<0.03	<0.007
CB-21	>0.044	<0.020	<0.122	0.17	<0.03	0.58
CB-21	0.075	<0.020	<0.122	0.12	<0.03	<0.007
CB-27	<0.044	<0.020	<0.122	0.27	<0.03	<0.007
CB-27	>0.044	<0.020	<0.122	0.18	<0.03	<0.007
CB-27	0.075	<0.020	<0.122	0.12	<0.03	<0.007
CB-86	<0.044	<0.020	0.22	0.27	<0.03	<0.007
CB-86	>0.044	<0.020	<0.122	0.18	<0.03	<0.007
CB-86	0.075	<0.020	<0.122	0.12	<0.03	<0.007

Las Tablas 13, 14 y 15 muestran los contenidos totales de metales en tres fracciones granulométricas distintas, a diferencia de las muestras de parques, el cobre tiene un

incremento en concentración en la fracción de tamaño menor (ejemplo 44.8 mg.kg⁻¹ para la fracción menor a 0.044mm) y disminuye su contenido en las fracciones más gruesas.

Tabla 13. Concentración total de metales en muestras con granulometría menor a 0.044 mm.

	Cu	Mn	Pb	Zn
CB-16	44.8	490.4	114.6	167.5
CB-19	1314.9	513.7	889.5	441.8
CB-21	2023.9	533.8	97.7	437.4
CB-27	142.6	519.9	63.0	264.4
CB-86	7038.8	590.3	142.5	860.2

Tabla 14. Concentración total de metales en muestras con granulometría equivalente a 0.044 mm.

	Cu	Mn	Pb	Zn
CB-16	32.7	436.2	100.2	131.7
CB-19	378	411.5	666	249.4
CB-21	684.8	408.4	71.1	267.7
CB-27	41.6	363.3	44	162.6
CB-86	3186.9	454.9	76.7	499.1

Tabla 15. Concentración total de metales en muestras con granulometría equivalente a 0.075 mm.

	Cu	Mn	Pb	Zn
CB-16	<dl	223	72.1	80.4
CB-19	52.9	567.3	446.4	176.5
CB-21	257.2	417.7	46.5	176.8
CB-27	<dl	195.9	33.9	88.5
CB-86	643	283.8	42.7	189.1

La Figura 27, 28 y 29 se aprecia la distribución de la concentración total de Cu, Pb y Zn, respectivamente, en función del tamaño de partícula y se observa que el contenido de los elementos incrementa a medida de que el tamaño de partícula disminuye. Éstas muestras fueron las seleccionadas para las pruebas de bioaccesibilidad y de extracción química secuencial de Tessier.

La muestra CB-86 corresponde con una muestra en una zona de alto tráfico pesado (ésta muestra se recolectó en una calle al sureste de la ciudad que funcionaba en ese momento como desviación de la carretera Hermosillo-Nogales).

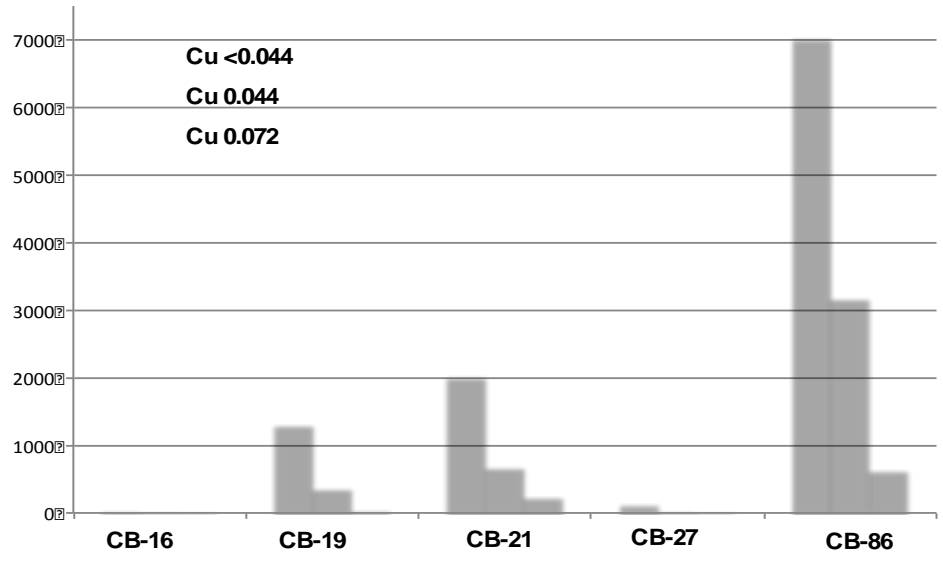


Figura 27. Distribución de cobre total en función del tamaño de partícula (tamaño en mm).

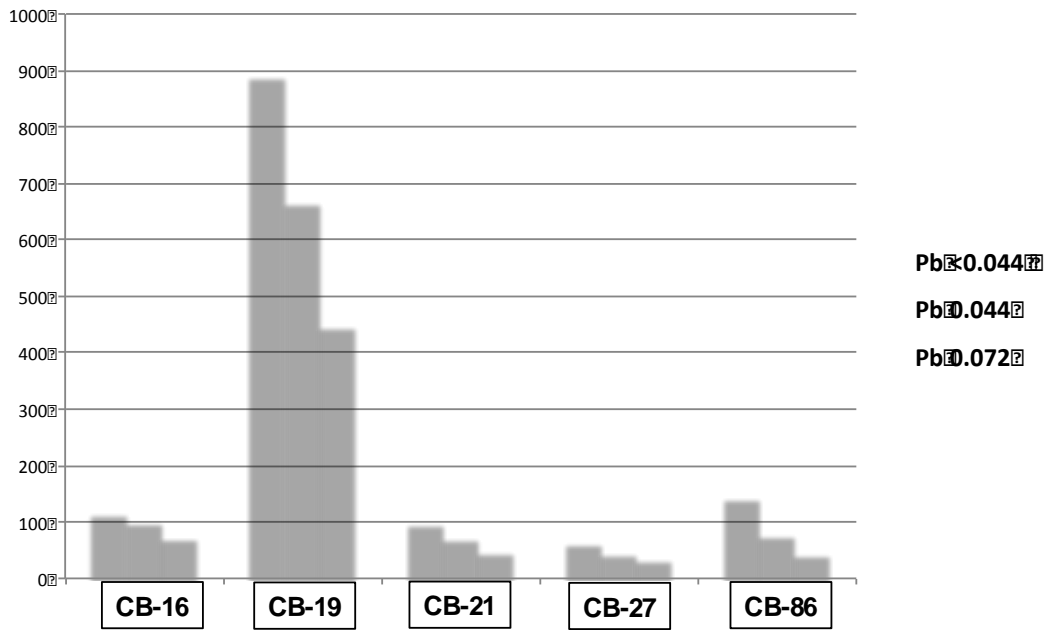


Figura 28. Distribución de plomo en función del tamaño de partícula (tamaño en mm).

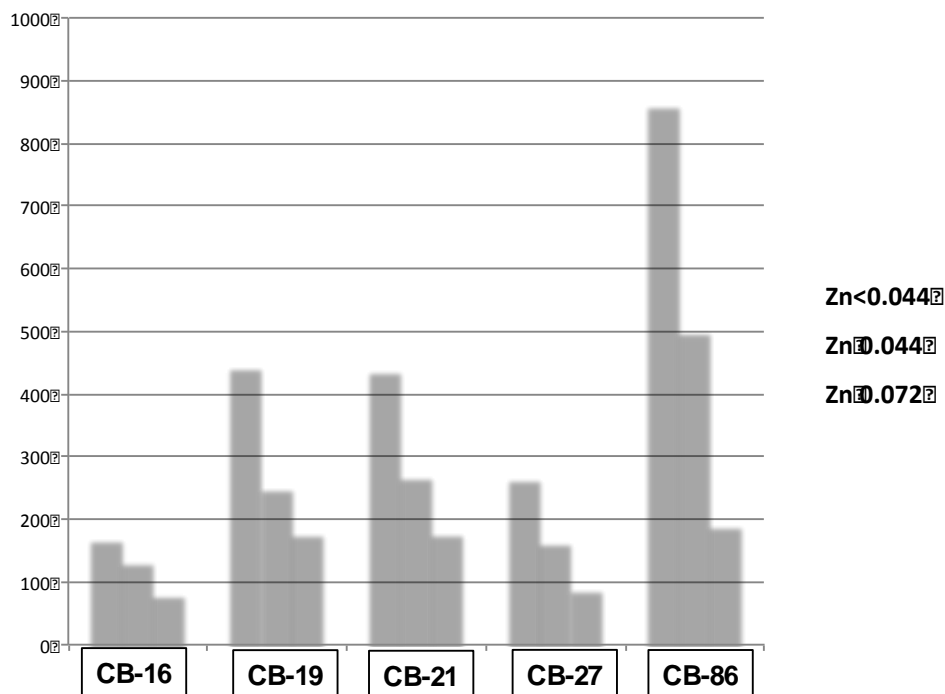


Figura 29. Distribución de zinc en función del tamaño de partícula (tamaño en μm).

El Pb presenta mayores valores en la muestra CB-19, mientras que el Cu y el Zn se presentan con máximos en la muestra CB-86. Esto es en cuanto a contenido total del metal por fracciones granulométricas estudiadas. Para estimar el porcentaje de bioaccesibilidad por metal y fracción granulométrica se recalcularon los valores de las Tablas 11 y 12 correspondientes a simulación en fluido gástrico y en fluido intestinal. Los resultados se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16. Porcentaje de bioaccesibilidad de metales en fluidos gástricos e intestinales, fracción menor a 0.044 μm , 0.044 μm y 0.072 μm . No se reportan datos para Cd ya que los valores reportados están por debajo del límite de detección.

Muestra	Fracción μm	Cu %		Mn %		Pb %		Zn %	
		G	I	G	I	G	I	G	I
CB-16	<0.044	27	26.7	Nr	Nr	2.6	2.6	11.9	11.9
CB-16	0.044	3	36.4	3.9	3.9	10	3	17.5	0.5
CB-16	0.075	Nr	Nr	Nr	Nr	4.2	4.2	13.7	0.9
CB-19	<0.044	1	0.91	2.1	Nr	6	0.3	9.1	9.1
CB-19	0.044	1	3.2	2.9	4.4	2.4	0.5	11.6	0.3
CB-19	0.075	23	22.6	2.1	2.3	0.7	0.7	9.1	0.4
CB-21	<0.044	1	0.6	4.5	4.5	11.3	3.1	8.9	0.2
CB-21	0.044	2	1.8	4.2	4.2	4.2	4.2	10.1	21.7
CB-21	0.075	5	22.6	2.9	2.9	6.5	6.5	11.3	0.4

CB-27	<0.044	8.4	8.4	5.2	5.2	4.8	4.8	8.7	0.3
CB-27	0.044	29	28.6	5	5	6.8	6.8	11.7	0.4
CB-27	0.075	Nr	Nr	6.1	6.1	8.8	8.8	18.1	0.8
CB-86	<0.044	3	0.2	4.6	4.6	8.4	2.1	5.2	0.1
CB-86	0.044	0.4	0.4	3.9	4	3.9	3.9	6.8	0.1
CB-86	0.075	2	1.9	4.2	4.2	7.02	7.02	10.6	0.4

G: Fase gástrica, I: Fase intestinal.

Nr: valores por debajo del límite de detección, por lo que no se reportan.

La tabla 16 muestra que para el caso del Cu, el mayor porcentaje de bioaccesibilidad corresponde a la muestra CB-16, fracción 0.044 mm con 36.4% en fase intestinal. La fase gástrica tiene menores porcentajes de bioaccesibilidad para el Cu, en general, aunque las muestras CB-16, CB-19, y CB-27 tienen significativos porcentajes de bioaccesibilidad para el Cu (superiores a 20%) lo que es importante porque se colectaron en áreas urbanas que tienen alta incidencia de diabetes mellitus (ver discusión en capítulo VI.9). La bioaccesibilidad para el Mn no excede el 7% en las muestras estudiadas, tanto para la fase gástrica como para la intestinal; mientras que la bioaccesibilidad para el Pb es mayor en la muestra CB-21 con 11.3% en fase gástrica y 3.1% en fase intestinal. La muestra CB-16 tiene un 10% de bioaccesibilidad para el Pb en fase gástrica y 3% en fase intestinal en la fracción de 0.044mm. El Zn tiene variables porcentajes de bioaccesibilidad para todas las muestras estudiadas tanto en la fase gástrica como en la fase intestinal. Esto último es importante ya que este metal atenúa el efecto del estrés oxidativo por lo que puede actuar en oposición a la bioaccesibilidad del Mn, Cu y Pb en las zonas con alta incidencia de diabetes y otras enfermedades como neoplasmas y del sistema circulatorio.

V. 7. Extracción secuencial de Tessier: asociación de metales a fases minerales con distinta solubilidad

La materia sólida puede ser particionada en fracciones específicas para ser extraídas selectivamente lo cual aporta información acerca del origen, modo de ocurrencia, disponibilidad biológica y físico-química, movilización y transporte de los elementos traza (Tessier *et al.*, 1979). Uno de los propósitos de este estudio es conocer la geodisponibilidad y las fases minerales a las que se asocian los metales de interés (Cd, Cu, Mn, Pb y Zn) en las muestras colectadas. El análisis se realizó en cinco muestras de polvo de calles que también fueron estudiadas para evaluar la bioaccesibilidad. Las muestras son: CB-16, CB-

19, CB-21, CB-27 y CB-86 en dos diferentes tamaños de partícula (menor a 0.044 mm y de 0.044 mm), y son representativas de áreas con distinto nivel de tráfico e incidencia de diabetes en la ciudad (Tabla 17 y Figura 30).

Muestra	Incidencia de Diabetes*	Tráfico
CB-16	Bajo	Bajo
CB-19	Alto	Alto
CB-21	Alto	Bajo
CB-27	Alto	Alto
CB-86	Bajo	Alto

Tabla 17. Selección de muestras para estudio de fraccionación química, considerando zonas de diferencia nivel de incidencia de Diabetes Mellitus y Exposición a Tráfico Vehicular. * La incidencia de Diabetes Mellitus fue tomada de Freire De Carvalho (2009).

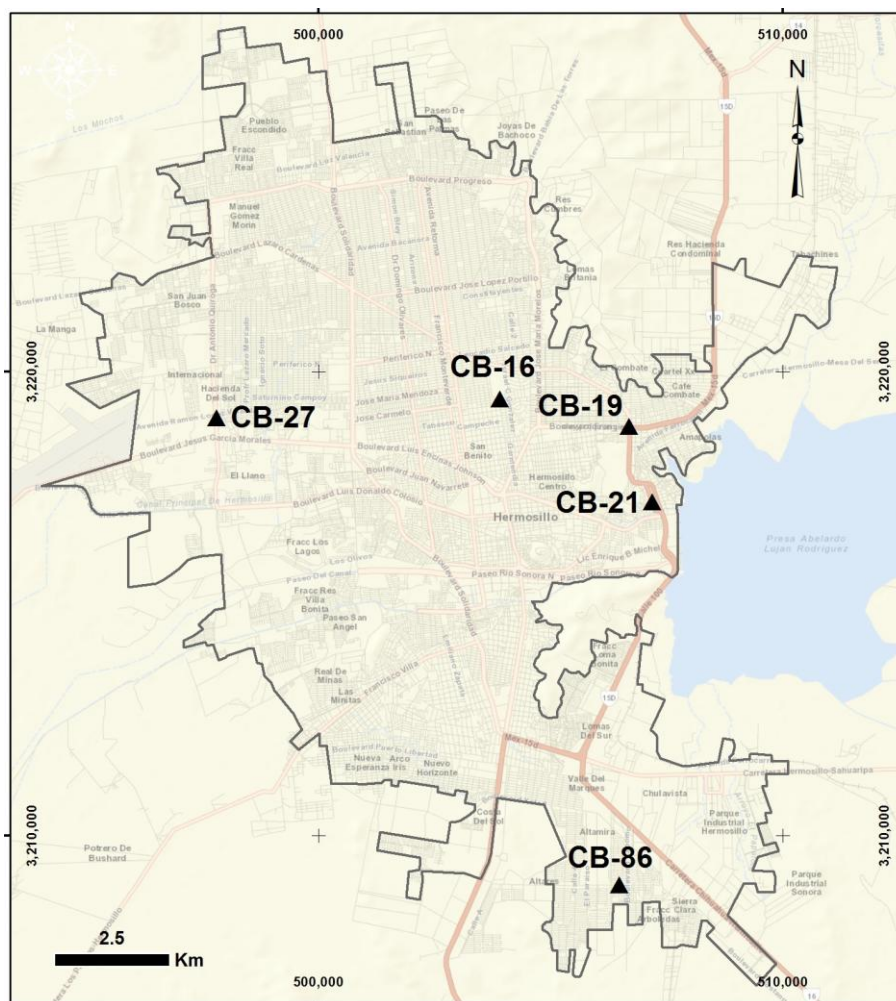


Figura30. Mapa de localización de muestras estudiadas para las pruebas de bioaccesibilidad y extracción secuencial de Tessier *et al.* (1979).

La concentración total de metales detectados en las muestras de calles fue de acuerdo con el siguiente orden descendente: Cu>Zn>Pb>Mn>Cd. Las tablas 13, 14 y 15 hacen referencia a las concentraciones (representadas en mg.kg^{-1}) para cada elemento según la fracción correspondiente. En los polvos con tamaño de partícula menor a 0.044 mm, la secuencia de concentración fue Cu>Pb>Mn>Zn>Cd y en la partícula de 0.044 mm: Cu>Zn>Pb>Mn>Cd. Los resultados indican que existe una mayor concentración de metales en la fracción más fina.

Las concentraciones máximas y mínimas para el tamaño de partícula menor a 0.044 mm de cada elemento son las siguientes: Cd, máxima de 28.1 mg.kg^{-1} en la muestra CB-86, mínima de 0.125 mg.kg^{-1} en CB-16 y CB-19. Para Cu la máxima de 4730 mg.kg^{-1} en CB-86 y mínima de 0.015 mg.kg^{-1} en CB-16 y CB-19. Mn, con el valor máximo de 364 mg.kg^{-1} en la muestra CB-21 y nuevamente CB-19 tiene el valor mínimo con 0.125 mg.kg^{-1} . Para el caso del plomo la muestra CB-19 tiene el valor máximo con 650 mg.kg^{-1} y la mínima concentración de 0.125 mg.kg^{-1} en la muestra CB-16. El valor máximo para zinc se detectó en la muestra CB-86 con 304 mg.kg^{-1} y CB-16 y CB-19 con el valor mínimo de 0.125 mg.kg^{-1} .

En el tamaño de partícula 0.044 mm el valor máximo para el Cd fue en las muestras CB-21 y CB-86 con 28 mg.kg^{-1} y mínimo en las muestras CB-19 y CB-21 con 0.125 mg.kg^{-1} . El valor máximo para Cd se presentó en las muestras CB-21 y CB-86 con 28 mg.kg^{-1} . En Cu el valor máximo fue en la muestra CB-86 con 3160 mg.kg^{-1} y CB-16 y CB-19 con los valores mínimo de 0.125 mg.kg^{-1} . El valor máximo en Mn fue en la muestra CB-16 con 319 mg.kg^{-1} y mínimo de CB-19 con 0.125 mg.kg^{-1} . Para el caso del Pb el valor máximo fue de 419.5 en la muestra CB-19 y en las muestras CB-16 y CB-19 se encontró el valor mínimo de 0.125 mg.kg^{-1} . Finalmente, para el Zn la máxima fue 665 mg.kg^{-1} en la muestra CB-19 y mínima de 0.125 mg.kg^{-1} en CB-16 y CB-19.

La Tabla 18 muestra las concentraciones obtenidas por el método de Tessier para cada fracción geoquímica en muestras con tamaño de 0.044 mm. Los resultados de esta tabla se convirtieron a fracción porcentual para facilitar la interpretación.

Tabla18 . Concentración de metales (mg.kg^{-1}) en las fracciones geoquímicas de muestras de polvos de calles de Hermosillo, Sonora con tamaño de partícula de 0.044mm.

Muestra	Fracción	Cd	Cu	Mn	Pb	Zn
CB-16	Intercambiable	0.125	0.125	18.9	0.125	0.125
	Carbonatos	14	23.75	47.6	31.25	30.75
	Óxidos de Fe/Mn	0.25	0.25	72	38.9	44.75
	M.O/Sulfuros	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
	Residual	0.25	0.25	319	0.25	68.8
CB-19	Intercambiable	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125
	Carbonatos	14.3	30.1	91.85	81.35	101.9
	Óxidos de Fe/Mn	0.25	0.25	79	491.5	73
	M.O/Sulfuros	0.25	396.5	0.25	58.5	28.95
	Residual	0.25	0.25	334	60.1	665
CB-21	Intercambiable	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
	Carbonatos	28	51.2	80.7	43.9	94.5
	Óxidos de Fe/Mn	0.25	0.25	89.6	0.25	88.1
	M.O/Sulfuros	0.25	1310	0.25	0.25	58
	Residual	0.25	204	316	0.25	0.25
CB-27	Intercambiable	0.25	0.25	27.7	0.25	0.25
	Carbonatos	27.9	49.3	97	42.3	76.9
	Óxidos de Fe/Mn	0.25	0.25	74.6	0.25	65.6
	M.O/Sulfuros	0.25	87.4	0.25	0.25	0.25
	Residual	0.25	0.25	318	0.25	0.25
CB-86	Intercambiable	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
	Carbonatos	28	59.3	79.4	44.9	105.2
	Óxidos de Fe/Mn	0.25	63.8	107	53.3	126
	M.O/Sulfuros	0.25	3160	0.25	0.25	189
	Residual	0.25	1566	332	0.25	127.6

La Tabla 19 muestra las fracciones porcentuales de los resultados del estudio de extracción secuencial geoquímica para la fracción de 0.044 mm (fracción más gruesa). El Cd se asocia preferencialmente a los carbonatos (mayor al 90% en las muestras estudiadas) independientemente si la muestra se localiza en áreas con alta ó con baja incidencia de Diabetes.

Tabla 19. Distribución porcentual de metales potencialmente tóxicos en las fracciones geoquímicas de muestras de polvos de calles de Hermosillo, Sonora con tamaño de partícula de 0.044mm.

Muestra	Fracción	Cd%	Cu%	Mn%	Pb%	Zn%
CB-16	Intercambiable	0.84	0.51	4.13	0.18	0.09
	Carbonatos	94.12	96.43	10.39	44.2	21.25
	Óxidos de Fe/Mn	1.68	1.02	15.73	54.96	30.93
	M.O/Sulfuros	1.68	1.02	0.05	0.35	0.17
	Residual	1.68	1.02	69.69	0.35	47.55
CB-19	Intercambiable	0.82	0.03	0.02	0.02	0.01
	Carbonatos	94.2	7.05	18.18	11.76	11.73
	Óxidos de Fe/Mn	1.65	0.06	15.64	71.07	8.4
	M.O/Sulfuros	1.65	92.81	0.05	8.46	3.33
	Residual	1.65	0.06	66.11	8.69	76.53
CB-21	Intercambiable	0.86	0.02	0.05	0.56	0.10
	Carbonatos	96.6	3.3	16.58	97.78	39.2
	Óxidos de Fe/Mn	0.86	0.02	18.41	0.56	36.5
	M.O/Sulfuros	0.86	83.67	0.05	0.56	24.06
	Residual	0.86	13.03	64.9	0.56	0.10
CB-27	Intercambiable	0.87	0.18	5.35	0.58	0.17
	Carbonatos	96.54	35.87	18.74	97.69	53.68
	Óxidos de Fe/Mn	0.87	0.18	14.41	0.58	45.79
	M.O/Sulfuros	0.87	63.59	0.05	0.58	0.17
	Residual	0.87	0.18	61.44	0.58	0.17
CB-86	Intercambiable	0.86	0.01	0.05	0.25	0.05
	Carbonatos	96.6	1.22	15.3	45.38	19.19
	Óxidos de Fe/Mn	0.86	1.31	20.6	53.86	22.99
	M.O/Sulfuros	0.86	65.2	0.05	0.25	34.5
	Residual	0.86	32.3	63.98	0.25	23.3

La Tabla 20 contiene las concentraciones de Cd, Cu, Mn, Pb y Zn en las fracciones geoquímicas obtenidas por el método de Tessier para las muestras con tamaño de partícula menor a 0.044 mm. Estos datos se presentan como referencia ya que se convirtieron a fracción porcentual para facilitar la interpretación y presentación de resultados.

Tabla 20. Concentración de metales ($\mu\text{g/g}$) en las fracciones geoquímicas de muestras de polvos de calles de Hermosillo, Sonora con tamaño de partícula menor de 0.044mm.

Muestra	Fracción	Cd	Cu	Mn	Pb	Zn
CB-16	Intercambiable	0.125	0.125	26.85	0.125	0.125
	Carbonatos	14.1	24.05	62.05	36.7	34.65
	Óxidos de Fe/Mn	0.25	0.25	95	49.9	58.5
	M.O/Sulfuros	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
	Residual	0.25	0.25	349	0.25	99.8
CB-19	Intercambiable	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125
	Carbonatos	14.3	36.25	92.45	99.05	112.5
	Óxidos de Fe/Mn	0.25	0.25	160.5	650	140
	M.O/Sulfuros	0.25	1270	0.25	67	79.5
	Residual	0.25	202	332	75.5	110
CB-21	Intercambiable	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
	Carbonatos	28	58.9	90.2	49.5	92.2
	Óxidos de Fe/Mn	0.25	27	143	71.9	160
	M.O/Sulfuros	0.25	2060	0.25	0.25	117
	Residual	0.25	189.2	364	0.25	124.4
CB-27	Intercambiable	0.25	0.25	32.2	0.25	0.25
	Carbonatos	28	50	105.6	42.7	78.7
	Óxidos de Fe/Mn	0.25	0.25	166	0.25	120
	M.O/Sulfuros	0.25	89.3	0.25	0.25	0.25
	Residual	0.25	0.25	294	0.25	0.25
CB-86	Intercambiable	0.25	0.25	39.1	0.25	0.25
	Carbonatos	28.1	78.9	97.9	51	123.9
	Óxidos de Fe/Mn	0.25	87.5	187	108	260
	M.O/Sulfuros	0.25	4730	0.25	0.25	304
	Residual	0.25	2300	328	0.25	214

La Tabla 21 muestra la distribución porcentual para Cd, Cu, Mn, Pb y Zn correspondientes al tamaño de partícula menor a 0.044 mm para cada fracción geoquímica. El Cd se asocia a carbonatos principalmente en porcentajes superiores al 90% en todas las muestras estudiadas. La distribución del Cu en la fracción granulométrica menor a 0.044 mm se asocia a la fracción de materia orgánica y sulfuros en todas las muestras con la excepción

de la CB-16 (zona de menor tráfico) en la que se asocia el Cu con carbonatos principalmente. La muestra CB-16 corresponde con área de baja incidencia de diabetes.

Tabla 21. Distribución porcentual de metales potencialmente tóxicos en las fracciones geoquímicas de muestras de polvos de calles de Hermosillo, Sonora con tamaño de partícula menor de 0.044mm.

Muestra	Fracción	Cd%	Cu%	Mn%	Pb%	Zn%
CB-16	Intercambiable	0.83	0.5	5.04	0.14	0.06
	Carbonatos	94.1	96.5	11.6	42.1	17.9
	Óxidos de Fe/Mn	1.67	1	17.8	57.2	30.3
	M.O/Sulfuros	1.67	1	0.05	0.29	0.13
	Residual	1.67	1	65.5	0.29	51.6
CB-19	Intercambiable	0.82	0.01	0.02	0.01	0.03
	Carbonatos	94.2	2.4	15.8	11.1	25.45
	Óxidos de Fe/Mn	1.6	0.02	27.4	72.9	31.7
	M.O/Sulfuros	1.6	84.2	0.04	7.5	17.98
	Residual	1.6	13.4	56.7	8.5	24.88
CB-21	Intercambiable	0.86	0.01	0.04	0.2	0.05
	Carbonatos	96.6	2.5	15.1	40.5	18.67
	Óxidos de Fe/Mn	0.86	1.16	23.93	58.8	32.4
	M.O/Sulfuros	0.86	88.2	0.04	0.2	23.7
	Residual	0.86	8.1	60.9	0.2	25.2
CB-27	Intercambiable	0.86	0.18	5.38	0.57	0.13
	Carbonatos	96.6	35.7	17.66	97.7	39.4
	Óxidos de Fe/Mn	0.86	0.18	27.8	0.57	60.2
	M.O/Sulfuros	0.86	63.7	0.04	0.57	0.13
	Residual	0.86	0.18	49.2	0.57	0.13
CB-86	Intercambiable	0.86	0.003	5.99	0.16	0.03
	Carbonatos	96.6	1.1	15	31.9	13.7
	Óxidos de Fe/Mn	0.86	1.2	28.67	67.6	28.8
	M.O/Sulfuros	0.86	65.7	0.04	0.16	33.7
	Residual	0.86	31.95	50.3	0.16	23.7

Las fracciones geoquímicas a las que se asocian principalmente los metales Pb, Cu, Zn y Mn se discuten en la siguiente sección.

V.7.1. Metales en las fracciones geoquímicas.

La distribución de metales para las distintas fracciones de las muestras tuvieron el siguiente comportamiento en función de mínimas y máximas concentraciones:

Fracción I: metales intercambiables.

Esta fracción incluye metales adsorbidos sobre superficies sólidas de minerales mediante una interacción electrostática relativamente débil, y que por tanto pueden ser liberados por un proceso de intercambio iónico. Por tanto, es la fracción que representa mayor geo- y biodisponibilidad. En esta fracción los metales Cd, Cu, Pb y Zn tienen un comportamiento similar ya que presentan bajas concentraciones fluctuantes entre 0.125-0.25 mg.kg⁻¹ representando un porcentaje $\leq 1\%$, a diferencia del Mn que se detectó hasta un 5.3% en la muestra CB-27 con tamaño de partícula menor a 0.044 mm.

Fracción II: metales unidos a carbonatos.

Diversos estudios argumentan que en esta fracción los metales precipitan ó co-precipitan y son susceptibles a cambios de pH, ya que una disminución conduce a la disolución de carbonatos e hidróxidos liberándose así los metales (Dang *et al.*, 2002). El Cd presentó comportamiento similar en todas las muestras estudiadas en los dos tamaños de partícula analizados con estimados porcentuales entre 94 y 96%. La Figura 31 muestra la distribución para el Cd en la fracción de 0.044 mm asociado a fracción de carbonatos principalmente, en menor porcentaje a óxidos de Fe/Mn, y residual en las muestras CB-16 y CB-19.

En el caso del Cu, el valor porcentual mínimo fue de 1% para la muestra CB-86 a un tamaño menor a los 0.044 mm (Figura 32), y el máximo fue de 96.4% en la muestra CB-16 en ambos tamaños de partícula estudiados. El valor porcentual mínimo para Mn asociado a carbonatos fue de 10% en la muestra CB-19 con tamaño menor a 0.044 mm y máximo de 18.7% en la CB-27 con tamaño de 0.044 mm. El Pb presenta un valor mínimo porcentual de 11.1% en la muestra CB-19 (menor a 0.044 mm) y un valor máximo de 97.7% en la CB-21 (menor a 0.044 mm) y CB-27 (menor a 0.044 mm). El Zn presenta un valor mínimo porcentual de 11.7% en la CB-19 (fracción de 0.044 mm) y un máximo de 53.6% en la CB-

27 (fracción de 0.044 mm). En general, la fracción asociada a carbonatos es la más significativa ya que el Cd, Cu y Pb se asocian a carbonatos en las muestras estudiadas lo que puede favorecer la liberación de estos metales en el organismo. Las Figuras 31 y 32 muestran la distribución de Cu en las cinco fracciones estudiadas con un comportamiento muy similar para ambos tamaños granulométricos. En la muestra CB-16 el Cu se asocia principalmente a carbonatos con un mínimo porcentaje asociado a óxidos de Fe y Mn y a la fracción residual. En las muestras CB-19, CB-21, y CB-86 el Cu se asocia a materia orgánica y sulfuros. La muestra CB-27 tiene un importante porcentaje de Cu asociado a carbonatos, mientras que la CB-86 tiene un 20 % de asociación a la fracción residual. Las Figuras 31 y 32 presentan la distribución del Mn para cada fracción estudiada. En ambos tamaños de partícula (0.044 mm y <0.044 mm) se observa un comportamiento similar con el Mn asociado principalmente a la fase residual y en menor proporción a la fase de óxidos de Fe/Mn y carbonatos. Las Figuras 31 y 32 indican un comportamiento variable en el caso del Pb para las dos fracciones granulométricas estudiadas. En la Figura 32 se presenta la distribución del Pb en las fracciones geoquímicas para el tamaño de partícula menor a 0.044 mm, donde la muestra CB-19 tiene una clara asociación del Pb con la materia orgánica/sulfuros, mientras que la muestra CB-27 indica una preferencia del Pb por la fase de carbonatos, lo que lo hace geodisponible. Las muestras restantes tienen una distribución similar para el Pb en fase de carbonato y de M.O./sulfuros.

Fracción III: metales unidos a óxidos de hierro y manganeso.

Esta fracción es de las más importantes de la fracción litogénica, ya que es donde se encuentran contenidos la mayor parte de los metales traza que potencialmente pueden ser liberados o redistribuirse de acuerdo a las características de los polvos y condiciones ambientales (Mat *et al.*, 1994). Las muestras con concentraciones de Cd presentan similitud ya que todas tienen porcentajes no mayores al 2% al igual que el Cu. El Mn tiene un máximo porcentual del 28.6% en la muestra CB-86 (0.044 mm) y mínimo porcentual del 14.4% en la muestra CB-27 (0.044 mm). El Pb con un mínimo porcentual de 0.5% en la muestra CB-21 (0.044 mm) y CB-27 en sus dos tamaños de partícula analizados. La muestra que registra el porcentaje máximo de Pb es la CB-19 (0.044 mm) con un valor

porcentual de 72.8%. Finalmente el Zn presenta valor porcentual máximo de 60.1% en la muestra CB-27 (<0.044 mm) y mínima de 8.4% en la muestra CB-19 (0.044 mm).

Fracción IV: metales unidos a materia orgánica y sulfuros.

La presencia de materia orgánica puede incrementar los niveles de metales en polvo y suelo. El Cd no presenta valores porcentuales superiores al 2% en la Fracción IV, en cualquiera de los tamaños estudiados. Los valores porcentuales mínimos para Cu en esta fracción se registraron en las muestras CB-16 (ambos tamaños) y el valor porcentual máximo para esta fracción se obtuvo en la muestra CB-19 (0.044 mm) con un valor del 93%. Para Mn las muestras no tuvieron valores mayores a 1% para el caso del Pb la mínima fue de 0.5% en la muestra CB-86 (0.044 mm) y máxima con 8.4% en la muestra CB-19 (0.044 mm). El Zn presenta un mínimo porcentaje de 0.1% en las muestras CB-16 y CB-27. El Cu presenta muy altos porcentajes en esta fracción. Las Figuras 31 y 32 indican la distribución del Zn en las fracciones geoquímicas para ambos tamaños de partícula. La CB-16 presenta la mayor diferencia en distribución con respecto a tamaño, ya que en la fracción más gruesa el Zn se asocia a la fase residual, mientras que en la fracción fina se asocia a carbonatos, óxidos de Fe/Mn y materia orgánica/sulfuros.

Fracción V: residual

El Cu solo aparece en la fracción residual en la muestra CB-86 con un porcentaje de 32.3% y el Mn con un porcentaje del 63.98%, en el tamaño 0.044 mm. El Cu (31.95%) y el Mn (50.3%) también tienen los valores porcentuales importantes en esta fracción. Las Figuras 36 y 37 muestran la distribución de las fracciones geoquímicas residual y no residual para Cd, Cu, Mn, Pb y Zn en ambos tamaños de partícula. Estas figuras indican que con la excepción del Mn, los otros elementos en general se asocian a las fases no residuales, lo que significa que tienen una geodisponibilidad considerable, en particular el Cu, Cd y Pb.

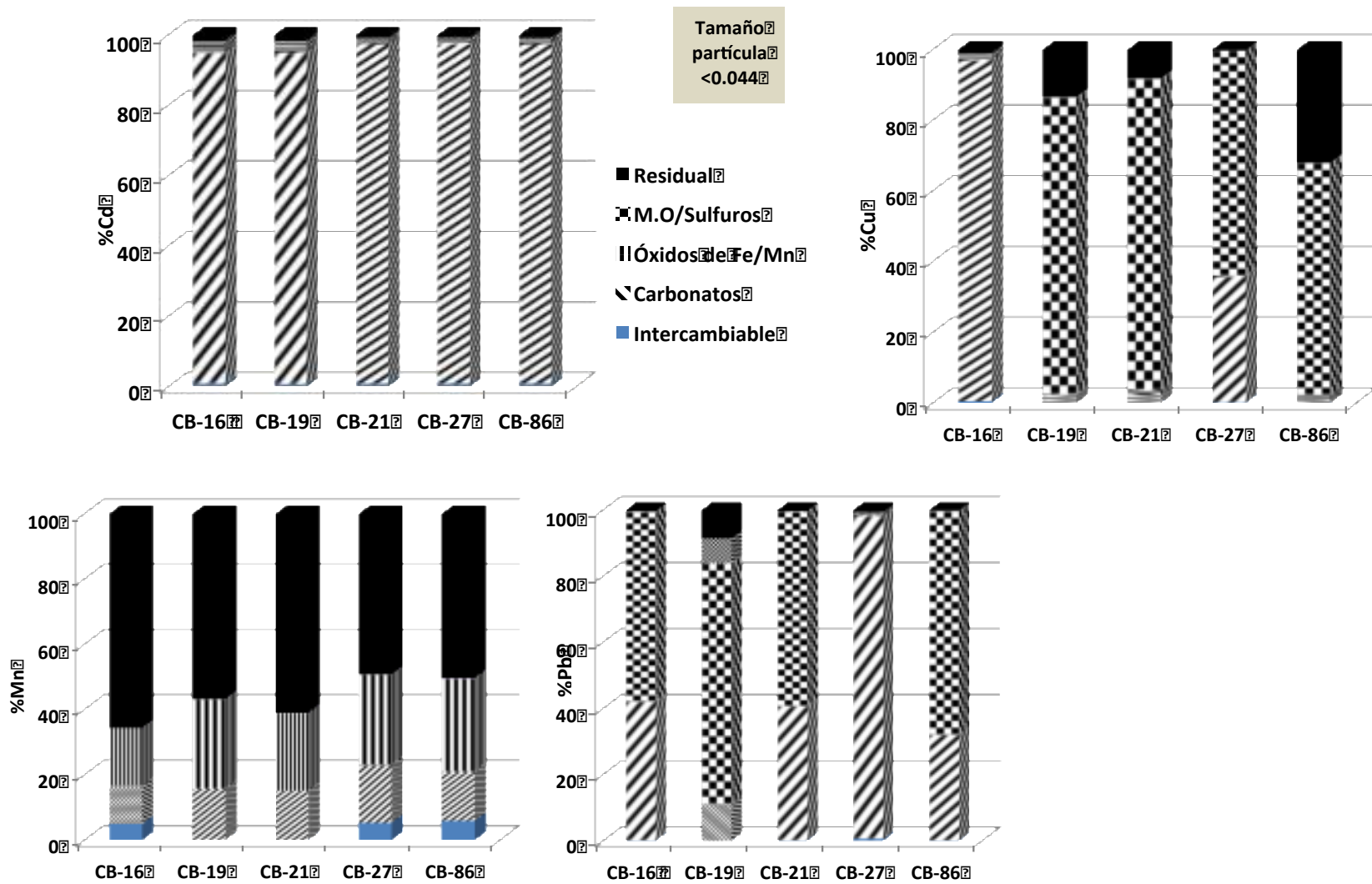


Figura 31. Distribución de metales en las fracciones geoquímicas estudiadas, tamaño granulométrico de 0.044 mm

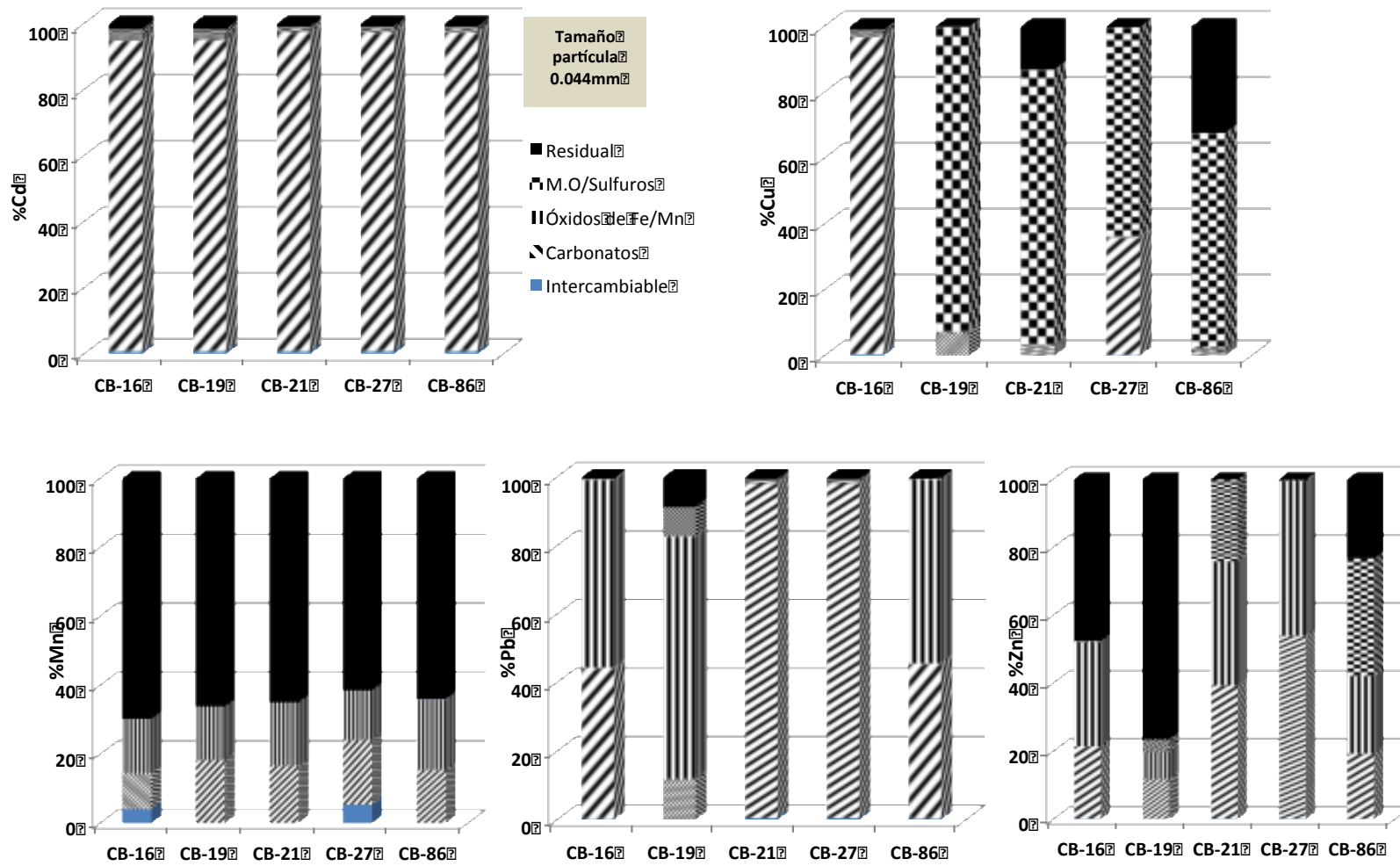


Figura 32. Distribución de metales en las fracciones geoquímicas estudiadas, tamaño granulométrico menor a 0.044 mm

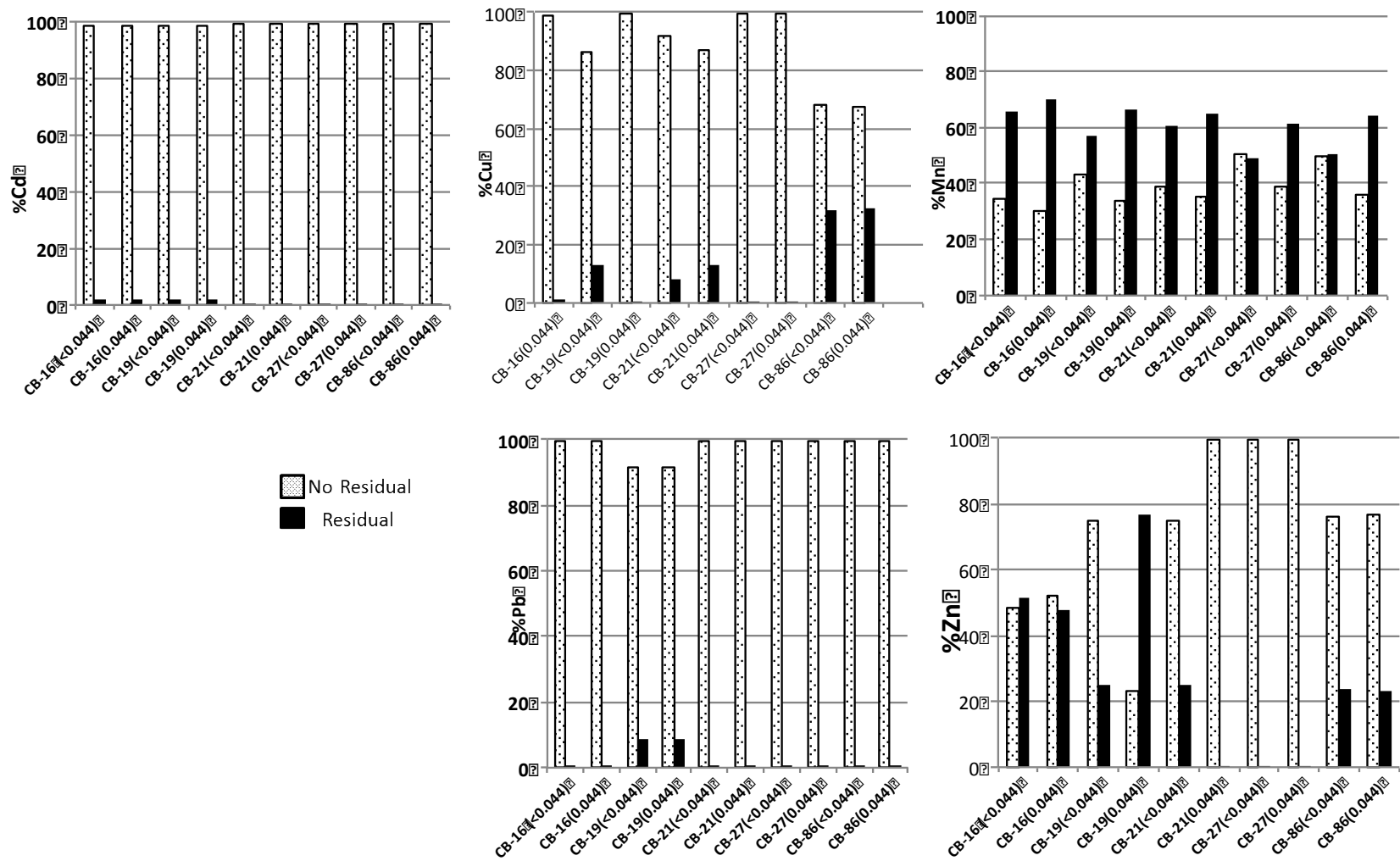


Figura 33. Distribución de metales en las fracciones residual y no residual para los tamaños granulométricos de 0.044 mm y menor a 0.044 mm

Tabla 22. Análisis textural de las muestras de polvo seleccionadas para estudios de bioaccesibilidad.

Muestra	% Arenas	%Arcillas	% Limos	Clasificación Textural
CB-16	79.51	3.39	17.09	Arena Francoso
CB-19	64.98	0.79	34.22	Franco Arenoso
CB-21	78.49	3.35	18.15	Arena Francoso
CB-27	80.49	3.75	18.15	Arena Francoso
CB-86	81.64	8.52	9.84	Arena Francoso

La Figura37 muestra la distribución del cobre en las fracciones geoquímicas estudiadas en función del tamaño de partícula. Las muestras CB-19, CB-21 y CB-86 muestran un comportamiento similar, con la concentración de cobre en las fases Materia orgánica/sulfuros y en menor porcentaje Residual. En el caso de la muestra CB-19 (Franco arenoso) hay un incremento en el porcentaje de Cu en la fracción más gruesa (92.81%) contra la fracción más fina (84.2%).

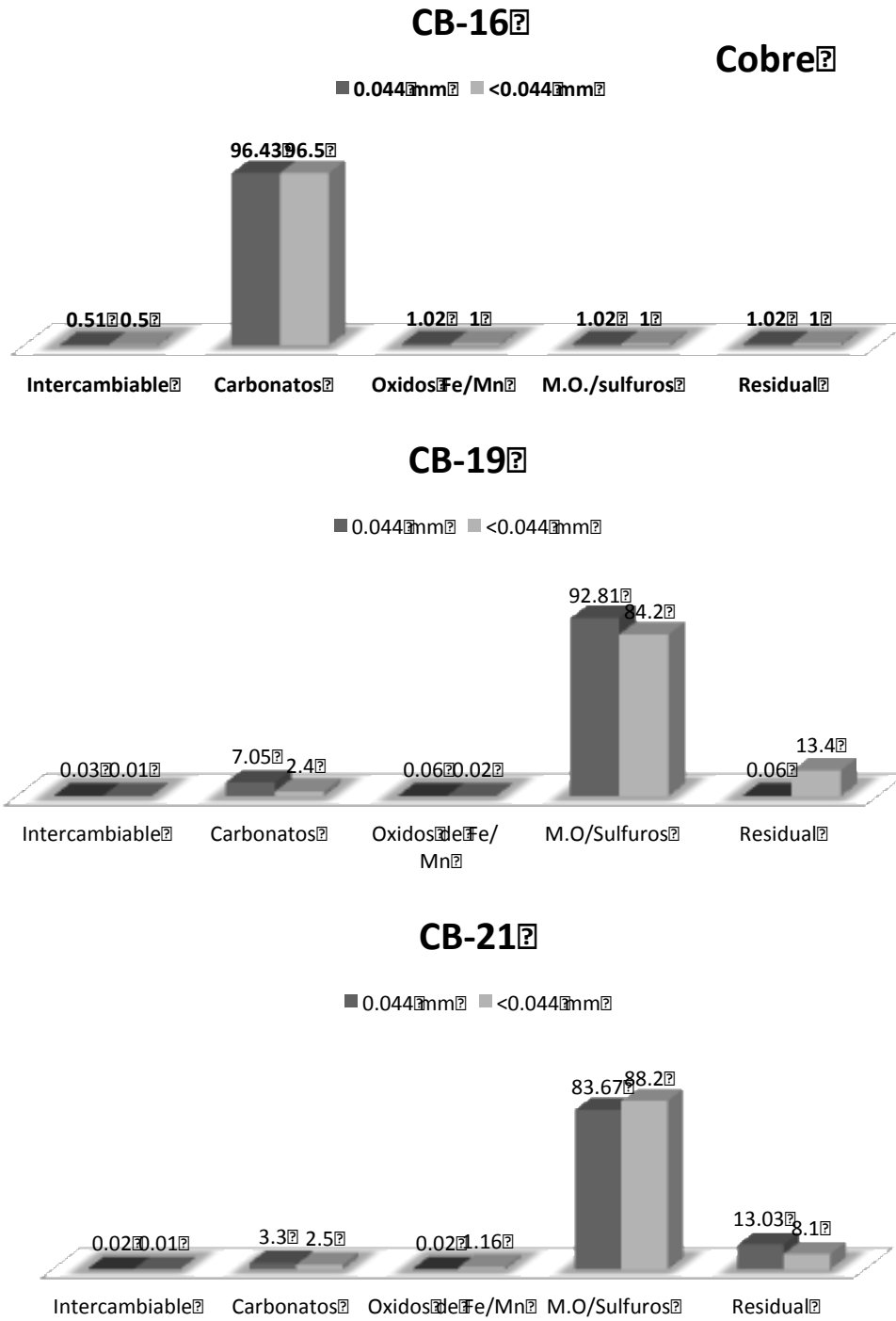
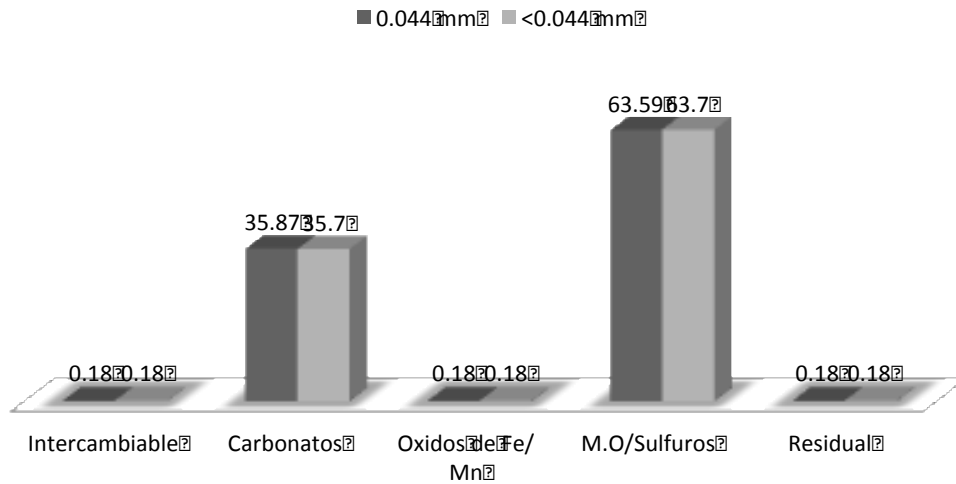
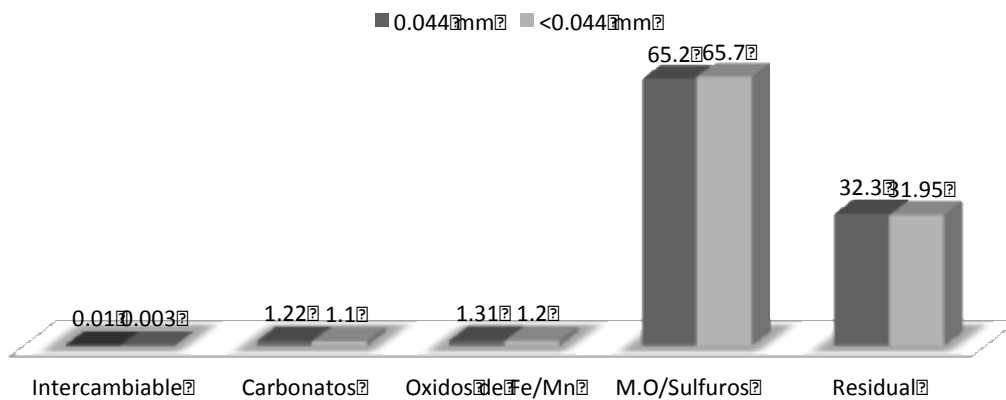


Figura 34. Distribución del Cu en las fracciones geoquímicas en función del tamaño granulométrico (0.044 mm y menor a 0.044 mm)

CB-27



CB-86



Continuación **Figura 34.** Distribución del Cu en las fracciones geoquímicas en función del tamaño granulométrico (0.044 mm y menor a 0.044 mm)

La Figura 35 muestra la distribución del Pb en las fracciones geoquímicas en función del tamaño de partícula. La muestra CB-21 muestra un incremento en plomo asociado a carbonatos en la fracción más gruesa (0.044 mm) en un 97.78%, con respecto a la fracción más fina (menor a 0.044 mm) con un 40.5%. La muestra CB-86 muestra un comportamiento similar con la excepción de la asociación a fase óxidos de Fe/Mn que tiene un incremento del 67.6 % en la fracción menor a 0.044 mm con respecto a la fracción de 0.044 mm.

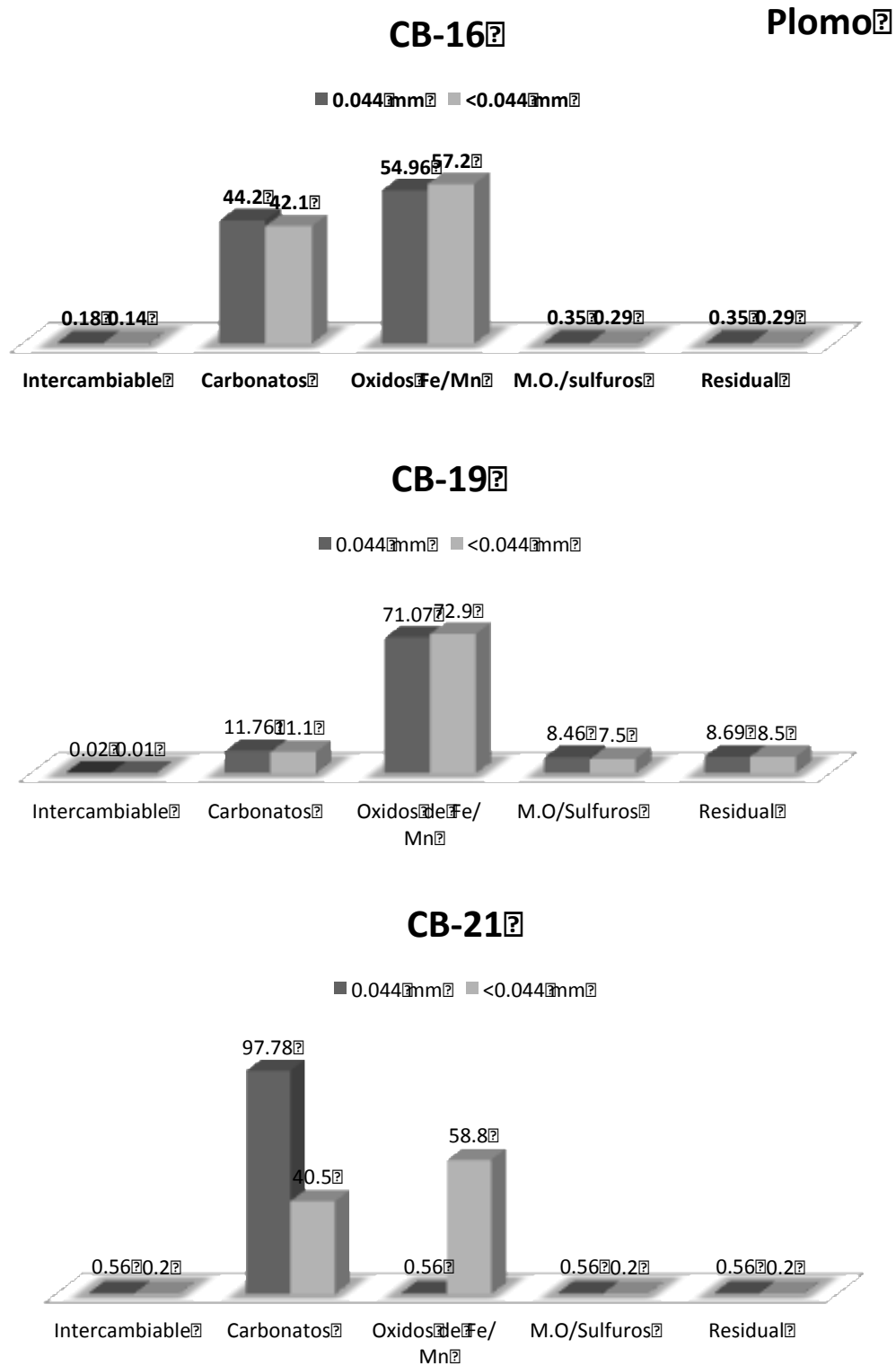
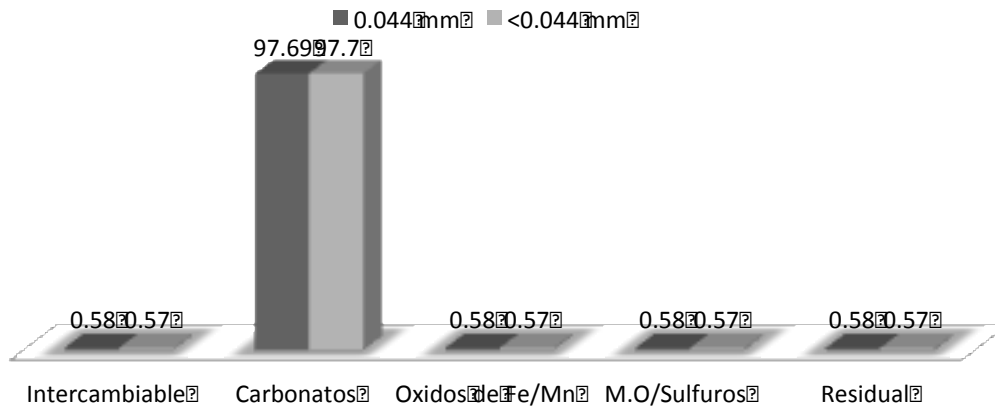
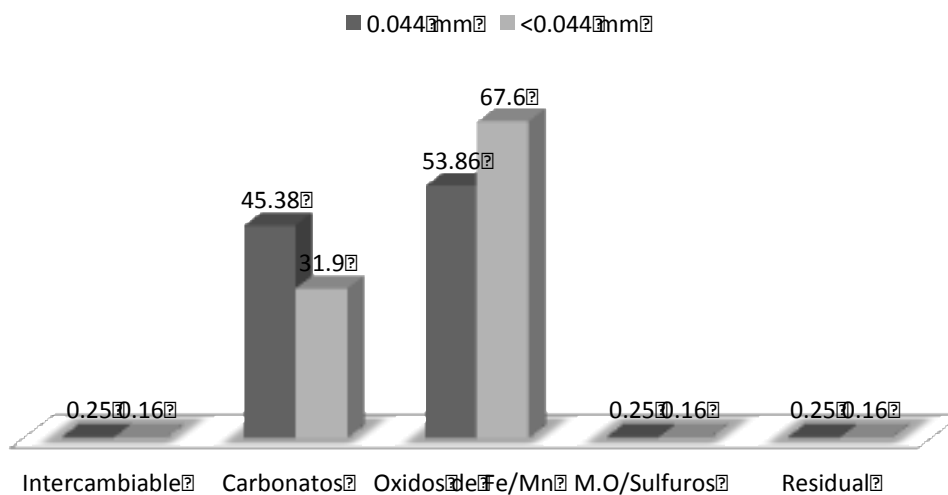


Figura 35. Distribución del Pb en las fracciones geoquímicas en función del tamaño granulométrico (0.044 mm y menor a 0.044 mm)

CB-27



CB-86



Continuación **Figura 35.** Distribución del Pb en las fracciones geoquímicas en función del tamaño granulométrico (0.044 mm y menor a 0.044 mm)

La Figura 36 muestra la distribución del Zn en las fracciones geoquímicas para los tamaños granulométricos estudiados. Las muestras CB-21, CB-19 y CB-86 muestran un comportamiento similar con una distribución en Carbonatos, Oxidos de Fe/Mn, M.O./sulfuros y Residual, la muestra que tiene mayores diferencias en cuanto al contenido de las fracciones geoquímicas y tamaño de partícula es la CB-19.

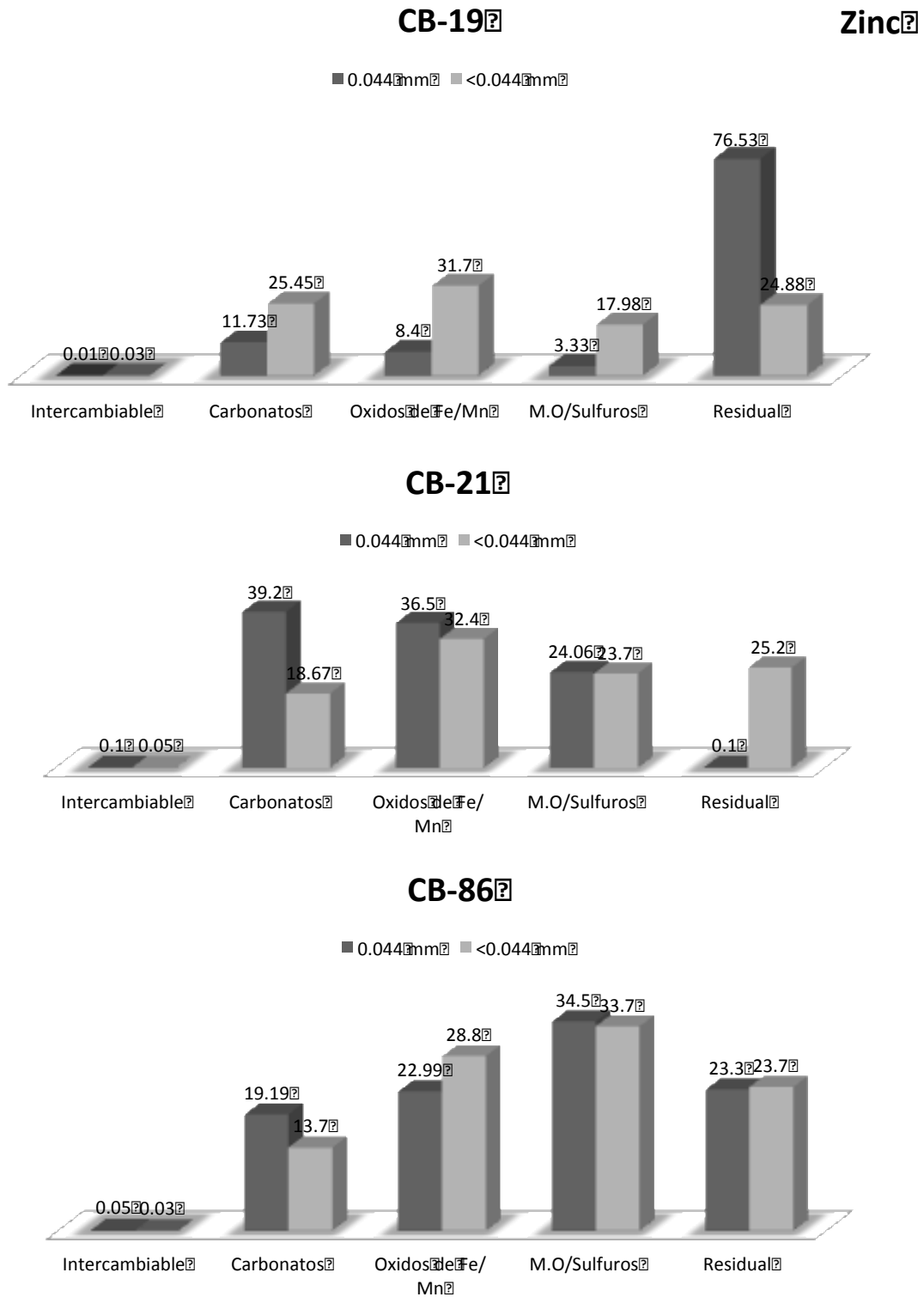
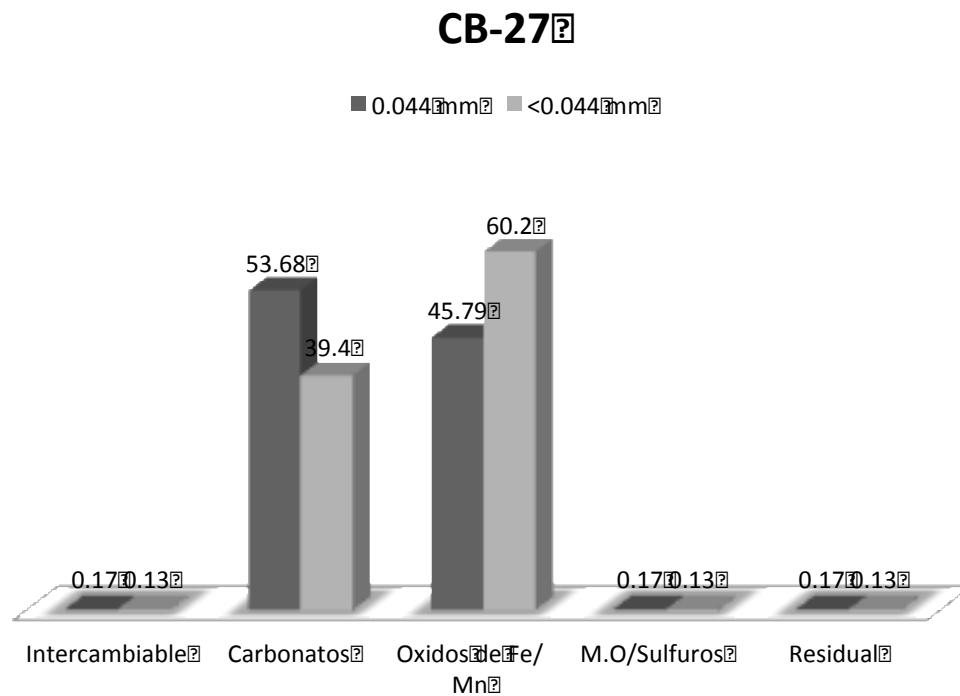
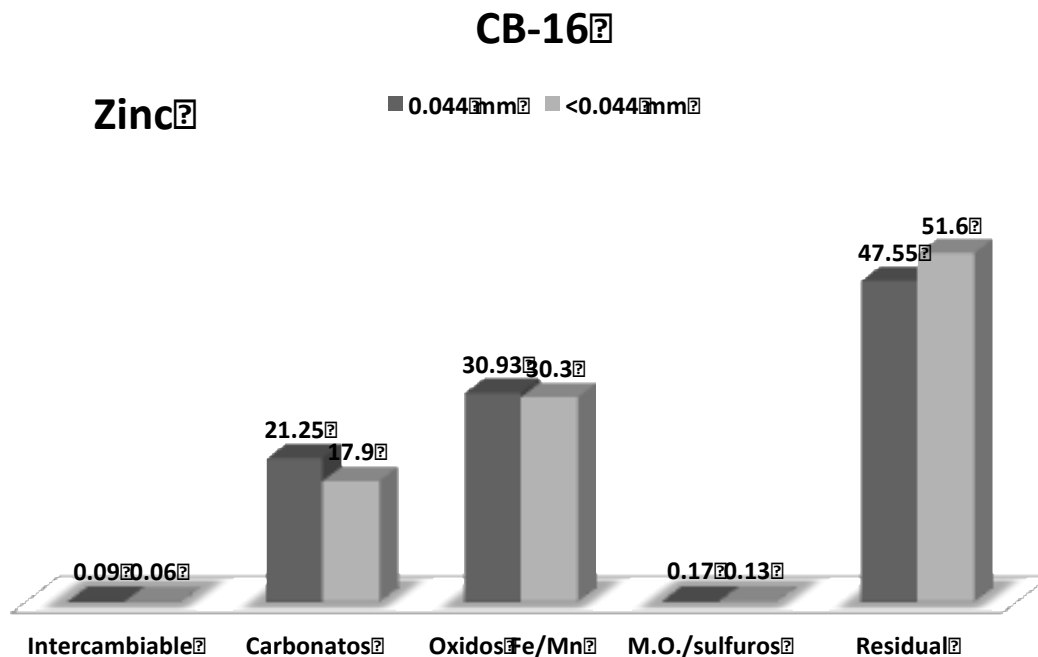


Figura 36. Distribución del Zn en las fracciones geoquímicas en función del tamaño granulométrico (0.044 mm y menor a 0.044 mm)



Continuación **Figura 36.** Distribución del Zn en las fracciones geoquímicas en función del tamaño granulométrico (0.044 mm y menor a 0.044 mm)

La Figura 37 muestra la distribución del Cd en las fracciones geoquímicas para los tamaños de partícula estudiados. El Cd se asocia a la fase carbonatos y muestra un ligero aumento en

el porcentaje para la fase menor a 0.044 mm en un 2% para las muestras CB-27 y CB-16 y un porcentaje igual para ambos tamaños de partícula en las muestras CB-19, CB-21 y CB-86, las que se asocian espacialmente con la ruta antigua de tráfico pesado y paso del ferrocarril.

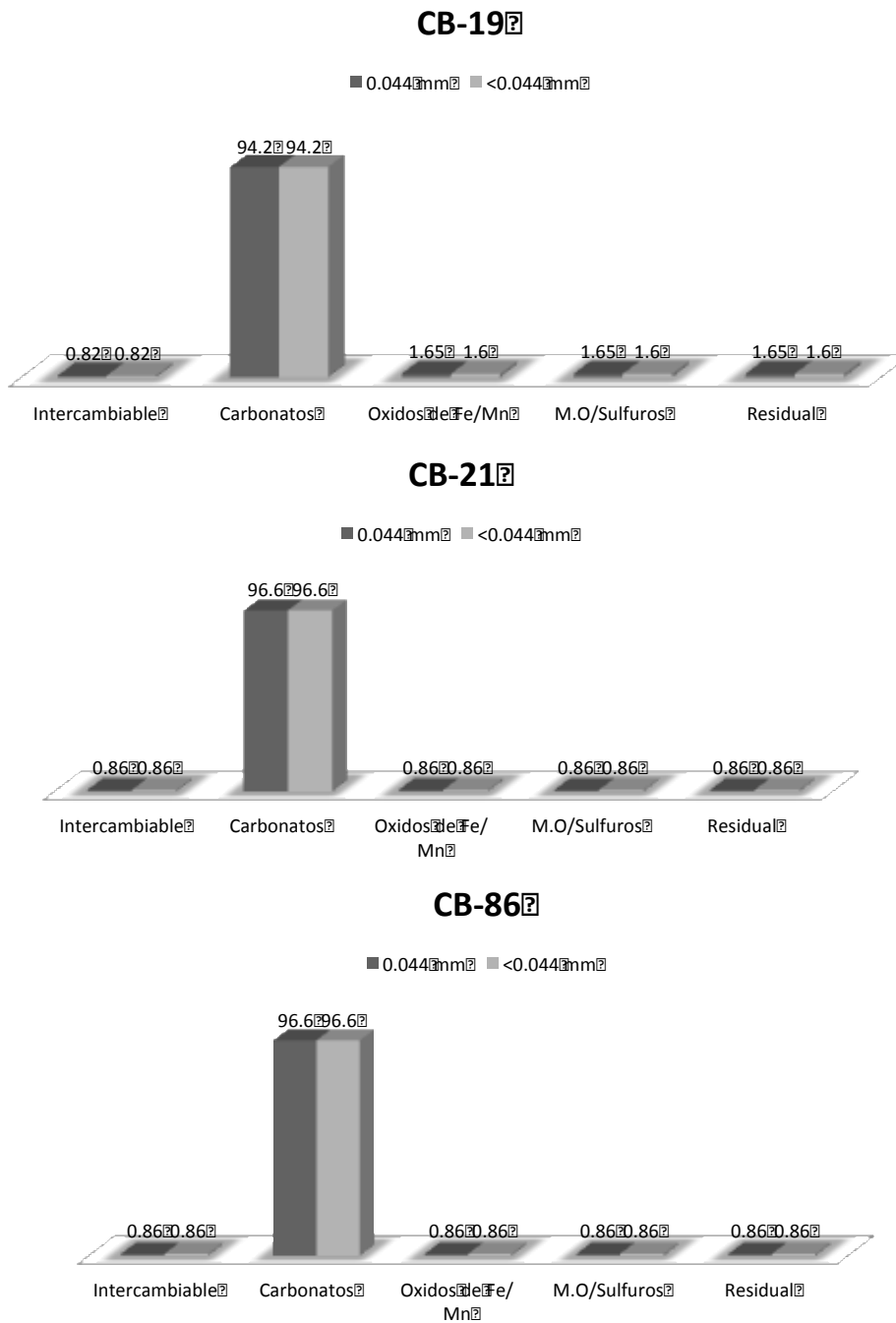
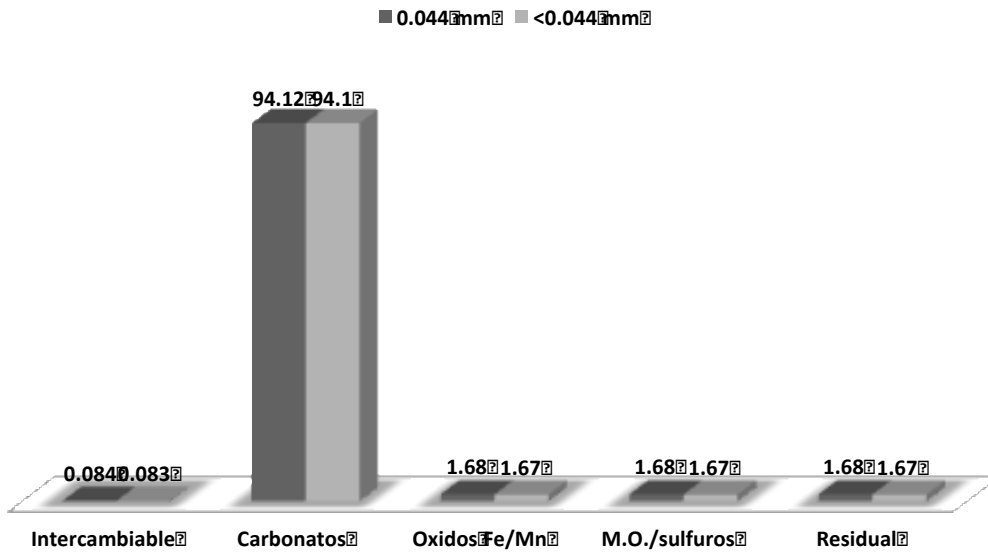
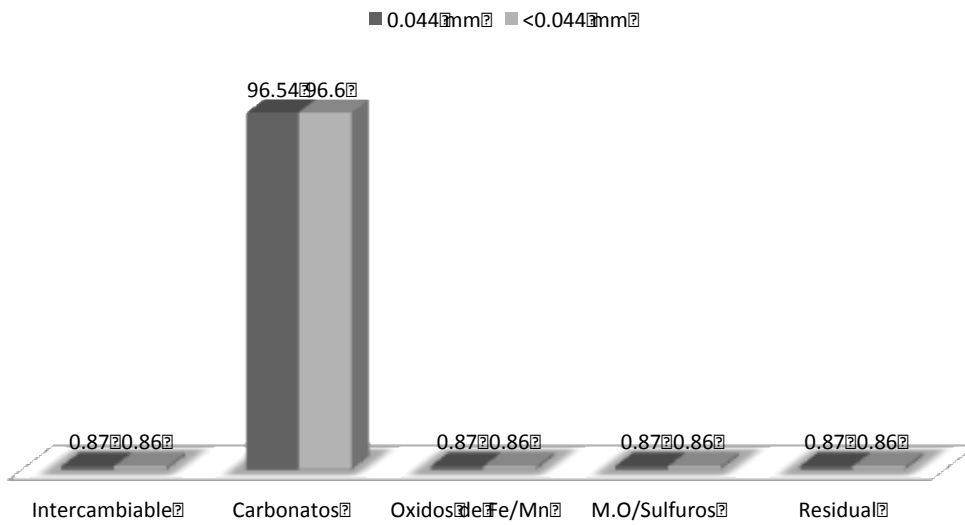


Figura 37. Distribución del Cd en las fracciones geoquímicas en función del tamaño granulométrico (0.044 mm y menor a 0.044 mm)

CB-16



CB-27



Continuación **Figura 37.** Distribución del Cd en las fracciones geoquímicas en función del tamaño granulométrico (0.044 mm y menor a 0.044 mm)

La Figura 38 muestra la distribución del Mn en las fracciones geoquímicas en función del tamaño de partícula. En general el Mn se asocia en la fase residual al tamaño de partícula de 0.044 mm, mientras que en la fracción geoquímica de óxidos de Fe y Mn tiende a acumularse preferencialmente en la fracción menor a 0.044 mm. Aunque el Mn se considera un elemento de poca movilidad geoquímica, bajo circunstancias particulares puede ser geodisponible en el caso de los contenidos asociados a los óxidos de Fe y Mn.

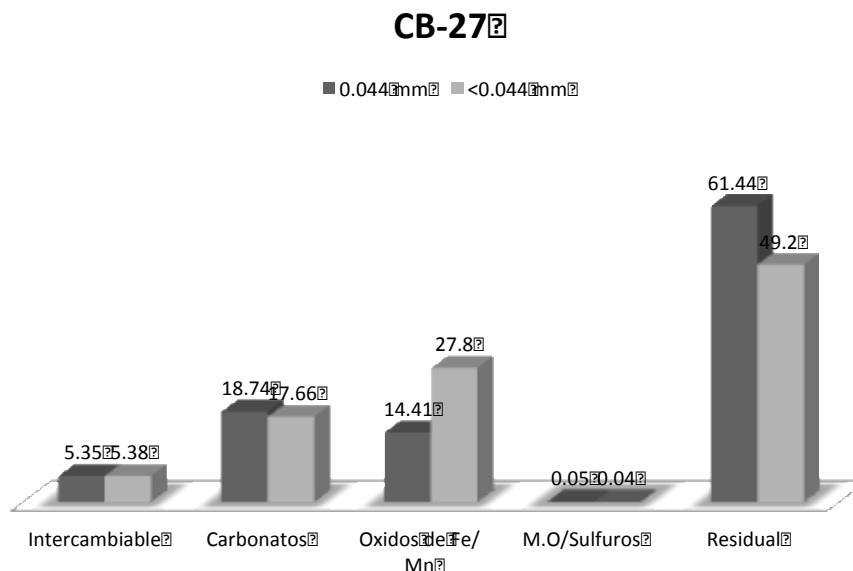
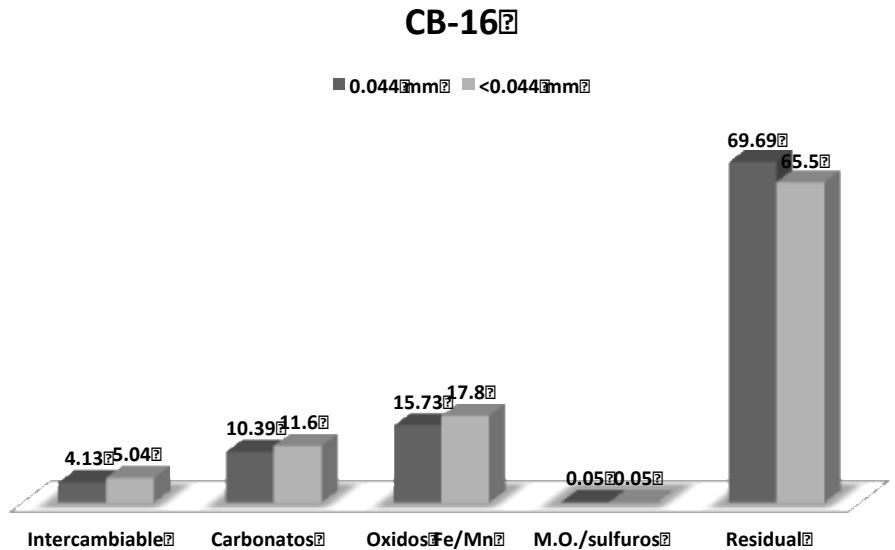
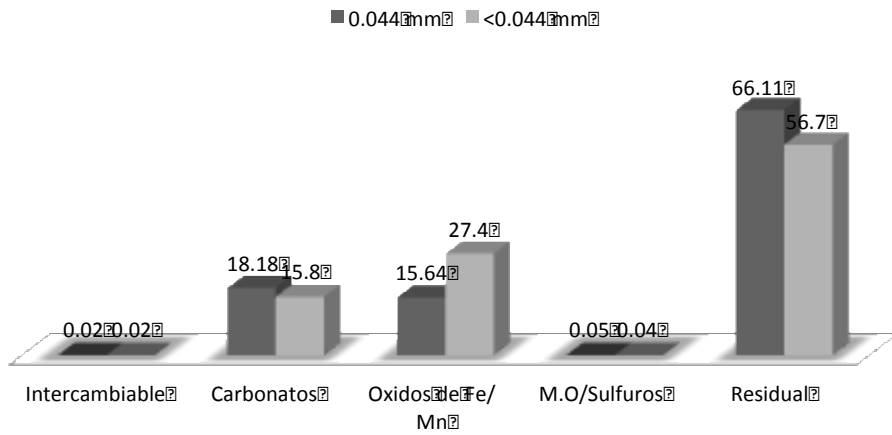
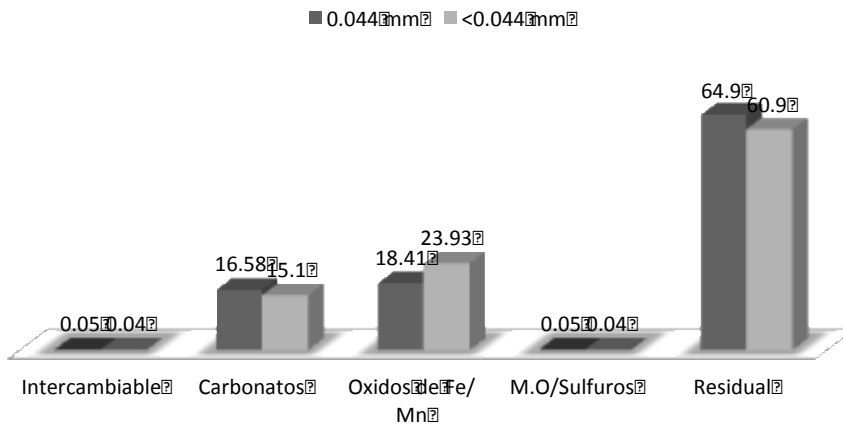


Figura 38. Distribución del Mn en las fracciones geoquímicas en función del tamaño granulométrico (0.044 mm y menor a 0.044 mm)

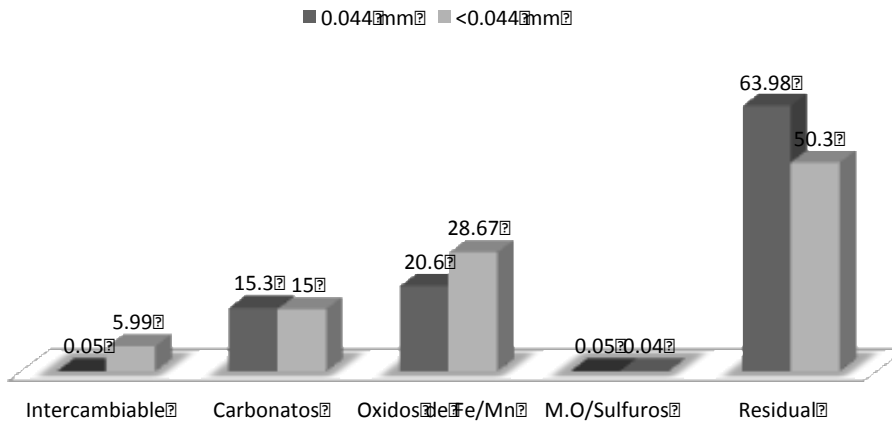
CB-19



CB-21



CB-86

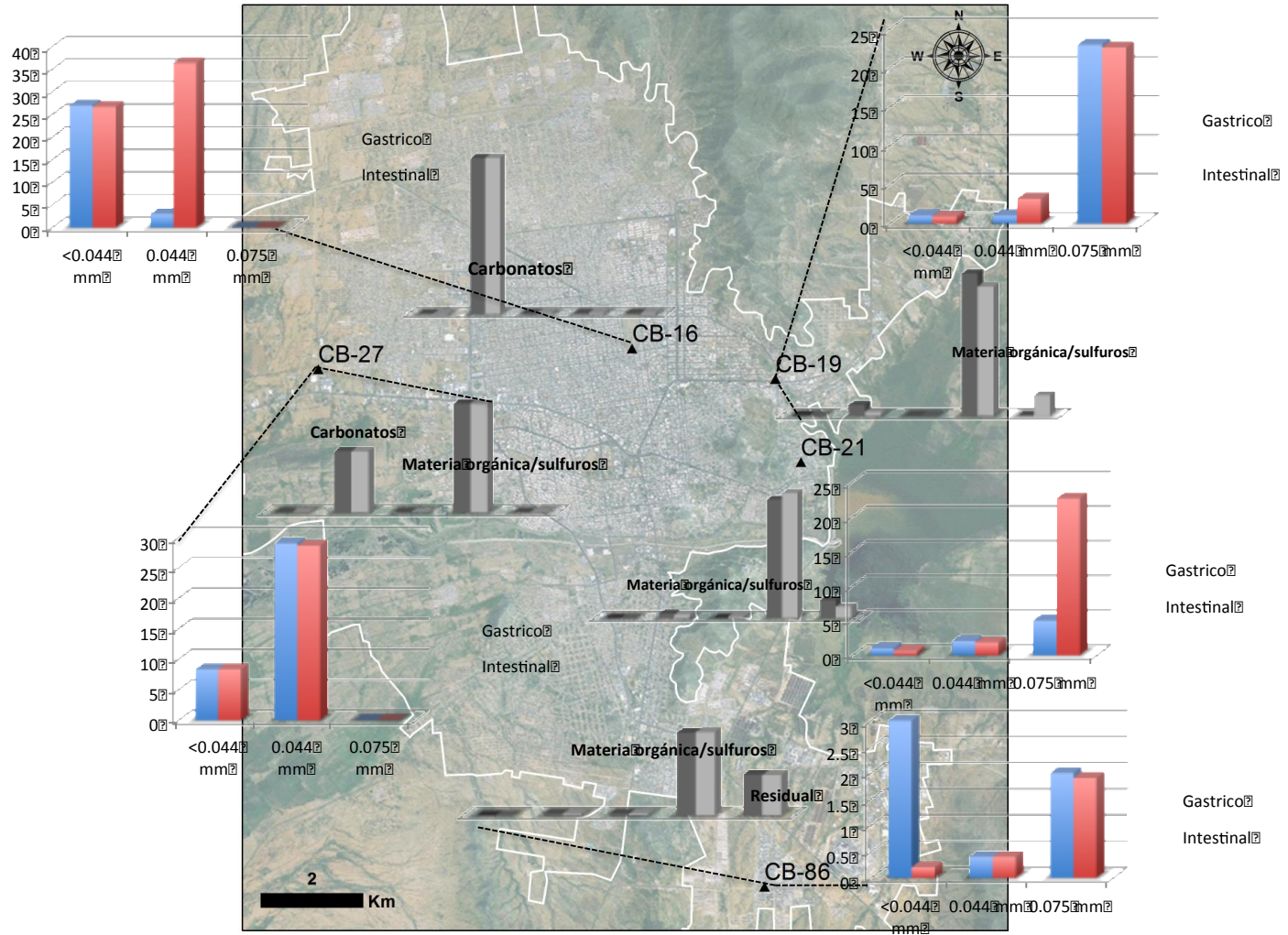


Continuación **Figura 38.** Distribución del Mn en las fracciones geoquímicas en función del tamaño granulométrico (0.044 mm y menor a 0.044 mm)

VI. 8. Distribución espacial de algunas enfermedades en Hermosillo, Sonora, cuyos síntomas son potenciados por la exposición a metales causantes de estrés oxidativo.

Las enfermedades del sistema circulatorio en Hermosillo se localizan principalmente al norte-noroeste de la ciudad con dos zonas importantes localizadas al noreste de la ciudad y algunas zonas del sur. La Figura 42 muestra la distribución espacial de la incidencia de Diabetes, Enfermedades del sistema circulatorio y Neoplasmas basado en información de Freire Da Carvahlo (2009). Estas áreas de coincidencia representan los polígonos de mayor riesgo (estrés oxidativo potencial por geo- y biodisponibilidad de elementos estudiados) para las personas con padecimientos del sistema circulatorio que están recibiendo tratamientos. La Figura 43 muestra la asociación de fracciones geoquímicas y la información de bioaccesibilidad gástrica e intestinal en metales. La asociación espacial más importante ocurre en la zona centro-este de la ciudad, que es también la zona urbanizada más antigua y donde la incidencia de DM y la tasa de mortalidad es también más elevada (Freire da Carvahlo, 2009). Las muestras con mayor geodisponibilidad también se ubican en la zona centro-oeste, y noroeste, donde hay mayor prevalencia de Diabetes Mellitus y algunos polígonos con incidencia importante de Neoplasmas. Esta serían las zonas de mayor susceptibilidad a estrés oxidativo y por consiguiente posibles complicaciones en los tratamientos de estas enfermedades. Sin embargo las muestras con mayores porcentajes de bioaccesibles son las que se localizan en la zona oeste de la ciudad, con porcentajes superiores al 30% de bioaccesibilidad en fase gástrica y asociación mineralógica con carbonatos (Figura 43).

Figura 42. Incidencia de Diabetes Mellitus, Enfermedades del Sistema Circulatorio y Neoplasmas en Hermosillo, Sonora. Datos de Freire Da Carvahlo (2009) (cambiar los mapas a colores)



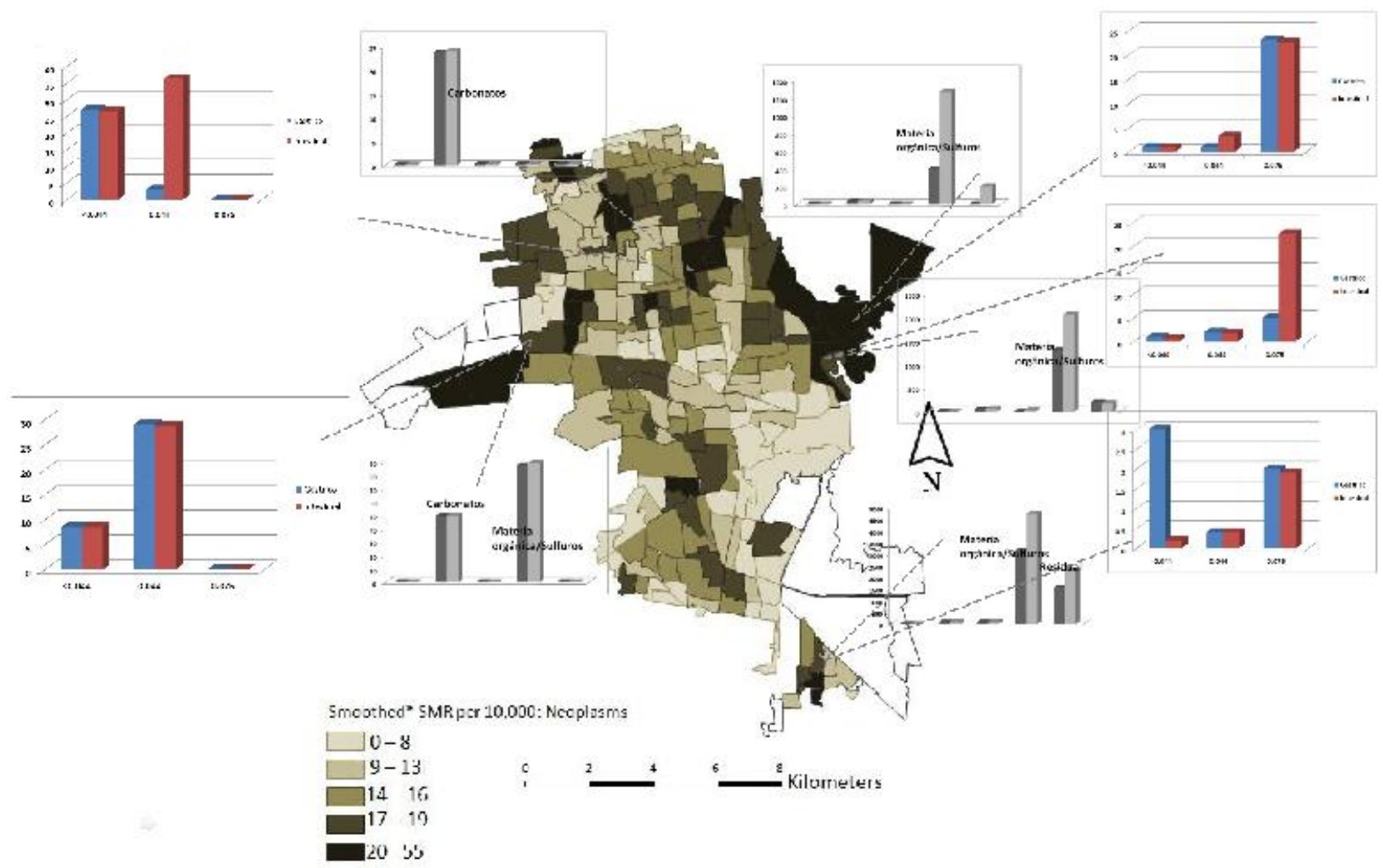


Figura 43. Distribución espacial de metales asociados a estrés oxidativo en función de sus fracciones geoquímicas y porcentaje de bioaccesibilidad.

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La distribución espacial de los metales posiblemente causantes de estrés oxidativo en la zona urbana es la siguiente: las mayores concentraciones de plomo en parques se concentra en la parte centro-norte de la ciudad, con los máximos valores reportados hacia el centro-este. El cobre en parques presenta alta concentración en gran parte de la mancha urbana, principalmente en el oeste, noreste y sureste de la ciudad. Manganeseo no presenta valores muy por encima del fondo geoquímico, sin embargo zinc en parques tiene la misma distribución espacial y nivel de contaminación que el cobre. Los metales estudiados en calles presentan similar distribución espacial que los parques, sin embargo las áreas de influencia son más extendidas y los niveles de contaminación son significativamente más altos. De acuerdo a los resultados del Índice de Contaminación, el cobre, plomo, zinc y cadmio presentan niveles de contaminación extremadamente altos, tanto para parques como para calles, lo que puede representar un riesgo a la salud, principalmente en las zonas de incidencia de enfermedades cuyos efectos asociados a los tratamientos son potenciados por el estrés oxidativo (diabetes, cardiovasculares y neoplasmas). En comparación con parques y calles de otras ciudades del mundo, un resultado significativo de esta investigación es que Hermosillo presenta niveles de contaminación similares a las megaciudades ó ciudades con elevado nivel de industrialización como Hong Kong, Urumqi en China, y Newcastle en Inglaterra.

En todos los metales estudiados, el contenido total se incrementa a medida que el tamaño de partícula disminuye, sin embargo las pruebas de bioaccesibilidad indican un comportamiento variable. El cobre presenta los mayores porcentajes de bioaccesibilidad, principalmente en las muestras tomadas en zonas de alto tráfico, con valores de 29% en fluido gástrico y hasta 36.4% en fluido intestinal. El zinc también presenta altos niveles de bioaccesibilidad con porcentajes variables para fase gástrica de 5.2 a 18.1% y de 0.1 a 21.7% en fase intestinal. El plomo presenta alta variación en bioaccesibilidad con rangos de 2.6 a 11.3 % en fase gástrica y 0.3 a 8.8 % en fase intestinal. El porcentaje de bioaccesibilidad para manganeseo no excede el 6% en fase gástrica y el 4.6% en fase intestinal. El cadmio no presenta niveles de bioaccesibilidad superiores al límite de detección del equipo por lo que se puede considerar poco o no bioaccesible.

El estudio de extracción química de Tessier muestra los siguientes resultados: El Cu se asocia a carbonatos en porcentajes mayores al 95% en la muestra más impactada por tráfico (calles con límites de velocidad de 60 kph), mientras que se asocia a fracción residual en un 32% y materia orgánica/sulfuros en un 80% en muestras ubicadas en zonas con tráfico intermedio (límite de velocidad de calle de 50 kph). El Cd se asocia principalmente a carbonatos en porcentajes que exceden el 90% para todas las muestras estudiadas, en las dos fracciones granulométricas, considerando que los valores de Cd en las pruebas de bioaccesibilidad en fluido gástrico e intestinal no excedía el límite de detección del equipo, se recomienda el repetir la prueba de bioaccesibilidad utilizando un ICP-MS con límites de detección mucho menores que el equipo usado (ICP-OES).

En el caso del plomo las muestras que presentan mayor bioaccesibilidad corresponden con las muestras que en el estudio de extracción química secuencial de Tessier muestran un alto porcentaje de asociación a fase de carbonatos y óxidos de Fe/Mn. El manganeso se asocia con más de 49% a la fase residual por lo que se considera poco biodisponible. El presente estudio indica que la zona oeste de la ciudad tiene un elevado porcentaje de bioaccesibilidad en fluidos gástricos e intestinales de metales asociados a estrés oxidativo, principalmente cobre y plomo. Los elevados porcentajes de bioaccesibilidad parecen asociarse a fases minerales de carbonatos, altamente geodisponibles. Esto puede afectar no solo a la salud humana, pero también a plantas y animales.

Se recomienda realizar estudios de biomarcadores de exposición y de efecto de metales en las zonas que puedan representar un mayor riesgo a la salud, así como más estudios similares en otros puntos de la ciudad. En este trabajo se estudiaron cinco muestras (tres fracciones, para un total de quince) debido a la complejidad y cantidad de tiempo que consume la técnica.

Además, realizar una evaluación de la dispersión de concentración de metales, considerando factores alternos como dirección del viento, erosión, temporadas de lluvia, etc.

Evaluar la estación CB-19 en las tres fracciones (especialmente en la fracción correspondiente a 0.075mm) por ser la fracción con mas bioaccesibilidad para el caso de Cu, inclusive hacer un nuevo muestreo para realizar una comparación desde el inicio del proceso.

Repetir para algunas muestras la técnica de extracción química secuencial de Tessier, ya que hubo algunas fracciones de difícil tratamiento.

REFERENCIAS

- Adriano, D.C. 1986. Trace elements in the Terrestrial Environment. Springer, New York.
- ATSDR, 2013. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. www.atsdr.gov
- Apeageyi, E., Bank, M.S., Spengler, J.D. 2011. Distribution of heavy metals in road dust along an urban-rural gradient in Massachusetts. *Atmospheric Environment* 45: 2310-2323.
- Berglund, M., Lindberg, A.L., Rahman, M., Yunus, M., Grandér, M., Lönnerdal, B., Vahter, M. 2011. Gender and age differences in mixed metal exposure and urinary excretion. *Environ. Res.* 111(8): 1271-1279.
- Bridges, C.C., Zalups, R. 2013. The Aging Kidney and Exposure to the Nephrotoxic Metals Cadmium and Mercury. Chapter 13 Aging and Vulnerability to Environmental Chemicals. RSC Publishing **ISBN: 978-1-84973-418-9**.
- Burt, R. 2004. Soil Survey laboratory methods manual. Soil Surv. Investigations Rep. 42, version 4.0, U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC. <http://soils.usda.gov>.
- Callender, E. Chapter 9.03. Heavy Metals in the Environment-Historical Trends. *Treatise of Geochemistry*. Vol. 9: 67-105.
- Chen, T.B., Zheng, Y.M., Lei, M., Huang, Z.C., Wu, H.T., Chen, H., Fan, K.K. Yu, K., Wu, X., Tian, Q.Z. 2005. Assessment of heavy metal pollution in surface soils of urban parks in Beijing, China. *Chemosphere* 60: 542-551.
- Dang, Z., Liu, C. and Haigh, M. 2002. Mobility of Heavy Metals Associated with the Natural Weathering of Coal Mine Spoils. *Environmental Pollution* 118, 419-426pp.
- Dane, J.H., y Topp, G.C. 2002. *Methods of Soil Analysis Part 4. Physical Methods*. IAEA, International Atomic Energy Agency.
- Del Río-Salas, R., Ruiz, J., De la O-Villanueva, M., Valencia-Moreno, M., Moreno-Rodríguez, V., Gómez-Alvarez, A., Grijalva, T., Mendivil, H., Paz-Moreno, F., Meza-Figueroa, D. 2012. Tracing geogenic and anthropogenic sources in urban dusts: insights from lead isotopes. *Atmospheric Environment* 60: 202-210.

- DeOcampo, D.M., Reed, P.J., Kalenuik, A.P. 2012. Road Dust lead (Pb) in Two Neighborhoods of Urban Atlanta, (GA,USA). *International Journal of Environmental Research and Public Health* 9: 2020-2030.
- Dijkema, M.B.A., Mallant, S.F., Gehring U., van der Hurk, K., Alsema, M., Strien, R.T., Fischer, P.H., Nijpels, G., Stehouwer, C.D.A., Dekker, J.M., Brunekreef, B. 2011. Long-term exposure to Traffic-related air pollution and type 2 Diabetes prevalence in a cross-sectional screening-study in the Netherlands. *Environmental Health* 10:76:1-9.
- Drever, J.I. 1988. *The Geochemistry of Natural Waters*, 2da. Edición. Prentice-Hall, New York.
- Faiz, Y., Tufail, M., Javed, M., Chaudhry, M., 2009. Road dust pollution of Cd, Cu, Ni, Pb, and Zn along Islamabad Expressway, Pakistan. *Microchemical Journal* 92: 186-192.
- Filippelli, G.M., Laidlaw, M.A.S., 2010. The elephant in the playground: confronting lead-contaminated soils as an important source of lead burdens to urban populations. *Perspectives in Biology and Medicine* 53: 31-45.
- Freire De Carvalho, M.H. 2009. *The Spatial and Environmental Predictors of Adult Mortality in the Northern Mexico Border Region*. PhD tesis, University of Michigan, 147 páginas.
- Fuchs-Tarlovsky, V., Bejarano-Rosales, M., Gutiérrez-Salmán, G., Casillas, M.A., López-Alvarenga, J.C., Ceballos-Reyes, G.M. 2011. Efecto de la suplementación con antioxidantes sobre el estrés oxidativo y la calidad de vida durante el tratamiento oncológico en pacientes con cáncer cérvico-uterino. *Nutrición Hospitalaria*, Vol. 26 (4):819-826.
- Gaetke, L.M., Chow, C.K. 2003. Copper toxicity, oxidative stress, and antioxidant nutrients. *Toxicology* 189 (1-2): 147-163.
- Glorennec, P., Lucas, J.P., Mandin, C., Le Bot, B. 2012. French children's exposure to metals via ingestion of indoor dust, outdoor playground dust and soil: Contamination data. *Environment International* 45: 129-134.

- Goyer, R.A., y Clarkson, T.W. 2001. Toxic effects of metals. Casarett and Doull's Toxicology: the Basic Science of Poisons, 6th. Edn. (ed. C.D. Klassen). McGraw-Hill, New York, 811-868.
- Gutiérrez, J.R.V. 2002. Daño oxidativo, radicales libres y antioxidantes. Revista Cubana de Medicina Militar Vol. 31(2): 126-133.
- Gurer-Orhan, H., Sabir, HU., Ozgünes, H. 2004. Correlation between clinical indicators of lead poisoning and oxidative stress parameters in controls and lead-exposed workers. Toxicology 195(2-3): 147-154.
- Herta de la Parra, Velasco M. L., 2008. Evaluación de la Erosión Eólica en Hermosillo, Sonora, México. Tesis de Maestría. Universidad de Sonora. 50pp.
- Inaba, T., Kobayashi, E., Suwazono, Y., Uetani, M., Oishi, M., Nakagawa, H., Nogawa, K. 2005. Estimation of cumulative cadmium intake causing Itai-itai disease. Toxicol. Lett. 159(2): 192-201.
- Iqbal, S., Wasim, M., Tufail, M., Arif, M., Chaudhry, M.M. 2012. Elemental contamination in urban parks of Rawalpindi/Islamabad- a source identification and pollution level assessment study. Environmental Monitoring and Assessment 184:5497-5510.
- Kabata-Pendias, A. 2000. Trace elements in Soils and Plants, 3ra. Edición, CRC Press. Boca Ratón.
- Keogh, J.P., y Boyer, L.V. 2001. Lead. En Clinical Environmental Health and Exposures. 2nd. Edn. (eds. J.B. Sullivan, Jr. Y G. Krieger). Lippincott Williams y Wilkins, Philadelphia: 879-88.
- Kordas, K., Lönnerdal, B., Stoltzfus, R.J., 2007. Interactions between Nutrition and Environmental Exposures: Effects on Health Outcomes in Women and Children. The Journal of Nutrition, American Society of Nutrition.
- Laidlaw, M.A.S., Filippelli, G.M. 2008. Resuspension of urban soils as a persistent source of lead poisoning in children: A review and new directions. Applied Geochemistry 23: 2021-2039.
- Lanphear, B.P., Dietrich, K., Auinger, P., Cox C. 2000. Cognitive Deficits Associated with Blood Lead Concentrations <10 ug/dL in US Children and Adolescents. Public Health Reports, Vol. 115: 521-529.

- Li, Y.H. 2000. A Compendium of Geochemistry. Princeton University Press, Princeton.
- Li, X., Poon, C., Liu, P.S. 2001. Heavy metal contamination of urban soils and Street dust in Hong Kong. *Applied Geochemistry* 16: 1361-1368.
- Liverman, D.M. 1990. Drought impacts in Mexico: Climate, Agriculture, Technology, and Land Tenure in Sonora and Puebla. *Annals of the Association of American Geographers* Vol 80 (1): 49-72
- Lyons, T.J., Jenkins, A.J. 1997. *Diabetes Rev*, 5: 365-391.
- McLaren, R.G., Cameron, K.C. 1994. Soil Science. An Introduction to the properties and management of N.Z. soil. Ed. Oxford University Press. Cap. 12. Intercambio de Iones del Suelo.
- Madeddu, R. 2005. Estudio de la influencia del cadmio sobre el medioambiente y el organismo humano: perspectivas experimentales epidemiológicas y morfofuncionales en el hombre y en los animales de experimentación. Tesis Doctoral Universidad de Granada. Editorial de la Universidad de Granada, ISBN: 84-338-3542-4, 500 p.
- Makri, A., Stilianakis, N.I. 2008. Vulnerability to air pollution health effects. *Int. J. Hyg. Environ Health*. 211 (3-4):326-336.
- Meza-Figueroa, D., De la O-Villanueva, M., De la Parra, M.L., 2007. Heavy metal distribution in dust from elementary schools in Hermosillo, Sonora, México. *Atmospheric Environment* 41: 276-288.
- Nriagu, J.O. 1979. Global inventory of natural and anthropogenic emissions of trace metals to the atmosphere. *Nature* 279: 409-411.
- Nriagu, J.O. y Pacyna, J.M. 1988. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water, and soils by trace metals. *Nature* 33: 134-139.
- Nriagu, J.O. 1988. A silent epidemic of environmental metal poisoning? *Environ. Pollut.* 50: 139-161.
- Okorie, A., Entwistle, J., Dean, JR. 2012. Estimation of daily intake of potentially toxic elements from urban dust and the role of oral bioaccessibility testing. *Chemosphere* 86: 460-467.

- Parker, V.G., Mayo, R.M., Logan, B.N., Holder, B.J., Smart, P.T. 2002. Toxins and Diabetes Mellitus: An Environmental Connection? *Diabetes Spectrum* Vol. 5(2):109-112.
- Plumlee, G.S. y Ziegler, T.L. 2003. The Medical Geochemistry of Dusts, Soils, and Other Earth Materials. Páginas 1-61. En: *Treatise of Geochemistry*, Editors: H.D. Holland y K.K. Turekian. Editorial Elsevier. Vol. 9 Environmental Geochemistry.
- Ramirez-Leal, R., Esparza-Ponce, H., Duarte Moller, A., 2007. Characterization of inorganic atmospheric particles in air quality program with SEM, TEM and XAS. *Revista Mexicana de Física* 53(3): 102-107.
- Reimann, C., y de Caritat, P. 1998. *Chemical Elements in the Environment*. Springer. Berlin.
- Rioux, C.I., Tucker, K.L., Brugge, D., Gute, D.M., Mwamburi, M. 2011. Traffic exposure in a population with high prevalence type 2 diabetes- Do medications influence concentrations of C-reactive protein? *Environmental Pollution* 159: 2051-2060.
- Ronit, P., 2011. Air pollution exposure: Who is at risk?. *Atmospheric Environment* 45, 1781-1785.
- Ruby, M.V., Davis, A., Kempton, J.H., Drexler, J.W., Bergstrom, P. 1992. Lead bioavailability: dissolution kinetics under simulated gastric conditions. *Environ. Sci. Technol.* 26: 1242-1248.
- Ruby, M.V., Davis, A., Link, T.E., Schoof, R., Chaney, R.L., Freeman, G.B., y Berstrom, P. 1993. Development of an in vitro screening test to evaluate the in vivo bioaccessibility of ingested mine-waste lead. *Environ. Sci. Technol.* 27: 2870-2877.
- Saeedi, M., Li, LY., Salmanzadeh, M. 2012. Heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons: pollution and ecological risk assessment in Street dust of Tehran. *Journal of Hazardous Materials* 227-228:9-17.
- Taylor, S.A., y Ashcroft, G.L. 1972. *Physical Edaphology. The physics of irrigated and nonirrigated soils*. 533 p. ISBN 0716708183. Freeman and Company Editorial.
- Tessier, A., Campbell, P.G.C., Bisson, M. 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Anal. Chem.* Vol. 51(7): 844-851.

- Uriu-Adams, J.Y., Keen, C. 2005. Copper, oxidative stress, and human health. *Molecular Aspects of Medicine* Vol. 26 (4-5): 268-298.
- Valko, M., Morris, H., Cronin, MTD. 2005. Metals, toxicity and oxidative stress. *Current medicinal chemistry*, Vol. 12 (10): 1161-1208.
- Viktorinova, A., Toserova, E., Krizko, M., Durackova, Z., 2009. Altered metabolism of copper, zinc, and magnesium is associated with increased levels of glycated hemoglobin in patients with diabetes mellitus. *Metabolism* 58(10): 1477-1482.
- Wedepohl, K.H. 1968. Chemical fractionation in the sedimentary environment. In *Origin and Distribution of the Elements* (ed. L.H. Ahrens). Pergamon Press, New York, 999-1015.
- Wei, B., Jiang, F., Li, X., Mu, S. 2009. Spatial distribution and contamination assessment of heavy metals in urban road dusts from Urumqi, NW China, *Microchemical Journal* 93(2): 147-152.
- Xu, B., Wu, SW., Lu, C.W., Deng, Y., Liu, W., Wei, YG., Yang, TY., Xu, ZF. 2013. Oxidative stress involvement in manganese-induced alpha synuclein oligomerization in organotypic brain slice cultures. *Toxicology*, 305(8): 71-78.

ANEXO 1

Tabla descriptiva del área de muestro de parques de la ciudad de Hermosillo, Sonora y coordenadas de los puntos de recolección realizados en este trabajo (Dato WGS 84, Zona UTM 12R).

Muestra	Este_UTM	Norte_UTM	Notas
BE-01	499714.4	3215138.43	Villa Bonita Cerrada Calabria, Fraccionamiento Villa Bonita
BE-02	500684.36	3214930.52	Portal del Pitic
BE-03	502357.23	3214786.94	Camino del Seri entre Arroyo Seco y San Angel; parque esquina
BE-04	502615.77	3214498.2	San Pedro y San Marcos, Colonia Nacameri
BE-05	502907	3211419	Blvd. Libertad y Calle Hortencia, Campo de Futbol
BE-06	500879	3211787	Calle I y Duendes, 169 m altura
BE-07	500577	3213577	Calle Mina 160 m altura
BE-08	503250	3213587	Enrique León y Navolato, 180 m altura
BE-09	504445.52	3214161.99	Blvd. Vildosola y Manuel Ojeda, campo Furia Naranja, 196 m altura
BE-10	504848	3210950	Templo Mayor y Pintores, 214 m altura
BE-11	501741	3211984	Escorpión Dorado y Blvd. del Cardo Santo, Col Olivos, 168 m altura
BE-12	501765	3212006	Pablo Citávaro y Biznaga, Col. Palo Verde Indeur, 186 m altura
BE-13	501435	3223430	Suaqui Grande y López del Castillo; 216 m altura
BE-14	500595	3223533	Anerico Vespucio y Santa Rosa, 212 m altura
BE-15	502840	3224161	Muestra en canal López Portillo
BE-16	503006	3224152	López Portillo entre Reyes y Piña, 251 m altura
BE-17	499345	3220090	Perimetral Norte, con Rep de Colombia y Eduardo W Villa, 173 m altura
BE-18	498660	3221583	Sostenes Rocha y Carlos Balderrama, 178 m altura, Fracc. Dunas
BE-19	498288	3222710	Calle de los Maestros y Av. Chaparral, Col Manuel Gómez Morín, 186 m altura
BE-20	504322	3222406	Misión Norte y Misión Atil, 241 m altura
BE-21	504067	3222240	Calle Dos y Banamichi, 228 m altura
PB-01	503986.279	3217271.8	Plaza Emiliana de Zubeldia; Debajo de columpios
PB-02	503954.182	3217215.28	Plaza Emiliana de Zubeldia, suelo mas arenoso

PB-03	502059.28	3217480.69	Correo Mayor y La Merced, Col Villa Satélite; arenoso
PB-04	502341.521	3217409.83	Olivares y Paseo del Prado; suelo muy arenoso, debajo de tobogán, poco compactado
PB-05	504242.531	3219098.86	Parque Guaymitas, Calle Seguro Social; material arenoso mas arcilla, se levanta fácil con viento
PB-06	504228.807	3219372.52	Parque Guaymitas, Calle Seguro Social; cancha de basquetbol, suelo muy fino
PB-07	504072.265	3219045.62	Parque Tutuli; Debajo de columpios, cerca de dogos fila
PB-08	504153.998	3219056.73	Parque Tutuli; Suelo arcilloso compacto
PB-09	503436.301	3220895.66	Parque Apolo; suelo arenoso entre columpios
PB-10	504482.917	3221483.23	Cero y Ley Federal del Trabajo; tiene grava pero bastante limo debajo de columpios
PB-11	504360.395	3221330.29	Ley 57 y Constitución; debajo de columpios, arenoso
PB-12	504211.414	3221690.31	Poder Legislativo y Calle Uno; arenoso, zona bien compacto
PB-13	503232.789	3218064.84	Parque Santuario Guadalupano, Iglesia de Piedra; entre columpios, arenoso con pedazos de ladrillos
PB-14	503327.17	3218113.61	Frente Escuela Benito Juárez, en parque Santuario Guadalupano, Iglesia de Piedra; arenoso y compacta
PB-15	503458.168	3222581.94	Parque Villa Hidalgo y Calle Cuatro; Sin Pavimentar
PB-16	503368.503	3223161.37	Opodepe y Calle Cuatro; Sin Pavimentar, Col Villa Sonora
PB-17	503003.677	3223388.39	Nacori Grande y Héroes de Caborca; Sin Pavimentar, mas arcilloso
PB-18	502807.066	3223903.54	Piña y Santa Rosalia
PB-19	502839.993	3224483	Arcelia Moraga y Maytorena; muy arcilloso
PB-20	502970.516	3219980.38	Cardenal y Codorniz (muchos niños)
PB-21	502970.516	3219980.38	Villa Morena y Los Valles
PB-22	502808.25	3217196.84	Ave Jardines y del Retiro; suelo mas compactado, mucha actividad infantil, mucha basura
PB-23	502092.87	3217970.35	Plateros y Mercaderes; parque con césped, solo arena descubierta en columpios
PB-24	501134.1	3217927.18	Los Angeles y Dublin; encerrada, poco suelo descubierta compactado
PB-25	500578.29	3217680.16	Paseo Santa Fe y Horquillas
PB-26	500985.86	3217683.92	Ave Santa Fe y Calle Aguaprieta; parque mas arenoso, poco usado
PB-27	497262.07	3216145.28	Parque dentro de Corceles
PB-28	502465.98	3218907	Arizona y Michoacan; parque a lado de materno, arenosa
PB-29	501850.83	3219775.59	Enrique Quijada y Guillermo Arreola; Parque Copa Cabana, suelo muy claro compactado y arenoso
PB-30	501806.18	3219707.85	Calle López del Castillo y Enrique Quijada, cancha Basquetbol

PB-31	501187.6	3219931.52	Ayuntamiento y García Aburto; muestra en puerta de Kinder en zona de columpios
PB-32	501047.26	3220826.05	San Blas y Privada Bella Vista; Frente a Fabrica, arboles arenoso
PB-33	499929.43	3221792.44	República Belice y Ramón Corona
PB-34	499847.14	3221789.3	República Belice y Ramón Corona; campo de Futbol a lado de parquecito
PB-35	499983.72	3221201.1	
PB-36	497861.99	3221159.73	Cabo Blanco y Navojoa; calle sin pavimentar y en mal estado , hay puesto de tacos
PB-37	503844.68	3219830.34	Fuente de panteón Yañez
PB-38	503956.81	3219710.56	Panteón Yañez manzana 10 block 7, calle menos transitada
PB-39	498855.79	3225576.01	Al final de la Agustín Zamora al norte y franquicia vimark, en campo de futbol de tierra (muy blanda)
PB-40	499225.7	3225338.43	Pueblitos y cerrada ópatas, hay parque pequeño y de bajo nivel social (arenosa)
PB-41	497844.17	3227305.03	No calles.. Parque pequeño no casas... al lado de monte ya no hay ciudad
PB-42	499321.37	3225085.7	parque de cerrada torre plata, parque de cerrada fresa dentro de zona de bajo nivel económico
PB-43	498483.99	3227566.28	Suelo natural al lado de PB-41
PB-44	498443.79	3224311.66	Villa del real y luz de valencia, muchos niños y parque muy grande, Limosa pero con grava
PB-45	497688.64	3224494.99	Cabo san Pedro y Normandía, parque pequeño
PB-46	497219.51	3220739.53	Suelo panteón quiroga
PB-47	502336.41	3222553.3	Monteverde y divisaderos (parque en área de columpios)
PB-48	501227.63	3224484.99	Parque en cerrada de capilla área de columpio
PB-49	498483	3223044	Lázaro mercado entre sierra del sur y sierra obscura, polvo en suspensión (192m)
PB-50	506720	3216399	Avenida unión y calle fresnos en col revolución 2 (167m)

ANEXO 2

Tabla descriptiva del área de muestro de calles de la ciudad de Hermosillo, Sonora y coordenadas de los puntos de recolección realizados en este trabajo (Datum WGS 84, Zona UTM 12R).

Muestra	Este_UTM	Norte_UTM	Notas
BEC-01	501227	3211859	Calle Mentirillas y Puente Rojo, Colonia Arcoiris, 158 m altura
BEC-02	500733	3212187	Calle J y Calle A, 167 m altura
BEC-03	499731	3212177	Calle Refugio Arvizu y María Jesús Fierro, 151 m altura
BEC-04	504673	3211532	Labradores y Choferes (por desviación de Blvd. Vildósola), tráfico pesado, 204 m altura
BEC-05	503666	3211800	Labradores y Gildardo Magaña, 207 m altura
BEC-06	503461	3211978	Calle del Cerro y Onceava (dirección aproximada pues no viene en mapa), 208 m altura
BEC-07	500902	3223821	Calle San Nicolás y Leonardo P. Gaxiola, Col. V del Cortijo, 216 m altura
BEC-08	499467.07	3219446.52	Saturnino Campoy y Rep. de Panamá
BEC-09	497973	3222296	Pedro Villegas y Cabo San Antonio, Col Mirador, 182 m altura
BEC-10	503823	3222617	Calle Huasabas entre 2 y 3, Col Cuatro Olivos, 243 m altura
BEC-11	503359	3223542	Calle Rebeico entre Israel González y Yañez, Col. Insurgentes. 252 m altura
BEC-12	503061	3222279	San Pedro y Heroes de Caborca, Col López Portillo, 236 m altura
CB-01	504214.205	3219392.46	Parque Guaymitas, Calle Seguro Social (enfrente de parada de autobús)
CB-02	504189.032	3219047.88	Parque Tutuli
CB-03	504232.806	3221716.91	Calle Uno y Plan de Aguaprieta
CB-04	503211.374	3218083.67	Calle Reforma, Santuario Guadalupano, Iglesia de Piedra (parada de autobús de reforma)
CB-05	502918.952	3219967.07	Gasolinera Reforma, Reforma y Luis Orci
CB-06	502844.882	3220460.08	Periférico Norte y Reforma, CFE; frente a CFE
CB-07	502777.656	3220846.73	Reforma, puerta del DIF en avenida 8
CB-08	503519.245	3223255.59	Granado y Israel González; Sin Pavimentar (enfrente de parada de autobús)
CB-09	502970.516	3219980.38	Piña y de los Corregidores
CB-10	501124.08	3217955.53	Los Angeles y Dublin

CB-11	499408.55	3217145.32	Colosio y Carlos Quintero Arce
CB-12	500861.58	3220169.37	Sobre Periférico Norte (en parada de autobús, frente a la comandancia norte)
CB-13	499303.88	3221099.6	Republica de Colombia y Pótam; frente a escuela bachilleres CBTIS 206
CB-14	503655.82	3219748	Reyes #243 (casa de Rafael Del Río)
CB-15	503838.8	3220112.21	Periférico Norte detrás de panteón Yañez, (en parada de autobús en Periférico norte y Yañez)
CB-16	503912.56	3219400.48	Puerta sur del panteón (puerta principal)
CB-17	504733.14	3220029.66	Periférico norte y blvd. Ignacio soto
CB-18	506258.24	3219551	Periférico norte y blvd. Ignacio soto a la altura de loma alta (c/vivero)
CB-19	506697	3218808	Fco. kino entre periférico norte salida a nogales, enseguida de gasolinera Faro
CB-20	506702.92	3217765.14	Periférico norte y circumbalación, calles de lado no pavimentadas
CB-21	507193.45	3217188.43	Sanalona y sta teresa, cerca de presa, en la esquina puesto de comida
CB-22	500309.62	3223946.9	Blvd. Solidaridad y progreso
CB-23	499361.74	3225179.85	Cerrada torre plata (Agustín Zamora y pueblitos)
CB-24	497607	3223644.66	Blvd. Progreso y Antonio quiroga, no pavimentado
CB-25	497665.98	3222460.09	Quiroga y Lázaro Cárdenas, muestra a lado de aceites para carros
CB-26	497683.29	3220773.95	Entrada de panteón sobre quiroga
CB-27	497807.88	3218996.47	Quiroga y mendoza (mucha industria en alrededores)
CB-28	497781.41	3218544.99	
CB-29	497884.45	3217005.99	Colosio y quiroga, cerca de gasolinera
CB-30	497884.45	3217005.99	Frente de oxxo
CB-31	501288.05	3217477.75	Solidaridad y colosio (frente a estacionamiento Sta Fe)
CB-32	502331.88	3217096	Colosio y olivares
CB-33	497265.74	3216001.58	Villa corceles y passage encerrada
CB-34	504786	3221016	Blvd. Morelos y Calle 7, frente a gasolinera
CB-35	504973.4	3222207.16	Calle los azulejos Dos, cerrada los azulejos, calle muy barrida de concreto
CB-36	504689.35	3222030.7	Blvd. López Portillo y Morelos, trafico ligero
CB-37	504566.8	3223230.9	Blvd. Morelos y Calle Iztacihuatl (concreto)
CB-38	504561.5	3224168.9	Intersección Morelos y Progreso, trafico variado calle de concreto

CB-39	503056.5	3224098.3	Blvd. progreso y Reyes de pavimento tráfico pesado (frente Benavides)
CB-40	503274.3	3217538.5	
CB-41	503058.74	3219125.5	Reforma esquina con Jose Heally sobre pavimento trafico pesado
CB-42	502702.7	3221761.16	Reforma esquina López portillo frente a gasolinera (pavimento, tráfico pesado)
CB-43	502515.5	3222966.7	Reforma esquina con Yécora (pavimento)
CB-44	502249.6	3224090.75	Reforma esquina con progreso, frente a Gas, tráfico pesado
CB-45	501499.86	3224979.2	Sin pavimento calle san Ismael
CB-46	501742.16	3226432.1	Colonia nueva, calle tetacahui, esquina tancitaro, urbvilla del cedro en pavimento
CB-47	500710.6	3221824.54	Blvd. solidaridad y cardenas (tráfico pesado)
CB-48	500716.8	3218419.4	Blvd. solidaridad esquina luis encinas, tráfico pesado frente a colcalocla (concreto)
CB-49	502037.91	3216281.07	Blvd. solidaridad esquina con calle olmos, frente aparada de autobús
CB-50	502818.35	3215580.33	Blvd. solidaridad y paseo rio sonora (tráfico pesado) entre dos gasolineras
CB-51	503191.4	3214823.26	Blvd. solidaridad y camino del seri (concreto) enseguida de pepsi tráfico pesado
CB-52	502673.77	3212131.59	Calle Jacinto López esquina con 13va, colonia villa hermosa ,poco trafico
CB-53	502223.05	3212920.7	Calle sin pavimentar en calle 4 , entre cactus y Jesús López
CB-54	503562.28	3213333.8	Blvd. solidaridad y calle aome, tráfico pesado (frente parada autobús)
CB-55	504304.08	3213657.24	Blvd. vildósola esquina con Jesús Lujan, frente a correos (tráfico pesado)
CB-56	502225	3218266	Luis Encinas y Olivares (viento en la ciudad)
CB-57	501899	3220267	Olivares y periférico norte (altura 202 metros)
CB-58	501803	3221103	olivares y Lázaro cárdenas (altura 201m)
CB-59	501131	3221567	
CB-60	499482	3223394	
CB-61	504737	3218842	Blvd. Morelos y Kino (192m)
CB-62	509594	3218768	Blvd. Kino entre 1ro de Mayo y Guillermo carpena (concreto)
CB-63	508547	3220008	
CB-64	506775	3232418	
CB-65	504462	3216528	Serdan y garmendia 188m
CB-66	504680	3216690	Monterrey entre matamoros y Benito Juárez

CB-67	504742	3217033	Juárez entre colosio y sonora frente a clonica noroeste 162 m
CB-68	503268	3216847	Colosio y reforma 170m
CB-69	503276	3217777	Reforma y luis encinas 195m
CB-70	504980	3217115	Revolución y luis encinas 178m
CB-71	506052	3216186	Emiliana de zubeldia y gilberto Suarez col. Revolución 1, 184m
CB-72	506213	3216725	Luis encinas y blvd. villas del pitic, 180m
CB-73	506808	3216492	Pavimento en salida de camiones de central camionera
CB-74	504658	3216130	Cerro de campana estacionamiento (280m)
CB-75	504440	3216088	Garmendia y cucurpe col cerro de la campana, 190m alt
CB-76	504311	3215793	Calle rosales y fco. serna, frente a procuraduría general de justicia, 182m
CB-77	506987	3214879	
CB-78	506244	3214040	Paseo de las lomas y diego rivera, los encinos 2, enseguida de oxo, 230 m
CB-79	506279	3213031	Periférico oriente frente a cereso, 215m
CB-80	505662	3211634	
CB-81	508707.59	3210637.93	Calle oro y plata Parque industrial, cerca de Bimbo y metal metálica y montaje, 209m
CB-82	509428	3208948	Calle de seris, frente a Universidad tecnológica de Hermosillo 225m
CB-83	509271	3210750	Calle de seris frente a pemex, 209m
CB-84	509823	3211369	Carretera a sahuaripa, frente a Deacero (montículos de Metales) 204m
CB-85	506678	3210197	Carretera a colorada y blvd. capomo, frente a entrada nuevo Hermosillo, 217m
CB-86	506483	3208934	
CB-87	503534	3209080	Carretera internacional, salida a guaymas cruce con blvd. jaudiel Zamorano, 210m
CB-88	502090	3209764	Calle villa Juárez esquina con sta. clara, fraccionamiento villas del sur, 184m
UNI-01	503737	3216918	Universidad de Sonora, Calle Rosales esq. Con Blvd. Luis Encinas
UNI-02	503566	3216901	Universidad de Sonora, Calle Rosales esq. Con Blvd. Luis Encinas
UNI-03	503338	3216885	Universidad de Sonora, Calle Rosales esq. Con Blvd. Luis Encinas
UNI-04	503898	3216959	Universidad de Sonora, Calle Rosales esq. Con Blvd. Luis Encinas
UNI-05	503314	3217097	Universidad de Sonora, Calle Rosales esq. Con Blvd. Luis Encinas
UNI-06	503302	3217216	Universidad de Sonora, Calle Rosales esq. Con Blvd. Luis Encinas

UNI-07a	503304	3217348	Universidad de Sonora, Calle Rosales esq. Con Blvd. Luis Encinas
UNI-07b	503304	3217348	Universidad de Sonora, Calle Rosales esq. Con Blvd. Luis Encinas
UNI-08	503291	3217535	Universidad de Sonora, Calle Rosales esq. Con Blvd. Luis Encinas
UNI-09	503443	3217572	Universidad de Sonora, Calle Rosales esq. Con Blvd. Luis Encinas
UNI-10	503519	3217583	Universidad de Sonora, Calle Rosales esq. Con Blvd. Luis Encinas
UNI-11	503671	3217445	Universidad de Sonora, Calle Rosales esq. Con Blvd. Luis Encinas
UNI-12	503923	3217305	Universidad de Sonora, Calle Rosales esq. Con Blvd. Luis Encinas
UNI-13	503997	3217312	Universidad de Sonora, Calle Rosales esq. Con Blvd. Luis Encinas
UNI-14	504016	3217205	Universidad de Sonora, Calle Rosales esq. Con Blvd. Luis Encinas
UNI-15	503537	3217130	Universidad de Sonora, Calle Rosales esq. Con Blvd. Luis Encinas

