



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**METALES PESADOS EN POLVO URBANO DE LA
CIUDAD DE CHETUMAL**

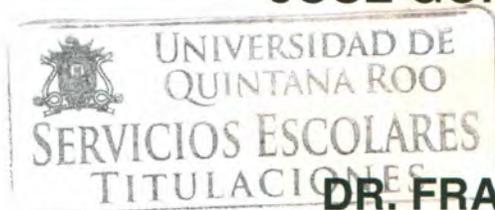
TESIS

Para obtener el grado de

INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTA

JOSÉ GONZALO ZAPATA CARBONELL



DIRECTOR

DR. FRANCISCO BAUTISTA ZÚÑIGA



ASESORES

**DR. OSCAR FRAUSTO MARTÍNEZ
M.I.A. JUAN CARLOS AVILA REVELES
Q.F.B. JOSÉ LUIS GONZÁLEZ BUCIO
I.Q. JOSÉ LUIS GUEVARA FRANCO**

Chetumal Quintana Roo, México, Junio de 2014



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

Trabajo de tesis bajo la supervisión del comité del programa de licenciatura y aprobada como requisito para obtener el grado de:

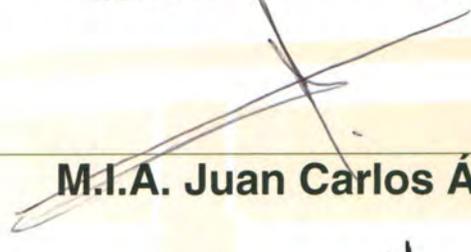
INGENIERO AMBIENTAL

Comité de Tesis

Director:


Dr. Francisco Bautista Zúñiga

Supervisor:


M.I.A. Juan Carlos Ávila Reveles

Supervisor:


Dr. Oscar Frausto Martínez



Chetumal, Quintana Roo, México, Junio de 2014.

DEDICATORIA

A Flor, Gonzalo y Anna Karen:

“¿Se acuerdan del plan de vida? Ahí va, ahí va...”

AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT por la beca brindada en la participación del proyecto “Las propiedades magnéticas de los suelos y sus aplicaciones: contaminación, clasificación, cartografía y uso del fuego en la agricultura”.

Al Ing. Víctor Alcérreca Sánchez, director del COQCYT, por el apoyo brindado durante el verano de la ciencia 2012, en el cual surgió la oportunidad de realizar éste trabajo.

A los miembros del comité evaluador, docentes de la Universidad de Quintana Roo, el Mtro. Juan Carlos Ávila Reveles, el Ing. José Luis Guevara Franco y el Q.F.B. José Luis González Bucio, por sus comentarios, sugerencias y enseñanzas de esta tesis.

A mis profesores de licenciatura de la Universidad de Quintana Roo, por sus enseñanzas de 5 años y la amistades forjadas durante el proceso.

Al Ing. José Luis Guevara Franco por su especial ayuda durante las revisiones del documento, gracias.

Al Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental y el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México por el curso de “Geoestadística Multiescalar” de la maestría en Geografía y manejo integrado del paisaje, y el uso de las instalaciones y laboratorios durante la medición de propiedades magnéticas y análisis de datos de polvos urbanos.

Al gran equipo de trabajo conformado por el Dr. Francisco Bautista, el Dr. Rubén Cejudo, el Dr. Oscar Frausto, el Dr. Avto Gogichaichvili, la Dra. Bertha Aguilar, la Dra. Carmen Delgado, la Dra. Patricia Quintana, el Dr. Jaime Rendón Von-Osten, el Dr. Jorge Arturo Benítez y la Dra. Luz del Carmen Lagunes, por su asesoría, opiniones y apoyo.

Al Ing. José Luis Cortés, al Mtro. Thomas Joseph Ihl, la Biol. Alma Barajas, la Biol. Marisol Fragoso, la Mtra. Patricia Fragoso, la Ing. Marisol Orozco, la Mtra. Lorena del Carmen Hernández, al Mtro. Alexander Sánchez Duque, al Ing. Jim Vidal, compañeros y colegas que me brindaron su experiencia, apoyo y amistad durante las diferentes estancias que requirió éste trabajo.

A la generación 2008-2013 de ingeniería ambiental y en especial a los inseparables 3 amigos de toda la licenciatura, por la fraternidad, maldades, experiencias, risas, pláticas inmortales y proyectos que surgieron y surgirán.

A mi familia por su incondicional apoyo, motivación y confianza, que fueron el principal motor del ciclo que se cierra con esta tesis.

ÍNDICE

1. Introducción.....	1
2. Marco teórico.....	3
Metales pesados.....	3
Límites permisibles.....	4
Riesgos de cáncer.....	4
3. Objetivo.....	6
3.1. Objetivos específicos.....	6
4. Antecedentes.....	7
5. Materiales y métodos.....	10
Zona de estudio.....	10
Método de muestreo.....	12
Tratamiento de los polvos.....	12
Preparación de muestras.....	12
Programación del XMARS XPRESS.....	13
Enfriamiento.....	13
Determinación de metales pesados.....	14
Índices de contaminación.....	14
Análisis estadístico.....	16
Análisis geoestadístico.....	16
6. Resultados.....	19
Comparación de medianas.....	19
Estadística descriptiva.....	22
Relaciones entre elementos.....	25
Clasificación de vialidades según la carga vehicular.....	27
Relación entre concentraciones por área y por peso.....	32
Mapas geoestadísticos.....	32
Metales por kilogramo de polvo.....	37
Cantidad de polvo por metro cuadrado.....	42
Metales por unidad de área.....	43
Factor contaminante de metales.....	47

Índice de carga contaminante.....	54
7. Discusión.....	56
El acumulamiento de polvos.....	56
La evaluación de contaminación por medio de referencias.....	56
Las posibles causas de contaminación.....	59
La conexión entre las vialidades y la contaminación.....	61
La influencia de los polvos en la periferia.....	61
8. Conclusiones.....	63
9. Recomendaciones.....	64
10. Literatura citada.....	65
11. Anexos.....	69

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Límites permisibles de metales en suelo urbano por nacionalidad.....	4
Cuadro 2. Clasificación del factor contaminante (FC).....	15
Cuadro 3. Escala según el índice de carga contaminante (ICC).....	15
Cuadro 4. Valor mínimo en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de metales usados para el cálculo del FC....	19
Cuadro 5. Estadística descriptiva del grupo de metales pesados expresados en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	22
Cuadro 6. Estadística descriptiva del grupo de metales pesados expresados en $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$	23
Cuadro 7. Estadística descriptiva del grupo de Factor contaminante.....	24
Cuadro 8. Estadística descriptiva del grupo de Índice de carga contaminante.....	25
Cuadro 9. Coeficientes de correlación del grupo de $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	26
Cuadro 10. Coeficientes de correlación del grupo de $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$	26
Cuadro 11. Coeficientes de correlación del grupo de Factor contaminante.....	27
Cuadro 12. Diferenciación de medianas en tipos de vialidad por cantidad de metales por área ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$).....	28
Cuadro 13. Diferenciación de medianas en tipos de vialidades por concentración de metales pesados ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).....	29

Cuadro 14. Diferenciación de medianas en tipos de vialidades por Factor contaminante (FC).....	30
Cuadro 15. Diferenciación de medianas en tipos de vialidades por índice de carga contaminante (ICC).....	31
Cuadro 16. Correlaciones entre la concentración por peso ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y la cantidad por área ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$).....	32
Cuadro 17. Especificaciones del análisis geoestadístico para mapas en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	75
Cuadro 18. Especificaciones del análisis geoestadístico para mapas en $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$	75
Cuadro 19. Especificaciones del análisis geoestadístico para los mapas de FC.....	76
Cuadro 20. Especificaciones del análisis geoestadístico para los mapas de ICC y $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica de la Ciudad de Chetumal.....	10
Figura 2. Distribución del contenido en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ por metal.....	20
Figura 3. Distribución del contenido en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ por metal, discriminando Fe.....	20
Figura 4. Distribución del contenido en $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ por metal.....	21
Figura 5. Distribución del contenido en $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ por metal, discriminando Fe.....	21
Figura 6. Distribución del factor contaminante (FC) por metal.....	22
Figura 7. Comparación de medianas de Cu en $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ por tipo de vialidad.....	29
Figura 8. Comparación de medianas de Fe en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ por tipo de vialidad.....	30
Figura 9. Comparación de medianas de FC de Fe por tipo de vialidad.....	31
Figura 10. Medianas de ICC por tipo de vialidad.....	31
Figura 11. Semivariogramas experimentales de A) ICC y B) $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$	33
Figura 12. Semivariogramas experimentales para factor contaminante de A) Cd, B) Cr, C) Fe, D) Mn, E) Pb, F) Ni y G) Cu.....	34
Figura 13. Semivariogramas experimentales para $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de Cd, Cr, Fe, Mn, Pb, Ni y Cu.....	35
Figura 14. Semivariogramas experimentales para $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ de Cd, Cr, Fe, Mn, Pb, Ni y Cu.....	36

Figura 15. Mapa de miligramos de Cadmio por kilogramo de polvo de la ciudad de Chetumal.....	37
Figura 16. Mapa de zonas que sobrepasan el límite de permisible de Cromo de 64 mg·kg ⁻¹	38
Figura 17. Mapa de zonas que sobrepasan el límite permisible de Cobre de 63 mg·kg ⁻¹	38
Figura 18. Mapa de miligramos de Hierro por kilogramo de polvo de la ciudad de Chetumal.....	39
Figura 19. Mapa de miligramos de Manganeso por kilogramo de polvo de la ciudad de Chetumal.....	39
Figura 20. Mapa de zonas que sobrepasan el límite permisible de Níquel de 50 mg·kg ⁻¹	40
Figura 21. Mapa de zonas que sobrepasan el límite permisible de Plomo de 140 mg·kg ⁻¹	41
Figura 22. Mapa de miligramos por metro cuadrado de polvo urbano en la ciudad de Chetumal.....	42
Figura 23. Mapa de miligramos de Cadmio por metro cuadrado presentes en la ciudad de Chetumal.....	43
Figura 24. Mapa de miligramos de Cromo por metro cuadrado presentes en la ciudad de Chetumal.....	44
Figura 25. Mapa de miligramos de Cobre por metro cuadrado presentes en la ciudad de Chetumal.....	44
Figura 26. Mapa de miligramos de Hierro por metro cuadrado presentes en la ciudad de Chetumal.....	45
Figura 27. Mapa de miligramos de Manganeso por metro cuadrado presentes en la ciudad de Chetumal.....	46
Figura 28. Mapa de miligramos de Níquel por metro cuadrado presentes en la ciudad de Chetumal.....	46
Figura 29. Mapa de miligramos de Plomo por metro cuadrado de presentes en la ciudad de Chetumal.....	47
Figura 30. Mapa del factor contaminante de Cadmio en la ciudad de Chetumal...48	

Figura 31. Mapa de zonas que sobrepasan el factor contaminante máximo de Cromo establecido de 6.....	48
Figura 32. Mapa de zonas que sobrepasan factor contaminante máximo de Cobre establecido de 6.....	49
Figura 33. Mapa del factor contaminante de Hierro presente en la ciudad de Chetumal.....	50
Figura 34. Mapa de zonas que sobrepasan el factor contaminante máximo de Hierro establecido de 6.....	51
Figura 35. Mapa del factor contaminante de Manganeso presente en la ciudad de Chetumal.....	52
Figura 36. Mapa del factor contaminante de Níquel presente en la ciudad de Chetumal.....	52
Figura 37. Mapa de zonas que sobrepasan el factor contaminante máximo de Plomo establecido de 6.....	53
Figura 38. Mapa del índice de carga contaminante en la ciudad de Chetumal.....	54
Figura 39. Mapa de zonas que sobrepasan el índice de carga contaminante máximo establecido de 6.....	55
Figura 40. Gráfica de frecuencias del índice de carga contaminante (ICC).....	69
Figura 41. Comparación de medias de Pb en $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ por tipo de vialidad.....	69
Figura 42. Comparación de medias de Pb en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ por tipo de vialidad.....	69
Figura 43. Comparación de medias de FC de Pb por tipo de vialidad.....	70
Figura 44. Comparación de medias de Cd en $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ por tipo de vialidad.....	70
Figura 45. Comparación de medias de Cd en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ por tipo de vialidad.....	70
Figura 46. Comparación de medias de FC de Cd por tipo de vialidad.....	71
Figura 47. Comparación de medias de Cr en $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ por tipo de vialidad.....	71
Figura 48. Comparación de medias de Cr en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ por tipo de vialidad.....	71
Figura 49. Comparación de medias de FC de Cr por tipo de vialidad.....	72
Figura 50. Comparación de medias de Cu en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ por tipo de vialidad.....	72
Figura 51. Comparación de medias de FC de Cu por tipo de vialidad.....	72
Figura 52. Comparación de medias de Fe en $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ por tipo de vialidad.....	73
Figura 53. Comparación de medias de Mn en $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ por tipo de vialidad.....	73

Figura 54. Comparación de medias de Mn en $\text{mg}\cdot\text{km}^{-1}$ por tipo de vialidad.....	73
Figura 55. Comparación de medias de FC de Mn por tipo de vialidad.....	74
Figura 56. Comparación de medias de Ni en $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ por tipo de vialidad.....	74
Figura 57. Comparación de medias de Ni en $\text{mg}\cdot\text{km}^{-1}$ por tipo de vialidad.....	74
Figura 58. Comparación de medias de FC de Ni por tipo de vialidad.....	75

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico del ser humano ha tenido como principal objetivo facilitar las actividades cotidianas y darse una mayor calidad de vida. Entre las actividades que el hombre ha modificado se encuentran la fabricación de herramientas, construcción de viviendas y la movilización; aunque dichas actividades poco a poco han afectado en la salud del mismo.

Toda edificación y construcción está expuesta a los elementos de tal modo que se encuentran en constante desgaste todo el tiempo. Es el desgaste de edificaciones, así como la erosión del suelo y rocas los que originan el polvo urbano (Brookman y Drehmel, 1984).

La quema de compuestos orgánicos, como en basureros; y la quema de combustibles fósiles, como la producida por los automóviles, son algunas fuentes de producción de sustancias perjudiciales para la salud humana en las ciudades.

El aumento del parque vehicular genera grandes emisiones por quema de combustibles fósiles, mayores residuos de abrasión de las llantas, desgaste de las balatas al frenar y materiales de desecho por construcción de carreteras y de industrias metalúrgicas, todo esto funge como causa en el aumento en la contaminación por metales pesados (Lu *et al.*, 2007).

Estudios recientes han demostrado que la principal causa de muerte en la población, después de ataques cardíacos, es el cáncer pulmonar en hombres y mujeres (Siegel *et al.*, 2012). Aunado a esto se ha anunciado que tras largas revisiones de estudios en los últimos años se encontró relación directa entre la presencia de contaminación, como metales pesados suspendidos, con muertes por cáncer en las ciudades (OMS, 2013).

La inhalación de polvos principalmente se encuentra relacionada con bronquitis, enfisema y asma, aunque también se encuentra que alteran la estructura de los pulmones (Fubini y Otero, 1999) provocando cánceres.

El término de salud ambiental indica que para asegurar el bienestar presente y futuro de las personas es necesario preservar, proteger y restaurar el ambiente (Ordóñez, 2000), por esto el diagnóstico de la calidad ambiental en zonas urbanas es el primer paso para conocer las condiciones ambientales que se tienen.

Después del diagnóstico le sigue el monitoreo. En México una forma de monitoreo es por medio del IMECA (índice metropolitano de calidad del aire), que cuantifica las partículas menores a 10 micrómetros (PM_{10}) que son directamente inhaladas por las vías respiratorias; también existe el SIMA (Sistema integral de monitoreo ambiental), pero no se aplica más que para la Ciudad de México y Nuevo León respectivamente.

Existen estudios de contaminación realizados en ciudades con grandes poblaciones que por lo general indican altos grados de contaminación, para tales casos las medidas tomadas son netamente mitigatorias y no preventivas; sin embargo, en ciudades pequeñas como la ciudad de Chetumal no existe información acerca de salud ambiental. Por lo tanto, no se sabe qué cantidad de polvos depositados hay, qué metales carcinogénicos existen ni en qué manera están distribuidos; un diagnóstico ayudaría a prevenir niveles elevados de contaminación como los que tienen la mayoría de las ciudades.

2. MARCO TEÓRICO

Todos los elementos mencionados anteriormente emiten residuos y usan la atmósfera como medio de transporte y el suelo como destino final.

En la capital del estado, las muertes por cáncer pulmonar y por enfermedades en vías respiratorias han ido aumentando considerablemente, y siguiendo estudios anteriores, esto puede deberse a este tipo de contaminación ambiental provocada por el hombre.

Es de suma importancia conocer las condiciones ambientales actuales en Chetumal, para poder luego decir qué es lo que se está produciendo indirecta e inconscientemente, y que pudiera estar causando enfermedades en un futuro cercano.

2.1 Metales pesados

La definición conocida globalmente para metal pesado se refiere a la densidad de éste; sin embargo, se ha puesto en duda dicha enunciación. Por lo tanto la definición que se maneja para “metal pesado” (MP) se refiere a la posición del elemento en la tabla periódica, pues su posición está relacionada con propiedades químicas de compuestos que incluyen el elemento (Appenroth, 2010). Así pues los MP se dividen en “elementos de transición”, “elementos terrestres raros” y otro grupo que incluye metales, metaloides y elementos dudosos.

Los efectos negativos en organismos vivos aumentan con la acumulación de metales pesados (Appenroth, 2010) y de las propiedades específicas del suelo (Gjoka *et al.*, 2011). Los MP se concentran en polvo en las ciudades, entonces éste queda disponible para que plantas, animales y el ser humano entren en contacto con él, ingerirlo o bien inhalarlo. Así pues, se vuelve prioritario estudiar las cantidades y concentraciones de estos elementos presentes en polvo de las ciudades.

2.2 Límites permisibles

Para analizar las cantidades y concentraciones en ciudades es necesario compararlas con parámetros acordados por los gobiernos, por lo tanto en muchos países se encuentran legislados las concentraciones máximas de algunos metales, por tipo de suelo, en miligramos de metal por kilo de muestra.

El cuadro 1 muestra una recopilación de los límites permisibles de cadmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), níquel (Ni) y plomo (Pb), que se tienen en México, EE UU, Canadá, España, Nueva Zelanda, Reino Unido y Holanda.

Cuadro 2. Límites permisibles de metales en suelo urbano por nacionalidad

Norma/País	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb
SEMARNAT	37	280	-	-	-	1600	400
EPA	70	230	-	-	-	1600	400
CCME	10	64	63	-	-	50	140
ESPAÑA	15	500	500	-	-	500	1000
Nueva Zelanda	5	560	32000	-	-	-	730
Reino Unido	10	-	-	-	-	130	-
Holanda	0.76	3.8	3.6	-	-	2.6	55

Las unidades se encuentran en mg de metal por kg de muestra

La variación de los límites puede deberse principalmente a distintos enfoques en las políticas de los países autores.

2.3 Riesgos de cáncer

Se han hecho estudios que indican las consecuencias que la acumulación de los MP ocasionan en el ser humano al ser expuesto. Si bien hay distintos tipos de exposición a contaminación, el de interés para explicar enfermedades en vías respiratorias es la inhalación.

Cabe mencionar que la contaminación no es homogénea en toda la ciudad (Ballester *et al.*, 1999), por esto se debe zonificar la ciudad para poder estudiarse. Particularmente el plomo es causante de desórdenes neurológicos como el deterioro de la memoria, reacción tardía y reducción de la habilidad cognitiva (Douay *et al.*, 2013), y el principal causante de cáncer pulmonar en las ciudades grandes.

Tanto el cromo como níquel son también elementos carcinogénicos, en el caso del Cr, esencialmente es el cromo hexavalente, que es encontrado en algunos colorantes, plantas cementeras, desgaste de balatas y en convertidores catalíticos (EPA, 2012) el principal sospechoso.

De igual manera, manganeso, cadmio y cobre (DES, 2013) son elementos que irritan las mucosas de las vías respiratorias originando inflamación y en caso de ingesta, pueden provocar otras enfermedades.

3. OBJETIVO

La evaluación de metales pesados (Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni y Pb) presentes en polvo urbano de la ciudad de Chetumal a través de indicadores de contaminación y el uso de geoestadística

3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

3.1.1 La determinación de la concentración de metales: Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni y Pb, mediante espectrometría de absorción atómica EAA en polvo urbano de la ciudad de Chetumal.

3.1.2 La aplicación de indicadores de contaminación ambiental (factor contaminante y carga contaminante) (Ong *et al.*, 2013) y comparación con la legislación ambiental vigente nacional e internacional.

3.1.3 La elaboración de mapas geoestadísticos para la zonificación de áreas impactadas por metales en polvo urbano de la ciudad de Chetumal.

4. ANTECEDENTES

Brookman y Drehmel (1984) definen que el polvo de las calles (polvo urbano) es la deposición de actividades tanto naturales como humanas, ya que las actividades naturales se refieren a la intemperización de la roca y suelo, son las actividades antropogénicas las productoras de la mayoría de los metales en el ambiente.

Dentro de las actividades antropogénicas, se considera a las chimeneas de industrias como fuentes emisoras fijas, mientras que automóviles, motocicletas y medios motorizados de transporte conforman las fuentes emisoras móviles, todas generan partículas que acaban en la atmósfera. Entre las fuentes móviles ocurre la quema de combustibles fósiles y su escape de los vehículos, residuos de abrasión de llantas y el desgaste de balatas de frenado (Lu *et al.*, 2007). El desgaste de llantas se genera durante el rodamiento, cuando existe fricción de las llantas sobre el pavimento (Rogge *et al.*, 1993), así que sus residuos se depositan en el suelo y las corrientes de aire los transportan de un lugar a otro y los vuelven disponibles para el ser humano.

En los últimos meses la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha confirmado la relación entre la contaminación atmosférica, principalmente debido a los metales pesados productos de industrias y parque automotriz, y las muertes por causa de cáncer de pulmón en adultos en ciudades (OMS, 2013).

Algunos autores mencionan que la ingestión de polvo y suelo contaminado con plomo es la principal vía de entrada de éste metal, igualmente, varios autores han mencionado en diversos estudios que existen correlaciones entre los niveles en el suelo y en la sangre de las personas. Curiosamente se menciona que la ingesta de los adultos es menor al 5%, mientras que en niñas y niños es mayor al 50%. (Laidlaw y Fillippelli, 2008; Mielke *et al.*, 1983, 2007; Mielke y Reagan, 1998) (Tomados de McClintock, 2012). Sin embargo, es por medio de la inhalación que el polvo urbano con metales pesados representa un riesgo para la salud (Adachi y Taniosho, 2004)

En México, el SIMA del Gobierno de Nuevo León (2013), es el Sistema Integral de Monitoreo Ambiental; la toma del Índice Metropolitano de Calidad del Aire (IMECA) en el Distrito Federal son algunos programas de monitoreo que se enfocan en reflejar la concentración de partículas suspendidas en el aire (principalmente PM₁₀: material particulado menor a 10 micrómetros), sin embargo no se indaga más en la naturaleza de los compuestos.

Algunos subproductos de la combustión menores a 100 nanómetros son de los más peligrosos para la salud ya que aún conservan sus propiedades oxidativas e inflamatorias, según se reporta en el documento de Donaldson y colaboradores (2001) y Maricq y colaboradores (1999); además, se ha dicho que la exposición a algunos metales pesados está correlacionada con casos de distintos tipos de cáncer (Øvrevik *et al.*, 2006); por esto, la EPA (Agencia de Protección al Ambiente) (2012) consideró ampliar el estándar y medir PM_{2.5} para tener una visión mayor de las partículas suspendidas que son más significativas.

Son contados los casos en los que, según el origen del suelo, se han encontrado concentraciones altas de algunos metales, por ejemplo los lugares en que predominan las arcillas en suelos, se encuentran grandes cantidades de metales, sobre todo Pb, Cd, Zn y Cu (Gjoka *et al.*, 2011). También en ciudades con altas emisiones industriales y por tráfico se han encontrado en polvos urbanos rastros de Cu, Cr, Ni, Pb y Zn, pero las fuentes varían dependiendo de la ciudad.

El hierro que se encuentra disuelto en combustibles fósiles como una impureza (Matzka y Maher, 1999) adsorbe materiales peligrosos: como metales pesados (Aguilar-Reyes *et al.*, 2012), dada ésta relación surge la idea de usar indicadores de contaminación en los que intervenga el Fe.

Siguiendo la hipótesis del hierro en Guadalajara y Morelia se llevaron a cabo estudios de metales en polvo urbano mediante la utilización de hojas de *Ficus benjamina* como indicador, estos indicaron que la planta puede utilizarse también

en cualquier ciudad ya que, además de tener la capacidad de fijar las partículas en la savia de sus hojas se encuentra comúnmente entre la flora urbana. Entonces, determinando algunos parámetros magnéticos se logró establecer otro tipo de metodología *proxy* para el monitoreo de la calidad de los polvos (Aguilar-Reyes *et al.*, 2012).

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Zona de estudio

Quintana Roo se localiza en la porción oriental de la península de Yucatán con una superficie de 50 843 km², que representa el 2.2% del total del territorio nacional. Su litoral colinda con el Golfo de México al norte a lo largo de 165 km; al este el mar Caribe. Al sur comparte frontera con Guatemala y Belice, al oeste y noroeste con los estados de Campeche y Yucatán, respectivamente. Sus coordenadas geográficas extremas son: al norte 21°36', al sur 17°49' de latitud norte; al este 86°43' y al oeste 89°25' de longitud oeste.

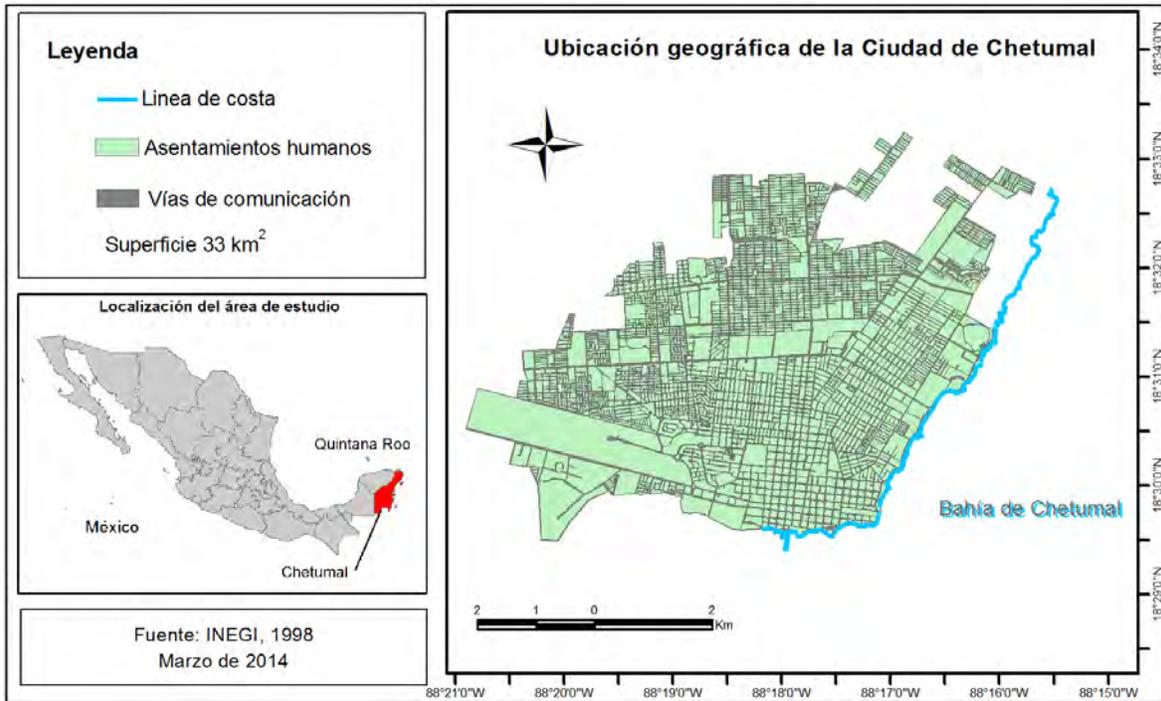


Figura 2. Ubicación geográfica de la Ciudad de Chetumal.

El relieve de Quintana Roo es plano, con una leve inclinación no mayor de 0.01% y pendiente en dirección oeste a este. A su vez, el estado se encuentra enclavado en la provincia fisiográfica XI Península de Yucatán, la cual consiste en una gran plataforma de rocas calcáreas marinas que ha venido emergiendo del mar Caribe desde hace millones de años (Pozo *et al.*, 2011).

Chetumal (figura 1) es la ciudad capital del estado de Quintana Roo, según fuentes del INEGI, la ciudad se encuentra asentada sobre roca caliza del Terciario plioceno, que abarca la mayor parte del estado. La ciudad se encuentra a una altitud promedio de diez metros sobre el nivel del mar y cuenta con una población de aproximadamente 151 mil habitantes (INEGI, 2010).

La ciudad presenta tres temporadas notables: la de nortes (diciembre-febrero), la de secas (marzo-mayo) y la de lluvias (junio-octubre); quedando ésta expuesta normalmente a vientos provenientes del SE, salvo que en los meses de diciembre a febrero se reciben vientos del norte. La temperatura promedio anual es de 26.6 °C, con una precipitación media anual de 1341 mm y una humedad anual promedio del 80% (Weatherbase, 2013).

5.2.1.1.1 Método de muestreo

La extracción de las muestras en la ciudad de Chetumal se llevó a cabo durante el mes de mayo de 2013, en temporada seca. El muestreo se realizó en los cruces de calles donde se acumulan los polvos; se muestrearon 86 puntos que fueron distribuidos en forma de malla, de manera que se abarcara toda la ciudad y se muestrearan zonas tanto de tráfico pesado, como el centro; y zonas de tráfico ligero, como la periferia.

En cada punto se de muestreo se marcó con un GPS *Garmin GPSmap 60C*; también se delimitó con una cuerda un área de un metro cuadrado, ya fuera sobre el asfalto o sobre cemento; se barrió y recogió el polvo contenido con una brocha y una pala de plástico (Wei y Yang, 2010; y Aguilar-Reyes *et al.*, 2011); cada muestra fue etiquetada y embolsada siguiendo parámetros estándar (Bautista *et al.*, 2011).

5.2.1.1.2 Tratamiento de los polvos

Las muestras tomadas en cada punto se dejaron secar a la sombra por dos semanas, después se con un mortero de madera y se tamizaron por medio de una malla de dos milímetros; al final se empaquetaron en bolsas nuevamente y trasladaron al laboratorio correspondiente para la cuantificación de metales.

5.2.1.1.3 Preparación de las muestras

La parte de muestras que sólo fueron tamizadas a dos milímetros fueron llevadas a la ciudad de Campeche, Campeche para hacer la digestión de ellas, que se llevó a cabo en el laboratorio de Epomex (Instituto de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México) a cargo del Dr. Jaime Rendón Von Osten, de la Universidad Autónoma de Campeche durante el mes de julio de 2013.

En el laboratorio, que contaba con un horno de microondas marca MARS Xpress con un carrusel para 48 muestras, se pesó una cantidad de 0.5 g de cada muestra de polvo urbano y se depositaron en 15 vasos para digestor MARS Xpress, a cada

uno de los cuales se les agregaron 5 mL de ácido nítrico (HNO_3) concentrado. Comenzada la reacción de HNO_3 se taparon los vasos y se cerraron hasta el tope. Se colocaron los tubos dentro del carrusel para ser introducidos al horno.

Para descartar impurezas en el agua destilada sería necesario tener un blanco como referencia; para la preparación del blanco se tomó 0.5 mL de agua bi-destilada y se depositaron en un tubo (igual que se hizo con los polvos), y se agregó el ácido nítrico.

5.2.1.1.4 Programación del MARS XPRESS

El equipo posee varios métodos estandarizados guardados en su memoria; el método usado fue el de la EPA 3015 para sedimentos, el cual comprende 5 min para elevar la temperatura hasta 150 °C y 5 min manteniendo esa temperatura al 80% de capacidad (1600W).

5.2.1.1.5 Enfriamiento

Para enfriar las muestras se retiró el carrusel con las muestras del horno y se colocó en una superficie plana y ventilada por aproximadamente 10 minutos, seguido a eso se ingresaron las muestras a un cuarto con aire acondicionado y temperatura media de 22 °C por 5 min; finalmente se llevaron a un área ventilada y se destaparon los vasos dejando escapar el poco vapor rojo que contenían.

Las muestras fueron depositadas en viales de vidrio etiquetados de 8 mL y se sellaron con cinta para transportarse de forma segura. Se mantuvieron a temperatura ambiente y a la sombra.

Ya que únicamente se contaban con 15 vasos del digestor y se tenían que procesar 86 muestras mas un blanco, la digestión se llevó a cabo en seis lotes, y para cada uno se realizaron todos los pasos anteriores.

5.2.1.1.6 Determinación de metales pesados

Para la determinación de los metales, los 86 extractos de polvo fueron enviados al laboratorio de El Colegio de Post-graduados (COLPOS), campus Cárdenas, Tabasco; que corre a cargo de la Dra. Luz del Carmen Lagunes Espinoza, para ser analizados a través de un espectrómetro de absorción atómica *PERKIN-ELMER* modelo "AAAnalyst 700".

Utilizando el método y el software *Winlab32AA*, establecidos por el fabricante (Perkin Elmer, 2009), se determinó el contenido de metales (Cr, Cu, Mn, Fe, Cd, Pb y Ni) en cada muestra.

Los valores se expresaron en miligramos de metal por kilogramo de muestra.

5.3.1.2 Índices de contaminación

Se utilizó índices para evaluar la contaminación de metales encontradas respecto a cantidades en el ambiente.

El factor contaminante (FC), es calculado por la siguiente ecuación:

$$FC = \frac{\text{CONCENTRACIÓN DE MUESTRA}}{\text{VALOR MÍNIMO}}$$

Donde *C Sample* indica la concentración del metal a estudiar encontrada en cada punto muestreado y VALOR MÍNIMO indica la concentración normal de dicho elemento encontrada en el ambiente (Wei y Yang, 2010; Ong *et al.*, 2013).

FC representa el número de veces que se sobrepasa del valor mínimo reportado en cada punto para el área de estudio (Ong *et al.*, 2013) Este índice se interpreta siguiendo la clasificación encontrada en Wei y Yang (2010); Ong y colaboradores (2013), ambos basados en Muller (1963), que indican valores ≤ 1 como bajo; ≤ 2 moderado; ≤ 5 altos y > 5 como extremadamente alto (cuadro 2).

Otro índice calculado fue el de carga contaminante (ICC), el cual sigue la siguiente fórmula:

$$ICC = \sqrt[n]{FC_1 \times FC_2 \times FC_3 \times \dots \times FC_n}$$

Donde FC representa al factor contaminante respectivo de cada elemento; n indica el número de elementos que se quieren evaluar. Para el caso de Chetumal, se trata de siete metales.

El cálculo de ICC indica el grado de contaminación puntual, considerando los contenidos totales de metal de cada muestra.

Ambos factores, FC e ICC, se interpretan con una escala de cinco clases (Cuadro 3) determinadas con quintiles y nombrados por la escala dada por Chakravarti y Patgiri (2009); Seshan y colaboradores (2010), citados en Ong y colaboradores (2013).

Cuadro 2. Clasificación del factor contaminante (FC).

Intervalo	Niveles de contaminación
FC=1	Nulo
1<FC≤2	Muy Bajo
2<FC≤4	Bajo
4<FC≤6	Medio
6<FC≤8	Alto
8<FC≤10	Muy alto
FC>10	Extremo

Cuadro 3. Escala según el índice de carga contaminante (ICC).

Intervalo	Nivel de contaminación
ICC=1	Sin contaminación
1<ICC≤2	Contaminación muy baja
2<ICC≤4	Contaminación baja
4<ICC≤6	Contaminación media
6<ICC≤8	Contaminación alta
8<ICC≤10	Contaminación muy alta
ICC>10	Contaminación extrema

Para la ciudad se estableció que a partir de un factor contaminante de seis será necesario implementar medidas urgentes de mitigación. Igualmente con el índice de carga contaminante, un valor igual a seis requerirá atención inmediata.

5.3.1.3.1 Análisis estadístico

Se llenó una base de datos en *Microsoft Excel* en la que se vaciaron los datos en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, y los valores de FC, e ICC; al igual que la clave de los puntos, las coordenadas geográficas, el nombre de las calles, el tipo de vialidad muestreada, y el peso de muestra. También se agregó un nuevo grupo calculado utilizando el peso de muestra y la concentración en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ se normalizó la cantidad de metales por m^2 muestreado, esto para representar la cantidad real de contaminantes en cada punto:

$$\text{mg m}^2 = \frac{\text{Concentración del metal } \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}}\right)}{\text{Peso de polvos } \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}\right)}$$

Dando como resultado la cantidad del metal a estudiar en miligramos por el área muestreada.

Ésta base fue analizada por medio del software estadístico *Statgraphics Centurion XV*, mediante el cual se describen todos los datos.

Con ésta matriz se analizó la estadística descriptiva de los 4 grupos de datos obtenidos; se hicieron correlaciones lineales entre metales por grupo y correlaciones lineales entre grupos.

5.3.1.3.2 Análisis Geoestadístico

Un análisis exploratorio de datos fue realizado para determinar la estadística descriptiva del conjunto de datos, en el cual se exploraron algunos datos como: media, mediana, varianza, desviación estándar, coeficiente de variabilidad, asimetría, curtosis; con la intención de determinar el tipo distribución. Finalmente, se realizó un análisis para detectar errores en la colocación geográfica de los puntos de muestreo (Gamma design, 2006).

También fue necesario hacer un análisis de autocorrelación que consiste en medir la igualdad de la variable dentro de un área determinada, lo anterior para describir la continuidad espacial basada en semivariogramas experimentales (Delgado *et al.*, 2010).

Los parámetros estructurales del semivariograma son: 1) efecto pepita o *Nugget*: es la varianza al azar que representa la variación en la concentración de los cada metal estudiado que no es espacialmente dependiente entre los valores examinados; 2) la meseta o *Sill*: es la asíntota de la curva en la cual la varianza alcanza su valor máximo, porque luego mantiene un valor constante; 3) el alcance o *Range*: es la distancia (h) a la cual se alcanza la varianza máxima de los metales en polvos, éste define el área de influencia de la autocorrelación (Delgado *et al.*, 2010).

La interpolación de los datos se realizó mediante el método *Kriging* Indicador (K ind), que es un método que presenta una amplia diferencia los valores mínimos y máximos que no logran tener una correlación aceptable, por esto se utiliza un valor intermedio denominado “umbral” que sirve como contraste entre los valores mínimos (Biblioteca de ayuda de ArcGis). Al ver el mapa usando éste método se observa la probabilidad de que se cumpla o no la condición dada: rebasar o no el umbral. Para los mapas de factor contaminante, el umbral a usar es seis.

Para el caso de concentración de metal por kilogramo polvo, fue necesaria una investigación de normas para límites permisibles de metales en polvo urbano para ser usados como umbrales; sin embargo, al no encontrar normas para polvos, se utilizó la norma para suelos urbanos de países como Canadá, Estados Unidos, Holanda, Nueva Zelanda, España, Reino Unido y, por supuesto, México (cuadro 1), Cabe destacar que se utilizaron los parámetros de la norma canadiense, por ser más estrictos y tener la mayor cantidad de parámetros.

Además de usar el método antes mencionado, se realizaron interpolaciones mediante el método de el inverso de la distancia (IDD); éste explícitamente supone que los puntos cercanos tienen relación entre si que los más alejados. Para

predecir valores en un punto no medido, el método IDD utiliza los valores medidos que rodeen la ubicación de a predecir, infiere que los valores medidos más cercanos al espacio con valor desconocido tienen mayor influencia en éste que los más alejados. Se asume que cada punto tiene una influencia local que disminuye con la distancia, esto le da mayor peso a los puntos cercanos al lugar de predicción, y el peso disminuye en función del a distancia (Biblioteca de ayuda de ArcGis).

Las capas de interpolaciones se usaron para la creación de mapas usando el software *ArcMaps* 10.1, con todas las extensiones disponibles en la versión completa, y la información vectorial de la ciudad de Chetumal en una escala de 1:250,000 solicitada al INEGI.

6. RESULTADOS

El resultado del muestreo fue de 86 muestras de polvo urbano de la ciudad de Chetumal y una matriz en hoja de cálculo con la que se realizó una comparación de las medianas, la descripción estadística de los datos, correlaciones entre elementos, una clasificación de medianas por tipo de vialidad y la descripción del proceso del análisis geoestadístico.

Para el cálculo del factor contaminante el VALOR MÍNIMO utilizado para cada elemento fue tomado de las concentraciones correspondientes encontradas en la muestra P1, que fue la muestra con menor cantidad de plomo en toda la ciudad. (cuadro 4).

Cuadro 4. Valor mínimo en $mg \cdot kg^{-1}$ de metales usados para el cálculo del FC.

Metales	<i>Cd</i>	<i>Cr</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Mn</i>	<i>Ni</i>	<i>Pb</i>
Valor mínimo	2.55	13.25	21.35	4240	76.7	21.45	23.75

6.1.1.1.1 Comparación de medianas

Las concentraciones de miligramo de metal por kilogramo de polvo se compararon entre si (figura 2); en dicha comparación se observa que la cantidad de hierro encontrado en los polvos de la ciudad es singularmente superior comparada con los otros metales; cuando se excluye a Fe en la comparación (figura 3) se puede observar que el siguiente elemento que sobresale después de Fe, respecto a los demás, es el plomo. Ordenando por cantidad encontrada, las concentraciones en mg por kilogramo de polvo, la siguiente a plomo es manganeso, seguida por cobre, cromo, níquel y por último cadmio.

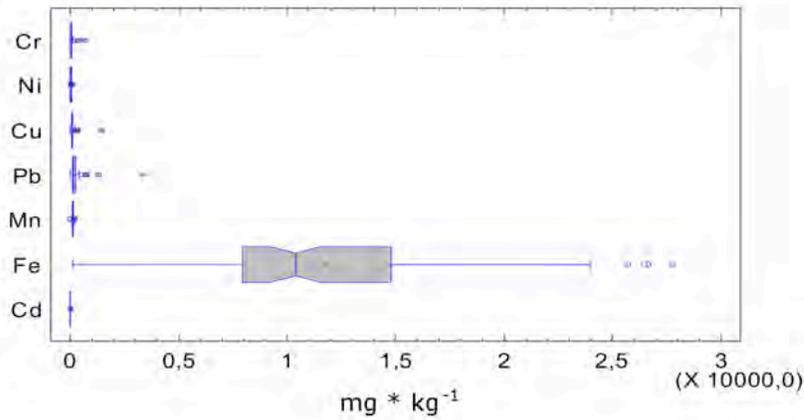


Figura 2. Distribución del contenido en $mg \cdot kg^{-1}$ por metal.

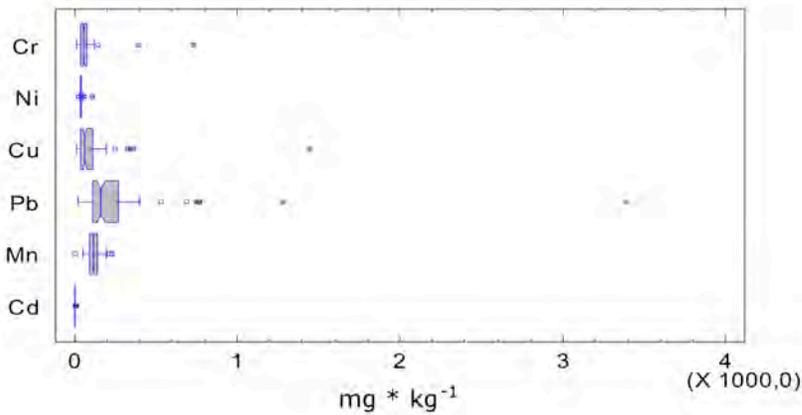


Figura 3. Distribución del contenido en $mg \cdot kg^{-1}$ por metal, discriminando Fe.

La relevancia de las concentraciones de metales en miligramos por unidad de área según la cantidad encontrada indica que el hierro encabeza la lista (figuras 4 y 5), a ésta le siguen, igual que en el caso anterior, manganeso, cobre, cromo, níquel y por último cadmio.

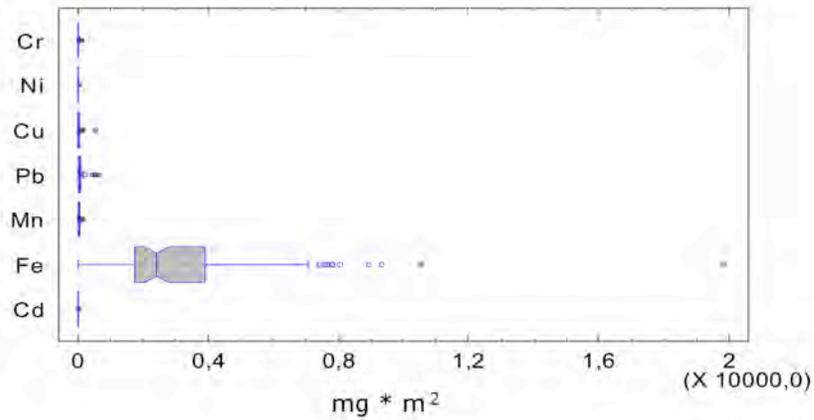


Figura 4. Distribución del contenido en $mg \cdot m^{-2}$ por metal.

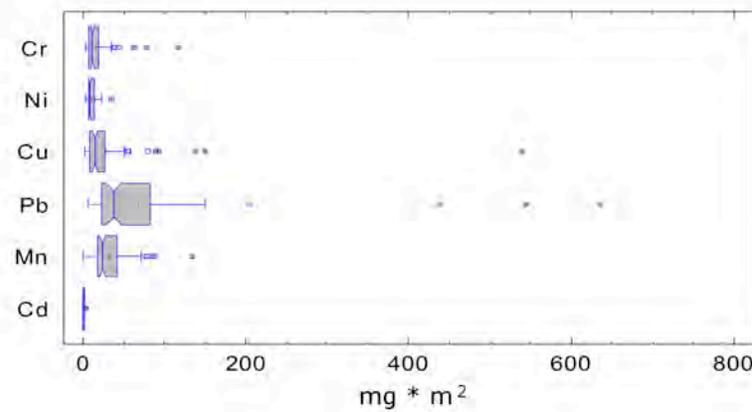


Figura 5. Distribución del contenido en $mg \cdot m^{-2}$ por metal, discriminando Fe.

El caso del FC (figura 6) presenta la peculiaridad de mostrar los valores de plomo como los más altos, seguidos por cobre, cromo, hierro, una similitud entre los valores de manganeso y cadmio, y por último los valores de níquel.

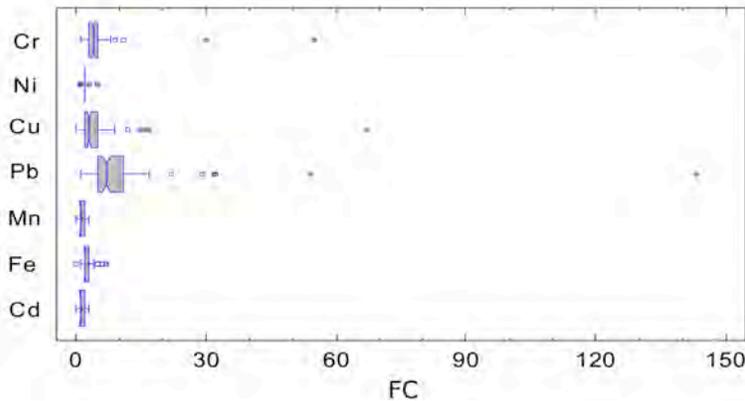


Figura 6. Distribución del factor contaminante (FC) por metal.

6.1.1.1.2 Estadística descriptiva

En el software *Statgraphics XV Centurion* se verificaron las medidas de tendencia central, de variabilidad y de deformación de los las concentraciones calculadas en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$, FC e ICC (cuadros , respectivamente).

Para las concentraciones en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (cuadro 5), se observa una distribución normal en los datos de Cd, Cr, Mn y Ni, ya que existe una similitud entre sus medias, medianas y modas; en cambio en los valores de Cu, Fe y Pb, se puede ver una amplia diferencia entre los valores de las medias y medianas únicamente, porque no existen modas para estos grupos de datos.

Cuadro 5. Estadística descriptiva del grupo de metales pesados expresados en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

	<i>Cd</i>	<i>Cr</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Mn</i>	<i>Ni</i>	<i>Pb</i>
n	86	86	86	86	86	86	86
Media	3.76	65.14	96.03	11758.1	114.67	37.15	257.36
Mediana	3.6	52.15	61.67	10360	113.22	35.3	158.55
Moda	3.45		106.95		125.2	33.85	
Varianza	0.72	7198.69	26222.5	3.40E+7	1465.81	90.82	157418
Desviación estándar	0.85	84.84	161.93	5834.48	38.28	9.53	396.75
Coef. Variación	22.61%	130.25%	168.61%	49.62%	33.39%	25.65%	154.16%
Mínimo	1	8	7.4	130	0.75	19	23.75
Máximo	8.65	728.1	1440.5	27750	228.9	106.1	3395.5
Asimetría	2.62	6.42	7.01	0.89	0.24	4.60	6.24
Curtosis	14.78	46.82	57.12	0.57	0.86	32.20	47.02

Además de las diferencias anteriores, se observa que en las medidas de asimetría, en todos los grupos de datos hay se encuentran agrupados estos hacia la derecha de la media, pues todos los grupos tienen sesgo positivo; sin embargo, en Cd, Fe y Mn no se nota esta tendencia tan pronunciada a comparación de Cr, Cu, Ni y Pb. En cuanto a la curtosis, o “medida de achatamiento”, es observado un comportamiento leptocúrtico en las agrupaciones de Cd, Cr, Cu, Ni y Pb, mientras que para Fe y Mn se observa un “achatamiento” mesocúrtico.

Debido a la variación en los criterios de normalidad, se determina que éste grupo no está normalmente distribuido.

En Cd se observaron valores desde 1 hasta 8.65 mg·kg⁻¹. En Cr los valores van desde 8 hasta 728 mg·kg⁻¹; Cu presentó valores de 7.4 a 1440.5 mg·kg⁻¹. Los valores de Fe fueron elevados a comparación del resto, pues el mínimo encontrado fue 130, llegando hasta los 27,750 mg·kg⁻¹. Mn fue el elemento cuyo valor mínimo fue el menor de los muestreados, yendo desde 0.75 hasta los 228.9 mg·kg⁻¹. Para el caso de Ni se registran valores de 19 a 106.1 mg·kg⁻¹, y para Pb los valores van de 23.75 a 3395.5 mg·kg⁻¹.

En el grupo de cantidad de metales por metro cuadrado (cuadro 6) no se observa distribución normal basándose en los parámetros de las medidas de tendencia central, para dichos datos no se tiene moda en ningún metal.

Cuadro 6. Estadística descriptiva del grupo de metales pesados expresados en mg·m⁻².

	<i>Cd</i>	<i>Cr</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Mn</i>	<i>Ni</i>	<i>Pb</i>
n	86	86	86	86	86	86	86
Media	1.01	16.50	28.11	3306.64	31.46	9.88	67.98
Mediana	11.49	8.41	14.29	37.70	24.63	2427.58	0.80
Moda							
Desviación estándar	0.59	16.89	61.45	2889.04	21.54	5.40	99.65
Coef. Variación	58.29%	102.33%	218.61%	87.37%	68.47%	54.69%	146.58%
Mínimo	0.32	2.5	1.37	20.98	0.12	2.88	5.84
Máximo	3.23	116.79	539.18	19820.1	133.64	34.23	636.15
Asimetría	3.43	1.59	7.10	4.16	1.96	2.77	1.51
Curtosis	15.88	3.82	57.64	19.32	5.61	11.87	2.49

En dicho cuadro se observa un sesgo positivo en todas las poblaciones de metales, sin embargo los valores son levemente mayores a 1 (en los casos de Cr, Mn, Ni y Pb) y un tanto más para Cd, Cu, Fe, por lo que se consideran normales. Igualmente una distribución no normal de los valores es visible en las poblaciones de Cd, Cu, Fe, Ni, según sus valores de curtosis, ya que estos presentan curvas leptocúrticas.

Para valores de curtosis como Cr, Mn y Pb, la curva mesocúrtica se considera normal. Ya que existe gran variación en los criterios de normalidad, éste grupo no está normalmente distribuido.

Los valores en éste grupo fueron: para Cd 0.32 a 3.23 mg·m⁻²; Cr 2.5 a 116.79 mg·m⁻²; Cu 1.37 a 539.18 mg·m⁻²; Fe 20.98 a 19,820.1 mg·m⁻²; Mn 0.12 a 133.64 mg·m⁻²; Ni 2.88 a 34.23 mg·m⁻²; y Pb de 5.84 a 636.15 mg·m⁻².

La estadística descriptiva del grupo de factor contaminante (cuadro 7) muestra que, basado en las medidas de tendencia central, las poblaciones de Cd, Cr, Cu, Fe, Mn y Ni tienen una distribución normal, pues su media, mediana y moda se encuentran muy parecidas; mientras que para el caso de Pb no pasa lo mismo.

Cuadro 7. Estadística descriptiva del grupo de Factor contaminante.

	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb
n	86	86	86	86	86	86	86
Median	1.33	4.94	4.45	2.79	1.5	1.94	10.89
Mediana	1	4	3	2	1	2	7
Moda	1	3	3	2	1	2	5
Varianza	0.29	41.18	56.88	2.02	0.34	0.22	278.56
Desviación estándar	0.54	6.41	7.54	1.42	0.58	0.46	16.69
Coef. Variación	40.74%	129.86%	169.36%	51.01%	39.27%	24.16%	153.19%
Mínimo	0	1	0	0	0	1	1
Máximo	3	55	67	7	3	5	143
Asimetría	0.90	6.41	6.99	0.88	0.35	2.59	6.26
Curtosis	0.36	46.59	56.84	0.49	-0.44	21.85	47.17

Para el caso de la asimetría, se observa un sesgo positivo en todos los metales, aunque para los casos de Cd, Fe y Mn, éste sea menor a 1, y para Cr, Cu, Ni y Pb el sesgo sea menor a 7.

El valor de curtosis indica curvas mesocúrticas en Cd y Fe, así como una curva mesocúrtica negativa para Mn. Siento leptocúrtica para el resto de los metales (Cr, Cu, Ni y Pb). Debido a la variación en los criterios de normalidad, se determina que éste grupo no está normalmente distribuido.

En éste grupo, los valores mínimos fueron de cero y uno, oscilando de 0 a 3 para Cd; 1 a 55 para Cr; 0 a 67 para Cu; 0 a 7 para Fe; 0 a 3 para Mn; 1 a 5 para Ni; y de 1 a 143 para Pb.

La estadística descriptiva del índice de carga contaminante (cuadro 8) indica que su media, mediana y moda son similares; su asimetría muestra un leve sesgo positivo, 1.06; la curtosis de la distribución es leptocúrtica, 2.76, que es mayor a lo ideal (cero). Los valores del índice de carga contaminante oscilaron del 1 hasta el 6.

Cuadro 8. Estadística descriptiva del grupo de Índice de carga contaminante.

n	86
Media	2.67
Mediana	3
Moda	3
Varianza	0.85
Desviación estándar	0.92
Coef. Variación	34.62%
Mínimo	1
Máximo	6
Asimetría	1.06
Curtosis	2.76

6.3 Relaciones entre elementos

El cuadro 9 muestra la tabla con los coeficientes de correlación entre las concentraciones de metales por kilogramo de polvo. Se encontró correlación lineal positiva entre la presencia de hierro (Fe) y manganeso (Mn); hierro (Fe) y níquel (Ni); manganeso (Mn) y níquel (Ni); y cromo (Cr) con plomo (Pb), con una significancia estadística del 95%, ya que muestran valores de P menores a 0.05.

Cuadro 9. Coeficientes de correlación del grupo de $mg \cdot kg^{-1}$.

	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb
Cd	1						
Cr	0.13 0.21	1					
Cu	0.11 0.28	-0.006 0.95	1				
Fe	-0.01 0.92	0.05 0.58	0.08 0.42	1			
Mn	0.08 0.42	0.13 0.23	0.14 0.17	0.57 0	1		
Ni	0.07 0.51	0.08 0.42	0.02 0.79	0.42 0.0001	0.29 0.006	1	
Pb	0.06 0.52	0.94 0	-0.01 0.85	0.009 0.92	0.07 0.48	0.059 0.58	1

El número superior de cada línea indica el coeficiente de correlación y el inferior el valor de P; en rojo se indican los valores de P que rechazan la hipótesis nula; siendo “no hay correlación” la hipótesis nula indicando que existe correlación.

Cuadro 10. Coeficientes de correlación del grupo de $mg \cdot m^{-2}$.

	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb
Cd	1						
Cr	0.44 0	1					
Cu	0.30 0.003	0.08 0.43	1				
Fe	0.66 0	0.48 0	0.22 0.04	1			
Mn	0.76 0	0.51 0	0.29 0.005	0.91 0	1		
Ni	0.82 0	0.48 0	0.2564 0.01	0.84 0	0.87 0	1	
Pb	0.43 0	0.86 0	0.09 0.40	0.50 0	0.50 0	0.50 0	1

El número superior de cada línea indica el coeficiente de correlación y el inferior el valor de P; en rojo se indican los valores de P que rechazan la hipótesis nula; siendo “no hay correlación” la hipótesis nula indicando que existe correlación.

Asimismo, en el grupo de cantidad de metal por metro cuadrado de área existen correlaciones entre Cd-Fe; Cd-Mn; Cd-Ni; Cr-Mn; Cr-Pb; Fe-Mn; Fe-Ni; Fe-Pb; Mn-Ni; Mn-Pb y Ni-Pb (cuadro 10) con una significancia estadística del 95%. Para éste caso el coeficiente de correlación aceptable se debe encontrar entre 0.5 y 1.

Cuadro 11. Coeficientes de correlación del grupo de Factor contaminante.

	<i>Cd</i>	<i>Cr</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Mn</i>	<i>Ni</i>	<i>Pb</i>
<i>Cd</i>	1						
<i>Cr</i>	0.22 0.04	1					
<i>Cu</i>	0.14 0.18	-0.01 0.91	1				
<i>Fe</i>	-0.01 0.89	0.06 0.56	0.08 0.41	1			
<i>Mn</i>	0.12 0.23	0.17 0.09	0.19 0.07	0.49 0	1		
<i>Ni</i>	0.03 0.77	0.04 0.64	0.07 0.49	0.33 0.001	0.14 0.17	1	
<i>Pb</i>	0.13 0.23	0.94 0	-0.02 0.81	0.02 0.79	0.12 0.24	0.03 0.72	1

El número superior de cada línea indica el coeficiente de correlación y el inferior el valor de P; en rojo se indican los valores de P que rechazan la hipótesis nula; siendo “no hay correlación” la hipótesis nula indicando que existe correlación.

El cuadro 11 muestra que existen correlaciones entre los factores contaminantes de Cd y Cr; Fe y Mn; Fe y Ni; Cr y Pb.

De manera general, se observa que en los tres casos, las correlaciones en común fueron las de Fe – Mn; Fe – Ni; Cr – Pb.

6.1.1.1.3 Clasificación de vialidades según la carga vehicular

Como ya fue mencionado en el método, en cada grupo formado (concentración por kilogramo; cantidad por metro cuadrado; factor contaminante) se clasificó las muestras por tipo de vialidad, es decir, vías primarias, secundarias o terciarias. La clasificación por tipo de vialidad proviene de la suposición que en vialidades primarias, el gran flujo vehicular está relacionado directamente con las concentraciones de metales por kilogramo de polvo y con las cantidades de metal por metro cuadrado.

En la ciudad no se encontró una clasificación oficial en el departamento de desarrollo urbano; por lo tanto se propusieron algunos criterios para establecer dicha clasificación: una vía primaria se refiere a una calle o avenida cuyo parque vehicular se mueve fluidamente la mayor parte del día y la velocidad constante mínima es 40 km h⁻¹. A esta vialidad le sigue la secundaria que considerada así

por un flujo vehicular más esporádico cuya velocidad es menor a los 40 km h⁻¹ y presenta algunos topes y paradas preventivas . Finalmente, la vialidad terciaria se refiere a calles pequeñas de zonas habitacionales que usualmente circulan a velocidad maniobra y estacionamiento

Siendo la anterior clasificación una propuesta, es necesario comprobarla. Lo ideal es un análisis de una vía: un análisis de varianza para comprobar la correcta pertenencia de los datos a las vialidades propuestas; sin embargo, se utilizó la prueba de *Kruskal Wallis* que es una prueba no paramétrica utilizada para hacer el contraste de hipótesis pero, a diferencia del ANOVA, *Kruskal Wallis* supone que no hay normalidad en la distribución de datos, por lo que fue ideal para el caso de Chetumal.

Cuadro 12. Diferenciación de medianas en tipos de vialidad por cantidad de metales por área (mg·m²).

Medianas en vialidad:					
Metal	Primaria	Secundaria	Terciaria	Est. de prueba	Valor P
Cd	0.81a	0.85a	0.54a	3.54	0.17
Cr	12.53a	11.495a	8.28a	4.10	0.128
Cu	18.63a	11.22ab	10.11b	7.09	0.028
Fe	2758.9a	2118.18a	1440.3a	5.20	0.074
Mn	26.2a	23.23a	15.85a	3.10	0.211
Ni	9.22a	8.35a	6.42a	2.89	0.235
Pb	39.62a	39.625a	22.82a	3.03	0.22

a: indica el grupo más contaminado; ab: el grupo intermedio y b: el grupo menos contaminado.

El cuadro 12 muestra el metal en cuestión, las medianas de los datos por vialidad, el estadístico de prueba y el valor de P.

En dicho cuadro se observa que la diferenciación en las medianas se dio para Cu únicamente pues con una significancia del 95%, sólo cobre presentó un Valor de P menor a 0.05.

La utilización de las terminaciones “a”, “b” y “ab” fueron dadas a las medianas para indicar la magnitud de la contaminación en cada vialidad: siendo “a” el nivel más alto, “b” el más bajo, y “ab” el intermedio.

La figura 7 muestra una comparación de las medianas de la cantidad de cobre por metro cuadrado; se puede ver diferencia entre ellas, demostrándose lo indicado en la prueba estadística de *Kruskal Wallis*.

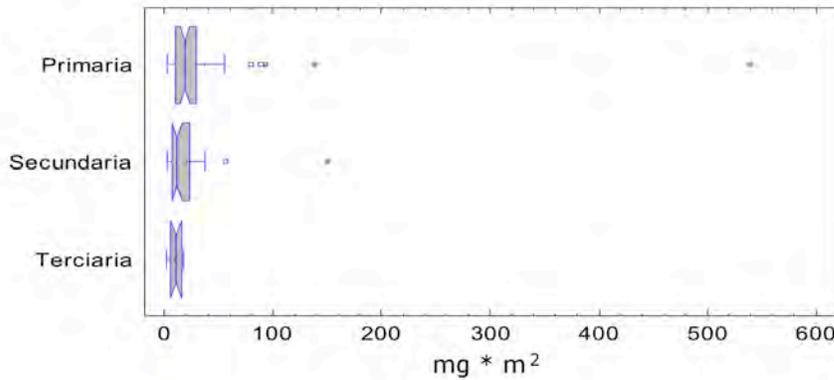


Figura 7. Comparación de medianas de Cu en $\text{mg}\cdot\text{m}^2$ por tipo de vialidad.

Para el caso de las concentraciones de metal por kilogramo de muestra también se llevó a cabo la comprobación de pertenencia de los datos al su tipo de vialidad. Se obtuvo un contraste visible entre las medianas de Fe (figura 8) y al comprobarlo estadísticamente (cuadro 13), fue el único que demostró un valor de P menor a 0.05, siendo así el único elemento en que aplica la diferenciación por vialidad para el caso de concentraciones por kilogramo de muestra.

Cuadro 13. Diferenciación de medianas en tipos de vialidades por concentración de metales pesados ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).

Medianas por tipo de vialidad					
Metal	Primaria	Secundaria	Terciaria	Est. de prueba	Valor P
Cd	3.6a	3.6a	3.85a	1.89	0.388
Cr	52.7a	51.1a	39.35a	1.73	0.42
Cu	73.95a	52.1a	55.2a	5.07	0.079
Fe	12240.0a	8982.5ab	8860.0b	6.37	0.041
Mn	117.75a	107.97a	107.1a	1.34	0.51
Ni	35.2a	34.22a	37.5a	3.87	0.144
Pb	142.6a	190.075a	112.4a	1.19	0.549

a: indica el grupo más contaminado; ab: el grupo intermedio y b: el grupo menos contaminado.

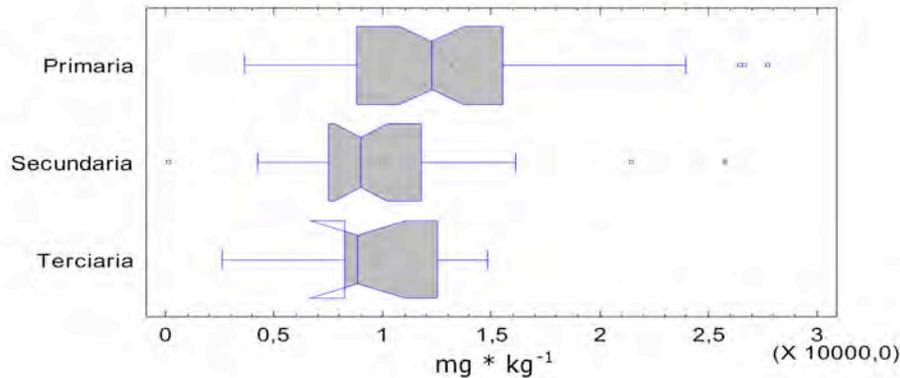


Figura 8. Comparación de medianas de Fe en $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ por tipo de vialidad.

Al igual que el caso anterior, para factor contaminante también hubo una respuesta positiva en la relación del Fe encontrado en el polvo urbano y la clasificación de vía asignada a para la ciudad (cuadro 14), obteniéndose un valor de P igual a 0.026.

Cuadro 14. Diferenciación de medianas en tipos de vialidades por Factor contaminante (FC).

Medianas por tipo de vialidad					
Metal	Primaria	Secundaria	Terciaria	Est. de prueba	Valor P
Cd	1a	1a	2a	4.72	0.094
Cr	4a	4a	3a	1.21	0.544
Cu	3a	2.5a	3a	4.29	0.116
Fe	3a	2b	2b	7.22	0.026
Mn	2a	1a	1a	7.22	0.260
Ni	2a	2a	2a	3.29	0.192
Pb	6a	8a	5a	1.00	0.604

a: indica el grupo más contaminado; ab: el grupo intermedio y b: el grupo menos contaminado.

Igualmente es verificable visualmente la distribución de las medianas para dicha clasificación (figura 9), mostrándose que efectivamente la vialidad primaria es la que presenta mayor presencia del elemento Fe, seguida por secundaria y terciaria cuyos valores son iguales para éste caso.

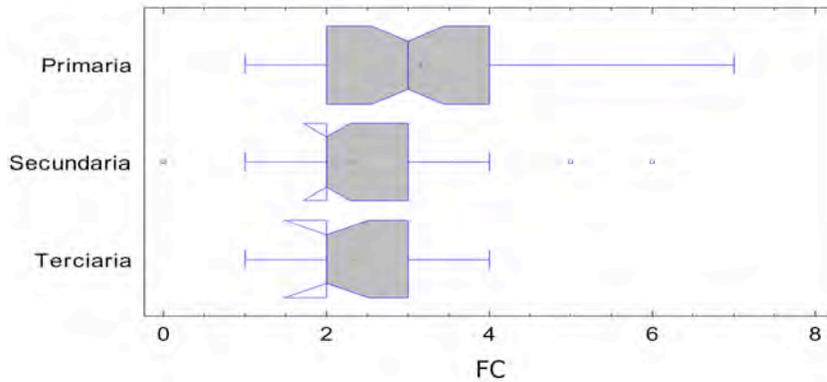


Figura 9. Comparación de medianas de FC de Fe por tipo de vialidad.

Por último se destaca en la comprobación de los valores de índice de carga contaminante respecto la categorización propuesta (cuadro 15) que existe una relación entre las vialidades primarias y los valores mayores encontrados de ICC, aunque en vialidades secundarias y terciarias se encuentre la misma mediana (ICC igual a dos). En la figura 10 es notorio el contraste explicado.

Cuadro 15. Diferenciación de medianas en tipos de vialidades por índice de carga contaminante (ICC).

Medianas por tipo de vialidad					
Metal	Primaria	Secundaria	Terciaria	Est. de prueba	Valor P
ICC	3a	2b	2b	6.1	0.047

a: indica el grupo más contaminado; ab: el grupo intermedio y b: el grupo menos contaminado.

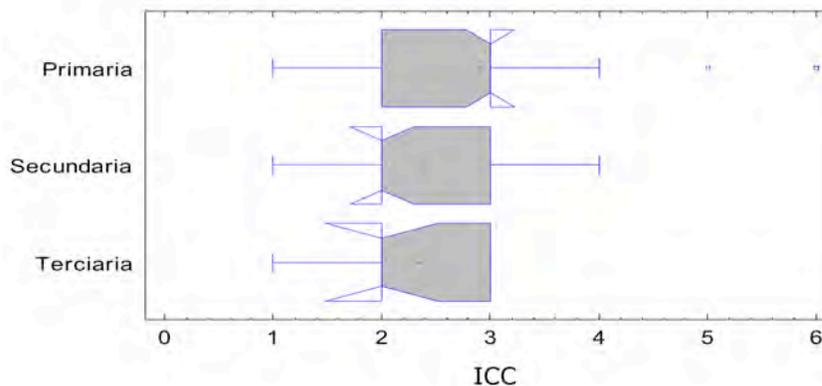


Figura 10. Medianas de ICC por tipo de vialidad.

6.1.1.1.4 Relación entre concentraciones por área y por peso.

Como se mencionó anteriormente, se obtuvieron concentraciones de metales por kilogramos de muestra de la ciudad y se transformaron los datos para indicar la cantidad de metal existente por metro cuadrado.

Es usual el manejo de la concentración de metal por kilogramo para límites permisibles tanto de manera nacional como internacional; sin embargo, en éste trabajo se busca explorar la posibilidad de volver tal tipo de medición como de uso común, pues refleja la cantidad real existente en un área determinada.

Para determinar si los las concentraciones de los metales se correlacionaban con la cantidad de los mismo se realizaron regresiones lineales entre estos grupos.

Cuadro 16. Correlaciones entre la concentración por peso ($mg \cdot kg^{-1}$) y la cantidad por área ($mg \cdot m^{-2}$).

Metal	Valor P	r²	C. corr.
Cd	0	0.191	0.43
Cr	0	0.648	0.80
Cu	0	0.943	0.97
Fe	0	0.440	0.66
Mn	0	0.277	0.52
Ni	0.0116	0.073	0.27
Pb	0	0.553	0.74

C. corr.: coeficiente de correlación.

En el cuadro 16 se sintetiza el valor de P, r² y coeficiente de correlación para de correlación lineal de cada metal entre concentración por peso y cantidad por área. Debido a los valores de P menores a 0.05 en todos los casos, se tomó como criterio para determinar una correspondencia que el coeficiente de correlación consecuente sea mayor a 0.5; resultando haber correlaciones para Cr, Cu, Fe, Mn y Pb.

6.2.1.3.1 Mapas geoestadísticos

Para una representación gráfica de los datos se decidió efectuar un análisis geoestadístico.

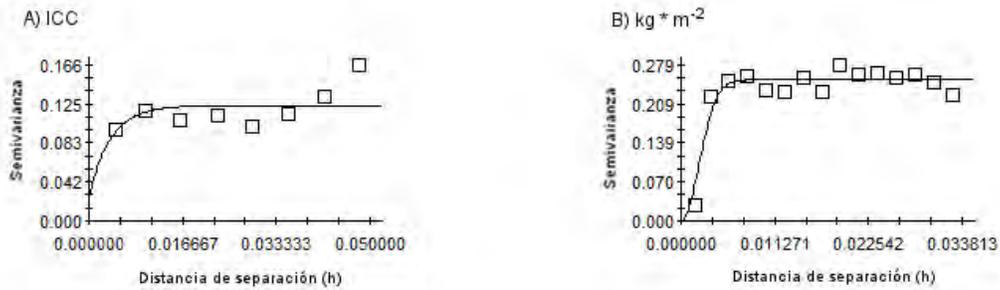


Figura 51. Semivariogramas experimentales de A) ICC y B) kg·m⁻².

Puesto que la legislación no consideraba todos los elementos que en éste trabajo se analizaron se efectuaron dos tipos de interpolación: *Kriging* Indicador (K ind) e inverso de la distancia (IDD).

Para que la información mostrada en los mapas geoestadísticos se asemeje a la realidad debe existir correlación entre los puntos que se interpolaron. Por tal razón se muestran los semivariogramas para la interpolación del mapa de ICC y de kilogramos por metro cuadrado (figuras 11A y 11B), cuyos valores de r^2 son 0.166 y 0.901 respectivamente (cuadro 20).

Del mismo modo se muestran los semivariogramas de las interpolaciones para FC (figura 12 A-G) siendo las r^2 iguales a 0.810, 0.646, 0.760, 0.908, 0.800, 0.984 y 0.706 respectivamente (cuadro 19).

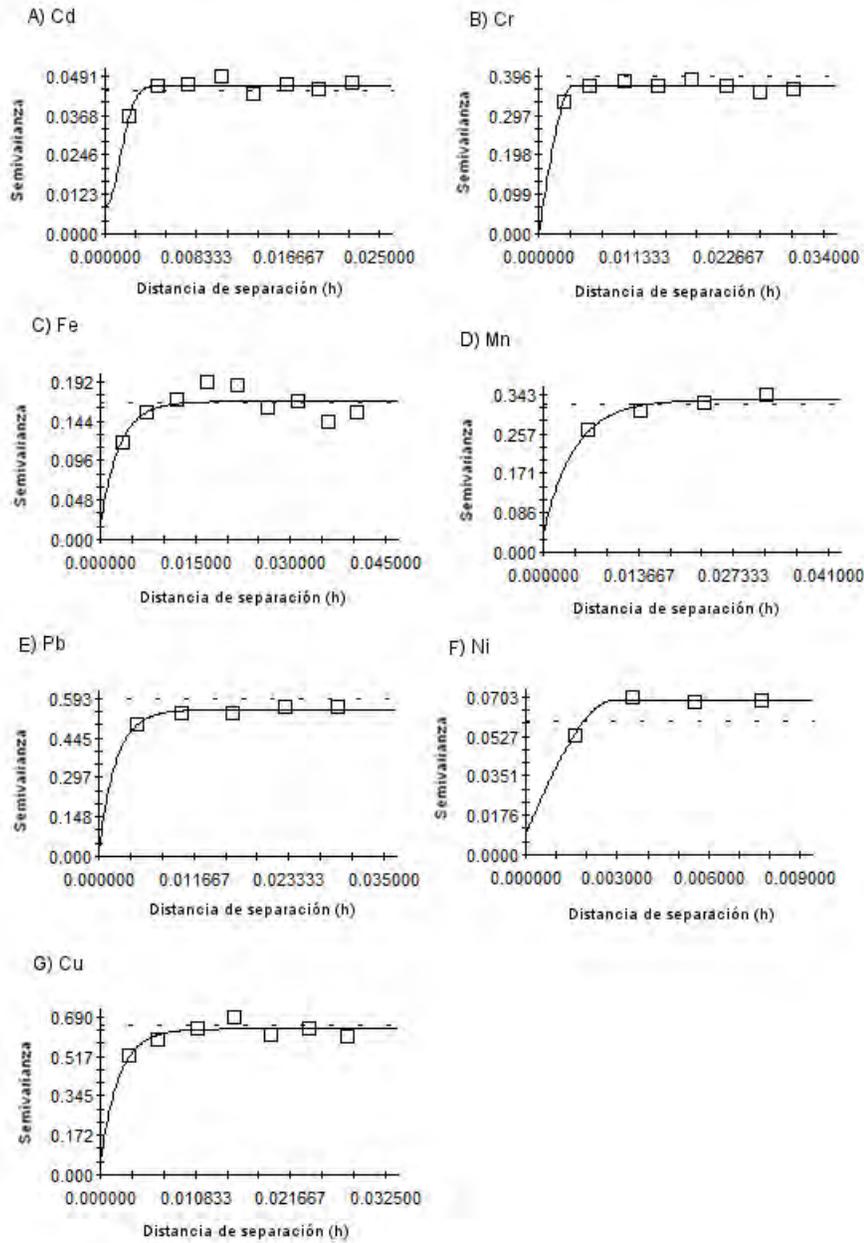


Figura 16. Semivariogramas experimentales para factor contaminante de A) Cd, B) Cr, C) Fe, D) Mn, E) Pb, F) Ni y G) Cu.

Los valores de concentración en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ mostraron semivariogramas (figura 13 A-G) con valores de r^2 iguales a 0.73; 0.231; 0.949; 0.762; 0.778; 0.437 y 0.639 para Cd, Cr, Fe, Mn, Pb, Ni y Cu respectivamente (cuadro 16).

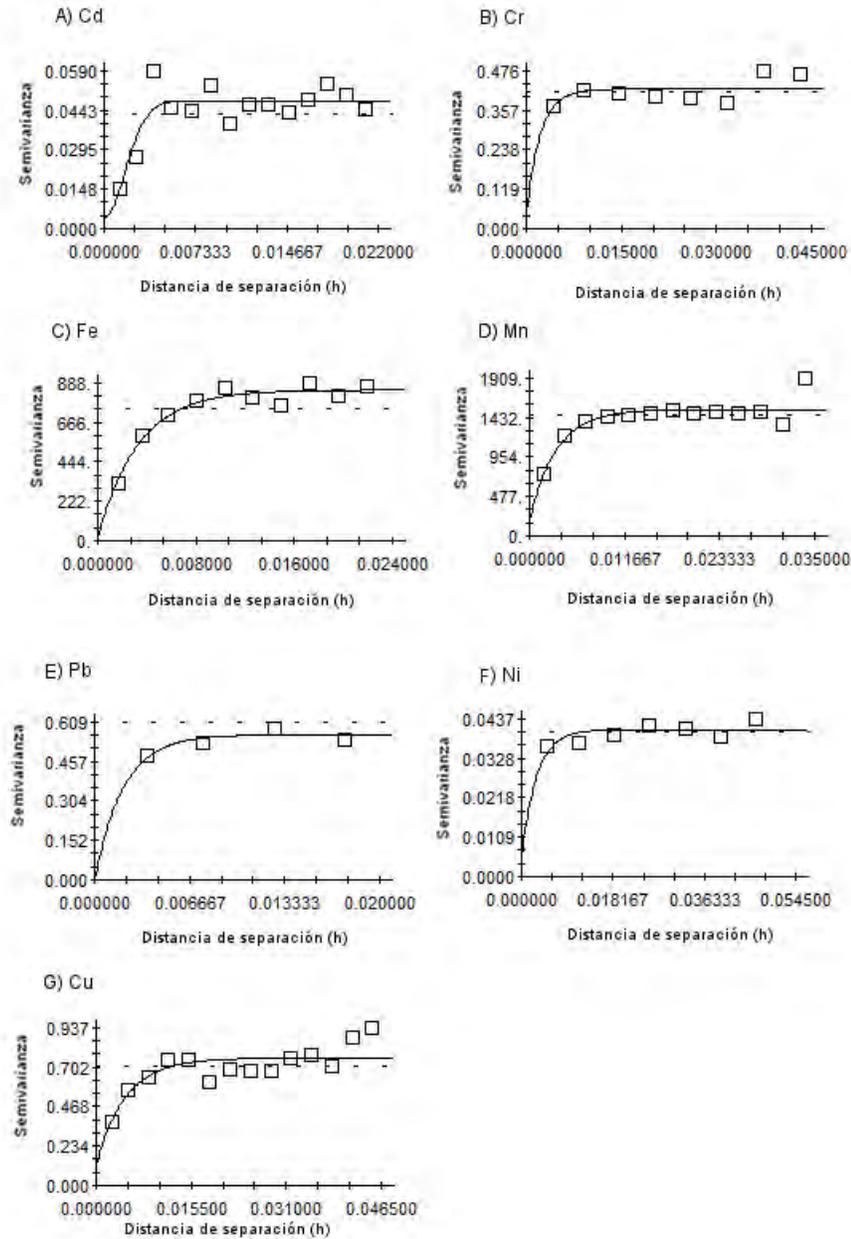


Figura 17. Semivariogramas experimentales para $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de Cd, Cr, Fe, Mn, Pb, Ni y Cu.

Finalmente, los semivariogramas de cantidad de metal en $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ (figura 14) mostraron valores de r^2 iguales a 0.273; 0.934; 0.762; 0.867; 0.867; 0.884 y 0.813 para Cd, Cr, Fe, Mn, Pb, Ni y Cu respectivamente (cuadro 18)

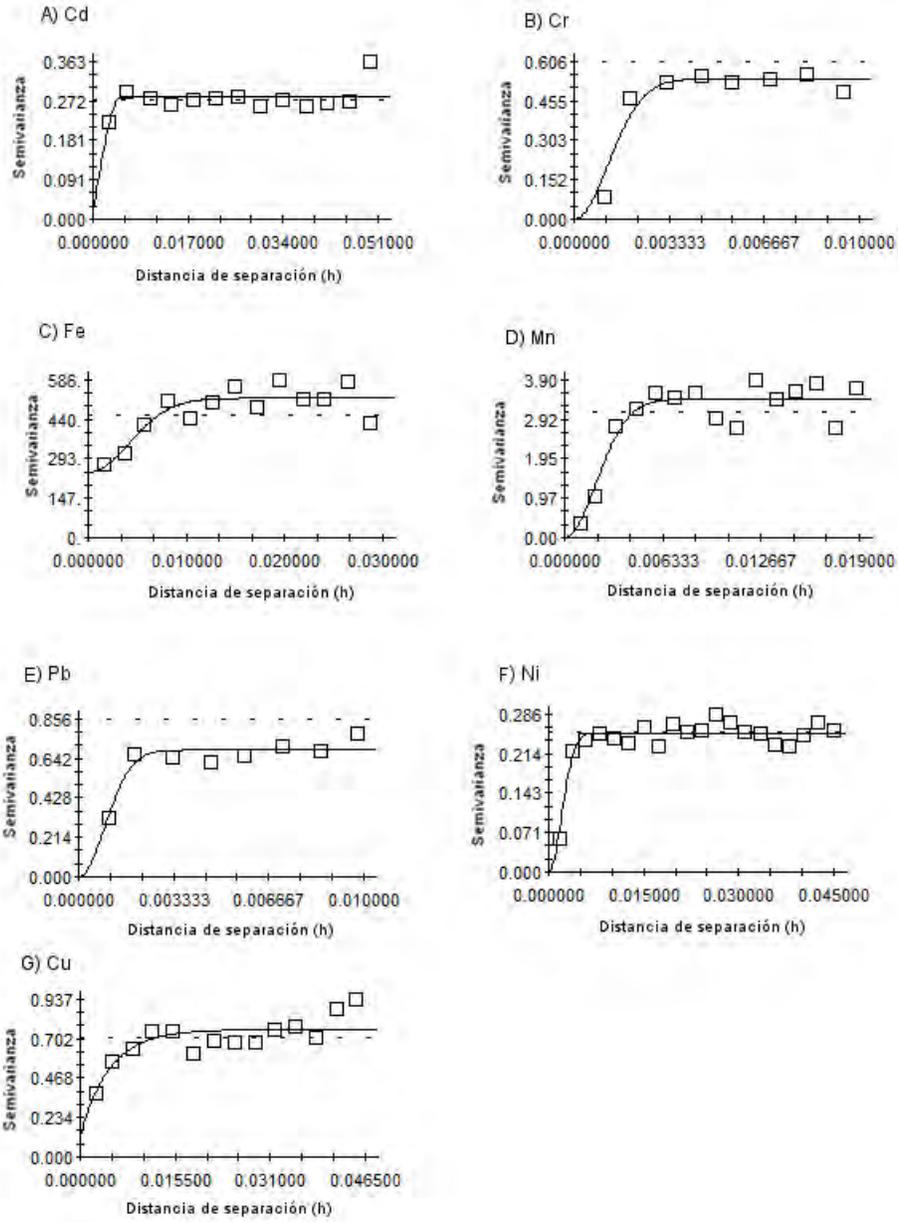


Figura 18. Semivariogramas experimentales para $mg \cdot m^{-2}$ de Cd, Cr, Fe, Mn, Pb, Ni y Cu.

6.2.1.3.2 Metales por kilogramo de polvo ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

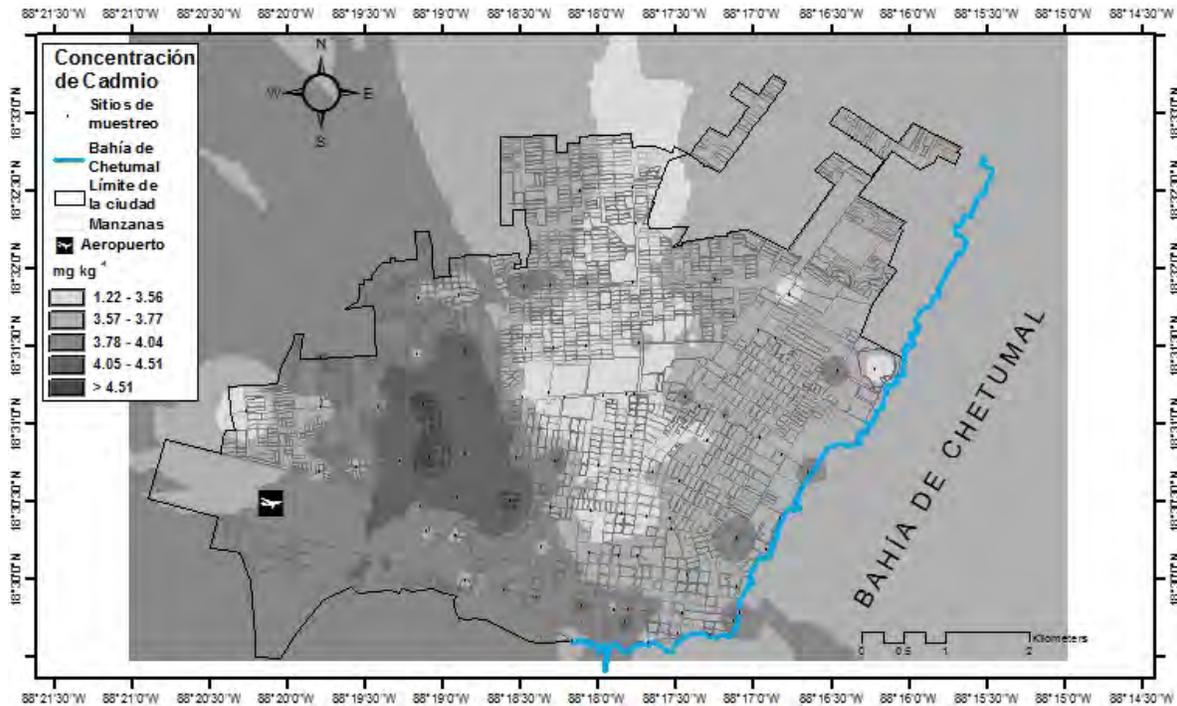


Figura 15. Mapa de miligramos de Cadmio por kilogramo de polvo de la ciudad de Chetumal.

La cantidad máxima de cadmio (figura 15) fue de $8.65 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y se halló al oeste de la ciudad, en una zona cercana a la avenida Javier Rojo Gómez. Igualmente existen dos focos más céntricos, uno cercano al parque de las Casitas y, hacia el norte, uno cercano a la avenida Eric Paolo.

En el caso del cromo, el resultado fue un mapa probabilístico (figura 16) que muestra en rojo las zonas con baja probabilidad de no rebasar el límite permisible establecido de $64 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, ubicándose al sur, así como algunos puntos al este cercanos al malecón, y otro foco hacia el oeste en la avenida insurgentes.

Para el caso de cobre (figura 17) también se realizó un mapa probabilístico; en éste caso el área que rebasa el límite establecido de $63 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ se reportó al suroeste de la ciudad, en las adyacencias de la avenida Álvaro Obregón y el Aeropuerto, así como también algunos puntos alrededor del mercado Andrés

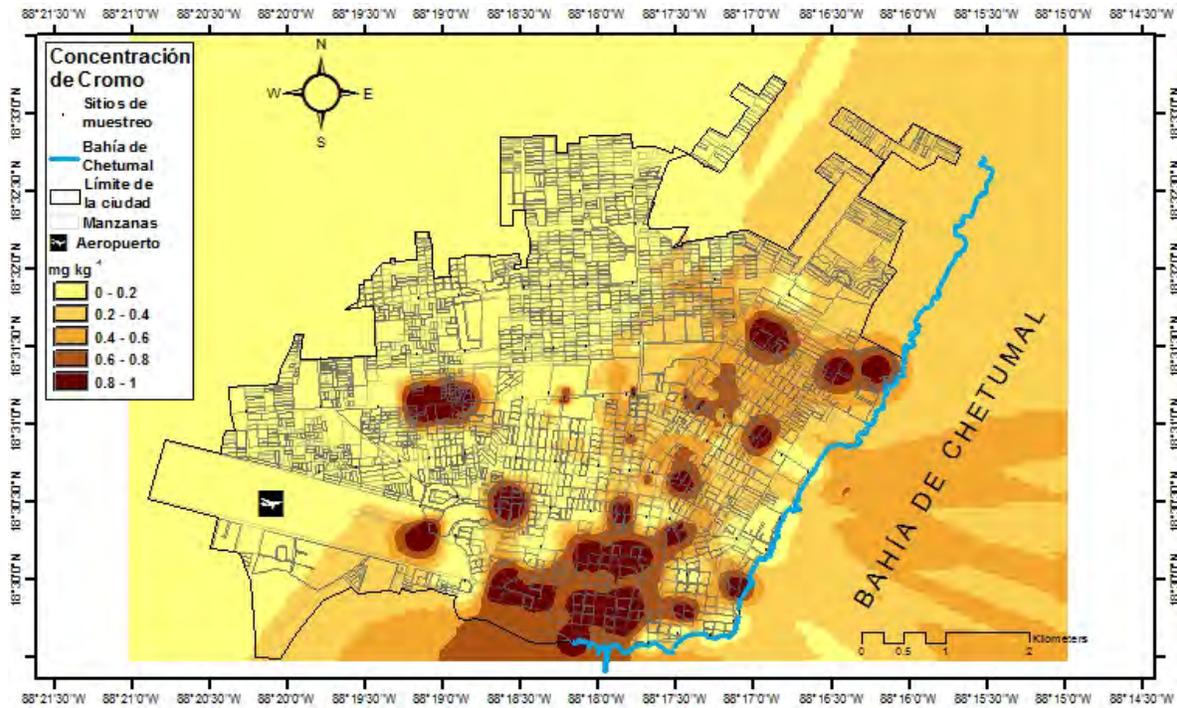


Figura 16. Mapa de zonas que sobrepasan el límite de permisible de Cromo de $64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

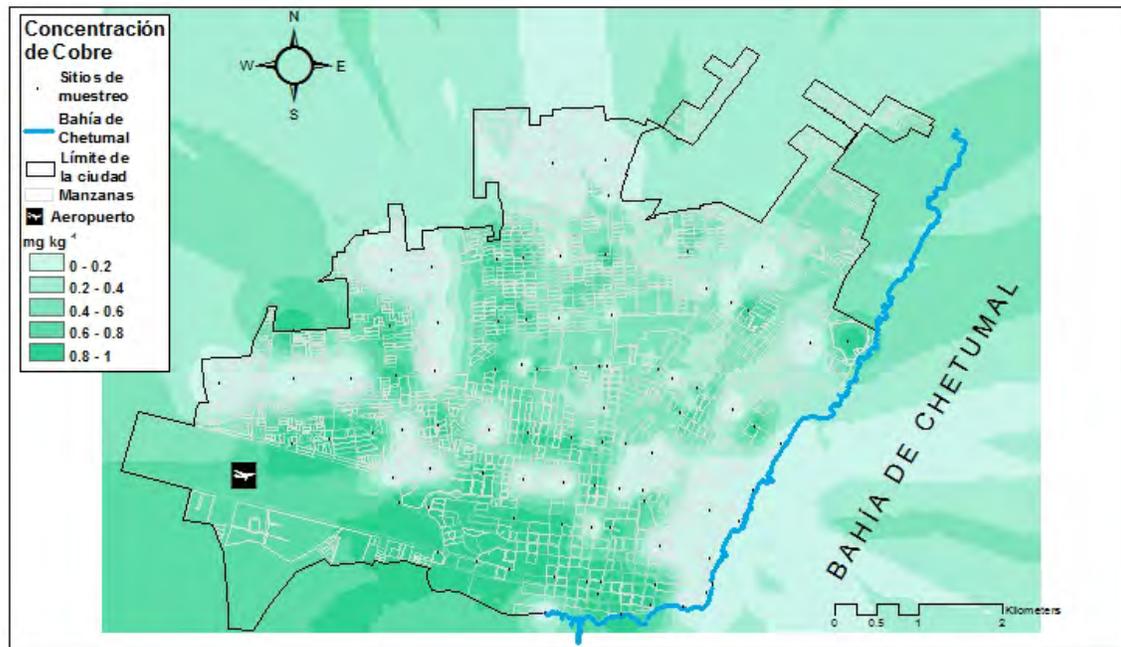


Figura 17. Mapa de zonas que sobrepasan el límite permisible de Cobre de $63 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Quintana Roo. Hacia el centro del mapa se observan otros puntos críticos, y al este se observa un punto único de igual importancia.

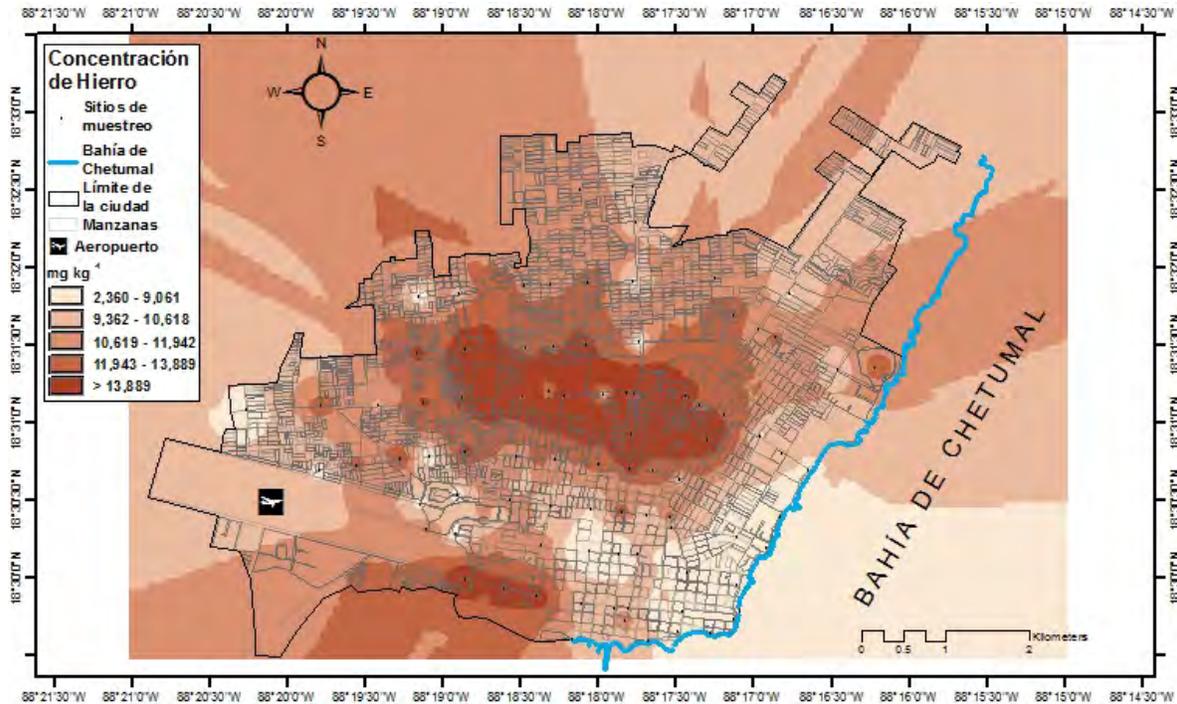


Figura 18. Mapa de miligramos de Hierro por kilogramo de polvo de la ciudad de Chetumal.

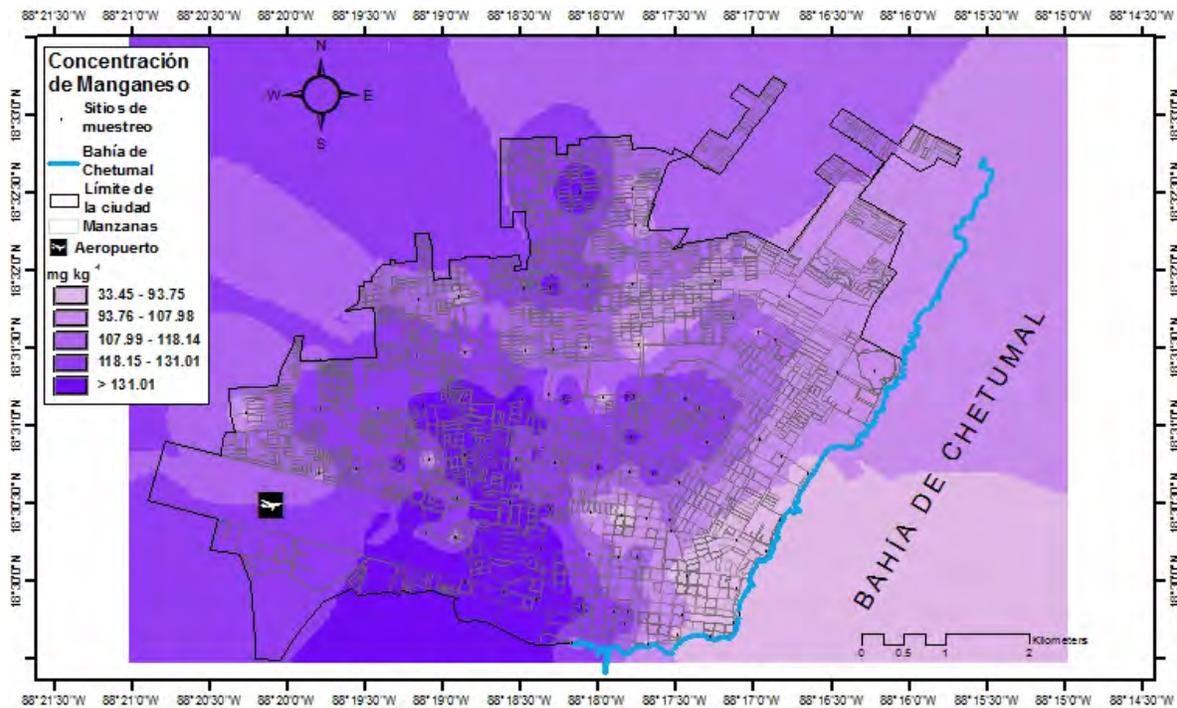


Figura 19. Mapa de miligramos de Manganeso por kilogramo de polvo de la ciudad de Chetumal.

En el mapa de hierro (figura 18) se indica hasta $27,750 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, la mayor concentración del elemento, justo en el centro de éste, aunque también se encontró una superficie con altos niveles al sur, muy cerca de la gasolinera Handall de la avenida Álvaro Obregón.

El manganeso (figura 19) se vio mayormente al sur y al centro de la ciudad, aunque también se encontró hacia el norte de la ciudad en dos puntos: uno sobre la avenida Maxuxac y el otro hacia el final de la avenida Constituyentes.

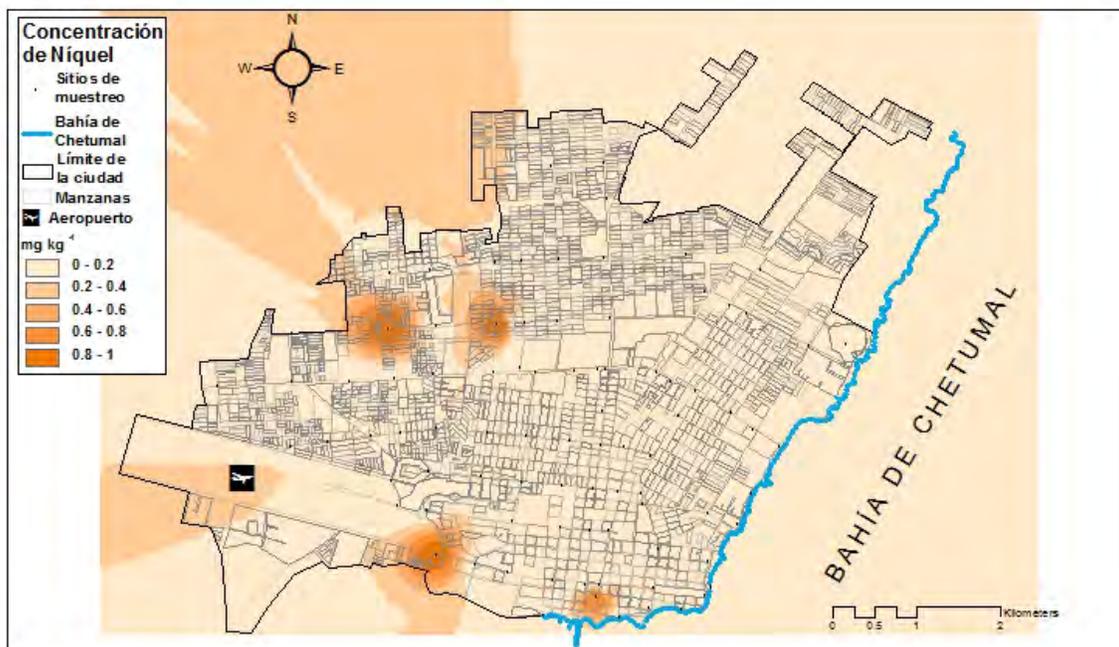


Figura 20. Mapa de zonas que sobrepasan el límite permisible de Níquel de $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

El níquel (figura 20) se analizó con un mapa probabilístico, y se observan cuatro puntos que sobrepasan la norma ($50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$): por el sur, uno al inicio de la avenida Álvaro Obregón; otro en la intersección de avenida Héroe y avenida Álvaro Obregón; y por el norte, un punto en el cruzamiento de Rojo Gómez con Eric Paolo; y por último en Eric Paolo con avenida Chetumal

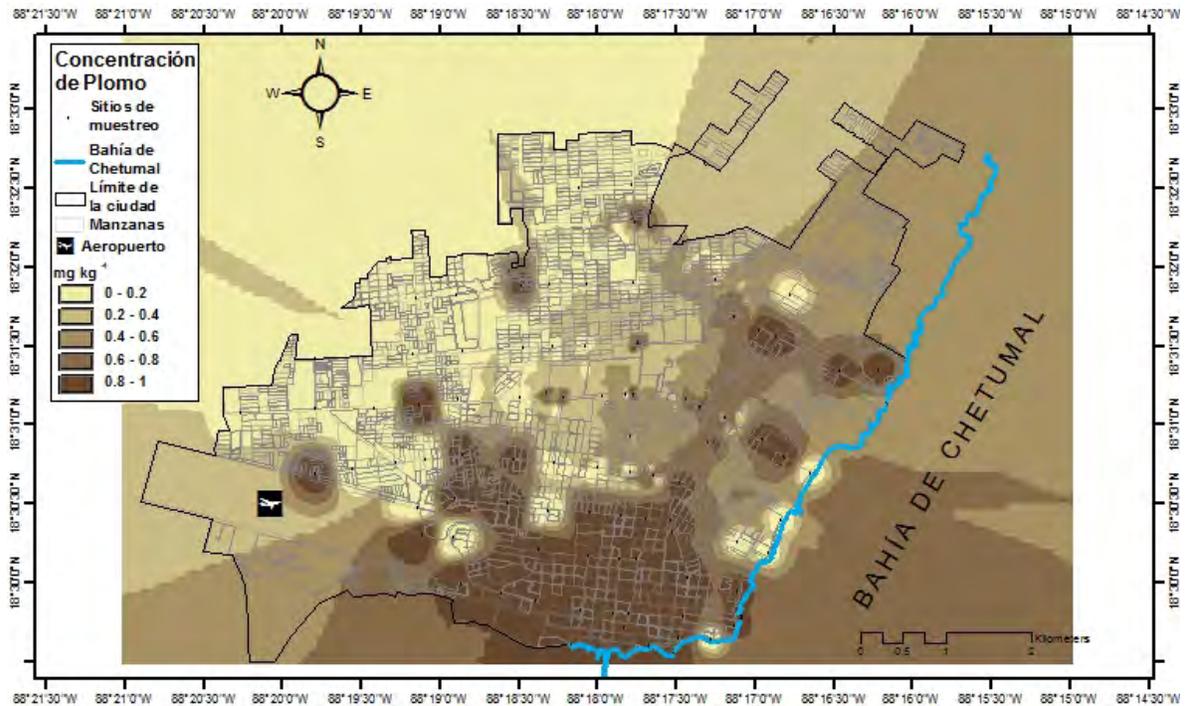


Figura 21. Mapa de zonas que sobrepasan el límite permisible de Plomo de $140 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

El caso final de concentraciones por kilogramo fue el plomo, un mapa probabilístico (figura 21) con $140 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ como umbral que indica que toda la zona sur se encuentra por encima de lo legislado junto con algunos puntos dispersos al centro y este de la ciudad.

6.2.1.3.3 Cantidad de polvo por metro cuadrado

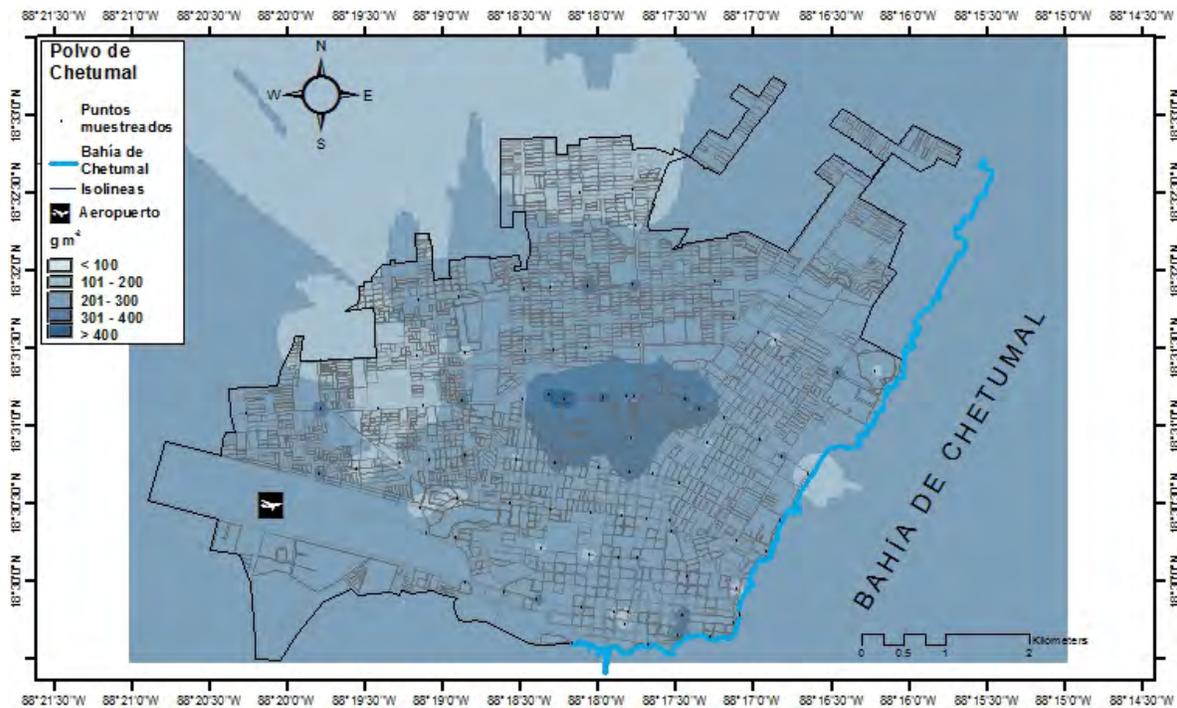


Figura 22. Mapa de miligramos por metro cuadrado de polvo urbano en la ciudad de Chetumal.

La figura 22 es el resultado de emplear la técnica geoestadística al conjunto de datos que indican las cantidades de polvo muestreados en mayo de 2013. En dicho mapa se muestra la ciudad de Chetumal y la distribución del polvo en ella, mostrándose en el centro del mapa la mayor cantidad de polvos, llegando a los 550 gramos. Dicha área abarca desde la zona de la avenida Insurgentes en la que se encuentra el zoológico y el Instituto tecnológico de Chetumal (ITCH), hasta la avenida Calzada Veracruz, de este a oeste; y de norte a sur desde el Colegio de bachilleres plantel dos, hasta la intersección entre la avenida Juárez y la calle Bugambilias.

Las zonas con menor cantidad de polvos muestreada fue la perteneciente a la colonia Sianka'an y al área de la colonia Payo Obispo hasta aproximadamente la avenida Bugambilias.

6.2.1.3.4 Metales por unidad de área ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$)

Como se ha mencionado se transformó los valores de $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ a $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$, resultando en los mapas siguientes:

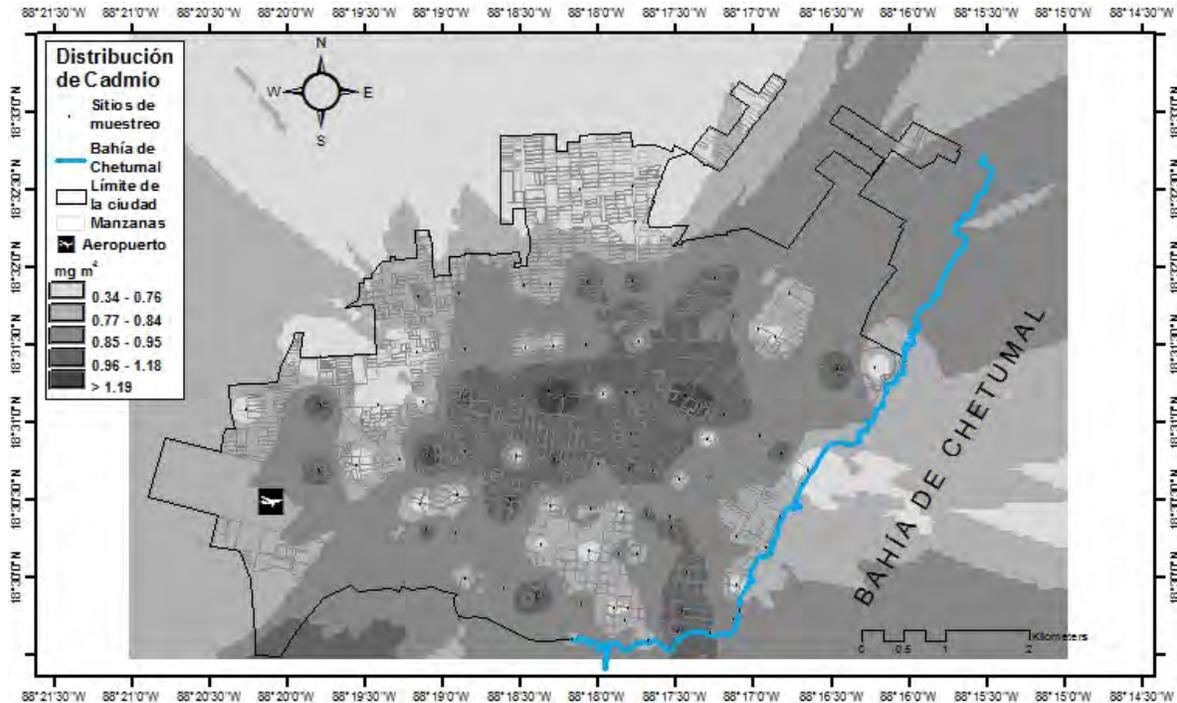


Figura 23. Mapa de miligramos de Cadmio por metro cuadrado presentes en la ciudad de Chetumal.

La mayor cantidad de cadmio de la ciudad (figura 23), que llegó hasta los $3.23 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, se encuentra aglomerada en la parte central de la ciudad en pequeñas zonas al los alrededores del Instituto tecnológico de Chetumal y la dirección de tránsito. Lo anterior puede deberse a que alrededor de esa misma zona se encontró la mayor cantidad de polvo.

Cromo es otro elemento que se estudió (figura 24), y a través del análisis geoestadístico se determinaron cantidades de hasta $116.79 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ mayormente en la zona sur de la ciudad, dentro de un área que abarca parte de la calle Othón P. Blanco, Álvaro Obregón e Ignacio Zaragoza principalmente, habiendo algunos otros focos en áreas adyacentes al ITCH, a la dirección de tránsito y a la Universidad de Quintana Roo.

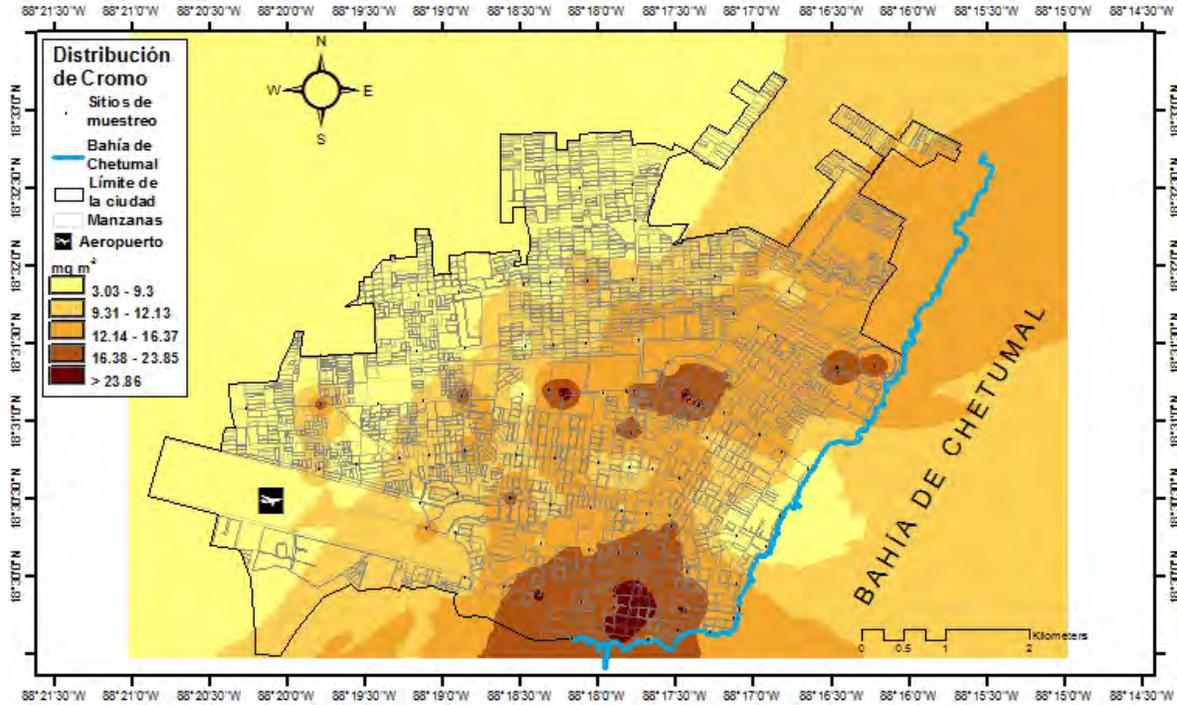


Figura 24. Mapa de miligramos de Cromo por metro cuadrado presentes en la ciudad de Chetumal.

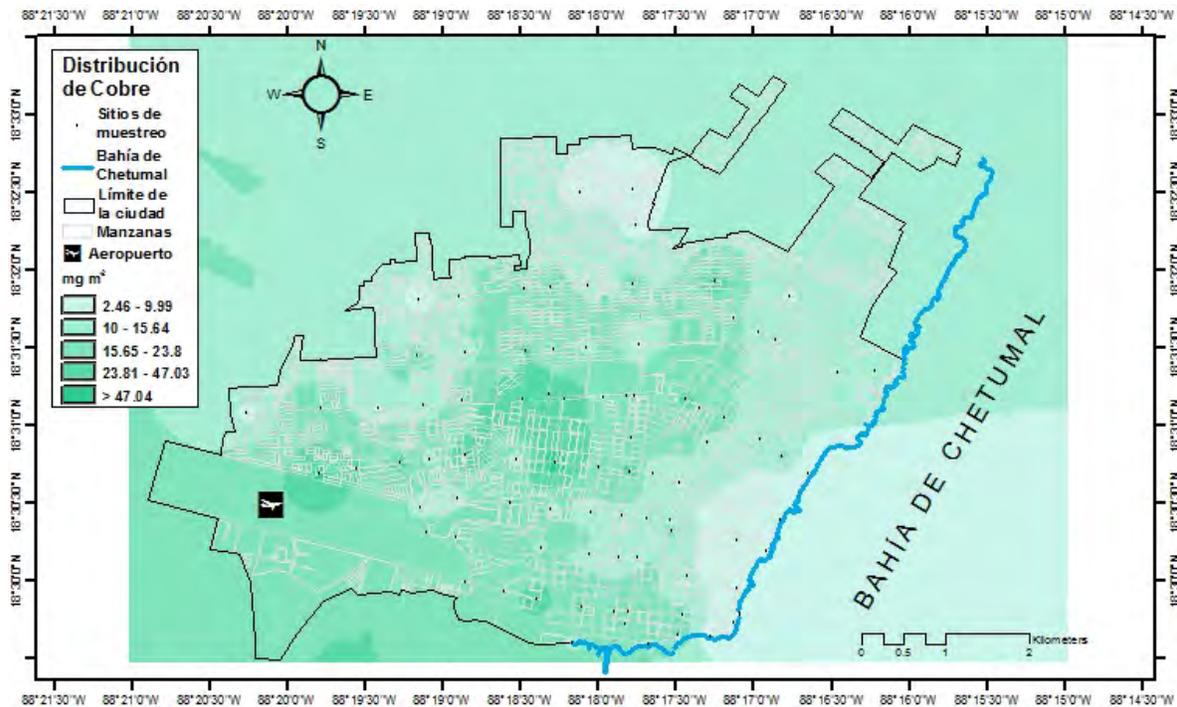


Figura 25. Mapa de miligramos de Cobre por metro cuadrado presentes en la ciudad de Chetumal.

El contenido mayor de cobre (figura 25), hasta $539.18 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$, se encontró principalmente al centro del área urbana, aunque se encuentra también en dos puntos, uno al oeste y otro al noreste del mapa.

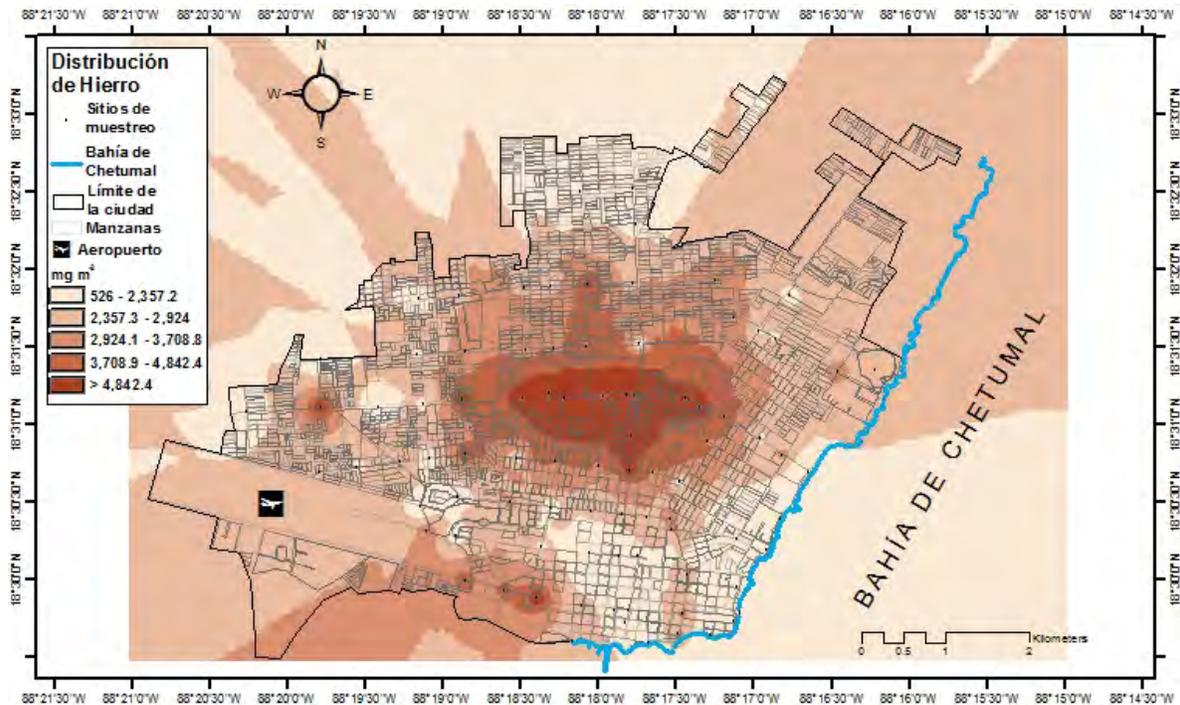


Figura 26. Mapa de miligramos de Hierro por metro cuadrado presentes en la ciudad de Chetumal.

Cantidades de hasta $19,820.1 \text{ mg}$ por metro cuadrado de hierro (figura 26) se hallaron al centro de la ciudad en una gran superficie, aunque también hay cinco focos visibles en el mapa: uno al sur suroeste, otro al oeste, dos adyacentes al oeste de la mancha principal de Fe y uno más hacia el norte de ésta.

Al igual que Fe, las cantidades más grandes de manganeso se encontraron al centro de la ciudad (figura 27) teniendo un pico de $133.64 \text{ miligramos}$ por metro cuadrado, igual que para hierro, se localizaron cuatro puntos alrededor del centro que presentan valores elevados.

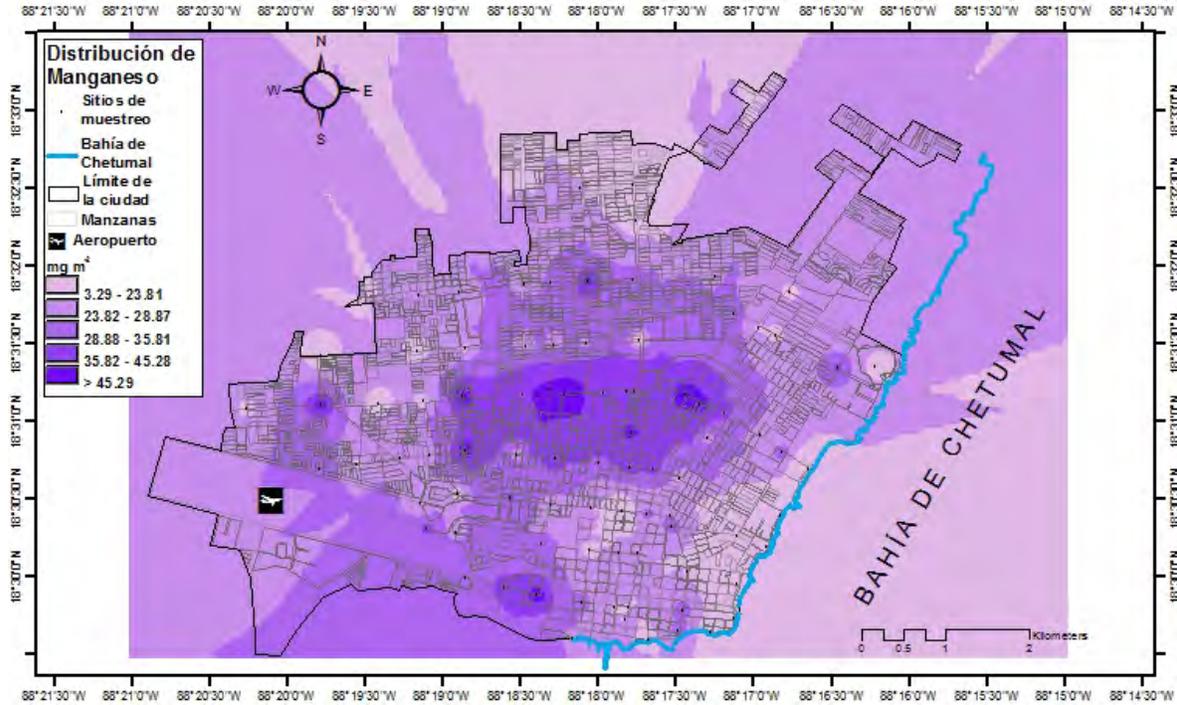


Figura 27. Mapa de miligramos de Manganeseo por metro cuadrado presentes en la ciudad de Chetumal.

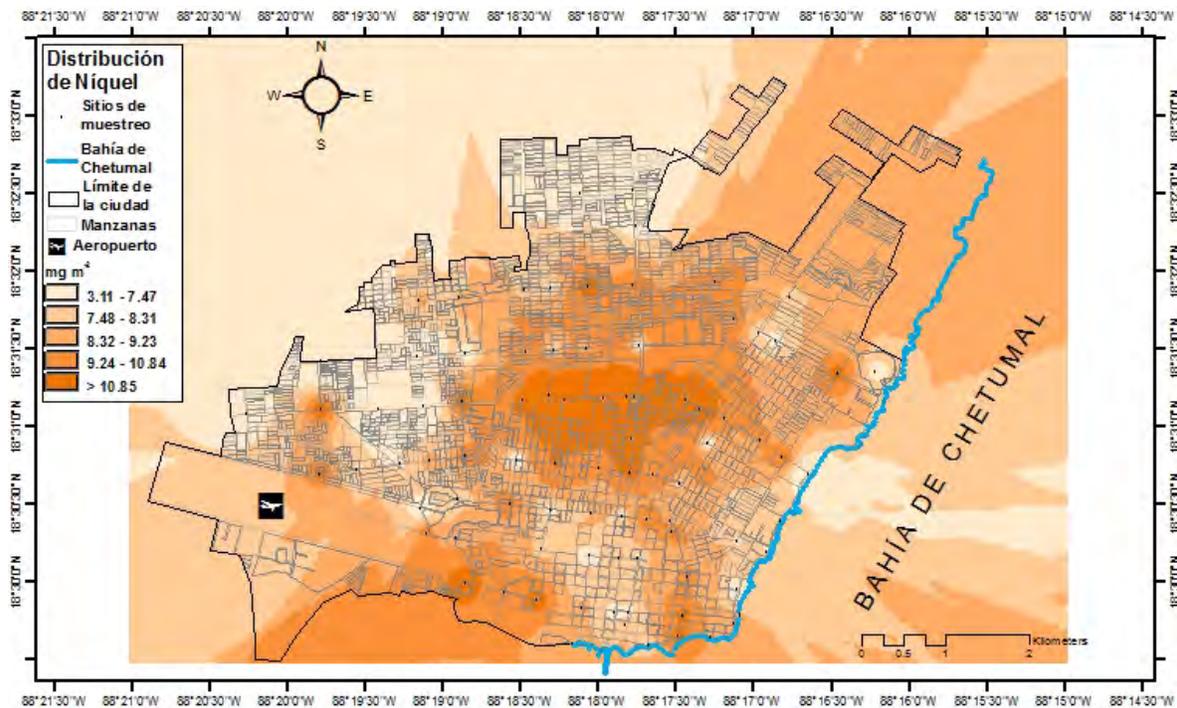


Figura 28. Mapa de miligramos de Níquel por metro cuadrado presentes en la ciudad de Chetumal.

Se reportan hasta $34.23 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ de níquel (figura 28) en el centro del mapa, con algunas zonas con altos niveles al sur; uno más al este y dos al oeste. Igual que los casos de Mn y Fe, se tiene correlación espacial entre la mayor cantidad de Ni y la zona de mayor masa de polvo muestreado.

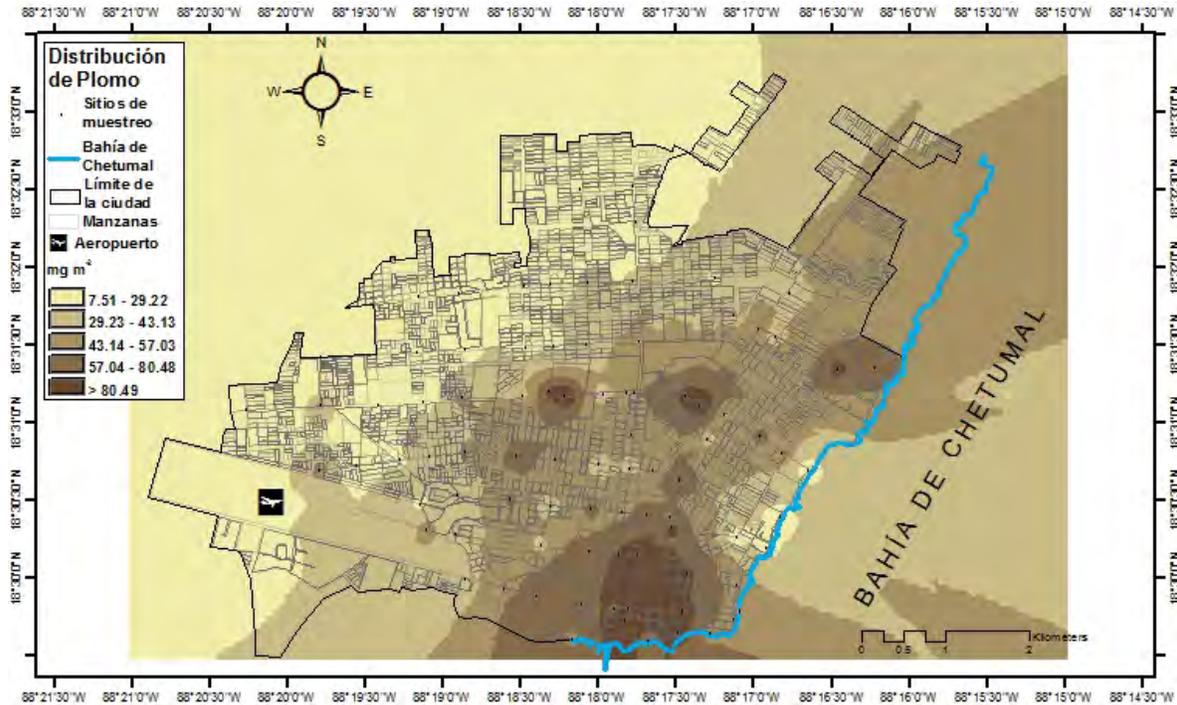


Figura 29. Mapa de miligramos de Plomo por metro cuadrado de presentes en la ciudad de Chetumal.

El particular caso de plomo mostró un comportamiento similar a Cr, que se presentó mayormente al sur, alcanzando los $636.15 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$; a su vez, fueron localizados tres puntos con altas cantidades hacia el centro y al este de la ciudad, en un área entre la Universidad de Quintana Roo y el malecón.

6.2.1.3.5 Factor contaminante de metales

El mapeo probabilístico del factor contaminante muestra los puntos que sobrepasan el máximo de seis. Un valor de seis en la escala propuesta en éste trabajo indica que la presencia del elemento en cuestión como “alta”, por lo tanto deberá ser reaccionarse de forma inmediata, porque se estaría elevando seis veces el contenido encontrado naturalmente en la ciudad.

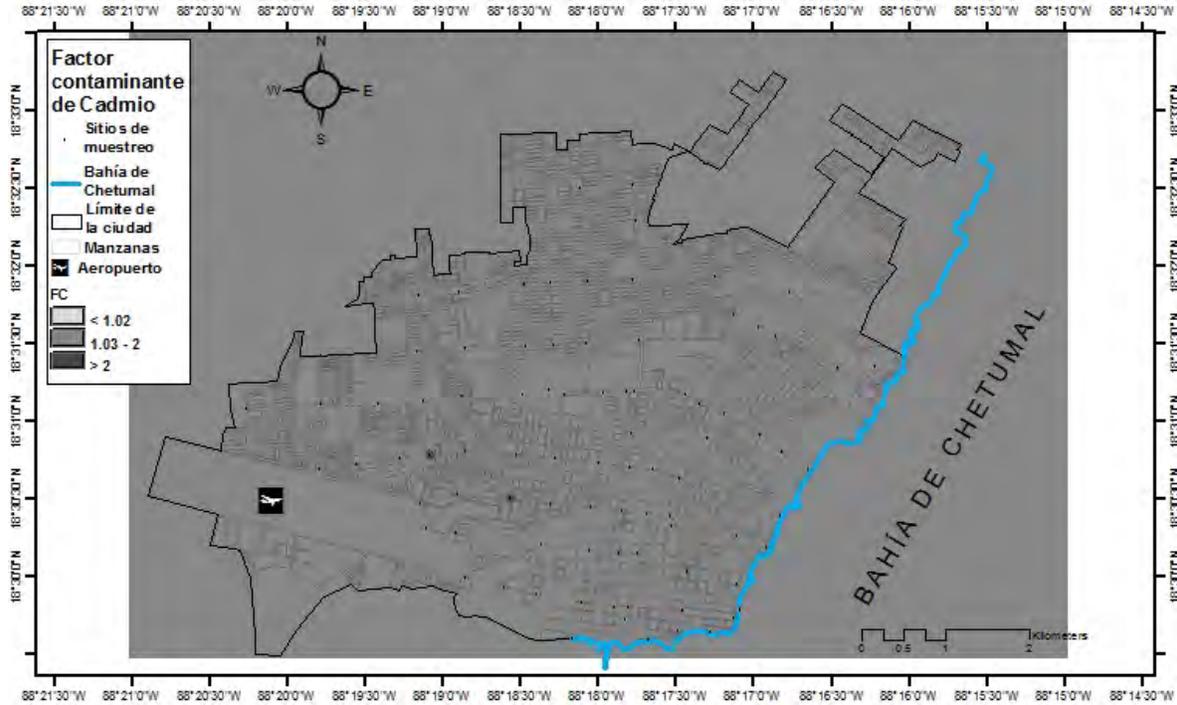


Figura 30. Mapa del factor contaminante de Cadmio en la ciudad de Chetumal.

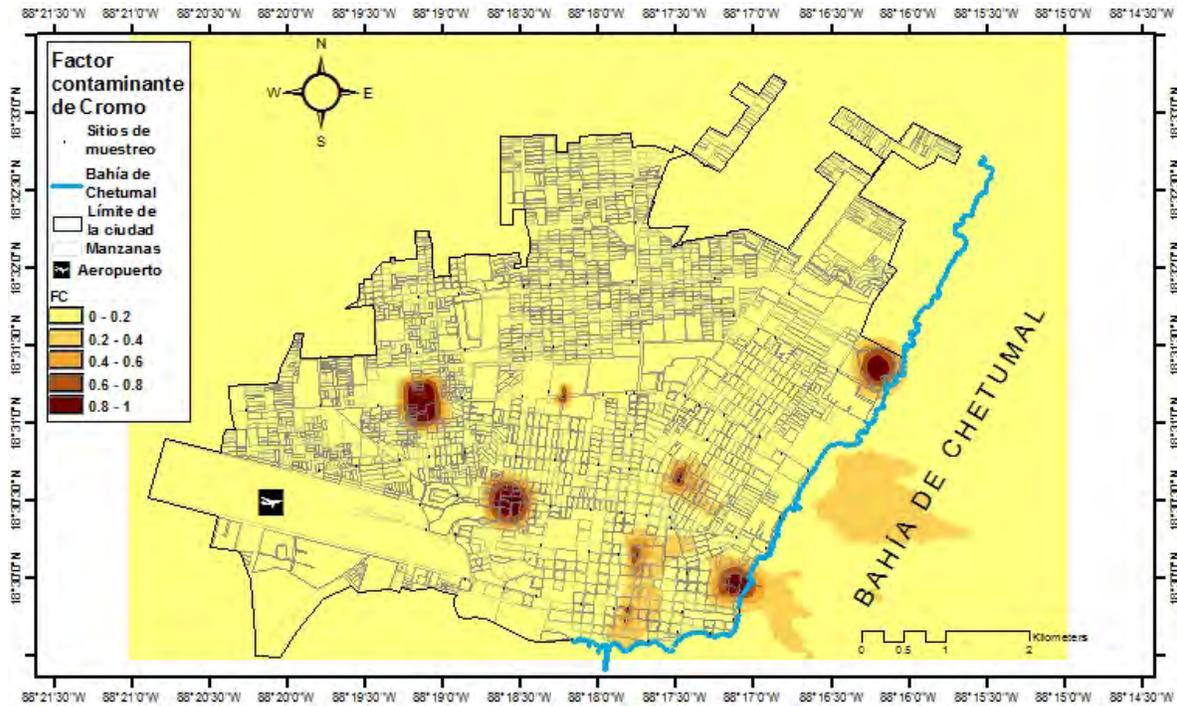


Figura 31. Mapa de zonas que sobrepasan el factor contaminante máximo de Cromo establecido de 6.

Para el caso de cromo (figura 31) se identifican ocho puntos que requieren atención inmediata. Cuatro se encuentran en la zona sureste, uno justo en el malecón y tres sobre la avenida Héroes y Calzada Veracruz. Más hacia el norte por el lado este se encuentra un punto de bastante importancia justo frente a la Universidad de Quintana Roo. En la zona céntrica del mapa, cercanos al zoológico y al ITCH se encuentra un pequeño punto. Los dos puntos faltantes se observan en zona del parque de las Casitas y frente a la plaza de Las Américas.

Las áreas con alto contenido de Cu (figura 32) se encontraron en cuatro avenidas: La avenida Maxuxac, la avenida Eric Paolo, avenida Insurgentes y en una pequeña parte de la avenida Álvaro Obregón. Tales puntos se encuentran contiguos, a excepción de un punto en la intersección entre Maxuxac y la avenida Centenario.

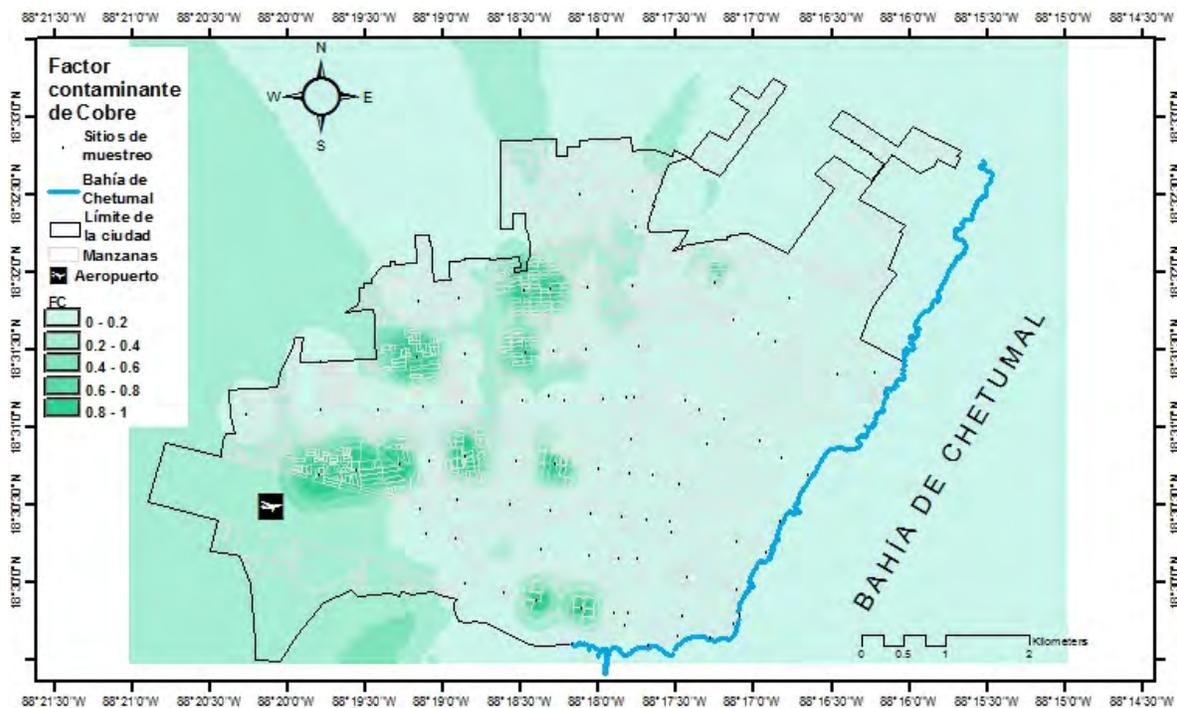


Figura 32. Mapa de zonas que sobrepasan factor contaminante máximo de Cobre establecido de 6.

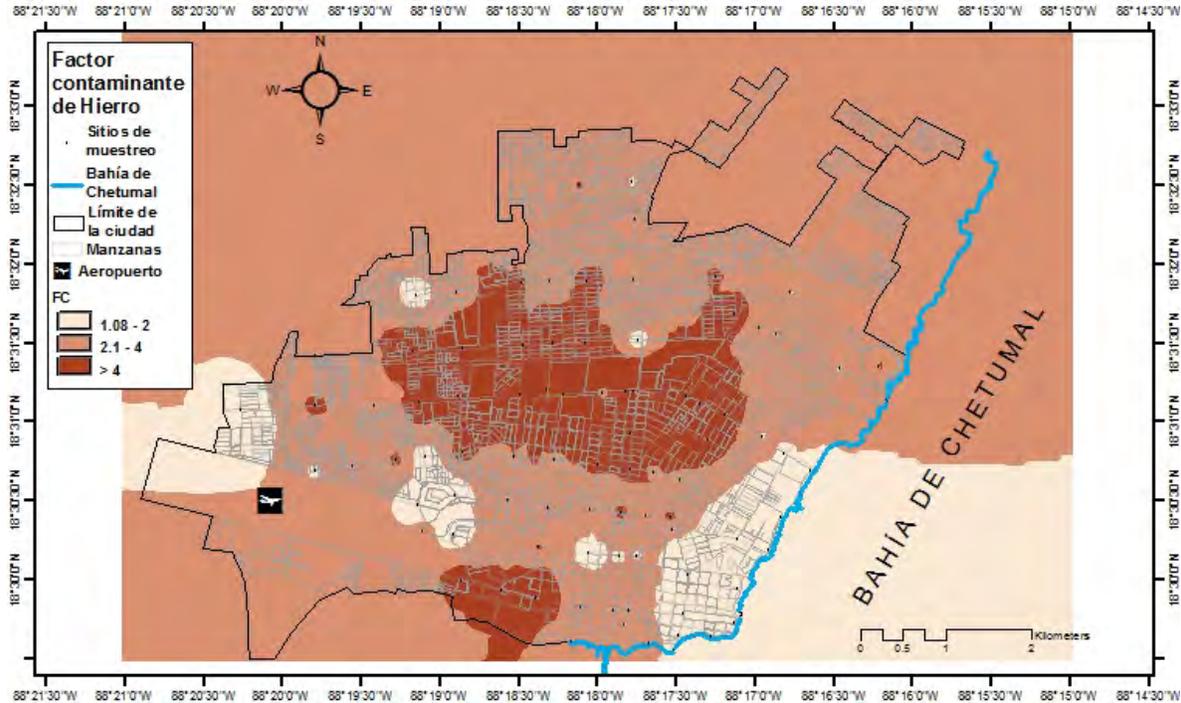


Figura 33. Mapa del factor contaminante de Hierro presente en la ciudad de Chetumal.

El mapa de Fe (figura 33) solamente presentó tres clases. En la ciudad predominaron los niveles muy bajo, bajo y medio; ocupó la mayor superficie el nivel “bajo” y se encontró el nivel “medios” al centro del mapa, cercano a la avenida Insurgentes y al sur, adyacente a la avenida Álvaro Obregón. Las zonas con nivel hierro “muy bajo” se halló aledaño a la Bahía de Chetumal y a la entrada de la ciudad.

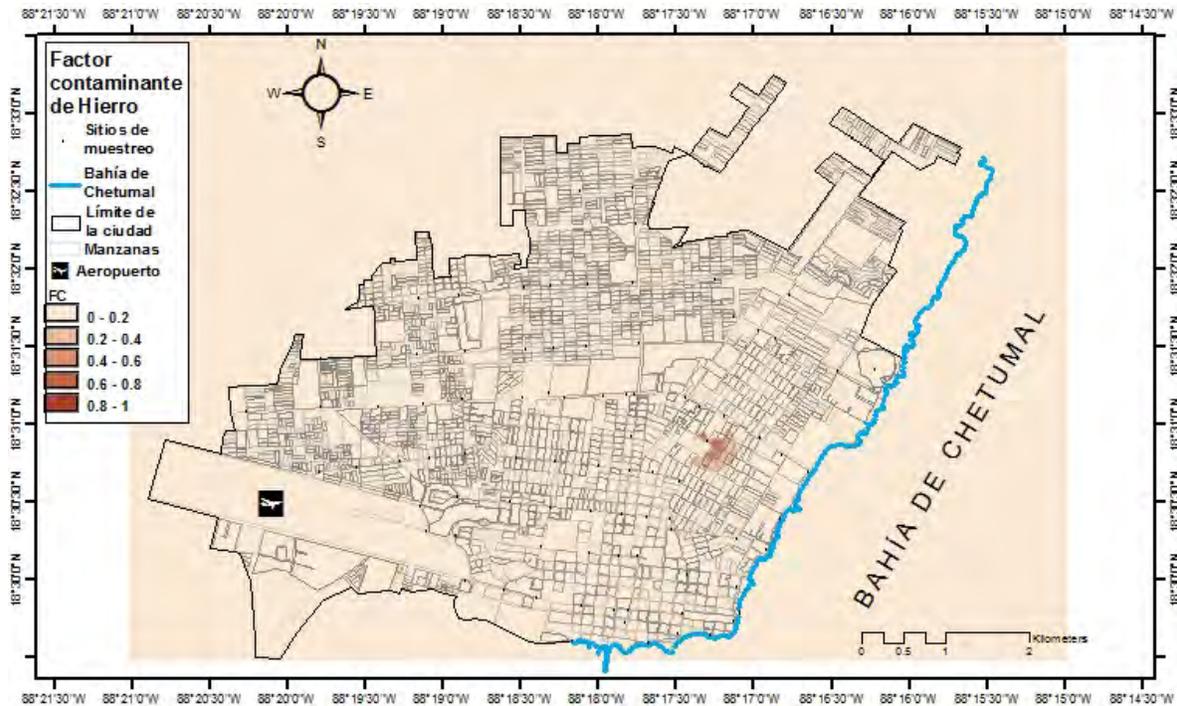


Figura 34. Mapa de zonas que sobrepasan el factor contaminante máximo de Hierro establecido de 6.

También se elaboró el análisis geoestadístico para Fe (figura 34) con interpolación de *Kriging* Indicador, encontrándose niveles que superan FC de seis justo frente al mercado Manuel Altamirano.

La presencia de manganeso (figura 35) explicada por el factor contaminante mostró únicamente dos clases: “baja” y “baja” de las cuales la mitad oeste de la ciudad se encuentra en “muy baja” y el lado este con “muy bajo” contenido de Mn.

En el caso de Ni presente (figura 36) se diferenciaron tres clases: “muy baja”, “baja” y “media” según el factor contaminante. Los niveles medios de contaminación por Ni se encontraron al noreste y al sur de la ciudad. Mientras que a lo largo de la avenida Héroes se encontraron niveles muy bajos de Ni, al igual que hacia la entrada de la ciudad.

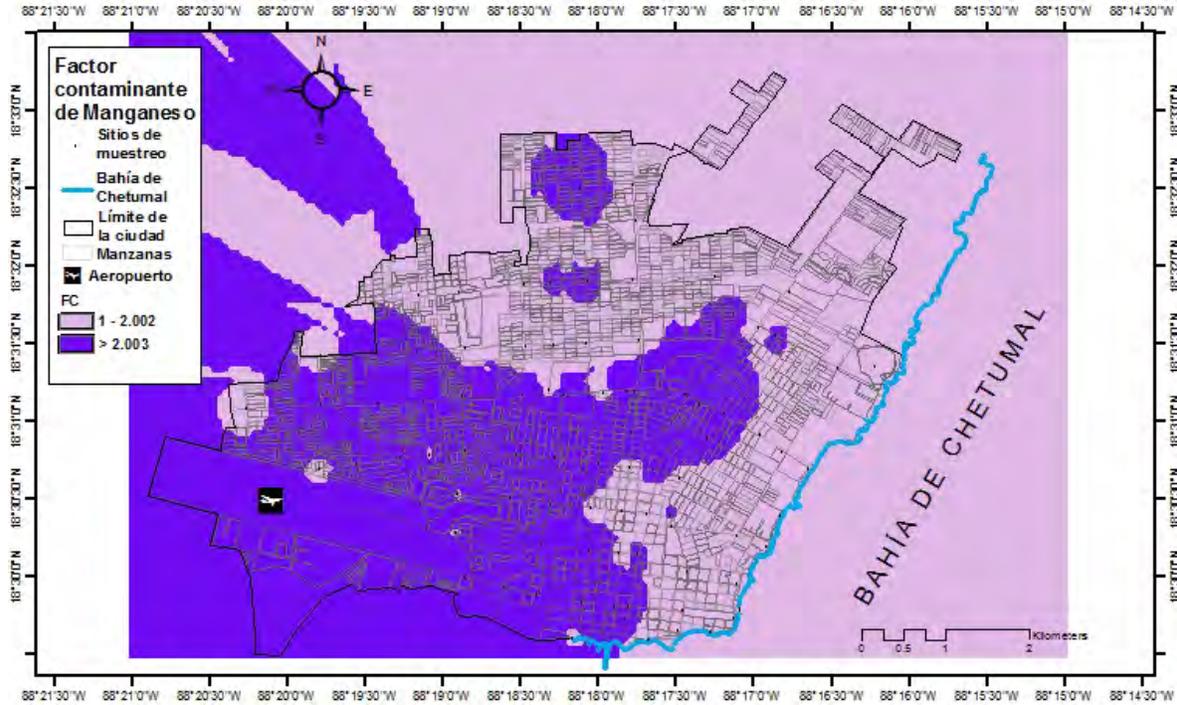


Figura 35. Mapa del factor contaminante de Manganeso presente en la ciudad de Chetumal.

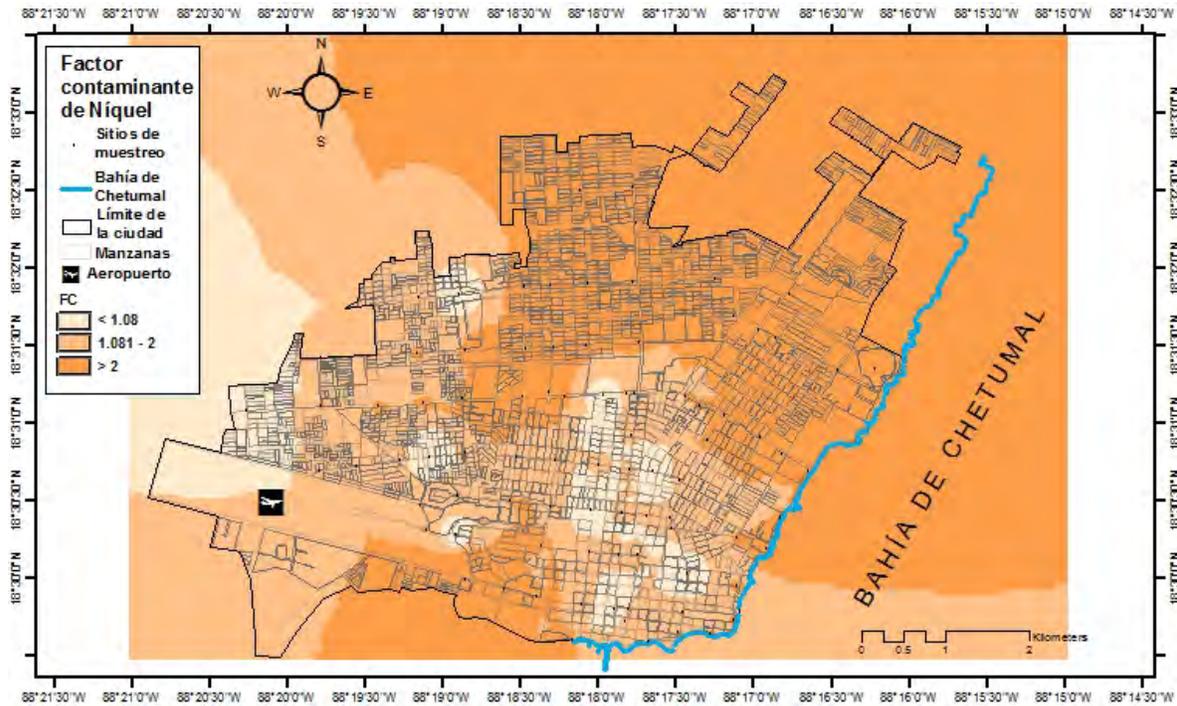


Figura 36. Mapa del factor contaminante de Níquel presente en la ciudad de Chetumal.

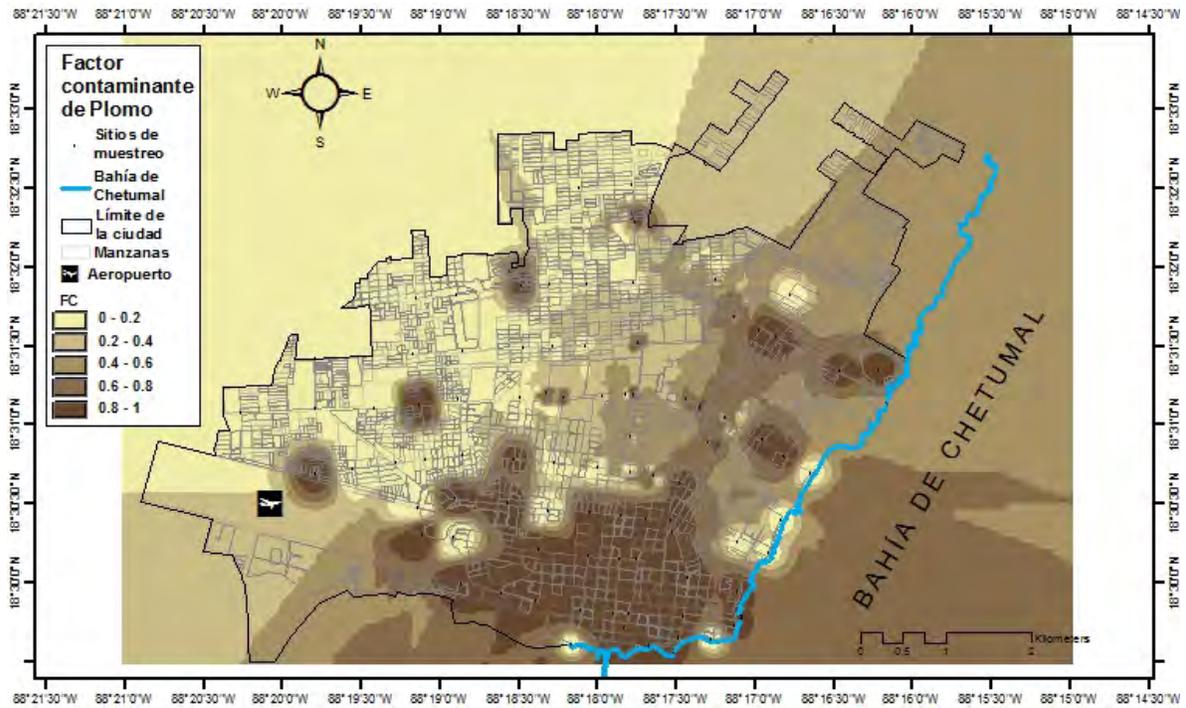


Figura 37. Mapa de zonas que sobrepasan el factor contaminante máximo de Plomo establecido de 6.

Finalmente, para plomo (figura 37) los valores “altos” predominan al sur sureste de la ciudad, en donde se encuentra la zona comercial, así como varias viviendas. También se notan algunos focos rojos hacia el centro y norte de la ciudad. El área menos afectada por contaminación por plomo se observa hacia el noroeste, cerca de la zona con mayor vegetación.

6.2.1.3.6 Índice de carga contaminante

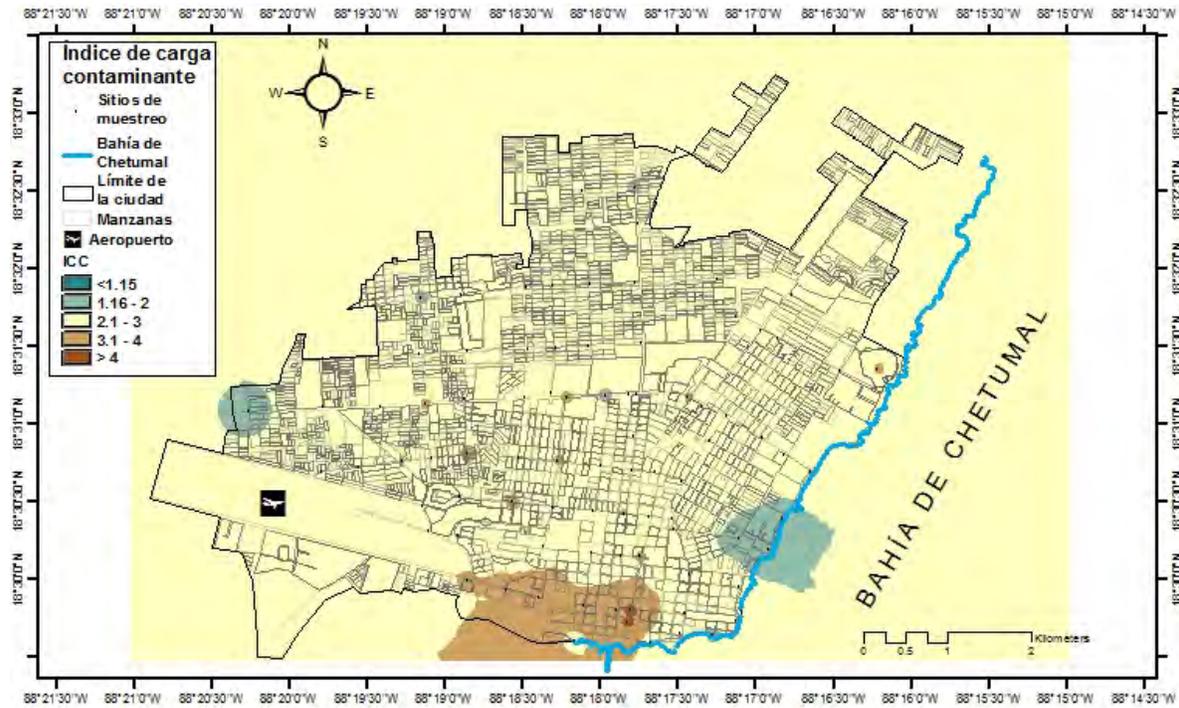


Figura 38. Mapa del índice de carga contaminante en la ciudad de Chetumal.

A partir del cálculo del índice de carga contaminante se originaron dos mapas (figuras 38 y 39) que identifican exactamente las zonas en las que hace falta atención inmediata, debido a la acumulación de altas concentraciones de uno o, incluso, los siete metales observados.

La figura 38 indica que un ICC de dos a tres, equivalente a contaminación baja, predomina en la ciudad. Sin embargo, es hacia el sur de la ciudad, en donde se encuentra el palacio de gobierno, el malecón, y parte de la avenida Héroes de la zona centro, en donde se observa una superficie con valores tres y cuatro; al igual que se observan algunos puntos dispersos en el centro del mapa.

Los valores tres y cuatro apuntan a contaminación baja, aunque hacia el sur se logran observar algunos puntos con un ICC superior a cuatro, es decir, de contaminación media. También pueden verse en el mapa probabilístico (figura 39) donde se señala la zona que sobrepasa el umbral establecido para ICC de seis.

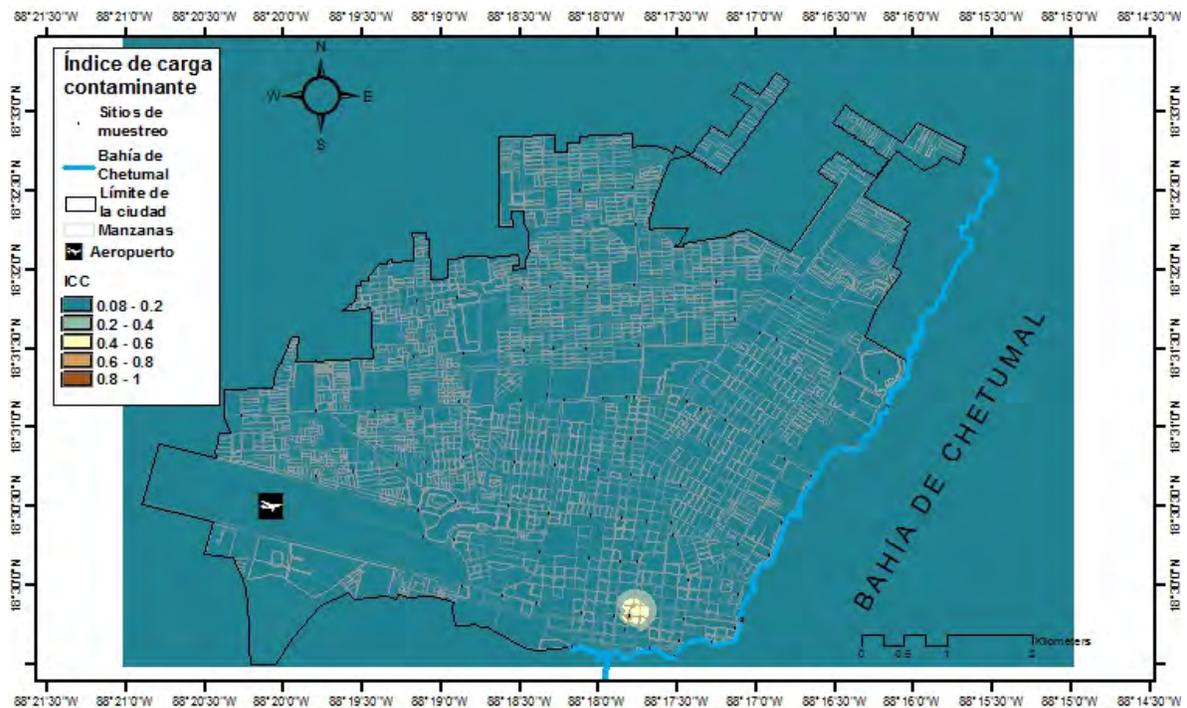


Figura 39. Mapa de zonas que sobrepasan el índice de carga contaminante máximo establecido de 6.

7. DISCUSIÓN

El estudio de contaminantes a menudo presenta distribución de datos de manera no normal, es decir, con la distribución gaussiana, debido a que la contaminación se encuentra asociada a actividades antropogénicas, como el tránsito vehicular o asociación de usos de los suelos urbanos (Wei y Yang, 2010).

7.1.1.1 El acumulamiento de polvos

El polvo urbano, además de contener metales pesados causales de cáncer puede contener otros elementos diferentes a los metales pesados, así como partículas biológicas, orgánicas e inorgánicas con alto poder tóxico.

En la ciudad de Chetumal el análisis espacial con los mapas geoestadísticos se infiere que en la zona de mayor cantidad de polvo se encontró mayor cantidad de metales pesados (Figura 22 – 29). Se sabe que algunas fuentes de polvo urbano proviene del desgaste de las balatas de frenado que contiene Aluminio (Al), Silicio (Si), Azufre (S), Titanio (Ti), Hierro (Fe), Cobre (Cu) y Antimonio (Sb); aunque algunas veces se han encontrado muestras con sulfato de Bario ($BaSO_4O$) y circonio (Zr) (Adashi y Taniosho, 2004). También las llantas dejan residuos de hidrocarburos que podrían contener compuestos aromáticos poli-cíclicos y óxido de zinc (Fauser *et al.*, 1999; Castro, 2008; Wei y Yang, 2010).

7.2.1.2 La evaluación de contaminación por medio de referencias

Para éste estudio se tomó en cuenta la legislación de países como EEUU, México, Holanda y Canadá para comparar los límites permisibles con lo encontrado en la ciudad.

Cuando se compararon los límites establecidos por la Agencia de Norteamericana de Protección al Ambiente (USEPA) con las concentraciones encontradas en el polvo de la ciudad de Chetumal, se observó que sus límites se encuentran por encima de los valores encontrados en la ciudad. Los niveles de contaminantes que permite la USEPA son: 75; 230; 1600 y 400 $mg \cdot kg^{-1}$ para Cd, Cr, Ni y Pb respectivamente, pues EEUU es un país industrializado a la vanguardia cuya

economía depende entre otras cosas de la tecnología que fabrica y vende, por lo tanto necesita cierta tolerancia en la legislación que le permita a sus industrias poder manejar ciertos elementos químicos contaminantes. Mientras Holanda, como país primermundista de la unión europea, posee la legislación más exigente de las revisadas que se enfoca en la conservación de los recursos naturales y la protección de la salud de su población (Haag, 2013). Tales límites de metales pesados en suelos son 0.76; 3.8; 3.6; 2.6 y 55 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ para Cd, Cr, Cu, Ni y Pb respectivamente; por lo cual los contenidos de metales pesados encontrados en los polvos urbanos de Chetumal estarían muy por arriba de los que permite la norma holandesa.

En el caso de México, la Secretaría de Medioambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) propone límites para la regulación de metales, sin embargo, dichos límites se basan principalmente en lo establecido por la USEPA y por lo tanto son demasiado altos.

Los niveles propuestos por el Consejo Canadiense de Ministros del Medio Ambiente (CCME) son intermedios a los establecidos por EEUU, México y Holanda, consecuentemente fueron los utilizados para evaluar a Chetumal. El CCME propone niveles para Cd, Cr, Cu, Ni y Pb, que son 10; 64; 63; 50 y 140 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectivamente. Ya que las concentraciones promedio encontradas en Chetumal para Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni y Pb fueron 3.76; 65.1; 96.03; 11,758.1; 114.67; 37.15 y 257.36 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectivamente, se deduce que Chetumal se encuentra por encima los límites permitidos en Cr, Cu y Pb basado en la norma canadiense.

La ciudad de Chetumal no es una ciudad industrializada y su crecimiento demográfico es rápido y constante, por lo cual es importante que la norma a utilizar para evaluar la ciudad sea tolerante pero enfocada a la conservación de los recursos naturales y la salud pública como lo son las normas holandesa y canadiense.

Ya que el polvo urbano se origina por la intemperización de edificaciones y de roca del suelo (Brookman y Drehmel, 1984), es normal tener ciertos metales presentes en la ciudad. Se sabe que en otros suelos cársticos es normal encontrar Cr, Cu, Cd, Pb y Mn en cierta proporción (Munteanu *et al.*, 2012), por esto para Chetumal se optó por usar el factor contaminante (FC) como índice para evaluar los puntos de muestreo.

Se observó que los promedios de FC encontrados en Chetumal fueron 1; 4; 3; 2; 1; 2 y 7 para Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni y Pb respectivamente. El resultado de FC indica que Chetumal no está contaminada con Cd; es bajo para Cr y Cu; muy bajo para Fe; nulo para Mn; muy bajo para Ni y alto para Pb. Hay que recordar que el nivel de FC que se establece como de atención inmediata es seis o nivel de contaminación alto. Es Pb el elemento que requiere atención inmediata para el caso de FC.

La diferencia entre el uso del valor mínimo como referencia y no los límites permisibles radica en que el valor mínimo representa a la cantidad normal local, y por ejemplo, no se puede comparar el valor mínimo de Chetumal con el valor mínimo de ciudades con industria minera o metalúrgica para deducir que no se encuentra contaminada, porque son circunstancias completamente diferentes, por lo tanto tiene mayor peso la utilización de FC para la evaluación de contaminación.

La media del Índice de carga contaminante (ICC) fue de 2.67, lo que sugiere que Chetumal tiene un nivel de carga contaminante bajo. Mientras que para éste caso, el umbral que indicaría atención inmediata sería seis, o carga alta.

Después de hacer una revisión bibliográfica no se encontraron informes de mediciones expresadas en $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$, sin embargo la utilidad del uso de éste parámetro está en demostrar la cantidad real de metales encontrada en cada punto muestreado. Mediante el uso del parámetro mencionado se facilita el decir exactamente a qué cantidad de contaminante está expuesta la población, además

dichas cantidades pueden ser comparadas con sus dosis letales medias (L.D. 50) en humanos y así determinarse el riesgo de muerte.

7.3 Las posibles causas de contaminación

El elemento más encontrado en la ciudad fue Fe, con una media de 11,758.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, encontrando la concentración más elevada en el cruce de la avenida Calzada Veracruz y la calle Cámara nacional de comercio, a un costado de una central de abastos conocida como “el mercado nuevo”, con una concentración de 27,750 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Habiéndose clasificado como vía primaria y existiendo correlación entre los valores de Fe y los tipos de vía, se infiere que la concentración está directamente relacionada con el tráfico de la zona; se ha encontrado que el elemento más abundante en algunas ciudades es Fe, éste se origina principalmente por el desgaste de balatas, la corrosión de los chasis y escape automotriz (Adachi y Taniosho, 2004). Además, algunas arcillas, al poseer cargas negativas pueden absorber cationes (Porta *et al.*, 2003) como lo son los metales, y ya que en ésta central de abastos se comercian productos de origen rural traídos de las comunidades suburbanas, los transportes arrastran porciones de suelo en las llantas y carrocerías residuos de suelos, que en su mayoría son Luvisoles y Vertisoles, enriqueciendo el polvo urbano con dichas arcillas incrementando los niveles de Fe. Por lo tanto se sugiere que la razón por el elevado contenido de dicho elemento tiene que ver con la gran cantidad de vehículos que entran y salen de la zona. Cabe destacar que el mercado también cumple con la función de terminal de autobuses provenientes del vecino país de Belice.

La muestra más elevada de Pb se encontró en el punto 23 que se encuentra en el cruce de la avenida Héroes y la avenida Álvaro Obregón, con una cantidad de 3395.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, del mismo modo la mayor concentración de Cr se halló en esa misma ubicación con 728.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Al revisar las correlaciones entre metales se encontró que Cr y Pb tienen una conexión en los tres grupos medidos ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ y FC), demostraron que existe una correlación entre Cr y Pb, tal relación está asociada al contenido de cromato de plomo II (PbCrO_4) que se encontró en la pintura amarilla para señalización en vialidades (Adashi y Taniosho, 2004). Además se considera al PbCrO_4 contenido en las pinturas amarillas como el principal aportador de Pb en las ciudades. Otros elementos que puede contener la pintura amarilla son: magnesio, aluminio, silicio, azufre y calcio.

Los neumáticos están compuestos por hidrocarburos, y dentro de los elementos que se le agregan para mejorar algunas propiedades se encuentra el Zn, Mn, S, Fe, Cl, Ni, Cr, Cd, Pb, Si y Ta; aunque su presencia y cantidades varían por el lugar de fabricación (Castro, 2008), esto pudiera explicar otra correlación común entre los tres grupos: Fe – Ni, al igual que explica porqué se encontraron de 23 a $28 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de Ni en aproximadamente el 90% de la superficie muestreada, recordando que la media de Ni ronda los $37 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

En algunos estudios (Davis *et al.*, 2001 dentro de Adachi y Taniosho, 2004) se menciona que el polvo originado por el desgaste de las balatas contribuye con el 47% de la carga contaminante urbana total de Cu, Puede ser la razón de los contenidos inusualmente elevados de Cu en Chetumal.

Estudios en suelos cársticos de Rumania han encontrado que es normal encontrar una concentración de 0 a $2.48 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de Cd (Munteanu *et al.*, 2012), pareciéndose a las concentraciones encontradas en la ciudad que mantuvieron en un promedio de $3.76 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. De hecho, el mapa de FC de cadmio indica que en un 99% de la superficie se mantiene un índice de uno a dos, indicando una distribución baja homogénea de Cd en la ciudad. Probablemente se trate de la cantidad normal de Cd de la ciudad. Sin embargo, Morales-García y cols. (2014) mencionan que la presencia de Cd puede estar explicada por la incineración de residuos sólidos municipales locales, por lo que puede explicarse la variación de las concentraciones a lo largo y ancho de la ciudad.

Finalmente para Mn, que no se encuentra sobrepasando ningún límite, se encontró tras la revisión bibliográfica que su presencia puede originarse debido a que es usado mayormente en aditivos vehiculares para optimizar el rendimiento (Pellizzari et al., 1999)

7.4 La conexión entre vialidades y la contaminación

Cuando se intentó encontrar una relación entre vialidades y los metales hallados se observó diferenciación para el caso de Cu en el grupo de $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$; Fe tanto en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ como en FC; y en ICC. La razón más probable de éstas correlaciones quizá se deba al volumen vehicular y la cantidad de veces que se utiliza el freno, para el caso de Cu, por los residuos que dejan las balatas (Davis *et al.*, 2001 dentro de Adachi y Taniosho, 2004); para Fe en ambos grupos el desgaste de los neumáticos, chasis y emisiones del escape (Adachi y Taniosho, 2004); y finalmente el ICC es un conjunto de todos los metales, por lo que, si es notorio en algún grupo, se verá reflejado en éste índice. Se puede destacar que, para estos casos, únicamente se vieron diferenciados dos tipos de vías: primarias y secundarias.

7.5.1.3 La influencia de los polvos en la periferia

Observando los mapas de distintos metales se perciben polígonos que extrapolan los metales encontrados dentro de la ciudad, es decir, indicando afectación hacia la zona rural al norte y oeste de la ciudad; y a la Bahía de Chetumal al sur y este.

Es suma importancia ésta información pues en la zona rural que limita a la ciudad es la única ruta de crecimiento de ésta, y ya que el suelo tiende a funcionar como búfer cuando se trata de elementos metálicos (Porta *et al.*, 2003) puede representar un riesgo a la salud para la futura expansión de la ciudad. También existen algunos lugares que cultivan alimentos del campo para autoconsumo y la ingesta es una de las principales vías de exposición (Ferreira-Baptista *et al.*, 2005; Muchuweti *et al.*, 2006 y Douay *et al.*, 2013).

Además, la zona de humedales que ahí se encuentra tiende a funcionar como un reservorio para algunos metales (Pereda-Solís y Martínez-Guerrero, 2012), volviéndose un potencial lugar de exposición.

Asimismo en éste estudio, por primera vez, se observa una causa diferente para la contaminación por metales pesados en la Bahía de la capital, sobre todo para los casos de Cr, Cu, Fe y Pb, debido a valores atípicamente elevados cercanos a la costa. En algunos casos se ha mencionado el aporte de metales a través de la corriente del río Hondo (Díaz *et al.*,2006 y Deveze, 2011), pero la ciudad podría representar otro aporte significativo a las cargas de metales encontradas en la Bahía de Chetumal.

8. CONCLUSIONES

8.1.1.2.1 Con base en la comparación entre promedios de concentraciones de metal por kilogramo de polvo en la ciudad de Chetumal, y los límites permisibles de la norma canadiense, se demostró que los elementos que rebasan los límites permitidos son Cr, Cu y Pb.

8.1.1.2.2 El factor contaminante indica que el Pb sobrepasa el nivel alto de contaminación.

8.1.1.2.3 El índice de carga contaminante indica que la ciudad de Chetumal tiene niveles de contaminación bajos, aunque existen puntos a lo largo de la avenida Álvaro Obregón que exigen atención inmediata por presentar alta carga contaminante.

8.2.1.3.1 El centro de la ciudad de Chetumal presenta la mayor cantidad de polvo, metales pesados y, por lo tanto, es la zona más contaminada.

8.2.1.3.2 Comparando entre tipo de vialidad, las primarias presentan mayor contaminación por Cu en $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$; Fe en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Fe en factor contaminante; y el índice de carga contaminante que las vialidades secundarias

9. RECOMENDACIONES

Para monitorear las concentraciones de metales en la ciudad de Chetumal se sugiere el uso de indicadores *proxy* como las técnicas magnéticas en polvo urbano, y en hojas de plantas con savia adhesiva como la de *Ficus benjamina*.

Basado en los resultados de éste trabajo demostrado en los mapas geoestadísticos, se propone realizar estudios de dinámica del polvo desde sitios contaminados hacia la Bahía y la zona rural que rodea la ciudad para comprobar el aporte de metales originados dentro de las vialidades de la ciudad.

Debido a los pocos estudios realizados en la ciudad de Chetumal sobre tipos de cáncer se sugiere llevar a cabo investigaciones con el objetivo de contabilizar y clasificar los casos de cáncer y la ubicación de los pacientes. Contando con dicho estudio pudieran compararse las locaciones con los principales focos de contaminación encontrados que pudieran ser los principales sitios de exposición.

Deberá tener mayor importancia la verificación vehicular en la ciudad de Chetumal para poder controlar de cierta manera los niveles de metales producidos durante la combustión y emisión de gases liberados al ambiente.

Es importante determinar las causas de los altos niveles de metales para explorar alternativas que reduzcan el riesgo a la salud pública y así poder mitigar el daño emitido al ambiente.

10. LITERATURA CITADA

- Aguilar-Reyes, B., Bautista, F., Rosas-Elguera, J., Gogichaishvilli, A., Cejudo, R. Y Morales, J. (2011). Evaluación de la contaminación ambiental por métodos magnéticos en las ciudades de Morelia y Guadalajara México. *Latinmag Letters*, 1(22), 1-6.
- Aguilar-Reyes, B.; Cejudo, R.; Martínez-Cruz, J.; Bautista, F.; Gogitchaichvilli, A.; Carvallo, C. y Morales, J. (2012). *Ficus benjamina* leaves as indicator of atmospheric pollution: a reconnaissance study. *Stud. Geophys. Geod.*, 56, 879-887.
- Appenroth, K. (2010) "Definition of heavy metals and their role in Biological systems", *Soil Biology: Soil Heavy Metals*, 19, 19-29.
- Ballester, F.; Tenias, J. y Pérez-Hoyos, S. (1999). Efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud: una introducción. *Rev. Esp. Salud Publica*, 73: 109-121.
- Biblioteca de ayuda de ArcGis. [Visto el 6 de mayo de 2014]. Disponible en: http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/Welcome_to_the_ArcGIS_Help_Library/00qn0000001p000000/.
- Brookman, E. y Drehmel, D. (1984) Future areas of investigation regarding the problem of urban road dust. *Environ Int.* 6, 313–20.
- Castro, G. (2008). "Materiales y compuestos para la industria del neumático" [Visto el 6 mayo de 2014] Disponible en: http://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material_Complementario/Materiales_y_Compuestos_para_la_Industria_del_Numatico.pdf.
- CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment), Canadian Environmental Quality Guidelines. Actualizado Julio 2 de 2013. [visto el 5 de octubre de 2013] Disponible en: <http://ceqg-rcqe.ccme.ca/>
- Consejería del medio ambiente de la junta de Andalucía. (1999) "Los criterios y estándares para declarar un suelo contaminado en Andalucía y la metodología y técnicas de toma de muestra y análisis para su investigación" Andalucía, España.
- Crommentuijn T.; Polde M. y Van de Plasshe E. (1997) "National Institute of public health and environment Bithoven, the Netherlands.
- Davis, P.; Shokouhian, M.; Ni, S. (2001). Loading estimates of lead, copper, cadmi- um, and zinc in urban runoff from specific sources. *Chemosphere*. 44: 997 – 1009.
- Delgado, C., Pacheco, J., Cabrera, A., Battlori, E., Orellana, R. y Bautista, F. (2010). Quality of groundwater for irrigation in tropical karst environment: The case of Yucatán, Mexico. *Agricultural Water Management*, 97, 1423-1433.
- Departamento de Servicios Ambientales (DES) de New Hampshire (2013). *Environmental Fact Sheet. Copper: health information summary*. [Visto 13 marzo de 2014]. Disponible en: <http://des.nh.gov/organization/commissioner/pip/factsheets/ard/documents/ard-ehp-9.pdf>
- DESCRIPCIÓN FÍSICA. Riqueza biológica de Quintana Roo, un análisis para su conservación. Pozo, C.; Armijo Canto, N. y Calmé, S. (editores). 1ra ed. (2011). P. 28.
- Deveze, R. (2011). Determinación de metales pesados (Cu, Hg, Cd, Cr, Zn) en Jaiba Azul (*Callinectes sapidus*) en la Bahía de Chetumal, Quintana Roo. Tesis de licenciatura. Universidad de Quintana Roo.
- Díaz-López, C.; Carrión-Jiménez, J.M.y González-Bucio, J.L (2006) Estudio de la contaminación de Hg, Pb, Cd y Zn en la bahía de Chetumal, Quintana Roo, México
- Donaldson, K.; Stone, V.; Seaton, A. Y MacNee, W. (2001) Ambient Particle Inhalation and the Cardiovascular System: Potential Mechanisms. *Environmental Healt Perspectives*, 109(Suppl. 4) 523-527.
- Douay, F.; Pelfrêne, A.; Planque, J.; Fourrier, H.; Richard, A.; Roussel, H. y Girondelot, B. (2013). *Environ. Monit. Asses.* 185: 3665-3680

- El Universal, Contaminación del aire exterior causa cáncer según la OMS. [Visto el 17 de octubre de 2013]. <http://www.eluniversal.com.mx/sociedad/2013/cancer-oms-958863.html>.
- Fauser, P.; Tjell J.; Mosbaek H. y Pilegaard K. (1999). Quantification of tire-tread particles using extractable organic zinc as tracer. *Rubber Chem Technol.* 72: 969 – 77.
- Ferreira-Baptista, L. (2005). Evaluación geoquímica de las propiedades del material particulado (polvo, suelos y sedimentos) de la ciudad de Luanda (Angola) y su entorno: implicaciones ambientales. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- Fubini, B. y Otero-Areán, C. (1999). Chemical aspects of the toxicity of inhaled mineral dusts. *Chem. Soc. Rev.* 28: 373-381.
- Gjoka, F.; Felix-Henningsen, P.; Wegener, H.; Salillari, I.; y Beqiraj, A. (2011) "Heavy metals in soils of Tirana (Albania)", *Environ. Monit. Assess.*, 172, 517-527.
- Gobierno de Nuevo Leon. Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA), [en línea]. [visto: 25 abril de 2013]. Disponible en: http://www.nl.gob.mx/?P=med_amb_mej_amb_sima
- GS+ (Gamma Design Software), (2006). *Geostatistics for environmental sciences. GS+ Users guide. Version 7.* Plainwell, MI, USA.
- Haag, D. (2013) 'The Caribbean Netherlands in context (cap B)', *Nature Policy Plan The Caribbean Netherlands 2013-2017.* COLOPHON.
- Huerta, E.; Brown, G.; Bautista, F. (2011) 'Macroinvertebrados del suelo y lombrices de tierra: Análisis de datos (cap 15)'. Bautista, F.; Palacio, J.; y Delfín H. (eds) *Técnicas de Muestreo para Manejadores de Recursos Naturales.* Morelia, UNAM.
- INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático), Metales pesados. [Visto el 12 de enero de 2014]. <http://www.inecc.gob.mx/sqre-temas/763-aqre-metales>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010). Población total de la ciudad de Chetumal, Quintana Roo. Censo de Población y Vivienda.
- Kirpichtchikova, T.; Manceau, A.; Spadini, L.; Panfili, F.; Marcus, M. y Jacquet, T. (2006). Speciation and solubility of heavy metals in contaminated soil using X-ray microfluorescence, EXAFS spectroscopy, chemical extraction and thermodynamic modeling, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70, 2163-2190.
- Laidlaw, M. y Fillippelli, G. (2008). Resuspension of urban soils as a persistent source of lead poisoning in children: a review and new directions. *Applied Geochemistry*, 23(8), 2021-2039.
- Levin, N.; Ben-Dor, E. Y Singer, A. (2006). A digital camera as a tool to measure color índices and related properties of sandy soils in semi-arid environments. *International Journal of Remote Sensing*, 24(26), 5475-5492.
- Lu, S.; Bai, Q. y Xue, F. (2007). Magnetic properties as indicators of heavy metals pollutions in topsoils: a case study from the city of Luoyang, China. *Geophys. J. Int.* 171, 568-580.
- Maricq, M., Podsiadlik, D. y Chase, R. (1999). Examination of the Size-Resolved and Transient Nature of Motor Vehicle Particle Emissions, *Environ. Sci. Technol.*, 33, 1618-1626.
- Matzka, J. y Maher, B. (1999). Magnetic biomonitoring of roadside tree leaves: identification of spatial and temporal variations in vehicle-derived particulates. *Atmospheric Environment*, 33, 4565-4569.
- McClintock, N. (2012) Assessing soil lead contamination at multiple scales in Oakland, California: Implications for urban agricultura and environmental justice. *Applied Geography*, 35, 460-473.

- Mielke, H.; Anderson, J.; Berry, K.; Mielke, P.; Chaney, R. y Leech, M. (1983). Lead concentrations in inner-city soils as a factor in the child lead problem. *American Journal of Public Health*, 73(12), 1366-1369.
- Mielke, H. y Reagan, P. (1998). Soil is an important pathway of human lead exposure. *Environmental Health Perspectives*, 106(Suppl. 1), 217-229.
- Mielke, H.; Gonzales, C.; Powell, E.; Jartun, M. y Mielke, P. (2007). Nonlinear association between soil lead and blood lead of children in metro-politan New Orleans, Louisiana: 2000-2005. *Science of the Total Environment*, 388, 43-53.
- Ministerio de Agricultura, alimentación y medio ambiente, España. [Visto el 20 de marzo de 2014] <http://www.boe.es/boe/dias/2005/01/18/pdfs/A01833-01843.pdf>
- Ministry of Environment. Soil guideline values, New Zealand. Actualizado, 9 junio 2009. [Visto el 20 de marzo de 2014]. Disponible en: <http://www.mfe.govt.nz/publications/rma/proposed-nes-managing-contaminants-in-soil/page8.html>
- Morales-García, S.; Rodríguez-Espinoza, P.; Jonathan, M.; Navarrete-López, M.; Herrera-García, M. y Muñoz-Sevilla, N. (2014). Characterization of As, and trace metals embedded in PM 10 particles in Puebla city, México. *Environ. Monit. Assess.* 186: 55-67.
- Muchuweti, M.; Birkett, j.; Chinyanga, E.; Zvauya, R.; Schrimshaw, M. y Lester, J. (2006). *Agriculture, ecosystems and environment.* 112: 41-48.
- Munteanu, C.; Giurginca, A.; Giurginca, M.; Panaiotu, C. y Niculescu, G. (2012). *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences.* 7: 193-204.
- Ong, M., Menier, D., Shazili, N. y Kamaruzzaman, B. (2013). Geochemical characteristics of heavy metals concentrations in sediments of Quiberon bay waters, South Brittany, France. *Oriental Journal of Chemistry*, 29, 39-45.
- Ordóñez, G. (2000). Salud ambiental: conceptos y actividades, *Rev. Panam. Salud Pública/Pan. Am. J. Public Health*, 7(3), 137-143.
- Pellizzari, E.; Clayton, C.; Rodes, C.; Mason, R.; Piper, L; Fort, B.; Pfeifer, G. y Lynam, D. (1999). Particulate matter and manganese exposures in Toronto, Canada. *Atmospheric Environment*, 33, 721-734.
- Pereda-Solís, M. y Martínez-Guerrero, J. (2012). Evaluación de los niveles hepáticos de metales pesados y metaloides en aves acuáticas de un humedal irrigado con aguas residuales en la ciudad de Durango, México. *Memorias del 5to congreso de la asociación mesoamericana de ecotoxicología y química ambiental.*
- Perkin-Elmer (2009). *AAAnalyst 700 Atomic Absorption Spectrometer*, PerkinElmer Inc., [Visto el 27 de febrero de 2014]. Disponible en <http://www.instrument.com.cn/show/literature/c126374.pdf>
- Porta, J.; López-Acevedo, M. Y Roquero, C. *Minerales del suelo, Componentes inorgánicos del suelo*, de "Edafología para la agricultura y el medio ambiente" (2003). Editorial Mundi-Prensa, 3ra edición. Madrid, Barcelona y México.
- SEMARNAT. Norma Oficial Mexicana 004. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Actualizado en 2002.
- Siegel, R.; Ward, E.; Brawley, O. y Jemal, A. (2011). The impact of eliminating socioeconomic and racial disparities on premature cancer deaths. *CA. A Cancer Journal for Clinicians*, 61, 212-236.
- Siegel, R., Naishadham, D. y Jemal, A. (2012). *Cancer statistics, 2012.* CA: A Cancer Journal For Clinicians, 62, 10-29.
- StatPoint Technologies Inc. (2009). *Statgraphics Centurion XV User manual.* [Visto el 15 de febrero de 2014]. Disponible en: <http://www.statgraphics.com/main.pdf>

- SUELOS. Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales. Bautista, F. (editor). 2da ed. (2011). P. 227.
- USEPA, Particulate Matter (PM-10), [en línea]. Actualizado: 5 enero de 2012, [visto: 25 abril de 2013]. Disponible en <http://www.epa.gov/airtrends/aqtrnd95/pm10.html>
- USEPA, Monitored Pollutants Actualizado 17 octubre de 2012, [visto 13 marzo de 2014]. Disponible en <http://www.epa.gov/schoolair/pollutants.html>
- USEPA, Method 3015a: Microwave Assisted Acid Digestions of Aqueous Samples and Extracts. Revisado en febrero de 2007, [Visto el 23 de septiembre de 2013]. Disponible en: <http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/pdfs/3015a.pdf>.
- Wackernagel, H. (2003). 'Linear Segression and Simple Krigin: Multiple Linear Regression (cap 3)' Springer-verlag (ed) *Multivariate Geostatistics: An Introduction with Applications*. Berlin Heidelberg.
- Weatherbase. Monthly weather averages summary for Chetumal. [en línea]. Actualizado el 1 mayo de 2013, [visto el 1 mayo de 2013]. Disponible en: <http://www.weatherbase.com/weather/weather.php3?s=5767&refer=&units=metric>
- Wei, B. Y Yang, L. (2010) A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China. *Microchemical Journal*, 94, 99-107.
- Øvrevik, J.; Låg, M.; Refsnes, M.; Nafstad, P.; Hetland, R. B.; Dybing, E. (2006) 'Particulate matter properties and health effects: consistency of epidemiological and toxicological studies. *Human and Experimental Toxicology*' Oslo, Norway 25, 559–579.

11. ANEXOS

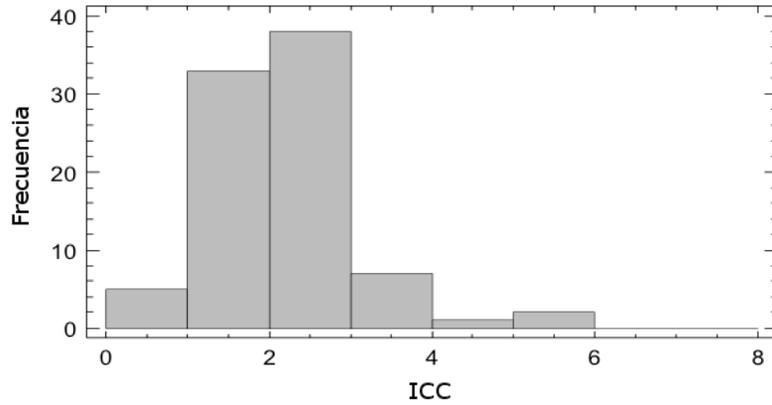


Figura 40. Gráfica de frecuencias del índice de carga contaminante (ICC).

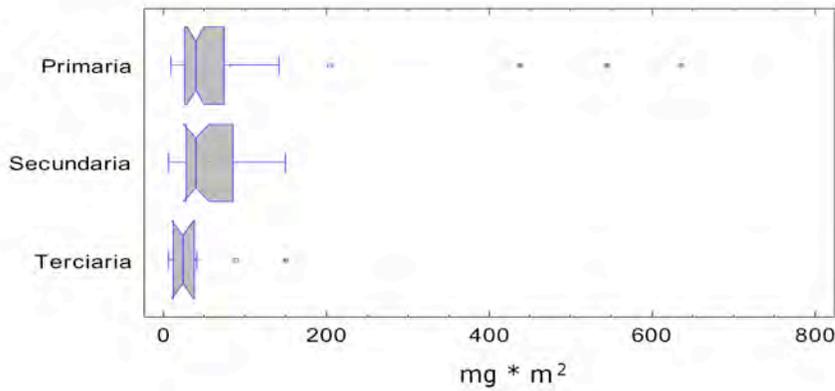


Figura 41. Comparación de medias de Pb en $mg \cdot m^{-2}$ por tipo de vialidad.

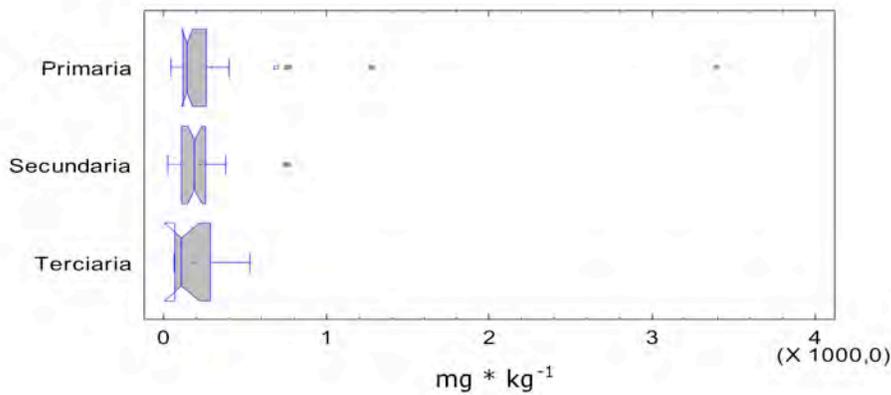


Figura 42. Comparación de medias de Pb en $mg3kg^{-1}$ por tipo de vialidad.

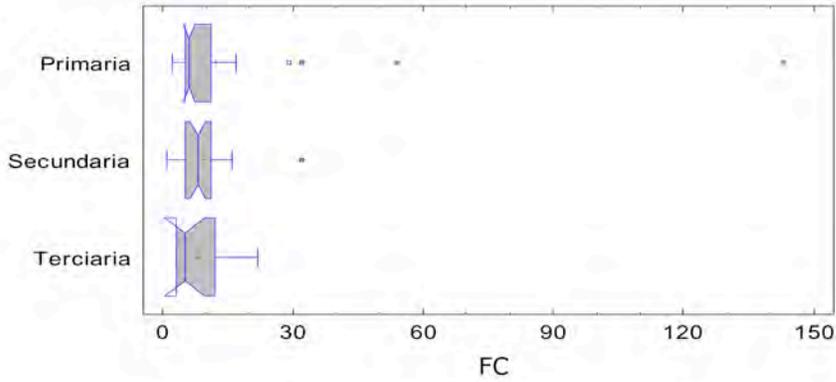


Figura 43. Comparación de medias de FC de Pb por tipo de vialidad.

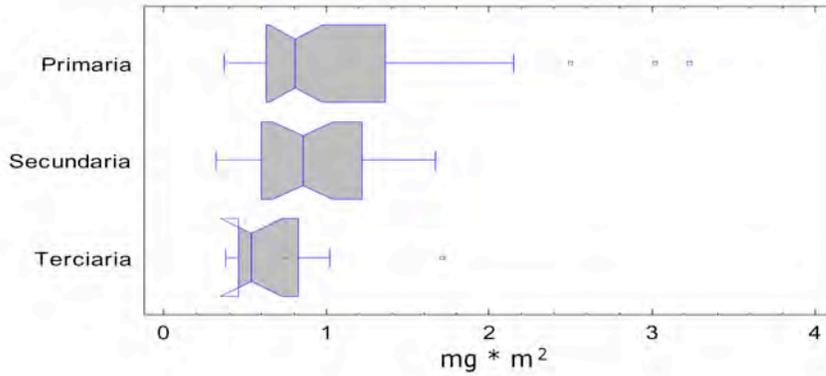


Figura 44. Comparación de medias de Cd en $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$ por tipo de vialidad.

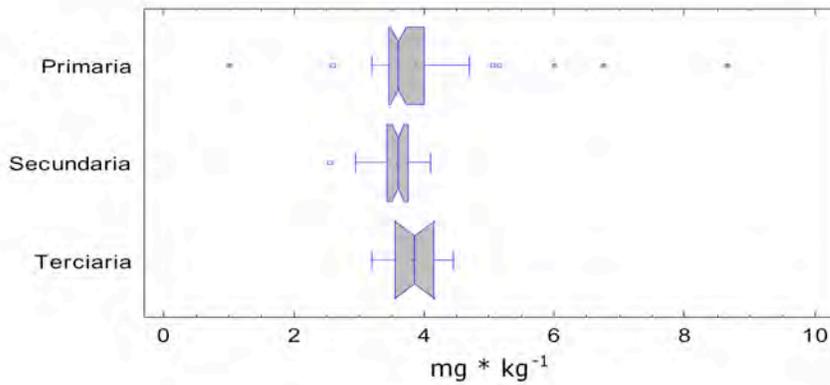


Figura 45. Comparación de medias de Cd en $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ por tipo de vialidad.

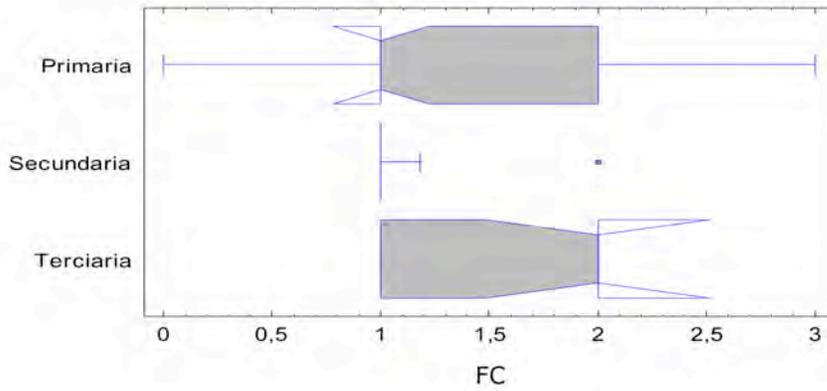


Figura 46. Comparación de medias de FC de Cd por tipo de vialidad.

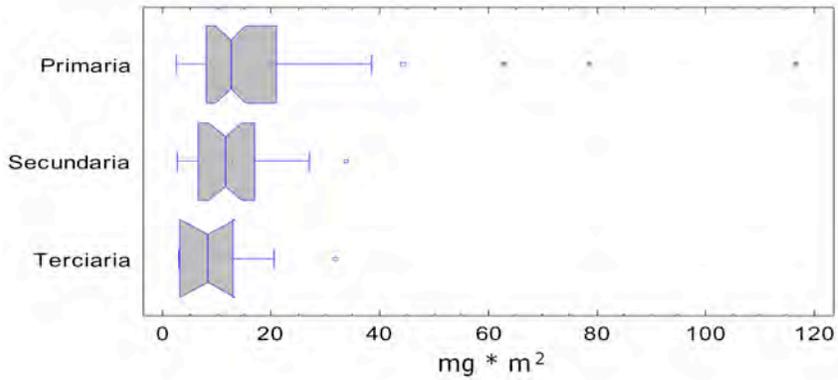


Figura 47. Comparación de medias de Cr en $\text{mg} \cdot \text{m}^2$ por tipo de vialidad.

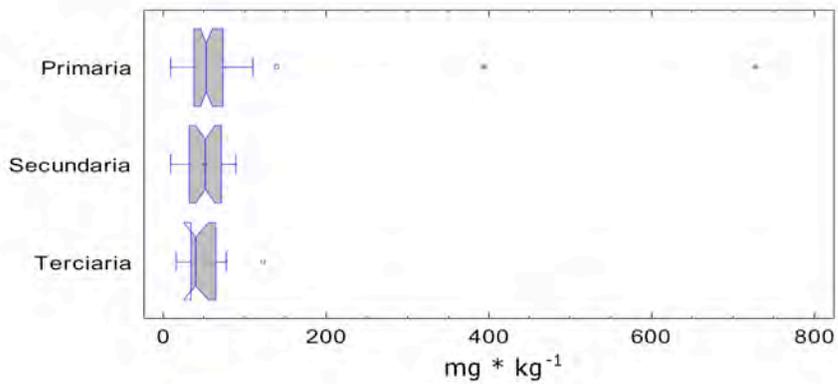


Figura 48. Comparación de medias de Cr en $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ por tipo de vialidad.

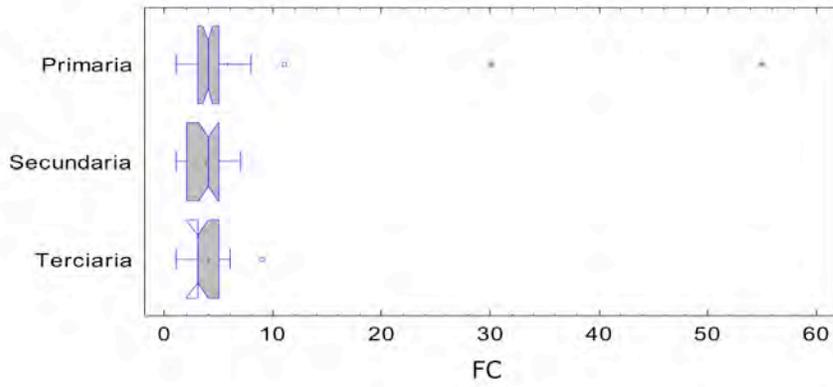


Figura 49. Comparación de medias de FC de Cr por tipo de vialidad.

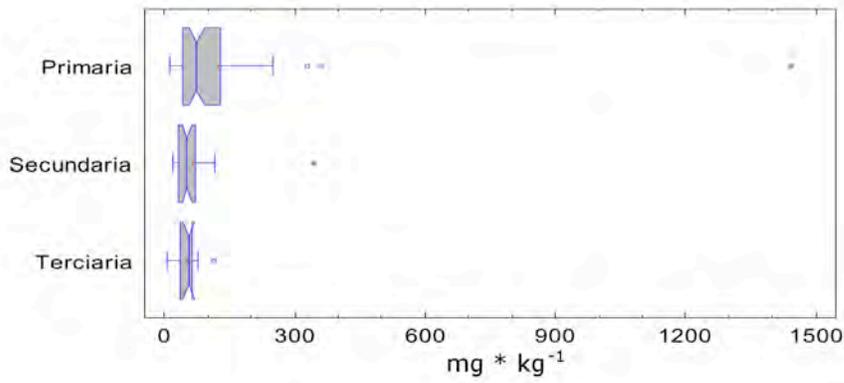


Figura 50. Comparación de medias de Cu en $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ por tipo de vialidad.

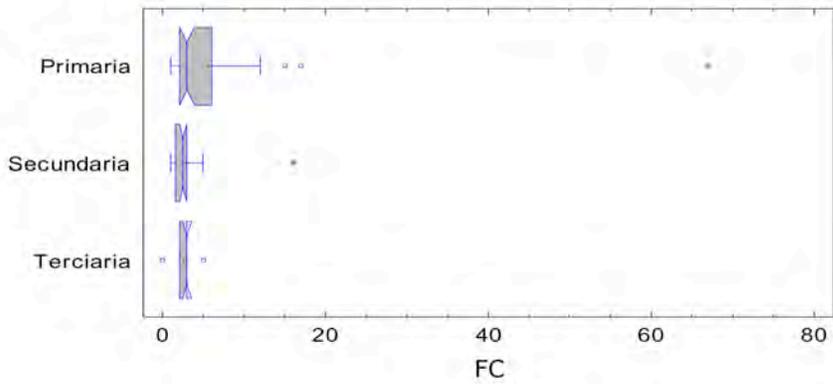


Figura 51. Comparación de medias de FC de Cu por tipo de vialidad.

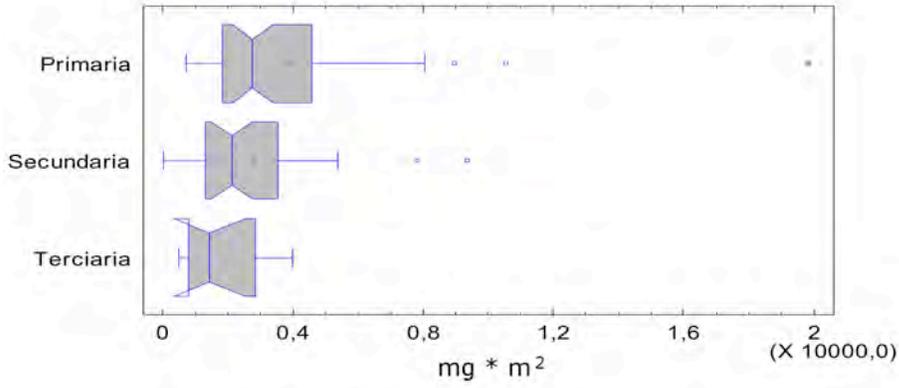


Figura 52. Comparación de medias de Fe en $mg \cdot m^{-2}$ por tipo de vialidad.

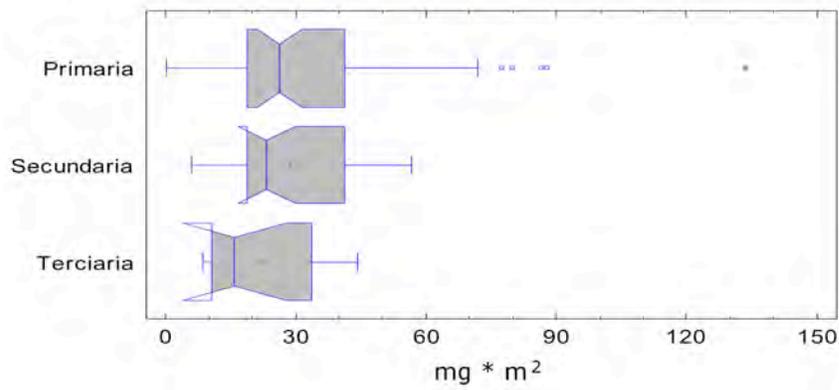


Figura 53. Comparación de medias de Mn en $mg \cdot m^{-2}$ por tipo de vialidad.

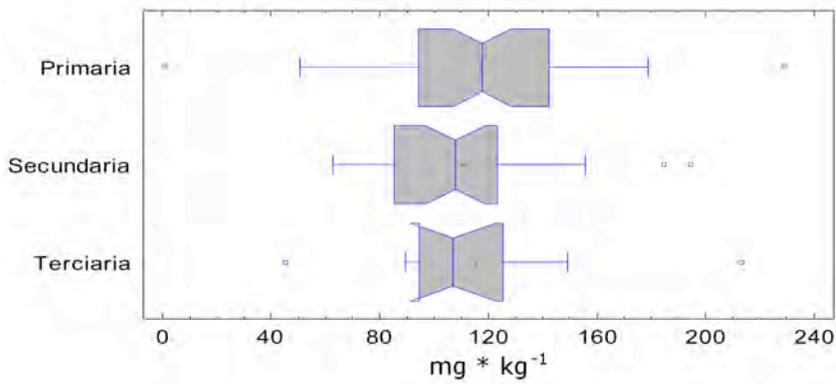


Figura 54. Comparación de medias de Mn en $mg \cdot kg^{-1}$ por tipo de vialidad.

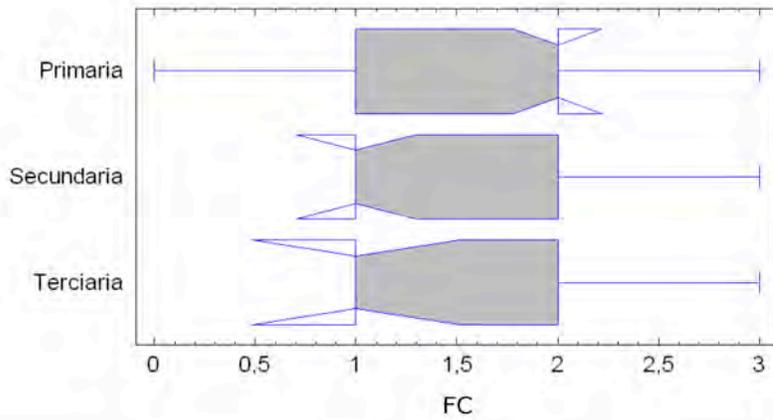


Figura 55. Comparación de medias de FC de Mn por tipo de vialidad.

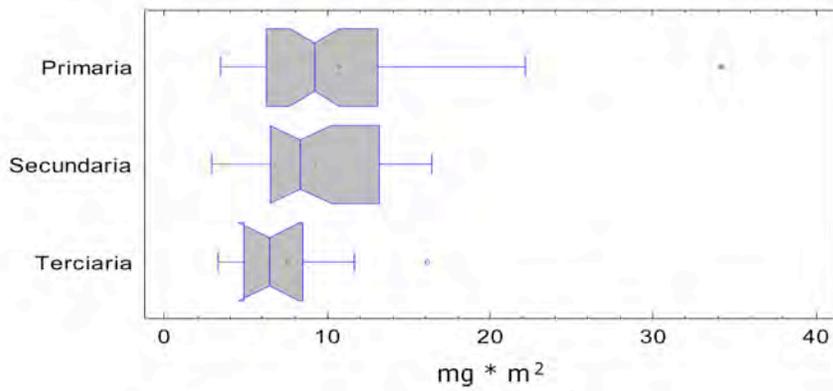


Figura 56. Comparación de medias de Ni en $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$ por tipo de vialidad.

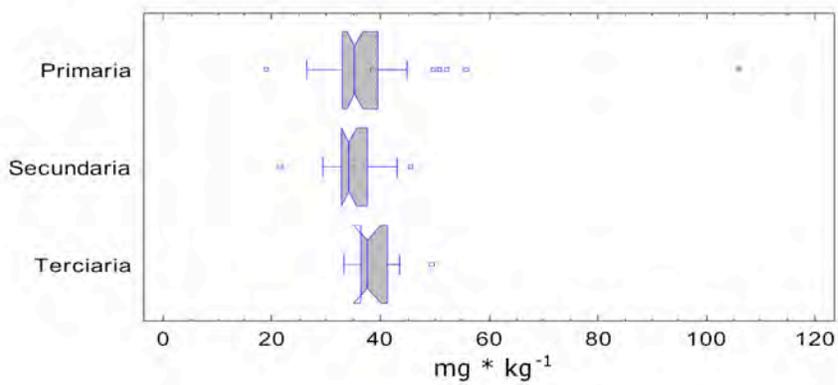


Figura 57. Comparación de medias de Ni en $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ por tipo de vialidad.

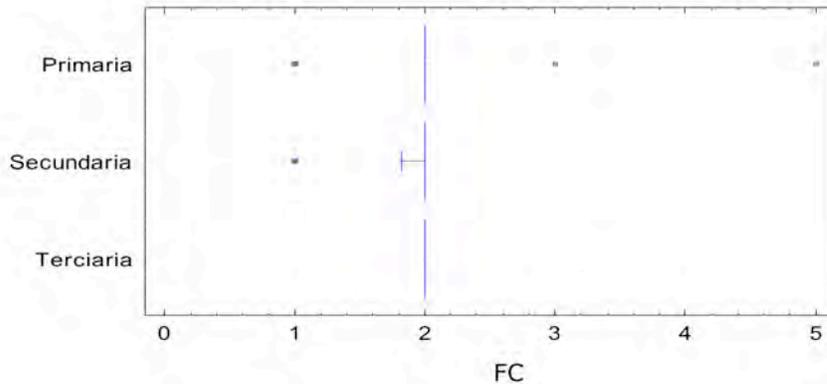


Figura 58. Comparación de medias de FC de Ni por tipo de vialidad.

Cuadro 17. Especificaciones del análisis geoestadístico para los mapas en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (metal)	Modelo	Transf.	Interp.	Umbral	ALD	LCDI	Varianza al azar (efecto pepita)	Varianza Total	Alcance	Varianza estructural Relativa (%)	r^2 del modelo
Cr	Exp	Log	K ind	64	0.045	0.00579	0.049	0.421	0.0066	88.4	0.231
Ni	Exp	Log	K ind	50	0.0545	0.00728	0.0055	0.0407	0.009	86.5	0.437
Cu	Exp	Log	K ind	63	0.0465	0.00355	0.127	0.757	0.0144	83.2	0.639
Pb	Exp	Log	K ind	140	0.02	0.005	0.001	0.56	0.006	99.8	0.778
Mn	Exp	N/A	IDW	N/A	0.035	0.0027	202	1531	0.0099	86.8	0.762
Cd	Gauss	R. C.	IDW	N/A	0.022	0.00155	0.0042	0.0477	0.00415692	91.2	0.730
Fe	Exp	R. C.	IDW	N/A	0.024	0.0023	17	848.9	0.0099	98.0	0.949

Cuadro 18. Especificaciones del análisis geoestadístico para los mapas en $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$.

$\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ (metal)	Modelo	Transf.	Interp.	Umbral	ALD	LCDI	Varianza al azar (efecto pepita)	Varianza Total	Alcance	Varianza estructural Relativa (%)	r^2 del modelo
Cr	Gauss	Log	IDW	N/A	0.01	0.00125	0.001	0.539	0.00294449	99.8	0.934
Ni	Gauss	Log	IDW	N/A	0.045	0.0023	0.0001	0.2522	0.00484974	100	0.884
Cu	Exp	Log	IDW	N/A	0.045	0.0056	0.092	0.989	0.0087	90.7	0.813
Pb	Gauss	Log	IDW	N/A	0.01	0.0013	0.001	0.687	0.00225167	99.9	0.867
Mn	Gauss	R. C.	IDW	N/A	0.019	0.0013	0.01	3.422	0.00502295	99.7	0.867
Cd	Esféric	Log	IDW	N/A	0.051	0.004	0.0185	0.281	0.005	93.4	0.273
Fe	Gauss	R. C.	IDW	N/A	0.03	0.0023	242.8	518.1	0.0102191	53.1	0.762

Cuadro 19. Especificaciones del análisis geoestadístico para los mapas de FC.

FC (metal)	Modelo	Transf.	Interp.	Umbral	ALD	LCDI	Varianza al azar (efecto pepita)	Varianza Total	Alcance	Varianza estructural Relativa (%)	r ² del modelo
Cr	Esf	Log	K ind	6	0.034	0.00406	0.001	0.372	0.0041	99.7	0.646
Ni	Esf	Log	IDW	N/A	0.009	0.0022	0.0094	0.0689	0.0029	86.4	0.984
Cu	Exp	Log	K ind	6	0.0325	0.00434	0.058	0.638	0.0063	90.9	0.706
Pb	Exp	Log	K ind	6	0.035	0.00655	0.02	0.552	0.0063	96.4	0.800
Mn	Exp	N/A	IDW	N/A	0.041	0.00927	0.0415	0.332	0.0135	87.5	0.908
Cd	Gauss	R. C.	IDW	N/A	0.025	0.002995	0.0083	0.0463	0.00329090	82.1	0.810
Fe	Exp	Log	K ind	6	0.045	0.0048	0.0307	0.2634	0.0102	88.3	0.760
Fe	Exp	Log	IDW	N/A	0.045	0.0048	0.0307	0.2634	0.0102	88.3	0.760

Cuadro 20. Especificaciones del análisis geoestadístico para los mapas de ICC y kg·m⁻².

	Mod.	Transf.	Interp.	Umbral	ALD	LCDI	Varianza al azar (efecto pepita)	Varianza Total	Alcance	Varianza estructural Relativa (%)	r ² del modelo
kg·m⁻²	Gauss	Log	IDW	N/A	0.033813	0.002254	0.0001	0.2522	0.519615	100	0.901
ICC	Exp	Log	IDW	N/A	0.05	0.0065	0.026	0.123	0.0114	78.9	0.166
ICC	Exp	Log	K ind	6	0.05	0.0065	0.026	0.123	0.0114	78.9	0.166