



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

CENTRO DE GEOCIENCIAS

Mapas geoquímicos de metales pesados de
metales pesados de suelos
del Estado de Tlaxcala, México

Tesis

que para obtener el grado de
Maestra en Ciencias de la Tierra
(Geología Ambiental)

presenta

Jacqueline Mireya
Calzada Mendoza

Tutor:

Dr. Jaime Alejandro Carrillo-Chávez

Proyecto financiado por:

Fondos mixtos Conacyt – Gobierno del
Estado de Tlaxcala, México
(TLAX-2002-CO1-1981)

Querétaro, Qro.
2007





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



DEDICATORIA

a Rosita y Jerónimo, mis padres
con inmenso amor y gratitud

a Claudia,

Roberto y Patricia

a Anuar, Yael, Yamil y Mirelle
(en orden de aparición)
mis sobrinos



La-baie_des_anges, Chagall 1962

AGRADECIMIENTOS

C *C/B* *Am7* *D7*
tantos siglos, tantos mundos, tanto espacio...
G
y coincidir

A mi familia por su amor incondicional.

Al Dr. Francisco Javier Rodríguez-Valadez por su respaldo y ejemplo.

A la Arq. Ma. del Carmen (as. Pamela) Siurob y su esposo el Ing. Salvador Cervantes por su amistad y amparo.

Al Dr. Juan Martín Gómez-González por su amistad, paciencia, entusiasmo y conocimiento durante las largas jornadas de escritura de la tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, al Gobierno del Estado de Tlaxcala y al Dr. Alejandro Carrillo Chávez por la gestión y financiamiento para la realización del proyecto.

Al Dr. Luca Ferrari, director del Centro de Geociencias, a los Drs. Gerardo Carrasco Núñez y Ángel F. Nieto-Samaniego en la Secretaría Académica, a los Drs. Roberto S. Molina Garza y Carlos Mendoza, responsables del Posgrado así como al Lic. Dionisio Salas León, secretario administrativo, por los recursos humanos y económicos que me brindaron durante mi estancia como estudiante. A Soledad Medina, Marta Pereda, Juan Manuel López, Emilio Nava, Lupita Hernández, Juanita Pérez, Patty Burgos y demás personal por su paciencia y apoyo.

Al Subcomité de Becas del Centro integrado por los Drs. Ángel Francisco Nieto-Samaniego, Roberto S. Molina Garza y Carlos Mendoza, así como al Dr. Alejandro Carrillo por el apoyo económico para la conclusión del presente trabajo.

Al QFB Mario Mojica Magallanes y Tec. Juan Barraquán por su apoyo en trabajo de campo y acondicionamiento de muestras. Al MC Gabriel Origel e Ing. Rodolfo Díaz-Castanón por su orientación sobre el manejo del ArcGis 8.1, Surfer y otros programas relacionados.

A la Dra. Ofelia Morton-Bermea y MC Elizabeth Hernández-Álvarez del Laboratorio de ICP-MS del Instituto de Geofísica, UNAM, por compartir conmigo sus conocimientos y aliento.

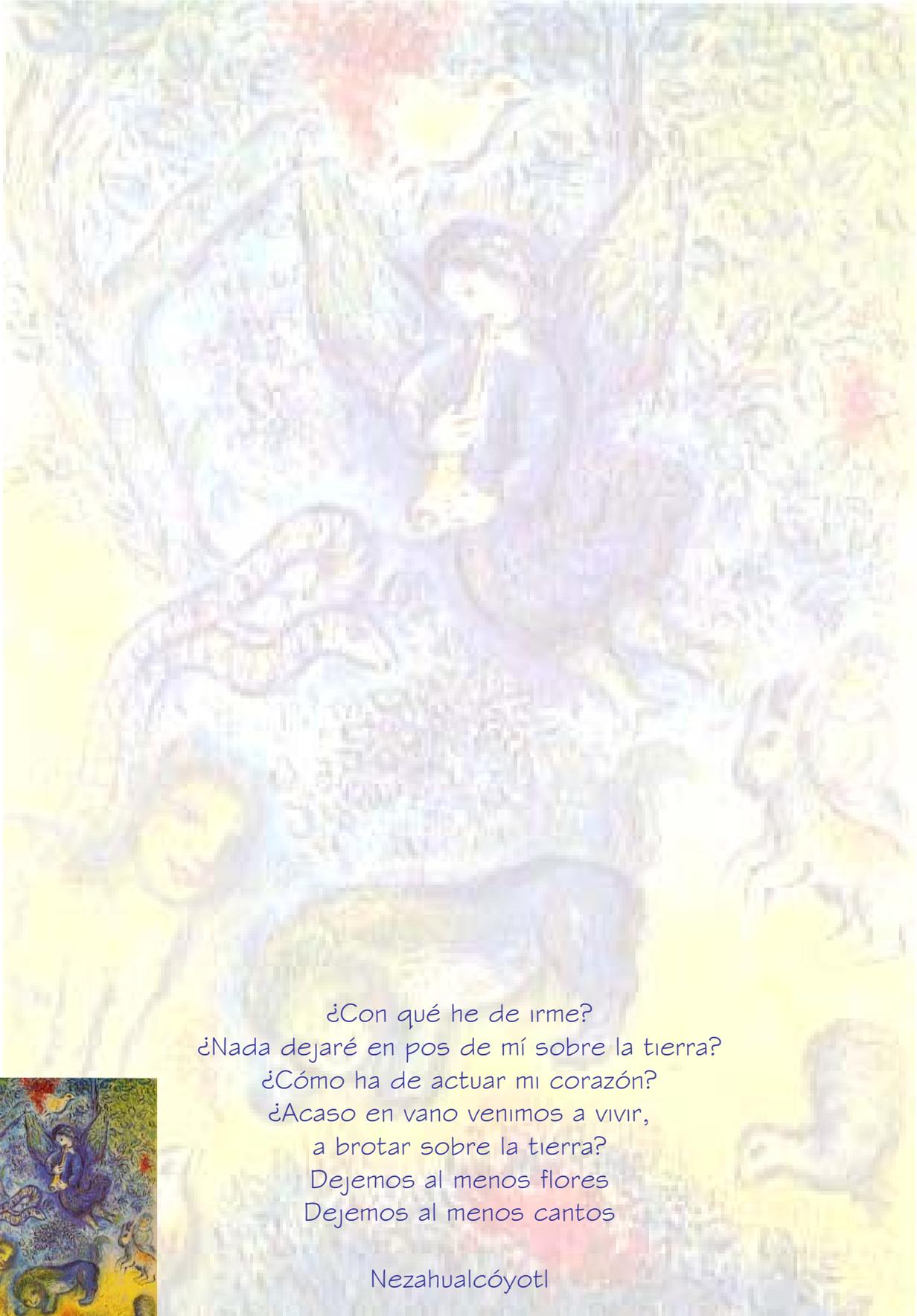
Al Drs. Juan Martín Gómez-González, Patricia Miretzky, Silke Cram, Gilberto Hernández Silva y Javier G. Castro-Larrangoitia por sus comentarios al documento de tesis.

Al Dr. Francisco Javier Barón-López de la Universidad de Málaga por poner a disposición de estudiantes de todo el mundo sus clases y materiales sobre estadística y su disposición a responder mis preguntas.

Al Ing. Fidencio Fernández de Sigash consultores por brindarme las facilidades para escribir mi tesis.

A mis amigos del Centro de Geociencias Norma González Cervantes y Tania Norato Cortés por su cálida bienvenida; Andrés Felipe Arango Guevara, Mario Mojica-Magallanes, Rafael Iván Puente-Solís, Manuel Ortiz y Francisco González-Sánchez por su compañía y estima. A mi “sensei” y amigo Javier Ponce Torres por aumentar mis conocimientos sobre software y hardware. A los Drs Harald Norbert Böhnelt y Héctor Román Pérez Enríquez por su entusiasmo durante las prácticas de *speaking*.

A Aldo Izaguirre Pompa y Paulina León Loeza por conocerlos y aguantarme en el cubo, a mis compañeros: Blanca, Aldo, Marisol, Ieni, Nelly, Montse, Mike, Laura, Chilo, Javier, Gildardo, Pepe, Isaac, Ivan, Janet “SLP”, Janeth “Linares”, Lupillo, Paula, Irving, Fernando, Edgar, Jorge, Lenin, Joel, Oscar y Toño Godínez por compartir el tiempo.



¿Con qué he de irme?
¿Nada dejaré en pos de mí sobre la tierra?
¿Cómo ha de actuar mi corazón?
¿Acaso en vano venimos a vivir,
a brotar sobre la tierra?
Dejemos al menos flores
Dejemos al menos cantos

Nezahualcóyotl

La flauta mágica de Mozart, Chagall 1967



ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ÍNDICE GENERAL	III
FIGURAS	VI
TABLAS	VII
SIGLAS Y ACRÓNIMOS	VIII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo General	3
1.2 Justificación.....	4
2. ÁREA DE ESTUDIO.....	5
2.1 Clima.....	5
2.2 Geología Regional.....	8
2.3 Geología Local	8
2.4 Unidades Fisiográficas	12
2.5 Hidrología Superficial	14
2.6 Edafología.....	17
2.7 Cubierta vegetal.....	22
3. ANTECEDENTES	24
3.1 Ambiente y metales pesados	24
3.1.1 Arsénico (As).....	26
3.1.2 Cadmio (Cd)	27
3.1.3 Cobalto (Co).....	28
3.1.4 Cobre (Cu)	28
3.1.5 Cromo (Cr).....	29
3.1.6 Molibdeno (Mo).....	29
3.1.7 Níquel (Ni)	30
3.1.8 Plomo (Pb)	31
3.1.9 Antimonio (Sb)	31
3.1.10 Talio (Tl).....	31
3.1.11 Vanadio (V)	32
3.1.12 Zinc (Zn)	32
3.2 Estudios previos	33
3.2.1 China	33
3.2.2 Suecia y Finlandia	34

3.2.3 Eslovaquia	35
3.2.4 Suelos del mar Báltico	35
3.2.5 México	36
4. METODOLOGÍA	40
4.1 Muestreo	40
4.2 Digestión de muestras	41
4.3 Análisis cuantitativo por ICP-MS	43
4.4 Análisis estadístico	45
4.5 Generación de mapas geoquímicos	47
4.6 Análisis de conglomerados	49
5. RESULTADOS	52
5.1 Arsénico	59
5.2 Cadmio	59
5.3 Cobalto	59
5.4 Cromo	60
5.5 Cobre	60
5.6 Molibdeno	61
5.7 Níquel	61
5.8 Plomo	61
5.9 Antimonio	62
5.10 Talio	62
5.11 Vanadio	62
5.12 Zinc	62
6. DISCUSIÓN	75
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	92
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
9. ANEXO A	A1
10. ANEXO B	B1

FIGURAS

2.1	Clima	7
2.2	Geología	10
2.3	Fisiografía	13
2.4	Hidrología Superficial	16
2.5	Edafología	19
2.6	Cubierta vegetal	23
3.1	Esquema de la interacción de los metales y los diferentes reservorios	25
4.1	Vías de comunicación y puntos de muestreo	42
4.2	Propiedades del diagrama de caja	46
5.1 a	Gráficas de caja	54
5.1 b	Gráficas de caja para Sb, Tl y Mo	54
5.3	Distribución de Arsénico Tlaxcala, México	63
5.4	Distribución de Cadmio Tlaxcala, México	64
5.5	Distribución de Cobalto Tlaxcala, México	65
5.6	Distribución de Cromo Tlaxcala, México	66
5.7	Distribución de Cobre Tlaxcala, México	67
5.8	Distribución de Molibdeno Tlaxcala, México	68
5.9	Distribución de Níquel Tlaxcala, México	69
5.10	Distribución de Plomo Tlaxcala, México	70
5.11	Distribución de Antimonio Tlaxcala, México	71
5.12	Distribución de Talio Tlaxcala, México	72
5.13	Distribución de Vanadio Tlaxcala, México	73
5.14	Distribución de Zinc Tlaxcala, México	74
6.1	Gráficas de caja por elementos y uso de suelo	76
6.2	Representación de conglomerados generados con enlace sencillo (SL)	82
6.3	Representación de conglomerados generados con enlace completo, medida de distancia City Block datos transformados	83
6.4	Representación de conglomerados producidos con la regla de enlace de promedio no ponderado de pares	84
6.5	Representación de conglomerados obtenidos con la regla de enlace de Ward	85
6.6	Análisis por conglomerados: regla de enlace completo, medida de distancia City Block Datos transformados	87

6.7	Análisis por conglomerados: regla de enlace completo, medida de distancia 1P	88
6.8	Análisis por conglomerados: regla de enlace promedio no ponderados de pares, medida de distancia City Block	89
6.9	Análisis por conglomerados: regla de enlace promedio no ponderados de pares, medida de distancia City Block Datos transformados	90
6.10	Análisis por conglomerados: regla de enlace Ward, medida de distancia City Block Datos transformados	91

TABLAS

3.1	Resumen estadístico del Proyecto Suelos del mar Báltico	36
3.2	Comparación de las concentraciones de metales y metaloides reportados en suelos mexicanos	39
4.1	Parámetros operacionales utilizados en ICP-MS	43
4.2	Parámetros de verificación de la calidad de los resultados	44
5.1	Estadística descriptiva	53
5.2	Contenido de As, Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, b, Sb, Tl, V y Zn en diferentes materiales	55
5.3	Comparación de las concentraciones (mg/kg) de metales y metaloides reportados en suelos mexicanos	58
5.4	Parámetros empleados para la generación de los mapas de distribución	57
6.1	Parámetros de la Prueba de Kruskal – Wallis	75
6.2	Correlación de acuerdo a la ρ de Spearman	78
6.3	Concentraciones de referencia totales y las obtenidas en Tlaxcala	

SIGLAS Y ACRÓNIMOS

AAS	Atomic Absorption Spectrophotometer
BC-MELP	British Columbia Ministry of Environment, Lands and Parks
DER	Desviación Estándar Relativa
EPA	Environmental Protection Agency
GRN	Global Global Reference Network
ICP-MS	Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry
IDW	Inverse Distance Weighting
IGCP	International Geoscience Programme
INAA	Instrumental Neutron Activation Analysis
INE	Instituto Nacional de Ecología
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
IPHS	International Programme on Chemical Safety
IUGS	International Union of Geological Sciences
LD	Límite de detección
NOM	Norma Oficial Mexicana
PFA	Perfluoralkoxy
Profepa	Procuraduría Federal de Protección al Ambiente
PIXE	Particle induced x-ray emission
Secoduv	Secretaría de Obras, Desarrollo Urbano y Vivienda
Semarnat	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SSA	Secretaría de Salud
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
US	United States
WHO	World Health Organization

RESUMEN

En el presente trabajo se elaboraron mapas geoquímicos de Cu, Co, Mo y Zn, elementos traza esenciales, V, Cr, Ni, elementos benéficos, y As, Cd, Pb y Tl, elementos potencialmente tóxicos, en suelos del Estado de Tlaxcala, información que en la actualidad se reconoce como fundamental para la elaboración de normas ambientales, diseño de planes de desarrollo urbano procedimientos de remediación, así como en programas de evaluación, prevención y mitigación del deterioro ambiental, efecto inherente al crecimiento de las ciudades. La digestión de los elementos se realizó a través HF/HClO₄ y la medición de las concentraciones de los metales y metaloides se realizó a través de espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS). Se empleó el método de interpolación Distancia Inversa ponderada (IDW por sus siglas en inglés) para crear los mapas.

De la información obtenida se efectuó un análisis estadístico, para evaluar el comportamiento normal de las concentraciones por la prueba de Shapiro-Wilk, lo cual arrojó que sólo los grupos Cr y Mo cumplen con la condición de normalidad. Lo anterior sirvió de base para examinar las correlaciones entre metales y metaloides a través de la rho de Spearman. Del mismo modo se encontró que en algunos elementos hay diferencias significativas entre las concentraciones obtenidas de suelos agrícolas y suelos no alterados, ello se evaluó por medio de la prueba de Kruskal-Wallis. Además se realizó un análisis de conglomerados para el conjunto de concentraciones obtenidas.

El contenido de Pb, Ni, Tl, V y Zn resultado del análisis de los suelos de Tlaxcala se comparó con las concentraciones de referencia totales definidas en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 y se encontró que las concentraciones obtenidas en los puntos muestreados son inferiores a los valores de la norma; pero ello no asegura que no pueda haber un impacto adverso sobre los cultivos y ganado del área de estudio debido al contenido de metales pesados.

I. INTRODUCCIÓN

A partir de la revolución industrial, la cantidad y calidad de los recursos naturales se ha modificado considerablemente y con ello las condiciones de nuestro entorno. Los cambios derivados de la actividad industrial se pueden observar en cualquier aspecto, tanto en el físico como en el social, lo que ha promovido la necesidad de prevenir, controlar y mitigar tales efectos. Una herramienta importante para tal fin es el conocimiento detallado del estado actual del medio físico.

Uno de los recursos del medio físico, primordial para la supervivencia del género humano, es el suelo, ya que lo provee de alimento y diversos materiales que cubren diferentes necesidades. Una de las líneas de investigación que en las últimas décadas ha tomado importancia se refiere a las relaciones del suelo y los metales pesados, ya que se reconoce que algunos elementos traza son esenciales (Cu, Co, Mo y Zn) o benéficos (V, Cr, Ni, Se y B) para el crecimiento de las plantas y la salud y nutrición humana y otros son potencialmente tóxicos, por ejemplo, Cd, Hg y Pb; y sólo se podrá evaluar el riesgo de exposición si se cuenta con información sobre las concentraciones presentes de estos elementos en el suelo. .

Con base en lo expuesto anteriormente, la elaboración de mapas que muestren la distribución espacial de metales pesados en suelos en la actualidad es una herramienta muy importante para el conocimiento de las causas y los procesos de deterioro del recurso, así como para desarrollar acciones de prevención, control y mitigación de los efectos negativos generados por la actividad antropogénica sobre el suelo.

Uno de los primeros proyectos en la elaboración de mapas geoquímicos fue el Proyecto de Reconocimiento Nacional y Geoquímica Regional de China, que inició en 1978 y aunque estaba orientado a la exploración minera, durante la planeación se adoptó un enfoque de la generación de mapas geoquímico a estudios sobre agricultura y geoquímica ambiental. Dicho proyecto consistió en el muestreo sistemático de varios tipos de materiales superficiales, en los cuales se determinó el contenido de 39 elementos por sistemas analíticos multi-elementales, y se crearon mapas geoquímicos a diferentes escalas, que mostraron la variación espacial de los elementos en los materiales muestreados (Xuejing and Tianxiang, 1993).

Otro trabajo similar fue el programa de mapeo de Suecia y Finlandia ([Gustavsson et al., 1994](#)). En éste, se muestrearon suelos glaciares y se determinaron las concentraciones de 14 elementos con fines de exploración y es uno de los primeros trabajos que involucró el territorio de dos países.

El Atlas Geoquímico de la República de Eslovaquia ([Vrana et al., 1997](#)), se concibió como una base importante para la gestión de las políticas públicas y la toma de decisiones en materia de planeación territorial y protección ambiental, además de brindar un punto de vista sobre el estado de su territorio a escala internacional. La base de datos incluyó el establecimiento del contenido de 36 elementos en sedimentos, rocas, agua subterránea y suelos e incluso follaje.

Los Programas Internacionales de Correlación Geológica 259 y 360 (IGCP por sus siglas en inglés), auspiciados por la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS por sus siglas en inglés y la UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura) representan el primer esfuerzo de crear un canal de referencia global para bases de datos geoquímicos nacionales y regionales ([Darnley et al., 1995](#)).

La Fase I IGCP 259: Mapeo Geoquímico Global, se crea en 1988 como una contribución al programa Internacional Geosfera – Biosfera sobre Cambio Global (IGBP). En esta fase se identifican algunos requisitos básicos con los que debe contar una Base Global de Datos Geoquímicos:

- Que el medio elegido sea común, representativo y disponible, colectado bajo un procedimiento estandarizado.
- Que las cantidades del medio sean adecuadas para investigaciones y referencias futuras.
- Que existan los datos analíticos para todos los elementos con significado ambiental o económico.
- Conseguir el límite de detección más bajo posible para todos los elementos.
- Un estricto control de calidad en todas las etapas del proceso.

La Fase II IGCP 360: Un Canal de Referencia Global (GRN) se encargó de la implementación de las recomendaciones del IGCP 259 para generar un canal con el cual se podrían normalizar los datos geoquímicos existentes locales y nacionales, obtenidos en diferentes estudios con distintos procesos de muestreo, técnica analítica y métodos de interpretación de datos. El resultado se plasmó en el Manual de Campo ([Salminen et al., 1998](#)), logro de la negociación de más de 100 países y el cual reúne los métodos empleados en esta fase para terrenos glaciares.

Uno de los estudios más extensos es el Atlas Geoquímico de la Región Este de Barents, en el cual se produjeron mapas geoquímicos de depósitos superficiales

como son: agua, suelo orgánico y minerogénico y vegetación. Considerando que el área de estudio se proyectaba como un área de desarrollo económico por la explotación de los campos petroleros de Timan-Pechora y los reservorios de gas al este del mar Barents, dicho estudio brindaría a las autoridades y otros interesados, una base para evaluar las condiciones ambientales existentes y así distinguir los impactos derivados de la explotación de los recursos antes mencionados (Salminen et al., 2004).

Por otro lado, a finales de los 90's se realizó un estudio para determinar las concentraciones de fondo (background) de metales traza en suelos superficiales de Florida (Chen et al., 1998). Entre los objetivos que se plantearon estuvo la validación de 4 métodos de la EPA (*Environmental Protection Agency*) y la determinación de las concentraciones base de 15 metales traza.

En México existen diversas investigaciones sobre el tema. Por ejemplo, la determinación de metales pesados en suelos de la Ciudad de México (Morton-Bermea et al., 2002), evaluación de problemas de contaminación en zonas mineras (Razo et al., 2004), evaluación del efecto del uso de aguas residuales para riego, (Lucho-Constantino Carlos A. et al., 2005), (Hernández-Silva et al., 2005), (Friedel et al., 2000). Dichos trabajos son importantes; pero las áreas que actualmente no manifiestan contaminación ambiental grave, tal vez porque no se cuenta con este tipo de estudios, requieren ser examinadas para detectar y prevenir problemas de contaminación que puedan impactar en la salud de sus habitantes.

Con base en lo expuesto anteriormente, la orientación del presente trabajo es la determinación de las concentraciones de Cu, Co, Mo y Zn, elementos traza esenciales; V, Cr y Ni elementos benéficos y el As, Cd, Pb y Tl como elementos potencialmente tóxicos y el análisis de las relaciones entre ellos, así como la generación de mapas de distribución espacial en los suelos de Tlaxcala que puedan servir de base para estudios agropecuarios, de planeación territorial y de protección ambiental locales.

1.1 Objetivo General

El objetivo general del presente trabajo es generar mapas geoquímicos de As, Cd, Cr, Co, Cu, Mo, Ni Pb, Sb, Tl, V y Zn en suelos del Estado de Tlaxcala, México que puedan servir de base para estudios agropecuarios, de planeación territorial y de protección ambiental locales y/o regionales.

2. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde al estado de Tlaxcala, con una superficie de 4060,923 km². En el año 2000 contaba con 60 municipios y una población de 962 646 habitantes. Colinda al norte con los estados de Hidalgo y Puebla; al este y sur con el estado de Puebla; al oeste con los estados de Puebla, México e Hidalgo.

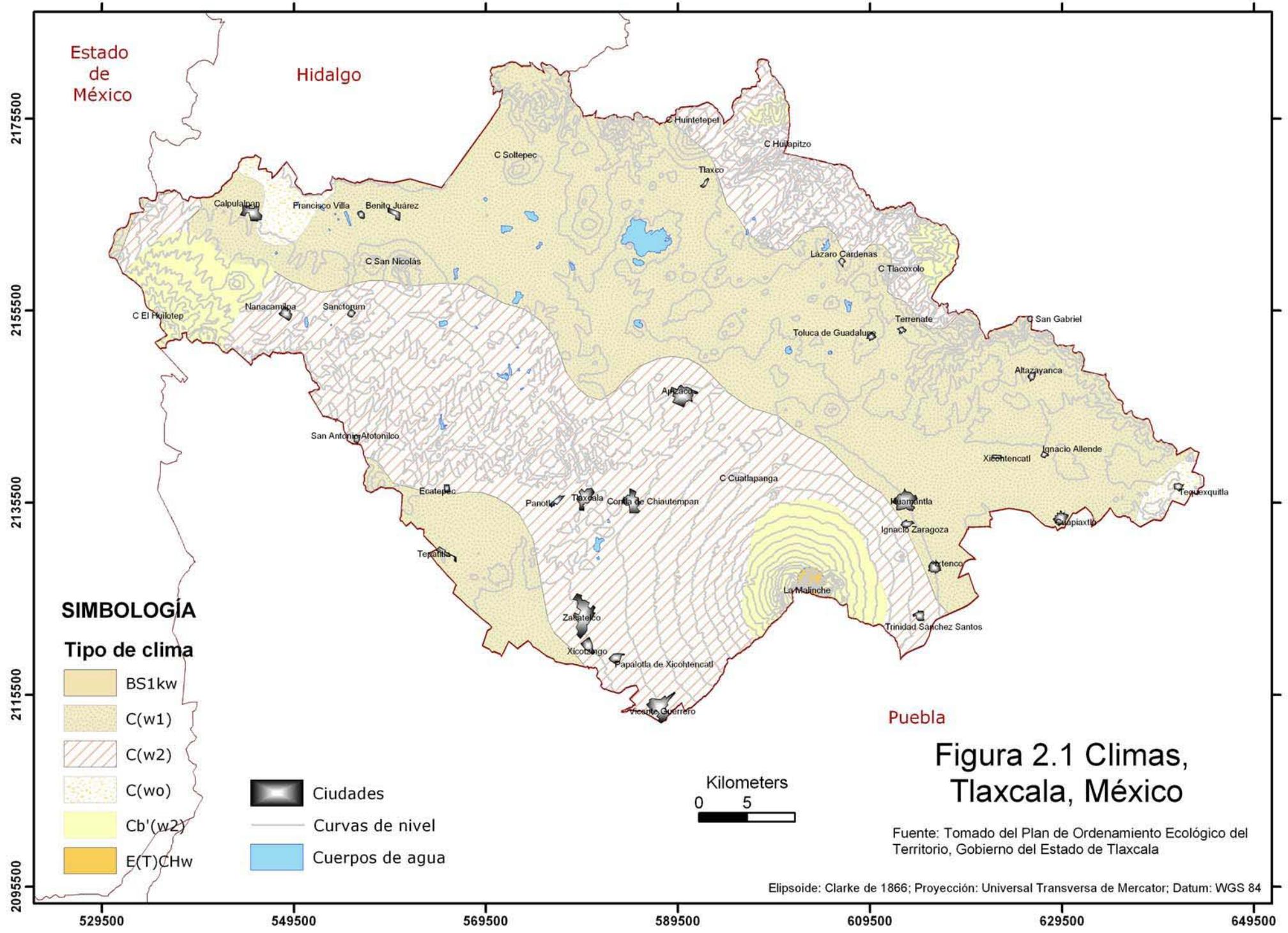
2.1 Clima

Tlaxcala se encuentra dentro de una zona intertropical y los factores que tienen mayor influencia en las condiciones climáticas del estado son:

- El relieve, que presenta diferencias de altitud que van de los 2,200 m en las zonas bajas de lomeríos y planicies, hasta más de los 4,000 m en las zonas montañosas.
- La distancia al mar, efecto de continentalidad, además de tener como barrera a la Sierra Madre Oriental que le impide recibir influencia directa del mar y su condición climática.
- Los vientos que predominan en la zona este y sur del estado, circulan desde el sureste. Como referencia, la ciudad de Tlaxcala tiene registrados como intensidad media, vientos del orden de 70 a 80 m/s para los meses de enero y marzo, que se ven disminuidos cuando chocan con el volcán La Malinche. Los vientos que provienen del noreste también disminuyen su velocidad por la interferencia que provoca la Sierra de Tlaxco.
- La continua deforestación que afecta drásticamente el microclima ya que desde la época de la colonia, con el cambio de uso de suelo hacia las actividades agrícolas.

El clima predominante en el estado es templado subhúmedo (Figura 2.1) con lluvias en verano, se extiende en las porciones bajas de valles y llanuras y en algunas porciones montañosas, este clima presenta cambios en las zonas de sierras, como en la Sierra de Tlaxco, La Malinche y La Sierra, donde el efecto de altitud domina en el tipo climático, siendo éstos más frescos, fríos y semifríos. Existe una marcada época de lluvias lo que permite, en gran parte del territorio, la agricultura de temporal, además de conseguir en algunas zonas la humedad suficiente para dos ciclos.

- El clima que predomina en el Estado de Tlaxcala es templado subhúmedo tipo **C(w1)**, presenta precipitación en verano, y un porcentaje de lluvia invernal menor de 5%. El régimen pluvial medio anual tiene un rango de 600 - 800 mm, los meses con mayor precipitación son de julio a agosto, donde se registran entre 140 a 150 mm, el mes más seco es febrero con 3 - 5 mm; la temperatura promedio es entre 12 y 18 °C, con un verano cálido, la temperatura media mensual más alta se presenta en los meses de abril y mayo, alcanzando de 18 a 19 °C, y la mínima en el mes de enero (13° a 14 °C).
- El templado subhúmedo, **C(w2)**, se diferencia del tipo de clima anterior, por el rango de precipitación que se encuentra entre los 800 a los 1 000 mm, la máxima incidencia de lluvias se presenta en los meses de junio a septiembre con 150 a 160 mm de precipitación, los meses más secos son enero y febrero con valores de 10 mm; presentan un rango de temperatura de entre 12° y 18° C, los meses más cálidos son marzo, junio, julio y agosto con temperaturas de 14° a 15 °C y los más fríos son enero y diciembre.
- **C(w0)(w)**, este subtipo es el menos húmedo de los templados subhúmedos, con lluvias en verano y porcentaje de precipitación menor a 5mm; la precipitación media fluctúa entre los 500 y 600 mm, la mayor precipitación se registra en junio con valores entre 110 y 120 mm, la mínima se presenta en enero y febrero con un valor menor de 10 mm; el régimen térmico medio anual oscila entre 12 y 16 °C, las temperaturas máximas se presentan en los meses de abril, mayo y junio, cuyas medias mensuales oscilan entre 16° y 18 °C, en enero se registra la mínima con un rango que fluctúa entre los 11 ° y 12 °C.
- El tipo **BS1kw**, es un clima de seco a semiseco templado, con lluvias en verano y el resto del año presenta lluvias escasas, el porcentaje de lluvia invernal es menor del 5 %, con un rango de precipitación entre 500 y 600 mm, por lo tanto estas zonas son de las más secas del estado de Tlaxcala. Este clima se extiende en una pequeña porción al este del estado, en el municipio de El Carmen Tequexquitla, cerca del límite con Puebla.
- **Cb'(w2)**. La temperatura media de este tipo de clima se halla entre 5 y 12 °C, siendo su rango de precipitación entre los 1000 y 1200 mm, se le encuentra en forma puntual en las partes medias de La Malinche y en la Sierra Nevada.
- En la cumbre del volcán La Malinche, predomina un clima frío tipo, **E(T)CHw**, con una temperatura media que va de los -2 y 5 °C. El rango de precipitación se ubica entre los 1 000 y 1 200 mm.



2.2 Geología Regional

El área de estudio se ubica en el sector oriental de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) que se divide en 3 sectores (Ferrari, 2000), perteneciendo Tlaxcala al sector oriental. La FVTM constituye una franja volcánica del Cenozoico Superior que cruza transversalmente la República Mexicana, conformada por diferentes rocas emitidas a través varios aparatos volcánicos. Demant (1978) considera que el eje más que formar una banda continua de rocas volcánicas, constituye un grupo de cinco focos principales de actividad con orientación y características distintas.

En la porción central del eje se han reconocido siete fases de volcanismo ocurridas a partir del Oligoceno, siendo la más importante la quinta, ocurrida a fines del Mioceno y que dio origen a las sierras de Las Cruces, de Río Frío y Nevada. Durante la sexta fase se desarrollaron los conos y domos del Iztaccíhuatl y el cono activo del Popocatepetl. La última fase, al igual que la anterior, se desarrolló en el Cuaternario y es responsable de la actividad volcánica que interrumpió el drenaje de la Cuenca de México que cruzaba hacia la Cuenca del Río Balsas, lo que originó el carácter endorreico de aquella.

Hacia su porción occidental, el eje está limitado por las fosas tectónicas de Tepic – Chapala y de Colima. La primera tiene una orientación noroeste – sureste y a ella están asociados los volcanes de San Juan, Sangangüey, Ceboruco, Tequila; la segunda posee una orientación norte sur y a ella están asociados el Nevado de Colima y el Volcán de Fuego (Volcán de Colima).

La composición de las rocas que conforman el Eje Neovolcánico Transmexicano es muy variable. Son abundantes los derrames y productos piroclásticos de composición andesítica, aunque existen numerosas unidades dacíticas y aún riodacíticas (Ferrari, 2000).

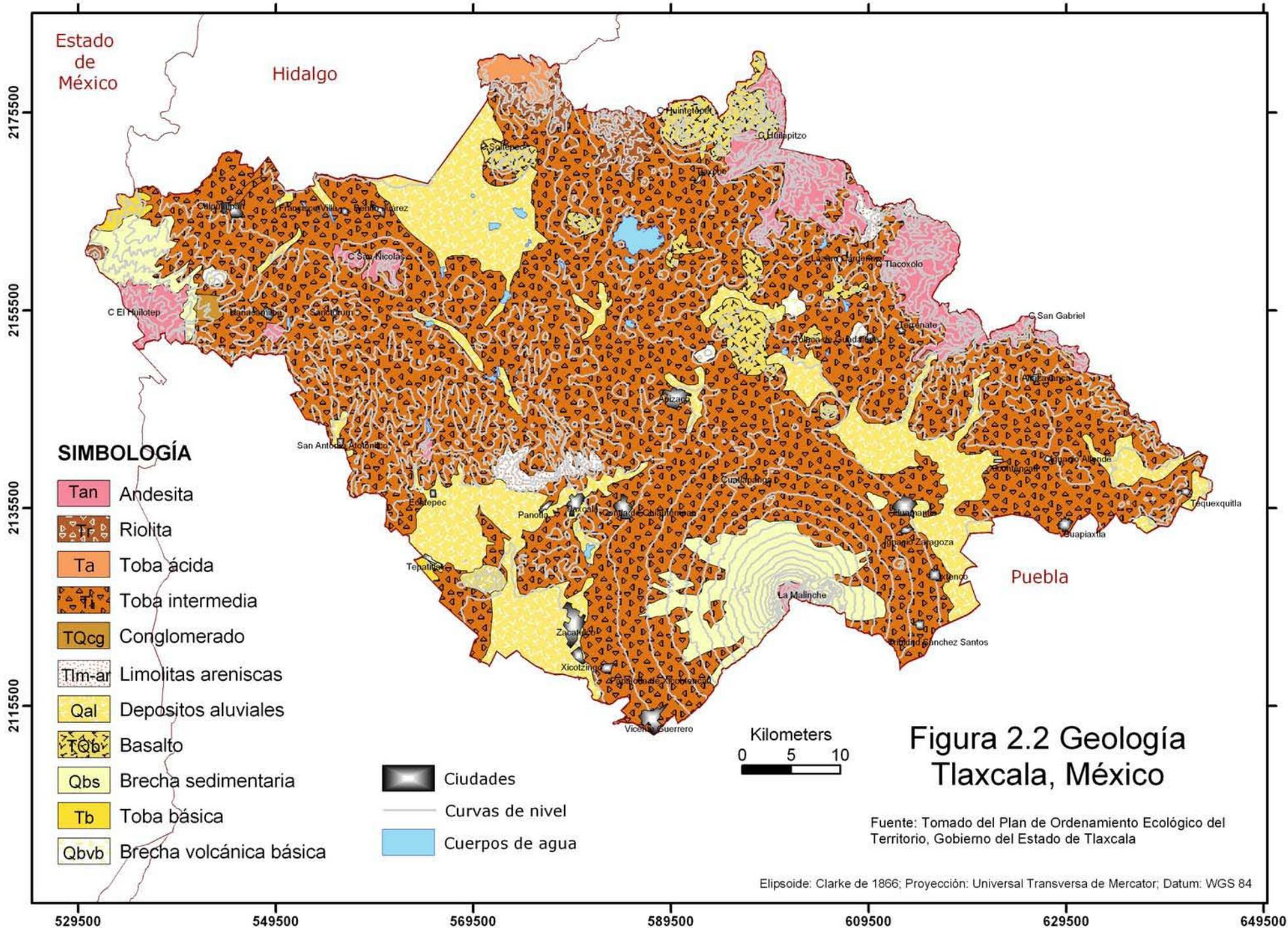
2.3 Geología Local

La actividad volcánica predominantemente durante el Terciario determinó el relieve de la entidad, generando rocas como: andesitas, riolitas, basaltos, tobas y brechas volcánicas. Además se presentan sedimentos lacustres y fluviales, así como brechas sedimentarias (INEGI, 1986) (Figura 2.2):

- Tobas ácidas (Ta). Son tobas soldadas fracturadas (ignimbritas) de color ocre y composición riolítica y dacítica, con fragmentos de feldespatos y pómez. Se encuentran sobre rocas sedimentarias como limolitas y areniscas, y son cubiertas por basaltos del Terciario y Cuaternario. Se localizan en lomeríos, mesas, cerros y barrancas al norte del municipio de Mariano

Matamoros, San Antonio Huextitla, Atlangatepec, Cápula Tlaxco, Chimalapa, Almoloya, Xaloztoc y Huamantla.

- Tobas básicas (Tb). Son rocas básicas del Pleistoceno, dispuestas en forma de estratos delgados y medianos de color gris oscuro, medianamente consolidadas, conformadas por piroclastos del tamaño de ceniza y lapilli. Se encuentran en conos cineríticos, lomeríos y cerros al oeste del poblado de Calpulalpan, sur de Tepetitla y sur de Santiago Cuautla. No fueron cartografiadas por estar representadas escasamente en el estado.
- Tobas intermedias (Ti). Son rocas piroclásticas escoriáceas muy intemperizadas del Plioceno (Terciario superior) y de color gris claro o café rojizo. Tienen textura porfídica conformada por plagioclasas en matriz vítrea silícea. Están cubiertas por brecha volcánica básica y andesitas del Cuaternario y se hallan en lomeríos, cerros, cañones y barrancas, en los municipios de Calpulalpan, Francisco Madero, Hueyotlipan, Apizaco, Huexoyucan, Nanacamilpa, Texoloc, Sanctorum, Mariano Arista, San Antonio Atotonilco y Vicente Guerrero.
- Andesitas (Tan). Son rocas volcánicas fracturadas de color gris claro o gris verdusco. Su composición es variada y puede contener piroxenos y una baja proporción de cuarzo; en algunos sitios presenta matriz vítrea ácida, de textura porfídica, con fenocristales de plagioclasas y ferromagnesianos, algunas son vesiculares. En algunos sitios está cubierta por depósitos piroclásticos o por basalto.
- Riolita (Tr). Se encuentra de forma muy localizada en el extremo occidental del Estado, en las sierras de Calpulalpan y de Tlaxco (cerro El Peñón del Rosario). Consiste esencialmente de cuarzo y feldespatos alcalinos en mayor proporción que plagioclasa sódica.
- Basalto (TQb). Estas rocas fueron generadas a finales del Terciario superior e inicios del Cuaternario. Se ubica en aparatos volcánicos, cerros y lomas al norte de la población de Tlaxco, San Lorenzo Soltepec, Apizaco, Atotonilco, oeste de Lagunilla y Cápula, noreste de San Pedro Ecatepec, y este de San Andrés Buenavista. Los basaltos son de colores oscuros y fracturados. En su mineralogía presentan plagioclasas, labradorita y olivino, con una textura holocristalina o porfídica en una matriz intergranular, y algunas veces estructuras vesiculares. Estos derrames cerraron algunos valles formando cuencas endorreicas, rellenadas posteriormente por material aluvial o lacustre.
- Brecha volcánica básica (Qbvb). Es un material cuaternario de color negro ligeramente compactado, moderadamente meteorizado y constituido por fragmentos de material piroclástico escoriáceo de composición básica, con un tamaño mayor de 32 mm. Se ubica al noreste del poblado de Nativitas,



Mariano Arista, oeste de Calpulalpan, noroeste de Apizaco y Oeste de Toluca, Guadalupe y Santiago Cuautla. Presenta altos contenidos de vidrio volcánico y posee una estructura microcristalina o porfídica con matriz intergranular. En algunos sitios están intrusionados por diques andesíticos o dacíticos. Son utilizados como material de construcción.

- Brecha sedimentaria (Qbs). Corresponde a un material anguloso de alto contenido de vidrio volcánico y de color blanco o amarillento cuando está muy alterado. Los fragmentos acumulados en capas gruesas y masivas alcanzan tamaños hasta de bloque. Durante el Terciario superior, la acción fluvial y fluvio-glaciar cambió la forma del relieve, moldeando esta unidad en las faldas del volcán de la Malinche, al oeste de Trinidad Sánchez Santos y al suroeste de Calpulalpan, oeste de Huamantla y Nanacamilpa.
- Conglomerado (TQcg). Son rocas polimícticas de origen continental del Terciario y Cuaternario dispuestas en estratos lenticulares gruesos, y constituidas de fragmentos redondeados y angulosos de caliza, arenisca, basalto, andesita y pedernal, en una matriz arcillo-arenosa poco consolidada y pobremente cementada. Se les encuentra al pie de la Malinche en San Juan Ixtenco y al oeste del poblado Mariano Arista y Nanacamilpa. En algunos lugares, sobreyace a calizas, tobas básicas y areniscas.
- Limolitas areniscas (Tlm-ar). Es la unidad litológica más antigua de la entidad (Terciario inferior). Se localiza en grandes cerros ubicados al norte de la ciudad de Tlaxcala, San Nicolás Panotla y Emiliano Zapata. Esta roca se originó por la acumulación de clastos en un ambiente lacustre, y recubiertas posteriormente por andesitas y tobas intermedias del terciario superior (Mioceno).

Las limolitas son de color verde y las areniscas de color gris claro, muestran un gran intemperismo y tienen un color blanco. Presentan fracturamiento, son grawvacas y subarcosas de grano fino, su composición es de granos de cuarzo y feldespatos, fragmentados de roca y mica detrítica, se presentan en una matriz arcillosa cementada con calcita y hematita, se disponen en estratos gruesos y medianos con estructura cruzada y huellas de oleaje. Las limolitas son de grano medio o grueso con fractura concoide, dispuestas en estratos delgados.

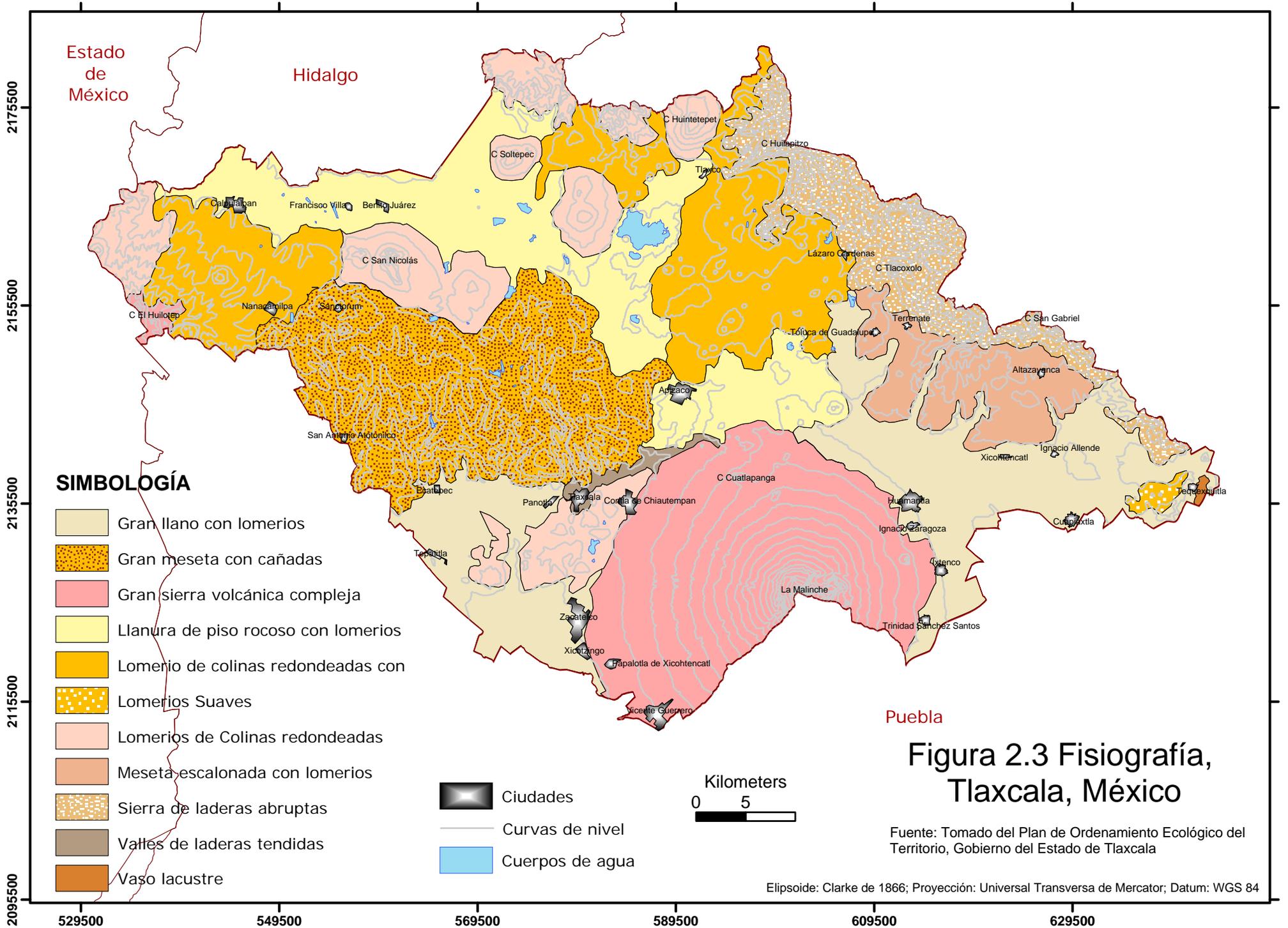
- Depósitos aluviales (Qal). Se origina por la depositación de sedimentos en las partes bajas transportados por el agua conformando planicies o valles; este material está constituido por clastos de roca volcánica de tamaño arena y arcilla. Se localizan en amplias zonas en San José Jiquilpan, Soltepec, Ignacio Zaragoza, Muños, Morelos, Contla, Xicohtencatl, noroeste y suroeste de Huamantla. Actualmente se utilizan como material de construcción y fabricación de ladrillo, tabique y teja.

Desde el punto de vista estructural, en la sierra de Tlaxco se presenta una serie de fracturas y fallas en rocas andesíticas del Terciario, como ocurre al norte de Cuapixtla, así como en cercanías de San Antonio Atotonilco y la sierra ubicada al norte de la ciudad de Tlaxcala.

2.4 Fisiografía

Tlaxcala se ubica en la sub-provincia fisiográfica denominada “Lagos y Volcanes de Anáhuac”, conformada por grandes sierras volcánicas alternados con amplios vasos lacustres. En esta sub-provincia se encuentran algunas de las elevaciones más altas del país, como son: el Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Zitlaltépetl, Zinantécatl y el Matlalcueyetl o Malinche. Las unidades fisiográficas que lo conforman se mencionan a continuación (Figura 2.3):

- Complejo de la gran Sierra Volcánica y la sierra de laderas abruptas. Está integrado por La Malinche, la orilla norte de la sierra Nevada, la ladera intermedia de Tláloc, la sierra de Tlaxco y la de Ixtacamaxtitlán, las dos últimas presentan laderas muy empinadas con pendientes de más del 30 %.
- Lomeríos suaves. Comprenden los cerros de El Carmen Tequexquitla.
- Lomerío de colinas redondeadas. Se conforman por la ladera superior de Tláloc, cerro Chame, Llanos de Soltepec, cerro Huintepec, cerro Tliltepec, Peñón del Rosario; cerros Xochitecatl y Zompitecat y la meseta de Acutlapilco.
- Lomeríos de colinas redondeadas con llanuras. Representados por las llanuras de El Rosario y los llanos de Piedras Negras.
- Lomeríos de colinas redondeadas con cañadas. Se encuentran localizados en la meseta de Nanacamilpa.
- Gran meseta con cañadas (barrancas). Conforman todo el Bloque de Tlaxcala.
- Meseta escalonada con lomeríos. Se presenta en los lomeríos de Huamantla y las mesetas de Terrenate-Altzayanca.
- Gran llano con lomeríos. Corresponde a la cuenca de Puebla, al valle de Huamantla y el valle de Guadalupe.
- Llanura con subsuelos rocosos y con lomeríos. Se ubica en las cuencas de Calpulalpan, de Tlaxco y de Apizaco.
- Vaso lacustre. Abarca la laguna de El Carmen Tequexquitla, en la región Oriente.
- Valle con laderas tendidas. Ubicado en la porción central del Estado, en el valle de Teotlalpan.



2.5 Hidrología superficial

El territorio del Estado forma parte de las regiones hidrológicas del Río Balsas (RH-18) que cubre el 77% del Estado, Tuxpan–Nautla (RH-27) con sólo el 4 % y Alto Pánuco (RH-26) que abarca el 19% del estado (INEGI, 1985) (Figura 2.4).

- En la región hidrológica 18, Río Balsas se identifican la subcuenca del Río Zahuapan (A), la cuenca del río Atoyac (D) y la cuenca cerrada Libres-Oriental (H):

- o Cuenca del río Zahuapan. Es la corriente superficial más importante del Estado, nace en la sierra de Tlaxco y lo recorre de norte a sur, siguiendo un curso sinuoso que recoge los escurrimientos de numerosos ríos y barrancas, de los cuales los más importantes en su margen oriental son los ríos Atenco, Los Negros y la barranca de Briones, que provienen de las aguas continentales y de la Malinche; y en su lado poniente, las barrancas de Texopa, Huehuetitla y Totolac (SECODUVI, 1997), que en conjunto drenan el 52% (2 033 km²) de la superficie del Estado.

En esta cuenca se localiza el mayor almacenamiento del Estado, que es la presa de San José Atlanga (capacidad de 54 400 000 m³), la segunda en importancia es la presa de San Fernando (con 2 700 000 m³) además de otras como la presa El Centenario, Las Cunetas, El Sol y La Luna, además de la Laguna de Acuitlapilco.

- o Cuenca del río Atoyac. Representa al río del mismo nombre, nace en la Sierra Nevada, es producto de los deshielos del flanco norte del Iztaccíhuatl y se interna en Tlaxcala por el suroeste, en el municipio de Tepetitla de Lardizábal, siguiendo por el municipio de Nativitas, tramo donde recibe las aportaciones de numerosos arroyos hasta su confluencia con el río Zahuapan, en el municipio de Xicohtzinco, en el extremo sur del Estado.

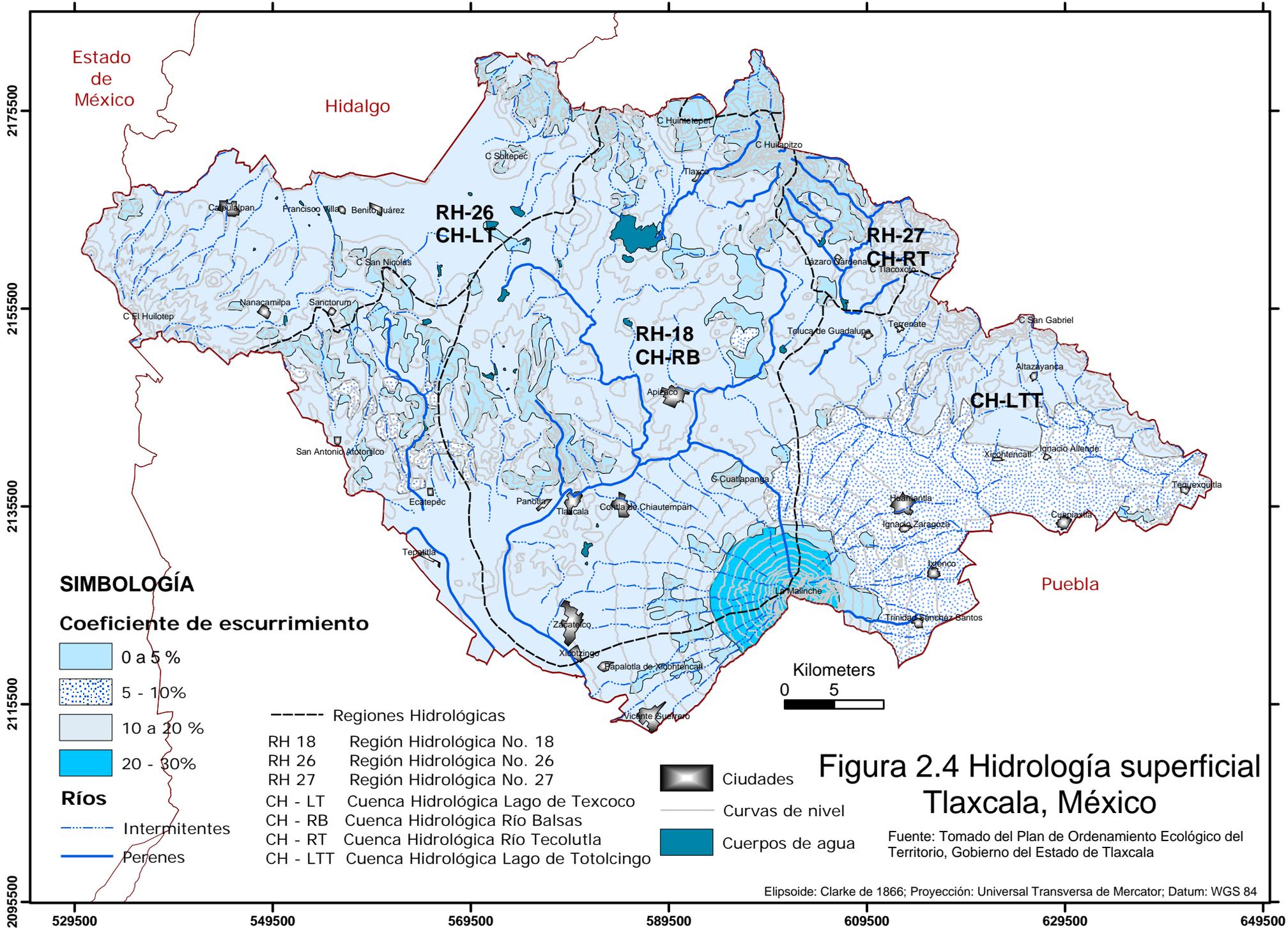
En su recorrido por el valle de Nativitas, los ríos Zahuapan y Atoyac son aprovechados para el riego agrícola, y es en este valle donde encuentra la mayor superficie de riego del Estado.

- o Cuenca cerrada Libres-Oriental (H) Ocupa el 25% del territorio estatal, recoge los escurrimientos provenientes de la vertiente sur de la sierra de la Caldera y los de las vertientes norte y oriente de La Malinche, que forman numerosas barrancas que depositan sus aguas en las planicies de inundación de Huamantla y Cuapiaxtla, donde los materiales acumulados obstruyen el drenaje natural y facilitan la infiltración del agua pluvial y fluvial, lo que ha originado áreas de considerable aridez e incluso salobres, como ocurre en el municipio de El Carmen Tequexquitla.

La cuenca oriental es alimentada por arroyos de caudal sólo durante la época de lluvias, que desaguan o terminan en las pequeñas lagunas y ciénagas que existen en los valles de los municipios de Terrenate, Huamantla y Cuapixtla, entre los que destacan el Río Guadalupe o Xonecuila, el río Meca y el río Alzayanca, todos ellos de régimen intermitente.

En el municipio del El Carmen Tequexquitla se encuentra una porción de la laguna de Totolcingo, la cual tiene una gran importancia en el ámbito estatal, además de contar con tres manantiales, uno de los cuales es de aguas azufradas y varios pozos para la extracción de agua para consumo humano y riego (Tlaxcala, 1998).

- **Región Hidrológica 26, Alto Pánuco o Valle de México.** Se localiza al poniente de Tlaxcala y ocupa el 19% de su superficie (SECODUVI, 2000). Parte de las aguas de esta región provienen de los escurrimientos de los municipios de Calpulalpan, Nanacamilpa, Sanctórum y Benito Juárez, que entre otros, dan origen a los ríos San Marcos, Calpulalpan y Amaxac, que se dirigen hacia el norte para formar la laguna de Atocha, en los llanos de Apan, donde se ubica la subcuenca del mismo nombre, en el Estado de Hidalgo.
Las cuencas de parte poniente del estado (municipio de Calpulalpan), están integradas por dos pequeños ríos que se originan en la Sierra Nevada; entre los principales ríos se encuentra el Amaxac, el cual atraviesa las barrancas de Calpulalpan, con aproximadamente 7 km en su recorrido; posteriormente se une a pequeños ríos ramales de temporal y termina en la laguna de Atocha, cerca de los límites con Hidalgo.
- **Región Hidrológica 27, Tuxpan-Nautla (cuenca B).** Se localiza en la parte central del Golfo de México. Una de sus corrientes proviene de una pequeña porción del noreste de Tlaxcala la cual cubre en el Estado un 6%, en la vertiente de la sierra de La Caldera. El territorio de esta sierra es escarpado, lo que da origen a numerosos arroyos que corren por barrancos, siendo el más importante el Tenexac, que forma la presa Tenexac y Lázaro Cárdenas; el río cambia de nombre aguas abajo por el de río Apulco, el cual es tributario del río Tecolutla, que forma la subcuenca del mismo nombre.



2.6 Edafología

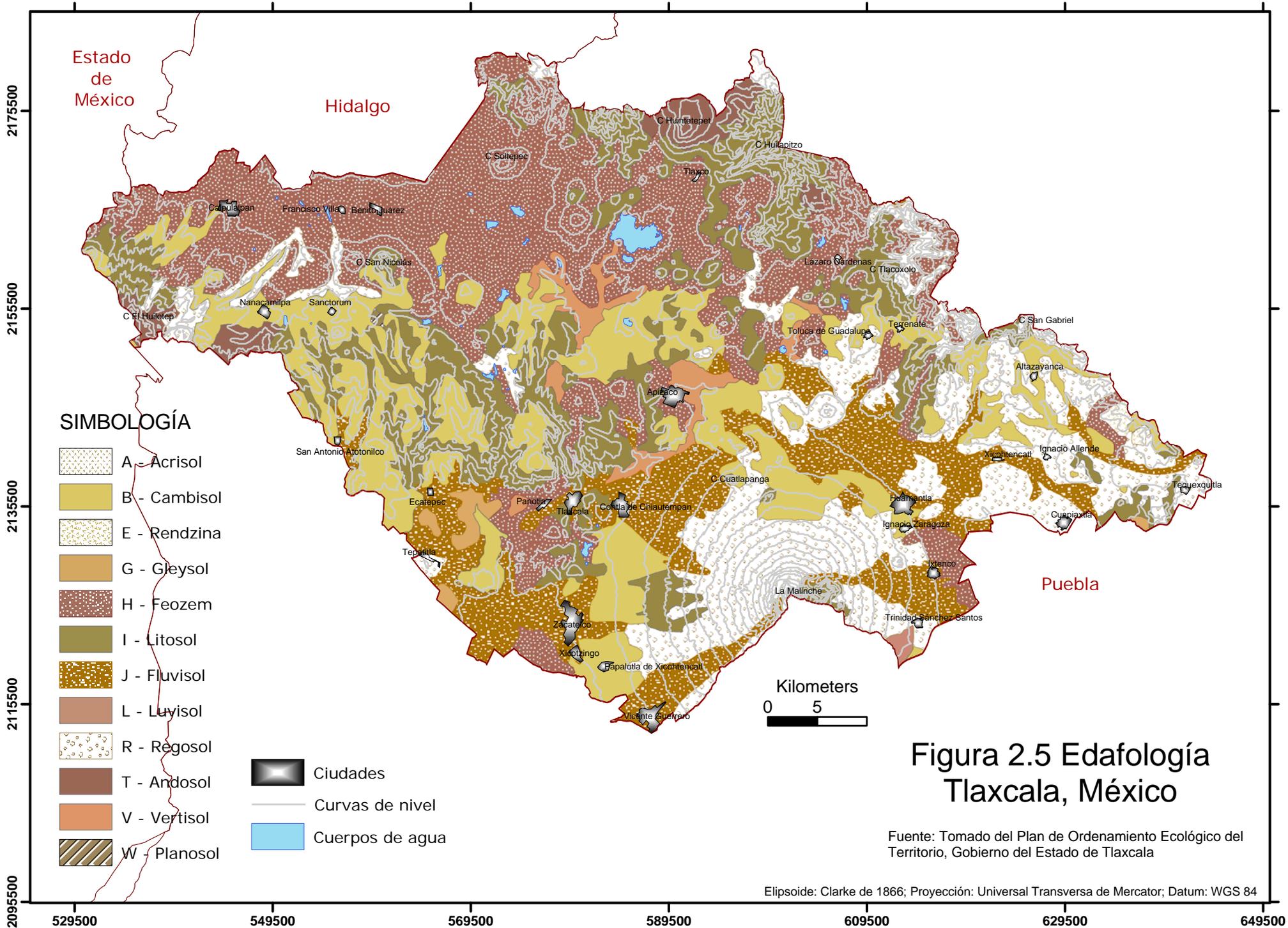
El mapa edafológico usado es el generado por Gobierno del Estado de Tlaxcala en el Plan de Ordenamiento Territorial (Figura 2.5), el cual tomó como base la unión de 32 coberturas: 17 a escala 1:250000 y 15 a 1:1000000 (SEMARNAT-INE - Tlaxcala, 2001). A continuación se describe brevemente cada unidad de suelo.

- FEOZEM (H). Se encuentra distribuido hacia el norte de Tlaxcala, en la bajada al oriente del Volcán la Malinche, se tienen las subunidades Feozem háplico (Hh) y Feozem calcárico (Hg).
- CAMBISOLES (B). Es una unidad que se extiende de este a oeste en el Estado y son suelos en proceso de cambio, se tienen las subunidades cambisol eútrico (Be) y cambisol húmico (Bh).
 - o Cambisoles éutricos (Be) (suelos de color café claros): Conformados de sedimentos toba limosos arenosos, arena franco limosa a franco. Dentro de la unidad se encuentran en proporciones pequeñas tepetates, así como Regosoles (R). En áreas de mucho relieve también se encuentran las unidades de Cambisol húmico y tepetates como asociaciones de los suelos. Genéticamente no existen diferencias con los Cambisoles crómicos, exceptuando la coloración y su material base más arenoso. Para aprovechamiento agrícola esta unidad es más apta que la de los Cambisoles crómicos, ya que el material arenoso se deja labrar mejor, inclusive en ausencia de la capa coluvial. Sin embargo, la capacidad aprovechable del agua se reduce de forma matemática ya que este suelo tiene una textura más gruesa; además, la mayoría de estas áreas se encuentran al noreste de Tlaxcala que es seco. Otro factor favorable consiste en que debido a su textura arenosa, no se endurece tanto el suelo al researse como los suelos café amarillentos; por lo tanto, se evalúa su utilidad agrícola más favorablemente.
 - o Cambisoles éutricos (suelos de barro desarrollados débilmente): Constituidos de coluvios de cenizas volcánicas con poco humus, arena migajosa a limo arenoso, migajoso. Muestran características de Fluvisoles por lo que es difícil diferenciarlos incluso en campo. Las áreas con este suelo son utilizables agrícolamente, ya que en el material parental ya se habían desarrollado con Andosol (T) o Cambisol (B) antes de su traslocación produciendo una fertilidad del suelo bastante elevada. Es más fácil de cultivar estos suelos, que aquellos derivados de sus asociaciones con los Andosoles (T) consistentes de sedimento toba. En Tlaxcala sólo existe cerca de Atotonilco en el municipio de Ixtacuixtla, colindante con Puebla.
 - o Cambisoles húmicos (Bh) (suelos de barro café oscuro): Consisten de material coluvial de sedimentos toba, café oscuro, frecuentemente

cubierto por una capa coluvial, arena limosa a migajón limoso sobre arena limosa a migajosa. Dentro de esta unidad se encuentran en áreas pequeñas tepetates y suelos de barro café amarillentos (Bc). Se extienden al noroeste de Tlaxcala, así como al pie de la ladera sur de la sierra de Tlaxco y del Peñón.

- REGOSOL (R). Se localizan en diferentes sitios del estado principalmente en el volcán La Malinche, Suelos sueltos, sin desarrollo, su perfil está constituido por un horizonte A o C y los limita la roca. Se tienen las subunidades Regosol eútrico (Re) y dístrico (Rd). Presentan una estructura arenosa o franca, de color claro, sin estructura o bloques subangulares pequeños, pobres en materia orgánica (0,3 a 1,2 %); su capacidad de intercambio catiónico es baja (5,8 a 7,5 meq/100 g), conductividad eléctrica de 2 dS/m, pH varía de ácido (5,1) a neutro (7); el porcentaje de saturación de bases es menor o mayor de 50%, contenido de calcio varía de 4,1 a 12,8 meq/100 g; el contenido de Na, K, Mg y P es bajo, estos materiales están dedicados a la agricultura de temporal con rendimientos de bajos a moderado, así como los que se llegan a utilizar en agricultura de riego con rendimientos variables; la aptitud para la agricultura es baja y deben dedicarse a la actividad forestal.
 - o Regosol eútrico (Re): Son suelos valiosos para la agricultura con elevada capacidad aprovechable de agua pero muy propensos a la erosión y consisten de sedimentos toba (cenizas volcánicas sedimentadas) arena migajosa, hasta limo arenoso, poco contenido de humus. Otra forma como se presenta Regosol Eútrico, consiste en sedimentos arenosos toba, limo arenoso y arena fina, los cuales se encuentran principalmente al noroeste de Huamantla y en algunas partes al centro y sur del mismo municipio.

- LITOSOLES. Los litosoles tienen un espesor menor a 10 cm, generalmente están limitados por un material duro continuo y coherente (roca). Su textura varía de migajón, arenoso a franca, el color que presenta es negro, café oscuro o gris, la estructura en bloques subangulares de tamaño medio, solamente tienen un horizonte A, son pobres en materia orgánica (0,5 %) y su capacidad de intercambio catiónico es moderada (13,5 meq/100 g); su conductividad eléctrica es menor a 2 dS/m, el pH ligeramente ácido (6,7); tienen una saturación de base mayor del 50%, el contenido de calcio y magnesio es moderado y del sodio, potasio fósforo es bajo. Su espesor es una limitante para su uso en agricultura, siendo su uso potencial el de vida silvestre. Este tipo de suelo está compuesto básicamente por sedimentos lacustres muy compactados del terciario y arena migajosa limosa.



- FLUVISOLES (J). Constituido de material aluvial reciente, se localiza en la bajada del volcán de la Malinche y al norte del municipio de Huamantla; sólo se presenta la subunidad fluvisol éutrico. Son de textura arenosa, sin desarrollo y estructura, de color gris o blanco; pobres en materia orgánica (0,5%), la capacidad de intercambio catiónico es baja (5,5 – 7,5 meq/100 g), su conductividad eléctrica es menor de 2 dS/m, son suelos ácidos o ligeramente ácido, el porcentaje de saturación de bases es mayor al 50%, el contenido de calcio y fósforo es alto y pobre en sodio, potasio y magnesio, están dedicados a la agricultura con rendimientos moderados.

Los Fluvisoles constan de sedimentos recientes, coluviales de granulación cambiante, frecuentemente contiene carbonatos. Aparece en todas las laderas bajas y al pie de elevaciones, rellena ranuras pequeñas, asociándose intensivamente en los pedregales hasta con los Litosoles. Si existe un fondo lo suficientemente profundo, se vuelven suelos con una capacidad del agua aprovechable alta, que siempre podrá ser utilizada agrícolamente si no existe una pendiente demasiado pronunciada.

- o Fluvisoles migajosos limosos consisten de coluvios recientes y localmente de sedimentos coluviales; migajón limoso a franco arenoso-arcilloso, localmente contiene carbonatos. Se le encuentra desde Zacatelco hacia Panotla y Tlaxcala así como en Apizaco y Muñoz. A pesar de que se presentan algunas dificultades al labrar, estos suelos son valiosos para el cultivo por su gran capacidad de intercambio.
- o Fluvisoles arenosos migajosos limosos. Consisten de sedimentos recientes fluviales y localmente coluviales, limo arenosos, migajoso y migajón limoso, localmente contiene carbonatos. En conjunto con los Fluvisoles limosos es la unidad más frecuente entre los Fluvisoles, que se encuentran en todas las cuencas, así como al pie de las laderas de La Malinche, de la Sierra Nevada y también en las planicies. Estos suelos se prestan de manera excelente para el cultivo de cualquier índole porque combinan una alta capacidad de agua aprovechable con un complejo de intercambio suficiente para los elementos nutritivos.
- o Fluvisoles arenosos limosos: Consisten de sedimentos recientes fluviales y coluviales localmente, arena limosa a migajosa, capa de humus débil y con carbonatos. Su distribución es frecuente sobre todo al pie nordeste de La Malinche. En la unidad hay suelos de fondos muy profundos, de muy fácil laboreo con un alto potencial de filtración de agua; se consideran los mejores suelos para el cultivo. Su posición al pie de la ladera de los volcanes los acerca al nivel del agua de fondo por lo que son los suelos que mejor se pueden irrigar.

- Fluvisoles arenosos gravosos: Consisten de sedimentos coluviales y fluviales recientes, en algunos sitios de arena gravosa a gravosa arenosa, rica en bloques. Siempre se encuentran en posiciones intermedias y bajas de la ladera en el área de descarga en todas direcciones de las barrancas que tienen un cauce radial. Las descargas más fuertes con Fluvisoles se encuentran en la ladera oriental de La Malinche, que a la altura de Ixtenco tiene una amplitud de 15 Km. Su utilidad para la agricultura se considera baja, por un lado el material pétreo evita un cultivo intenso con máquinas o herramientas, por el otro, la capacidad de agua aprovechable, por encontrarse sobre barro, se considera mediana y, además, al material fino de la tierra le hace falta complejos de intercambio para los elementos nutritivos de la misma.
- Fluvisoles gravosos arenosos: Se encuentran al pie de La Malinche y también son aprovechables, pero su potencial de producción está reducido por su contenido de grava. Consisten de sedimentos localmente fluviales o coluviales, arena gravosa y, en algunos sitios, migajón arenoso gravoso.
- VERTISOL (V). Son suelos ricos en arcilla, duros y se agrietan cuando están secos, masivos y chiclosos cuando están húmedos, se localizan al oeste de Calpulalpan, oeste de Tlaxco y de Apizaco. Tienen una estructura masiva del 30 % de arcilla, de color negro o rojo oscuro, con un drenaje interno deficiente, solamente tienen un horizonte A o un C, la capacidad de intercambio catiónico es alta (27,5 meq/100 g) y la materia orgánica que contiene varía de 2,1 a 3,9 %, su conductividad eléctrica es menor de 2 dS/m; pH ligeramente ácido (6,2) y un porcentaje de saturación de bases es mayor a 50%, el contenido de Ca, P y Mg es alto, en cambio con respecto al Na, y K es bajo. Son suelos con buena aptitud agrícola, actualmente están dedicados a la agricultura.
- ANDOSOLES (T). Se localizan al noreste de Tlaxco y oeste de Calpulalpan principalmente. Son suelos derivados de materiales ricos en vidrio volcánico, bajos en densidad y ricos en minerales halófanos. Son suelos de textura franca o de migajón arenoso, de color negro o café oscuro, estructura migajosa o bloques subangulares de tamaño pequeño, ricos en materia orgánica (1,8 – 3,6%) y su capacidad de intercambio catiónico es alta (22,2 a 28,4 meq/100 g), la conductividad eléctrica es menor a 2, el pH es ácido o ligero (5,4 – 6,29) y su porcentaje de saturación de bases puede ser menor o mayor a 50%; el contenido de Ca y Mg es moderado, el contenido de Na, K y P es bajo, algunos de estos suelos están dedicados a la agricultura aunque su vocación natural es forestal.
 - Andosoles húmicos (Th): De las laderas intermedias, húmedas, templadas, consistentes de cenizas andesitas antiguas, franco a

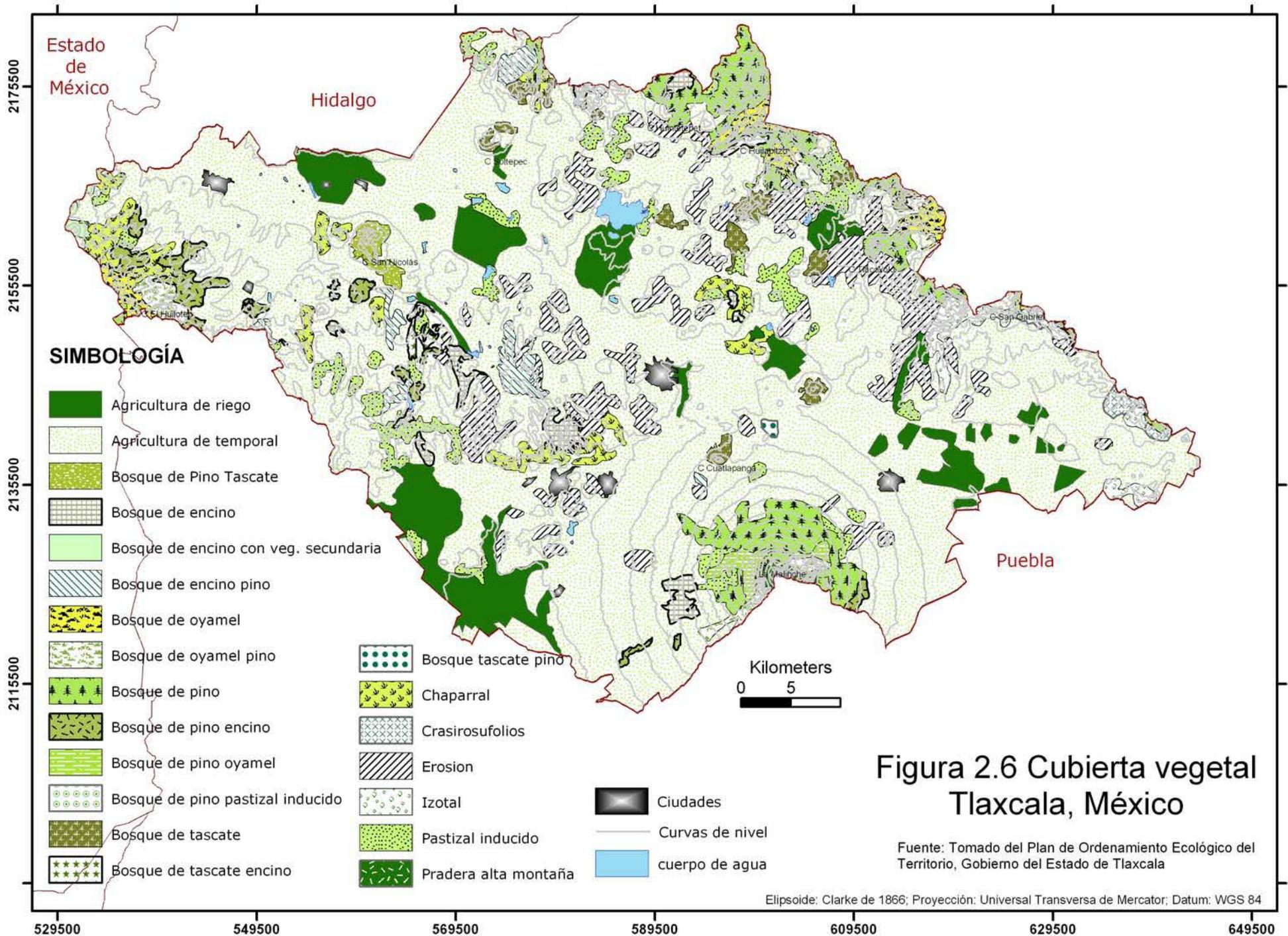
franco arcilloso. Las características típicas de los Andosoles están desarrolladas en esta unidad. El contenido de sustancia orgánica se encuentra en el suelo superior al 15% y a un metro de profundidad todavía alcanza el 10%.

- GLEYSOLES (G). Presentan problemas de oxidación – reducción por estar saturados con agua durante gran parte del año, se ubican al oeste de Nativitas en una superficie muy reducida. Son de textura arcillosa, color oscuro en la superficie y gris en el subsuelo, la estructura es de bloques subangulares de tamaño medio, pobre en materia orgánica, tienen una capacidad de intercambio catiónica alta (24 meq/100 g), conductividad eléctrica menor de 2 dS/m, y un pH alcalino (8), el porcentaje de saturación de bases cercano al 100 % y el contenido de Ca y Mg es alto, el Na y K es bajo.
- REDZINA (E). Este suelo es de color negro que descansa sobre material calcáreo, se localiza al norte de Tequixquitla. Presenta una textura arenosa, estructura granular o migajosa, son ricos en materia orgánica (3,5%), pH neutro o ligeramente alcalino, tienen una conductividad eléctrica menor a 2 dS/m, su capacidad de intercambio catiónico es alta (27,2 meq/100 g), el porcentaje de saturación de bases es mayor al 50 %, su contenido de Ca y Mg es alto y bajo el de Na y K.
- LUVISOL (L). Solamente se localiza al sur del municipio de Zitlaltepec. Son suelos con una saturación de bases mayor del 50%, su textura es migajón arcilloso, con estructura prismática o bloques subangulares de tamaño grande, el color es rojo, ocre o café, tiene poros finos, es pobre en materia orgánica (1,1 a 1,2 %), la capacidad de intercambio catiónico es alta (21,8 meq/100 g); su conductividad eléctrica es menor a 2, el pH es ligeramente ácido, el contenido de Ca, Mg y P es moderado, bajo en Na y K.

2.7 Cubierta vegetal

Se emplea el mapa de cubierta vegetal presentado por el Gobierno del Estado de Tlaxcala (Figura 2.6). De éste se observa que en la mayor parte del Estado predomina la agricultura de temporal seguida de la agricultura de riego y que aún se presentan zonas de bosques de encino, al norte de Tlaxcala; bosques de pino y oyamel, como en el Parque Nacional La Malinche. Esta información es importante y se retomará en el apartado de análisis de los resultados.

Los cultivos del estado son: acelgas, alfalfa verde, avena forrajera verde, amaranto, betabel, brócoli, calabacita, canola, cebada en grano, cebolla, chícharo, cilantro, col, coliflor, durazno, elote, espinaca, haba, lechuga, maíz, papa, trigo, zanahoria, entre otros.



3. ANTECEDENTES

3.1 Ambiente y metales pesados.

En la actualidad se reconoce que algunos elementos traza son esenciales (Fe, Cu, Co, Mo y Zn) o benéficos (V, Cr, Ni, Se y B) para el crecimiento de las plantas y la salud y nutrición humana y otros son potencialmente tóxicos (por ejemplo Cd, Hg y Pb). La vida de un organismo depende completamente de su capacidad para regular la captación, asimilación, compartimentación intracelular y desplazamiento intercelular de metales traza. De esta forma todos los organismos, desde una bacteria hasta el hombre, han desarrollado diferentes mecanismos para obtener los nutrientes esenciales del ambiente, utilizarlos o almacenarlos dentro de compartimentos intracelulares y regular su abundancia dentro de las células, para prevenir una acumulación excesiva y su toxicidad (Lobinski et al., 2006). Por ello es importante estudiar la forma en que se dan las relaciones metal – organismo.

Por otro lado, la geosfera es la fuente original de los metales, pero también se encuentran en la biosfera e hidrosfera. Los metales pueden estar presentes en forma sólida, líquida o gaseosa, así como en elementos individuales y en compuestos orgánicos e inorgánicos, por ejemplo en la geosfera están presentes en minerales, vidrios y fundidos (*melts*); mientras que en la hidrosfera se los encuentra en forma de iones disueltos y complejos, coloides y sólidos suspendidos. En la atmósfera pueden estar presentes como elementos y compuestos gaseosos, así como en partículas y aerosoles. (Larocque y Rasmussen, 1998) (Figura 3.1)

Tanto la hidrosfera, atmósfera, biosfera y geosfera se consideran reservorios, es decir, medios dinámicos donde se llevan a cabo diversos mecanismos que promueven la transferencia de los metales entre las diferentes “esferas” y es importante resaltar que la actividad antropogénica ha modificado las velocidades de éstos al alterar las características de los diferentes reservorios.

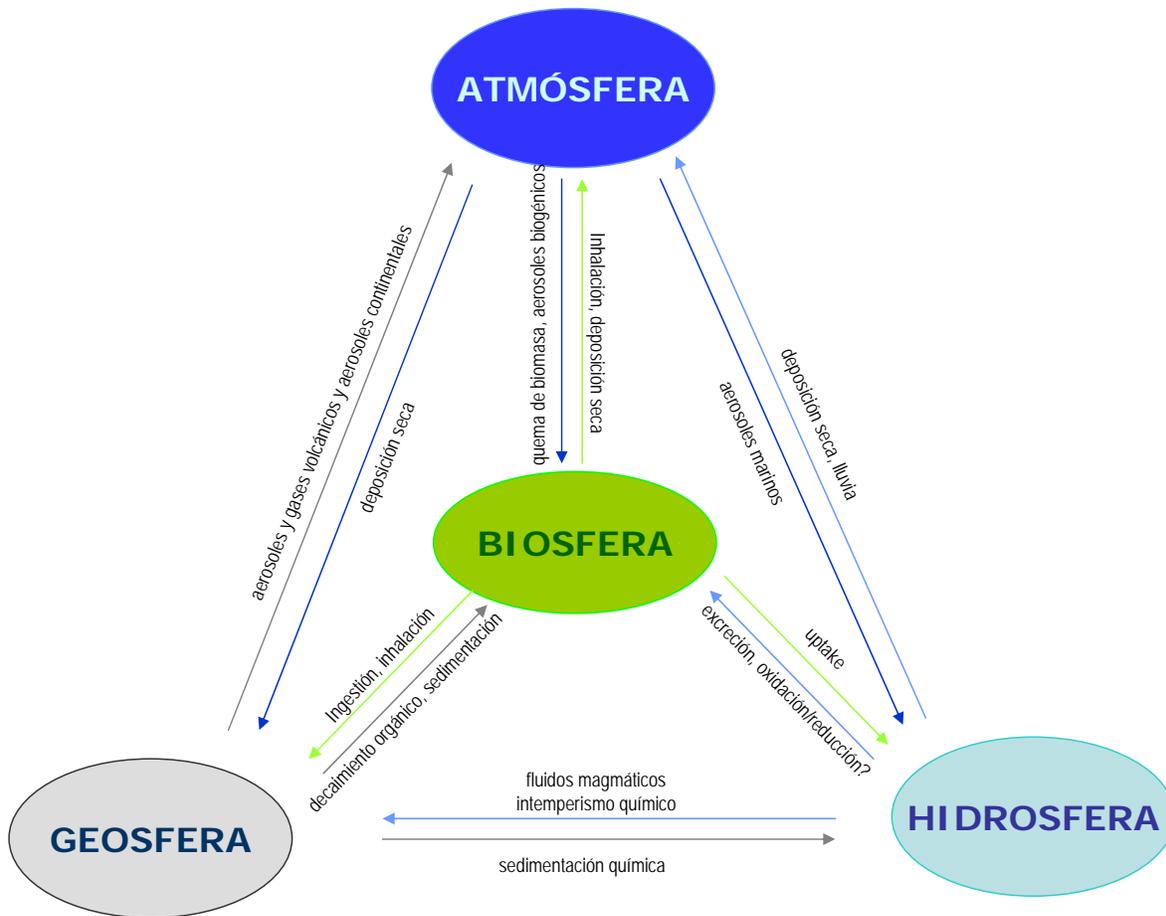


Figura 3.1 Esquema de la interacción de los metales y los diferentes reservorios. Según Larocque and Rasmussen (1998)

Un ejemplo de la dinámica comentada lo constituye el intemperismo de jales mineros y la generación de drenaje ácido de minas. El drenaje ácido resulta de la oxidación natural de sulfuros metálicos, cuando éstos son expuestos al oxígeno atmosférico y agua meteórica o de proceso. Méndez-Ortiz (2003) llevó a cabo un análisis de jales procedentes de una mina tipo Skarn Pb-Zn-Ag, uno de los yacimientos de mayor importancia en México, encontrando que aún cuando los residuos procedentes de la explotación y beneficio de este tipo de mineralizaciones polimetálicas, no presentan evidencias características de la generación de DAR-LM cuando se someten a una alteración, dependerá de sí se generan las condiciones necesarias, incluso a pH cercanos de la neutralidad, para la movilización de arsénico en solución a partir de la oxidación de arsenopinita (FeAsS), lo que mostró el potencial de contaminación por arsénico en aguas y suelos asociados a este tipo de sitios mineros, incluso en medios semiáridos.

Por medio de la precipitación de minerales y la adsorción de metales, se lleva a cabo el intercambio entre la geosfera e hidrosfera. Los metales se transportan de la geosfera hacia la atmósfera a través de aerosoles continentales, gases

volcánicos y partículas, tales como suelo, sedimentos, y cenizas. La deposición seca y húmeda, son mecanismos por los cuales los metales pueden ingresar a la parte sólida de nuestro planeta. Cabe resaltar el interés que existe en la actualidad sobre la influencia de las emisiones industriales (quema de combustibles fósiles, incineración de residuos, entre otras), con el fin de distinguir las especies de metales generadas por éstas en comparación con las de origen natural para evaluar el impacto sobre nuestro planeta (Stimac, 1996); (Nriagu, 1989); (Henderson et al., 1996); (Rawlis et al., 2002)

Los metales pueden entrar a la biosfera a través de la ingestión de sólidos, la ingestión o absorción de líquidos y la inhalación de sólidos y gases. La química de los iones juega un papel clave en la evolución bioquímica. Existen diversos estudios que muestran el papel que juegan los metales en la salud, el medio ambiente y la economía (Sheppard, 1998); (Guthrie, 1992); (Fyfe, 1996); (Johannesson et al., 2002)

Tomando en cuenta lo expuesto líneas arriba, a continuación se presenta una breve descripción de los elementos que se analizan en este trabajo.

3.1.1 Arsénico (As)

Es un elemento traza con propiedades de semimetal. Puede existir en cuatro valencias: -3, 0, +3 y +5 y en ambientes fuertemente reductores como arsénico elemental y arsina (-3). En condiciones moderadamente reductoras la forma de arsenito (+3) puede dominar pero el arsenato (+5) es, generalmente, el estado de oxidación estable en ambientes oxigenados. Las sales de arsénico exhiben un intervalo de solubilidades acuosas dependiendo del pH y el ambiente iónico (WHO, 2001). Asimismo, la biodisponibilidad y toxicología de este elemento dependen de su estado químico, el As (+3) es más tóxico que el As(+5).

El Arsénico es un constituyente natural de la corteza del planeta. El promedio de contenido de As en la corteza varía entre 1 y 2 mg As/kg y está ampliamente distribuido en una variedad de minerales (más de 200 especies) El más común de los minerales de arsénico es la arsenopirita, FeAsS y este elemento se asocia con diversos tipos de depósitos minerales, especialmente los que incluyen la mineralización de sulfuros (Bhattacharya et al., 2002). Las concentraciones de As en varios tipos de rocas ígneas van de < 1 a 15 mg As/kg, con valores medios de 2 mg As/kg. Concentraciones similares (<1 – 20 mg As/Kg) se encuentran en areniscas y calizas y se pueden hallar concentraciones mayores en rocas sedimentarias arcillosas (> 900 mg As/kg). (WHO, 2001)

El promedio de emisión atmosférica de As de fuentes naturales es cerca de 12,2 ton. Estas fuentes incluyen polvo arrastrado por el viento producto de la intemperización de la corteza, incendios forestales, brisa marina, arroyos termales y

geisers. La emisión de As de erupciones volcánicas es variable y puede alcanzar valores altos de 8,9 ton/año (Monte Santa Helena en los Estados Unidos) y bajos como de 0,04 ton/año (Poas en Costa Rica).

Por otro lado, se han reportado concentraciones de arsénico en agua de mar de 2,6 $\mu\text{g/L}$, mientras que en aguas superficiales y subterráneas no contaminadas el intervalo de concentración es de 1 a 10 $\mu\text{g/L}$. En forma natural, en cuerpos de agua cercanos a zonas de mineralización de sulfuros las concentraciones encontradas pueden ser mayores (100 – 5000 $\mu\text{g/L}$) (Fordyce et al., 1995) Por no ser parte del objetivo del presente estudio no se mencionan a detalle los mecanismos que hacen posible tales concentraciones.

La concentración local de As ocurre en yacimientos hidrotermales de arsenopinita, oropimente, realgar y otros sulfuros. En ambientes sedimentarios, el As se presenta como oxianiones sorbidos en sedimentos oxidados. En suelos, el arsénico puede existir en diferentes formas. El suelo cuenta con propiedades de auto-limpieza ya que la adsorción y coprecipitación de arsénico inorgánico ocurre en partículas de arcillas; además, forma precipitados insolubles con azufre y cationes, particularmente hierro como en la arsenopinita. Los valores de fondo (*background*) de As en suelos, depende de la litología de las rocas madre, de igual manera la especiación y movilidad está influenciada por características físicas como son el tamaño de grano, mineralogía y características químicas.

El uso de los compuestos de arsénico incluye pesticidas, conservadores de madera, vidrio, aleaciones y componentes electrónicos, entre otros. Los compuestos como son el metilarsenato monosódico ($\text{NaCH}_3\text{HAsO}_3$), metilarsenato disódico ($\text{Na}_2\text{CH}_3\text{AsO}_3$) y el ácido dietilarsenico ($(\text{CH}_3)_2\text{AsO}(\text{OH})$) se usan ampliamente en la agricultura como fungicidas, insecticidas y herbicidas. El As_2O_3 se emplea para decolorar el vidrio en la manufactura de fármacos y el arsénico elemental con las aleaciones de Pb, Cu, Sb, Sn, Al y Ga.

3.1.2 Cadmio (Cd)

El cadmio es un elemento metálico (número atómico 48) que raramente es encontrado en estado puro y su distribución promedio es 0,1 mg/kg en la corteza de la Tierra. Se le puede encontrar en diferentes tipos de rocas y suelos y en agua, así como en el carbón y el petróleo. Entre sus fuentes naturales se hallan los depósitos de zinc, plomo y cobre. (Nordberg y Nordberg, 2002)

Este elemento puede formar diversas sales lo que le confiere gran movilidad, y sus respectivos efectos, en el ambiente. (WHO, 1992) Muchos compuestos inorgánicos son solubles en agua, por ejemplo cloruro, sulfato acetato mientras que el óxido y sulfuros tienen baja solubilidad.

El Cd se encuentra comúnmente asociado con el Zn y su concentración promedio es de 0,1 mg/kg aunque niveles mayores se encuentran en rocas sedimentarias. La actividad volcánica es la fuente natural más importante de cadmio. En suelos superficiales se encuentran concentraciones entre 0,1 y 0,4 mg/kg (Page et al., 1981) La media en suelos volcánicos es de 0,001 a 1 mg/kg y en suelos volcánicos se han encontrado niveles mayores a 4,5 mg/kg. En sedimentos de ríos y lagos la concentración reportada varía de 0,03 a 1 mg/kg (Korte, 1983).

La aplicación de fertilizantes fosfatados representa una entrada directa a suelos agrícolas, naturalmente el contenido de cadmio en los fertilizantes varía dependiendo del origen de la roca. Aunque en menor proporción, la aplicación de lodos de drenaje municipal también se considera una entrada de Cd a los suelos, cuestión que se desconoce para el área de estudio. El Cd se usa para proteger el acero, hierro, cobre, latón y otras aleaciones de la corrosión.

3.1.3. Cobalto (Co)

El Cobalto es un elemento magnético relativamente raro. Sus dos estados de valencia son Co (+2) y Co (+3) y ocurre naturalmente como arseniuros, óxidos y sulfuros. El Cobalto se comporta como otros metales pesados, formando quelatos¹ como el Fe, Mn, Zn y el Cu. La concentración de Co en la materia seca de las plantas esta entre 0,02 a 0,5 ppm. En los suelos la concentración está entre 1 y 40 ppm (Marschener, 1986). Junto con el Níquel, el Cobalto es un elemento traza de importancia para el crecimiento de diversas especies de bacterias. El Co es un elemento esencial para la formación de la vitamina B12, sin embargo, la administración excesiva produce el desarrollo de bocio y reduce la actividad de la glándula tiroides.

3.1.4 Cobre (Cu)

El cobre pertenece al grupo IB de la tabla periódica. En el ambiente se encuentra comúnmente con una valencia de 2, pero puede existir con valencias 0, +1 y +3. El Cu se presenta en diversas sales minerales y compuestos orgánicos, así como en forma metálica. El metal es poco soluble en agua, las sales o soluciones moderadamente ácidas, pero pueden ser disueltas en ácido nítrico y sulfúrico así como en soluciones básicas de hidróxido de amonio o carbonato.

Las fuentes naturales de cobre incluyen el viento $0,9 - 15 \times 10^3$ ton; partículas volcánicas, $0,9 - 18 \times 10^3$ ton; incendios forestales, 0,1 a $7,5 \times 10^3$ mg/kg; brisa marina, $0,2$ a $6,9 \times 10^3$ ton, y procesos biogénicos $0,1 - 6,4 \times 10^3$ ton, (WHO, 1998) mientras que las fuentes antropogénicas son: fundidoras, industria del hierro, estaciones de energía, aunque la mayor liberación de cobre a la tierra es de

¹ Un quelato es una forma soluble y estable formada cuando ciertos átomos de una molécula orgánica llamada agente quelatante o ligando se unen a metales catiónicos cediéndoles electrones.

los jales de las minas de cobre y lodos del drenaje. El Cu se usa en la fabricación de fertilizantes, bactericidas, fungicidas, alguicidas, sistemas de distribución de agua, preservadores de maderas, galvanoplastia, entre otros.

La abundancia natural en la corteza de la Tierra del Cu se ha estimado en 60 mg/kg y $2,5 \times 10^{-4}$ mg/l en el mar, según (Lide y Frederikse, 1993). Aparece en minerales tales como la cuprita (Cu_2O), malaquita ($\text{Cu}_2\text{CO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$), calcopinita (CuFeS_2), calcocita (Cu_2S) y bornita (Cu_5FeS_4). El contenido de Cu en rocas ígneas va de 4 – 200 mg/kg y de 2 – 90 mg/kg en rocas sedimentarias (Cannon et al., 1978) En la atmósfera se encuentra asociado con las partículas sólidas y es a través de la sedimentación, deposición seca y lluvia que llega al suelo. En el Cu que se halla en el agua resulta del intemperismo del suelo y descargas de la industria y plantas de tratamiento de lodos.

El cobre es componente de diversos enzimas de las plantas e interviene en la fotosíntesis formando parte de las proteínas que participan en el transporte de electrones. También está relacionado con la síntesis de proteínas, ya que su deficiencia al igual que la de zinc paraliza la síntesis de éstas. Las deficiencias de cobre son también características de suelos calizos y de suelos arenosos muy lavados. Por el momento no se conocen antagonismos de este elemento con otros.

3.1.5 Cromo (Cr)

El cromo (Cr) se presenta en forma elemental y valencia +3 en los principales depósitos, cabe mencionar que la mayor parte del Cr hexavalente se deriva de las actividades humanas. La concentración de Cr varía en promedio de 5 a 1800 mg/kg en rocas graníticas y rocas ultrabásicas respectivamente. La forma mineral más importante es la cromita ($\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$) aunque raramente se encuentra pura. Otro mineral raro es la Crocoita (PbCrO_4), el cual se encuentra en regiones con vetas de plomo y se puede hallar asociado con piromorfita, cerusita, wulfenita (WHO, 1988a). En rocas ígneas, hay una correlación positiva entre el cromo y el níquel, magnesio y silicio. El intemperismo de rocas produce complejos de cromo que son casi exclusivamente en el estado trivalente. Según (Merian, 1984) del 100% de entradas, las emisiones antropogénicas representan el 70% a través de la producción y uso del metal, quema de combustibles fósiles; y menos del 1% se debe a emisiones volcánicas.

3.1.6 Molibdeno (Mo)

El molibdeno no existe libre en la naturaleza, sino en forma de minerales, siendo los más importantes la molibdenita y la wulfenita. Este elemento ocupa el lugar 56 en abundancia entre los elementos de la corteza terrestre y junto con el Fe, Cu, Zn, Mn, Cl, B, V y Co se considera un micronutriente, es decir, un elemento esencial

para el desarrollo de la planta y que se requiere sólo en cantidades usualmente menores a 50 mg/kg de tejido. La función fundamental del molibdeno en el metabolismo vegetal está relacionada con la fijación del nitrógeno atmosférico y con la asimilación de los nitratos. El molibdeno del suelo procede de la descomposición de minerales de molibdeno: sulfuro de molibdeno, molibdato de plomo, molibdato cálcico, molibdato ferroso y polimolibdatos complejos. Este es el único elemento cuya carencia se acentúa al aumentar la acidez del suelo (Salminen et al., 2004).

El molibdeno es importante en la osificación de los animales, ejerciendo por otra parte, un efecto inhibitor específico sobre las fosfatasas, enzimas esenciales para la asimilación de fósforo orgánico por las plantas. Además, es muy importante su acción catalítica para fijación del nitrógeno atmosférico por medio de las bacterias. Por otra parte suelos alcalinos y de salinidad media promueven su absorción (BC-MELP, 1986).

Por otro lado, este metal se usa principalmente en aleaciones con acero. Dicha aleación soporta altas temperaturas y presiones y es muy resistente, por lo que se utiliza en la construcción, para hacer piezas de aviones y piezas forjadas de automóviles. El alambre de molibdeno se usa en tubos electrónicos y el metal sirve también como electrodo en los hornos de vidrio. El sulfuro de molibdeno se usa como lubricante en medios que requieren altas temperaturas (Olivares, 2005)

3.1.7 Níquel (Ni)

El promedio del Níquel en la corteza terrestre es cerca del 0,008% (Mason, 1952) y es el quinto elemento más abundante por peso, después del hierro, oxígeno, magnesio y sílice; y el vigésimo cuarto más abundante en la corteza. La mayor parte del Ni se presenta en minerales de Fe-Mg de rocas ígneas y metamórficas (por ejemplo olivino) Las concentraciones de níquel van de 2 a 60 mg/kg y de 50 a 200 mg/kg en rocas ígneas ácidas y básicas respectivamente, en cambio las lateritas que se desarrollan durante el proceso de intemperismo pueden contener más de 10 veces la cantidad de níquel en la roca original (WHO, 1991).

El Ni en suelo puede existir en forma de minerales inorgánicos cristalinos o precipitados, adsorbido o en complejos en cationes orgánicos (por ejemplo materia orgánica) o cationes inorgánicos (por ejemplo arcillas) y complejos metálicos quelados en solución de suelo. En sistemas acuáticos, el Ni se presenta en sales solubles en partículas de arcillas o materia orgánica, o asociada con partículas orgánicas tales como ácidos húmicos, fúlvicos y proteínas. En la atmósfera, este elemento existe en forma de aerosoles, principalmente producidos por la superficie oceánica, viento y cenizas volcánicas, incluso por incendios forestales.

3.1.8 Plomo (Pb)

En prácticamente, todo el mundo se puede hallar el plomo (Pb), la concentración promedio de Pb en la corteza es entre 10 y 20 mg/kg) La fuentes naturales de este elemento son las emisiones volcánicas, intemperismo geoquímico, los aerosoles marinos y su fuente geológica fundamental son las rocas metamórficas e ígneas. Los minerales donde se encuentra este elemento son la cerrusita (PbCO_3) y la anglesita (PbSO_4), siendo la galena (PbS) el más importante, el cual se presenta depósitos asociados a otros minerales, principalmente aquéllos que contienen zinc (WHO, 1977). Otros constituyentes de los depósitos de plomo son la plata y el cobre y en menores cantidades el oro, bismuto, antimonio, arsénico, cadmio, estaño, galio, talio, indio, germanio y telurio.

Cabe mencionar que el contenido natural de Pb en suelo y ecosistemas terrestres, es difícil de determinar por la influencia significativa de las actividades humanas. El Pb en suelo puede ser relativamente insoluble (como sulfato carbonato u óxido), soluble, adsorbido en arcillas, en materia orgánica coloidal adsorbido y coprecipitado con sesquióxidos, incluso formando complejos con compuestos orgánicos (US-EPA, 1986); (WHO, 1989). En general, la concentración de plomo, en aguas superficiales o subterráneas no es mayor a 10 $\mu\text{g/l}$. El plomo en la atmósfera se encuentra en especies tanto inorgánicas como orgánicas, derivadas principalmente de la quema de combustibles fósiles y aditivos de este elemento.

3.1.9 Antimonio (Sb)

El antimonio, desde el punto de vista químico, está muy relacionado con el arsénico. Se combina fácilmente con el arsénico, el plomo, el estaño, el zinc, el hierro y el bismuto. Este metaloide se encuentra en la naturaleza combinado con diversos elementos, en especial en minerales que contienen estibina (Sb_2S_3), valentinita (Sb_2O_3), kermesita ($\text{Sb}_2\text{S}_2\text{O}$) y senarmontita (Sb_2O_3).

Los usos del Sb van desde la fabricación de semiconductores y la producción de aleaciones, a las que proporciona dureza, resistencia mecánica, resistencia a la corrosión y un bajo coeficiente de fricción.

3.1.10 Talio (Tl)

Este elemento tiene valencias +1 y +3, se considera más tóxico que el mercurio, cadmio, cobre y plomo. En sistemas geoquímicos, comúnmente se presenta el talio monovalente, el cual sustituye al potasio y rubidio en silicatos como feldespato y mica, de esta similitud se deriva que pueda ser absorbido fácilmente por las plantas e integrarse a la cadena trófica. El contenido de Talio en rocas ígneas varía de 0,05 a 1,7 ppm (Nriagu, 1998). En sistemas hidrotermales, el talio se une a sulfuros como la piritita, escalerita o marcasita. Entre los minerales que forma este

elemento están la lorandita (TlAsS_2) y la crokesita ($(\text{Cu,Ag,Tl})_2\text{Se}$). (WHO, 1996) La intemperización de estos sulfuros conduce a la dispersión del talio en rocas sedimentarias, hidróxidos de hierro y manganeso, y materia orgánica, incluyendo el carbón. La fuente antropogénica principal de este elemento es la explotación de yacimientos, tratamiento y fundición de sulfuros.

Por su toxicidad, el Tl se usó como rodenticida por primera vez en Alemania en la década de los 20's, también el TlSO_4 en azúcar, se usó como insecticida para el control de las hormigas (Smith and Carson, 1977). Los usos de este elemento Junto con Hg, el talio forma una aleación líquida que congela a -60°C y se utiliza para termómetros de bajas temperaturas y el sulfuro de talio se emplea en la fabricación de células fotoeléctricas sensibles a las radiaciones infrarrojas.

3.1.11 Vanadio

El vanadio es un elemento raro y se encuentra en la corteza terrestre en concentraciones cercanas de 0,015 g/kg, en la misma proporción que el cromo, estroncio y zirconio. Se conocen cerca de 70 minerales, entre los principales se encuentran la vanadita, la descloicita cuprodescloicita, carnosita, roscoelita y patronita; cabe mencionar que el petróleo y el carbón mineral también son fuente de este elemento (WHO, 1988b).

El vanadio en suelos está relacionado al material parental y aunque se puede hallar en todos los perfiles, su concentración es mayor en el horizonte A debido a la actividad biológica de las plantas. Los niveles de este elemento en la atmósfera se deben principalmente a aerosoles marinos y polvo continental y sólo una parte pequeña es producto de la actividad volcánica (Zoller et al., 1973).

El V se utiliza en pequeñas cantidades para la manufactura de caucho, plásticos, cerámicas y otros productos químicos. El óxido de vanadio es el compuesto más utilizado, y se emplea principalmente como aleación para dar resistencia a un tipo especial de acero, en partes de automóviles y también como catalizador en la industria de plásticos.

3.1.12 Zinc

Este elemento es calcófilo, tal como el cobre y el plomo y raramente se encuentra en estado de oxidación cero. Entre los minerales del zinc están la esfalerita (ZnS), el más importante, la esmitsonita (ZnCO_3) y la hemimorfita. La media de zinc en suelos y rocas aumenta en el siguiente orden: arena (10 – 30 mg/kg), roca granítica (50 mg/kg), arcilla (95 mg/kg) y basalto (100 mg/kg) (Adriano, 1986)

El zinc está relacionado directamente con el crecimiento vegetal debido a su participación en la biosíntesis de algunas fitohormonas: las auxinas. Las deficiencias

de zinc se presentan fundamentalmente en suelos calizos, debido a que el zinc sólo es soluble a pH ácido o con una riqueza elevada en fósforo (P_2O_5), derivado al antagonismo entre ambos iones.

El principal uso industrial del Zn es como cubierta anticorrosivo para hierro o acero. También se utiliza en compartimentos de baterías secas y como metal de aleación en la fabricación de latón y bronce. El óxido de zinc es el compuesto más ampliamente utilizado en la industria, principalmente, en la de pinturas, plásticos, cosméticos, farmacéutica, tintas, textiles, eléctrica y electrónica.

3.2 Estudios previos

3.2.1 China

Uno de los primeros proyectos en la elaboración de mapas geoquímicos fue el Proyecto de Reconocimiento Nacional y Geoquímica Regional de China, que inició en 1978 y aunque estaba orientado a la exploración minera, durante la planeación, se adoptó un enfoque del mapeo geoquímico hacia estudios en agricultura y geoquímica ambiental. Después de 5 años de investigación y estudios piloto, en 1983 se inició el muestreo a gran escala de todo el país. Para 1992 más de 4,6 millones de km^2 del territorio chino se habían cubierto, descubriendo miles de nuevos afloramientos minerales, incluidos 400 de oro (Xuejing y Tianxiang, 1993).

El muestreo incluyó diversas zonas (montañas, desiertos, semidesiertos, bosques y pantanos) en materiales como suelo y sedimentos, entre otros, de los cuales se determinó el contenido de 39 elementos Ag, As, Au, B, Ba, Be, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, G, Hg, La, Li, Mn, Mo, Nb, P, Pb, Sb, Sn, Sr, Th, Ti, U, V, W, Y, Zn y Zr, Al, Fe, Ca, Mg, K, Na y Si). Se determinaron simultáneamente 24 elementos mayores y menores por medio de espectrometría de emisión atómica con plasma de acoplamiento inductivo (AES-ICP) o espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF), mientras que para los 15 restantes se usó espectrofotometría de absorción atómica con llama (AAS), espectrometría de absorción atómica con horno de grafito (AAS), espectrometría de fluorescencia atómica previa generación de hidruros (HG-AFS), , electrodo de ión selectivo (ISE), polarografía (POL) y espectrometría de fluorescencia láser (LFS) como métodos analíticos como espectrometría. Para reducir los sesgos entre laboratorios, ya que un gran número de muestras se analizó en más de 20, se elaboró un procedimiento para el monitoreo del control de calidad.

Este proyecto no sólo fue importante por el descubrimiento de nuevos yacimientos minerales, sino por la innovación de la tecnología de mapeo geoquímico en China. Por otro lado, se realizaron otros estudios enfocados a problemas ambientales, por ejemplo, en las montañas de Yeshan en la provincia Hebei. En este proyecto se

consideró un área de 10 000 km² y se correlacionaron mapas de cultivos de maíz, arroz, soya, sorgo y cacahuate con los mapas geoquímicos de Cu, Pb, Zn, As, Cd, H, Mo, Cr, Co, F y B, tomando en cuenta, además, tasas de enfermedades comunes de la región como diabetes mellitus, problemas cardiacos y carcinoma de esófago. Los resultados arrojaron que la tasa de mortalidad de carcinoma de esófago fue ligeramente mayor en áreas donde la concentración de Mo era mayor en el condado de Funing y que las bajas concentraciones de Cr podrían estar correlacionadas con daños cardiacos e hipertensión y diabetes mellitus.

3.2.2 Suecia y Finlandia

Otro trabajo fue el programa de mapeo en Suecia y Finlandia durante la década de los 80's (Gustavsson et al., 1994). Este proyecto surge con fines de exploración, y se muestrearon suelos glaciares cubriendo un área de 470 000 km² con un total de 83400 muestras. Por la parte de Suecia, la base de datos incluyó 12 700 muestras cubriendo un área de 190 000 km², con una densidad de muestreo aproximada de 1 muestra/16 km², como trayectoria de muestreo se eligieron los caminos, además de terrenos planos y depresiones topográficas. Las muestras se compusieron de al menos 5 submuestras de cada sitio de muestreo. Las muestras se tomaron a una profundidad cercana a 1 m del horizonte.

En Finlandia se recolectaron cerca de 70 700 muestras para un área de 280 000 km², el muestreo se realizó a través de una malla de 2 km X 2 km y al menos se tomó una muestra en cada celda. La densidad del muestreo fue de 1 muestra/4 km², excepto para el Au, para el cual fue de 1 muestra/16 km² y para la composición de las muestras se emplearon de 3 a 5 submuestras. La profundidad de muestreo fue de 1.5 m, lo que correspondió al horizonte C.

El programa de mapeo geoquímico en ambos países eligió un tamaño de partícula menor a 0,06 mm y se determinaron las concentraciones de 14 elementos (Al, Au, Ba, Ca, Co, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Ni, P, Ti y Zn). Como medio de digestión se utilizó el agua regia caliente e ICP- AES para la lectura de las concentraciones, excepto para el Au el cual fue determinado por AAS. Los intervalos de concentración obtenidos fueron de 4,8 a 46,7 ppm y 11,7 a 72,3 de Cu, para Suecia y Finlandia respectivamente; de 5,0 a 64,5 para Ni y de 15,5 a 77,7 ppm para Zn.

En la generación de los mapas se alisaron e interpolaron los datos de campo con una malla regular de 1 km por lado entre puntos cercanos, a través de la mediana móvil ponderada, calculada dentro de ventanas circulares centradas en los puntos de la malla. Se fijó un radio de ventana de 20 km sobre toda el área y para todos los elementos.

3.2.3 Eslovaquia

Entre 1991 y 1995 se compiló el Atlas Geoquímico de la República de Eslovaquia a escala 1: 1 000 000, que incluyó 36 elementos, en conjunto con mapas que asociaron características geológicas y ecológicas a una escala 1: 200 000. En este periodo las investigaciones se concentraron en la evaluación de las concentraciones y distribuciones de elementos químicos, incluidos algunos tóxicos, en agua subterránea, sedimentos fluviales rocas, suelos y follaje de árboles (Vrana et al., 1997).

En relación a los suelos, se recolectó 1 muestra por 10 km² de los horizontes A, B y C, de suelos agrícolas y forestales, para los cuales se preparó una muestra compuesta de 3 a 5 submuestras, aunque sólo se analizaron aquéllas de los horizontes A y C por cuestiones de presupuesto. El tamaño de partícula elegido para el análisis fue menor a 0,125 mm y en la digestión se utilizaron diversos medios de acuerdo del elementos, en total 36 (Al, As, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, F, Fe, Ga, Hg, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Ph, Rb, Sb, Se, Sr, V, W, Y y Zn), por ejemplo, para Cu, Pb, Zn, Ni, Co, Cd y Mo se emplearon HF y HNO₃, para As y Sb con HNO₃ y KClO₃, previa eliminación de la materia orgánica con H₂O₂. En el control de calidad se ocuparon materiales de referencia certificados (CRM por siglas en inglés) de Estados Unidos (suelos NIST 2709, 2710, 2711, y el sedimento fluvial NIST 2704) de Canadá (STDS 2, STSD 3 Y LKSD 4), suelos de Polonia (BPMG-1 y PL1), sedimentos chinos (GBW 07309, GBW 07312), los CRM se analizaron con cada serie de 50 muestras. La base de datos comprendió 9892 muestras. Las técnicas analíticas comprendieron ICP-AES, HG-AAS, FAAS e ISE.

Como resultado para los suelos de Eslovaquia para las medianas obtenidas son para el As: 7,1 mg/kg y 6,4 mg/kg, para el Cr: 85 mg/kg y 86 mg/kg, para el Cu: 17 mg/kg, para el Sb: 0,6 mg/kg y 0,5 mg/kg y para el Zn: 51 mg/kg a 54 mg/kg en los horizontes A y C respectivamente; para el Cd se reportó, en el horizonte A, medianas de 0,2 mg/kg para suelos agrícolas y 0,4 mg/kg en suelos forestales. Los valores de los metales, en general, fueron mayores en zonas de explotación minera.

3.2.4 Suelos del mar Báltico

Este proyecto consideró suelos cultivables de 10 países alrededor del mar Báltico, una superficie total de más de 1 800 000 km², con una densidad de muestreo de 1 sitio por cada 2 500 km². (Reimann et. al., 2000) Se determinaron las concentraciones de 41 elementos Al, As, Ba, Bi, Ca, Ce, Cl, Co, Cr, Cs, Cu, F, Fe, Ga, Hf, K, La, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pb, Rb, S, Sb, Sc, Si, Sn, Sr, Ta, Th, Ti, U, U, V, W, Y, Zn y Zr) de los horizontes A (0 – 25 cm) y B o C (50 – 70 cm) en muestras compuestas de 5 a 13 submuestras colectadas en áreas de 100 m X 100 m, sólo aquéllas de Polonia y Suecia pertenecían a muestras de estudios

previos; pero en general en 8 de los 10 países participantes, el muestreo siguió el mismo procedimiento. En este trabajo las muestras se diluyeron en razón 1:6 con tetraborato de litio ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) y se fundieron en discos vítreos, los cuales fueron analizados por medio de fluorescencia de Rayos-X por dispersión en longitud de onda (WD-XRF). Adicionalmente se determinaron el pH, la conductividad eléctrica (CE), y la pérdida por calcinación (LOI) a 450 y 1030 °C. La Tabla 3.1 muestra parte de los resultados obtenidos.

Tabla 3.1 Resumen estadístico del Proyecto Suelos del mar Báltico¹

Suelos superficial (0-25 cm)					
Elemento	LD (mg/kg)	Media	Mediana	Mínimo	Máximo
		mg/kg			
Cr	3	41	32	< 3	614
Pb	4	16	15	< 4	85
V	5	48	37	< 5	258
Zn	3	52	43	< 3	264

¹Tamaño de partícula < 2mm, Técnica analítica WD-XRF.

Una observación importante fue que los patrones de los mapas señalaron claramente las 3 unidades tectónicas más grandes del área de estudio, lo que para muchos geólogos fue inesperado, ya que cada unidad tectónica consiste de una amplia variedad de tipos de rocas. Lo anterior sugiere que no sólo la litología, sino también la edad, pueden gobernar la distribución regional de muchos elementos. Los mapas geoquímicos regionales demostraron que la geología domina ampliamente la composición química de los suelos.

3.2.5 México

Los estudios que existen sobre concentraciones de metales pesados en suelos mexicanos, se refieren principalmente a zonas mineras, zonas irrigadas con aguas residuales, o bien a zonas que han representado un problema de salud pública como es el caso de la Comarca Lagunera.

Una de las zonas más estudiadas es el valle del Mezquital, y áreas circunvecinas, del estado de Hidalgo, esto debido a que ha dicha zona sido irrigada con aguas residuales por mucho tiempo. Para realizar este estudio se examinaron la concentración total así como diferentes fracciones de Cu, Cd, Pb y Zn en 4 perfiles de suelo en el distrito rural O63 en el Estado de Hidalgo (Flores et al., 1997), el cual ha sido irrigado con aguas residuales provenientes de la Ciudad de México. Los suelos presentes en el área de estudio fueron Feozem y Vertisol. Las concentraciones totales se obtuvieron a través de la digestión con HNO_3 4M a 80 °C durante 12 hr, mismas que variaron de 8,9 a 86,5 mg/kg para el Cu, de 0,86 a 5,07 mg/kg para el Cd, de 18,1 a 131,7 mg/kg de Pb y de 101 a 235,5 mg/kg

de Zn. La prueba de Mann-Whitney arrojó que no existió una diferencia significativa ($p = 0,05$) en la concentración de As total entre las muestras de suelo tomadas a profundidades de 0 – 30 y 0 – 60 cm. La [Tabla 3.2](#) muestra un resumen de los rangos obtenidos por Flores et al. (1997), así como por autores que se mencionan líneas abajo.

Uno de los antecedentes sobre este tipo de estudios corresponde al de la Comarca Lagunera ([Rosas et al., 1999](#)), en el que se midieron los niveles de As en muestras de suelo agrícola, agua, leche y alfalfa. El contenido total de As en las muestras de suelo, en partículas menores a 177 μm , se obtuvo a través de la digestión con $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$ y analizadas por AAS. El rango de As total en suelo fue de 11 a 30 $\mu\text{g/g}$; sin embargo, la fracción de As extraíble no fue mayor al 12% del total en el horizonte de 0 a 30 cm. Además, se usó el coeficiente de Spearman para calcular las correlaciones entre los niveles de arsénico de los diferentes materiales, encontrando que éstas fueron significativas entre el arsénico inorgánico total y el arsénico (III) y (V) tanto en agua subterránea, suelo (0 – 30 cm) y alfalfa (hojas y raíces).

El sureste de la Ciudad de México fue objeto de otra investigación con objetivos similares. En este caso se analizaron suelos forestales y urbanos expuestos a diferentes condiciones de tránsito vehicular. Como medio de digestión se usó una mezcla de ácidos ($\text{HCl}/\text{HNO}_3/\text{HClO}_4$) en una parrilla de calentamiento, mientras que en la determinación del contenido de los elementos se utilizó la técnica del ICP-MS ([Morton-Bermea et al., 2002](#)). En general el suelo que presentó mayores concentraciones de metales pesados fue el urbano bajo condiciones elevadas de tráfico: Cd 1,6 mg/kg; Cu 98,2 mg/kg; Pb 1188,9 mg/kg y Zn 741,7 mg/kg (valores expresados como la concentración media); mientras que los suelos forestales dieron por resultado: Cd 1,1 mg/kg; Cu 43,5 mg/kg; Pb 49,7 mg/kg, y Zn 195,8 mg/kg.

También se han realizado estudios en zonas mineras como la de Zimapán, Hgo., en la que se examinaron las concentraciones de As, Cu, Pb y Zn en suelos superficiales, sedimentos y rocas ([Ongley et al., 2003](#)). Para la determinación de As y Zn en concentraciones mayores de 500 mg/kg, se usó la técnica de análisis por activación neutrónica (INAA) y para las concentraciones menores de Cu, Pb y Zn, se aplicó la digestión total de roca e ICP.

En otra investigación, ([Mireles et al., 2004](#)), se utilizó la emisión de rayos X inducida mediante un haz de protones (PIXE por sus siglas en inglés), en la determinación de metales pesados en dos terrenos agrícolas, Mixquiahuala, Hgo. y Tláhuac, D.F., que han sido irrigados con aguas residuales. Para los sitios antes mencionados, las concentraciones medias de Cr alcanzaron 60 y 90 mg/kg, de Co 60 y 70 mg/kg, las de Ni estuvieron entre de 40 y 30 mg/kg, de Cu 100 y 40 mg/kg, de Zn 80 y 60 mg/kg; y de Pb 45 y 70 mg/kg, respectivamente. Por la naturaleza de la técnica analítica no es necesario el empleo de algún método de digestión.

Por otro lado, se efectuó un análisis de contaminación de arsénico, cobre, plomo y zinc, en suelos, agua y sedimentos en el distrito minero de Villa de la Paz, en el estado de San Luis Potosí (Razo *et al.*, 2004). Los suelos del área de estudio fueron del tipo Litosol Eútrico asociado con Leptosoles y se eligió un tamaño de partícula menor a 600 μm de acuerdo a la distribución del tamaño de los minerales del yacimiento. Se empleó una digestión con ácido nítrico al 25% asistida con horno de microondas y espectrometría de absorción atómica (AAS) para la determinación de las concentraciones, cuyos límites de detección fueron 0,10 mg/L Pb, 0,01 mg/L Zn, 0,03 mg/L Cu y 0,0001 mg/L As. Como resultado se hallaron concentraciones de As, para la zona urbana, entre 8 y 11930 mg/kg, y de 27 a 2970 mg/kg para el Pb. En el área rural las concentraciones de As estuvieron entre 7 y 17384 mg/kg y el intervalo de Pb fue de 30 a 3450 mg/kg. En el mismo estudio se calculó la correlación de As, Cu, Pb y Zn en las muestras no observándose una relación significativa entre los elementos.

Otro planteamiento para el monitoreo de metales pesados en sedimentos y suelo, se realizó en las cuencas de los ríos Guanajuato, San Juan de Otates y Turbio, ubicados en el Estado de Guanajuato, siendo los materiales de muestreo sedimentos y suelos (Hernández-Silva *et al.*, 2005). El tamaño de grano que se eligió fue menor a la malla 100 (0,149 mm), en la digestión se utilizó un horno de microondas con una mezcla de ácidos HCl/HNO₃, y la determinación de las concentraciones se realizó a través de AAS con límites de detección de: As 0,020 $\mu\text{g}/\text{kg}$; Cd 0,2 mg/kg; Co 0,5 mg/kg; Cu 1,0 mg/kg; Cr 1,0 mg/kg; Ni 0,8 mg/kg; Pb 3,0 mg/kg y Zn 1,0 mg/kg. Los rangos de concentraciones obtenidas se muestran en la Tabla 3.2

Tabla 3.2 Comparación de las concentraciones de metales y metaloides reportados en suelos mexicanos

As	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Técnica Analítica	Fuente
NR	0,86 – 5,07	NR	NR	8,9 – 86,5	NR	18,1 – 131,7	101 – 235,5	AAS	Flores <i>et. al.</i> 1996
11 – 30 $\mu\text{g/g}$	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	AAS	Rosas <i>et. al.</i> 1997
NR	0,9 – 1,2	NR	NR	40,3 – 47,2	NR	28,8 – 76,4	165,5 – 210,7	ICP-MS	Morton-Bermea <i>et. al.</i> 2002 ¹
< 32 000	NR	NR	NR	< 12 704	NR	< 41 444	< 16 976	INAA E ICP	Ongley <i>et. al.</i> 2003
NR	NR	< 60	< 60	< 100	< 40	< 45	< 80	PIXE	Mireles <i>et. al.</i> (2004) ²
NR	NR	< 70	< 90	< 40	< 30	< 75	< 60	PIXE	Mireles <i>et. al.</i> (2004) ³
7 – 17384	NR	NR	NR	NR	NR	30 - 3450	NR	AAS	Razo <i>et. al.</i> (2004) ⁴
1,6 – 109,8	< LD	5,95 – 76,2	17 - 769	4,4 – 184,7	< 472,4	99,4 – 511,4	< 347,6	AAS	Hernández, <i>et. al.</i> 2005 ⁵
0 – 96,58	1,6 – 5,1	49 – 115,6	3 - 615	0 – 77,5	0,8 – 539,4	11,3 – 362,3	17,3 – 278,5	AAS	Hernández, <i>et. al.</i> 2005 ⁶

Nota: ¹Suelo natural; ²Mixquiahuala, Hgo; ³Tláhuac, D.F.; ⁴Suelo natural; ⁵Cuenca del Río Guanajuato; ⁶Cuenca San Juan Otates, NR: No reportados

4. METODOLOGÍA

Para el cumplimiento de los objetivos planteados en el presente trabajo se realizaron los siguientes pasos: muestreo, preparación de muestras, análisis cuantitativo, análisis estadístico para la interpretación de los datos obtenidos y generación de mapas de distribución en un sistema de información geográfico. Es conveniente mencionar que derivado del uso de los diferentes programas (*software*) en todo el documento se usa la coma para indicar los decimales.

4.1 Muestreo

El objetivo del diseño del muestreo es asegurar la obtención de información relevante de acuerdo con los objetivos de la investigación, con una fiabilidad conocida. El diseño de un muestreo puede ser a juicio o probabilístico (Sepúlveda et al., 2005). El primero se basa en criterios definidos por un especialista para elegir el sitio de muestreo, mientras que el segundo considera la teoría de la probabilidad. En la presente tesis se utilizó el primero y los criterios que se eligieron para el muestreo fueron:

- Como ruta de muestreo se eligió la trayectoria de las vías de comunicación (carreteras federales, estatales y de terracería).
- La distancia entre muestras fue entre 5 y 10 km para evitar las zonas urbanas y el punto de muestreo estuvo entre 30 y 50 m alejado de las vías de comunicación de acuerdo a las condiciones del terreno, es decir, hacia la izquierda o derecha dependiendo de la facilidad de acceso.
- Ya que gran parte de la superficie de Tlaxcala se destina a la agricultura, se eligieron para el análisis únicamente suelos agrícolas y suelos forestales y que no mostraran una evidente alteración antrópica (que serán designados en todo el documento como no agrícolas), descartando los de uso urbano, ya que es el suelo que presenta mayor alteración por la actividad antropogénica.
- Las muestras se tomaron a una profundidad de 0 – 30 cm, ya que es donde se realiza el mezclado del suelo para la agricultura y la planta puede capturar más fácilmente los metales y metaloides, dependiendo del pH, contenido de materia orgánica, potencial de óxido-reducción y humedad, factores que determinan las especies que están presentes en el suelo.

Durante el muestreo los barrenos se realizaron con pala sin pintar y se utilizaron bolsas de polietileno para almacenar y transportar las muestras. Cada punto de muestreo se localizó con un GPS marca Garmin en coordenadas geográficas y coordenadas UTM Zona 14 con Datum WGS 84. Entre abril del 2004 y julio del 2005 se tomaron 106 muestras; pero para la generación de mapas se eliminaron

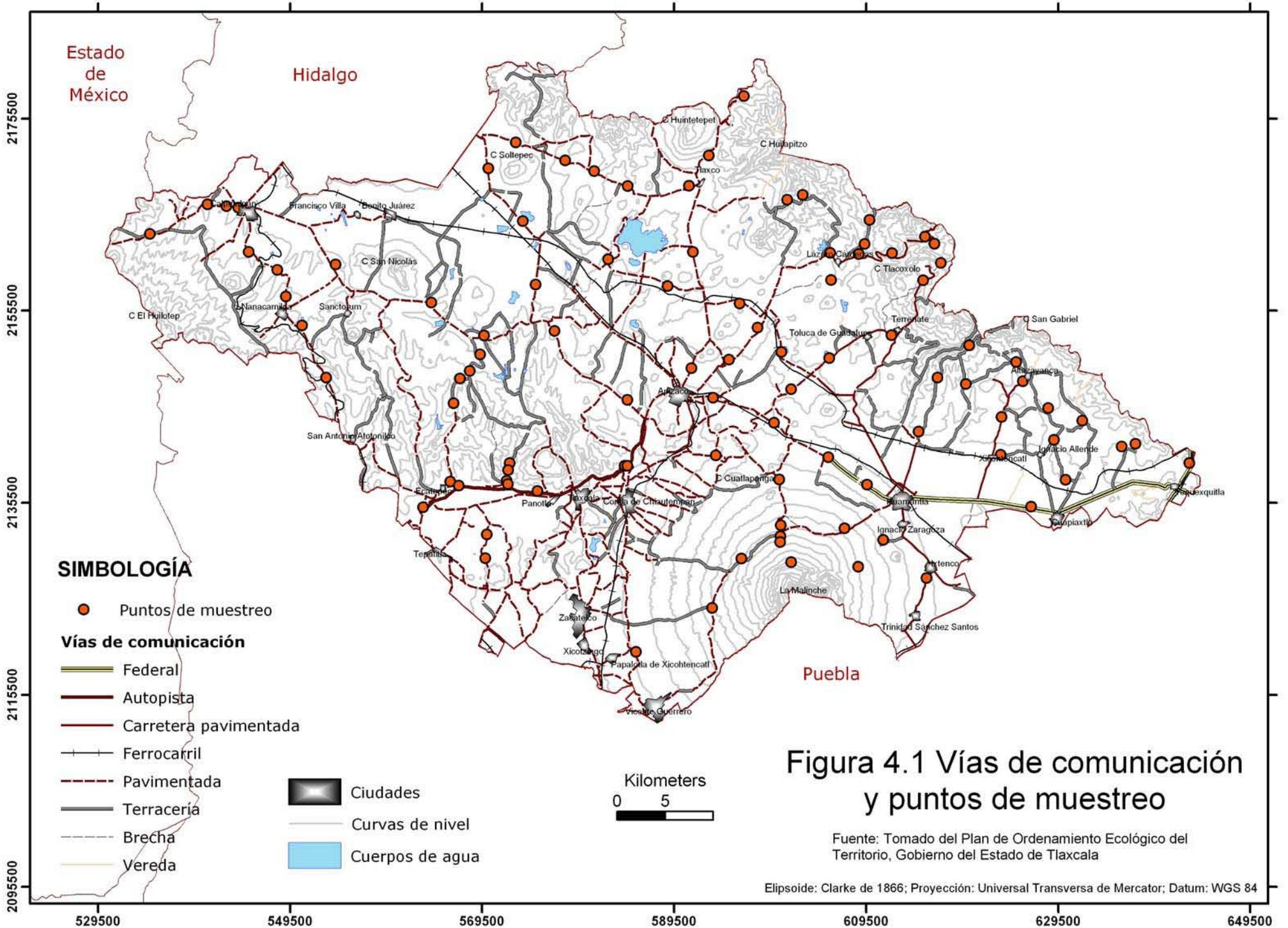
aquellas que, una vez ubicadas en el área por medio del ArcGis 8.1, excedieron los límites del área de estudio y las que presentaron coordenadas incorrectas por posibles interferencias del GPS, quedando con un total de 96 (Figura 4.1).

4.2 Digestión de muestras

Las técnicas analíticas, cuyo objetivo es determinar la concentración del elemento de interés, normalmente requieren de muestras en disolución, por lo que es necesario realizar una digestión. Esta disolución, o digestión, puede ser parcial o total dependiendo de cual sea el objetivo de la determinación.

Como paso anterior a la digestión de las muestras se retiró la materia orgánica como hojas y tallos y posteriormente se secaron y disgregaron. El secado de las muestras puede llevarse a cabo a temperatura ambiente, pero para agilizar el proceso se decidió hacerlo en un horno a temperatura menor de 40^o C, para evitar la volatilización de elementos como el As y Sb, durante un periodo entre 4 y 8 hr. y se usó un mortero de cerámica para desaglomerar la muestra. El tamaño de partícula que se eligió para el estudio fue la malla 200 (< 74 μm), ya que es la fracción donde se puede hallar la mayor concentración de metales pesados, elementos de estudio en este trabajo, por su relación con el material arcilloso (Peh y Miko, 2001).

Para la digestión, se empleó una mezcla de ácido fluorhídrico (HF) y ácido perclórico (HClO₄). Para ésta se pesó 0,2 g de muestra en vasos de PFA de 50 ml, luego se adicionó una mezcla de ácidos concentrados bidestilados (10 ml de HF y 4 ml de HClO₄) y se calentó en una parrilla de calentamiento a 120°C hasta obtener el desprendimiento de vapores blancos de HClO₄. A continuación se añadieron 2 ml de HClO₄ para eliminar residuos de HF y se evaporó hasta sequedad total. La solución final se aforó a 100 ml con 2% de HNO₃ bidestilado y 10 g/l de una solución acuosa certificada de In-Re de la marca SPEX, *High purity* utilizada como estándar interno. Ésta sirve para corregir fluctuaciones inmediatas del instrumento y efectos de matriz. Para tener un control sobre la posible contaminación entre las muestras, se efectuó la digestión de un blanco reactivo el cual lleva el mismo tratamiento que las muestras. Por cada 10 muestras se realizó un duplicado y una digestión de un material de referencia certificado (SRM 2586 – *Trace Elements in soil (contains lead from paint)*) del *National Institute of Standards & Technology*, según procedimiento establecido en el Laboratorio ICP-MS del Instituto de Geofísica, con la finalidad de verificar la calidad de preparación de muestra y análisis.



4.3 Análisis cuantitativo por ICP-MS

El análisis se llevó a cabo en el Laboratorio ICP-MS del Instituto de Geofísica a cargo de la Dra Ofelia Mortón Bermea y la M.C. Elizabeth Hernández Álvarez. Los análisis de los metales pesados fueron realizados en un ICP-MS (marca VG Elemental modelo PlasmaQuad3®) el cual tiene por características una alta sensibilidad y bajos límites de detección, además se encuentra libre de interferencias en comparación con otras técnicas analíticas (Hernández-Álvarez et al., 2004). Los metales pesados que se analizaron fueron: As, Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Sb, Tl, V y Zn.

Las condiciones de optimización se establecieron con el control de los parámetros instrumentales (flujo de gas acarreador, flujo de gas enfriador, velocidad de introducción, posición de la antorcha, voltajes de los lentes, detector y cuadrupolo). Los parámetros de operación se presentan en la [Tabla 4.1](#)

Tabla 4.1 Parámetros operacionales utilizados en ICP-MS

INSTRUMENTO: VGEElemental PlasmaQuad PQ3	
<i>Plasma de acoplamiento inductivo (ICP)</i>	
Poder de radiofrecuencia	1510 W
Potencia reflejada	< 5 W
Gas del plasma	Argón (pureza 99,999%)
Nebulizador	Meinhardt "De Galen"
Cámara de nebulización	Con atomizador enfriada por agua
Antorcha	Cuarzo, 1,5 mm
<i>Flujos del gas argón (l/min)</i>	
Gas enfriador	16
Gas auxiliar	0,68
Gas nebulizador	0,70
<i>Espectrómetro de Masas (MS)</i>	
Cono muestreador	Níquel, 1,0 mm de orificio
Cono "Skimmer"	Níquel, 0,7 mm de orificio
Región diferencial de vacío	$1,0 \times 10^{-6}$ mbar
Cuadrupolo	Hiperbólico
Detector	Multicanal en modo de pulso

La optimización de estos parámetros se realizó con una solución de 10 ug/l de Be, Co, Bi, In y Tb para cubrir un intervalo amplio de masas. La sensibilidad más alta se logró para la masa ¹¹⁵In debido a que es la masa intermedia entre los rangos de masas a analizar. Para la calibración se realizó una curva con cinco puntos: Blanco, 0,1 ppb, 1 ppb, 10 ppb y 100 ppb de una solución acuosa certificada multielemental de Metales Pesados de la marca SPEX, High purity. Además de la solución de Indio – Renio añadida como estándar interno, mencionada líneas arriba.

Para verificar la calidad de los resultados se evaluó la precisión y la exactitud del método. La precisión se valoró en términos de la desviación estándar relativa

(%DER), la cual se considera un parámetro confiable para determinar la reproducibilidad, los valores obtenidos se comparan con los establecidos (material de referencia certificado), si son menor al 10% entonces los valores se consideran satisfactorios (Wood, 1999). La precisión del procedimiento fue evaluada en términos de la desviación estándar relativa (%DER) y es para la mayoría de los elementos <10%. La Tabla 4.2 muestra los parámetros para verificar la calidad de las mediciones.

Tabla 4.2 Parámetros para verificar la calidad de los resultados

	Material de referencia (ppm)		Precisión (% DER)	Exactitud (SST)
	Soil 7 SRM	Soil 7 Lab. ICP-MS IGF		
As	13,4	13,15	4,03	0,065
Cd	1,3	1,4	5,27	0,002
Co	8,9	8,39	5,85	0,125
Cr	60	61,66	0,94	0,479
Cu	11	12,31	8,14	0,655
Mo	2,5	2,34	8,40	0,016
Ni	26	27,62	4,09	0,913
Pb	60	60,36	2,60	0,281
Sb	1,7	1,64	8,01	0,004
V	66	64,99	0,91	0,299
Zn	104	105,44	0,43	0,476

La exactitud se evaluó en términos del valor SST (*Sutarno & Steger Test*) (Morton et al., 1997) y se calcula con la fórmula:

$$X - \frac{X_{lit}}{2\sigma} \quad (1)$$

donde X_{lit} es un valor certificado o recomendado y sigma (σ) es la desviación estándar obtenida del certificado del material de referencia utilizado. La exactitud se calculó como <1, lo que indica que los resultados encontrados son satisfactorios respecto a los reportados, esto demostró que el proceso de preparación y determinación instrumental son los óptimos para la determinación de metales pesados.

4.4 Análisis Estadístico

El análisis estadístico es una herramienta que se emplea para estimar el comportamiento de una población, conjunto, finito o infinito, de elementos; ya sea que se cuente con todos los elementos de ella o a través de una muestra o subconjunto de la población. Cada conjunto de datos tiene una distribución característica, la más común es la distribución normal, la cual puede describirse en términos de algunos parámetros que se emplean para hacer estimaciones e inferencias (prueba de hipótesis) sobre la población. Existen diversos parámetros que describen de manera sintética a una población, por medio de su función de distribución, algunos son: la media, la moda, la mediana, la varianza y la desviación estándar. La elección de cualquiera de ellos depende del comportamiento de la población (Mayor-Gallego, 2004).

La mayoría de los análisis estadísticos se basan inicialmente en la suposición de que los datos cumplen con la distribución normal, como en el caso del análisis de correlación entre variables, el cual es de interés para el presente trabajo. Sin embargo, el estudio de variables espacialmente dependientes, como lo son los estudios geoquímicos y ambientales, en general, no siguen el comportamiento de distribución normal (Reimann y Filzmoser, 1999).

Tomando en cuenta lo anterior, el análisis estadístico seguido en el presente trabajo consistió en el estudio de la función de distribución de las variables medidas (concentración de As, Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Sb, Ti, V y Zn) a través de histogramas y la prueba de Shapiro-Wilk; descripción del comportamiento de las concentraciones obtenidas por medio de diagramas (o gráficos) de caja (Figura 4.2), detección de *outliers*, la evaluación de las diferencias significativas entre las concentraciones de acuerdo a los usos de suelo y el análisis de relaciones (correlación) entre los metaloides y metales pesados a través de la *Rho* (ρ) de Spearman.

Es importante diferenciar entre los histogramas y los diagramas de barras, pese a sus similitudes visuales los segundos se emplean básicamente para variables discretas, mientras que los primeros se asocian a variables de tipo continuo, agrupadas en intervalos. Un histograma se construye a partir de la tabla estadística, representando sobre cada intervalo, un rectángulo que tiene a este segmento como base. El criterio para calcular la altura de cada rectángulo es el de mantener la proporcionalidad entre las frecuencias absolutas (o relativas) de cada intervalo y el área de los mismos.

En relación a la prueba de normalidad, la prueba de Shapiro-Wilk utiliza mínimos cuadrados generalizados para realizar una regresión entre las observaciones ordenadas y los valores esperados de los estadísticos ordenados de la normal (es decir, éste ajusta una línea a los puntos del gráfico de probabilidad normal) y compara la pendiente de la línea obtenida con la desviación estándar de las observaciones. Si el parámetro p es menor a 0,05 usualmente se rechaza la hipótesis nula de una distribución normal.

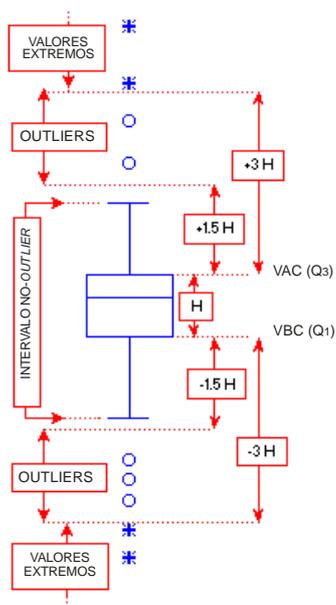


Fig. 4.2 Propiedades del Diagrama de caja

Los diagramas de caja permiten mostrar la distribución de los datos y sus estadísticos: mediana, primero y tercer cuartiles, el grado de dispersión y el grado de simetría de la distribución. Además no es necesario asumir o ajustar los datos a un modelo en particular. Las barra puede representar el intervalo no-outlier o los valores máximo y mínimo de la variable

Los cuartiles son estadísticos de posición, los cuales dividen a la población en cuatro intervalos con similar número de individuos: $Q_1 = 25\%$, $Q_2 = 50\%$ (mediana) y $Q_3 = 75\%$.

Para el cálculo de los *outliers* se utilizó el del recorrido intercuartílico (IQR). Este método se basa en los cuartiles y consiste en calcular las denominadas vallas interiores (f_1 y f_3), a partir de Q_1 , Q_3 e IQR:

$$f_1 = Q_1 - 1,5 * IQR$$

$$f_2 = Q_3 + 1,5 * IQR \quad (2, 3, 4)$$

$$IQR = Q_3 - Q_1$$

Cualquier observación (o concentración) que quede fuera de las vallas interiores se denomina *outlier* y se considera un valor anómalo que debería ser estudiado.

En relación al cuestionamiento de evaluar las diferencias de las concentraciones de los elementos entre suelos agrícolas y los no agrícolas, se empleó la prueba de Kruskal – Wallis. El contraste de Kruskal–Wallis es la alternativa no paramétrica del método ANOVA, es decir, sirve para contrastar la hipótesis de que k muestras cuantitativas han sido obtenidas de la misma población y al igual que las demás técnicas no paramétricas, ésta se apoya en el uso de los rangos asignados a las observaciones. Las hipótesis a contrastar son: H_0 : Las k muestras provienen de la misma población y H_1 : Alguna proviene de una población con mediana diferente a las demás (Rius et al., 1999).

El procedimiento consiste en ordenar de menor a mayor los m datos, después se asigna un rango (R), 1 para la lectura más pequeña, 2 para el siguiente y así sucesivamente. Si existen valores repetidos y/o lecturas por debajo del límite de detección, es decir para $< LD$, se concede la mitad del rango, por ejemplo para $< LD$'s $R = 1,5$. A continuación se suman los rangos de cada grupo de datos (o

poblaciones a comparar). Si no hay valores repetidos o lecturas por debajo del límite de detección se calcula K_w , estadístico de Kruskal – Wallis, por medio de

$$K_w = \frac{12}{m(m+1)} \sum_{j=1}^k \frac{R_j^2}{n_j} - 3(m+1) \quad (5)$$

Si existen repeticiones o valores $< LD$, se utiliza

$$K_w' = \frac{K_w}{1 - \frac{1}{m(m^2 - 1)} \sum_{j=1}^g t_j(t_j^2 - 1)} \quad (6)$$

donde g es el número de grupos de repeticiones y t_j es el número de datos repetidos en cada grupo de datos (Gilbert, 1987). Para decidir si se ha de aceptar o no la hipótesis nula se compara el valor de K_w (o K_w') con el de la tabla de la χ^2_{k-1} con $k - 1$ grados de libertad, se rechaza H_0 si el valor del estadístico supera el valor teórico de $\chi^2_{k-1, 1-\alpha}$, α es el nivel de significación y en este trabajo toma el valor de 0,5. Para el cálculo de estadístico se empleó Excel.

Por otro lado, para el análisis de las relaciones entre los elementos de una población existen diversos métodos. Si los datos siguen una distribución normal, comúnmente se usa el coeficiente de Pearson, dicho parámetro es influenciado por “outliers”, varianzas desiguales y la no – normalidad de la función de distribución. Este coeficiente mide la fuerza de la relación lineal entre dos variables y toma valores de -1 a +1. Otro método es la *Rho* (ρ) de Spearman, la cual es la versión no paramétrica del coeficiente de correlación de Pearson, toma los mismos valores y se basa en los rangos de los datos en lugar de hacerlo en los valores reales. Este coeficiente resulta apropiado para datos ordinales, y para datos agrupados en intervalos que no satisfacen el supuesto de normalidad. Los datos ordinales se refieren a una escala donde las posibilidades o variantes de un carácter, tienen una relación de orden, es decir, pueden ser ordenadas por jerarquías, por ejemplo la dureza de Mohr.

4.5 Generación de mapas geoquímicos

Con el objeto de facilitar la visualización de las concentraciones de metaloides y metales pesados, en los suelos de Tlaxcala se elaboraron mapas de distribución, para lo cual se utilizó el software comercial ArcGis 8.1 (ArcView), tales mapas se crean a partir de un conjunto de puntos tomados de un área por medio de una interpolación.

Existen diversos métodos de interpolación y en general se dividen en dos tipos: determinísticos y geoestadísticos. Todos los métodos se apoyan en la similitud que existe entre los puntos más cercanos, los métodos deterministas emplean funciones matemáticas, mientras que los geoestadísticos utilizan tantos métodos matemáticos como estadísticos. Los métodos geoestadísticos requieren que los datos cumplan con ciertas condiciones para que puedan ser aplicados, como ser

normalmente distribuidos, que la variable sea estacionaria de segundo orden, entre otros, situación que generalmente no es trivial resolver. [Weber y Englund \(1992\)](#) evaluaron 15 estimadores para determinar su conveniencia para aproximar concentraciones en sitios contaminados en 54 subconjuntos de datos. Los 54 grupos resultaron de evaluar 3 tamaños de muestras, 3 patrones de muestreo y 2 niveles de error de muestreo. Los resultados se valoraron a través del error cuadrado medio y sorprendentemente los estimadores de distancia inversa y distancia inversa cuadrada fueron mejores que los otros, seguidos de kriging logarítmico y *rank kriging*. El método elegido en esta tesis fue la Distancia Inversa Ponderada considerando que es un método sencillo, práctico y se ha empleado con éxito en proyectos de escala regional. ([Salminen et al., 2004](#)).

El método de Distancia Inversa Ponderada (IDW por sus siglas en inglés) parte de la consideración de que los puntos que están más cercanos son más parecidos entre sí, es decir, tienen características similares, en comparación con aquéllos que están más lejanos. En términos generales el algoritmo del software se basa en la Ecuación 1:

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \quad (7)$$

donde: $\hat{Z}(s_0)$ es el valor que se predice en el punto s_0 . N es el número de puntos de muestra medidos alrededor del punto que será usado en la predicción. λ_i son las ponderaciones (o pesos) asignados a cada punto medido que será usado, dichos pesos decrecen con la distancia. Finalmente, $Z(s_i)$ es el valor observado en el punto s_i

Por otro lado, por medio de la Ecuación 2 se establecen los pesos o ponderaciones

$$\lambda_i = \frac{d_{i0}^{-p}}{\sum_{i=1}^N d_{i0}^{-p}} \quad \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad (8)$$

Ello implica que conforme la distancia crece, el peso es reducido por un factor p . La cantidad d_{i0} es la distancia entre el punto de predicción, s_0 , y cada uno de los puntos medidos, s_i . El parámetro de potencia, p , influye sobre el peso, o ponderación, de los valores de los puntos medidos sobre el valor del punto de predicción; es decir, la forma en cómo la distancia crece entre el punto medido y el punto de predicción ([Johnston et al., 2001](#)). Si $p > 1$ se da mayor peso a los puntos cercanos (comparados con los pesos de puntos distantes) y da por resultado una superficie más detallada; mientras que $p < 1$ incrementa la importancia de los puntos alejados y predice una superficie más alisada ([Schloeder et al., 2001](#)). El módulo *Geostatistical Analyst* de Arcview 8.1 cuenta con la opción

de deducir el valor óptimo de “p” e incluir una orientación preferencial del terreno (anisotropía) a fin de mejorar la interpolación.

4.6 Análisis de conglomerados

Adicionalmente, se aplicó un análisis de conglomerados (en inglés, *cluster analysis*). Esta técnica estadística sirve para clasificar casos o variables en grupos cuyos miembros son similares de alguna forma. Los objetos pueden estar caracterizados por más de un atributo, en este trabajo se busca agrupar los puntos de muestreo realizados en suelos de Tlaxcala teniendo como atributos (o dimensiones) las concentraciones de As, Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Sb, Tl, V y Zn.

Existen diversos métodos de análisis de conglomerados entre los que se encuentran: a) método incompleto, en éste se realiza previamente una reducción de los datos a una o dos dimensiones aplicando análisis de componentes principales y los conglomerados se detectan por medio de un gráfico; b) de partición, en el cual los objetos se asignan exactamente a un grupo; c) de traslape, donde un objeto puede ser asignado a más de un grupo; d) jerárquicos, en éste se construye un árbol de conglomerados donde cada nodo contiene conglomerados “hijos” y e) de conglomerados difusos, en esta técnica los objetos no tienen una localización clara dentro de un grupo, es decir, la membresía se evalúa para especificar qué tan lejos el objeto está localizado de un conglomerado.

El proceso de análisis de conglomerados puede incluir: a) determinación de variables y detección de *outliers*, b) transformación y/ estandarización de variables, c) determinación de la medida de distancia, d) elección e implementación del algoritmo de conglomeración, e) evaluación de los resultados por medio de mediciones de validez de conglomerados y la interpretación de los resultados; aunque algunos estudios se realizan solamente con algunos pasos de los propuestos líneas arriba (Templ, 2003).

El análisis de conglomerados jerárquico comienza con el cálculo de la matriz de distancias entre los elementos de la muestra (casos o variables). Esa matriz contiene las distancias existentes entre cada elemento y todos los restantes de la muestra. A continuación se buscan los dos elementos más próximos (es decir, los dos más similares en términos de distancia) y se agrupan en un conglomerado. De esta forma, se van agrupando los elementos en conglomerados cada vez más grandes y más heterogéneos hasta llegar al último paso, en el que todos los elementos muestrales quedan agrupados en un único conglomerado, el trabajo de análisis consiste en descubrir la existencia de grupos homogéneos (Pardo y Ruiz, 2001)

La versatilidad del análisis de conglomerados jerárquico radica en la posibilidad de utilizar distintos tipos de medidas para estimar la distancia existente entre casos y variables (renglones y columnas de la matriz, respectivamente) y la posibilidad de seleccionar entre diversos métodos de aglomeración. En general, no existe ninguna

combinación ideal, sino que es necesario valorar distintas soluciones para elegir la más conveniente.

El análisis de conglomerados se aplicó a las variables y casos, para lo cual se empleó el programa STATISTICA, se identificaron valores anómalos y se usaron algunas medidas de distancia y reglas de enlace a los datos originales y estandarizados. Las medidas de distancia que se usaron para la generación de los mapas fueron (StatSoft, Inc., 2004):

- Distancia euclidiana (medida de disimilaridad), es la distancia geométrica en el espacio multidimensional y se calcula con:

$$D(x, y) = \sqrt{\sum_i (x_i - y_i)^2} \quad (9)$$

- Cuadrado de la distancia euclidiana, con esta medida se colocan progresivamente los pesos más grandes en objetos distantes que están más separados.
- Distancia de ciudad o Manhattan, se calcula por la suma de los valores absolutos de las diferencias entre los objetos. En esta medida de disimilaridad, el efecto de grandes diferencias (*outliers*) es bloqueado ya que no se elevan al cuadrado y en algunas ocasiones es muy similar a la distancia euclidiana.
- Distancia *Chevychev*. Esta medida de disimilaridad podría ser adecuada cuando se quiere definir dos objetos como diferentes, si éstos son diferentes en cualquiera de las dimensiones y se calcula por medio de la diferencia más grande en valor absoluto entre los valores de dos variables.
- Una manera usual de definir la distancia entre variables es a través del coeficiente de correlación de Pearson (*Pearson product moment correlation*). STATISTICA tiene la opción de calcular la distancia en la forma

$$D(x, y) = 1 - |r_{1,2}| \quad (10)$$

donde

$$r_{1,2} = \frac{\sum (Y_{i1} - \bar{Y}_1) * (Y_{i2} - \bar{Y}_2)}{[\sum (Y_{i1} - \bar{Y}_1)^2 * \sum (Y_{i2} - \bar{Y}_2)^2]^{1/2}} \quad (11)$$

lo que da por resultado que las variables con correlaciones negativas fuertes sean asignadas como pequeñas disimilaridades.

Una vez que se ha elegido la medida de distancia, se requiere definir los criterios para formar los conglomerados, es decir, una regla para determinar cuándo dos conglomerados son suficientemente similares para ser enlazados. En relación a los métodos de enlace entre las opciones que existen, se emplearon (StatSoft, Inc., 2004):

- Enlace simple o del vecino más próximo. En este método la distancia entre dos conglomerados se determina por la distancia de los dos objetos más

cercanos (vecinos más cercanos) en los diferentes conglomerados. Con esta regla, los conglomerados resultantes tienen a representar largas cadenas.

- Enlace completo o del vecino más lejano. Al contrario del método anterior, en éste las distancias entre conglomerados se determina por la mayor distancia entre los objetos y usualmente se emplea cuando los objetos de manera natural forman distintos grupos.
- Promedio no ponderado de pares (*unweighted pair-group average*). En este procedimiento, la distancia entre dos conglomerados se calcula como la distancia promedio entre todos los pares de objetos en los dos diferentes conglomerados. Este método es muy eficiente cuando los objetos tienden a agruparse naturalmente, incluso en forma de cadenas.
- Método de Ward. Este método, propuesto por Ward (1963), emplea un análisis de varianza para evaluar la distancia entre conglomerados, con lo que se intenta minimizar la suma de la distancias al cuadrado de cualquier par de conglomerados que puede ser formados en cada paso. En otras palabras, en cada paso se unen aquellos conglomerados (u objetos) que dan lugar a un menor incremento de la suma de cuadrados de las distancias intra-conglomerado. En general, este método se considera muy eficiente, sin embargo tiende a crear conglomerados de tamaño pequeño.

5. RESULTADOS

En esta sección se presenta la distribución espacial (mapas geoquímicos) del **As**, **Cd**, **Co**, **Cr**, **Cu**, **Mo**, **Ni**, **Pb**, **Sb**, **Tl**, **V** y **Zn** en los suelos del Estado de Tlaxcala, además de la estadística descriptiva, prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, histogramas y diagramas de caja para mostrar el comportamiento de las concentraciones obtenidas. Para el análisis se consideraron 96 muestras de las cuales 68 correspondieron a suelo agrícola. Las características acerca del tipo y zonas de muestreo, así como de los elementos analizados se dieron en secciones previas.

Durante el cálculo las lecturas que estuvieron por debajo del LD se sustituyeron por la mitad del valor de éste. En el caso del Cd se presentaron 39 lecturas por debajo del límite de detección, mayor al 25 %, por lo que no fue conveniente realizar el análisis estadístico ni el mapa de distribución espacial (Reimann y Filzmoser, 1999).

La [Tabla 5.1](#) muestra la estadística descriptiva de los resultados obtenidos, ésta incluye el límite de detección (LD), la media, la mediana, los valores mínimos y máximos obtenidos, el intervalo no-outlier, número de outliers y el parámetro p de la prueba de Shapiro-Wilk, el número de lecturas por debajo del límite de detección. En lo que se refiere a la prueba de Shapiro-Wilk, una de las premisas de este análisis es que si el parámetro p es menor a 0,05, entonces, usualmente se rechaza la hipótesis nula de una distribución normal. En este trabajo sólo el Cr y el Mo cumplen esta condición.

Como se mencionó en la metodología, la función de distribución normal se ve influenciada por valores anómalos (*outliers*), dichas lecturas se calcularon con el método basado en el recorrido intercuartílico (ITC) con un coeficiente de 1,5 y los elementos que presentaron datos anómalos fueron el As, Co, Cu, Ni, Pb, Sb, Tl, V y Zn ([Tabla 5.1](#)).

Para mostrar el comportamiento de las concentraciones obtenidas se emplea el gráfico de caja (*box-plot*) ([Figuras 5.1 y 5.2](#)), en los cuales la caja indica el intervalo de concentración donde se agrupa del 25 al 75 % de las muestras, la barra el intervalo no-outlier y la línea azul dentro de la caja la mediana. Si la caja es poco alta indica que el 50 % de los datos se concentra en un intervalo no tan amplio. La línea ayuda a visualizar el grado de dispersión de los datos así como la

simetría. Por ejemplo Ni, Zn, Cr y V muestran una mayor dispersión. El As y el Tl presentaron la mayor cantidad de *outliers*. La Figura 5.1b muestra un acercamiento a los gráficos de caja del Sb, Tl y Mo, para facilitar su observación.

Tabla 5.1 Estadística descriptiva

	L.D. ppb	% <L.D. .	Media	Mediana	Mín.	Máx.	Intervalo No- outlier	# outli er	S-W p <
			mg/kg						
As	0,2	5,2	20,76	6,65	< LD	96,57	< LD – 13,57	22	0,0000
Cd	0,54	40,6	--	--	--	--	--	--	--
Co	0,02	0	12,86	12,76	4,09	25,1	6,26 – 19,03	5	0,0009
Cr	0,26	0	68,57	66,39	14,08	135,66	14,08 – 135,66	0	0,4886
Cu	0,52	0	18,16	15,36	3,04	120,3	3,04 – 35,08	7	0,0000
Mo	0,87	0	1,44	1,41	0,13	3,21	0,1289 – 3,214	0	0,5489
Ni	0,41	0	28,68	26,73	0,21	125,91	0,21 – 65,08	3	0,0000
Pb	0,12	0	13,8	12,56	6,53	68,71	6,53 – 19,76	3	0,0000
Sb	0,39	5,2	0,34	0,33	< LD	1,17	< LD – 0,6948	3	0,0002
Tl	0,04	16,6	0,48	0,52	< LD	1,26	0,1392 – 0,8796	22	0,0000
V	0,037	0	90,05	83,21	33,62	177,05	33,62 – 153,55	3	0,0027
Zn	0,45	0	73,12	71,8	38,13	133,78	38,13 – 104,85	4	0,0002

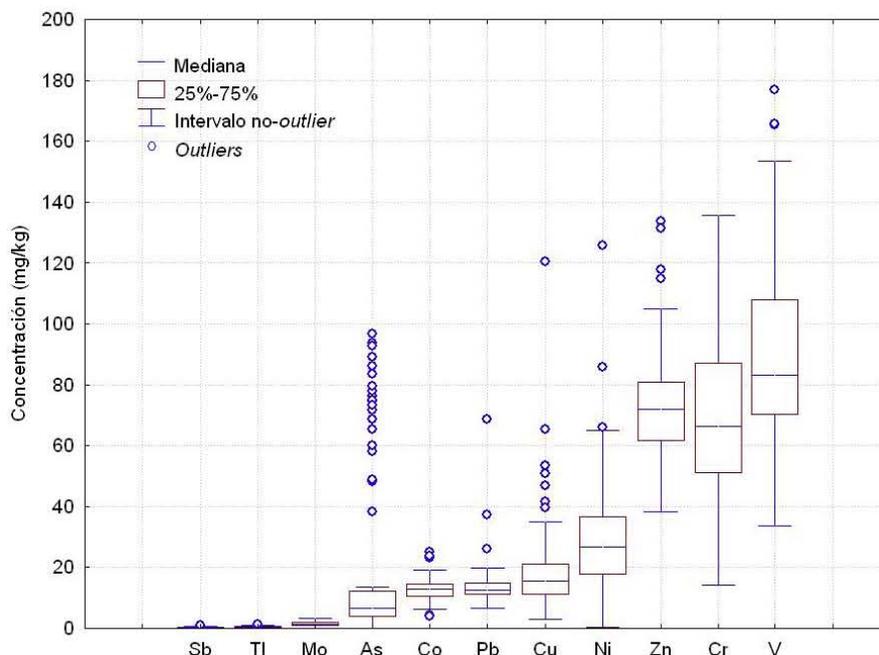


Figura 5.1 Gráficas de caja. La caja representa el intervalo donde se agrupa del 25 al 75 % de las muestras. Si la caja es poco alta indica que el 50 % de los datos se concentra en un intervalo no tan amplio. La línea ayuda a visualizar el grado de dispersión de lo datos así como la simetría. Por ejemplo Ni, Zn, Cr y V muestran una mayor dispersión. El As y el TI presentaron la mayor cantidad de outliers.

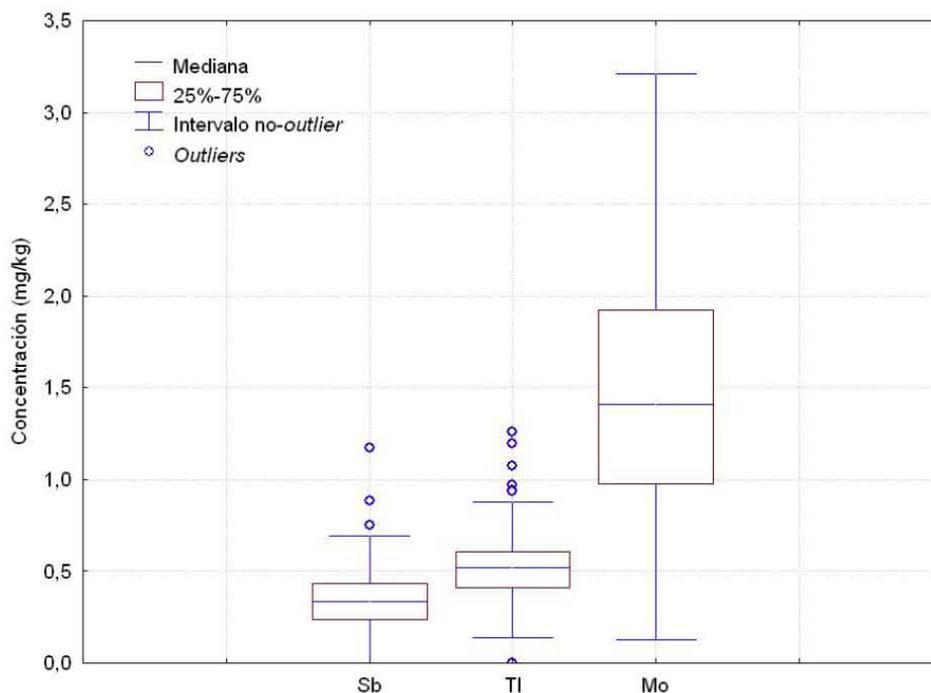


Figura 5.2 Gráficas de cajas para Sb, TI y Mo. Se observa que el antimonio y talio presentaron valores outliers, mientras que el Mo mayor dispersión.

Tabla 5.2 Contenido de As, Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Sb, Tl, V y Zn en diferentes materiales.

	Litosfera	Rocas ultramáficas	Rocas máficas	Rocas intermedias	Rocas ácidas	Lutitas	Rocas metamórficas	Areniscas	Calizas	Carbón	Suelo	Tlaxcala ¹
As	1,8 2,0 1,5	2 0,7	2 0,7	1,9	1,6 3	5	0,08	1,2 0,5	2 1,5	25 10	6	6,65 (< LD – 96,57)
Cd	0,16 0,1 0,1	0,06 0,05	0,18 0,2	0,13	0,17 0,10	0,3	ND	0,1 <0,04	0,03 0,1	1	0,35	ND
Co	23 11,6 10	80 110	30 45	20	10 4	19	24	9 0,3	1 0,1	150 10	8	12,76 (4,09 – 25,1)
Cr	93 35 35	2500 2300	230 250	100	14 10	90	162	35 35	11 5	100 20	70	66,39 (14,08 – 135,66)
Cu	53 14,3 25	80 40	90 90	60	25 12	55 45	43	25 2	7 6	20	30	15,36 (3,04 – 120,3)
Mo	1,2 1,4 1,5	0,8 0,3	1,3 1,2	1	1,5 1,2	1,5 2	1	1,3 0,3	0,4 0,3	2,7 3	1,2	1,41 (0,13 – 3,21)
Ni	56 18,6 20	1230 2000	80 130	61	8 5	70 70	70	35 2	20 5	20	50	26,73 (0,21 – 125,91)
Pb	12 17 20	0,4 0,05	6 4	16	20 20	15 22	ND	13 10	9 5	20	12	12,56 (6,53 – 68,71)
Sb	0,3 0,31 0,23	0,1 0,1	0,35 0,2	0,2	0,3 0,3	1,35 1	ND	0,2 0,05	0,15 0,15	2 2	1	0,33 (<LD – 1,17)
Tl	0,9 0,75 0,75	0,18 0,05	0,25 0,18	0,5	1,9 1,1	1,3 1	1	1,5 0,4	0,1 0,05	3	0,2	0,52 (<LD – 1,26)
V	190 53 60	87 80	300 260	150	70 70	150	150 130	30 130	19 15	40	90	83,21 (33,62 – 177,05)
Zn	68 52 71	50 60	84 100	73	58 50	95 100	136	40 20	20 40	50	90	71,8 38,13 – 133,78)

Recopilación elaborada por [Salminen et. al., 2004](#) ¹Corresponde a la mediana obtenida en los suelos de Tlaxcala y los valores entre paréntesis a los valores mínimo y máximo. ND – No disponible

Por otro lado, la [Tabla 5.2](#) muestra una comparación entre las concentraciones de los elementos analizados en diferentes materiales (que no corresponden a Tlaxcala) y la mediana de las concentraciones obtenidas en el presente estudio. Se emplea el uso de la mediana como un estadístico que puede describir mejor a la población ya que la función de distribución de las concentraciones no tuvo un comportamiento normal. A partir de dicha información se advierte que en los suelos de Tlaxcala, la mediana de las concentraciones de As, Co, Mo, Pb y Tl sólo son ligeramente mayores a lo reportado para suelos. Las diferencias entre los valores se deben principalmente a las diferencias en el material parental de los suelos, pero también deben tomarse en cuenta el tamaño de partícula de la muestra, las técnicas de digestión y analíticas usadas para la determinación de éstos.

De la misma forma es interesante comparar las concentraciones de los elementos analizados en esta tesis con estudios realizados en suelos de México ([Tabla 5.3](#)) El contenido de As obtenido en Tlaxcala fue mayor al obtenido por Rosas *et. al.* (1997) en suelo agrícola de la Comarca Lagunera determinada por AAS; pero menor al hallado por Ongley *et. al.* (2003) y Razo *et. al.* (2004) en las zonas mineras de Zimapán, Hgo. y Villa de la Paz, SLP. Asimismo los niveles de este elemento fueron parecidos los reportados por Hernández *et. al.* (2005) entre las cuencas San Juan Otates y del río Guanajuato.

Para el Co y Cr las concentraciones, en comparación con las del suelo de Tlaxcala (4,09 – 25,1 y 14,08 – 135,66 mg/kg), fueron más altas las reportadas por Hernández *et. al.* (2005) en las cuencas San Juan Otates (49 – 115,6 y 3 – 615 mg/kg) y la del río Guanajuato (5,95 – 76,2 y 17 – 769 mg/kg respectivamente). En relación al Cu las concentraciones son parecidas las reportadas para el distrito de riego O63 (8,9 – 86,5 mg/kg) y Mixquiahuala (< 100 mg/kg) ambos sitios en Hidalgo, así como las publicadas para las cuencas San Juan Otates (0 -77,5 mg/kg), río Guanajuato (4,4 – 184,7 mg/kg) y las obtenidas en Tlaxcala (3,04 – 120,3 mg/kg).

Los trabajos citados en la [Tabla 5.3](#) indican que el contenido de níquel fue menor en las muestras de los distritos de riego de Mixquiahuala (< 40 mg/kg) y Tláhuac (< 60 mg/kg) determinadas por medio de PIXE y las más altas en las cuencas del río Guanajuato (< 472,4 mg/kg) y San Juan Otates (0,8 – 539,4 mg/kg) con AAS, en comparación con el hallado en Tlaxcala (0,21 – 125,91 mg/kg). Los niveles de Pb en suelos naturales del Distrito Federal y los de Tlaxcala fueron parecidos, 28,8 – 76,4 y 6,53 – 68,71 mg/kg respectivamente, ambos obtenidos con ICP-MS en relación a los reportados por Ongley *et. al.* (2003) (< 41 444 mg/kg) y Razo *et. al.* (2004) (30 – 3450 mg/kg) para los distritos mineros de Zimapán y Villa de la Paz, respectivamente. Por otro lado, los intervalos de concentración reportados para Zn son similares entre los suelos de distrito

OG3 en Hidalgo, suelo natural del DF y el de la cuenca San Juan Otates en Guanajuato con intervalos de concentración de 101 – 235,5 ppm, 165,5 – 210,7 y de 17,3 - 278, respectivamente. Los valores más bajos fueron los reportados para suelos en Tláhuac, DF y Mixquiahuala, Hgo con siendo menores a 60 y 80 ppm, respectivamente. Los determinados en Tlaxcala variaron entre 38,13 y 133,78 ppm.

En los apartados 5.1 a 5.11 se describe la distribución espacial de los metales y metaloides analizados en este estudio (As, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Sb, Tl V y Zn), contenidos en los suelos de Tlaxcala. Los detalles sobre el uso, estados de oxidación y fuentes de dichos elementos se expusieron en los Antecedentes.

En la generación de los mapas (Figuras 5.3 a 5.15), como se mencionó en la metodología, se empleó el método *Inverse Distance Weighting* (IDW) incluido en el módulo Geostatistical Analyst del ArcGis 8.1 de ESRI, en el sistema de coordenadas UTM (Transversa Universal de Mercator) y no se eliminaron los valores considerados como *outliers*. Durante el proceso se probaron varios radios de interpolación en un área circular, optimizando el factor de potencia para cada radio. Los resultados se evaluaron a través de la media del error y el error cuadrático medio de predicción RMSE (*root mean square prediction error*). La Tabla 5.4 muestra los parámetros que se emplearon en la generación de los mapas.

Tabla 5.4 Parámetros empleados para la generación de los mapas de distribución

	Radio de vecindario (m)	# vecinos a incluir	# vecinos a incluir al menos	Factor de potencia (p)	Media del error	RMSPE
As	8000	20	15	2,7916	-0,329	15,8
Co	13600	20	15	1	-0,117	3,146
Cr	12000	15	15	1	-0,149	23,21
Cu	10000	20	15	1,5576	0,615	15
Mo	13600	10	10	1,8237	0,025	0,5127
Ni	14500	20	15	2,0835	-0,719	12,99
Pb	8500	20	15	1	0,458	6,709
Sb	17000	20	10	1	0,003	0,183
Tl	10000	20	15	1,9446	-0,009	0,1923
V	10000	20	15	1,3559	0,093	25,65
Zn	10000	15	10	1,4812	0,85	15,68

Tabla 5.3 Comparación de las concentraciones (mg/kg) de metales y metaloides reportados en suelos mexicanos

As	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Técnica Analítica	Fuente
NR	0,86 – 5,07	NR	NR	8,9 – 86,5	NR	18,1 – 131,7	101 – 235,5	AAS	Flores <i>et. al.</i> 1996
11 – 30 $\mu\text{g/g}$	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	AAS	Rosas <i>et. al.</i> 1997
NR	0,9 – 1,2	NR	NR	40,3 – 47,2	NR	28,8 – 76,4	165,5 – 210,7	ICP-MS	Morton-Bermea <i>et. al.</i> 2002 ¹
< 32 000	NR	NR	NR	< 12 704	NR	< 41 444	< 16 976	INAA E ICP	Ongley <i>et. al.</i> 2003
NR	NR	< 60	< 60	< 100	< 40	< 45	< 80	PIXE	Mireles <i>et. al.</i> (2004) ²
NR	NR	< 70	< 90	< 40	< 30	< 75	< 60	PIXE	Mireles <i>et. al.</i> (2004) ³
7 – 17384	NR	NR	NR	NR	NR	30 - 3450	NR	AAS	Razo <i>et. al.</i> (2004) ⁴
1,6 – 109,8	< LD	5,95 – 76,2	17 - 769	4.4 – 184,7	< 472,4	99,4 – 511,4	< 347,6	AAS	Hernández, <i>et. al.</i> 2005 ⁵
0 – 96,58	1,6 – 5,1	49 – 115,6	3 - 615	0 – 77,5	0,8 – 539,4	11,3 – 362,3	17,3 – 278,5	AAS	Hernández, <i>et. al.</i> 2005 ⁶
<LD – 96,57	NR	4,09 – 25,1	14,08 – 135,66	3,04 – 120,3	0,21 – 125,91	6,53 – 68,71	38,13 – 133,78	ICP-MS	Tlaxcala ⁷

Nota: ¹Suelo natural; ²Mixquiahuala, Hgo; ³Tláhuac, D.F.; ⁴Suelo natural; ⁵Cuenca del Río Guanajuato; ⁶Cuenca San Juan Otates, NR: No reportados

Para facilitar la observación de los mapas, en los puntos de muestreo, se exhiben círculos de color púrpura, cuyo diámetro varía de acuerdo a la concentración; esto es, círculos pequeños indican concentraciones bajas y los círculos grandes corresponden a las concentraciones más altas. Cada mapa contiene, además, un histograma que permite identificar las concentraciones de mayor abundancia. Dicho histograma sirvió de base, en la mayoría de los elementos, para elaborar la escala de colores en los mapas, la cual corresponde al número de intervalos del histograma. En el Anexo 3 se adjunta una plantilla transparente con todos los municipios de Tlaxcala para facilitar la ubicación de éstos. A continuación se describen los resultados individuales del análisis de los elementos en Tlaxcala.

5.1 Arsénico (As)

El intervalo de concentración de As obtenido en los suelos de Tlaxcala contempló valores por debajo del LD hasta 96,57 mg/kg. Tomando en cuenta el histograma ubicado en la parte superior derecha de la figura 5.3, se observa que las concentraciones de As obtenidas se pueden dividir en dos grupos: uno de bajo contenido de As que va de < LD hasta 14 mg/kg y otro de concentraciones más altas entre 38,60 a 96,57 mg/kg, valores que fueron reconocidos como *outliers*. Este intervalo *outlier* se localizó al Este de Tlaxcala en los municipios de Huamantla, Alzayanca, Cuapixtla, Zitlaltepec y Teolochocho (Figura 5.3).

Dado que, aproximadamente 72 % de los puntos de muestreo presentaron una concentración menor de 10 mg/kg, lo cual se ilustra en el histograma, es posible establecer que en general los suelos del Estado de Tlaxcala presentan bajas concentraciones de As.

5.2 Cadmio (Cd)

Del Cadmio se obtuvieron 39 valores por debajo del límite de detección, ello imposibilitó su tratamiento estadístico y la generación del respectivo mapa. La Figura 5.4 muestra que las concentraciones altas se ubicaron cerca del Parque Nacional La Malinche y al Este de Tlaxcala, en Huamantla y Alzayanca. Para evaluar adecuadamente este elemento, es necesario llevar a cabo un muestro más detallado en la zona de estudio.

5.3 Cobalto (Co)

Para el Co se obtuvieron concentraciones entre 4,09 y 25,1 mg/kg (Figura 5.5). Del histograma se observa que las concentraciones con mayor frecuencia fueron entre 12 y 14 mg/kg, lo que se reconoce por 2 franjas que recorren Tlaxcala de norte a sur, una del municipio de Sanctorum de Lázaro Cárdenas, Benito Juárez, Hueyotlipan, Ixtlacuixtla, Tepetitla de Lardizabal y la parte Este de España. La otra

franja incluye parte de Tlaxco, Atlangatepec, Muñoz de Domingo Arenas, Tetla, Xaloztoc, Santa Cruz Tlaxcala, Tzompantepec, Cuaxomulco, Chiautempan, San José Teacalco, Tocatlan, San Francisco Tetlanohcan, Huamantla y Teolochoholco.

Por otro lado, se identificó como intervalo no-*outlier* el que comprende las concentraciones entre 6,26 y 19,03 mg/kg, lo cual dio por resultado 5 *outliers*, 3 de los cuales pertenecen a concentraciones altas (23,17 – 25,1 mg/kg), dichos valores se ubican al NE de Tlaxcala en los municipios de Tlaxco y Emiliano Zapata. Al O de Tlaxcala, en los municipios de Calpulalpan, Nanacamilpa y parte de Sanctorun y Española se presentaron concentraciones entre 14 y 16 mg/kg.

5.4 Cromo (Cr)

El intervalo de concentración obtenido para el cromo va de 14,08 a 135,66 mg/kg y no se hallaron *outliers*. La distribución superficial del Cr (Figura 5.6) muestra que en buena parte de Tlaxcala se presentan concentraciones entre 60 y 80 mg/kg. Mientras que en la zona del cerro Soltepec, municipio de Tlaxco, cerca del volcán la Malinche, municipios de Huamantla Teolochoholco, Ziltaltepec e Ixtenco, así como la zona sureste, en Cuapiaxtla, Alzayanca y El Carmen Tequexquitla, prevalece una concentración entre 40 y 60 mg/kg. En las muestras de los municipios de Calpulalpan, Nanacamilpa, Sanctorum de Lázaro Cárdenas, Española, Ixtlacuixtla, Yauhquemehcan, Apizaco, Xaloztoc, Tetla y Tlaxco se obtuvo un contenido de Cr entre 80 y 100 mg/kg.

5.5 Cobre (Cu)

Las concentraciones obtenidas para el cobre variaron entre 3,04 a 120,3 mg/kg, entre las cuales se identificó un intervalo *outlier*, de 7 muestras, que contempla los valores mayores a 35,06 mg/kg (Figura 5.7). Del histograma se observa que cerca del 70 % de las muestras presento una concentración menor a 20 mg/kg y sólo dos de éstas rebasaron los 60 mg/kg. Los valores *outliers* se localizaron en los municipios de Calpulalpan, Emiliano Zapata y Alzayanca.

El intervalo de concentración que predomina en Tlaxcala está entre 15 y 20 mg/kg, mientras que en el sector sureste del volcán La Malinche, en los municipios de Ziltaltepec e Ixtenco, se presentaron las más bajas: entre 3,04 y 5 mg/kg. Al norte en una porción de Tlaxco, Lázaro Cárdenas y Emiliano Zapata, sí como al oeste en parte de Sanctorum de Lázaro Cárdenas, Nanacamilpa y Benito Juárez las muestras tuvieron un contenido de Co entre 20 y 30 mg/kg.

5.6 Molibdeno (Mo)

El Molibdeno mostró concentraciones entre 0,13 y 3,21 mg/kg y no se reconoció algún valor como *outlier*, es decir, las 96 lecturas se encontraron dentro del intervalo no-*outlier*. La distribución superficial, [Figura 5.8](#), exhibe que el contenido de Mo aumenta de Este a Oeste y de Sur a Norte. El histograma muestra que las concentraciones entre 1 y 1,5 mg/kg son las de mayor abundancia, seguidas del intervalo entre 1,5 y 2 mg/kg, así como que los valores con menor frecuencia están entre 3 y 3,5 mg/kg.

Las concentraciones más bajas, menores a 1 mg/kg, se hallaron en Huamantla, Cuapixtla, Alzayanca, y una porción pequeña del municipio de Terrenate; mientras que aquellas entre 1 y 1.5 mg/kg ocuparon los municipios de Nativitas, Tlaxcala, Zacatelco, Panotla, Santa Ana Chiautempan, Tzompantepec Tocatlan, entre otros. Finalmente, las concentraciones entre 1,5 y 2 mg/kg se presentaron al Noroeste, incluyendo Calpulalpan, Tlaxco, Hueyotlipan, Españita, Xaltocan, parte de Yauhquemehcan, Atlangatepec, Tlaxco y Tetla.

5.7 Níquel (Ni)

El intervalo de concentración obtenido para el Ni estuvo entre 0,21 y 125,91 mg/kg, del cual se identificaron 3 *outliers*. Dos de los *outliers*, los más altos (> 65,08 mg/kg), se localizan al NE, cerca del cerro Huilapitzo en el municipio de Tlaxco. En el sector SE, en los municipios de Huamantla, Cuapixtla, Alzayanca, Ixtenco y algunas porciones de Terrenate y Santa Ana Chiautempan, las concentraciones de Ni varían entre 0,2 y 20 mg/kg ([Figura 5.9](#)). En el lado oeste, en Calpulalpan, Nanacamilpa, Benito Juárez, Xaltocan, Ixtlacuixtla, San Lucas Tecopilco, entre otros, la concentración que predomina está entre 30 y 40 mg/kg.

5.8 Plomo (Pb)

Las concentraciones obtenidas de Pb van de 6,53 a 68,71 mg/kg y se identificaron 3 valores *outlier* (25,94 – 98,71 mg/kg), los cuales están ubicados en la comunidad de La Trinidad, municipio de Ixtlacuixtla al oeste de Panotla ([Figura 5.10](#)). Del histograma se observa que en gran parte de Tlaxcala predominan concentraciones entre 10 y 20 mg/kg. Al O, en el municipio de Calpulalpan, y al E en Alzayanca y una porción de Terrenate y Huamantla, pueden encontrarse concentraciones entre 14 y 16 mg/kg. Al N, en el municipio de Tlaxco se presentan niveles de Pb bajos, entre 6 y 10 mg/kg.

5.9 Antimonio (Sb)

El antimonio presentó un intervalo de concentración entre lecturas por debajo del límite de detección ($< LD$) y 1,17 mg/kg, 5 valores por debajo del límite de detección y 3 *outliers* (0,7527 – 1,17 mg/kg). El histograma de la [Figura 5.11](#) muestra que en Tlaxcala predominan las concentraciones de antimonio entre 0,2 y 0,4 mg/kg. Al E, en Alzayanca, Cuapiaxtla y El Carmen Tequexquitla, el suelo alcanzó una concentración entre 0,4 y 0,6 mg/kg. Los puntos de muestreo de mayor concentración se observaron en los municipios de Tetla y Terrenate.

5.10 Talio (Tl)

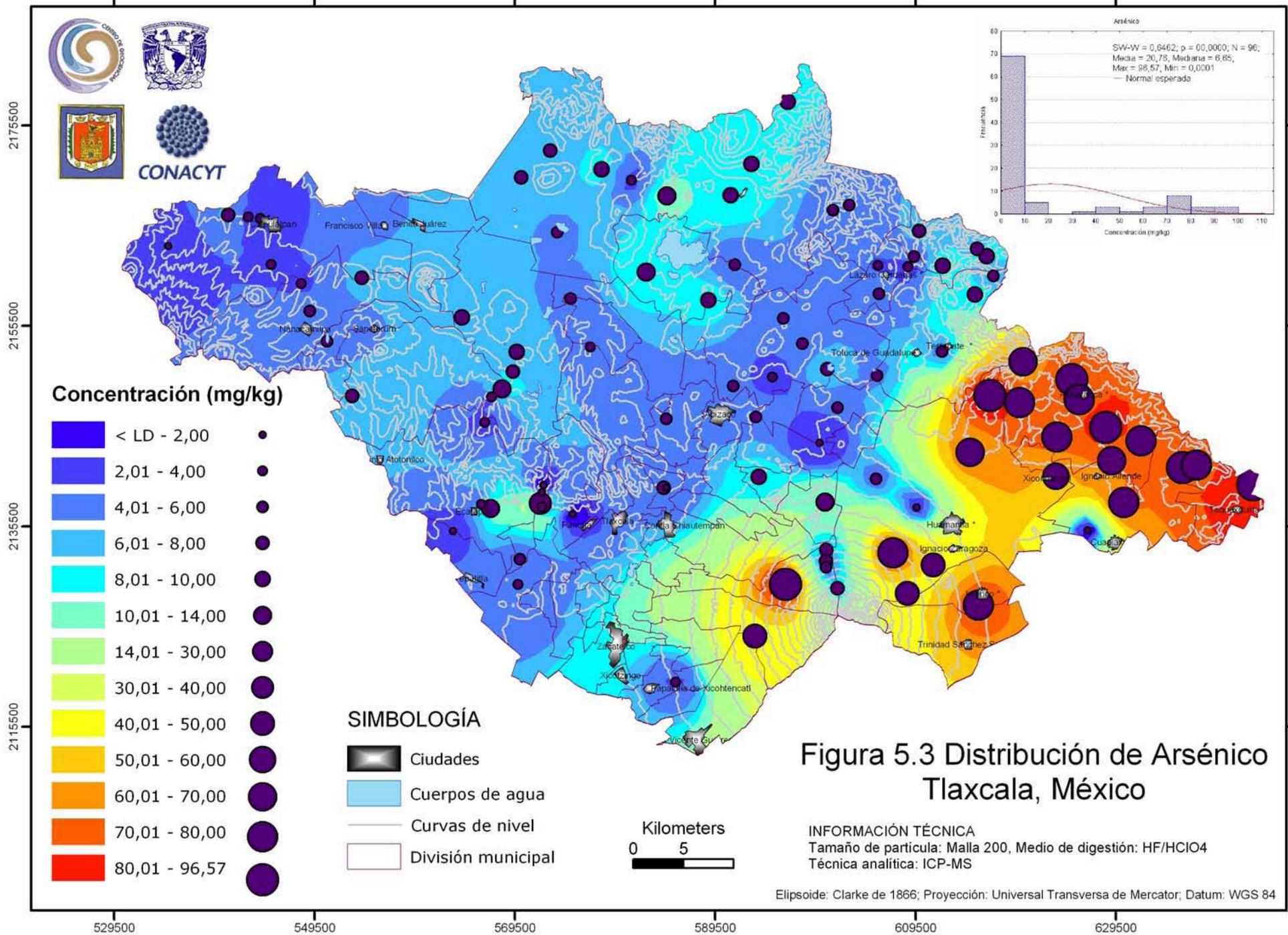
El talio presentó 16 lecturas por debajo del límite de detección, pero al no alcanzar el 25 % del total de las muestras fue posible la aplicación del análisis estadístico. La lectura máxima obtenida fue de 1,26 mg/kg, con una mediana de 0,52 mg/kg. En la [Figura 5.12](#) se observa que predominan las concentraciones entre 0,4 y 0,6 mg/kg, mientras que al noreste en los municipios de Emiliano Zapata, Terrenate, Tlaxco y Lázaro Cárdenas, se presentan concentraciones menores a 0,2 mg/kg, misma región donde se localizaron la mayor parte de las lecturas por debajo del límite de detección. Al Este, en las proximidades de Alzayanca, Cuapiaxtla y El Carmen Tequexquitla, así como al Oeste, cerca de Calpulalpan, se ubican áreas con contenido de Tl entre 0,6 y 0,8 mg/kg.

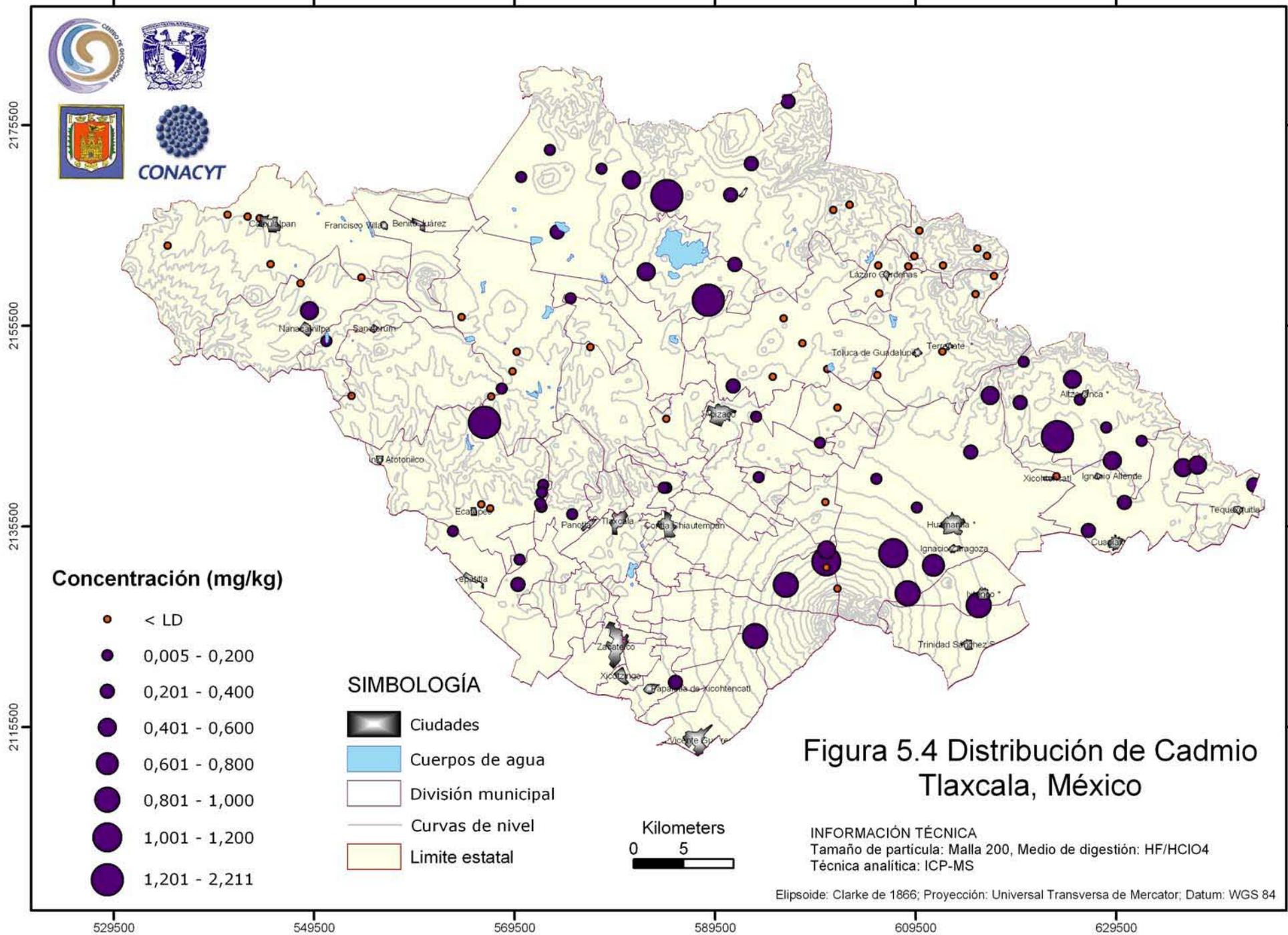
5.11 Vanadio (V)

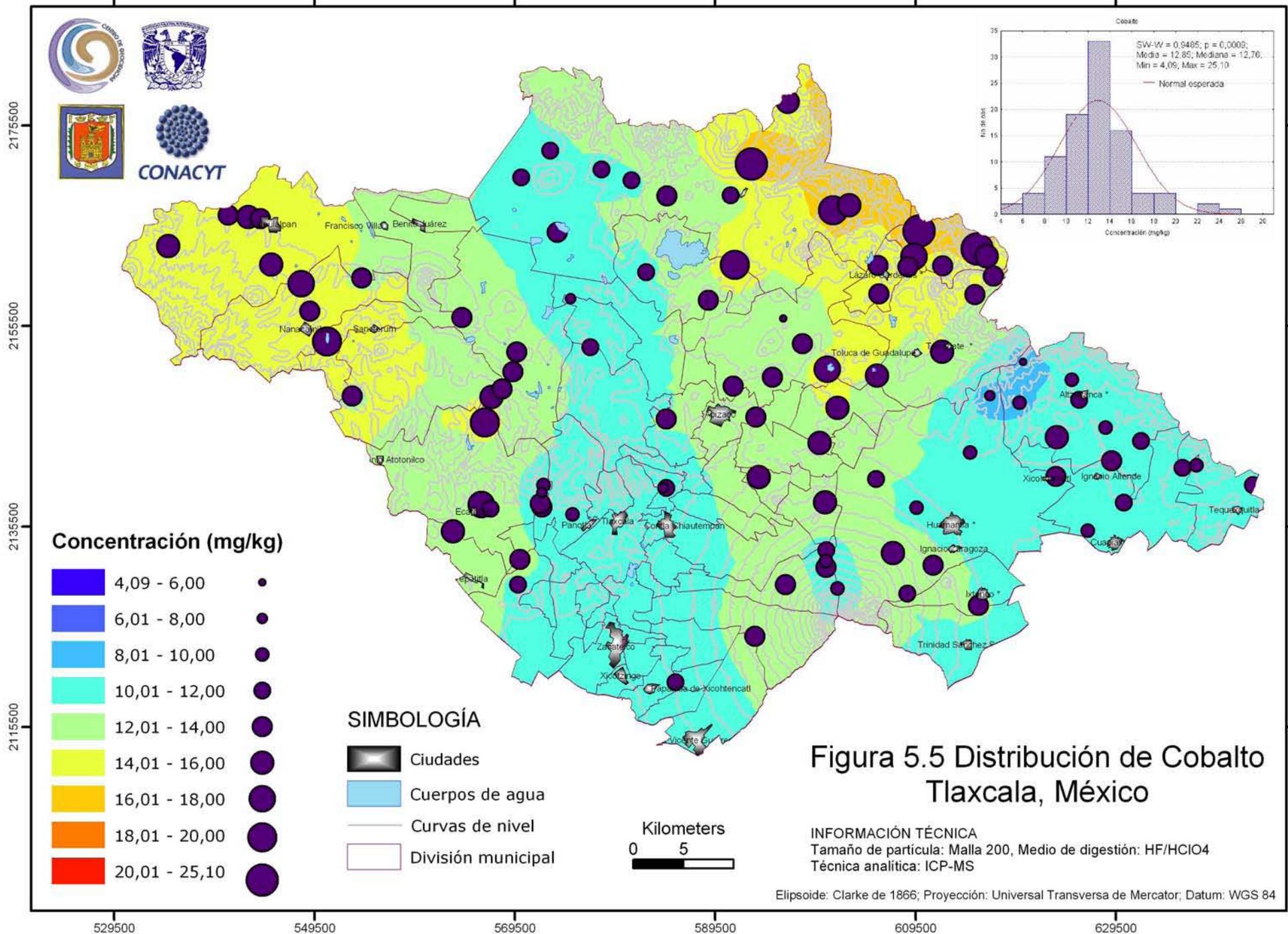
El intervalo de concentración obtenido para el vanadio varió entre 33,62 y 177,05 mg/kg, con una mediana de 83,21 mg/kg y 3 valores *outliers* ($> 153,55$ mg/kg). La [Figura 5.13](#) muestra que en el lado oeste de Tlaxcala abundan las concentraciones entre 60 y 80 mg/kg, en los municipios de Calpulalpan, Nanacamilpa, Españita, Nativitas y Panotla, entre otros; le siguen aquéllas entre 80 y 100 mg/kg, en la franja central norte – sur. Al E, en el municipio de Alzayanca y algunas partes de Cuapiaxtla y Huamantla, se presentan concentraciones superiores a 120 mg/kg.

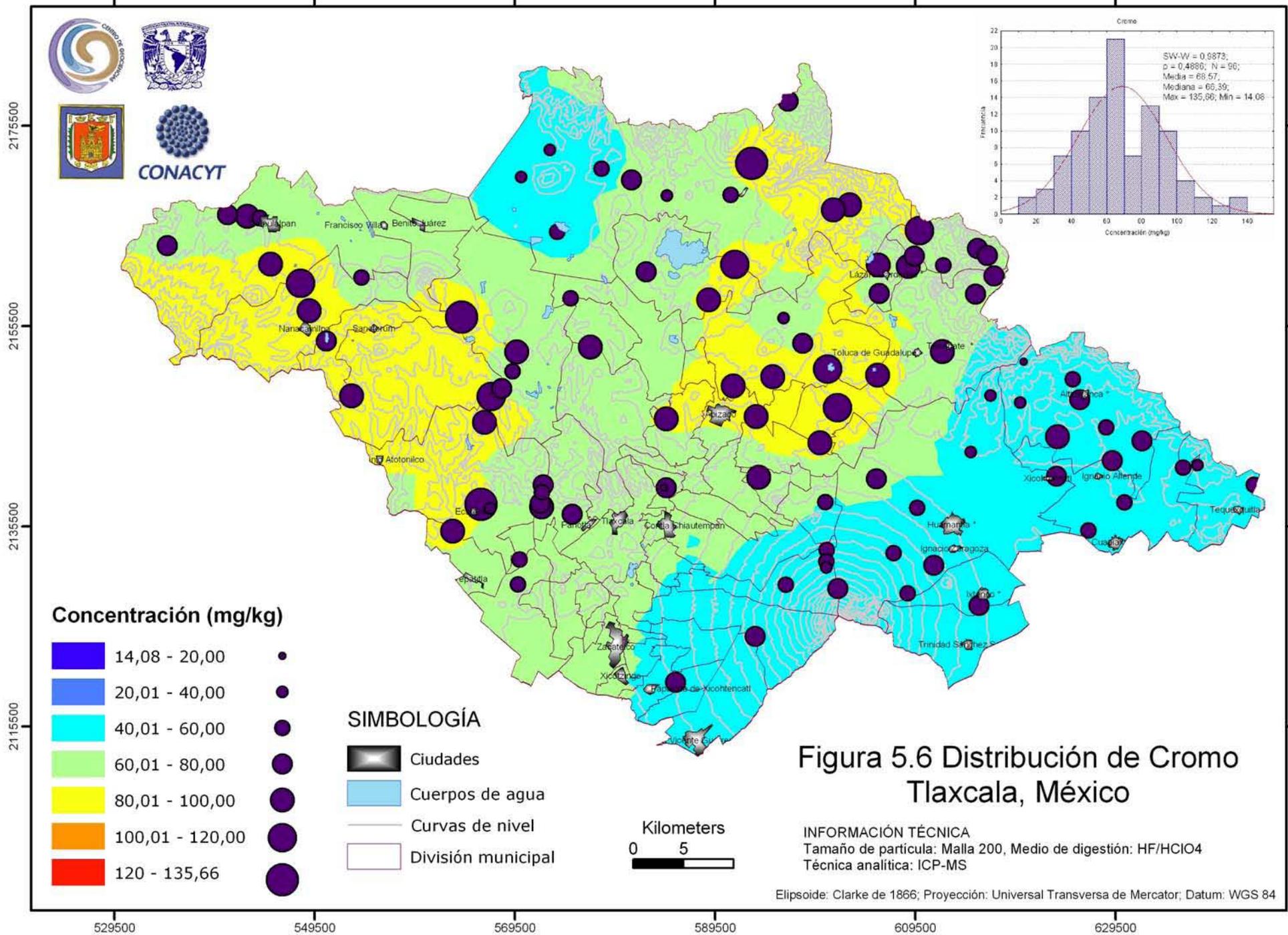
5.12 Zinc (Zn)

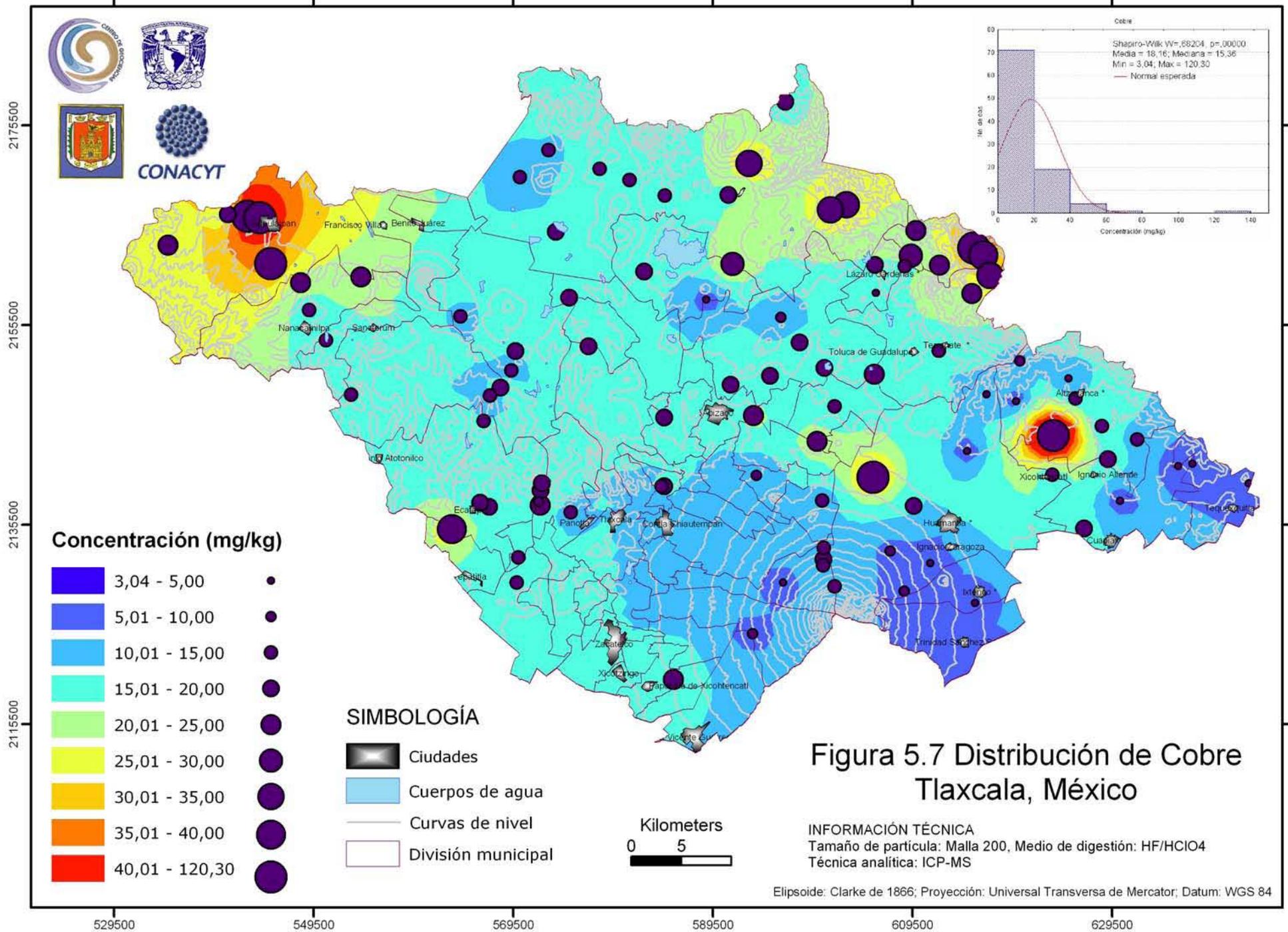
En los suelos muestreados de Tlaxcala, las concentraciones de Zn varían de 38,13 a 133,78 mg/kg, con una mediana de 71,8 mg/kg y se identificaron 4 valores *outliers*, mayores a 104,85 mg/kg, dos de los cuales se ubican cerca del volcán La Malinche. La distribución del contenido de zinc en los suelos el intervalo entre 60 y 70 mg/kg domina en la mayor parte del área de estudio ([Figura 5.14](#)), seguido de las concentraciones entre 70 y 80 mg/kg. Algunas zonas de los municipios de Emiliano Zapata, al noreste, Xaloztoc, Huamantla, Zitlaltepec y San José Teacalco al centro sur, mostraron concentraciones por encima de 90 mg/kg.

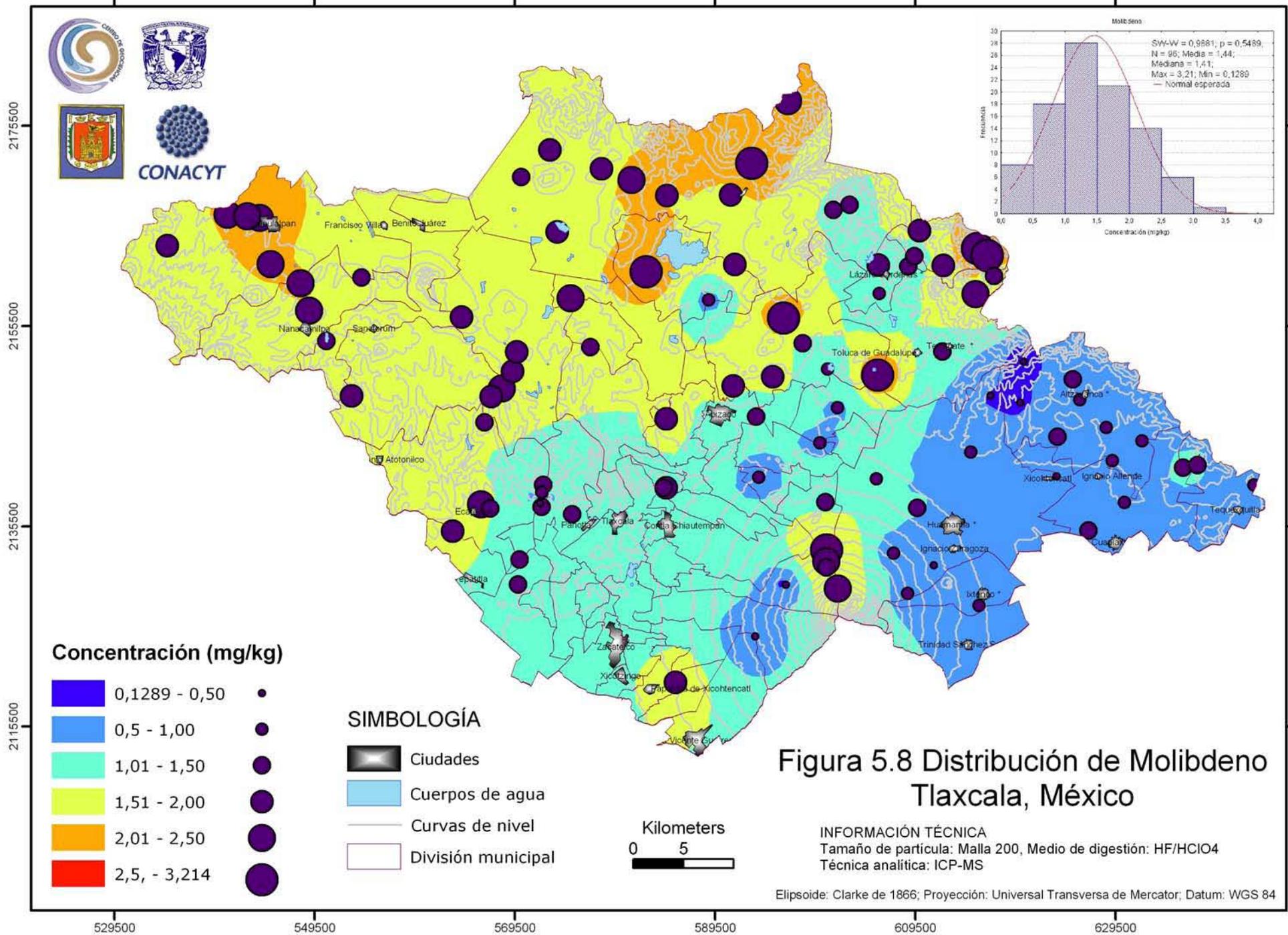


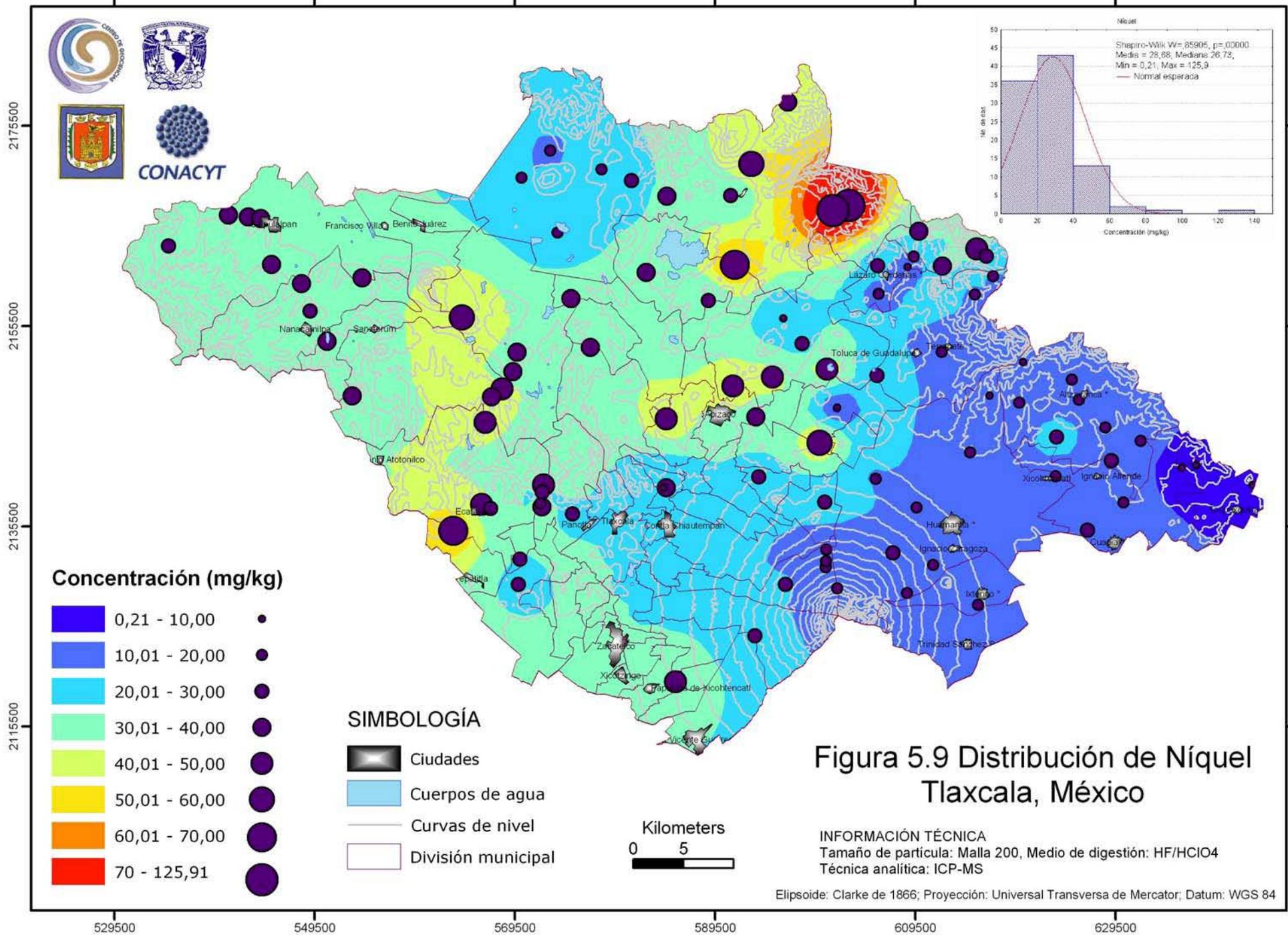


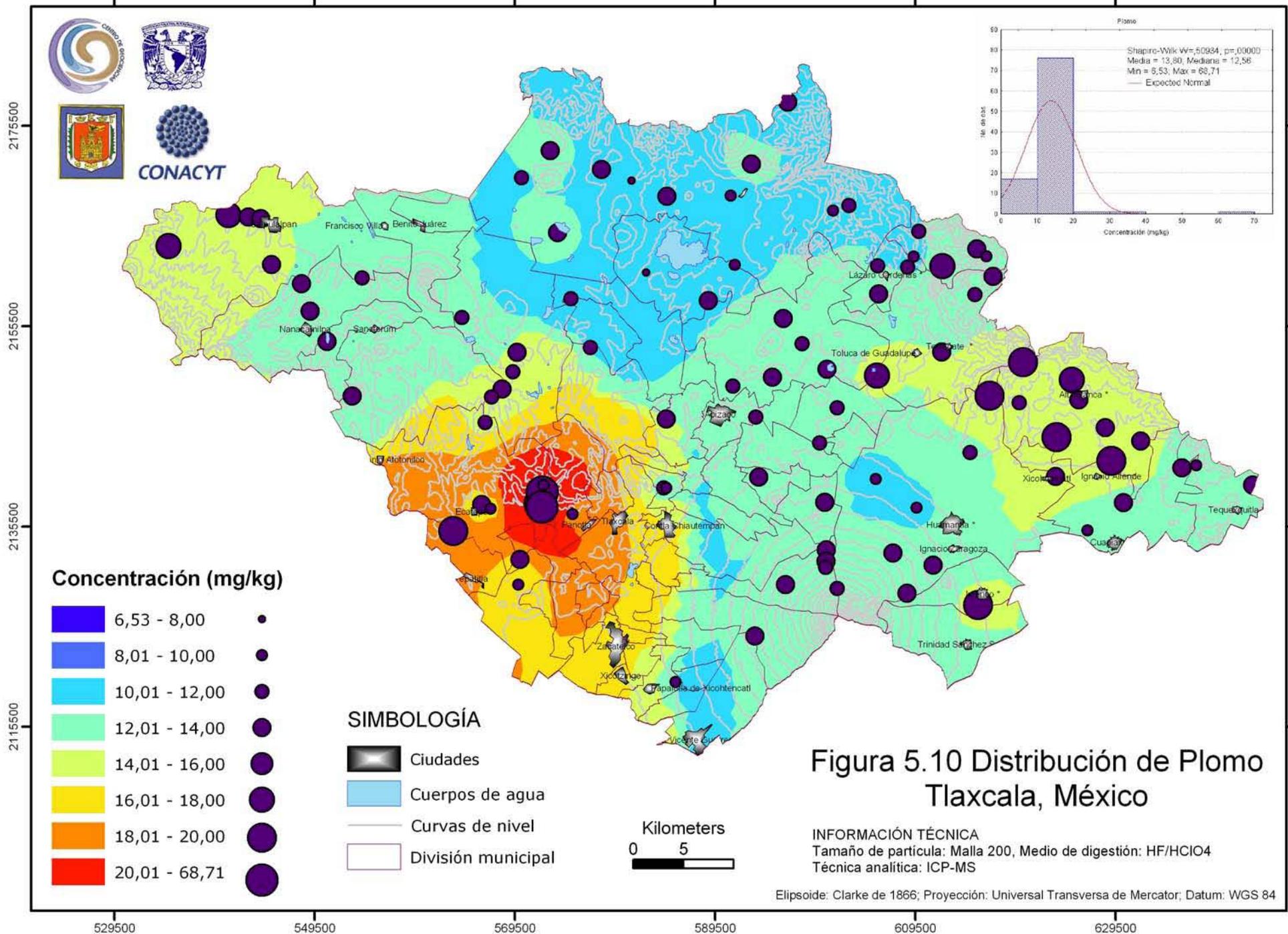


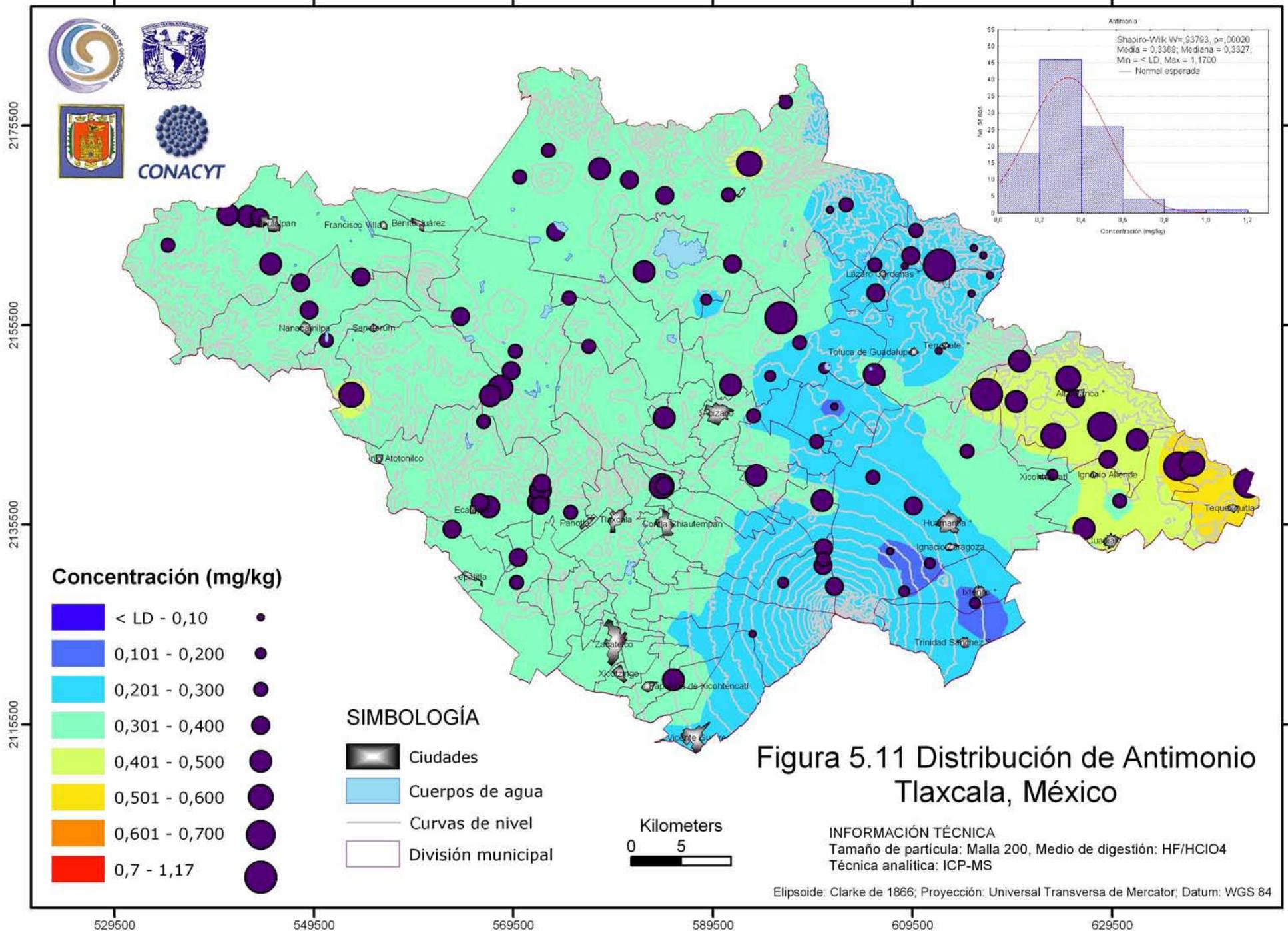


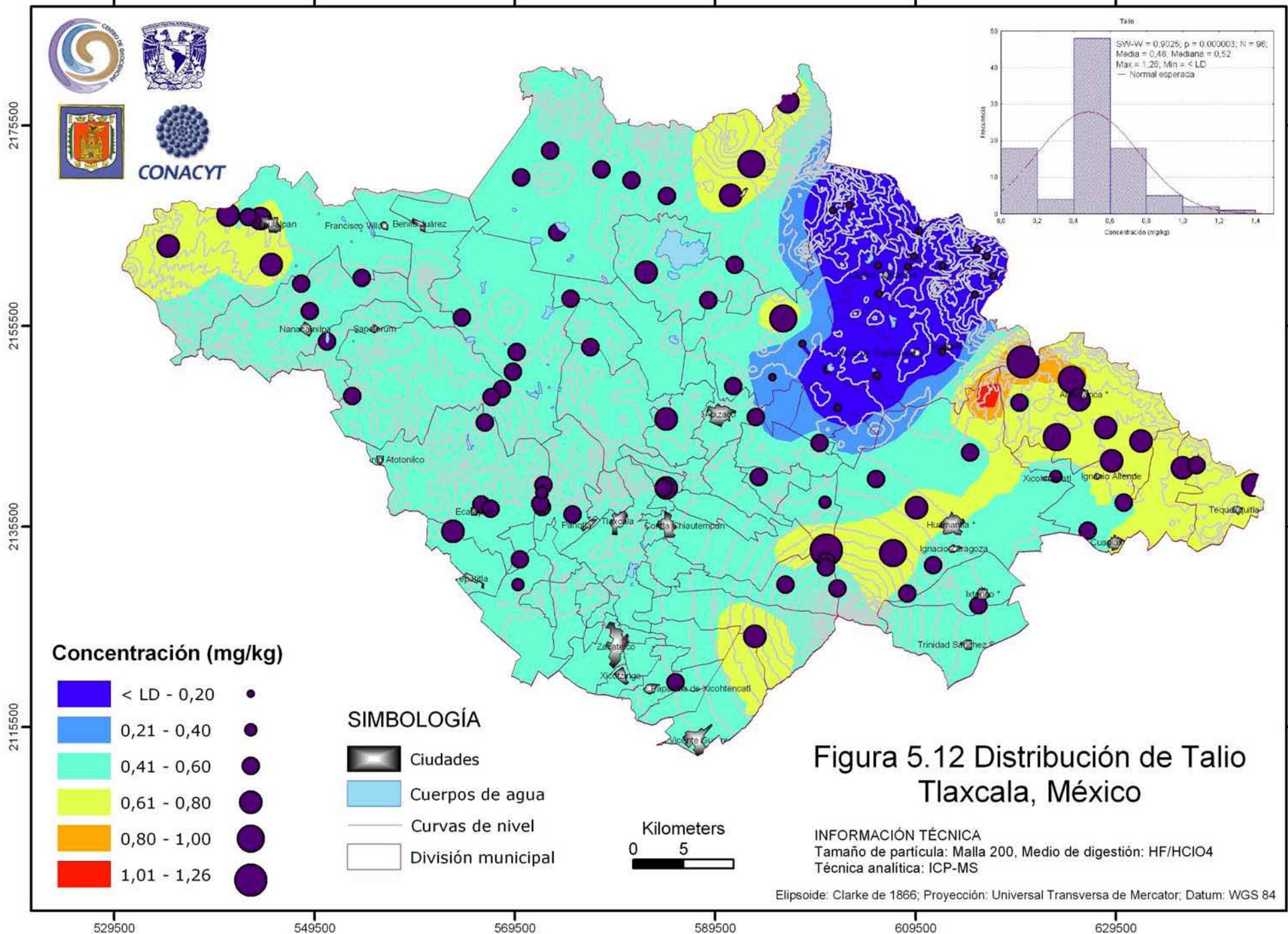


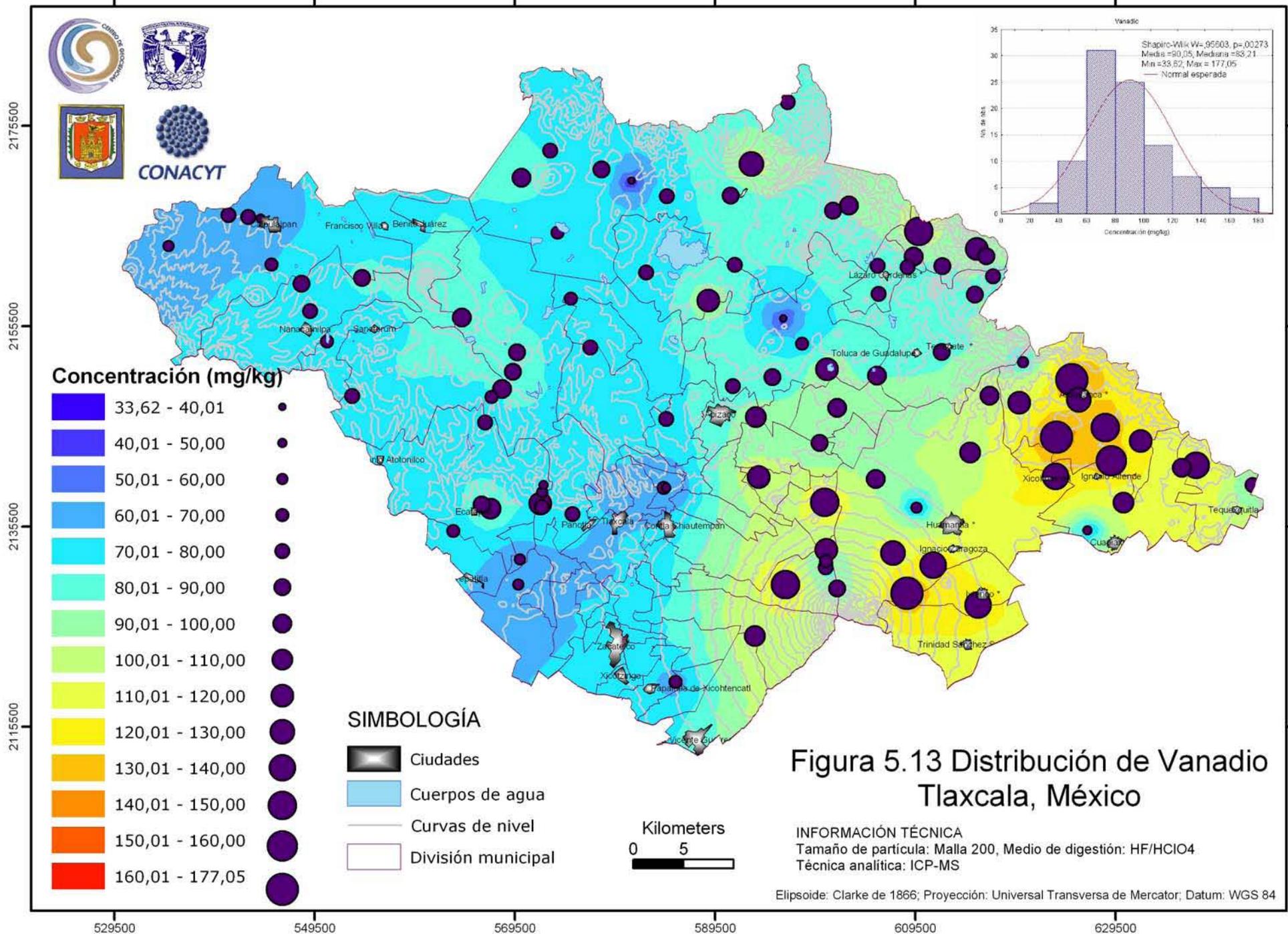


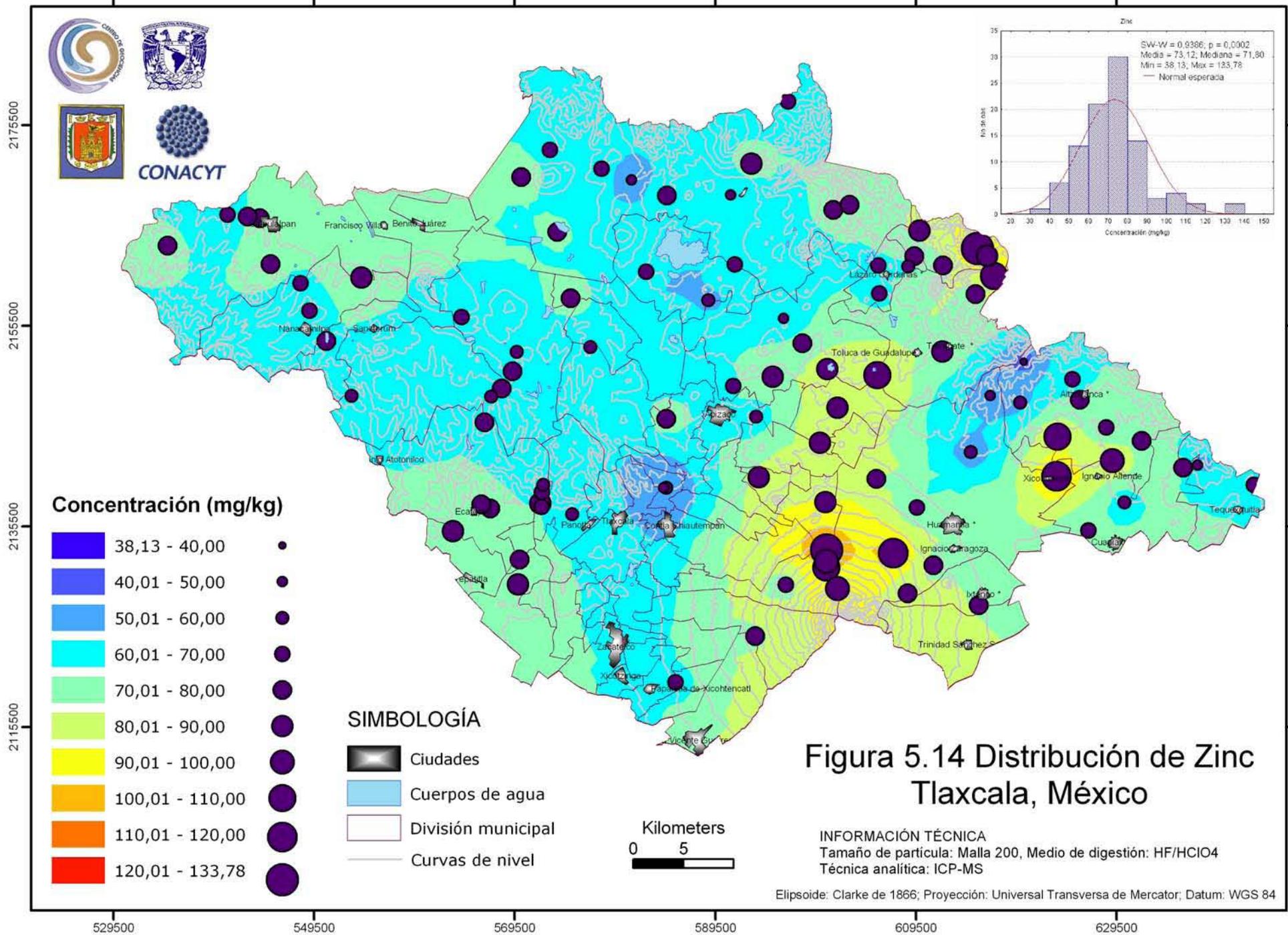












6. DISCUSIÓN

Adicionalmente a la elaboración de los mapas que muestran la distribución espacial de metales pesados en los suelos de Tlaxcala se planteó evaluar si existían diferencias significativas entre las concentraciones de los elementos de los suelos agrícolas y no agrícolas, para lo cual se empleó la prueba de Kruskal – Wallis. Además, se calculó la correlación entre elementos usando la ρ de Spearman. Finalmente se aplicó un análisis por conglomerados.

La prueba de Kruskal – Wallis dio por resultado que sólo para el Cr y Ni sí hubo diferencias significativas. La mediana de los suelos agrícolas fue significativamente mayor a la mediana de los suelos no agrícolas. La [Tabla 6.1](#) muestra los datos usados para calcular el estadístico K_w' por medio de la hoja de cálculo Excel (las ecuaciones están descritas en el capítulo de metodología).

Tabla 6.1 Parámetros de la Prueba de Kruskal – Wallis

	R_1	R_2	g	t_j	K_w	K_w'
As	2840,5	1535	1	5		-29,65
Co	3431	1225	0	--	1,15	1,15
Cr	3658	998	1	2		8,42*
Cu	3467	1189	0	--	1,86	
Mo	3386	1270	2	2, 2		0,5
Ni	3578	1078	0	--	5,09*	
Pb	3353,5	1302,5	2	2, 2		0,20
Sb	3087,5	1278	3	5, 2, 2		-35,18
Tl	2233	1161	6	16, 2, 2, 2, 2, 2		-135,1
V	3225	1431	0	--	0,35	
Zn	3373,5	1282,5	2	2, 2	0,37	
$m = 96; n_1 = 68; n_2 = 28; k = 2; \alpha = 5\% \text{ y } \chi^2_{1,0,95} = 3,84$						

Nota: Los asteriscos (*) indican los valores mayores a χ^2 lo que rechaza la hipótesis nula de que las muestras provienen de una misma población. K_w' es el parámetro de Kruskal – Wallis corregido por < LD y/o repeticiones.

Para facilitar la observación de las diferencias se usaron diagramas de caja (Figura 6.1). En dichos diagramas el rectángulo (caja) indica el intervalo de concentración donde se agrupa del 25 al 75 % de las muestras y la línea azul dentro de la caja la mediana y la barra señala los valores mínimo y máximo. Conforme la barra del intervalo de mínimo a máximo aumenta, los datos muestran una mayor dispersión. Por ejemplo, para el As se observa que en los suelos agrícolas y no agrícolas las concentraciones abarcan un intervalo amplio de concentraciones, pero el 50% de sitios de muestreo en suelos agrícolas se agrupan en un margen mucho menor (3,81 - 9,73 mg/kg) en comparación con los no agrícolas (5 - 73,08 mg/kg). El contenido de Cu en los suelos agrícolas presentó mayor dispersión que en los no agrícolas. En el caso del Pb se advierte que las concentraciones tanto de suelos agrícolas como no agrícolas tomaron valores en un intervalo amplio, la mayor parte de las lecturas (el 50%) se congregaron en intervalos pequeños, 11,04 - 14,82 mg/kg y de 11,33 a 14,12 mg/kg respectivamente

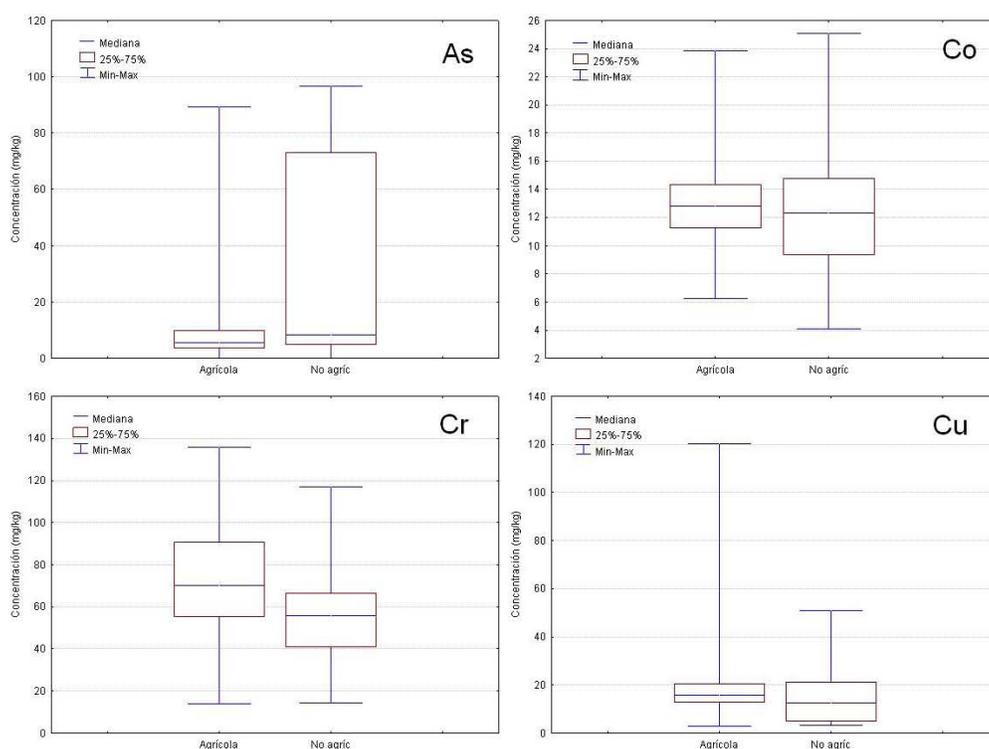


Figura 6.1. Gráficos de caja por elemento y uso de suelo.

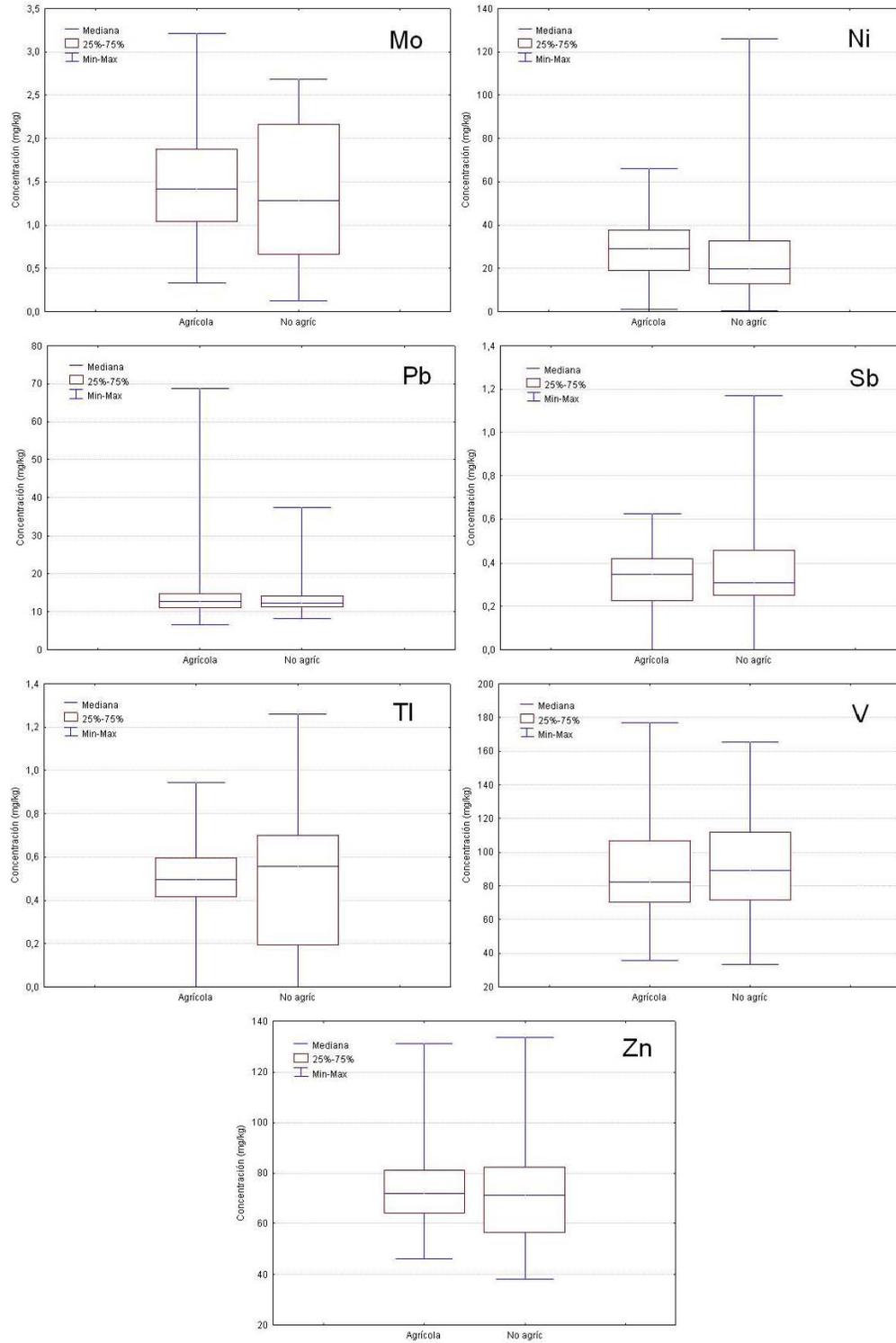


Fig. 6.1. Gráficos de caja por elemento y uso de suelo. Continuación

En lo que se refiere al cálculo de la correlación los valores obtenidos se muestran en la [Tabla 6.2](#). La ρ de Spearman dio por resultado que el V y As presentaron la mayor correlación positiva ($\rho = 0,73$), seguidos del Cr y Co, $\rho = 0,65$; Cr y Ni, $\rho = 0,63$ y Ni y Cu ($\rho = 0,61$). Aunque las correlaciones se consideran significativas con un valor p del 5% y un valor absoluto del coeficiente ρ mayor a 0,7 ([Mahlknecht et al., 2004](#)), para este trabajo los valores mayores a 0.6 se consideran aceptables. Las correlaciones positivas indican probablemente una misma fuente, que puede ser el material parental.

Tabla 6.2 Correlación de acuerdo a la ρ de Spearman

	As	Co	Cr	Cu	Mo	Ni	Pb	Sb	Tl	V	Zn
As	1										
Co	-0,14	1									
Cr	-0,40	0,65*	1								
Cu	-0,51	0,38	0,44	1							
Mo	-0,37	0,20	0,22	0,53	1						
Ni	-0,43	0,53	0,63*	0,61*	0,46	1					
Pb	0,25	0,17	0,06	-0,15	-0,14	-0,11	1				
Sb	0,18	-0,29	-0,22	-0,1	0,12	-0,04	0,23	1			
Tl	0,24	-0,30	-0,23	-0,16	0,04	-0,05	0,20	0,51	1		
V	0,73*	0,21	0,02	-0,24	-0,42	-0,19	0,23	-0,10	-0,09	1	
Zn	0,08	0,45	0,13	0,25	0,05	0,04	0,18	-0,28	-0,24	0,36	1

Nota: Los asteriscos (*) señalan los valores significativos con un valor $p < 0.05$

Debido a que el contenido de metales pesados en el suelo depende de factores como la historia geológica, la vegetación y el clima, no se puede establecer un valor único que se asigne como natural. Además, no se cuenta con una base de datos de los suelos de México que contenga las concentraciones de metales pesados. Por ello se han desarrollado normas que permitan valorar y controlar la contaminación de los suelos.

En este sentido, en marzo pasado se publicó la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, que establece los criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plomo, selenio, talio y vanadio. Dicha norma tiene como antecedente las Memorias 1999 – 200 del Grupo de Trabajo sobre Restauración de Suelos Contaminados organizado por la Procuraduría Federal de Protección Ambiental ([Profepa, 2000](#)), donde se acordaron unos Criterios Interinos de Restauración de suelos contaminados con Inorgánicos Tóxicos (metales pesados) ([Tabla 6.3](#)). Estos documentos se tomaron como referencia para evaluar

en cierta medida la calidad de los suelos de Tlaxcala de acuerdo a los contenidos de los elementos traça obtenidos.

Tabla 6.3. Concentraciones de referencia totales y las obtenidas en Tlaxcala

Contaminante	Concentraciones por tipo de uso de suelo				Concentración en Tlaxcala ³
	Uso agrícola/residencial (mg/kg)		Uso industrial (mg/kg)		
	A ¹	B ²	A	B	
Arsénico	22	NR	260	NR	96,57
Cadmio	37	20	450	100	--
Cromo Hexavalente	280	75/375	510	750 ⁴	135,66 ⁴
Níquel	1600	75/150	2000 0	700	125,91
Plomo	400	100/200	750	1500	68,71
Talio	5.2	NR	67	NR	1,26
Vanadio	550	NR	7200	NR	177,05
Zinc	NR	300/800	NR	1500	133,78

Nota: ¹Concentraciones de referencia totales (CR_T) por tipo de uso de suelo. NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. ²Criterios Interinos de Restauración de suelos contaminados con Inorgánicos Tóxicos (Metales Pesados). ³Concentración máxima obtenida. ⁴La concentración de Cr es total. Se puede observar que en general, la norma es menos estricta en comparación con lo establecido en el 2000.

El análisis realizado en este trabajo, es el primero en su tipo que se hace en los suelos de Tlaxcala, sin embargo no es suficiente para concluir que las concentraciones encontradas tengan o no efectos sobre los cultivos, ganado y/o en la salud de población tlaxcalteca. Para evaluar el impacto real sobre los ecosistemas, el ganado y la población del As, Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Sb, Tl, V y Zn, es necesario elaborar un muestreo más detallado en las áreas donde se localizaron las concentraciones más elevadas de estos elementos y contar con estudios epidemiológicos que sirvan para identificar la historia natural de las enfermedades, describir la distribución, frecuencia y tendencias de la enfermedad en las poblaciones, así como causas y factores de riesgo para la aparición y desarrollo de enfermedades.

Adicionalmente, se consideró adecuado aplicar el análisis de conglomerados a los grupos de concentraciones obtenidos. Esta técnica estadística permite clasificar casos o variables en grupos cuyos miembros son similares de alguna forma. En la tesis se aplicó a los sitios de muestreo (casos), con el objetivo de identificar algún patrón geológico, fisiográfico o hidrológico en el área de estudio.

Durante el análisis se hicieron algunas consideraciones:

- a) Para reducir el impacto de los *outliers* sólo se emplearon 9 de las 11 variables, excluyendo al As y Tl ya que presentaron 22 valores considerados *outliers* y se descartaron 2 casos (o sitios de muestreo), ya que al tomar en cuenta las variables (metales pesados), dichos puntos coincidieron en ser *outliers* para más de 2, es decir, se realizó el análisis con 94 casos y 9 variables.
- b) Dado que es común encontrar que las variables muestren diferentes escalas de medición, por ejemplo el Sb logra valores en décimas de mg/kg en comparación con el V que sobrepasa los 100 mg/kg, para la formación de conglomerados se decidió usar los datos originales y datos estandarizados. La estandarización busca escalar los rangos de las variables para facilitar la comparación. Inicialmente, para la transformación se utilizó una alternativa menos sensible a los *outliers*, la desviación absoluta de la mediana, MAD por sus siglas en inglés (*Median Absolute Deviation*) (Templ, 2003), definida por:

$$MAD(x_j) = 1,4826 \cdot \text{med}_i \left| x_{ij} - \text{med}_i(x_{ij}) \right|$$

Al resolver esta fórmula, la variable MAD en la mayor parte de las variables dio ceros, por lo que se eligió otra transformación que no considerara estadísticos paramétricos, debido a que la mayoría de las variables no presentaron una distribución normal:

$$x_{ij} \leftarrow \frac{x_{ij}}{\max(X) - \min(X)}$$

Las medidas de distancia que se utilizaron fueron: euclidiana (E), cuadrado de la distancia euclidiana (SE), *City-block* (CB), Chevychev (Che), y la definida por uno menos el coeficiente de correlación de Pearson (IP), se recomienda que la distancia euclidiana y su cuadrado se calculen sólo con los datos originales. Como reglas de enlace: sencillo (SL), completo (CL), promedio no ponderado de pares (UWPGA) y Ward. Con ello se obtuvieron 32 árboles en total, de los cuales se identificaron más de 100 conglomerados.

A continuación se generaron gráficas de caja (Anexo B) para observar el comportamiento de las concentraciones de los elementos en cada árbol, es decir,

cómo era la variación del contenido de metales entre conglomerados. Posteriormente los árboles se representaron sobre el área de estudio y se superpusieron a los mapas geológico, fisiográfico e hidrológico con la intención de identificar alguna relación, dicha representación se realizó por medio del programa ArcGis 8.1. Según la distribución de los conglomerados en el área de estudio, el número de miembros en éstos se varió buscando establecer algún patrón.

Para facilitar la identificación de los conglomerados, éstos se denominan por una clave conformada por: a) la regla de enlace (SL, CL, UWPGA o Ward), b) medida de distancia (E, SE, CB, Che o IP) y c) el número de Grupo (por ejemplo G1), además se agregó la letra T para diferenciar los conglomerados creados con los datos transformados. El número de grupo puede contener una letra, por ejemplo b, lo que significa que pertenece a un subconjunto del grupo, dichos subconjuntos se realizaron para continuar con la identificación de patrones.

Para el presente trabajo, a partir de los 32 árboles generados se decidió mostrar cada conglomerado como una columna con 96 renglones, correspondientes a los puntos de muestreo. En cada columna se resaltan con color las celdas que forman al conglomerado, es decir, si los puntos TLX322A, TLX506A, TLX509 y TLX512 pertenecen al conglomerado CL-E G5 (grupo 5 del árbol generado con enlace completo y distancia euclidiana) las celdas que contienen dichas claves se iluminan, mientras que las restantes quedan en blanco. Las Figuras 6.2, 6.3, 6.4 y 6.5 presentan los conglomerados ordenados por las diferentes reglas de enlace.

Del enlace sencillo (Figura 6.2) los conglomerados SL-E G1, SL-SE G1 y SL-CB G1 agruparon casi a los mismos puntos de muestreo y el mayor contenido de Cr como característica significativa. El SL-Che G2 reunió los casos con mayor concentración de V (Anexo B).

De los conglomerados generados con enlace completo (Figura 6.3), se observa que los miembros de CL-E G5, CL-SE G4 son muy parecidos y se caracterizan por los valores más altos de V. También CL-E G4 y CL-SE G3b resultaron similares en sitios de muestreo y concentraciones de las variables. Además de los conglomerados CL-CB T G3 y CL-IP G4 que coinciden en casos y en mayor contenido de V.

Respecto al enlace de promedio no ponderado de pares (Figura 6.4), los conglomerados que más se asemejan en sitios de muestreo y concentraciones de los elementos analizados son el UWPGA-E G3, UWPGA-SE G3. De igual manera, los grupos UWPGA-Che T G3, UWPGA-CB G2 y UWPGA-IP G3 comparten aproximadamente la misma combinación de casos y los valores más altos de vanadio. La regla de enlace de Ward ((Figura 6.5) dio que los conglomerados Ward-E G3 y Ward-SE G4 y Ward-Che T G4 reúnen los sitios de muestreo con el mayor contenido de V.



Figura 6.2 Conglomerados generados con enlace sencillo (SL). Las celdas en color indican los sitios de muestreo que pertenecen al conglomerado. Se pueden observar las similitudes entre los conglomerados SL-E G2, SL-SE G2 y SL-CB G2.

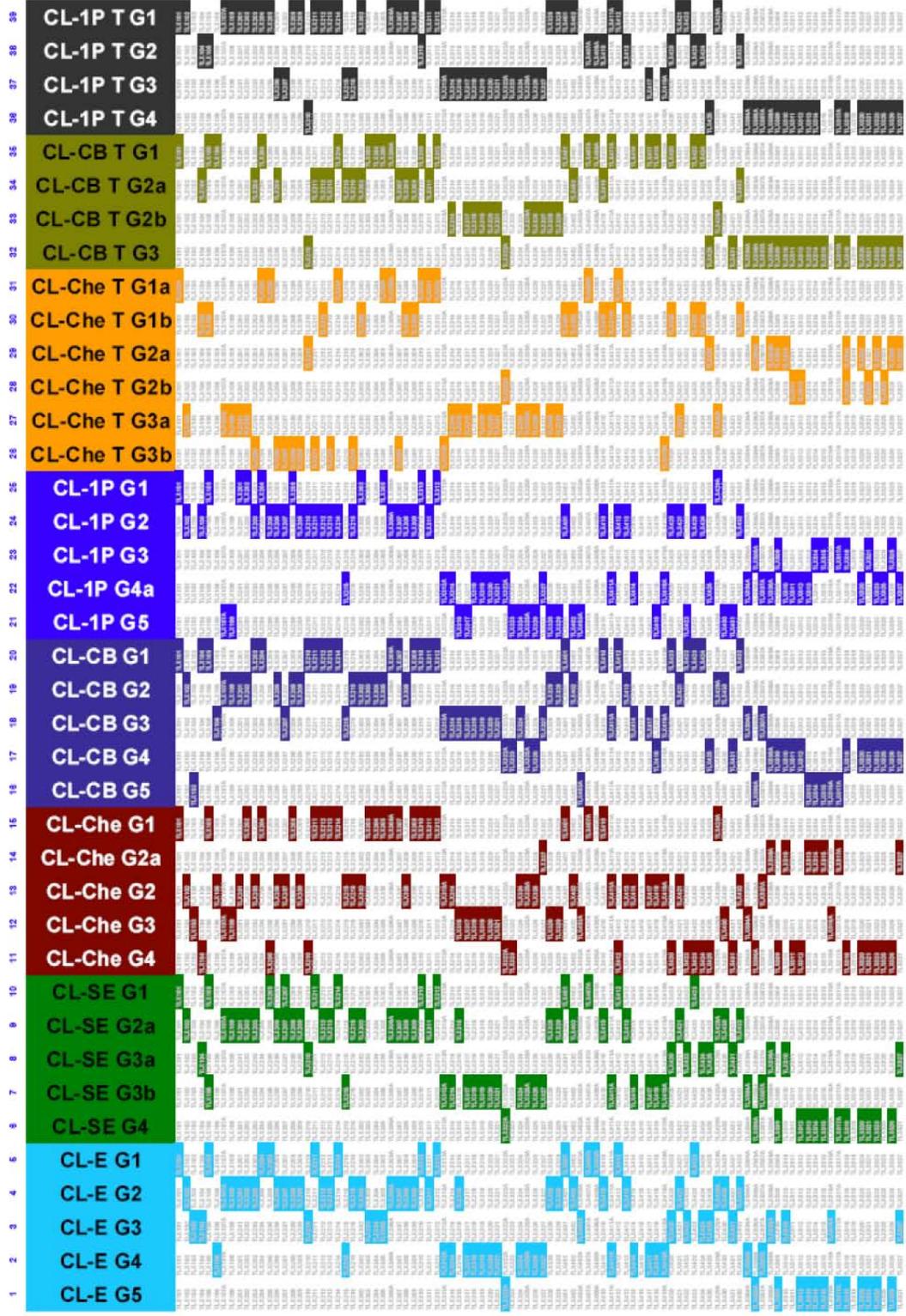


Figura 6.3 Representación de los conglomerados producidos con enlace completo (CL)

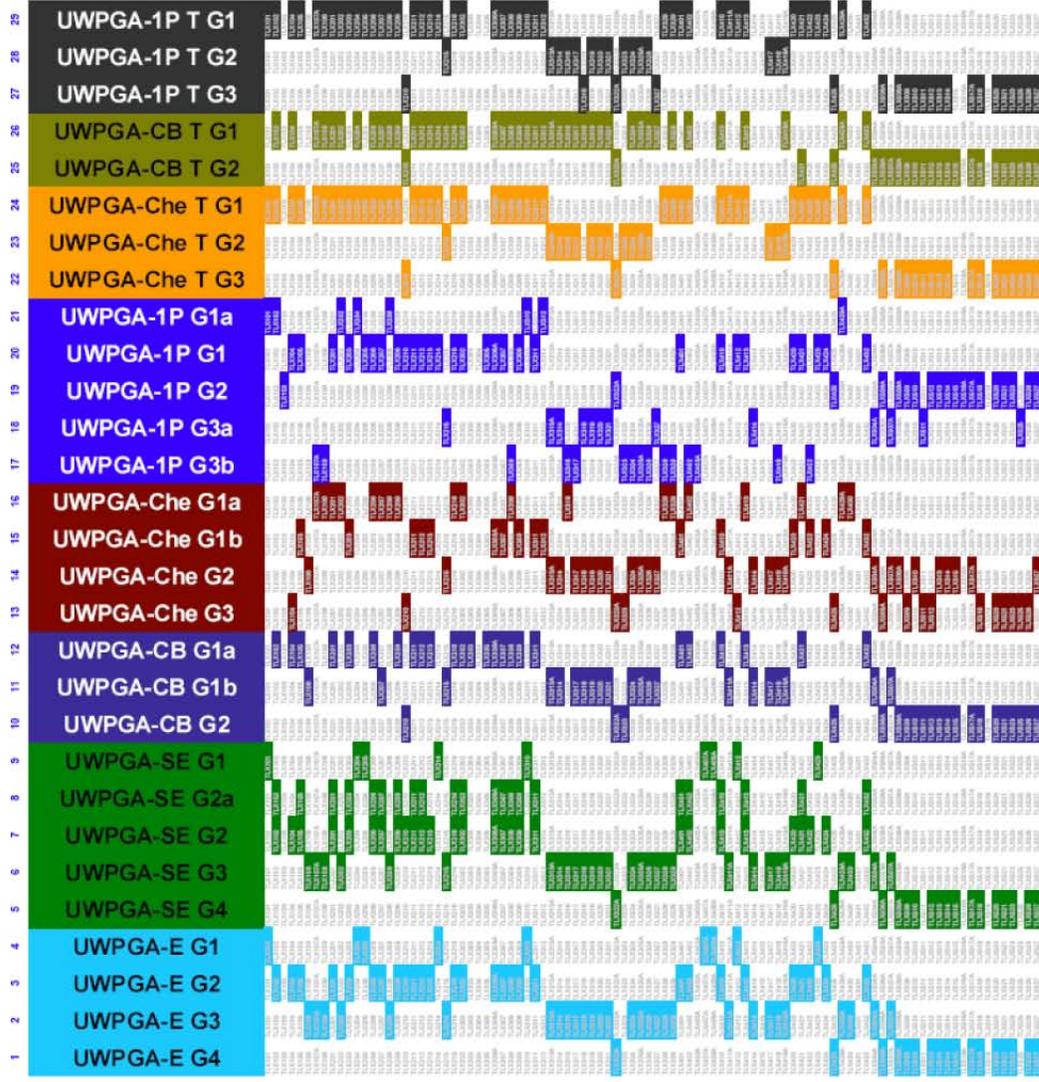


Figura 6.4 Representación de los conglomerados creados con la regla de enlace promedio no ponderado de pares.

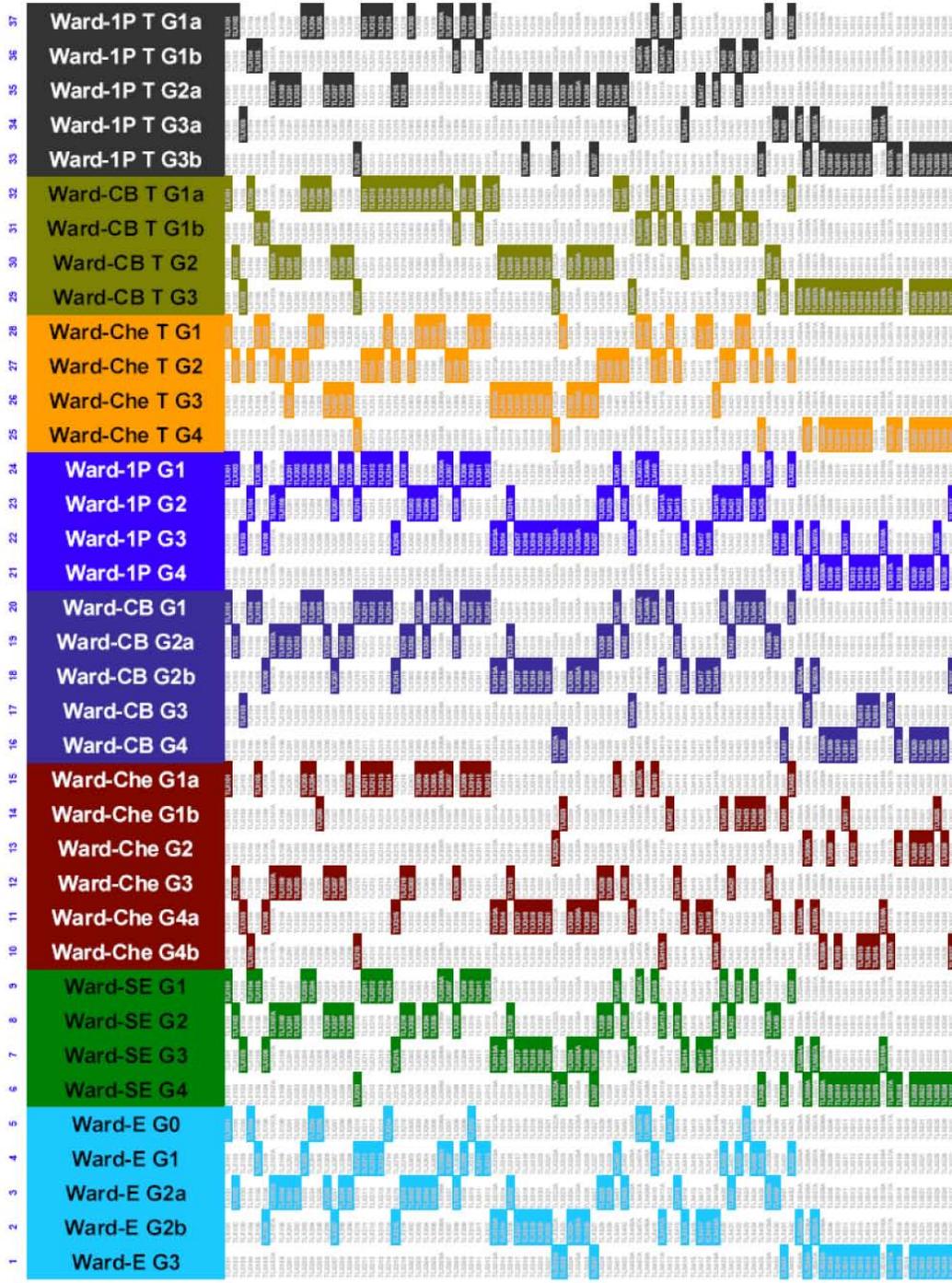


Figura 6.5 Representación de los conglomerados obtenidos por la regla de enlace Ward.

A pesar de la existencia de similitudes entre varios de los conglomerados obtenidos de los diferentes árboles; no se halló un significado claro de éstas, ya que no se identificó algún patrón acorde con la geología, la fisiografía o la hidrología superficial. Sólo algunos de los conglomerados tuvieron una correspondencia geográfica al agrupar los sitios de muestreo con los valores más altos de vanadio, mismos que se ubicaron al SE de Tlaxcala (ver mapa de distribución en el apartado de resultados). Tales conglomerados son CL–CB T G3 (la T indica que fue con los datos transformados), CL – IP G4, UWPGA – CB G2, UWPGA – CB T G2 y Ward – CB T G3, mismos que se presentan en las Figuras 6.6 a la 6.10. En dichas figuras cada conglomerado se representó por un símbolo, para facilitar su observación y se incluyó el diagrama de caja con la finalidad de observar la variación de las concentraciones de Sb, Mo, Co, Pb, Cu, Ni, Zn, Cr y V.

La dificultad para identificar algún patrón congruente con la geología, fisiografía o hidrología superficial, puede deberse a la necesidad de contar con un mayor número de sitios de muestreo, ya que un número deficiente de muestras impide evidenciar alguna manifestación geológica, fisiográfica e hidrológica. A pesar de este resultado se decidió mostrar el procedimiento para que sirva como antecedente a trabajos realizados en nuestro país. Además, queda abierta la posibilidad de determinar algún patrón a través de elaborar combinaciones entre las variables para producir otros árboles.

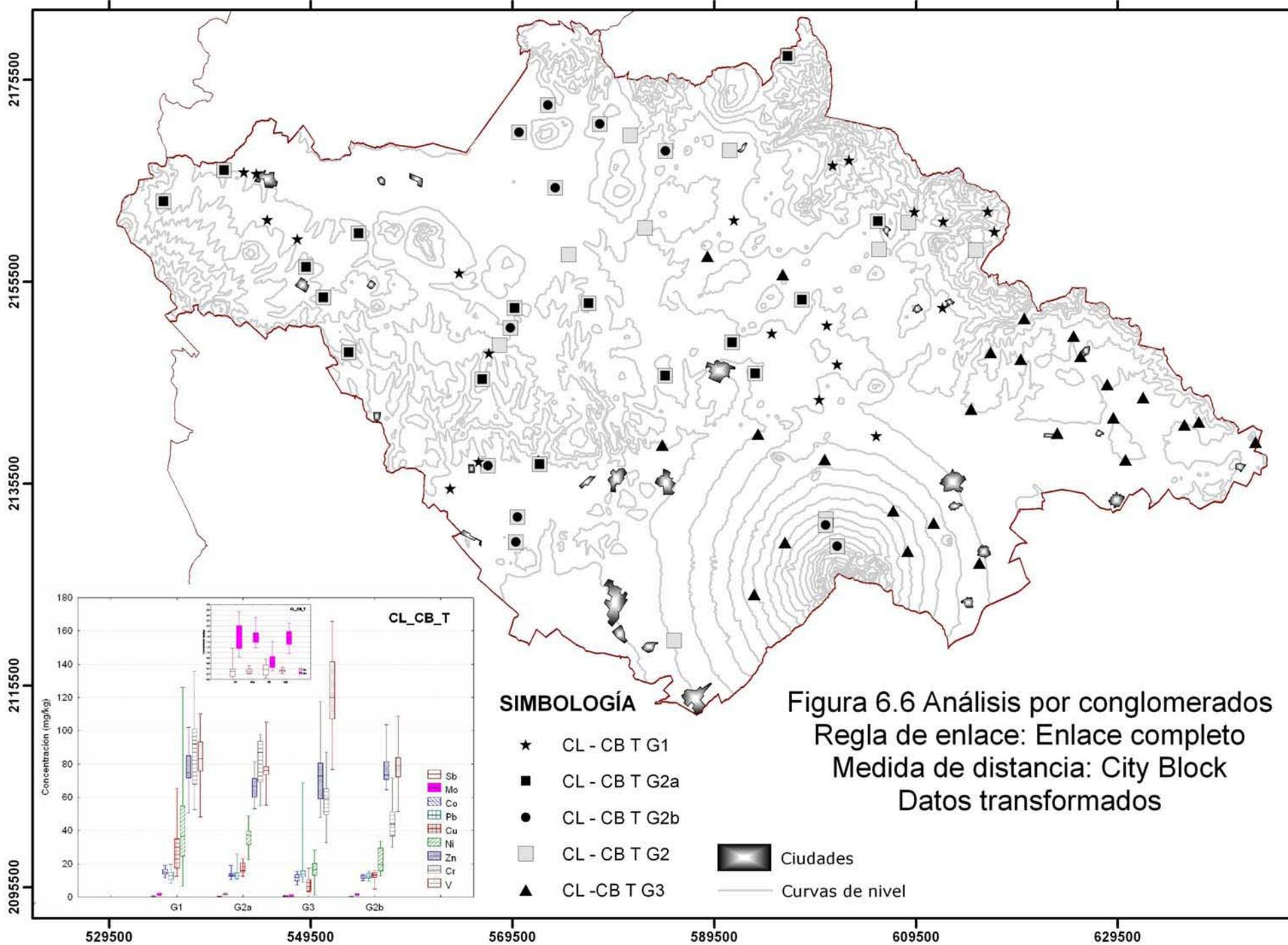
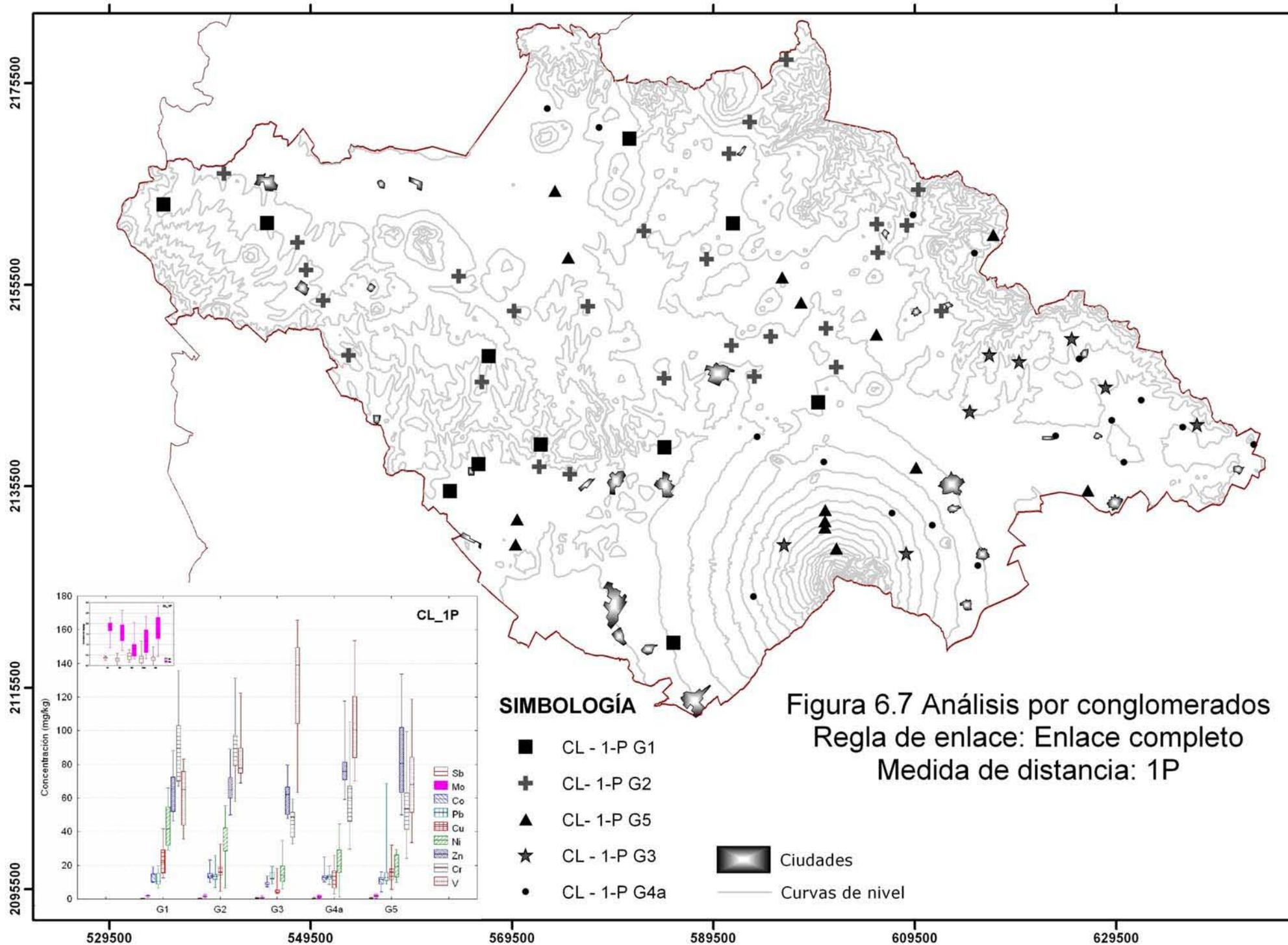


Figura 6.6 Análisis por conglomerados
 Regla de enlace: Enlace completo
 Medida de distancia: City Block
 Datos transformados



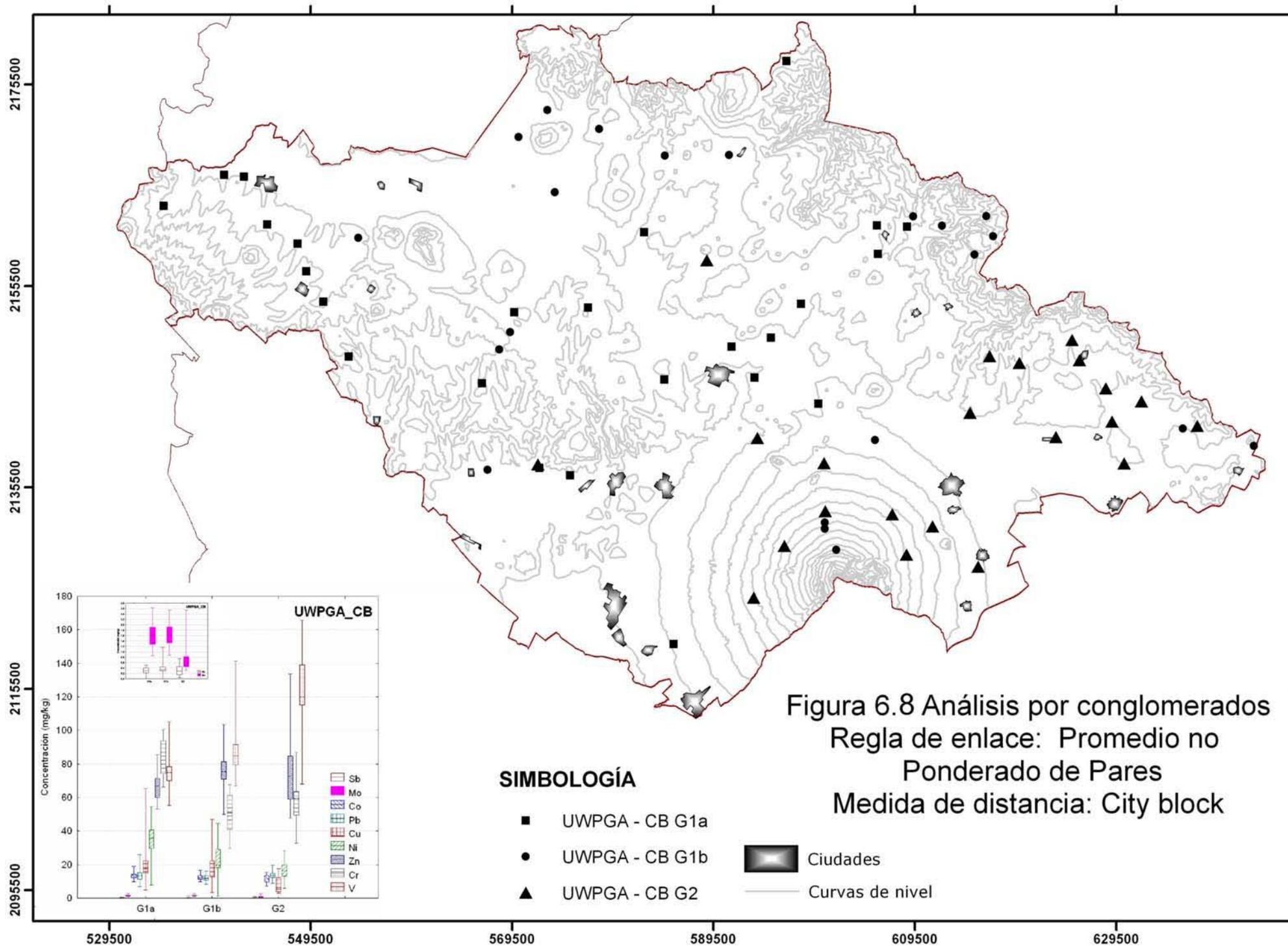


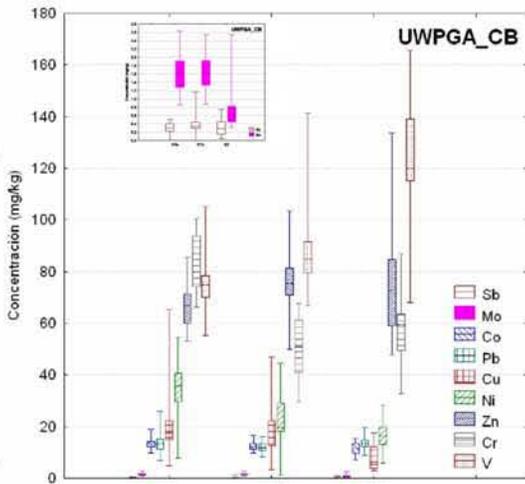
Figura 6.8 Análisis por conglomerados
 Regla de enlace: Promedio no Ponderado de Pares
 Medida de distancia: City block

SIMBOLOGÍA

- UWPGA - CB G1a
- UWPGA - CB G1b
- ▲ UWPGA - CB G2

■ Ciudades

— Curvas de nivel



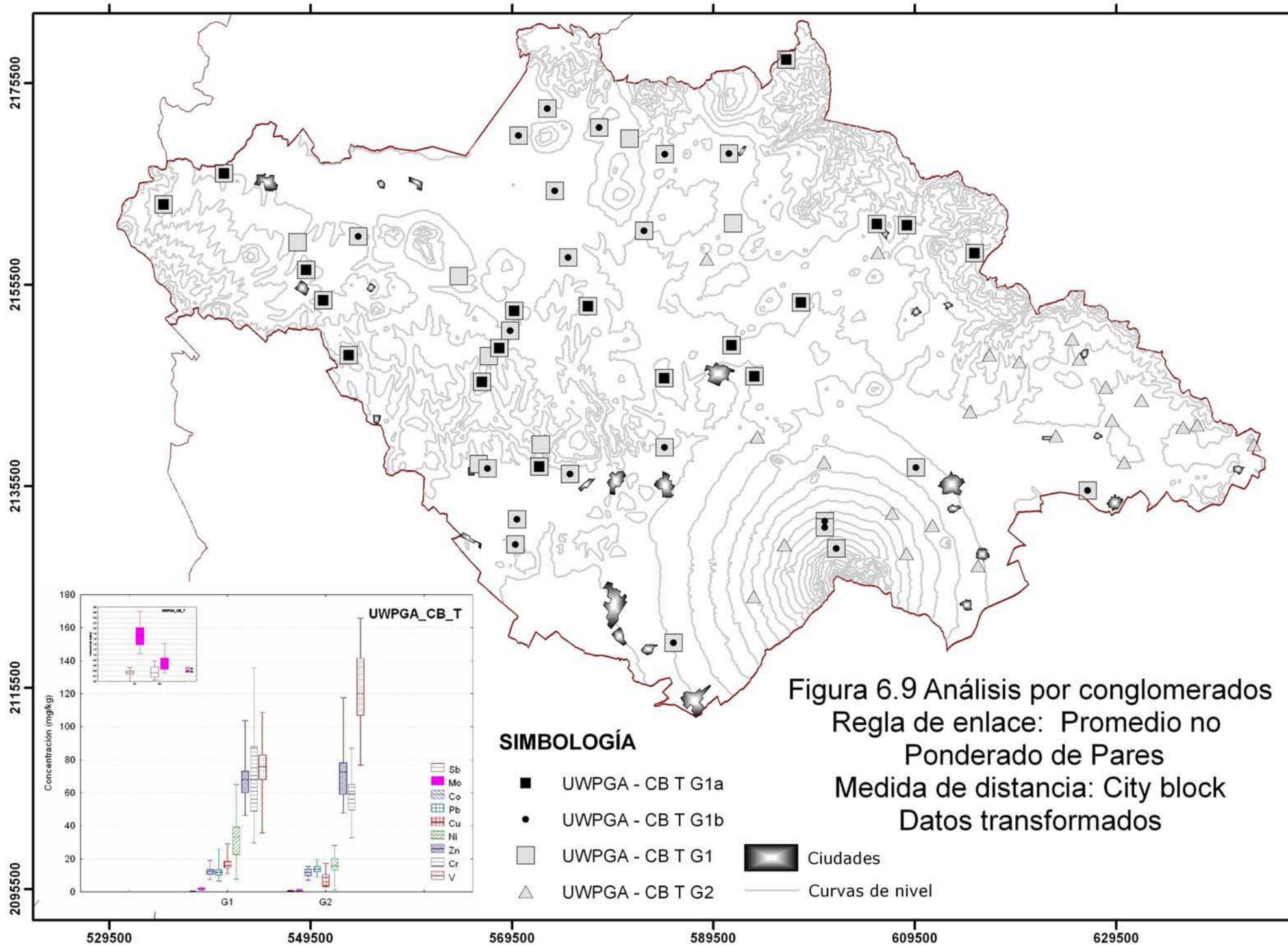
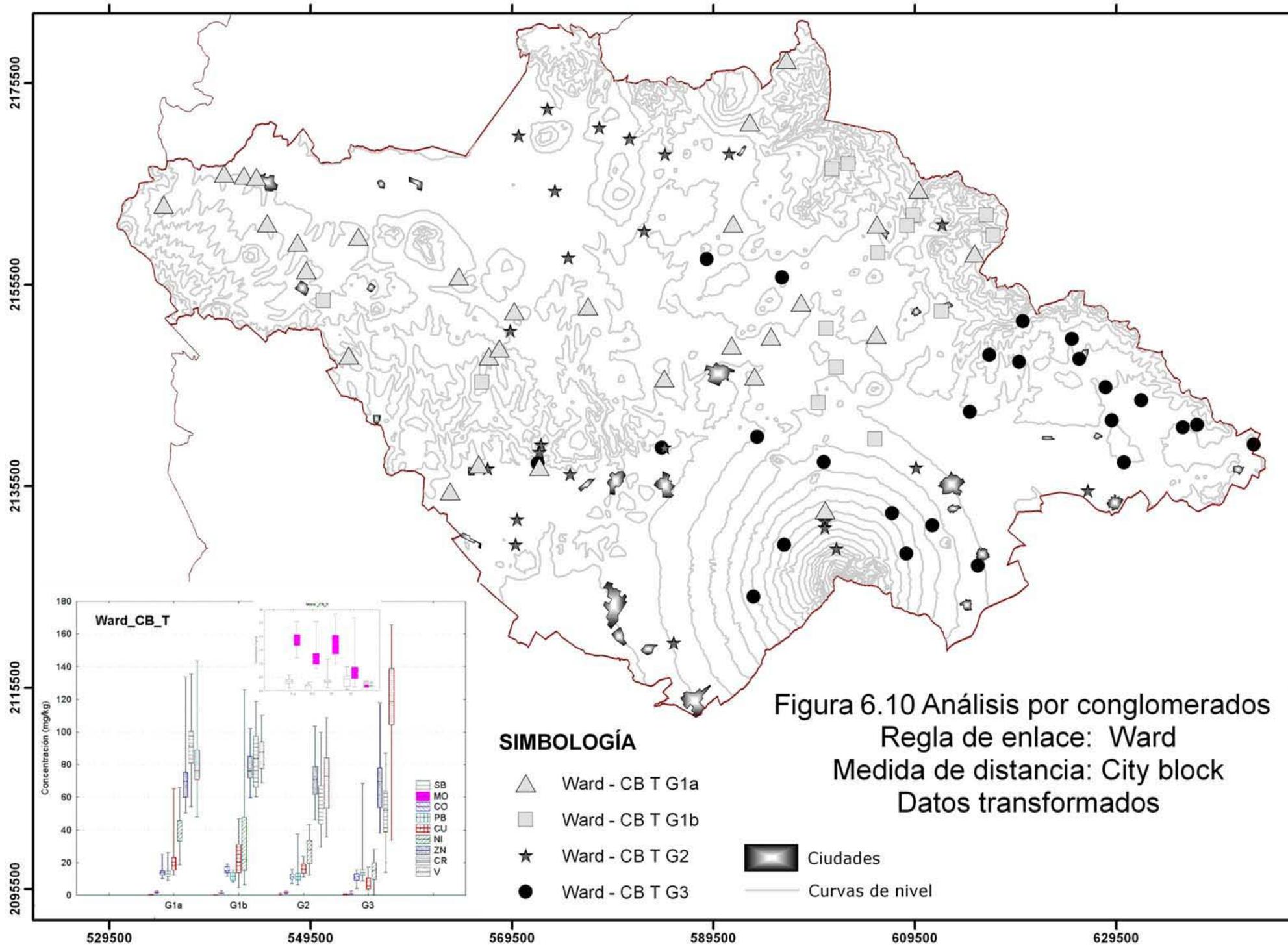


Figura 6.9 Análisis por conglomerados
 Regla de enlace: Promedio no Ponderado de Pares
 Medida de distancia: City block
 Datos transformados



7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos en la presente investigación sobre mapas geoquímicos de los suelos de Tlaxcala sugieren que las concentraciones de Cr, Ni, Pb, Tl y V en los suelos de Tlaxcala, obtenidas con HF/HClO₄, son menores a las concentraciones de referencia totales establecidas en la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA I-2004.

El análisis realizado en este trabajo, es el primero en su tipo que se hace en los suelos de Tlaxcala, sin embargo no es suficiente para concluir que las concentraciones encontradas tengan o no efectos sobre los cultivos, ganado y/o en la salud de población tlaxcalteca. Para evaluar el impacto real sobre los ecosistemas, el ganado y la población del As, Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Sb, Tl, V y Zn, es necesario elaborar un muestreo más detallado en las áreas donde se localizaron las concentraciones más elevadas de estos elementos y contar con estudios epidemiológicos que sirvan para identificar la historia natural de las enfermedades, describir la distribución, frecuencia y tendencias de la enfermedad en las poblaciones, así como causas y factores de riesgo para la aparición y desarrollo de enfermedades. Además de estudios de movilidad de metales en el suelo; adsorción y absorción de los elementos en tejidos de los vegetales cultivados, así como de órganos de animal criados en el área de estudio. Todo ello contribuiría a elaborar un perfil ambiental más completo del estado de Tlaxcala.

Se sugiere que dichos análisis se deben concentrar al Este, en los municipios de Huamantla, Alzayanca, Cuapixtla, Zitlaltepec y Teolochocho donde se manifestaron las concentraciones más altas de arsénico; en los alrededores de Calpulalpan donde se obtuvieron concentraciones elevadas de cobre; al NE, en el municipio de Tlaxco donde se presentaron alto contenido de Ni, y en las inmediaciones del volcán La Malinche donde se encontraron los valores más altos de Zn.

Por otro lado, la prueba de Kruskal-Wallis dio por resultado que las medianas del Cr y Ni de los suelos agrícolas fueron significativamente mayores a las de los no agrícolas; pero aún con estos datos no se puede concluir sobre un aporte antropogénico ya que sería necesario conocer a detalle las fuentes potenciales.

Respecto al análisis de correlación por medio de la *rho* de Spearman, dio por resultado que el As y V presentaron la mejor correlación positiva ($\rho = 0,73$), seguidos del Cr y Co ($\rho = 0,65$), Cr y Ni ($\rho = 0,63$) y Ni y Cu ($\rho = 0,61$). Para

entender mejor estos resultados sería conveniente desarrollar estudios de mineralogía de los suelos y las rocas de Tlaxcala.

Del análisis de conglomerados realizado a pesar de las similitudes entre los diversos árboles, no se halló un significado claro de tales semejanzas, ya que no se identificó algún patrón acorde con la geología, la fisiografía o la hidrología superficial. Sólo cinco de los conglomerados, CL-CB T G3, CL - I P G4, UWPGA - CB G2, UWPGA - CB T G2 y Ward - CB T G3, tuvieron una correspondencia geográfica al agrupar los sitios de muestreo con los valores más altos de vanadio, mismos que se ubicaron al SE de Tlaxcala. Tal dificultad puede deberse a la necesidad de contar con un mayor número de sitios de muestreo y una descripción geológica con más detalle. A pesar de este resultado se decidió mostrar el procedimiento para que sirva como antecedente a trabajos realizados en nuestro país. Además, queda abierta la posibilidad de determinar algún patrón a través de elaborar combinaciones entre las variables para producir más árboles.

Finalmente, para un uso adecuado del recurso suelo es imprescindible contar mapas geoquímicos no sólo de áreas con problemas actuales de contaminación sino de todo el territorio nacional. Dicho conocimiento puede servir de base para la toma de decisiones tanto para el sector privado como el público en materia de agricultura, ganadería, protección ambiental y planeación urbana.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adriano, D.C., 1986, Zinc, in Adriano, D.C. Trace elements in the terrestrial environment: New York, Springer, p. 421 - 469.
- Andersen, K.J., y Kisser, M.I., 2004, Digestion of Solid Matrices Desk Study - Horizontal, Eurofins A/S, Denmark NÖ Umweltschutzanstalt, Austria, p. 59.
- BC-MELP, 1986, Water Quality criteria for Molybdenum, British Columbia Ministry of Environment, Lands and Parks.
- Bhattacharya, P., Jacks, G., Frisbie, S.H., Smith, E., Naidu, R., y Sarkar, B., 2002, Arsenic in the Environment: A Global Perspective, in Sarkar, B., ed., Heavy Metals in the Environment, Marcel Dekker, Inc.
- Cannon, H.L., Connally, G.C., Epstein, J.B., Parker, J.G., Thornton, I., y Wixson, G., 1978, Rocks: geological sources of most trace elements. Workshop at South Seas plantation Captiva Islands, FL, US.: Geochem Environ, v. 3, p. 17 - 31.
- Chen, M., Ma, L.Q., y Harris, W., 1998, Background concentrations of trace metals in Florida surface soils: Comparison of Four EPA Digestion Methods and Baseline Concentration of 15 metals, University of Florida, p. 71.
- Darnley, A.G., Björklund, A., Bolviken, B., Gustavsson, N., Koval, P.V., Plant, J.A., Steenfelt, A., Tauchid, M., y Xuejing, X., 1995, A Global Geochemical Database for Environmental and Resource Management. Recommendations for International Geochemical Mapping, Earth Science: Paris, UNESCO Publishing, p. 122.
- Demant, A., 1978, Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación: Rec. Inst. Geol., v. 2, p. 172 - 173.
- Ferrari, L., 2000, Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, v. LIII, p. 84-92.
- Flores, L., Blas, G., Hernández, G., y Alcalá, R., 1997, Distribution and sequential extraction of some heavy metals from soils irrigated with wastewater from Mexico city: Water, Air, and Soil Pollution, v. 98, p. 105 - 117.
- Fordyce, F., Williams, T., Palittpapapon, A., y Charoenchaisri, P., 1995, Hydrogeochemistry of arsenic in an area of chronic mining-related arsenism, Ron Phibun District. Keyworth, UK: British Geological Survey.
- Friedel, J.K., Langer, T., Siebe, C., y Stahr, K., 2000, Effects of long-term waste water irrigation on soil organic matter, soil microbial biomass and its activities in central Mexico: Biol Fertil Soils, v. 31, p. 414 - 421.
- Fyfe, W.S., 1996, Trace metals: the good, the bad and the ugly (abstract), Geol. Assoc Can - Mineral Assoc Can Program.

- Gilbert, R.O., 1987, *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*: New York, Van Nostrand Reinhold, 320 p.
- Gobierno del Estado de Tlaxcala, 1998, *Monografía de los municipios del estado de Tlaxcala*, Gobierno del Estado de Tlaxcala.
- González-Medrano, F., 2004, *Las comunidades vegetales de México*: México, D.F., Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), 82 p.
- Gustavsson, N., Lampio, E., Nilsson, B., Norblad, G., Ros, F., y Salminen, R., 1994, *Geochemical maps of Finland and Sweden: Journal of Geochemical Exploration*, v. 51, p. 143-160.
- Guthrie, G.D., 1992, *Biological effects of inhaled minerals: Am Mineral*, v. 77, p. 225 - 243.
- Henderson, P.J., McMartin, I., Hall, G., Walker, D., y Percibal, J.B., 1996, *Distribution of heavy metals in humus and till samples in the vicinity of the smelter at Flin Flon, Manitoba (abstract)*, *Geol Assoc Can - Mineral Assoc Can Program*, Volume 21, p. A43.
- Hernández-Álvarez, E., González-Hernández, G., y Morton-Bermea, O., 2004, *Manual de preparación de muestras para análisis por espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS)*: México, D.F., Instituto de Geofísica, p. 14.
- Hernández-Silva, G., Solorio-Munguía, J.G., Maples-Vermeersch, M., Vasallo-Morales, L., Flores-Delgadillo, L., Hernández-Santiago, D., Solís-Valdez, S., Hernández-Anguiano, M.E., and Alcalá-Martínez, J.R., 2005, *Monitoreo de contaminantes en las cuencas de los ríos Guanajuato, San Juan de Otates y Turbio y su impacto en el río Lerma, estado de Guanajuato, México*: México, D.F., Instituto de Geología.
- INEGI, 1985, *Anuario Estadístico del estado de Tlaxcala 1984*: México.
- INEGI, 1986, *Síntesis Geográfica de Tlaxcala*.
- Johannesson, M., Anheden, M., Arrhenius, E., Dahl, J., Ericson, S.-O., Hinderson, A., Nielsen, B., Obernberger, I., y Riddell-Black, D., 2002, *The Market Implication of Integrated Management for Heavy Metals Flows for Bioenergy use in the European Union*: Kalmar, Sweden, p. 115.
- Johnston, K., Hoef, J.M.V., Krivoruchko, K., y Lucas, N., 2001, *Using Geostatistical Analyst, GIS by ESRI*, ESRI.
- Korte, F., 1983, *Ecotoxicology of cadmium: general overview: Ecotoxicol. Environ. Saf.*, v. 7, p. 3 - 8.
- Larocque, A.C.L., y Rasmussen, P.E., 1998, *An overview of trace metals in the environment, from mobilization to remediation: Environmental Geology*, v. 33, p. 85 - 91.
- Lide, D.R., y Frederikse, H.P.R., 1993, *CRC Handbook of chemistry and physics*: Boca Raton, Florida, CRC Press.
- Lobinski, R., Moulin, C., y Ortega, R., 2006, *Imaging and speciation of trace elements in biological environment: Biochimie*, v. 88, p. 1591-1604.
- Lucho-Constantino Carlos A., Álvarez-Suárez Mirian, Beltrán-Hernández Rosa I., Prieto García Francisco, y M., P.-V.H., 2005, *A multivariate analysis of the*

- accumulation and fractionation of mayor and trace elements in agricultural soils in Hidalgo State, Mexico irrigated with raw wastewater: *Environmental International*, v. 31, p. 313 - 323.
- Mahlknecht, J., Steinich, B., y León, I.N.d., 2004, Groundwater chemistry and mass transfers in the Independence aquifer, central Mexico, by using multivariate statistics and mass-balance models: *Environmental Geology*, v. 45, p. 781 - 795.
- Marschner, H., 1986, *Mineral nutrition of higher plants.*: New York, Academic Press.
- Mason, B., 1952, *Principles of geochemistry*: New York, John Wiley & Sons, London, Chapman & Hall, 276 p.
- Mayor-Gallego, J.A., 2004, *Estadística Descriptiva, Diplomatura de Estadística. Curso 2004 - 2005*: Sevilla, España, Facultad de Matemáticas y Estadística.
- Méndez-Ortiz, B.A., 2003, *Caracterización y modelamiento hidrogeoquímico de la oxidación de sulfuros durante la alteración simulada de jales mineros procedentes de una mineralización tipo skarn Pb-Zn-Ag*: San Luis Potosí, Universidad Autónoma de Sal Luis Potosí.
- Merian, E., 1984, Introduction on environmental chemistry and global cycles of arsenic, beryllium, cadmium, chromium, cobalt, nickel, selenium, and their derivatives.: *Toxicol. Environ. Chem*, v. 8, p. 9 - 38.
- Mireles, A., Solís, C., Andrade, E., Lagunas-Solar, M., Piña, C., y Flocchini, R.G., 2004, Heavy metal accumulation in plants and soil irrigated with wastewater from Mexico city: *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.*, v. B, p. 187 - 190.
- Morton, O., Hernández, E., Lounejeva, E., y Armenta, M.A., 1997, Desarrollo y aplicación de un método analítico para la determinación de lantánidos en materiales geológicos por de ICP-MS, *Actas INAGEQ*, Volume 3, p. 259-264.
- Morton-Bermea, O., Hernández-Álvarez, E., Gaso, I., y Segovia, N., 2002, Heavy Metal Concentrations in Surface Soils from Mexico City: *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, v. 68, p. 383 - 388.
- Nordberg, M., y Nordberg, u.F., 2002, Cadmium, in Sarkar, B., ed., *Heavy Metals in the Environment*, Marcel Dekker, Inc.
- Nriagu, J., 1989, A global assessment of natural sources of atmospheric trace metals (abstract): *Nature*, v. 338, p. 47-49.
- Nriagu, J.O., 1998, *In Thallium in the Environment*, Wiley.
- Olivares, G., 2005, *Mercado nacional e internacional del Molibdeno: Chile*, Comisión Chilena del Cobre.
- Ongley, L.K., Armenta, A., y Mango, H., 2003, Concentrations of heavy metals in soil, Zimapan, Mexico, *J. Phys. IV France*, Volume 107, p. 983 - 986.
- Page, A.L., Bingham, F.T., y Chang, A.C., 1981, Cadmium. In *Effect to Heavy metal pollution on plants*, in Leep, N.W., ed., Vol. 1: *Effects of trace metals on plant function*, Volume 1: England, Applied Science Publishers, p. 77 - 109.

- Peh, Z., y Miko, S., 2001, Geochemical comparison of stream and overbank sediments: A case study from the Zumberak Region, Croatia: *Geologia Croatica*, v. 54/1, p. 119-130.
- PROFEPA, 2000, Memorias 1999 – 200 del Grupo de Trabajo sobre Restauración de Suelos Contaminados. Procuraduría Federal de Protección Ambiental, México.
- Rawlis, B.G., Lister, T.R., y Mackenzie, A.C., 2002, Trace-metal pollution of soils in northern England: *Environmental Geology*, v. 42, p. 612-620.
- Razo, I., Carrizales, L., Castro, J., Díaz-Barriga, F., y Monroy, M., 2004, Arsenic and heavy metal pollution of soil, water and sediments in a semi-arid climate mining area in Mexico: *Water, Air, and Soil Pollution*, v. 152, p. 129 - 152.
- Razo, I., Carrizales, L., Castro, J., Díaz-Barriga, F., y Monroy, M., 2004, Arsenic and heavy metal pollution of soil, water and sediments in a semi-arid climate mining area in Mexico: *Water, Air, and Soil Pollution*, v. 152, p. 129 - 152.
- Reimann, C., y Filzmoser, P., 1999, Normal and lognormal data distribution in geochemistry: death o myth. Consequences for the statistical treatment of geochemical and environmental data: *Environmental Geology*, v. 39, p. 1001-1014.
- Rius, F., Barón, F.J., Sánchez, E., y Parras, L., 1999, Bioestadística: métodos y aplicaciones: Málaga, Ed. SPICUM, 322 p.
- Rosas, I., Belmont, R., Armienta, A., y Baez, A., 1999, Arsenic concentrations in water, soil, milk and forage in Comarca Lagunera, Mexico: *Water, Air, and Soil Pollution*, v. 133, p. 133 - 149.
- Salminen, R., Chekushin, V., Tenhola, M., Bogatyrev, I., Glavatskikh, S.P., Fedotova, E., Gregorauskiene, V., Kashulina, G., Niskavaara, H., Polischuk, A., Rissanen, K., Selenok, L., Tomilina, O., y Zhdanova, L., 2004, *Geochemical Atlas of the Eastern Barents Region*, ELSEVIER, 548 p.
- Salminen, R., Tarvainen, T., Demetriades, A., M. Duris, Fordyce, F.M., Gregorauskiene, V., Kahelin, H., Kivisilla, J., Klaver, G., Klein, H., Larson, J.O., Lis, J., Locutura, J., Marsina, K., Mjartanova, H., Mouvet, C., O'Connor, P., Odor, L., Ottonello, G., Paukola, T., Plant, J.A., Reimann, C., Schermann, O., Siewers, U., Steenfelt, A., Sluys, J.V.d., y Williams, L., 1998, FOREGS geochemical mapping. Field manual., Geologian tutkimuskeskus, Opas - Geological Survey of Finland,, p. 36 pages.
- Sastre, J., Sahuquillo, A., Vidal, M., y Rauret, G., 2002, Determination of Cd, Cu, Pb and Zn in environmental samples: microwave-assisted total digestion versus aqua regia and nitric acid extraction: *Analytica Chimica Acta*, v. 462, p. 59-72.
- Schloeder, C.A., Zimmerman, N.E., y Jacobs, M.J., 2001, Comparison of Methods for Interpolating Soil Properties Using Limited Data: *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 65, p. 470 - 479.
- SECODUVI, 1997, Plan de Desarrollo Urbano Regional de la Región Sur del Estado de Tlaxcala.
- SECODUVI, 2000, Plan Estatal de Desarrollo Urbano de Tlaxcala.

- SEMARNAT-INE, y Gobierno del Estado de Tlaxcala., 2001, Ordenamiento Ecológico del Estado de Tlaxcala, Instituto de Ecología. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, p. 332.
- Sepúlveda, T.V., Trejo, J.A.V., y Pérez, D.A.d.l.R., 2005, Suelos contaminados por metales y metaloides: Muestreo y alternativas para su remediación: México, D.F., Instituto Nacional de Ecología (INE-Semarnat), 141 p.
- Sheppard, S.C., 1998, Geophagy: who eats soil where do possible contaminants go?: *Environ Geol*, v. 33, p. 109 - 114.
- Smith, A.H., Lingas, E.O., y Rahman, M., 2000, Contamination of drinking-water by arsenic in Bangladesh: a public health emergency: *Bull World Health Organ*, v. 78, p. 1093 - 1103.
- Smith, I.C., y Carson, B.L., 1977, Trace metals in the environment I. Thallium: Michigan, Ann Arbor Science.
- StatSoft, Inc. (2004). STATISTICA (data analysis software system), version 7. www.statsoft.com
- Stimac, J., 1996, Assessing volcanic contributions to global metal emissions, *Geol Assoc Can - Mineral Assoc Can Program*, Volume 21, p. A91.
- Templ, M., 2003, Cluster Analysis with Application to Data from Geochemistry [Master's Thesis, thesis]: Vienna, Univ. of Technology
- US-EPA, 1986, Air quality criteria for lead.: Washington DC, Environmental Protection Agency.
- Vrana, K., Rapant, S., Bodis, D., Marsina, K., Mankovská, B., Curlík, J., Sefčík, P., Daniel, J., Lucivjansky, L., Lexa, J., y Pramuka, S., 1997, Geochemical Atlas of the Slovak Republic at a scale of 1:1,000,000: *Journal of Geochemical Exploration*, v. 60, p. 7-37.
- Weber, D., y Englund, E., 1992, Evaluation and comparison of spatial interpolators: *Mathematical Geology*, v. 24, p. 381 - 391.
- WHO, 1977, Lead . Environmental Health Criteria 3: Gèneva, IPCS - WHO, ILO & UNEP.
- WHO, 1988a, Chromium. Environmental Health Criteria 61: Geneva, IPCS - WHO, ILO & UNEP.
- WHO, 1988b, Vanadium: Geneva, IPCS - WHO, ILO & UNEP.
- WHO, 1989, Lead- Environmental aspects: Geneva, IPCS - WHO, ILO & UNEP.
- WHO, 1991, Nyckel. Environmental Health Criteria 108: Geneva, IPCS - WHO, ILO & UNEP.
- WHO, 1992, Cadmium - Environmental aspects - Environmental Health Criteria 135: Geneva, IPCS - WHO, ILO & UNEP.
- WHO, 1996, Thallium: Geneva, IPCS - WHO, ILO & UNEP.
- WHO, 1998, Cooper. Environmental Health Criteria 200: Gèneva, IPCS - WHO, ILO & UNEP.
- WHO, 2001, Arsenic and Arsenic compounds. Environmental Health Criteria 224: Geneva, IPCS - WHO, ILO & UNEP.
- Wood, R., 1999. How to validate analytical methods. *Trends in analytical chemistry*, v. 18. nos. 9-10. p 624-632.

- Xuejing, X., y Tianxiang, R., 1993, National geochemical mapping and environmental geochemistry - progress in China: *Journal of Geochemical Exploration*, v. 49, p. 15-34.
- Zoller, W.H., Gordon, G.E., Gladney, E.S., y Jones, A.G., 1973, The sources and distribution of vanadium in the atmosphere, *Trace elements in the environment*: Washington DC, American Chemical Society, p. 31 - 47.

ANEXO A. Relación de localización y concentraciones de As, Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Sb, Tl, V y Zn de los sitios de muestreo

No	CLAVE	E_UTM	N_UTM	Uso de suelo	Municipio	As	Cd	Co	Cr	Cu	Mo
1	TLX101	563342	2135025	Agrícola	Tepetitla de Lardizabal	1,62	0,17	14,43	94,85	35,08	1,9523
2	TLX102	575251	2136714	Agrícola	Panotla	0,38	0,13	9,66	66,64	12,20	1,0549
3	TLX103	584362	2139330	Agrícola	Apetatitla de Antonio Carvajal	7,94	0,13	6,26	14,08	11,00	1,4104
4	TLX104	593572	2146418	Agrícola	Apizaco	5,64	0,12	12,20	86,44	23,09	1,2025
5	TLX105	599928	2143827	Agrícola	Xaloztoc	< LD	0,16	14,93	97,38	24,07	0,8540
6	TLX106	605563	2140229	Agrícola	Huamantla	4,83	0,19	11,55	60,37	46,93	0,9846
7	TLX107A	609613	2137359	Agrícola	Huamantla	1,39	0,18	9,74	47,58	15,92	1,0330
8	TLX108	626696	2135088	Agrícola	Cuapiaxtla	< LD	0,22	8,98	55,57	16,69	1,3647
9	TLX201	585533	2119960	Agrícola	Papalotla de Xicohtencatl	3,84	0,21	10,53	67,11	22,68	1,8119
10	TLX202	584636	2139352	Agrícola	Apetatitla de Antonio Carvajal	< LD	0,17	10,13	69,90	18,31	1,6845
11	TLX203	591290	2149488	Agrícola	Tetla	4,52	0,32	13,24	87,10	18,21	1,5945
12	TLX204	591463	2161601	Agrícola	Atlangatepec	4,11	0,32	19,03	103,00	29,08	1,7338
13	TLX205	593122	2171651	Agrícola	Tlaxco	9,79	0,35	23,17	131,35	32,78	2,5527
14	TLX206	596758	2177849	Natural	Tlaxco	8,31	0,37	15,67	66,05	15,83	2,3207
15	TLX207	591051	2168512	Agrícola	Tlaxco	9,68	0,39	10,74	58,01	19,04	1,9167
16	TLX208	581165	2170010	Agrícola	Tlaxco	3,05	0,49	10,16	69,62	14,41	2,2668
17	TLX209	582626	2160851	Agrícola	Atlangatepec	10,30	0,58	11,17	79,19	17,54	2,6309
18	TLX210	588832	2158049	Agrícola	Atlangatepec	9,15	1,22	13,50	87,16	4,35	0,7227
19	TLX211	584634	2146208	Agrícola	Yauhquemehcan	4,94	< LD	13,43	97,45	15,89	1,6757
20	TLX212	577057	2153363	Agrícola	Xaltocan	3,63	< LD	10,29	94,02	16,14	1,4036
21	TLX213	569710	2152890	Agrícola	Hueyotlipan	8,69	< LD	12,25	87,90	15,13	1,7596
22	TLX214	564212	2156346	Agrícola	Hueyotlipan	8,14	< LD	13,32	120,93	14,55	1,9304
23	TLX215	554234	2160298	Agrícola	Calpulalpan	6,43	< LD	12,26	54,84	22,22	1,3815
24	TLX216	540900	2166558	Agrícola	Calpulalpan	6,39	< LD	13,75	70,23	16,23	2,0207
25	TLX302	534894	2163476	Agrícola	Calpulalpan	1,67	< LD	14,39	76,60	21,66	1,6597
26	TLX303	542881	2166373	Agrícola	Calpulalpan	3,32	< LD	14,14	87,11	65,26	2,0104
27	TLX304	544107	2166215	Natural	Calpulalpan	2,88	< LD	13,65	57,16	50,85	2,2894
28	TLX305	545186	2161619	Agrícola	Calpulalpan	3,83	< LD	14,28	89,66	41,67	2,0342
29	TLX306A	548179	2159724	Agrícola	Nanacamilpa de Mariano Anista	3,65	< LD	17,90	100,59	21,39	2,0811
30	TLX307	549048	2156979	Agrícola	Nanacamilpa de Mariano Anista	5,56	0,59	13,68	93,76	12,55	2,0603
31	TLX308	550749	2153953	Agrícola	Sanctorum de Lázaro Cárdenas	4,67	0,06	18,92	66,14	12,49	1,1848
32	TLX309	553261	2148510	Agrícola	Españita	7,52	< LD	12,45	93,17	14,70	1,7344
33	TLX310	566170	2137692	Agrícola	Ixtacuxtla de Mariano Matamoros	3,44	< LD	16,58	135,66	15,59	2,0268
34	TLX311	566519	2145852	Agrícola	Ixtacuxtla de Mariano Matamoros	3,29	2,15	18,75	97,71	14,85	1,4863
35	TLX312	567183	2148422	Natural	Hueyotlipan	3,26	< LD	14,98	116,79	12,55	1,8517
36	TLX313A	568224	2149219	Agrícola	Españita	10,09	0,01	13,35	61,42	16,79	2,3386
37	TLX314	569302	2150939	Agrícola	Hueyotlipan	7,65	< LD	13,24	45,89	14,01	1,8340
38	TLX316	575089	2158212	Agrícola	Panotla	4,93	0,06	7,40	48,29	18,24	2,0612
39	TLX317	573751	2164823	Agrícola	Tlaxco	5,67	0,22	12,23	41,23	16,14	1,7199
40	TLX318	570149	2170301	Agrícola	Tlaxco	7,77	0,13	12,00	29,92	13,26	1,2433
41	TLX319	573022	2172992	Agrícola	Tlaxco	7,02	0,04	11,16	38,96	14,62	1,7422
42	TLX320	578158	2171118	Agrícola	Tlaxco	8,81	0,12	11,20	45,99	14,81	1,6184
43	TLX321	584674	2168464	Agrícola	Tlaxco	11,22	2,21	13,26	29,67	12,80	1,9968
44	TLX322A	600467	2137905	Agrícola	San José Teacalco	13,57	< LD	15,10	50,80	10,52	1,4202
45	TLX323	600605	2133145	Natural	San Francisco Tetlanohcan	6,80	0,58	10,32	54,28	14,94	2,5363
46	TLX324	600580	2132013	Natural	San Francisco Tetlanohcan	6,50	1,09	8,91	41,34	17,61	2,2904
47	TLX325A	601701	2129304	Natural	San Francisco Tetlanohcan	7,86	< LD	9,81	63,02	11,27	2,1052
48	TLX326	600562	2131410	Natural	San Francisco Tetlanohcan	4,07	< LD	13,03	34,25	11,09	1,4992

ANEXO A. Relación de localización y concentraciones de As, Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Sb, Tl, V y Zn de los sitios de muestreo

No	CLAVE	E_UTM	N_UTM	Uso de suelo	Municipio	Ni	Pb	Sb	Tl	V	Zn
1	TLX101	563342	2135025	Agrícola	Tepetitla de Lardizabal	65,90	19,65	0,3883	0,6523	68,26	88,20
2	TLX102	575251	2136714	Agrícola	Panotla	28,41	9,36	0,2644	0,4203	70,35	58,99
3	TLX103	584362	2139330	Agrícola	Apetatitla de Antonio Carvajal	5,72	10,62	0,5107	0,5254	62,14	46,29
4	TLX104	593572	2146418	Agrícola	Apizaco	36,85	11,82	0,2455	0,4065	105,20	57,92
5	TLX105	599928	2143827	Agrícola	Xaloztoc	54,55	11,32	0,2386	0,4867	83,19	84,34
6	TLX106	605563	2140229	Agrícola	Huamantla	19,07	8,66	0,2410	0,4572	97,51	77,73
7	TLX107A	609613	2137359	Agrícola	Huamantla	19,17	8,88	0,3552	0,6456	54,71	61,23
8	TLX108	626696	2135088	Agrícola	Cuapiaxtla	20,07	9,23	0,4404	0,5993	49,05	63,23
9	TLX201	585533	2119960	Agrícola	Papalotla de Xicohtencatl	41,74	9,58	0,4026	0,5994	61,90	65,49
10	TLX202	584636	2139352	Agrícola	Apetatitla de Antonio Carvajal	31,75	9,13	0,3791	0,6494	40,89	52,03
11	TLX203	591290	2149488	Agrícola	Tetla	48,09	11,50	0,4194	0,5927	74,66	67,99
12	TLX204	591463	2161601	Agrícola	Atlangatepec	65,08	9,02	0,3815	0,5793	75,72	60,04
13	TLX205	593122	2171651	Agrícola	Tlaxco	52,25	15,58	0,5905	0,8459	122,25	81,71
14	TLX206	596758	2177849	Natural	Tlaxco	39,26	12,07	0,2756	0,6990	75,62	60,02
15	TLX207	591051	2168512	Agrícola	Tlaxco	26,52	9,99	0,2941	0,6242	85,94	49,95
16	TLX208	581165	2170010	Agrícola	Tlaxco	28,80	6,53	0,3661	0,5589	35,78	46,43
17	TLX209	582626	2160851	Agrícola	Atlangatepec	35,67	6,95	0,4252	0,6478	70,10	60,19
18	TLX210	588832	2158049	Agrícola	Atlangatepec	28,18	12,17	0,1663	0,4925	115,25	57,90
19	TLX211	584634	2146208	Agrícola	Yauhquemehcan	48,95	14,66	0,4004	0,6043	79,22	78,06
20	TLX212	577057	2153363	Agrícola	Xaltocan	37,19	10,84	0,2020	0,4309	76,40	53,14
21	TLX213	569710	2152890	Agrícola	Hueyotlipan	39,81	13,64	0,2997	0,4819	88,73	56,70
22	TLX214	564212	2156346	Agrícola	Hueyotlipan	55,60	11,95	0,3243	0,5723	98,71	66,81
23	TLX215	554234	2160298	Agrícola	Calpulalpan	37,96	10,78	0,3577	0,4684	85,09	81,31
24	TLX216	540900	2166558	Agrícola	Calpulalpan	35,60	17,47	0,4457	0,6113	74,90	63,99
25	TLX302	534894	2163476	Agrícola	Calpulalpan	29,94	17,04	0,2784	0,6388	55,14	70,76
26	TLX303	542881	2166373	Agrícola	Calpulalpan	34,88	14,83	0,4757	0,5829	71,07	70,23
27	TLX304	544107	2166215	Natural	Calpulalpan	32,04	12,66	0,3010	0,6161	48,06	74,98
28	TLX305	545186	2161619	Agrícola	Calpulalpan	34,84	15,32	0,4378	0,6529	68,07	71,70
29	TLX306A	548179	2159724	Agrícola	Nanacamilpa de Mariano Anista	36,57	13,40	0,3496	0,5666	82,37	69,15
30	TLX307	549048	2156979	Agrícola	Nanacamilpa de Mariano Anista	29,64	13,63	0,3058	0,5248	74,61	64,21
31	TLX308	550749	2153953	Agrícola	Sanctorum de Lázaro Cárdenas	33,29	14,55	0,2090	0,4987	68,83	72,07
32	TLX309	553261	2148510	Agrícola	Españita	33,07	14,69	0,5146	0,5458	72,59	59,86
33	TLX310	566170	2137692	Agrícola	Ixtacuxtla de Mariano Matamoros	45,89	15,00	0,3763	0,4536	82,85	72,55
34	TLX311	566519	2145852	Agrícola	Ixtacuxtla de Mariano Matamoros	42,32	11,57	0,2036	0,4293	77,58	70,11
35	TLX312	567183	2148422	Natural	Hueyotlipan	39,72	10,38	0,4542	0,5090	65,19	50,46
36	TLX313A	568224	2149219	Agrícola	Españita	44,56	12,29	0,5276	0,5917	93,28	70,90
37	TLX314	569302	2150939	Agrícola	Hueyotlipan	33,45	11,87	0,3453	0,4695	82,17	78,40
38	TLX316	575089	2158212	Agrícola	Panotla	34,81	10,49	0,2785	0,5929	63,16	79,46
39	TLX317	573751	2164823	Agrícola	Tlaxco	19,68	15,51	0,3605	0,4956	66,76	73,19
40	TLX318	570149	2170301	Agrícola	Tlaxco	19,67	11,86	0,2840	0,4430	90,69	73,49
41	TLX319	573022	2172992	Agrícola	Tlaxco	18,59	13,56	0,2939	0,4593	79,52	69,96
42	TLX320	578158	2171118	Agrícola	Tlaxco	18,93	12,56	0,4019	0,5501	83,22	65,06
43	TLX321	584674	2168464	Agrícola	Tlaxco	30,71	13,46	0,3352	0,5839	78,25	71,45
44	TLX322A	600467	2137905	Agrícola	San José Teacalco	23,19	12,81	0,4979	0,3644	141,28	86,00
45	TLX323	600605	2133145	Natural	San Francisco Tetlanohcan	18,89	13,09	0,3388	1,0739	118,81	133,78
46	TLX324	600580	2132013	Natural	San Francisco Tetlanohcan	12,85	12,25	0,2554	0,5475	68,14	91,23
47	TLX325A	601701	2129304	Natural	San Francisco Tetlanohcan	12,72	11,75	0,3000	0,5422	84,36	97,23
48	TLX326	600562	2131410	Natural	San Francisco Tetlanohcan	12,94	10,91	0,3216	0,4394	77,81	103,54

ANEXO A. Relación de localización y concentraciones de As, Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Sb, Tl, V y Zn de los sitios de muestreo

No	CLAVE	E_UTM	N_UTM	Uso de suelo	Municipio	As	Cd	Co	Cr	Cu	Mo
49	TLX327	567073	2137271	Agrícola	Ixtacuxtla de Mariano Matamoros	13,22	< LD	10,70	39,47	15,73	1,3412
50	TLX328	570004	2132202	Agrícola	Santa Ana Nopalucan	4,27	0,19	12,77	53,55	12,77	1,2867
51	TLX329	569831	2129704	Agrícola	Nativitas	3,80	0,30	11,54	48,78	12,71	1,4946
52	TLX401	595223	2150393	Agrícola	Tetla	3,01	< LD	13,61	95,53	19,93	1,7143
53	TLX402	598205	2153738	Agrícola	Tetla	4,60	< LD	12,56	68,07	17,70	1,3816
54	TLX403A	596310	2156237	Natural	Tetla	4,37	< LD	4,22	23,96	6,40	2,6799
55	TLX407A	601267	2167021	Natural	Tlaxco	5,12	< LD	18,82	84,85	30,78	1,4367
56	TLX408A	602885	2167536	Natural	Tlaxco	5,47	< LD	15,62	88,24	31,17	1,3755
57	TLX410	605743	2161513	Agrícola	Lázaro Cárdenas	3,86	< LD	12,75	89,42	19,57	1,5872
58	TLX411A	609347	2162430	Natural	Emiliano Zapata	4,89	< LD	16,76	67,65	25,76	1,0531
59	TLX412	609861	2164954	Natural	Emiliano Zapata	6,79	< LD	25,10	105,27	21,96	1,7447
60	TLX413	608739	2161393	Agrícola	Lázaro Cárdenas	2,78	< LD	12,13	82,83	13,65	1,2992
61	TLX414	612218	2161489	Natural	Emiliano Zapata	9,74	< LD	13,59	52,57	20,62	1,7002
62	TLX415	615641	2163187	Agrícola	Emiliano Zapata	7,41	< LD	23,84	73,62	53,54	3,2140
63	TLX417	616611	2162463	Natural	Emiliano Zapata	8,53	< LD	14,50	61,88	39,68	2,5381
64	TLX418	617283	2160460	Agrícola	Terrenate	5,47	< LD	13,19	62,51	32,04	1,3420
65	TLX419A	615442	2158637	Natural	Terrenate	8,71	< LD	13,44	67,08	23,67	2,2198
66	TLX420	612153	2152920	Agrícola	Terrenate	5,16	< LD	15,21	92,11	14,25	1,1488
67	TLX421	605845	2158696	Agrícola	Lázaro Cárdenas	4,81	< LD	13,79	71,65	4,76	0,9722
68	TLX422	605673	2150557	Agrícola	Terrenate	5,65	< LD	15,92	99,65	22,04	2,8260
69	TLX423	600688	2151180	Agrícola	Tetla	7,98	< LD	17,51	118,84	17,10	0,9133
70	TLX424	601698	2147323	Agrícola	Xaloztoc	4,47	< LD	14,51	101,12	13,69	0,8304
71	TLX425	593845	2140407	Agrícola	Cuaxomulco	9,04	0,06	15,52	85,44	5,33	0,6286
72	TLX429A	572365	2139625	Natural	Ixtacuxtla de Mariano Matamoros	< LD	0,19	9,96	76,36	18,89	1,1883
73	TLX430	572222	2138910	Natural	Ixtacuxtla de Mariano Matamoros	< LD	0,15	8,00	51,90	19,54	0,9919
74	TLX431	572054	2137775	Agrícola	Ixtacuxtla de Mariano Matamoros	38,36	0,11	12,33	73,88	5,76	0,4491
75	TLX432	572198	2137435	Agrícola	Ixtacuxtla de Mariano Matamoros	2,06	0,17	12,68	81,02	23,18	1,2541
76	TLX504A	643187	2139635	Natural	El Carne Tequexquitla	96,57	0,39	10,61	41,05	3,25	0,8721
77	TLX506A	637567	2141613	Agrícola	El Carne Tequexquitla	76,22	0,42	8,33	32,88	3,39	1,0032
78	TLX507A	636136	2141346	Agrícola	El Carne Tequexquitla	83,37	0,59	11,23	49,94	4,68	1,1108
79	TLX508A	632017	2144030	Natural	Altzayanca	74,56	0,03	11,49	65,18	12,22	0,8171
80	TLX509	628483	2145343	Agrícola	Altzayanca	89,09	0,13	9,47	50,94	12,85	0,8587
81	TLX510	625846	2148131	Agrícola	Altzayanca	74,98	0,15	11,34	60,81	13,55	0,5941
82	TLX511	623517	2140497	Agrícola	Huamantla	58,11	< LD	12,50	68,90	11,02	0,3301
83	TLX512	629083	2142048	Agrícola	Altzayanca	68,81	0,43	13,27	68,19	17,16	0,6457
84	TLX513	630283	2137869	Natural	Cuapixtla	71,60	0,23	10,23	49,68	3,68	0,7462
85	TLX514	614969	2142889	Natural	Huamantla	65,39	0,32	8,97	38,74	3,95	0,5869
86	TLX515	616923	2148531	Natural	Huamantla	93,66	0,55	7,12	32,83	3,50	0,4508
87	TLX516A	620246	2151898	Natural	Altzayanca	60,18	0,20	4,09	14,19	5,09	0,1289
88	TLX517A	619889	2147841	Natural	Altzayanca	77,94	0,35	8,59	36,57	3,87	0,4062
89	TLX518	625119	2150137	Natural	Altzayanca	86,09	0,58	9,88	51,59	4,50	1,0279
90	TLX519	623619	2144417	Agrícola	Altzayanca	73,40	1,90	15,02	80,16	120,30	1,2303
91	TLX520	611270	2131635	Agrícola	Huamantla	48,09	0,74	13,05	63,60	3,30	0,4004
92	TLX521	608681	2128814	Agrícola	Huamantla	48,71	0,92	11,89	59,51	5,44	0,7948
93	TLX523	615782	2127635	Agrícola	Ixtenco	77,82	0,87	12,63	61,10	3,04	0,5155
94	TLX525	607261	2132836	Natural	Huamantla	79,50	1,12	15,19	59,88	6,42	0,5489
95	TLX526	596528	2129686	Natural	San Francisco Tetlanohcan	92,82	0,84	13,71	52,99	4,98	0,3131
96	TLX527	593479	2124549	Natural	Teolocholco I470	48,70	0,95	13,60	60,34	8,14	0,4248

ANEXO A. Relación de localización y concentraciones de As, Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Sb, Tl, V y Zn de los sitios de muestreo

No	CLAVE	E_UTM	N_UTM	Uso de suelo	Municipio	Ni	Pb	Sb	Tl	V	Zn
49	TLX327	567073	2137271	Agrícola	Ixtacuxtla de Mariano Matamoros	29,13	9,95	0,4418	0,4009	108,68	75,74
50	TLX328	570004	2132202	Agrícola	Santa Ana Nopalucan	29,53	14,82	0,3529	0,4363	52,17	72,63
51	TLX329	569831	2129704	Agrícola	Nativitas	26,25	9,42	0,2161	0,3356	51,34	84,32
52	TLX401	595223	2150393	Agrícola	Tetla	44,25	15,46	0,1053	0,1392	82,39	85,59
53	TLX402	598205	2153738	Agrícola	Tetla	26,86	11,24	0,2068	0,1914	69,91	75,40
54	TLX403A	596310	2156237	Natural	Tetla	9,82	15,75	0,8850	0,9698	33,62	49,82
55	TLX407A	601267	2167021	Natural	Tlaxco	85,85	9,13	0,0906	< LD	86,52	74,67
56	TLX408A	602885	2167536	Natural	Tlaxco	125,91	10,94	0,2510	< LD	93,19	71,90
57	TLX410	605743	2161513	Agrícola	Lázaro Cárdenas	22,71	11,54	0,2400	< LD	76,82	64,89
58	TLX411A	609347	2162430	Natural	Emiliano Zapata	19,76	8,73	0,3200	< LD	93,71	74,20
59	TLX412	609861	2164954	Natural	Emiliano Zapata	33,77	11,72	0,2526	< LD	143,72	87,26
60	TLX413	608739	2161393	Agrícola	Lázaro Cárdenas	7,61	11,84	< LD	< LD	70,07	59,86
61	TLX414	612218	2161489	Natural	Emiliano Zapata	33,47	16,19	1,1700	< LD	83,93	75,52
62	TLX415	615641	2163187	Agrícola	Emiliano Zapata	41,64	12,50	0,0997	< LD	114,45	131,41
63	TLX417	616611	2162463	Natural	Emiliano Zapata	24,25	8,20	< LD	< LD	89,10	87,63
64	TLX418	617283	2160460	Agrícola	Terrenate	17,90	12,84	< LD	< LD	77,91	101,95
65	TLX419A	615442	2158637	Natural	Terrenate	18,24	12,00	0,0907	< LD	89,24	70,24
66	TLX420	612153	2152920	Agrícola	Terrenate	15,29	14,09	< LD	< LD	89,68	84,08
67	TLX421	605845	2158696	Agrícola	Lázaro Cárdenas	13,08	15,47	0,3028	< LD	77,82	64,60
68	TLX422	605673	2150557	Agrícola	Terrenate	27,60	17,96	0,4063	< LD	90,45	102,69
69	TLX423	600688	2151180	Agrícola	Tetla	47,66	14,16	0,1633	< LD	110,28	89,12
70	TLX424	601698	2147323	Agrícola	Xaloztoc	6,47	11,99	< LD	< LD	97,46	85,07
71	TLX425	593845	2140407	Agrícola	Cuaxomulco	23,57	14,77	0,4214	0,5103	119,91	84,70
72	TLX429A	572365	2139625	Natural	Ixtacuxtla de Mariano Matamoros	43,18	8,33	0,3375	0,5661	44,00	53,40
73	TLX430	572222	2138910	Natural	Ixtacuxtla de Mariano Matamoros	22,43	37,41	0,4133	0,3855	51,01	62,62
74	TLX431	572054	2137775	Agrícola	Ixtacuxtla de Mariano Matamoros	17,59	68,71	0,4835	0,4185	117,60	80,61
75	TLX432	572198	2137435	Agrícola	Ixtacuxtla de Mariano Matamoros	39,18	25,94	0,3517	0,4495	76,72	69,11
76	TLX504A	643187	2139635	Natural	El Carne Tequexquitla	4,92	13,48	0,6948	0,6719	76,54	67,03
77	TLX506A	637567	2141613	Agrícola	El Carne Tequexquitla	6,08	8,84	0,5973	0,5089	138,94	48,71
78	TLX507A	636136	2141346	Agrícola	El Carne Tequexquitla	1,10	13,80	0,6235	0,7947	91,56	77,36
79	TLX508A	632017	2144030	Natural	Altzayanca	15,82	14,18	0,4643	0,7044	117,54	77,12
80	TLX509	628483	2145343	Agrícola	Altzayanca	14,11	12,68	0,6074	0,6042	144,98	66,44
81	TLX510	625846	2148131	Agrícola	Altzayanca	16,46	13,95	0,3302	0,6591	120,29	72,65
82	TLX511	623517	2140497	Agrícola	Huamantla	14,51	14,62	0,1328	0,2945	133,73	117,73
83	TLX512	629083	2142048	Agrícola	Altzayanca	20,03	19,76	0,3721	0,6396	153,55	96,08
84	TLX513	630283	2137869	Natural	Cuapixtla	13,02	12,28	0,2586	0,5854	107,35	58,99
85	TLX514	614969	2142889	Natural	Huamantla	13,07	11,86	0,2951	0,5285	104,41	50,25
86	TLX515	616923	2148531	Natural	Huamantla	9,46	19,18	0,7527	1,2601	97,88	47,76
87	TLX516A	620246	2151898	Natural	Altzayanca	0,21	18,22	0,4687	1,1965	53,06	38,13
88	TLX517A	619889	2147841	Natural	Altzayanca	10,44	11,80	0,4468	0,4766	116,27	53,56
89	TLX518	625119	2150137	Natural	Altzayanca	19,72	17,03	0,5387	0,8796	165,26	61,98
90	TLX519	623619	2144417	Agrícola	Altzayanca	28,47	19,34	0,5706	0,9427	177,05	104,85
91	TLX520	611270	2131635	Agrícola	Huamantla	17,34	12,56	0,1165	0,4667	135,59	72,36
92	TLX521	608681	2128814	Agrícola	Huamantla	17,86	15,80	0,1773	0,5761	165,69	76,59
93	TLX523	615782	2127635	Agrícola	Ixtenco	14,69	18,05	0,1305	0,4151	131,83	78,10
94	TLX525	607261	2132836	Natural	Huamantla	20,08	14,06	0,0447	0,9354	120,03	114,93
95	TLX526	596528	2129686	Natural	San Francisco Tetlanohcan	21,06	12,31	0,1580	0,5754	149,54	63,62
96	TLX527	593479	2124549	Natural	Teolocholco I470	26,59	13,42	0,0851	0,6163	106,90	76,58

Anexo B. Gráficas de caja de las concentraciones de Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Sb, V y Zn generados durante el análisis de conglomerados

