

95
201



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

DISTRIBUCION DE ALGUNOS METALES PESADOS
EN SUELOS AGRICOLAS Y SEDIMENTOS DE LA
SUBCUENCA DEL RIO SILAO, EN EL ESTADO DE
GUANAJUATO.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

B I O L O G O

P R E S E N T A :

LUZ MARIA LAZCANO ARRIOLA



DIRECTOR DE TESIS: M. EN C. LOURDES FLORES DELGADILLO

1998

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

258204



Universidad Nacional
Autónoma de México



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 está 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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

M. en C. Virginia Abrín Batule
Jefe de la División de Estudios Profesionales de la
Facultad de Ciencias
Presente

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo de Tesis: *Distribución de algunos metales pesados en suelos agrícolas y sedimentos de la subcuenca del Río Silao, en el Estado de Guanajuato.*

realizado por Luz Maria Lazcano Arriola

con número de cuenta 8827390-3 , pasante de la carrera de Biología

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis
Propietario

M. en C. Lourdes Flores Delgadillo

Propietario

Dr. Gilberto Hernández Silva

Propietario

Dra. Amada Laura Reyes Ortigoza

Suplente

M. en C. Rosalia Ramos Bello

Suplente

M. en C. Ma. del Socorro Galicia Palacios

Consejo Departamental de Biología

M. EN C. ALEJANDRO MARTINEZ MENA

A mis Padres

**Fidel Lazcano
Gudelia Arriola**

**Gracias por la vida, su amor,
y sobre todo su apoyo
para realizar mi sueño.**

**A mi hermana
Roxana Lazcano**

**Por su cariño, y los
momentos felices que pasamos.**

A Federico

Por compartir juntos el amor

INDICE

	Pág.
RESUMEN	
I INTRODUCCIÓN	1
II ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	3
III OBJETIVOS	7
3.1 Objetivo general	
3.2 Objetivos específicos	
IV DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE TRABAJO	8
4.1 Localización	
4.2 Hidrología	
4.3 Orografía	
4.4 Clima	
4.5 Uso del suelo	
4.6 Población	
4.7 Actividades económicas	
4.8 Contaminación ambiental	
V MATERIAL Y MÉTODOS	11
5.1 Trabajo de gabinete	
5.2 Trabajo de campo	
5.3 Análisis de laboratorio	
5.4 Análisis estadístico	
VI RESULTADOS Y DISCUSIÓN	13
6.1 Propiedades físicas y químicas de los suelos superficiales	

	Pág.
6.1.1 Color	
6.1.2 pH	
6.1.3 Materia Orgánica	
6.1.4 Capacidad de intercambio catiónico	
6.1.5 Carbonatos Alcalino-Térreos	
6.1.6 Textura	
6.2 Distribución de metales pesados en los suelos superficiales	17
6.2.1 Cadmio	
6.2.2 Cobalto	
6.2.3 Cromo	
6.2.4 Cobre	
6.2.5 Hierro	
6.2.6 Manganeso	
6.2.7 Níquel	
6.2.8 Plomo	
6.2.9 Zinc	
6.3 Propiedades físicas y químicas de los perfiles del suelo	26
6.4 Distribución de metales pesados en los perfiles del suelo	27
6.5 Propiedades físicas y químicas de los sedimentos	28
6.5.1 Color	
6.5.2 pH	
6.5.3 Materia orgánica	
6.5.4 Capacidad de intercambio catiónico	
6.5.5 Carbonatos alcalino-térreos	
6.5.6 Textura	
6.6 Distribución de metales pesados en los sedimentos	31
6.6.1 Cadmio	
6.6.2 Cobalto	
6.6.3 Cromo	
6.6.4 Cobre	
6.6.5 Hierro	
6.6.6 Manganeso	
6.6.7 Níquel	
6.6.8 Plomo	
6.6.9 Zinc	
VII CONCLUSIONES	37
VIII BIBLIOGRAFIA	39
IX APÉNDICE	43

RESUMEN

En este trabajo se evaluó el nivel de contaminación por metales pesados en algunos suelos agrícolas dedicados a la agricultura, se identificaron los posibles problemas de contaminación por metales, en varios de los principales ríos y arroyos de la Subcuenca del Río Silao, a través de sus sedimentos.

Después de un reconocimiento de la Subcuenca del Río Silao a través de las cartas topográficas y edafológicas se procedió a elegir los sitios de muestreo, donde se obtuvieron 13 sitios para realizar perfiles de suelo, 10 sitios para obtener suelos superficiales, además de 27 sitios para obtener sedimentos (ubicados a lo largo del Río Silao y otros afluentes de la región). A las muestras de suelos y sedimentos se les practicaron los siguientes análisis: color, textura, valor de pH, materia orgánica, contenido de carbonatos alcalino-térreos, capacidad de intercambio catiónico total, metales pesados en forma total y disponible. La información obtenida se sometió a un análisis de varianza, comparación múltiple de Tukey, análisis de correlación múltiple y pruebas de t.

Los suelos presentan colores claros debido al contenido bajo de materia orgánica, ya que son suelos extremadamente pobres; en cuanto al valor de pH se clasifican de neutros a medianamente alcalinos; la capacidad de intercambio catiónico con valores de bajos a medios; el contenido de carbonatos también presentan valores bajos, los suelos presentan una clasificación textural muy variada: arenas migajosas, migajones arenosos, arenas, francos, arcillas y migajones arcillosos.

Los sedimentos se comportan casi de la misma forma que los suelos, presentan colores claros, el valor de pH es de neutros a medianamente alcalinos, la capacidad de intercambio catiónico total fue muy baja, así como el contenido de carbonatos; presentan una clasificación textural de: arenas migajosas, migajones arenosos y arenas.

Las concentraciones totales de metales pesados en los suelos no exceden los límites normales y las propiedades más importantes y asociadas a la retención de metales pesados son: contenido de materia orgánica, contenido de arcillas y limos. Sin embargo, las muestras de sedimentos mostraron concentraciones menores de metales pesados con respecto a los suelos, las propiedades que presentaron una asociación para la adsorción de estos son: contenido de carbonatos, contenido de arcillas y limos, además del valor de pH. Siendo la principal fuente de metales en la zona ubicada en la sierra los factores naturales y en la zona de planicie el manejo antrópico que incluye el uso intensivo de fertilizantes y agroquímicos en la agricultura, y las actividades que se desempeñan en esta zona agrícola, minera e industrial.

I INTRODUCCIÓN

El suelo es un componente en el ecosistema terrestre esencial para el crecimiento de plantas, y la degradación y el reciclado de la biomasa muerta. Es un medio heterogéneo complejo que comprende sólidos orgánicos y minerales, componentes acuosos y gaseosos que son capaces de soportar la vida vegetal y de llevar a cabo diferentes procesos; también, se puede considerar al suelo como una capa delgada que cubre gran parte de la superficie terrestre y que es muy vulnerable (Ortiz, 1980).

La atmósfera es el mejor y gran recipiente donde se pueden encontrar partículas y sustancias contaminantes que, posteriormente, son depositadas en suelos, agua y plantas. La contaminación ambiental, especialmente por químicos, participa como factor principal en la destrucción de los componentes de la biosfera (Piotrowska, 1994). Durante varias décadas ha sido estudiada la contaminación de origen antropogénico, pues, ésta se ha incrementado con el desarrollo de la industria y la urbanización.

Las fuentes antropogénicas son las que contribuyen considerablemente a la contaminación del ambiente (motores de vehículos, hidroeléctricas, etc.), produciendo grandes cantidades de sustancias tóxicas como: óxidos de nitrógeno, azufre, varios hidrocarburos y, metales pesados, los cuales son un producto neto de la industrialización que, al rebasar los límites soportados por los seres vivos, adquieren alarmantes signos de toxicidad y constituyen un serio problema para el bienestar de los organismos (Gutiérrez, 1982).

El suelo es un medio muy grande donde se pueden acumular diferentes contaminantes como los metales pesados o metales traza, que es un grupo grande de elementos que tienen importancia tanto industrial como biológica. Desde el punto de vista químico, "metales pesados" es el término más usado y reconocido para el grupo de elementos con una densidad mayor de 6 g/cm^3 (Alloway, 1995). Fergusson (1990), considera que los elementos pesados están bajo el siguiente criterio: 1) los elementos son relativamente abundantes en la corteza de la tierra, 2) son extraídos y usados en cantidades razonables, 3) son tóxicos a los seres humanos, y 4) pueden realizar perturbaciones significantes a los ciclos biogeoquímicos. Algunos de estos elementos como Co, Cr, Cu, Mn, Mo y Zn, son esenciales en pequeñas concentraciones para el crecimiento normal y favorable de plantas y animales, aunque en altas concentraciones son tóxicos. Otros metales pesados no son esenciales para las plantas, pueden afectar su crecimiento y elevar los riesgos de la salud humana, como As, Cd, Hg, Pb, Tl, U. Los componentes sólidos del suelo tienen la capacidad de adsorber iones y diferentes materiales. Esta capacidad de adsorción depende directamente de las propiedades químicas del suelo como: a) pH, factor que controla la conducta química de los metales y otros procesos importantes en el suelo; b) materia orgánica; c) minerales arcillosos, que son partículas coloidales cargadas negativamente, con capacidad de atraer diferentes cationes, ya sea nutrientes o contaminantes; y d) el contenido de CaCO_3 , entre otros.

La contaminación de los suelos es la consecuencia de actividades agrícolas, industriales, de eliminación de desechos sólidos, líquidos e, inclusive, de la precipitación húmeda y seca proveniente de la atmósfera contaminada.

La contaminación del suelo por actividades agrícolas se produce por el empleo de maquinaria para el preparativo del suelo que se va a sembrar, por el uso de plaguicidas, herbicidas, insecticidas, fungicidas y rodenticidas, que contienen compuestos orgánicos, compuestos organoclorados, organofosfatados y metales pesados. Estas sustancias llegan a los cultivos y de aquí, se trasladan a la dieta animal y humana llegando a constituirse, dependiendo de sus concentraciones, en trastornadores metabólicos de las actividades fisiológicas de los seres vivos (Morales, 1980).

A partir de 1550, en el Estado de Guanajuato se empezaron a descubrir grandes vetas y numerosas minas fueron abiertas, entre ellas la de "El Refugio" de donde se extraían grandes cantidades de fluorita. Algunas minas continúan en producción y, la mayoría, se encontraban sobre la margen de los ríos. En 1804, cuando se empezó la explotación de las vetas de la Sierra se iniciaron los trabajos en la mina de "La Peregrina". Con el paso del tiempo, esta actividad ha ido decreciendo (Labra, 1988). Actualmente, el Estado de Guanajuato cuenta con 8 regiones mineras de donde se han extraído: oro, plata, cobre, plomo, azufre, y fluorita, entre otros minerales. Particularmente, al norte del municipio de Silao, se encuentran 7 lotes mineros: "La Tinaja", "El Mal Paso", "La Blanca 4", "La Ladrillera", "El dos de Abril", "Cerro los Barrientos", y "El Roble" que, actualmente, están en explotación bajo el mando de la Compañía Minera Las Torres, ubicadas junto a Mesa de Agua Buena y se extraen: oro, plata, plomo, zinc, cobre y selenio (SECOFI, 1995). El principal Distrito Minero se encuentra ubicado en el centro del Estado, entre la planicie conocida como El Bajío y el frente de las sierras de Santa Rosa y de Guanajuato.

La agricultura e industria son, también, de las actividades de importancia y trascendencia para el Estado; la agricultura es la actividad más frecuente que realizan los diferentes municipios que constituyen el Estado.

Silao de la Victoria es el nombre de uno de los municipios de alta productividad agrícola y ganadera, que pertenece a la subcuenca del Río Silao. Es un sector dedicado, en menor escala, a la industria. Actualmente, este Municipio tiene registradas solo 4 fábricas, una de ellas se ubica en la zona urbana de Silao, y las otras, en sus alrededores (CANACINTRA, 1993). Quizás no sea mucha la actividad industrial en esta zona, pero estas 4 fábricas pueden estar iniciando algunos problemas de contaminación, aunque de manera muy local, pues los desechos industriales, gaseosos y líquidos, son liberados directamente a la atmósfera y al suelo, a través del agua de riego y/o de la precipitación pluvial. La presencia de asentamientos humanos, actividad agrícola intensa y el desarrollo industrial, alteran las condiciones originales del suelo y agua.

Debido a lo anterior, en este estudio se pretende conocer el nivel de contaminación por nueve metales pesados (Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn) en suelos y sedimentos pertenecientes a la subcuenca del Río Silao.

II ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

Varios estudios se han realizado sobre metales pesados en diferentes ecosistemas y todos han indicado que muchas áreas cercanas a complejos urbanos, industriales y minas metalúrgicas, contienen altas concentraciones de estos elementos (Alloway, op cit.).

En estudios realizados en suelos del Distrito de Riego 03 de Tula, Hidalgo, sobre metales pesados, se ha encontrado que la mayoría de éstos están por debajo de los valores normales. Sin embargo, Mascareño (1974) encontró que el plomo soluble en suelos regados con aguas negras fue de 7.0 mg/Kg, siendo este un valor muy alto. En plantas, encontró concentraciones muy elevadas de 779.0 mg/Kg (cifras semejantes a las reportadas para los pastos que crecen a un metro de distancia de las carreteras muy transitadas en los E.U.).

Méndez (1982), también realizó estudios en el Distrito de Riego 03 del Estado de Hidalgo y encontró niveles altos de cobalto en suelos, hasta de 200 mg/Kg, siendo una concentración muy alta en comparación con los valores reportados por otros autores. En aguas negras detectó concentraciones muy elevadas de cobalto (9.75 mg/Kg), observando que este elemento ha aumentado en las aguas de 1974 a 1981. En los suelos las concentraciones de cromo total detectadas fueron de hasta 500 mg/Kg, también muy elevadas, las de níquel total fueron de 250 mg/Kg, el plomo en concentraciones de 300 mg/Kg, valores considerablemente altos; finalmente, los valores de zinc total encontrados también los reporta muy elevados, de hasta 1,170 mg/Kg.

En estudios realizados en sedimentos de la costa fronteriza de Baja California, Gutiérrez (1994) indicó que las concentraciones de Al, Mn, Cu, Ag y Cd en sedimentos retirados de la costa (60 m) son de dos a diez veces superiores a las que se encuentran en los sedimentos que están más cercanos a la costa (10-15 m); observó que las máximas concentraciones de Al, Mn, Cr, Zn y Cu (7,493.0, 78.8, 24.2, 16.5 y 6.2 $\mu\text{g g}^{-1}$ peso seco, respectivamente), Cd y Ag (0.29 y 0.30 $\mu\text{g g}^{-1}$ peso seco, respectivamente) se encuentran, por lo general, en sedimentos superficiales, y este comportamiento se debe a la asociación de los elementos con el tamaño pequeño del grano y a los contenidos de materia orgánica de origen marino, terrestre y antropógeno.

Zimny (1991) en un estudio que realizó sobre el contenido de metales pesados en la biomasa de la vegetación en césped de cuatro distritos residenciales de la ciudad de Polonia, demostró que el contenido de los elementos tales como: Mn, Zn, Cr, Pb, Cu, Ni, Cd y Co, no exceden los valores que pueden considerarse como peligrosos en este tipo de ambiente natural, solo el Fe se incrementa cuando se encuentra a lo largo de las calles (119 a 1,185 mg/Kg), los valores de Zn se encuentran de 47.4 a 78.4 mg/Kg y son valores altos comparados con los reportados por otros autores; el autor encontró que el Pb se acumula, principalmente, en las calles y su contenido total estuvo por arriba de 20 mg/Kg.

Mogollón (1989), en un estudio realizado en sedimentos de la cuenca del Lago de Valencia, Venezuela, determina las concentraciones de Cu, Zn y Ni extraídos con HNO₃ (1N) en muestras recolectadas en sitios de baja actividad poblacional y en zonas de alta actividad humana para establecer su influencia. Los valores encontrados son: en la zona de baja actividad humana (no contaminada) para Cu, Ni y Zn (24, 17 y 57 mg/Kg) y en la zona de mayor influencia doméstica las concentraciones de Cu, Ni y Zn (60, 28 y 146 mg/Kg) son más elevadas; en general, se observó que las concentraciones de metales en los sedimentos de las zonas doméstico-industrial son de 1.6 a 2.6 veces mayores que los de la zona de baja actividad humana.

Miller *et al.*, (1983), encontraron que suelos arenosos de zonas industriales en Indiana, E.U, están contaminados por Cd, Zn, Cu y Pb, y son retenidos en los primeros 5 cm de la superficie del suelo. El objetivo de este trabajo fue determinar el movimiento de estos metales en estos suelos, y estimar la capacidad que tienen para retener metales pesados cuando se les adiciona una solución que contenga metales. Los elementos en la solución del suelo, aunque presentan un límite bajo, indican cierta concentración de Cd, Zn, Cu y Pb en la capa de 0 - 5 cm. Los suelos de Villarroble presentaron niveles iniciales de 5 ug/Kg de Cd, 1000 ug/Kg de Zn y Mg, 100 ug/Kg de Cu y 200 ug/Kg de Pb, y demostraron que estos suelos llegaron a retener el doble de la cantidad de metales presentes inicialmente.

Ramírez *et al.*, (1987), en un estudio realizado en agua de los ríos que sirven de cuerpos receptores de la mayor parte de los desechos generados en el Area Metropolitana de San José, Costa Rica, en donde se encuentra el mayor desarrollo industrial del país. Se detectó Pb en todas las estaciones de muestreo, y Cr en 8 de ellas. Los autores indican que la presencia de los metales es de fuentes antropogénicas y que descargan sus afluentes sin tratamiento alguno. Del estudio comparativo de agua, se observó que el aumento en la concentración media de Cu es de 0.02 mg L⁻¹ y de Zn es de 0.01 mg L⁻¹ que expresados en carga representan un aumento de 14 y 21 Kg ha⁻¹, respectivamente. Los metales más abundantes son el Zn y Cu por sus niveles de concentración, y son evidencia de que las descargas de los afluentes son vertidas en estos cuerpos de agua y pueden ser indicadores del avance de la contaminación en Costa Rica.

Hernández *et al.*, (1990) en un estudio realizado en suelos del Distrito de Desarrollo Rural 063 en el Estado de Hidalgo, estudiaron las tendencias en la concentración de metales pesados en los suelos de esta zona que han sido irrigadas con aguas residuales provenientes de la Ciudad de México y Area Metropolitana. Se reportan las cantidades totales y extractables de Fe, Cu, Mn, Zn, Ni, Cd, Cr, Co y Pb. Los resultados obtenidos fueron comparados con datos publicados por Mascareño (1974), Gutiérrez (1979-80) y Méndez (1982). Las tendencias de comportamiento de los elementos en forma total fueron heterogéneas. La acumulación de los metales pesados en el suelo fue menor de lo que se esperaba debido, probablemente, a la continua extracción de estos elementos por los cultivos.

Katyal (1991) con la finalidad de ver la distribución y disponibilidad de Zn, Cu Mn y Fe, extraídos con DTPA, realizó un estudio en 8 diferentes tipos de suelo en la India, observando que hay una fuerte influencia de distribución de estos micronutrientes, así como una fuerte declinación del Zn con un valor alto de pH y/o contenido de cal y bajos contenidos de materia orgánica y arcilla, ocasionando deficiencias; también observó, el

aumento de Cu al incrementar la materia orgánica y la arcilla; el contenido total de Zn, Mn, Cu y Fe aumentaron con el contenido de cal y arcillas. La disponibilidad de estos elementos disminuyó en el suelo cuando éste se vuelve árido.

Banin *et al.*, (1981), observaron que las irrigaciones comerciales con aguas tratadas de afluentes rurales, provocaron la acumulación de metales pesados en los primeros 10 - 15 cm de superficie del suelo en tres cultivos comerciales. Encontraron, además, diferencias en el contenido total y fraccionado de cadmio en los tres suelos y también para cobre, níquel y plomo en suelos arcillosos en comparación con cultivos adyacentes irrigados con agua normal. Notaron que las concentraciones de cromo no tuvieron diferencias significativas en ninguno de ellos. Por otro lado, encontraron un incremento en la concentración de los elementos estudiados en el pasto Rhodes (*Chloris gayana* Kunth) y el crecimiento fue comparado en pastos irrigados con afluentes de agua normal. El incremento aunque significativo, fue ligero y, en paralelo, en cultivos que fueron irrigados con afluentes de aguas negras por más de 28 años. La captación de metales fue valorada como factor de enriquecimiento y tendió a disminuir con el incremento del área de superficie del suelo. Esto fue particularmente pronunciado en los elementos estudiados más inestables (Cd, Cu y Ni) y menos pronunciado en Pb y Cr.

En el Estado de Guanajuato los niveles de contaminación atmosférica se están incrementando, día a día, en el corredor industrial del Bajío, por el gran desarrollo industrial y la ausencia de medidas eficientes para controlar la contaminación atmosférica y de suelos proveniente de fuentes fijas. En esta región, a las fuentes fijas industriales se suma la contaminación periódica ocasionada por la quema de desechos agrícolas .

Respecto a la contaminación del agua, el panorama es tan alarmante o más aún que el de la contaminación atmosférica. Es verdad que el agua, en su flujo, se autopurifica, sin embargo, los volúmenes vertidos de aguas negras son cada vez más importantes y crean severos problemas de contaminación en las cercanías de las principales ciudades del Estado. Los efectos de esta contaminación se manifiestan por la alta incidencia de muertes y enfermedades de origen infeccioso y parasitario. Desafortunadamente, la ausencia de un control sanitario estricto de hortalizas y frutas, impide conocer el impacto de dicha contaminación en los consumidores que no viven en el Estado. Las descargas del drenaje agrícola también deben ser controladas ya que, en el Bajío, el uso de fertilizantes y plaguicidas es muy intenso, y las aguas residuales de las labores agrícolas se contaminan con elementos tóxicos que contienen los fertilizantes y plaguicidas (SEDUE, 1980).

La contaminación del suelo se puede presentar en dos regiones importantes, la primera en las zonas mineras en donde el suelo acumula desechos mineros de carácter inerte, que sepultan capas del suelo orgánicas, acumuladas durante milenios. Este proceso esteriliza al suelo y requiere decenas y hasta centenas de años para que sobre los desechos se establezca alguna actividad vegetal. Además de contaminar y esterilizar el suelo, estos desechos afectan negativamente el paisaje y afectan también la red hidrológica. El segundo tipo de contaminación de suelos importante es el producido por la acumulación de desechos orgánicos que se producen en dos formas: por la utilización de aguas negras en la agricultura de riego y por la acumulación indiscriminada de desechos sólidos de las ciudades, los cuales constituyen verdaderos basureros abiertos muy mal ubicados. La mayoría de las ciudades principales del Estado se ubican sobre

terrenos de origen lacustre o en sus proximidades, y estos terrenos contienen aguas subterráneas que son utilizadas para usos domésticos, industriales y agrícolas; por consiguiente, la disposición indiscriminada de desechos sólidos no sólo contamina el suelo, sino que a su vez, se contaminan las aguas subterráneas por infiltración (SEDUE, op cit.).

En virtud de la importancia agrícola de esta región de El Bajío, así como de la falta de información concerniente a la presencia de metales pesados en los suelos agrícolas, mismos que han sido incorporados por el riego con agua de mala calidad y por la aplicación intensa de agroquímicos, además de otras fuentes de contaminación, se justifica el desarrollo de la presente investigación.

III OBJETIVO GENERAL

Evaluar el nivel de contaminación por metales pesados en suelos agrícolas de la subcuenca del Río Silao, Guanajuato, y de sedimentos de ríos y arroyos de la región.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- En la capa arable de los suelos conocer la distribución del contenido total y disponible de los metales pesados (Cd, Cr, Co, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn).
- Evaluar el grado de movilidad de los metales a través de su cuantificación en los perfiles de suelo.
- Determinar las propiedades físicas y químicas de los suelos y sedimentos relacionadas con la retención de los metales.
- Evaluar el grado y tipo de asociación entre las propiedades del suelo y sedimentos con el contenido de metales.
- Determinar el grado de disponibilidad de los metales para los cultivos de esta zona.

IV DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE TRABAJO

4.1 Localización

El Municipio de Silao está situado a los 100° 00' - 102° 00' de longitud al oeste del Meridiano de Greenwich, y a los 20° 00' - 21° 45' de latitud norte. La altura sobre el nivel del mar es de 1780 metros. La superficie del territorio es de 537.40 Km², equivalentes al 1.76 % del total estatal. Al norte y al este limita con el Municipio de Guanajuato; al sur con el de Irapuato; al sureste con el de Romita, y al oeste con el de León (Figura 1). El área de trabajo también abarcó parte de la Sierra de Guanajuato y toda esta zona se encuentra ubicada a los 101° 20' - 101° 30' longitud norte, y 20° 50' - 21° 10' longitud oeste (Figura 2).

4.2 Hidrografía

El Río Silao cruza la mayor parte del territorio municipal y a su paso va alimentándose con los arroyos Magueyes, Pascuales, Hondo y El Tigre, así como del Río Gigante, que es principal afluente. Dentro del Municipio se encuentran algunos arroyos de importancia, como los de Agua Zarca, San Francisco, El Paraiso, Pabileros y Aguas Buenas. La topografía plana del territorio propicia que en época de lluvias, cuando el Río Silao se vuelve muy caudaloso, sucedan grandes inundaciones. En la Sierra se cuenta también con el Río La Herma, cuyos principales afluentes son los arroyos La Tinaja, La Colmena, El Salteador y Rincón del Lobo. Además, se tienen algunos cuerpos de agua como la presa San Miguel, Balneario Comanjilla, La Esperanza y Maravillas (INEGI, 1994).

4.3 Orografía

La topografía del territorio municipal es casi plana en su totalidad, ya que integra parte de la región llamada Bajío de Silao. Pueden citarse como elevaciones principales: El Cerro del Cubilete, conocido también como montaña de Cristo Rey, cuya altura es de 2580 msnm. Este cerro sirve de límite con el Municipio de Guanajuato; así, los cerros de Mesa El Agua Buena con 2050 msnm, cerro Las Peñas con 2020 msnm, Mesa Los Ramírez con 1990 msnm, Mesa el Bajío con 1910 msnm, y Cerro El Diablo con una altura de 1860 msnm (INEGI, op cit.).

4.4 Clima

Es templado, muy benigno. La temperatura máxima es de 38.8° C y la mínima de 4° C. La temperatura media es de 19.6° C. La precipitación pluvial media anual es de 699 mm (Secretaría de Gobernación, 1988). Los climas predominantes son: semicálido subhúmedo con lluvias en verano menos húmedo (A CwO); templado subhúmedo con lluvias en verano de humedad media (C (w1)), y semiseco semicálido (BS1h) (INEGI, op cit.).

4.5 Uso del suelo

Sistema ecológico: pastizal, bosque, cuerpos de agua y matorral. Sistema Productivo: agrícola, pecuario, agropecuario, extractivo. Asentamientos humanos: urbano y rural. Usos recomendables: silvestre, agrícola, pecuario, agropecuario, forestal, industrial, minero, cultural, recreativo, urbano, turístico y bosque (SEDUE, op cit.).

4.6 Población

Las localidades principales del municipio son: Silao, La Aldea, Coecillo, Bajío de Bonillas, Colonias Nuevo México, Comanjilla, Chichimequillas, Trejo, Los Rodríguez, Medranos, Napoles, Baños de Agua Caliente, en la Sierra o cerca a ella se encuentran otras pequeñas localidades (SEDUE, op cit).

4.7 Actividades económicas

Agricultura: muy variada y destaca los cultivos cíclicos: maíz, maíz-frijol, sorgo, trigo, frijol, garbanzo, jitomate, chicharo y papa. En productos de hortaliza destacan: cebolla, chile verde, zanahoria, repollo y otros más. Cultivos perennes: alfalfa, espárrago y fresa. Ganadería: se cría, principalmente, la especie bovina y, en menor proporción, la porcina, equina, ovino, caprino, y aves que incluyen gallinas y pollos para carne y huevo, abejas o colmenas (SEDUE, op cit).

Industria: la industria reviste importancia en el Municipio se empaican frutas, legumbres y diversos lácteos; se fabrican tabiques, artesanías e implementos agrícolas; además, se cuenta con industria extractora de caolín, grava, arena y granito.

4.8 Contaminación ambiental

Actualmente, la mayor parte de la población económicamente activa se dedica a las actividades primarias (agricultura y ganadería); aunque, muy recientemente, se ha observado un notable incremento tanto de las actividades secundarias como de servicios, principalmente en la ciudad de Silao. Con base en un análisis integrado de los medios natural y socioeconómico, se ha detectado que el Municipio, en términos generales, presenta un buen estado de conservación de las condiciones ecológico-ambientales (SEDUE, op cit); sin embargo, existen algunos aspectos que los afectan. Los problemas identificados que más afectan al medio natural son:

- El Río Silao, nace en la zona montañosa perteneciente a la Sierra de Guanajuato, presenta al entrar a territorio municipal un estado íntegro, hasta que descargan en él aguas residuales sin tratar (pequeñas cantidades) de los poblados de Chichimequillas, Salitrillo y Providencia, que su calidad se ve disminuida.

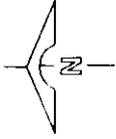
- El río mencionado se altera en mayor medida al pasar por la ciudad de Silao, ya que ésta vierte sus aguas residuales municipales e industriales directamente en él, sin proporcionarles previamente ningún tipo de tratamiento. A pesar de que el nivel de

contaminación del Río Silao no es de manera alguna alarmante, se debe tener en cuenta que nuevas industrias están por establecerse en el Municipio y que incrementarán, con sus desechos líquidos, el nivel de contaminación del Río. Además, al usarse agua del Río Silao para irrigar la zona agrícola centro-sur del Municipio, se altera la calidad del suelo, de la flora y de los demás ecosistemas circundantes.

En cuanto a los desechos sólidos se detecta que:

- La poca actividad industrial y comercial del Municipio, aunada a un servicio bastante eficiente de limpieza en la Ciudad de Silao hace que, tanto en los bordes de la carretera como en la Ciudad, no se den casos críticos de disposición arbitraria de basura.
- El problema ambiental detectado en este renglón lo constituye el depósito de basura localizado en terrenos de Cerritos, al este de la localidad, el cual al ser a cielo abierto, provoca contaminación del suelo y de los mantos acuíferos, por la acción de las lluvias; además de que altera la calidad del aire, con la emanación de malos olores.
- La calidad del aire en el Municipio de Silao es buena. Se ve afectada en pequeña escala y a nivel urbano, por fuentes móviles (vehículos de motor), y por algunas industrias de reciente creación y, a nivel rural, por la quema de desechos sólidos.
- En lo referente a suelos, dado que la mayor parte del Municipio es zona agrícola de alta productividad, el uso de fertilizantes y plaguicidas en forma inmoderada, está ocasionando disminución en la calidad de los mismos (SEDUE, op cit).

102° 00' 100° 00'



SAN LUIS POTOSÍ

ZACATECAS

21° 45'

21° 45'

Limite estatal
Limite municipal
Carreteras
Ferrocarril



SIMBOLOGIA

JALISCO

Leon

Guajajuato

Romita

Irapuato

QUERETARO

20° 00'

MICHOACAN

20° 00'

ESCALA GRAFICA



KILOMETROS

102° 00'



MODIUS DE LOCALIZACION Y DIFERENCIALION

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE CIENCIAS

TESIS

Distribucion de algunos minerales pesados
en suelos agricolas y sedimentos de la
subcuenca del Rio Silma en el estado de
Queretaro

TIPO DE LOCALIZACION GEOGRAFICA
AREA DE ESTUDIO

FECHA DE ELABORACION DEL ESTUDIO
Escala: Estado de Queretaro

FECHA DE 1997
Autor: Jose Pedro Serrano

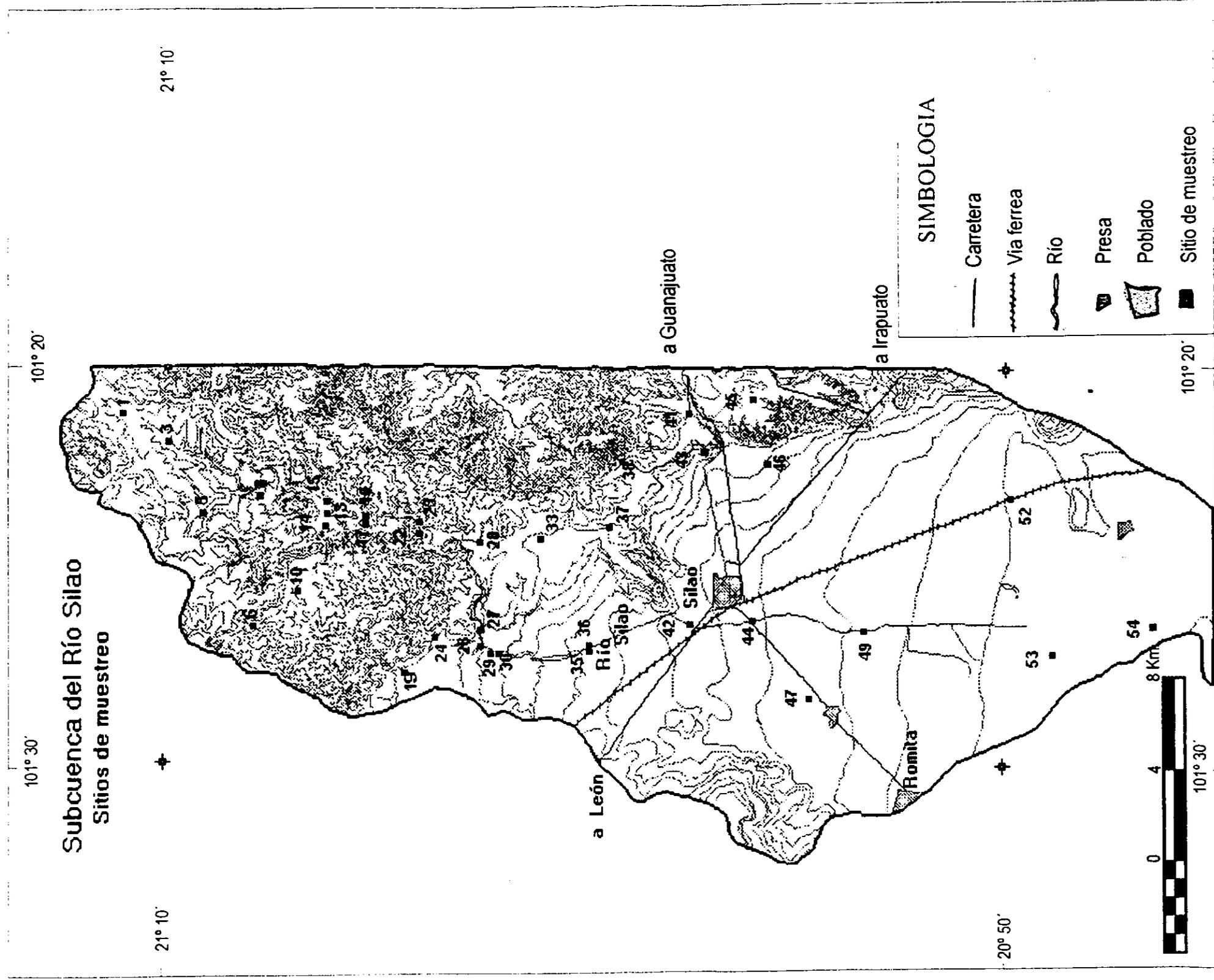


Figura 2

V MATERIAL Y MÉTODOS

5.1 Trabajo de gabinete

Se hizo un análisis de la subcuenca a través de las cartas topográficas y edafológicas con escala 1:50 000 correspondientes a Silao (F14 - C52) y Nuevo Valle de Moreno (F14 - C42), editadas por CETENAL (INEGI) en 1989.

5.2 Trabajo de campo

Con la información contenida en las cartas de INEGI, se procedió a realizar amplios recorridos de campo con la finalidad de elegir los sitios de muestreo. Se tomaron 13 sitios en los que se realizaron perfiles de suelo, con una profundidad que varió desde los 55 hasta 230 cm. Se muestrearon horizontes de suelo por lo que se obtuvieron 37 muestras. También fueron tomadas 10 muestras de suelo superficial (0 - 30 cm). Todo el muestreo fue realizado en campos dedicados a la actividad agrícola. A su vez se colectaron 27 muestras de sedimento (0 - 30 cm) provenientes de diferentes sitios ubicados a lo largo del Río Silao y otros afluentes de la región. Cada una de las muestras fueron colocadas en bolsas de plástico con capacidad de 1 kg, debidamente etiquetadas y cerradas para trasladarse al laboratorio.

Se colectaron algunas muestras de agua provenientes de presas y del Río Silao, las cuales fueron consideradas no representativas por el bajo número de ellas. Las muestras se colectaron en botellas de plástico con capacidad de 1 lt, debidamente lavadas con HNO_3 al 10 % y agua desionizada. Se midieron algunos parámetros de las aguas en el momento de la colecta: valor de pH, temperatura, conductividad eléctrica y salinidad. Finalmente, estas muestras fueron preservadas agregando 2 ml de HNO_3 concentrado por cada litro de agua, y se almacenaron en hieleras para su transporte al laboratorio.

5.3 Análisis de laboratorio

Las muestras de suelo y sedimento colectadas se extendieron sobre papel cartoncillo para su secado a temperatura ambiente en un laboratorio. Las muestras secas se molieron y tamizaron a través de una malla de 2 mm de abertura (tamiz del No. 10). El material seco y tamizado se mezcló muy bien para homogeneizar y obtener por medio de cuarteo, una submuestra representativa para su análisis. A todas estas submuestras de suelo y sedimento se les practicaron los siguientes análisis:

1.- Color. La determinación de esta propiedad se hizo por comparación, utilizando las tablas de color de Munsell (Munsell Color Company, Inc., 1954).

2.- Textura. La determinación del porcentaje de arena, limo y arcilla (análisis mecánico) se llevó a cabo por el método del hidrómetro de Bouyoucos (Villegas *et al.*, 1978).

3.- pH. Se determinó utilizando una suspensión de suelo-agua en relación de 1:2.5 con un potenciómetro pH-meter E588, Metrohm Herisau (Chapman, 1973).

4.- Materia orgánica. Se determinó por combustión húmeda según el método de Walkley y Black (Black *et al.*, 1965).

5.- Carbonatos alcalino-térreos. Se determinó por titulación (con NaOH, 0.25N) del ácido clorhídrico (0.5 N) no utilizado para la neutralización de los carbonatos (Richards, 1974).

6.- Capacidad de intercambio catiónico total. Por centrifugación, saturando el suelo con Na^+ y eluyendo con NH_4^+ (Richards, op cit.).

7.- Metales pesados disponibles. Utilizando una solución extractora que contiene DTPA y regulada a pH 4.8 (Wolf, 1982).

8.- Metales pesados totales. Se extrajeron por medio de una digestión con agua regia ($\text{HNO}_3:\text{HCL}$, 1:3), utilizando un horno de microondas marca CEM modelo MDS 2000. Para esta determinación las muestras tuvieron que ser molidas en mortero de ágata y homogeneizadas utilizando una malla de 0.002 mm de abertura (tamiz No. 100).

Los metales pesados determinados fueron: Fe, Cu, Zn, Mn, Cd, Co, Cr, Pb y Ni, lo cual se llevó a cabo por espectrofotometría de absorción atómica, empleando una flama de aire-acetileno para todos los elementos. El equipo utilizado fue de la marca Perkin Elmer modelo 3110.

Para tener una mayor confiabilidad en los resultados que se obtuvieran, todos los análisis fueron realizados por duplicado, excepto la textura.

5.4 Análisis estadístico

La información obtenida fue sometida a diversas técnicas estadísticas. Se realizó un análisis de varianza para determinar si existen diferencias significativas entre los contenidos promedio de los metales pesados, totales y disponibles, en los sitios muestreados. Cuando el análisis de varianza resultó significativo, se procedió a realizar el análisis de comparaciones múltiples de Tukey, para comparar todas las medias y encontrar los suelos con contenidos medios diferentes. Este análisis se realizó tanto en muestras de suelo superficial y sedimentos como en los perfiles, teniendo como efecto principal a los sitios, en el primer caso, y a la profundidad, en el segundo (Daniel, 1982).

El grado y tipo de relación entre los metales pesados y las diferentes propiedades del suelo se obtuvo a través de un análisis de correlación múltiple. También se realizó una prueba de t para comparar los promedios de la zona de estudio. Algunos resultados se presentan en el Apéndice.

VI RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Propiedades físicas y químicas de los suelos superficiales

6.1.1 Color

Los resultados promedio de las propiedades físicas y químicas de los suelos superficiales de la subcuenca del Río Silao se presentan en la Tabla 1. El color de los suelos superficiales es, muy probablemente, la característica más obvia y la que más fácilmente puede observarse. Esta propiedad física, la mayoría de las veces, está determinada por la cantidad y estado del hierro y/o de la materia orgánica. También, el pH y el contenido de cationes pueden modificar esta característica (Fitz-Patrick, 1984). Los suelos superficiales de la zona de estudio presentan colores claros (pardo amarillentos y grisáceos) debido, al contenido tan bajo de materia orgánica presente.

6.1.2 pH

El pH es una propiedad muy importante para el suelo ya que está muy relacionada con otras propiedades del mismo, como por ejemplo el tipo y cantidad de cationes solubles y precipitados; además, los contenidos altos de materia orgánica inducen acidez (Fitz-Patrick, op cit.). Los valores de pH en los suelos de la zona de estudio oscilan entre 7.0 y 8.0 unidades (Tabla 1). Se consideran de neutros a medianamente alcalinos (Moreno, 1970). Con base en el análisis de varianza practicado en estos resultados de pH, los suelos de la zona de estudio presentan diferencias significativas; se compararon los valores promedio de pH de la zona de planicie: 7.56, con el de la sierra: 7.48, realizándose una prueba de t para conocer si existen diferencias entre estos 2 valores; el análisis arrojó un valor de $t = 0.05$, el cual resultó no significativo ($t_{0.05, gl_{21}} = 1.72$), es decir, en promedio, ambas zonas presentan valores muy similares de esta propiedad. Algunos sitios ubicados en las partes bajas de las pendientes de la sierra como el No 28, 41 y 43 presentan valores altos de pH: 7.6, 7.8 y 7.8, respectivamente, en comparación con los sitios No 3 y 18 (7.3 y 7.1) que se ubican en las partes más altas de dichas pendientes y que presentan valores más bajos. Esta diferencia, probablemente, podría deberse a que en las partes bajas de las pendientes se acumulan diversos materiales como sales que proceden de las partes más altas, originando así valores de pH bajos en las partes altas, y valores mayores en las partes bajas (Gráfica 1).

En la planicie de esta subcuenca también podemos encontrar algunas diferencias en los valores de pH de los sitios No 49, 52 y 54 que tienen valores de esta propiedad de 7.6, 7.4 y 7.4, respectivamente, y son estadísticamente diferentes a los valores que presentan los sitios No 27, 42 y 44 los cuales son: 8.0, 7.4 y 8.1, respectivamente. Estas diferencias quizás pueden verse favorecidas por las diferentes actividades agrícolas que se realizan en esta parte de la subcuenca, ya que la utilización de fertilizantes y el riego con agua de mala calidad ocasiona que el pH de los suelos se eleve. Por otra parte, el clima, particularmente, la precipitación, también está ejerciendo alguna influencia sobre el pH de estos suelos, pues como la precipitación pluvial en toda la zona es relativamente

baja, el pH del suelo tiende a subir, debido a la alta evaporación y, consecuente incremento de cationes básicos (Fitz-Patrick, op cit.).

El desarrollo y crecimiento de las plantas depende, en cierto grado, de los valores de pH del suelo. Algunas plantas se desarrollan mejor en condiciones de pH ácido, mientras que otras no, esta propiedad tiene una influencia directa en la solubilidad y disponibilidad de los nutrientes. Por lo tanto, en los suelos de la zona de estudio se desarrollarán mejor los cultivos de maíz (pH 6.0 - 8.0), trigo (pH 6.0 - 8.0), y alfalfa (6.5 - 8.0), de acuerdo con lo reportado por Ortiz op cit.; de hecho, estos son los cultivos de mayor importancia económica para el Municipio de Silao. A través del análisis de correlación se observó que, en este trabajo en particular, ésta propiedad no esta asociada con ninguna de las otras propiedades del suelo estudiadas, es decir, aparentemente esta propiedad no está influyendo en las otras propiedades del suelo.

6.1.3 Materia orgánica

La materia orgánica de los suelos está formada por los restos y productos en descomposición de plantas y animales. La mayor cantidad de materia orgánica se origina de las plantas, principalmente de sus partes aéreas, así como también de las raíces. Es muy importante esta propiedad porque, al igual que el pH, está muy relacionada con otras propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo (Alloway, op cit.). El contenido de materia orgánica observada en los suelos superficiales de la subcuenca, se encuentra entre 0.06 y 3.88 % (Tabla 1). Solamente el sitio No 38 presenta un contenido medianamente alto de materia orgánica, los otros sitios analizados pueden considerarse como extremadamente pobres (según la clasificación de Ortiz, op cit.). La ubicación de este sitio 38 permite la acumulación de materia orgánica proveniente de la parte alta de la sierra, por lo cual se presenta este alto contenido. El análisis de varianza también indicó que los suelos estudiados presentan diferencias significativas en contenidos de materia orgánica.

El valor promedio de materia orgánica en la planicie es de 1.26 % y el de la sierra es de 1.47 % y, a través de la prueba de t ($t_{cal} = 0.15$, $t_{0.05}$, $gl_{21} = 1.72$) se puede decir que no hay diferencia significativa entre estos dos promedios. La mayor parte de los suelos de la planicie presentan contenidos de materia orgánica menores al 1 %, por lo que se puede decir que estos suelos presentan un cierto grado de infertilidad que, quizás, pueda estar siendo contrarrestado con el empleo de altas dosis de fertilizantes químicos, pues los abonos orgánicos, evidentemente, no se aplican (Gráfica 1). La actividad agrícola continua puede ocasionar la pérdida de materia orgánica en el suelo, principalmente, con el cultivo del maíz. La práctica de retirar todos los residuos del cultivo y no volver a incorporarlos, contribuye a una disminución de este material, ya que la conservación de los contenidos de materia orgánica del suelo, a niveles satisfactorios en suelos cultivados es, uno de lo problemas principales de la agricultura (Tamhane, 1978).

Algunos sitios como el No 47, 42 y 52 presentaron contenidos por arriba del 1% debido, probablemente, a la pequeña incorporación de residuos de los cultivos. Los suelos en la zona de sierra presentan diferencias significativas en el contenido orgánico, ya que algunos sitios ubicados en la parte baja de las pendientes, como el No 38 (3.88%) y 37 (2.41%), presentaron altos contenidos de materia orgánica debido, quizás, a la mayor acumulación de material orgánico. El análisis de correlación indicó que hay asociación con el contenido de arcilla ($r = 0.45$, $P < 0.05$) y con el contenido de limos ($r =$

0.43, $P < 0.05$), lo cual resulta lógico, ya que la materia orgánica forma complejos muy estables con los coloides inorgánicos del suelo (Ortiz, op cit).

6.1.4 Capacidad de intercambio catiónico total

En el suelo la capacidad de intercambio catiónico es la propiedad que indica la adsorción de cationes como Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , e H^+ , principalmente. En este proceso participan la fracción arcillosa y los coloides orgánicos, que presentan cargas negativas. Estas últimas pueden ser permanentes o dependientes del pH. Las cargas permanentes ocurren en las arcillas y resultan del reemplazo isomórfico dentro de la estructura de la arcilla; las cargas dependientes del pH están directamente relacionadas con la variación del pH del suelo, ya que cuando los valores de pH son bajos, la capacidad de intercambio catiónico es baja, pero aumenta al elevarse el pH (Fitz-Patrick, op cit).

Los suelos de la zona de estudio tienen mayor capacidad de intercambio catiónico en comparación con los sedimentos, presentando valores de hasta $36.6 \text{ cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ (Tabla 1), esto se debe a que los suelos contienen mayor cantidad de arcillas y limos finos que permiten más la adsorción de los cationes, lo cual se demuestra con el coeficiente de correlación altamente significativo entre esta propiedad y el porcentaje de arcillas ($r = 0.93$, $P < 0.01$) y con el porcentaje de limos ($r = 0.86$, $P < 0.01$), lo que indica que estas dos fracciones del suelo son las que intervienen, en mayor medida, en el proceso de intercambio catiónico, pues los contenidos de materia orgánica son tan bajos, que casi no intervienen en este proceso.

Estadísticamente, se encontraron diferencias significativas entre la capacidad de intercambio promedio en la zona de planicie ($18.72 \text{ cmol}(+)\text{kg}^{-1}$) y el valor promedio obtenido en la zona de sierra ($15.92 \text{ cmol}(+)\text{kg}^{-1}$), ya que el valor de t calculado fue de $t_{\text{cal}} = 2.05$ y es mayor al valor de $t_{0.05}$, $g_{|21|} = 1.72$ encontrado en las tablas correspondientes. Esta diferencia se puede deber a que un poco del material arcilloso de las partes altas de la sierra puede estar transportándose hacia las partes bajas y planas de la zona, ocasionando la ligera pérdida de este material en la sierra que ocasiona una pequeña disminución en el valor de esta propiedad (Gráfica 1).

Los sitios No 28, 43 y 45, que se ubican en las pendientes bajas de la sierra, presentaron altos intervalos de esta propiedad, probablemente, porque en estos sitios se acumuló material arcilloso que contribuyó a la adsorción de los cationes. En el caso del sitio No 45, el contenido de materia orgánica (2.11%) es otro factor que también puede influir en el valor de esta capacidad ($21.2 \text{ cmol}(+)\text{kg}^{-1}$), pues este sitio no tiene un alto contenido de material arcilloso.

6.1.5 Carbonatos alcalino-térreos

El contenido de carbonatos de calcio y magnesio es relativamente bajo en la mayor parte de la zona estudiada, se encuentra en un rango de 1.3 - 7.2 % (Tabla 1). El promedio del contenido de carbonatos en la sierra (3.12%) y el de la planicie (3.25%) se compararon a través de la prueba de t y ésta indicó que, en promedio, no existen diferencias significativas ($t_{\text{cal}} = 0.08$, $t_{0.05}$, $g_{|21|} = 1.72$) entre estas dos zonas, ya que los carbonatos, particularmente CaCO_3 , son de los primeros iones salinos en acumularse en los suelos con climas áridos o semiáridos (Fitz-Patrick, 1984) (Gráfica 1). La mayoría de

los suelos estudiados en la zona contienen porcentajes bajos de carbonatos, los cuales mostraron estar asociados con el contenido de limos ($r= 0.52$, $P<0.05$) que, quizás, esté reflejando que los carbonatos alcalino-térreos determinados tengan tamaños de partículas muy similares a los de los limos.

6.1.6 Textura

La textura del suelo se refiere a la proporción relativa de las fracciones de arena, limo y arcilla; es una propiedad que influye en la capacidad de intercambio catiónico, y en muchas otras propiedades físicas. En términos generales, se pueden distinguir 2 tipos de suelos, los de textura gruesa y los de textura fina. En los suelos de textura fina predominan las arcillas y tienen una mayor superficie activa que los suelos de textura gruesa o arenosos (Ortiz, op cit.). Los suelos de la zona de estudio presentan una clasificación textural que varía desde arenas migajosas, migajones arenosos, arenas, y francos, hasta arcillas y migajones arcillosos (Tabla 1). Los suelos que contienen mayor cantidad de arcillas y limos podrán realizar procesos químicos más eficientemente, como el intercambio catiónico para la nutrición de las plantas.

Al realizar un análisis de varianza se observa que estos suelos presentan diferencias significativas, siendo los valores de arcillas muy variados y van desde 1.8 hasta 45.5 % (Tabla 1). Se comparó el contenido promedio de arcilla en la zona de planicie el cual es de 21.30% con el valor de la zona de sierra de 16.12% a través de una prueba de t , indicando diferencias significativas entre estos promedios ($t_{cal}= 3.10$, $t_{0.05}$, $g_{l21}= 1.72$). Esta diferencia se puede deber, muy posiblemente, a la recepción de material fino en la planicie proveniente de las partes altas de la subcuenca (Gráfica 1). Los sitios No 47, 52 y 53 tienen los porcentajes más altos de arcillas en toda la zona estudiada: 45.5, 30.5 y 31.0%, respectivamente, los cuales están ubicados en la planicie y reflejan el proceso de transporte antes mencionado.

El porcentaje de arcillas presentó una relación altamente significativa con el porcentaje de limos ($r= 0.75$, $P<0.01$). La capacidad de intercambio catiónico es la propiedad que está más asociada con el contenido de arcillas ($r= 0.93$, $P<0.01$), ya que es en esta fracción donde se realiza el proceso de intercambio catiónico, principalmente. También, se presenta una asociación significativa entre el contenido de arcillas y el contenido de materia orgánica ($r= 0.45$, $P<0.05$), lo cual puede estar indicando la presencia de complejos organo-minerales estables en estos suelos. El porcentaje de limos presentó comportamientos similares, reflejado en el coeficiente de correlación obtenido entre estas dos variables. Se pueden observar valores del contenido de limo que van desde 3.6 % hasta 47.2%. El valor promedio para la zona de sierra es de 26.72% y el valor promedio para la zona de planicie es de 25.92%, los cuales no fueron diferentes estadísticamente ($t_{cal}= 0.62$, $t_{0.05}$, $g_{l21}= 1.72$).

El contenido de limos es de las fracciones del suelo que también está muy asociada con la capacidad de intercambio catiónico ($r= 0.86$, $P<0.01$), lo cual puede indicar que parte de este proceso se puede estar realizando en la fracción fina de estos limos, es decir, que dicha fracción mineral interviene en el proceso de intercambio, aunque en menor medida. La fracción limosa también presenta asociación significativa con el contenido de CaCO_3 ($r= 0.52$, $P<0.05$), así como con el contenido de materia orgánica ($r= 0.43$, $P< 0.05$), como se había mencionado en párrafos anteriores.

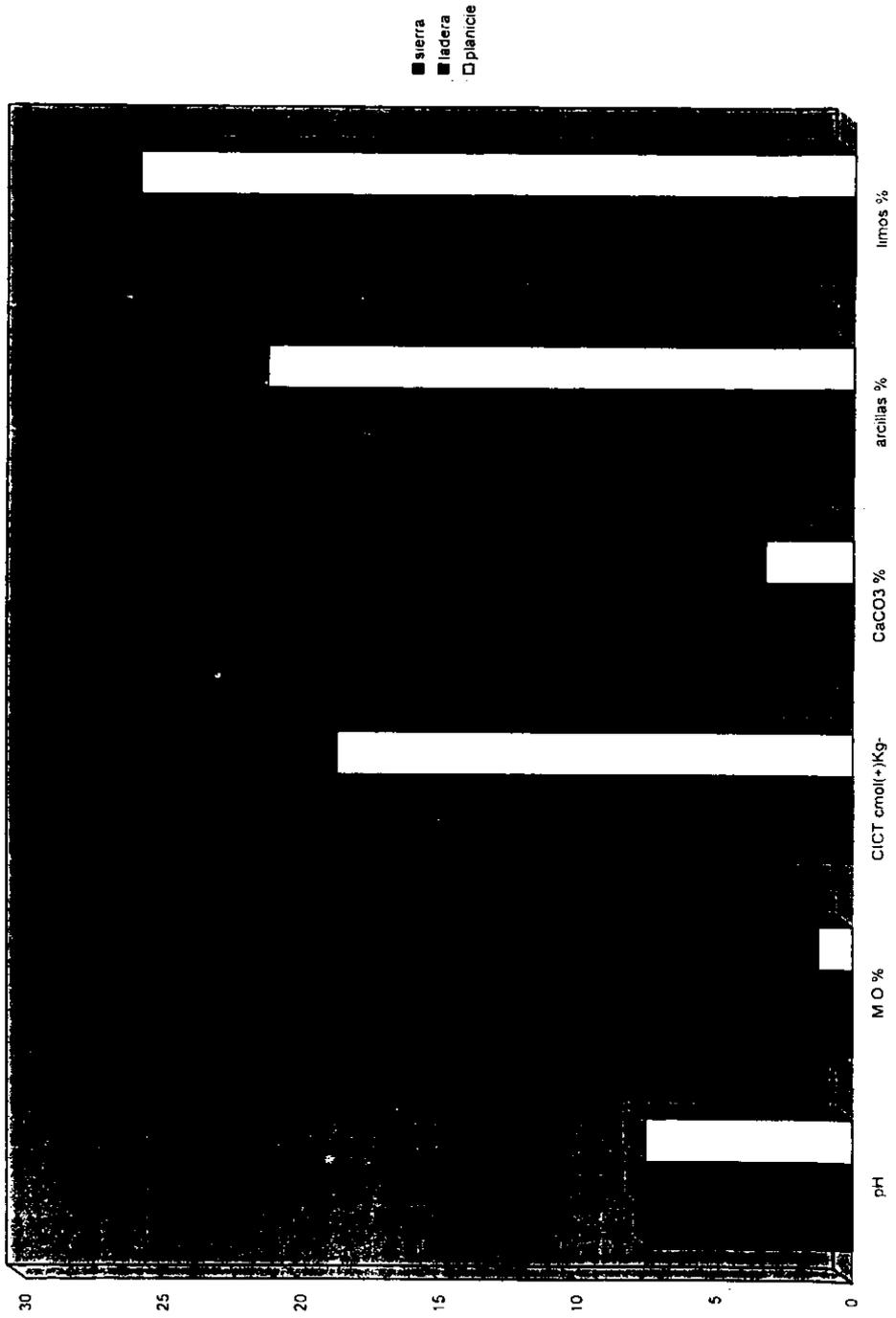
Tabla 1. Propiedades físicas y químicas de muestras superficiales de suelos agrícolas en la zona de estudio.

Sitio	pH suelo:H ₂ O 1:2.5	M.O (%)	CICT cmol(+)/kg	CaCO ₃ (%)	arcillas (%)	limos (%)	Clasif. Textural	Color seco	Color húmedo
3	7.3	0.66	16.7	1.32	16.3	19.3	miqajón arenoso	pardo claro	pardo oscuro
18	7.1	0.76	5.7	1.60	3.6	12.7	arena migajosa	pardo	pardo oscuro
19	7.0	1.17	8.9	1.76	16.3	19.7	miqajón arenoso	pardo grisáceo	gris oscuro
23	7.8	0.36	5.7	3.10	5.4	16.3	arena migajosa	pardo amarillento	pardo amarillento
27	8.0	0.06	2.4	1.73	1.8	3.6	arena	pardo amarillento	pardo oscuro
27*	7.2	1.48	18.7	2.96	18.1	32.1	franco	pardo amarillento	pardo oscuro
28	7.6	0.73	30.1	4.08	27.2	45.4	franco	pardo amarillento	pardo oscuro
35	7.2	1.87	10.5	1.76	10.5	16.4	miqajón arenoso	pardo amarillento	pardo oscuro
36	8.0	0.77	17.9	2.81	18.2	27.2	miqajón arenoso	pardo amarillento	pardo amarillento
37	7.3	2.41	13.8	3.55	18.2	47.2	franco	pardo grisáceo	pardo grisáceo
38	7.6	3.88	22.8	2.40	25.4	25.4	miqajón arcillo-arenoso	pardo amarillento	pardo amarillento
41	7.8	0.85	11.4	2.71	9.0	21.4	miqajón arenoso	pardo amarillento	pardo amarillento
42	7.4	2.88	21.2	4.23	29.0	16.3	miqajón arcilloso	pardo claro	pardo oscuro
43	7.8	1.78	22.8	7.17	21.8	41.8	franco	pardo amarillento	pardo amarillento
44	8.1	0.98	10.5	6.22	16.3	19.7	miqajón arenoso	pardo	pardo oscuro
45	7.5	2.11	21.2	3.56	18.2	18.0	miqajón arenoso	negro	negro
47	7.3	1.55	35.8	3.5	45.5	38.1	miqajón arenoso	gris oscuro	gris oscuro
46	7.7	0.41	5.7	3.74	5.4	21.8	arena migajosa	pardo amarillento	pardo amarillento
47*	7.4	1.29	36.6	4.30	45.4	38.1	arcilla	gris oscuro	gris oscuro
49	7.6	0.93	8.9	2.11	10.9	23.6	miqajón arenoso	pardo amarillento	pardo oscuro
52	7.4	2.13	29.3	2.98	30.4	47.2	miqajón arcilloso	gris oscuro	gris oscuro
53	7.6	1.34	34.2	3.51	30.9	41.8	miqajón arcilloso	gris oscuro	gris oscuro
54	7.4	0.71	11.4	2.76	14.5	10.4	miqajón arenoso	pardo	pardo oscuro

M.O. = Materia orgánica

CICT = Capacidad de intercambio catiónico total

GRÁFICA 1. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS PROMEDIO EN SUELOS SUPERFICIALES



6.2 Distribución de metales pesados en los suelos superficiales

6.2.1 Cadmio

Los suelos analizados presentan un contenido de cadmio total en un rango de 0.55 a 2.35 mg/Kg (Tabla 2), y comparando este rango con el reportado por Alloway (op cit.) para suelos normales (0.01 a 2.0 mg/Kg), algunos suelos de esta zona de estudio se encuentran muy ligeramente contaminados (sitios No 27^a, 28, 49 y 52). La mayoría de los sitios que se localizan en la parte plana contienen una mayor concentración de cadmio con respecto a los sitios localizados en la sierra, lo cual puede ser debido, entre otras causas, a que estos suelos están dedicados a la agricultura reciben con frecuencia altas aplicaciones de fertilizantes fosfatados que incrementan el contenido de este elemento.

Los sitios No 49 (1.9 mg/Kg) y 52 (2.3 mg/Kg) se encuentran dentro de este sistema productivo agrícola con uso del suelo adecuado para productividad alta, con alto riesgo a la contaminación (Ecoplán, Silao, 1981); además, son sitios que presentan un contenido alto de cadmio con respecto a los otros sitios ubicados en esta zona debido, probablemente, a la utilización de fertilizantes fosfatados y/o pesticidas, así como al posible uso del agua del Río Silao para riego, agua que podría ser de mala calidad, pues a este río se vierten todo tipo de desechos provenientes de la Ciudad de Silao. En el caso del sitio No 52, éste se localiza en las cercanías de una subestación eléctrica y la vía del ferrocarril que comunica a las ciudades de León e Irapuato, lo que podría ocasionar la ligera contaminación por este metal.

Algunos sitios localizados en la sierra presentan concentraciones de cadmio ligeramente elevadas, como los sitios No 38 (1.7 mg/Kg) y 43 (1.80 mg/Kg) lo cual, probablemente, se deba al contenido alto de materia orgánica que esté interviniendo en la retención de este elemento. Al realizar una prueba de *t* para comparar los promedios entre la zona de planicie (1.48 mg/Kg) y la zona de sierra (1.28 mg/Kg) se encontró que no existen diferencias significativas entre estas zonas ($t_{\text{cal}} = 0.14$, $t_{0.05, 9|_{21}} = 1.72$), ambas presentan contenidos similares de cadmio, aunque éste provenga de distintas fuentes. El cadmio presentó una relación significativa con la capacidad de intercambio catiónico ($r = 0.44$, $P < 0.05$) lo que indica una posible adsorción de este elemento en el complejo de cambio de estos suelos. El porcentaje de limos también presentó una relación significativa con el contenido de este elemento ($r = 0.49$, $P < 0.05$) pues, al encontrarse gran cantidad de este material de limo fino, la adsorción de cadmio será mayor.

La presencia de este elemento en los suelos de la zona de estudio se debe, principalmente, a las diversas prácticas agrícolas, incluyendo a la fertilización fosfatada, pues su distribución en los suelos superficiales no se encuentra relacionada con ningún otro metal (Gráfica 2).

Los factores del suelo que afectan la absorción de los metales pesados por las plantas son, principalmente: el contenido total del elemento presente en el suelo y los procesos químicos del suelo (Alloway, op cit.).

Los contenidos promedio de metales pesados en forma disponible para las plantas determinados en los suelos superficiales de esta subcuenca se presentan en la Tabla 2, en la que se observa que el contenido de Cd disponible se encuentra en un rango de 0.1 a 0.8 mg/Kg, debido a que no hay concentraciones altas de Cd total en estos suelos.

Kabata-Pendias y Pendias (1992), señalan que las plantas de suelos agrícolas pueden tolerar hasta 3 mg/Kg de Cd. El origen de este elemento en el suelo puede influir en su disponibilidad, Alloway op cit. reportó que el cadmio en suelos contaminados por fuentes orgánicas, suelen acumular más Cd en las porciones comestibles de los vegetales. Las propiedades químicas de estos suelos permiten que la disponibilidad del cadmio sea baja.

La zona de planicie presentó un valor promedio de 11.0 % de disponibilidad, mientras que, el valor promedio de disponibilidad en la sierra fue de 13.64 %. Esta diferencia quizás se deba a que los valores de pH en la zona de sierra son ligeramente menores a los de planicie, ya que el pH es la propiedad que más influye en la disponibilidad, aumentando con valores ácidos. La absorción de Cd por las plantas está inversamente relacionada al pH del suelo. Alloway op cit. reportó que la entrada de cadmio a las plantas de arroz decrece cuando el pH se incrementa de 5.5 a 7.5. En este trabajo no se encontró ninguna relación significativa entre las propiedades del suelo y la disponibilidad de este elemento. Los elementos Co ($r = 0.51$, $P < 0.05$) y Pb ($r = 0.43$, $P < 0.05$), presentaron una relación significativa con el cadmio en su forma disponible, lo que indica que estos elementos tienen similares comportamientos durante la absorción vegetal.

6.2.2 Cobalto

El cobalto es un elemento que se encuentra en forma natural en los suelos y es esencial para microorganismos y animales rumiantes. También es necesario en plantas inferiores por su papel esencial en la fijación de nitrógeno. En las plantas superiores tiene efectos favorables en el crecimiento (Alloway, op cit.). En la corteza de la tierra, el Co se encuentra en rocas a concentraciones que van desde 100 a 200 mg/Kg; en rocas sedimentarias en un rango de 0.1 a 20 mg/Kg. En suelos este elemento parece estar asociado con minerales arcillosos o materia orgánica (Kabata-Pendias y Pendias, op cit.). Alloway op cit. reportó un rango de concentración para suelos no contaminados por este metal que va de 0.5 a 65 mg/Kg.

Los contenidos totales de cobalto en los suelos de la zona de estudio se encuentran en un rango de 5.0 a 33.0 mg/Kg (Tabla 2), que al compararse con los rangos reportados por Alloway, se concluye que no presentan signos de contaminación. Los sitios con concentraciones más altas son: el No 38 (33.0 mg/Kg) y No 41 (25.0 mg/Kg), y se ubican en las pendientes bajas de la sierra; lo que ocasiona la acumulación de material proveniente de las partes altas. En el caso del sitio 38, al presentar altos contenidos de materia orgánica (3.88 %), se presenta mayor adsorción de cobalto, lo que origina la ligeras acumulaciones de este elemento.

El valor promedio de la concentración de cobalto total en la zona de planicie es de 17.4 mg/Kg, y para la zona de sierra es de 15.6 mg/Kg. Dichos valores no resultaron ser diferentes estadísticamente ($t_{cal} = 0.72$, $t_{0.05} = 1.72$), lo cual indica que ambas zonas, presentan contenidos similares de este elemento (Gráfica 2).

El contenido de materia orgánica presentó asociación significativa ($r = 0.44$, $P < 0.05$) con el contenido de cobalto, lo que implica adsorción de este elemento en la fracción orgánica de estos suelos. McLaren (1986) reportó que el cobalto puede ser adsorbido sobre los minerales arcillosos y en materiales orgánicos, proceso que también está regulado por el valor de pH en el suelo.

Se encontraron algunas relaciones altamente significativas del cobalto con otros metales: Fe ($r = 0.78$, $P < 0.01$), Cu ($r = 0.85$, $P < 0.01$), Zn ($r = 0.56$, $P < 0.01$), Mn ($r = 0.71$, $P < 0.01$), Cr ($r = 0.82$, $P < 0.01$) y Ni ($r = 0.91$, $P < 0.01$), lo cual indica que el patrón de distribución de todos estos elementos, en la capa superficial del suelo estudiado es muy similar.

El contenido promedio de cobalto disponible en estos suelos se encuentra en un rango que va de 0.4 a 2.6 mg/Kg. La absorción de cobalto por las plantas está determinada por la concentración del elemento en su forma iónica en la solución del suelo. En la zona de planicie el valor promedio de disponibilidad es de 2.0% y en la zona de sierra es de 8.11%, lo cual también puede estar relacionado con los valores de pH menores en la zona de sierra que originan mayor solubilidad y en consecuencia mayor disponibilidad de este elemento. En este trabajo no se encontró que las propiedades del suelo tengan una relación significativa en la disponibilidad de cobalto para la planta. El contenido de cobre presentó una relación altamente significativa con el cobalto ($r = 0.80$, $P < 0.01$).

6.2.3 Cromo

Se considera al cromo como elemento esencial en los organismos cuando se encuentra en bajas concentraciones. Es muy abundante sobre la superficie terrestre, presentándose en forma natural como Cr^{3+} pero es altamente insoluble, la otra forma estable en la que se puede encontrar es como Cr^{6+} , la cual es más tóxica (Gutiérrez, 1990). El rango normal de concentración de cromo total en los suelos del mundo es de 125 a 250 mg/Kg (Galvao, 1987).

Los suelos analizados presentaron contenidos de cromo totales en valores de 6 a 88 mg/Kg (Tabla 2) que, con base en Galvao op cit., se clasifican como concentraciones normales. Sin embargo, a través de los datos se observa la influencia del Río Silao, provocada por su caudal que conduce materiales sólidos y en solución, las concentraciones obtenidas en los suelos de las partes más altas de la sierra fluctúan entre 6.0 mg/Kg (sitio 3) y 13.0 mg/Kg (sitio 18), y las encontradas en la planicie que varían desde 34.0 mg/Kg (sitio 47) hasta 68.0 mg/Kg (sitios 42 y 46). Los sitios que se encuentran ubicados en las partes bajas de la sierra, también hacen evidente el proceso de acumulación de este metal proveniente de las partes altas de la misma, a través de los sitios No 38 y 41 con concentraciones de 67.5 mg/Kg y 61.5 mg/Kg, respectivamente.

Se comparó el contenido promedio de cromo total de la zona de planicie (43.83 mg/Kg) con el de la sierra (34.0 mg/Kg) a través de una prueba de t , encontrando que son significativamente diferentes ($t_{cal} = 3.35$, $t_{0.05}$, $g_{12} = 1.72$), diferencia que también puede ser debida al mencionado proceso de transporte de materiales; además de posibles fuentes antropogénicas que contribuyen a la acumulación de este metal en la parte plana (Gráfica 2).

El análisis de correlación indicó que el cromo se encuentra asociado con los siguientes elementos: Fe ($r = 0.76$, $P < 0.01$), Cu ($r = 0.83$, $P < 0.01$), Mn ($r = 0.46$, $P < 0.01$) y Ni ($r = 0.82$, $P < 0.01$), lo que indica que en suelos con altas concentraciones de cromo, existen altas concentraciones de Fe, Cu, Mn y Ni.

El cromo disponible para las plantas se encuentra en una concentración que va de 0.54 a 1.0 mg/Kg. Alloway (op cit.) menciona que en suelos no contaminados las

concentraciones de Cr disponible se encuentran cercanas a 0.23 mg/Kg y, en general, estas concentraciones son menores de 1 mg/kg. La propiedad del suelo que influye en la disponibilidad del cromo es, principalmente, el pH. Sin embargo, las fuentes antropogénicas también son responsables de los contenidos elevados de este elemento en plantas.

El valor promedio de disponibilidad de cromo, es mayor en la zona de sierra (2.84%) que en la zona de planicie (0.6%), pues en la zona de planicie hay un mayor contenido de arcillas y limos que estén reteniendo a este elemento, disminuyendo así el Cr disponible en esta zona. Ninguna propiedad del suelo mostró tener una influencia directa en la disponibilidad del cromo para la planta. Únicamente, se presentó una relación altamente significativa con el níquel ($r = 0.89$, $P < 0.01$).

6.2.4 Cobre

El cobre es uno de los elementos esenciales para plantas y animales; es muy abundante en las rocas. La forma iónica más común y móvil de cobre es el cation con valencia 2+ (Cu^{2+}), aunque existen en la superficie del suelo varias especies iónicas (Kabata-Pendias y Pendias, op cit.). Las concentraciones de este metal en los suelos no contaminados tienen un rango que va de 2.0 a 250 mg/Kg (Alloway, op cit.)

Los suelos de la zona estudiada presentan contenidos de cobre total que oscilan entre 7.5 y 50.0 mg/Kg (Tabla 2), por lo que se puede observar que se encuentran dentro del rango normal.

Al comparar el valor promedio de la concentración de cobre en la zona de planicie (31.97 mg/Kg) con el de la sierra (27.54 mg/Kg), se observó que estas dos zonas son diferentes estadísticamente ($t_{\text{cal}} = 2.59$, $t_{0.05}$, $gl_{21} = 1.72$), lo que indica que la zona de planicie ha acumulado mayor cantidad de este elemento, el cual puede provenir de las partes altas de la sierra y ser distribuido por el Río Silao y sus afluentes (Gráfica 2). Este mecanismo se puede observar a través de los sitios ubicados en la zona de planicie (No 27, 35, 42 y 44) que presentaron contenidos altos de este elemento, por estar ubicados en la proximidad del Río Silao, y cuyas concentraciones fueron de 37.5, 39.5, 40.0 y 38.0 mg/Kg, respectivamente. Estos sitios pueden ser comparados con los sitios No 52 (25.0 mg/Kg) y 54 (21.0 mg/Kg) que se encuentran alejados del Río Silao y que presentaron concentraciones bajas de cobre.

Las propiedades químicas de los suelos son muy importantes para el comportamiento de los metales. En estos suelos superficiales de la subcuenca, las propiedades físicas y químicas determinadas no presentaron ninguna relación estadística significativa con las concentraciones de cobre. Kabata-Pendias y Pendias (op cit.) indicaron que se han llevado a cabo muchos estudios en los que la materia orgánica ha tenido un papel importante en la adsorción del cobre en el suelo, también señalan que el pH controla el comportamiento de este metal en el suelo y señalan que la concentración del cobre, en cualquier forma aniónica o catiónica, disminuye con valores de pH de 7 a 8. En un estudio realizado por Flores *et al.* (1992), reportaron que las principales propiedades responsables en la retención de los metales en los suelos del Estado de Hidalgo fueron el contenido de materia orgánica y de limos.

El análisis de correlación indicó que los contenidos de cobre total en los suelos de la subcuenca del Río Silao presentan relaciones altamente significativas con los siguientes elementos: Fe ($r=0.70$, $P < 0.01$), Zn ($r= 0.55$, $P < 0.01$), Mn ($r= 0.56$, $P < 0.01$) y Ni ($r= 0.84$, $P < 0.01$), lo que señala un comportamiento similar de estos elementos con la del cobre debido, posiblemente, a los mecanismos de transporte y acumulación, además de las incorporaciones naturales y antropogénicas de todos estos elementos.

Siendo el cobre un elemento esencial para las plantas, es necesario que el suelo tenga un buen contenido de este elemento en forma soluble, o la calidad de los productos de una cosecha se verán afectados por una deficiencia de este elemento. Las concentraciones de este metal en forma disponible para las plantas se encuentran en un rango de 0.44 a 3.56 mg/Kg. Las plantas de suelos agrícolas pueden tolerar hasta 50 mg/Kg de cobre, por lo que las concentraciones aquí reportadas no provocarán toxicidad a las diferentes plantas cultivadas en estos suelos.

El grado de disponibilidad del cobre fue mayor en la zona de sierra, con un valor promedio de 4.33%, comparado con el valor promedio de 1.82% de la zona de planicie debido, probablemente, a los diferentes valores de pH encontrados en ambas zonas de estudio, aunque esto no fue reflejado a través de alguna relación estadística entre las propiedades del suelo y la disponibilidad de este elemento.

6.2.5 Hierro

Este elemento es abundante en la corteza terrestre, ocupa el 2º lugar en abundancia, con relación a los otros metales (Lester, 1987), pero en el suelo pueden escasear sus formas intercambiables y solubles (Kabata-Pendias y Pendias, op cit.).

Los contenidos totales de hierro en los suelos de la zona de estudio se encuentran en un rango de 9,765 a 51,455 mg/Kg (Tabla 2), encontrando estos contenidos elevados por ser un elemento abundante en la naturaleza y que, además, es esencial para el desarrollo de plantas y animales (Alloway, op cit.). De acuerdo con Ortega (1981), estos suelos se pueden considerar bajos en este elemento, ya que el rango normal reportado por este autor es de 50,000 a 300,000 mg/Kg.

Los valores promedio de Fe total obtenidos en la subcuenca son: 32,500 mg/Kg en la zona de planicie, y 30,652.5 mg/Kg para la zona de sierra. La prueba de t indicó que estos valores son diferentes significativamente ($t_{cal}= 937.81$, $t_{0.05}$, $gl_{21}=1.72$). Algunos suelos de la sierra se pueden catalogar como deficientes en este elemento, como en el caso de los sitios No 3 (9,765 mg/Kg), 18 (24,950 mg/Kg) y 43 (20,385 mg/Kg) que, probablemente, se deba a que el material parental del suelo no proporciona suficiente Fe. En esta misma zona de sierra, pero sobre la parte baja de la ladera se encuentran los sitios No 37 (51,455 mg/Kg) y 38 (42,825 mg/Kg) que tienen concentraciones de hierro total mayores a las que presentaron los sitios 3, 18 y 43, lo cual señala mecanismos de transporte que, origina pequeñas acumulaciones de la mayoría de los elementos, en las partes bajas de la sierra, lo cual permite que estas partes más bajas de la sierra puedan estar bajo un sistema de producción agrícola (Gráfica 3).

Los suelos ubicados en la planicie, presentan concentraciones de hierro total que va de 29,875 a 34,845 mg/Kg. De acuerdo al análisis de correlación realizado, no mostró ninguna asociación con las propiedades físicas o químicas, por lo que se deduce que no

intervinieron en forma significativa en la distribución del hierro total en los suelos de la subcuenca.

Se encontraron algunas relaciones altamente significativas del hierro total con otros elementos: Zn ($r = 0.53$, $P < 0.01$), Mn ($r = 0.56$, $P < 0.01$), y Ni ($r = 0.70$, $P < 0.01$), lo que indica que en los suelos de la subcuenca tienen un patrón de distribución similar al del hierro.

La absorción del hierro por las plantas está metabólicamente controlada, ya que los principales cationes absorbidos por la planta son Fe^{3+} que se reduce a Fe^{2+} cuando la raíz lo absorbe. En la zona de estudio, el contenido de hierro disponible para las plantas se encuentra en un rango de 9.08 a 55.82 mg/Kg, considerándose concentraciones bajas para la planta, ya que Kabata-Pendias y Pendias (op cit.) reportan que los granos de varios cereales no difieren substancialmente en sus concentraciones de Fe, y éstas se encuentran en un rango promedio que va de 25 a 80 mg/Kg.

El grado de disponibilidad de este elemento es igual en la zona de sierra (0.04%) que en la zona de planicie (0.04%). No se encontró alguna relación significativa entre las propiedades químicas del suelo y la disponibilidad de este elemento. El zinc disponible presentó una relación altamente significativa con el hierro disponible ($r = 0.54$, $P < 0.01$) pues, al ser elementos esenciales, su disponibilidad y entrada a la planta pueden estar controladas por los mismos factores en estos suelos.

6.2.6 Manganeso

Las formas más comunes de manganeso en minerales son los iones Mn^{2+} , Mn^{3+} o Mn^{4+} , pero su estado de oxidación 2+ es el más frecuente en la roca, forma parte de minerales silicatados (Jarvis, 1984). Alloway (op cit.), reportó las concentraciones de este elemento en suelos normales en un rango que va de 20 a 10,000 mg/Kg.

Los valores de manganeso total de la zona de estudio se encuentran en el rango de 83.8 a 808 mg/Kg (Tabla 2), se considera a estos suelos como no contaminados por este elemento, de acuerdo con el límite reportado por Alloway. Comparando el contenido promedio de Mn total en los suelos de la zona de planicie (560.8 mg/Kg) con el de la sierra (425.8 mg/Kg), se encontró que existen diferencias significativas entre estos lugares ($t_{cal} = 84.37$, $t_{0.05}$, $gl_{21} = 1.72$). Los sitios No 3 (84.0 mg/Kg), 18 (273.0 mg/Kg) y 28 (283.0 mg/Kg) ubicados en la parte alta de la sierra, son los que presentaron concentraciones bajas de este elemento. Si comparamos las concentraciones de estos sitios con los de la parte baja de la ladera como los sitios No 37 (775.5 mg/Kg) y 41 (622 mg/Kg), observamos nuevamente una pequeña acumulación de este elemento en estos últimos sitios debido, quizás, al mismo fenómeno de transporte mencionado para todos los elementos (Gráfica 4).

En la planicie también se encuentran sitios con concentraciones bajas de Mn; sin embargo, el sitio No 53 (808 mg/Kg) y 47 (660 mg/Kg) son los que presentaron un contenido más alto de este elemento en comparación con los demás sitios; en éstos el contenido de materia orgánica, arcillas y limos, ocasiona que este metal se acumule en cantidades mayores al de los otros sitios.

Con los análisis de correlación múltiple se observa que la propiedad química que está asociada con la acumulación de este metal en los suelos es el contenido de materia orgánica ($r = 0.54$, $P < 0.01$), esta relación es altamente significativa. Flores *et al.*, (op cit.), estudiando los suelos del Estado de Hidalgo, también observaron que la materia orgánica y el porcentaje de limos fueron las propiedades que estuvieron más asociadas con la distribución del manganeso en esos suelos.

El comportamiento del manganeso en los suelos es muy complejo y está gobernado por diferentes factores de los cuales el pH es el más importante. Los suelos altamente alcalinos (pH arriba de 8) pueden presentar toxicidad por manganeso (Kabata- Pendias y Pendias, op cit.). Los cambios en las formas iónicas del manganeso también pueden influenciar la disponibilidad de otros elementos, por lo tanto, ciertas formas de Mn pueden actuar como importante fuente de otros metales traza, más notablemente, en el cobalto (Jarvis, op cit.).

El manganeso presentó una asociación altamente significativa con los siguientes metales: Zn ($r = 0.67$, $P < 0.01$), Cr ($r = 0.46$, $P < 0.01$) y Ni ($r = 0.65$, $P < 0.01$), lo que indica patrones de comportamiento similar del manganeso y estos elementos.

Todas las plantas requieren de manganeso, debido a que es importante en su fisiología y está relacionado con los procesos de oxidoreducción. Las concentraciones de manganeso disponible se encontraron en un rango que va de 3.98 a 70.36 mg/Kg. Este elemento es fácilmente absorbido por las plantas cuando se encuentra en forma soluble en el suelo.

Nuevamente, se encontró que la zona de sierra presenta un mayor grado de disponibilidad (4.50%) que la zona de planicie (2.72%), esto debido probablemente, al contenido relativamente más alto de materia orgánica en esta zona de planicie que pueda estar reteniendo al manganeso y así disminuyendo su disponibilidad hacia las plantas, lo cual está indicado por el índice de correlación, un tanto débil pero significativo, que se presentó entre estas dos variables ($r = 0.40$, $P < 0.05$). Un resultado similar fue reportado por García (1986) en suelos del Estado de México.

6.2.7 Níquel

La acumulación de níquel en el suelo va a depender, principalmente, de las prácticas culturales que se ejerzan en las zonas de cultivo, tales como la fertilización excesiva con productos fosfatados ricos en níquel que pueden contener de 30 a 1000 mg de Ni/Kg de fertilizante (Alloway, op cit.), y a la utilización de aguas residuales para riego. Sin embargo, la naturaleza del material parental influye, también, en el contenido natural de níquel en cada uno de los suelos.

Otro factor importante para la acumulación de este metal pesado, es la materia orgánica, ya que el níquel tiende a adsorberse en la superficie de las partículas de humus. Las arcillas son secundariamente importantes en los procesos de acumulación de níquel más, no por ello, no se deben de tomar en cuenta, pues resultan determinantes en la distribución del níquel en la fase sólida y líquida del suelo (Alloway, op cit.).

La concentración de níquel en los suelos de la subcuenca del Río Silao se encuentran en un rango que va de 5.5 a 91.0 mg/Kg (Tabla 2). Estas concentraciones se encuentran

dentro de valores normales reportados por Alloway (op cit.), que oscilan de 2.0 a 750 mg/Kg. El valor promedio de las concentraciones de Ni en la zona de la planicie es de 34.74 mg/Kg, y para los sitios de la zona de sierra es de 33.6 mg/Kg, los cuales no son diferentes estadísticamente ($t_{cal} = 0.45$, $t_{0.05}$, $g_{21} = 1.72$).

Las concentraciones más altas de níquel en los suelos superficiales de la subcuenca se presentaron en la zona baja de la sierra, en los sitios No 38 con 91.0 mg/Kg y 41 con 58 mg/Kg. Estas concentraciones indican una pequeña acumulación del elemento en esta zona de ladera, lo cual puede ser debido al mismo mecanismo de transporte mencionado en la discusión de todos los demás elementos (Gráfica 2).

El análisis de correlación múltiple indicó una relación significativa entre la materia orgánica y el níquel ($r = 0.50$, $P < 0.05$), concordando con lo ya mencionado y reportado por Alloway. El elemento que mostró tener una asociación significativa con el níquel fue el Zn ($r = 0.50$, $P < 0.05$).

El contenido de níquel disponible en los suelos de esta subcuenca se encuentra en un rango de 1.14 a 3.20 mg/Kg. Estas concentraciones no originarán ningún síntoma de toxicidad en las plantas, pues Kabata-Pendias y Pendias (op cit.) reportan rangos de toxicidad en diferentes especies de plantas que varían de 10 a 100 mg/Kg. Los autores también reportan que hay algunas plantas muy sensibles a la presencia de este elemento en el suelo, que fácilmente pueden verse afectadas aún con concentraciones entre 10 y 30 mg/Kg.

El grado de disponibilidad del Ni en la zona de sierra presentó un valor promedio de 6.52%, y la zona de planicie un valor promedio de 1.03%. Esta diferencia puede deberse a las diferencias de pH en ambas zonas, lo cual fue señalado a través de la correlación significativa obtenida entre el grado de disponibilidad y los valores de pH ($r = -0.46$, $P < 0.05$), es decir, a valores bajos de pH, la concentración de níquel disponible para la planta será mayor. Sánchez (1985) en un estudio realizado en suelos del Estado de México, reportó una concentración de este elemento en forma disponible de 1.8 a 2.6 mg/Kg, rango similar al obtenido en este trabajo. Además, el autor también reportó que el valor de pH presentó una correlación negativa en la disponibilidad de este elemento.

6.2.8 Plomo

Este metal no es esencial para los seres vivos. Se presenta en dos estados de oxidación Pb^{2+} y Pb^{4+} , el primero predomina en el ambiente acuático (Villanueva, 1992). El plomo entra al ambiente terrestre a través de la minería, fundición, procesamientos y coloración. Su principal fuente es de origen antropogénico (Piotrowska, op cit.). Las concentraciones de este metal en suelos normales se encuentran en un rango que va de 2.0 a 300 mg/Kg (Alloway, op cit.).

En los suelos superficiales de la subcuenca del Río Silao los contenidos de plomo total varían de 1.0 a 49.5 mg/Kg (Tabla 2). Estas concentraciones se pueden considerar muy bajas si son comparadas con el rango normal reportado por Alloway. Al realizar una prueba de t para comparar la concentración promedio de plomo en la zona de planicie (14.63 mg/Kg) con la concentración promedio en la zona de sierra (10.16 mg/Kg), se encontró que si hay diferencias significativas entre estas 2 zonas ($t_{cal} = 2.96$, $t_{0.05}$, $g_{21} = 1.72$). Esta diferencia se debe, probablemente, a que en la zona de planicie, a través de

los sitios No 44 (29.5 mg/Kg), 47^a (22.0 mg/Kg) y 52 (22.0 mg/Kg) se logra observar la influencia de diversas fuentes antropogénicas como por ejemplo, la carretera que comunica las ciudades de Silao y Romita, la vía del ferrocarril que comunica las ciudades de Irapuato y León, y las aguas del Río Silao que están muy próximas a la ciudad y que, por lo tanto, deben contener gran parte de las aguas residuales provenientes de esta Ciudad de Silao. La zona de sierra, presenta concentraciones bajas de plomo total, excepto el sitio No 45 (49.5 mg/Kg) que se ubica en la zona de ladera y que recibe ligeras aportaciones de material procedentes de las partes altas (Gráfica 2).

El plomo no presentó ninguna asociación significativa con ninguna de las propiedades de estos suelos lo cual indica que, aparentemente, dichas propiedades no están influyendo directamente sobre los niveles y distribución de plomo en los suelos de esta zona. Este resultado no era esperado pues, como reporta Piotrowska (op cit.), el pH del suelo, su contenido de materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico, son de gran importancia para la adsorción y retención de plomo. Por otra parte, los valores de pH influyen en la disponibilidad del plomo para las plantas.

Este metal no presentó ninguna asociación con otros metales, indicando que la distribución horizontal y superficial del plomo en los suelos de la zona de estudio es independiente de la influencia de cualquier otro metal.

El contenido de plomo disponible en estos suelos se encuentra en un rango de 1.14 a 2.86 mg/Kg, rango muy bajo en comparación con el reportado por Sánchez (1985) y que va de 5.1 a 10.0 mg/Kg. El grado de disponibilidad del plomo en la zona de sierra presentó un valor promedio de 47.55%, y la zona de planicie un valor promedio de 15.08%. El plomo no es soluble en el suelo; sin embargo, éste se absorbe, principalmente, a través de los pelos radicales de la raíz y almacenado, en un grado considerable, en las paredes de la célula.

6.2.9 Zinc

El zinc es un elemento traza esencial para los humanos, animales y plantas superiores (Alloway, op cit.). El zinc ocupa el 7^o lugar según el orden de abundancia de metales pesados en la litosfera, es el metal más abundante presente en residuos sólidos y se encuentra en concentraciones de aproximadas de 250 mg/Kg (Lester, op cit.).

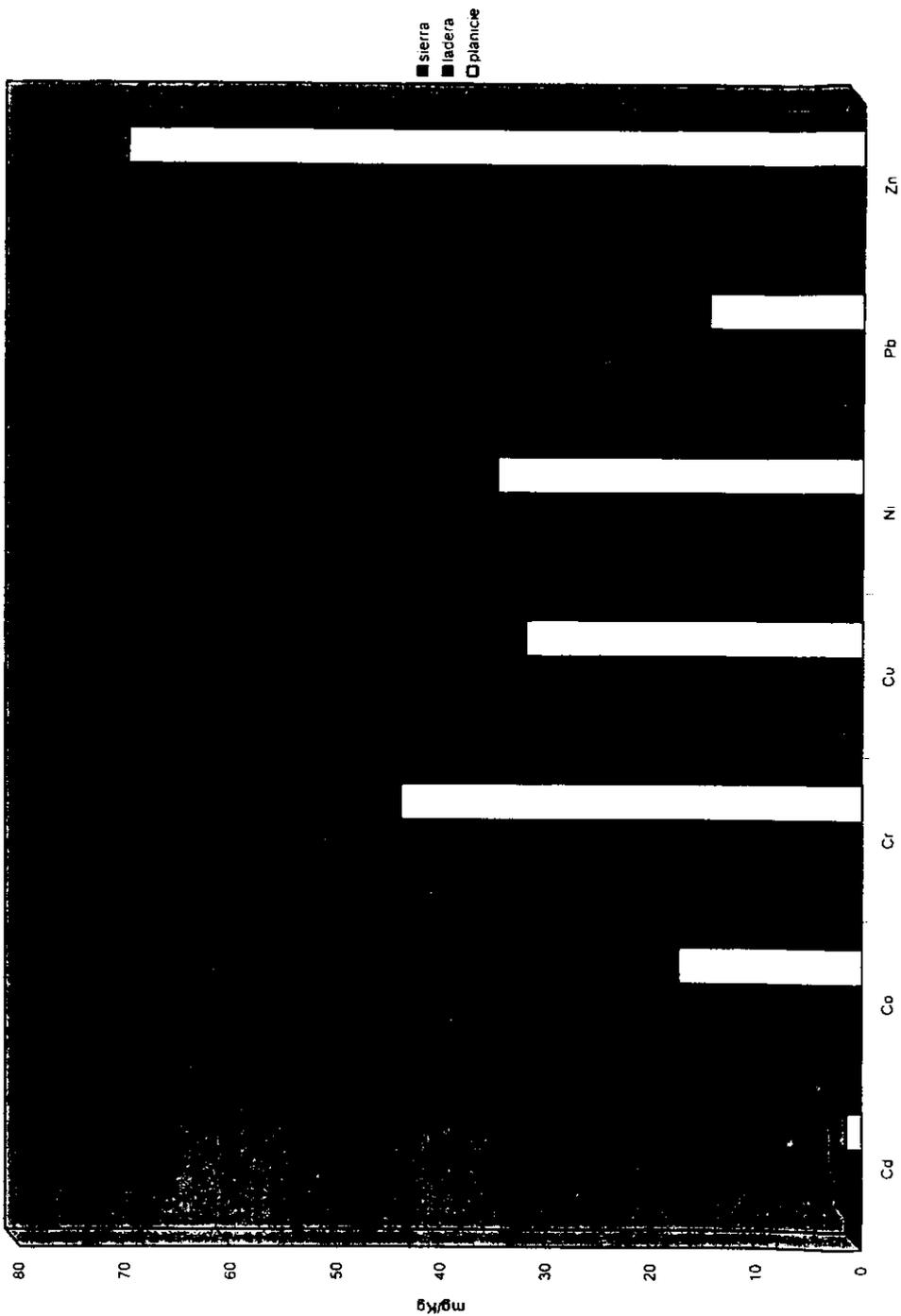
El contenido de zinc total en los suelos de la zona de estudio varía de 25.5 a 102 mg/Kg (Tabla 2). Al comparar este rango con el reportado por Alloway (op cit.) para suelos agrícolas normales y que va de 1.0 a 900 mg/Kg, se observa que los suelos de la subcuenca tienen concentraciones relativamente bajas de este elemento. Se observó una diferencia estadística significativa entre la concentración promedio de Zn de la zona de planicie (69.86 mg/Kg) y la de zona de sierra (67.0 mg/Kg) ($t_{\text{cal}} = 2.02$, $t_{0.05, g_{121}} = 1.72$). Como en el caso anteriormente discutido, la distribución de zinc en los suelos de la parte de planicie de la subcuenca, se ve determinada por las fuentes antropogénicas, como las carreteras y vías de ferrocarril, lo cual se puede observar a través de los sitios No 44, 47, 47^a y 52 cuyas concentraciones de zinc fueron 96.5, 102.0, 98.5 y 80.7 mg/Kg, respectivamente. También, se debe de considerar la influencia que puede tener una fábrica de toda clase de estructuras metálicas ubicada sobre la carretera Irapuato-Silao (CANACINTRA, op cit.) la cual realiza aleaciones y galvanización, que incrementan los contenidos de zinc en estos sitios mencionados (Gráfica 2).

Tabla 2. Concentración total y disponible de metales pesados en muestras superficiales de suelos agrícolas (mg/kg).

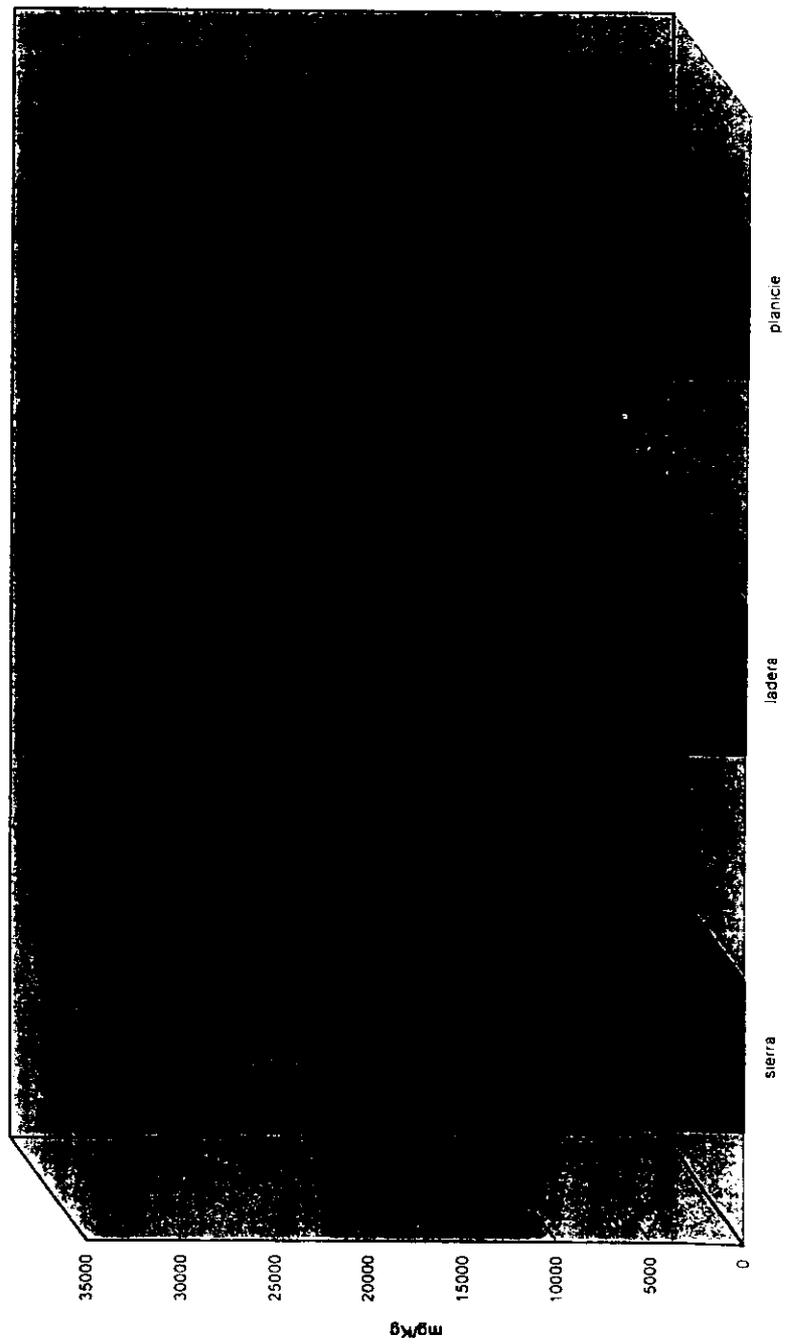
Sitio	Cd t	Cd d	Co t	Co d	Cr t	Cr d	Cu t	Cu d	Fe t	Fe d	Mn t	Mn d	Ni t	Ni d	Pb t	Pb d	Zn t	Zn d
3	0.8	0.3	5.0	0.5	6.0	0.6	15.0	0.4	9765	9.0	83.8	4.0	5.5	1.1	2.0	1.7	25.5	0.3
18	1.0	0.3	8.0	0.7	13.0	0.6	7.5	0.6	24950	43.8	273.0	38.0	6.5	1.3	9.0	1.3	59.5	0.9
19	0.9	0.2	8.0	0.7	11.5	0.6	15.0	1.0	26170	10.5	464.0	24.8	11.5	1.3	5.5	1.3	69.5	0.5
27	1.2	0.3	18.0	0.8	48.0	0.7	26.5	1.0	40975	19.5	413.5	32.8	33.0	1.5	11.0	1.3	56.5	0.6
27*	1.9	0.7	18.5	1.1	44.7	0.7	37.5	2.3	34845	14.3	560.0	53.0	36.5	1.9	13.2	1.3	68.5	1.3
23	1.0	0.2	14.5	1.0	36.5	0.6	23.5	1.1	29595	16.6	483.0	40.7	30.0	1.4	1.1	1.5	56.0	0.6
28	2.1	0.7	15.0	1.0	48.0	0.7	39.0	1.5	36120	19.1	283.5	19.8	33.0	1.8	13.0	1.5	71.5	0.5
35	1.2	0.1	15.0	1.5	43.0	0.5	39.5	1.6	31570	28.0	503.0	60.7	33.5	1.7	15.5	1.3	63.5	1.0
36	0.5	0.1	14.5	1.0	41.5	0.6	29.5	1.7	31655	34.3	422.0	26.6	39.0	1.4	13.5	1.4	57.5	0.4
37	1.5	0.2	24.5	1.0	47.5	0.6	36.7	1.2	51455	12.5	775.5	32.7	43.5	1.6	4.0	1.4	91.5	0.5
38	1.7	0.8	33.0	2.6	67.5	0.7	50.0	3.6	42825	7.8	395.0	70.4	91.0	2.7	5.5	1.5	99.5	1.0
41	0.8	0.4	25.0	1.2	61.5	0.6	46.7	2.2	40605	9.7	650.0	44.6	58.0	2.0	1.0	1.2	86.0	0.4
42	1.3	0.1	20.5	1.2	68.0	0.6	40.0	1.4	34035	55.8	626.0	64.5	42.5	2.3	12.0	1.7	65.5	3.5
43	1.8	0.5	16.5	1.3	26.0	0.7	23.0	1.6	20385	5.7	349.0	13.9	29.0	2.1	11.0	2.2	49.5	0.5
44	1.2	0.2	17.0	1.4	47.5	0.8	38.0	3.0	29875	29.2	553.0	29.8	33.5	1.9	29.5	2.8	96.5	4.0
45	1.1	0.6	6.5	2.1	22.5	1.0	19.0	1.6	24655	6.2	502.0	35.7	28.0	3.2	49.5	2.7	61.5	0.5
46	1.3	0.4	23.5	1.2	68.0	0.7	42.0	1.7	37865	14.0	591.0	52.8	50.0	1.8	7.0	1.6	51.5	0.7
47	1.2	0.1	18.7	0.9	35.2	0.6	30.7	1.8	36785	12.7	660.0	23.7	37.0	1.8	17.0	2.4	102	0.4
47*	1.7	0.1	18.0	0.8	34.0	0.6	34.5	1.7	35465	12.8	632.0	23.8	33.5	1.8	22.0	2.1	98.5	0.4
49	1.9	0.1	16.0	0.4	46.5	0.6	22.5	1.2	30295	42.1	435.5	23.9	28.0	1.5	8.0	1.7	48.0	0.5
52	2.3	0.1	15.0	1.0	22.5	0.6	25.0	2.5	25025	10.1	560.0	55.8	23.7	1.8	22.0	2.4	80.7	0.9
53	1.8	0.1	17.0	0.5	24.0	0.7	29.0	1.8	25115	21.2	808.0	34.6	27.5	1.3	13.0	2.1	66.0	0.4
54	1.9	0.1	14.5	1.0	47.0	0.6	21.0	1.4	28995	13.4	527.0	33.5	34.0	1.4	6.5	1.4	53.5	0.5

t= total
d= disponible

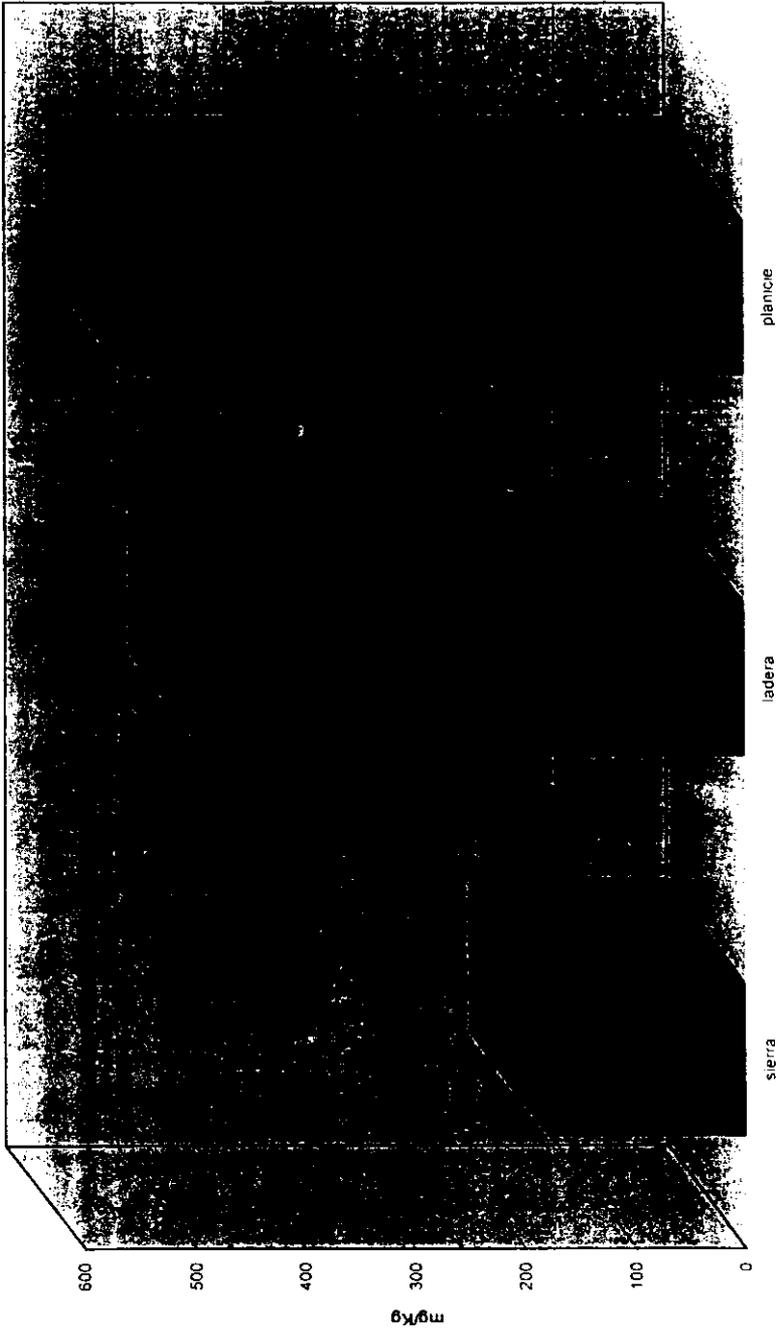
GRÁFICA 2. CONCENTRACIÓN PROMEDIO DE METALES PESADOS TOTALES EN SUELOS SUPERFICIALES



GRÁFICA 3. CONCENTRACIÓN DE Fe TOTAL EN SUELOS SUPERFICIALES



GRÁFICA 4. CONCENTRACIÓN DE Mn TOTAL EN SUELOS SUPERFICIALES



Por otra parte, los sitios No 37, 38 y 41, ubicados en la parte baja de la sierra presentaron los más altos contenidos de zinc en esta zona de sierra, las cuales fueron 91.5, 99.5, y 86.0 mg/Kg, respectivamente, lo cual puede atribuirse a los mismos mecanismos de transporte ya señalados.

Las propiedades químicas de los suelos son muy importantes para el comportamiento de los metales, por lo que, a través de un análisis de correlación, se pudo conocer las propiedades de mayor importancia en la distribución y acumulación de zinc en estos suelos, ellas fueron: el contenido de materia orgánica ($r= 0.47$, $P < 0.05$), y la capacidad de intercambio catiónico ($r= 0.42$, $P < 0.05$) que presentaron una relación significativa con el zinc; mientras que, el porcentaje arcillas ($r= 0.55$, $P < 0.01$) presentó una asociación altamente significativa. En un estudio realizado por Flores *et al.*, (op cit.) en suelos del Estado de Hidalgo, los autores encontraron que la materia orgánica y el porcentaje de limos fueron las propiedades que tuvieron más relación con el zinc de esos suelos. Garrison (1982), indicó que el comportamiento químico del Zn, Cd y Pb en los suelos es similar.

Las formas solubles de zinc son fácilmente disponibles para las plantas, principalmente, la forma iónica de Zn^{2+} que es la más absorbida por la raíz de la planta, jugando un papel muy importante. El contenido de zinc disponible se encontró en un rango de 0.32 a 3.46 mg/Kg. La zona de planicie presentó un grado de disponibilidad de 1.48%, mayor que el de la zona de sierra con 0.89%. Alloway (op cit.) menciona que los principales factores que afectan la disponibilidad del zinc en los suelos son el valor de pH, el contenido de materia orgánica, sitios de adsorción y la actividad micobiana.

6.3 Propiedades físicas y químicas de los perfiles de suelo

En la Tabla 3 se puede apreciar la variación en el color que presentan los suelos al variar la profundidad de los mismos en los perfiles realizados. Se presentan colores oscuros en la superficie que se van cambiando a colores claros a mayor profundidad. Generalmente, en los horizontes superficiales de los perfiles se presentan colores como pardo oscuro o gris oscuro y, conforme aumenta la profundidad, los colores se toman a pardo pálido, gris, e inclusive, blanco. Los perfiles que tuvieron poca profundidad (No 3, 36, 37, 45 y 54), con 2 horizontes, el color se mantiene igual. El cambio de color en los diferentes horizontes de los perfiles realizados se debe, principalmente, a la cantidad de materia orgánica que se acumula en los horizontes superficiales del suelo.

Los valores de pH presentan diferentes patrones de comportamiento en los perfiles analizados, pues en algunos de ellos, estos valores tienden a aumentar con la profundidad, mientras que, en otros, disminuye y, en otros más, se mantiene relativamente uniforme. Los valores de pH oscilan entre 6.7 y 8.2 unidades. Esta variación es originada por una ligera acumulación, en unos casos, y a una pérdida, en otros de bases en el perfil por efecto de riego, movimiento que se ve favorecido por las texturas arenosas que presentan estos suelos.

Con respecto al contenido de materia orgánica (Tabla 3), se observa que sus valores presentan una tendencia a disminuir con el aumento en la profundidad del perfil, debido a que en la parte superficial del suelo se presenta la mayor acumulación de material

orgánico por depositación de hojarasca y residuos de cultivos. Además, en los primeros centímetros de profundidad hay una mayor abundancia de raíces de las plantas y de pequeños organismos vivos y/o muertos que van a proporcionar también material orgánico al suelo. En este horizonte superficial se llevan a cabo, en mayor proporción, los procesos de degradación y descomposición de estos materiales orgánicos. Conforme aumenta la profundidad del perfil del suelo, el contenido del material orgánico va disminuyendo, en ocasiones, en pequeñas proporciones. Se ha reportado que los ciclos de oxidación-reducción que ocurren en el suelo originan la oxidación de la materia orgánica y, por consiguiente, su pérdida a través del perfil (Navarro, 1990). Los contenidos de materia orgánica en los perfiles de suelo de la zona de estudio, parecen influir en la ligera acidez que presentan estos suelos, como lo indica el coeficiente de correlación obtenido entre estas dos variables ($r = -0.36$, $P < 0.05$).

Los valores de la capacidad de intercambio catiónico también se presentan en la Tabla 3. En ella se puede observar una cierta variación, aún dentro de cada perfil, la cual está directamente influenciada por la textura del suelo, como lo indica el coeficiente de correlación obtenido entre la capacidad de intercambio y el contenido de arcillas ($r = 0.84$, $P < 0.01$), y el contenido de limos ($r = 0.69$, $P < 0.01$), es decir, los valores de la capacidad de intercambio catiónico van a depender de los valores en el contenido de arcillas, principalmente; aunque el contenido de limos, también influye en la capacidad de intercambio a lo largo de los perfiles del suelo. Esta propiedad de intercambio catiónico se lleva a cabo, principalmente, en la fracción mineral más que en la orgánica, pues el coeficiente de correlación obtenido entre la capacidad de intercambio y el contenido de materia orgánica ($r = 0.34$, $P < 0.05$) es más bajo al obtenido con las fracciones minerales.

La cantidad de carbonatos alcalino-térreos encontrada en los perfiles de suelo fue similar a la encontrada en los suelos superficiales, solo que en los perfiles se presenta una variación en el contenido de estos carbonatos en función de la profundidad. Esta variación no es uniforme en los 13 perfiles, en algunos, el contenido disminuye, en otros, aumenta y, en otros más, no hay un patrón de comportamiento bien definido (Tabla 3). Se observó una ligera influencia del contenido de carbonatos sobre el pH en los perfiles del suelo, a través del coeficiente de correlación ($r = 0.38$, $P < 0.05$).

La clasificación textural para los perfiles también varía con la profundidad, encontrando texturas como arenas, arenas migajosas, migajones arenosos, y francos, hasta migajones arcillosos y arcillas; pero la textura predominante es el migajón arenoso. En algunos perfiles como el No 3, 35, 37, 41, 45 y 52, la clasificación textural es la misma en todos los horizontes (Tabla 3). Se obtuvo una relación altamente significativa entre el contenido de arcillas y el de limos ($r = 0.58$, $P < 0.01$), que concuerda con las clases texturales de estos perfiles.

6.4 Distribución de metales pesados en los perfiles del suelo

En los perfiles del suelo pueden variar las concentraciones de los elementos pesados al aumentar la profundidad de los mismos, lo cual se ve influenciado por un gran número de factores como: el material madre, procesos pedogenéticos, contenido orgánico, de arcillas, de minerales de hierro, el valor de pH, la topografía del suelo, la actividad microbiana, y posibles contaminaciones. La relevancia de cada uno de estos factores varía de sitio a sitio. La movilidad de los elementos dentro de los perfiles del suelo es una

Tabla 3. Propiedades físicas y químicas de perfiles de suelo de la zona de estudio.

Sitio	Prof (cm)	pH suelo:H ₂ O 1:2.5	M.O (%)	CICT cmol(+)/kg	CaCO ₃ (%)	arcilla (%)	limos (%)	clasif. Textural	Color seco	Color húmedo
3	45	7.3	0.66	16.73	1.32	16.3	19.3	migajón arenoso	pardo claro	pardo oscuro
	70	6.7	0.18	20.38	1.19	20.0	20.0	migajón arenoso	blanco	pardo claro
35	30	7.2	1.87	10.6	1.76	10.5	16.40	migajón arenoso	pardoamarillento	pardo oscuro
	70	7.4	0.84	8.1	2.32	12.8	10.90	migajón arenoso	pardoamarillento	pardo oscuro
	130	7.5	0.81	11.4	2.54	12.8	16.30	migajón arenoso	pardoamarillento	pardo oscuro
	190	7.7	0.70	22.5	3.74	27.3	47.30	migajón arenoso	pardoamarillento	pardo oscuro
36	65	8.0	0.77	17.9	2.81	18.2	27.20	migajón arenoso	pardoamarillento	pardoamarillento
	150	7.7	0.14	2.4	1.83	3.7	5.4	arena	pardoamarillento	pardoamarillento
37	30	7.3	2.41	22.82	3.55	18.18	47.27	franco	pardo grisáceo	pardo grisáceo
	60	7.2	2.07	22.82	3.96	18.18	43.63	franco	pardo grisáceo	pardo grisáceo
41	30	7.8	0.85	11.4	2.71	9.0	21.40	migajón arenoso	pardoamarillento	pardoamarillento
	60	8.1	0.59	12.0	2.22	10.9	18.19	migajón arenoso	pardoamarillento	pardoamarillento
	95	8.2	0.52	8.9	2.79	9.0	18.18	migajón arenoso	pardoamarillento	pardoamarillento
42	50	7.4	2.88	21.19	4.23	29.0	16.36	migajón arcilloso	pardo claro	pardo oscuro
	80	7.6	1.87	17.93	3.40	21.8	32.73	franco	pardoamarillento	pardo oscuro
	130	8.0	0.87	36.11	4.28	43.6	29.09	arcilla	gris	gris fuerte
	190	7.8	0.73	11.41	2.32	14.5	34.54	migajón arenoso	pardoamarillento	pardo oscuro

Tabla 3. Continuación

Sitio	Prof. (cm)	pH suelo:H ₂ O 1:2.5	M.O (%)	CICT cmol(+)/kg	CaCO ₃ (%)	arcilla (%)	limos (%)	Clasif. Textural	Color seco	Color húmedo
44	08	8.1	0.98	10.6	6.22	16.4	20.0	migajón arenoso	pardo	pardo oscuro
	55	7.5	0.60	26.5	3.30	27.2	36.3	franco	pardoamarillento	pardoamarillento
	85	8.0	0.30	6.5	1.61	10.9	10.9	arena migajosa	pardoamarillento	pardoamarillento
	125	7.7	0.22	17.1	2.22	38.1	30.9	migajón arcilloso	gris pardusco	pardo
45	30	7.5	2.11	21.1	3.56	18.1	18.0	migajón arenoso	negro	negro
	65	8.1	1.00	19.5	6.25	20.0	20.0	migajón arenoso	gris	gris
47	50	7.3	1.55	35.8	3.54	45.4	38.1	arcilla	gris oscuro	gris oscuro
	150	7.9	0.15	22.8	4.30	18.1	40.0	franco	gris claro	gris claro
	230	7.8	0.13	19.5	3.37	18.1	43.6	franco	pardo claro	pardoamarillento
49	32	7.6	0.93	8.9	2.12	10.9	23.6	migajón arenoso	pardoamarillento	pardo oscuro
	58	7.6	0.87	12.2	2.54	14.4	36.3	franco	pardoamarillento	pardo oscuro
	85	7.5	0.22	8.9	2.22	10.9	20.0	migajón arenoso	pardoamarillento	pardo oscuro
52	20	7.4	2.13	29.3	2.98	30.9	47.2	migajón arcilloso	gris oscuro	gris oscuro
	34	7.5	1.54	29.3	3.10	32.7	45.4	migajón arcilloso	gris oscuro	gris oscuro
	70	7.6	0.95	30.1	2.79	32.7	40.0	migajón arcilloso	gris oscuro	gris oscuro
53	35	7.6	1.34	34.2	3.52	30.9	41.8	migajón arcilloso	gris oscuro	gris oscuro
	75	7.7	1.25	34.2	4.06	29.0	43.6	migajón arcilloso	gris oscuro	gris oscuro
	130	7.7	1.17	35.8	4.35	25.4	41.8	franco	gris oscuro	gris oscuro
54	27	7.4	0.71	11.4	2.76	14.5	10.9	migajón arenoso	pardo	pardo oscuro
	55	7.8	0.40	25.2	4.08	25.4	36.3	franco	gris	gris oscuro

de las propiedades clave que determinan sus concentraciones y su posición en los horizontes de los perfiles (Fergusson, op cit.).

En la Tabla 4 se presentan las concentraciones totales de los metales pesados en los diferentes perfiles de suelo obtenidos de la subcuenca del Río Silao. En esta tabla se observa que el comportamiento de los metales, no tiene un patrón bien definido, lo cual se debe a que las características físicas y químicas de los perfiles de suelo tienen una influencia en la distribución de los metales en relación con la profundidad. Dicha influencia se observa a través de las correlaciones significativas obtenidas entre los siguientes metales y las propiedades del suelo: pH y Co ($r = 0.40$, $P < 0.05$), pH y Cr ($r = 0.37$, $P < 0.05$), pH y Cu ($r = 0.36$, $P < 0.05$), pH y Ni ($r = 0.39$, $P < 0.05$), materia orgánica y Zn ($r = 0.33$, $P < 0.05$), contenido de arcillas y Mn ($r = 0.42$, $P < 0.05$), contenido de arcillas y Zn ($r = 0.44$, $P < 0.01$), contenido de limos y Mn ($r = 0.50$, $P < 0.01$), contenido de limos y Zn ($r = 0.46$, $P < 0.01$), contenido de carbonatos y Pb ($r = 0.34$, $P < 0.05$) y contenido de carbonatos y Zn ($r = 0.56$, $P < 0.01$).

Las concentraciones de la mayoría de los metales en algunos perfiles presentaron un incremento en función del aumento en la profundidad, movimiento descendente de los metales que se ve favorecido por las texturas arenosas que presentan dichos perfiles (No 3, 36, 41 y 45,). Sin embargo, en otros, las concentraciones más altas de los metales se encontraron en los horizontes superficiales, dichos contenidos fueron disminuyendo con el aumento en la profundidad, es decir, no hubo mucha movilidad de los metales. La localización de plomo cerca de la superficie del suelo en la mayoría de los perfiles está, principalmente, relacionada con la acumulación superficial de materia orgánica, lo cual concuerda con lo reportado por Kabata-Pendias y Pendias (op cit.) y Piotrowska (op cit.). Sin embargo, otros autores han encontrado que el subsuelo ha mostrado un índice superior de contaminación, señalan que esta acumulación se debe, principalmente, a la adsorción de los metales en las superficies arcillosas, óxidos de Fe y Mn, y en carbonatos (Alloway, op cit.). En condiciones alcalinas o neutras, el plomo tiene una movilidad relativamente baja (Fergusson, op cit.).

Las concentraciones de algunos metales en los perfiles No 3, 36, 37 y 45, se mantienen constantes en los horizontes, debido a que en ellos sólo se cuenta con 2 horizontes, y la textura en estos suelos someros también es homogénea.

En la Tabla 4a se presentan las concentraciones de los metales pesados en forma disponible en los diferentes perfiles. Se observa que el comportamiento de los metales tampoco tiene un patrón bien definido, pues sus concentraciones totales, así como las características físicas y químicas de los perfiles de suelo, influyen en la distribución y disponibilidad .

6.5 Propiedades físicas y químicas de los sedimentos.

6.5.1 Color

Los resultados de las propiedades físicas y químicas de los sedimentos del Río Silao y arroyos aledaños se presentan en la Tabla 5. Los colores predominantes son: colores claros (blanco, pardo claro, pardo amarillento), aunque también se observaron colores

Tabla 4. Concentración total de metales pesados en perfiles de suelo de la zona de estudio (mg/kg)

Sitio	Prof (cm)	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
3	45	0.80	5.0	6.0	15.0	9765	83.5	5.5	2.0	25.5
	70	1.15	4.0	5.5	6.5	10430	47.5	6.5	3.0	25.5
35	30	1.20	15.0	43.0	39.5	31570	503	33.5	15.5	63.5
	70	0.95	13.0	40.0	22.5	29345	406	27.0	7.5	56.5
	130	1.10	11.5	39.5	23.5	28905	410	33.5	10.5	56.5
	190	0.55	19.0	59.5	43.5	38010	513	53.5	22.0	77.0
36	65	0.55	14.5	41.5	29.5	31655	422	39.0	13.5	57.5
	150	1.25	14.5	45.0	28.5	35335	414	34.5	13.0	54.5
37	30	1.50	23.0	57.0	36.5	49760	634	43.0	6.0	85.5
	60	1.45	24.7	47.5	36.5	51457	777	43.5	4.2	91.5
41	30	0.80	25.0	61.5	46.5	40605	650	58.0	1.0	86.0
	60	1.20	28.0	71.7	48.2	40500	622	60.2	2.5	47.2
	95	1.50	26.0	70.0	45.0	38355	586	57.5	7.5	46.0
42	50	1.30	20.5	68.0	40.0	34035	626	45.5	12.0	65.5
	80	1.60	21.0	68.0	36.0	33495	699	48.0	15.5	59.5
	130	1.75	22.0	61.0	41.0	40500	753	51.5	18.0	83.5
	190	1.05	20.0	56.0	29.0	33885	638	39.0	14.0	50.5
44	08	1.20	17.0	47.5	38.0	29875	553	33.5	29.5	96.5
	55	1.32	20.0	50.0	36.0	38005	677	43.0	13.7	81.5
	85	0.95	13.0	40.0	28.5	29200	451	27.0	15.5	51.5
	125	0.85	18.5	28.5	23.5	28150	818	27.5	16.5	68.0
45	30	1.15	6.5	22.5	18.5	24655	502	28.0	49.5	61.5
	65	1.95	14.5	26.5	18.5	22035	395	20.5	12.0	68.5
47	50	1.22	18.7	35.5	30.7	27865	653	37.0	17.0	102
	150	1.00	15.5	31.5	21.0	28145	535	25.0	13.5	80.0
	230	2.05	19.5	44.5	31.0	35925	617	39.0	13.0	89.0
49	32	1.9	16	46	22	30295	435	28	8.0	48
	58	2.0	19	56	28	29695	636	39	10	46
	85	1.8	16	44	32	27535	594	31	7.0	47
52	20	2.3	15	22	25	24515	560	23	22	80
	34	2.3	14	22	25	24390	575	27	17	78
	70	2.5	17	24	22	27250	618	28	18	81
53	35	1.8	17	24	29	25115	808	27	13	66
	75	1.5	16	23	22	20790	697	22	9.5	51
	130	1.6	15	22	18	21140	754	23	15	57
54	27	1.9	14	47	21	28995	527	34	6.5	53
	55	1.3	12	25	19	19795	544	25	7.5	47

Tabla 4a. Concentración de metales pesados en forma disponible en perfiles del suelo de la zona de estudio (mg/kg).

Sitio	Prof (cm)	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
3	45	0.30	0.48	0.58	0.44	9.08	3.98	1.14	1.66	0.32
	70	0.30	0.48	0.58	0.54	4.28	1.12	1.14	1.62	0.34
35	30	0.12	1.50	0.54	1.58	28.02	60.68	1.66	1.30	0.98
	70	0.28	0.86	0.54	1.32	34.16	34.16	1.62	0.84	0.38
	130	0.28	0.90	0.54	1.62	25.96	38.18	1.70	0.94	0.46
	190	0.28	1.38	0.54	1.44	30.46	69.02	1.94	0.94	0.76
36	65	0.14	0.94	0.56	1.66	34.38	26.68	1.38	1.40	0.36
	150	0.10	0.92	0.50	0.94	24.36	28.18	1.10	1.24	0.40
37	30	0.24	0.98	0.60	1.20	12.56	32.76	1.60	1.44	0.54
	60	0.42	0.84	0.62	1.16	10.36	18.52	1.58	1.40	0.36
41	30	0.38	1.26	0.62	2.22	9.68	44.56	2.06	1.24	0.36
	60	0.38	1.16	0.62	1.88	7.30	36.40	1.76	1.16	0.36
	95	0.36	1.16	0.62	1.80	8.96	33.34	1.74	1.20	0.34
42	50	0.16	1.26	0.66	1.40	55.82	64.64	2.32	1.66	3.46
	80	0.16	1.0	0.64	1.38	40.14	44.68	2.14	1.42	1.48
	130	0.14	0.94	0.62	2.08	15.98	9.84	1.66	1.56	0.36
	190	0.14	0.86	0.58	1.36	43.10	31.22	1.46	0.94	0.44
44	08	0.22	1.38	0.80	2.96	29.26	29.76	1.94	2.86	3.96
	55	0.14	0.84	0.70	1.98	14.48	23.8	1.76	1.78	0.48
	85	0.12	0.78	0.58	1.50	17.04	23.88	1.24	1.50	0.60
	125	0.12	0.80	0.58	1.92	11.14	21.74	1.38	1.72	0.36
45	30	0.62	2.10	1.10	1.62	6.22	35.70	3.20	2.70	0.50
	65	0.36	1.08	0.70	1.42	9.16	27.24	2.30	1.48	0.28
47	50	0.14	0.76	0.60	1.74	12.88	23.88	1.76	2.14	0.40
	150	0.14	0.92	0.70	1.46	6.54	10.44	1.50	2.66	0.36
	230	0.10	0.72	0.60	1.60	11.04	10.28	1.40	2.08	0.32
49	32	0.1	0.4	0.5	1.2	42.1	23.9	1.5	1.7	0.5
	58	0.1	0.4	0.6	1.4	40.4	20.4	1.5	1.7	0.4
	85	0.1	0.4	0.6	1.4	36.7	31.0	1.5	1.5	0.4
52	20	0.1	1.0	0.6	2.5	10.1	55.9	1.8	2.4	0.9
	34	0.1	0.6	0.6	2.6	10.2	44.5	1.6	2.6	0.6
	70	0.1	0.3	0.6	1.9	8.8	25.0	1.4	2.1	0.4
53	35	0.1	0.5	0.7	1.8	21.2	34.6	1.3	2.1	0.4
	75	0.1	1.0	0.7	1.7	6.3	26.2	1.5	1.9	0.5
	130	0.1	1.0	0.6	1.6	3.0	25.0	1.6	1.8	0.4
54	27	0.1	1.0	0.6	1.4	13.4	33.5	1.4	1.4	0.5
	55	0.1	1.0	0.6	2.0	6.0	27.8	1.5	1.7	0.5

pardos más oscuros. Los colores claros predominantes, se deben al contenido tan bajo de material orgánico presente en estos sedimentos.

6.5.2 pH

Los valores de pH no presentan fuertes variaciones y se encuentran en un rango de 6.6 a 8.0 (Tabla 5) Estadísticamente, el valor promedio de pH en los sedimentos de arroyos de la sierra (7.33) fue similar al valor promedio de los sedimentos del Río Silao (7.77) en la planicie ($t_{cal}= 0.20$, $t_{0.05}$, $gl_{25}= 1.70$). Sin embargo, los sedimentos del Río presentaron un valor de pH alto, probablemente, porque en éste se vierten muchos desechos, domésticos e industriales (Gráfica 5).

En los sitios No 44, 49 y 53, se presentaron los valores más altos de pH en los sedimentos: 7.6, 7.6 y 8.0, respectivamente, lo cual puede deberse a que estos sitios están ubicados cerca de la Ciudad de Silao, y los desechos de la Ciudad están influyendo en el incremento de esta característica. En los arroyos ubicados en la sierra, el valor de pH no es alto, excepto en los sitios No 6 y 22 que presentan valores de 7.8 esto se atribuye al arrastre de partículas y sales acumuladas en estos lugares. Esta propiedad presentó una débil asociación con el contenido de carbonatos ($r= 0.38$, $P< 0.05$); sin embargo, en los sitios 6 y 22 influyó en los valores de pH.

6.5.3 Materia Orgánica

Los contenidos de materia orgánica en sedimentos se encuentran en valores de 0.03 a 2.81 % (Tabla 5). Los cuales son menores a los que se observaron en los suelos, debido probablemente a que no hay aporte de material orgánico de vegetación natural. Al comparar los valores promedio del contenido de materia orgánica de los sedimentos del Río Silao (0.48%), y los de arroyos de la sierra (0.70%) se encontró que, estadísticamente, no hay diferencia entre estos 2 valores. El sitio No 5 presenta el mayor contenido orgánico en sus sedimentos, debido a que se encuentra en la pendiente alta de la sierra y la vegetación que se encuentra ahí le proporciona el material orgánico a este lugar, además, es un sitio que se ubica muy cerca del poblado de Vaquerías y puede estar recibiendo los desechos de este pequeño poblado (Gráfica 5).

Los sitios ubicados a lo largo del Río Silao presentaron bajos contenidos de materia orgánica, por ejemplo el sitio No 44 (0.37%) y 49 (0.53%); estos valores pueden deberse a la excesiva erosión hídrica que se presenta a lo largo del Río Silao, lo cual origina gran pérdida del material mineral fino que impide la retención del material orgánico incorporado que ocasiona, por lo tanto, texturas arenosas en los sedimentos.

El contenido de materia orgánica en los sedimentos mostró tener una asociación altamente significativa con la capacidad de intercambio catiónico ($r= 0.59$, $P< 0.01$) y con el porcentaje de limos ($r= 0.67$, $P< 0.01$).

6.5.4 Capacidad de Intercambio Catiónico

Los valores de la capacidad de intercambio catiónico en los sedimentos oscilan entre 1.6 y 20.3 cmol(+)Kg (Tabla 5). Los valores de esta propiedad obtenidos en los sedimentos, son más bajos que en los suelos, lo cual se debe al escaso contenido de material mineral fino y material orgánico en los sedimentos. El análisis de t para comparar el valor promedio de la capacidad de intercambio observada en los arroyos de la sierra (5.17%) con el valor promedio de esta característica en los sedimentos del Río Silao en la planicie (8.73%), indicó que hay diferencia significativa entre estos 2 valores ($t_{cal}= 2.65$, $t_{0.05}$, $gl_{25}= 1.70$) (Gráfica 5).

La capacidad de intercambio catiónico en este tipo de material también está altamente relacionada con el porcentaje de arcillas y limos, obteniendo índices de correlación de $r= 0.72$, $P < 0.01$ y $r= 0.74$, $P < 0.01$ respectivamente, es decir, que esta capacidad de intercambio dependerá, principalmente, del contenido de estas 2 fracciones minerales de los sedimentos. Sin embargo, también el contenido de materia orgánica ($r= 0.59$, $P < 0.01$) y el contenido de $CaCO_3$ ($r= 0.57$, $P < 0.01$) influyen en esta característica, aunque en menor medida en estos suelos.

6.5.5 Carbonatos alcalino-térreos

El contenido de carbonatos de calcio y magnesio presentes en estos sedimentos es más bajo con respecto al contenido observado en los suelos, y se encuentra en valores de 0.91 a 4.48 %. Estadísticamente, el índice promedio de carbonatos en los arroyos de la sierra (2.05%) y el de los sitios del Río (2.64%), no presentaron diferencias significativas ($t_{cal}= 0.42$, $t_{0.05}$, $gl_{25}=1.70$) (Gráfica 5). El contenido de carbonatos se relaciona con otras propiedades de estos sedimentos, con el pH ($r= 0.38$, $P < 0.05$), el porcentaje de arcillas ($r= 0.40$, $P < 0.05$), y el porcentaje de limos ($r= 0.46$, $P < 0.05$) lo cual indica que, probablemente, se puedan estar cuantificando los carbonatos como partículas de arcilla o limo en el análisis granulométrico. Por otra parte, también se presentó una relación altamente significativa entre el contenido de carbonatos y la capacidad de intercambio catiónico ($r= 0.57$, $P < 0.01$), lo que indica una posible intervención de los carbonatos alcalino-térreos en el proceso de intercambio catiónico.

6.5.6 Textura

La clasificación textural en sedimentos, al igual que en suelos, varía, pues se encontraron: arenas, arenas migajosas, migajones arenosos, un migajón arcillo arenoso, y francos (Tabla 5). Los contenidos de arcillas se encuentran en un rango que va de 1.8 a 30.9%. Se observaron diferencias significativas entre el contenido promedio de arcillas en los sedimentos de los arroyos en la parte de sierra (6.17%) y el contenido promedio de arcilla en los sedimentos del Río Silao en la planicie (14.47%) ($t_{cal}= 6.38$, $t_{0.05}$, $gl_{25}= 1.70$), lo cual indica un arrastre significativo de material fino por erosión hídrica desde la zona de sierra hacia la planicie (Gráfica 5). Sin embargo, en la zona de la sierra algunos sitios presentaron contenidos altos de arcilla, como el sitio No 1 (14.5%) y 5 (16.3%), los cuales se ubican en la parte alta, pero con cierta pendiente que permite una pequeña acumulación de este material fino en estos sitios. El contenido de arcillas presentó una correlación significativa con el contenido de limos ($r= 0.40$, $P < 0.05$), pues el limo es un

material que también es transportado por erosión junto con el material arcilloso; y con el contenido de CaCO_3 ($r= 0.42$, $P< 0.05$), que pudiera indicar que los carbonatos alcalino-térreos se cuantificaron como material arcilloso en el análisis de la textura del sedimento. También, hay una relación altamente significativa entre el contenido de arcillas y la capacidad de intercambio catiónico ($r= 0.72$, $P< 0.01$), lo que indica la fracción principal donde se realiza este proceso de intercambio.

El contenido de limos en los sedimentos se encontró en un rango que va de 1.8% a 36.3% y, al igual que las arcillas, mostraron diferencias significativas los contenidos promedio entre ambas zonas de estudio: arroyos de la sierra (10.69%) y el sedimento del Río Silao (13.44%) ($t_{\text{cal}}= 3.71$, $t_{0.05}$, $gI_{25}= 1.70$) (Gráfica 5). Los sitios No 1 (16.3%) y 5 (31%) son los sitios de la sierra en pendientes altas que también presentaron alto contenido de limos, por la misma razón por la que presentaron alto contenido de arcillas. El contenido de limo mostró estar asociado muy significativamente con el contenido de materia orgánica ($r= 0.67$, $P< 0.01$), pues estos 2 materiales pudieron haber formado complejos muy estables en los sedimentos analizados; también, se encontró una asociación altamente significativa entre la fracción limosa y la capacidad de intercambio catiónico ($r= 0.73$, $P< 0.01$), y solo significativa con el contenido de arcillas ($r= 0.40$, $P<0.05$), pues los limos y arcillas están interviniendo en el proceso de intercambio catiónico; también, se presentó la relación entre el limo y el contenido de CaCO_3 ($r= 0.46$, $P< 0.05$).

6.6 Distribución de metales pesados en los sedimentos

6.6.1 Cadmio

Los sedimentos de la subcuenca del Río Silao presentaron concentraciones de cadmio total en un rango de 0.70 a 2.60 mg/Kg (Tabla 6). Si comparamos este rango con el reportado por Alloway (op cit.) para suelos agrícolas (0.01 - 2.4 mg/Kg), se observa que solo algunos de los sedimentos están ligeramente arriba de este rango normal. Sin embargo, se debe considerar el tipo de material que se está analizando, pues los sedimentos son indicativos de la calidad del agua que ha corrido por esos ríos o arroyos.

En general, el valor promedio de la concentración de este elemento en el sedimento de los arroyos de la sierra (1.18 mg/Kg) no presenta diferencia significativa con el valor promedio obtenido en los sedimentos del Río Silao en la parte de planicie (1.58 mg/Kg) ($t_{\text{cal}}= 0.28$, $t_{0.05}$, $gI_{25}=1.70$), aunque algunos sedimentos obtenidos a lo largo del Río Silao, sitios No 44 (1.50 mg/Kg), 26, 29 y 49 (2.60 mg/Kg), presentaron altos contenidos de cadmio, pues se encuentran ubicados en la parte más próxima a la Ciudad de Silao, por lo que, los desechos domésticos e industriales, entre ellos los metales pesados, tienden a ser adsorbidos por el material suspendido o son precipitados encontrándose, principalmente, en sedimentos (Galeano, 1990). Los sedimentos de los arroyos aledaños y afluentes del Río Silao presentaron un contenido bajo de cadmio, con excepción del sitio No 28 (2.60 mg/Kg) con una concentración alta de este elemento pues, por estar ubicado en la parte de la ladera, puede estar recibiendo cierto aporte de las partes más altas de la sierra (Gráfica 6).

Al realizar el análisis de correlación múltiple se encontró que la propiedad química que intervino, principalmente, en la adsorción de cadmio por los sedimentos fue el pH ($r=$

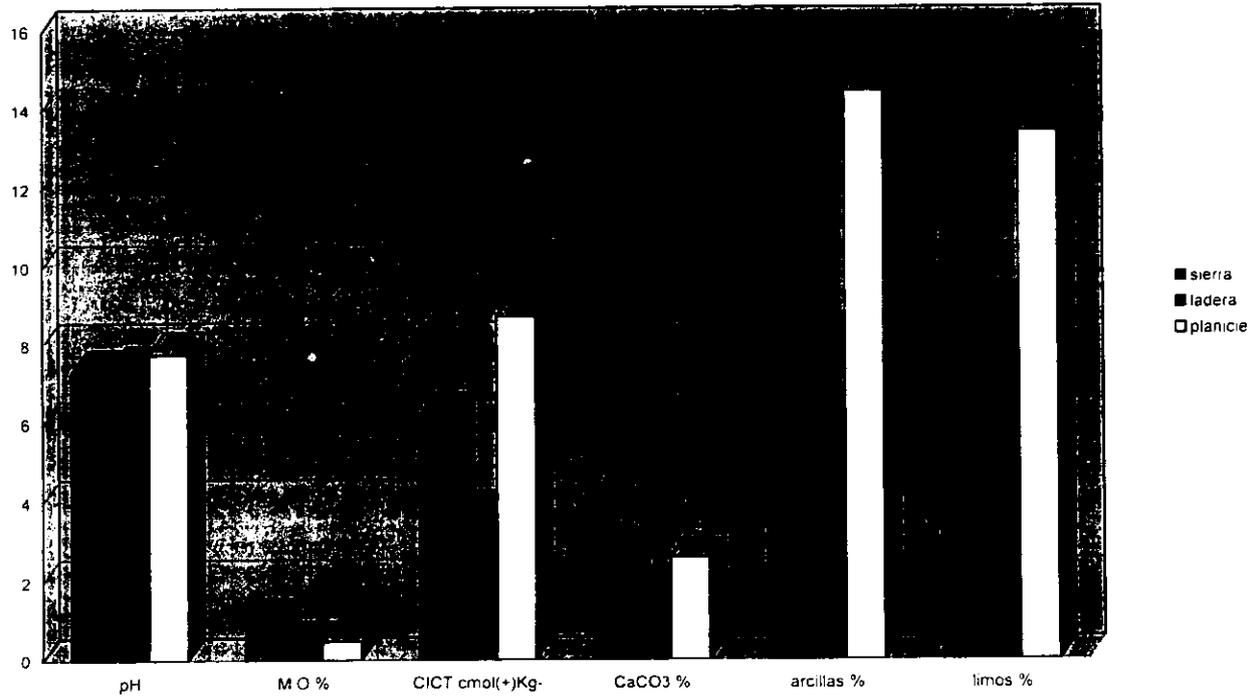
Tabla 5. Propiedades físicas y químicas de los sedimentos.

Sitio	pH suelo:H ₂ O 1:2.5	M.O (%)	CICT cmol(+)/kg	CaCO ₃ (%)	arcillas (%)	limos (%)	Clasif. Textural	Color seco	Color húmedo
1	7.2	0.80	5.7	2.48	14.5	16.3	migajón arenoso	blanco	pardo
5	7.6	2.81	19.5	2.91	16.3	30.9	migajón arenoso	pardo grisáceo	pardo grisáceo
6	7.8	0.18	2.5	1.48	1.8	5.4	arena	pardo claro	pardo claro
8	7.3	0.14	2.4	1.19	1.8	3.6	arena	pardo claro	pardo amarillento
10	7.0	0.66	1.6	1.32	3.6	10.9	arena	gris claro	pardo grisáceo
10 ^a	7.1	0.56	1.6	1.20	3.6	10.9	arena	pardo claro	pardoamarillento
13	6.6	1.32	5.7	2.63	5.4	13.7	arena migajosa	pardoamarillento	pardo oscuro
14	7.7	1.32	8.9	2.73	5.4	14.5	arena migajosa	pardo	pardo grisáceo
15	7.1	1.25	8.1	2.61	16.3	1.8	migajón arenoso	pardoamarillento	pardoamarillento
17	7.5	0.23	1.6	1.50	1.8	7.2	arena	pardo claro	pardo oscuro
18	7.1	0.89	5.7	2.01	5.4	13.7	arena migajosa	pardo	pardo oscuro
19	7.2	0.57	5.7	2.41	7.2	14.5	arena migajosa	pardo claro	pardoamarillento
22	7.8	0.03	2.82	1.73	2.0	4.0	arena migajosa	pardo claro	pardo

Tabla 5. Continuación

Sitio	pH suelo H ₂ O 1:2.5	M.O (%)	ClCT cmol(+)/kg	CaCO ₃ (%)	arcillas (%)	limos (%)	Clasif. Textural	Color seco	Color húmedo
23	7.7	0.14	2.4	2.07	4.0	2.0	arena migajosa	pardo claro	pardoamarillento
24	7.2	1.32	2.4	1.51	9.0	16.3	arena migajosa	pardoamarillento	pardo grisáceo
24*	6.9	0.09	5.7	1.24	5.4	5.4	arena	gris	gris oscuro
26	7.9	0.09	3.2	2.96	10.9	9.0	arena migajosa	pardo claro	pardoamarillento
28	7.7	0.09	4.9	4.47	3.6	14.5	arena migajosa	pardo claro	pardo oscuro
29	7.6	0.73	2.4	0.91	5.4	12.7	arena migajosa	pardo claro	pardo oscuro
30	7.8	1.03	19.3	4.48	21.8	36.3	franco	pardo grisáceo	pardo grisáceo
30*	7.7	1.17	6.5	1.83	9.0	20.0	migajón arenoso	pardo claro	pardo oscuro
33	7.5	0.32	5.7	1.47	3.6	9.7	arena	pardoamarillento	pardoamarillento
35	7.9	0.14	8.1	2.40	14.6	9.1	migajón arenoso	pardo claro	pardoamarillento
44	7.6	0.38	20.3	2.25	30.9	9.1	migajón arcillo- arenoso	pardo claro	pardoamarillento
49	7.6	0.53	5.7	2.19	14.5	9.0	migajón arenoso	pardoamarillento	pardo oscuro
53	8.0	0.22	8.1	3.25	14.5	10.9	migajón arenoso	pardoamarillento	pardoamarillento
53*	7.9	0.07	4.9	3.52	9.0	5.4	arena migajosa	pardoamarillento	pardoamarillento

GRÁFICA 5. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS PROMEDIO EN SEDIMENTOS



0.39, $P < 0.05$). Este metal presentó, también, una asociación altamente significativa con algunos metales como: Cr ($r = 0.50$, $P < 0.01$) y Co ($r = 0.55$, $P < 0.01$); con algunos otros presentó una asociación un poco menos fuerte: Fe ($r = 0.45$, $P < 0.05$), Cu ($r = 0.42$, $P < 0.05$), Mn ($r = 0.39$, $P < 0.05$) y Ni ($r = 0.48$, $P < 0.05$), lo que puede indicar un patrón de comportamiento muy similar entre todos estos elementos.

En la Tabla 6 se observan las concentraciones de los metales pesados en forma disponible en sedimentos. El contenido de cadmio disponible se encuentra en un rango que va de 0.08 a 0.70 mg/Kg, comparando este rango con el reportado por Ponce (1988) en un estudio realizado en sedimentos de una laguna de Campeche, México, en donde las concentraciones van de 0 a 2.12 mg/Kg, se pueden considerar bajas las concentraciones de Cd disponible en los sedimentos de los cauces de la subcuenca del Río Silao.

El grado de disponibilidad en los sedimentos del Río presenta un valor promedio de 12.43%, en comparación con el valor promedio de disponibilidad en los sedimentos de los arroyos que es de 11.22%, valores que son ligeramente menores a los obtenidos en los suelos de esta Subcuenca.

En este trabajo el cadmio disponible presentó una relación significativa con el contenido de arcillas ($r = -0.49$, $P < 0.05$) indicando que esta fracción mineral retiene a este elemento en su superficie, haciéndolo menos disponible si aumenta el contenido de arcilla en los sedimentos.

6.6.2 Cobalto

Los sedimentos presentaron concentraciones de cobalto total bajas en comparación con los suelos, no rebasando el rango normal reportado por Alloway (op cit.); los valores promedio obtenidos en los sedimentos se encuentran en un rango de 3.5 a 28.0 mg/Kg (Tabla 6). El promedio de cobalto de los arroyos de la sierra es de 12.41 mg/Kg y el promedio en los sedimentos del Río Silao es de 15.0 mg/Kg, los cuales no presentan diferencia significativa ($t_{cal} = 1.60$, $t_{0.05}$, $gl_{25} = 1.70$). Los sitios que presentaron mayor contenido de cobalto a lo largo del Río Silao son, al igual que con el cadmio, el No 44 (18.5 mg/Kg) y 49 (20.5 mg/Kg). También, se encontraron sitios ubicados en la sierra que presentaron concentraciones altas de este elemento, el No 28 y 33 con 28.0 mg/Kg, ambos sitios, se encuentran en las partes bajas de la sierra, en ladera, por lo que pueden estar recibiendo aportes de las partes altas, incluso, de varios elementos (Gráfica 6).

El contenido de carbonatos presentó una relación significativa con el contenido de cobalto en los sedimentos ($r = 0.47$, $P < 0.05$), que indicaría una posible adsorción de este metal en los carbonatos. Los metales asociados fuertemente con el cobalto fueron: Fe ($r = 0.83$, $P < 0.01$), Cu ($r = 0.75$, $P < 0.01$), Mn ($r = 0.64$, $P < 0.01$), Cr ($r = 0.90$, $P < 0.01$) y Ni ($r = 0.92$, $P < 0.01$) siendo la distribución de todos ellos, en los sedimentos de la subcuenca, muy similar.

El contenido de cobalto disponible se encuentra en un rango que va de 0.4 a 1.1 mg/Kg, valores bajos si se comparan con los reportados por Ponce (op cit.), que se encuentran en un rango de 7.03 a 21.18 mg/Kg.

El Co en los sedimentos de los arroyos presenta un grado de disponibilidad alto (4.16%) en comparación con los sedimentos del Río (1.97%) quizás, al contenido alto de

carbonatos y partículas finas (arcillas y limos) presentes en los sedimentos del río, ocasiona la retención de este elemento, haciendo que su disponibilidad disminuya. El contenido de carbonatos presentó una relación negativa y significativa en la disponibilidad de cobalto ($r = -0.37$, $P < 0.05$), indicando que cuando esta propiedad este en mayor cantidad, la disponibilidad de cobalto será menor. Este elemento presentó una relación con otros elementos: Cr ($r = 0.89$, $P < 0.01$), Fe ($r = 0.48$, $P < 0.05$), Mn ($r = 0.76$, $P < 0.01$), Ni ($r = 0.66$, $P < 0.01$) y Pb ($r = 0.49$, $P < 0.01$).

6.6.3 Cromo

Los sedimentos presentaron concentraciones de cromo total en un rango que fluctúa de 3.5 a 101.0 mg/Kg (Tabla 6), concentraciones que están dentro del rango normal reportado por Alloway (op cit.) para suelos agrícolas. Al comparar el contenido promedio de cromo en los sedimentos de los arroyos (26.84 mg/Kg) con el contenido promedio en los sedimentos del Río Silao en la planicie (28.8 mg/Kg), se encontró que ambos valores no son diferentes significativamente ($t_{cal} = 1.05$, $t_{0.05}$, $gl_{25} = 1.70$) (Gráfica 6). Como en el caso anterior, los sitios No 28 (82.5 mg/Kg) y 33 (101 mg/Kg) ubicados en la sierra, presentaron las concentraciones más altas de este elemento. En la parte de la planicie, nuevamente, los sitios No 49 (53.5 mg/Kg) y 44 (30 mg/Kg) son los que presentaron contenidos altos de cromo, por encontrarse ubicados muy próximos a la Ciudad de Silao.

El contenido de carbonatos ($r = 0.42$, $P < 0.05$) es una de las propiedades que tuvo una mayor influencia en la acumulación de cromo en los sedimentos de la subcuenca. El cromo también presentó una asociación significativa con Mn ($r = 0.44$, $P < 0.05$) y una altamente significativa con Ni ($r = 0.92$, $P < 0.01$).

El cromo disponible se encontró en concentraciones que van de 0.52 a 0.74 mg/Kg, considerándose muy bajas. En los sedimentos del Río se observó un valor promedio de 1.36% de disponibilidad del Cr, y en los arroyos de la sierra fue de 3.89%, valores que fueron un poco más altos a los observados en los suelos superficiales de la zona de estudio.

La capacidad de intercambio catiónico ($r = -0.42$, $P < 0.05$) y el contenido de carbonatos ($r = -0.49$, $P < 0.05$) influyeron en forma significativa en la disponibilidad de este metal, es decir, el contenido de carbonatos y las fracciones orgánicas y minerales encargadas de realizar el proceso de intercambio catiónico en estos sedimentos van a retener al cromo, disminuyendo su disponibilidad. El Cu ($r = 0.40$, $P < 0.05$), Fe ($r = 0.49$, $P < 0.01$), Mn ($r = 0.51$, $P < 0.01$), Ni ($r = 0.86$, $P < 0.01$) y Pb ($r = 0.57$, $P < 0.01$), presentaron una relación con el Cr en forma disponible.

6.6.4 Cobre

En los sedimentos las concentraciones de cobre total fluctuaron en un rango de 4.0 a 56.5 mg/Kg (Tabla 6). Habiendo diferencia estadística entre el valor promedio de las concentraciones de este elemento en la sierra con el de la planicie, los cuales son 20.66 mg/Kg y 26.55 mg/Kg, respectivamente, ($t_{cal} = 3.59$, $t_{0.05}$, $gl_{25} = 1.70$). Sin embargo, los sitios 33 (56.5 mg/Kg) y 28 (47.5 mg/Kg) localizados en la sierra, presentaron las concentraciones más altas de este elemento (Gráfica 6).

Los metales que presentaron una relación altamente significativa con el cobre en forma total son: Fe ($r= 0.75$, $P< 0.01$), Mn ($r= 0.70$, $P< 0.01$), Cr ($r= 0.68$, $P< 0.01$) y Ni ($r= 0.73$, $P< 0.01$).

El cobre disponible en estos sedimentos se encontró en un rango que va de 0.40 a 2.30 mg/Kg, contenidos bajos al compararse con los reportados por Ponce (op cit.) los cuales fluctuaron de 1.61 a 15.07 mg/Kg. En los sedimentos de los arroyos en la parte de sierra el grado de disponibilidad del Cu fue de 2.8%, y en los del Río en la planicie de 2.3%. Ninguna propiedad de estos sedimentos mostró tener alguna influencia, aparente pero significativa, con la disponibilidad de este elemento en los sedimentos.

6.6.5 Hierro

Los valores de hierro total en los sedimentos variaron de 12,295 a 44,170 mg/Kg (Tabla 6), rango que se encuentra por debajo del reportado por Ortega (op cit.) el cual va de 50,000 a 300,000 mg/Kg. Los sitios No 28 (44,170 mg/Kg) y 33 (36,860 mg/Kg), ubicados en la parte de ladera, contienen las concentraciones más altas de Fe total (Gráfica 7).

El contenido de carbonatos mostró estar asociado significativamente con el contenido de Fe ($r= 0.40$, $P< 0.05$) en estos sedimentos. El Mn ($r= 0.66$, $P< 0.01$), Cr ($r= 0.80$, $P< 0.01$), y Ni ($r= 0.85$, $P< 0.01$), son los metales que presentaron una relación altamente significativa con el hierro.

El contenido de hierro disponible en los sedimentos estuvo en un rango de 10.66 a 52.0 mg/Kg, considerado muy bajo, ya que la gran cantidad de partículas gruesas presentes en los sedimentos no retienen las formas solubles de este elemento. El grado de disponibilidad del Fe en los sedimentos de los arroyos es de 0.06%, y en los sedimentos del Río Silao es de 0.04%, valores también muy bajos y muy similares a los obtenidos en los suelos. El contenido de carbonatos presentó una relación negativa y significativa ($r= -0.41$, $P< 0.05$) con el contenido de Fe disponible, indicando que los carbonatos están interviniendo en la retención de este metal en forma disponible. Este elemento presentó una relación altamente significativa con el Mn disponible ($r= 0.52$, $P< 0.01$).

6.6.6 Manganeso

Los contenidos totales de manganeso total están en un rango de 132 a 958 mg/Kg; el valor promedio de la concentración en los arroyos de la sierra es de 409.4 mg/Kg, y el de la planicie es de 568.55 mg/Kg. Los sedimentos de los sitios que se ubican en la sierra y que presentaron el mayor contenido de este metal son el No 19 y 24, con 958 y 635 mg/Kg, respectivamente, son sitios que se encuentran en la parte baja de la sierra donde inicia, propiamente, la zona de planicie, por lo que se puede suponer que estos sitios están recibiendo aportes de materiales, sólidos y en solución, de las partes altas de la sierra (Gráfica 8).

En la zona de planicie, los sedimentos de los sitios que presentaron mayor contenido de Mn total son el No 35 (671.5 mg/Kg) que recibe grandes caudales de agua con sedimento que conllevan elementos pesados provenientes de la sierra; el No 44 (808

mg/Kg) y 49 (633.0 mg/Kg), que están ubicados en las proximidades de la Ciudad de Silao, la cual contribuye con sus desechos, domésticos e industriales, al aumento de metales en esta zona. El manganeso mostró tener una asociación altamente significativa con el Ni ($r = 0.64$, $P < 0.01$).

El manganeso disponible estuvo en un rango que va de 16.14 a 55.96 mg/Kg. El valor promedio de disponibilidad de Mn en los arroyos de la sierra es de 4.42%, y en los sedimentos del Río es de 2.30%, valores muy similares a los observados en los suelos de esta subcuenca. Ninguna propiedad de los sedimentos interviene, aparentemente, en la disponibilidad del manganeso para las plantas.

6.6.7 Níquel

Las concentraciones de níquel total obtenidas en los sedimentos de la subcuenca van de 2.0 a 58.5 mg/Kg, concentraciones bastante bajas si las comparamos con el rango reportado por Alloway (op cit.) para suelos normales agrícolas (2 - 750 mg/Kg).

Los valores promedio de las concentraciones de níquel en los sedimentos de los arroyos de la sierra es de 25.25 mg/Kg, y en la planicie es de 26.83 mg/Kg, los cuales no presentaron diferencia significativa ($t_{\text{cal}} = 0.89$, $t_{0.05}$, $gl_{25} = 1.70$). Al igual que con los elementos anteriores, los sitios No 28 (50.0 mg/Kg) y 33 (58.5 mg/Kg) son los que presentan los más altos contenidos (Gráfica 6). Este elemento presentó una relación significativa con el contenido de carbonatos ($r = 0.48$, $P < 0.05$) y, como ya se mencionó, presentó una relación altamente significativa con Mn ($r = 0.64$, $P < 0.01$).

El contenido de níquel disponible en estos sedimentos se encuentra en un rango que va de 0.9 a 2.1 mg/Kg. El valor promedio de disponibilidad de Ni en los arroyos es de 13.29% y el de el Río es de 4.79%, valores más altos en comparación con los observados en los suelos de esta zona de estudio.

La disponibilidad de níquel en estos sedimentos está influenciada por el contenido de carbonatos ($r = -0.48$, $P < 0.05$), es decir, que la pequeña fracción de carbonatos en estos sedimentos están reteniendo con relativa fuerza al elemento, disminuyendo así su disponibilidad para la planta y no causándole daño a ésta. El plomo y el níquel presentaron una relación altamente significativa ($r = 0.50$, $P < 0.01$) entre ellos.

6.6.8 Plomo

Los contenidos totales de plomo se encontraron en un rango de 2.0 a 21.5 mg/Kg (Tabla 6), concentraciones muy por debajo del rango reportado por Alloway (op cit.). Hubo diferencias significativas entre la concentración promedio de plomo en sedimentos de los arroyos en la parte de la sierra (7.91 mg/Kg) y la concentración promedio en los sedimentos del Río Silao en la planicie (12.55 mg/Kg) ($t_{\text{cal}} = 3.54$, $t_{0.05}$, $gl_{25} = 1.70$) (Gráfica 6). Se observó que los sitios con mayor contenido de plomo son el No 53 (20.0 mg/Kg) y 44 (21.5 mg/Kg), plomo que se ha transportado desde las proximidades de la Ciudad de Silao (sitio No 44) hasta el sitio 53. Silao cuenta con una fábrica de tejas, losetas y vajillas, y una fábrica de ladrillos, que pueden estar contribuyendo con este metal

(CANACINTRA, op cit.), aunque se han reportado sedimentos con más de 100 mg/Kg de plomo en áreas contaminadas (Hutchinson, 1987).

Los sedimentos de los arroyos de la sierra que presentaron contenidos elevados de plomo son: 5 (17.0 mg/Kg) y 10 (16.0 mg/Kg). El contenido de plomo estuvo correlacionado con el contenido de limos ($r= 0.45$, $P< 0.05$); también, con la capacidad de intercambio catiónico ($r= 0.50$, $P< 0.01$) y con el porcentaje de arcillas ($r= 0.55$, $P< 0.01$), lo cual indica una adsorción de este metal en el complejo de cambio y en la fracción limosa. Este metal sólo presentó una asociación altamente significativa con el Zn ($r= 0.65$, $P< 0.01$).

El contenido de plomo disponible en estos sedimentos se encuentra en un rango que va de 0.9 a 2.3 mg/Kg. Los sitios de los arroyos presentaron un grado de disponibilidad de Pb con un valor promedio de 22.98%, y los sitios del Río presentaron un valor promedio de 7.70%, esta diferencia se debe, probablemente, a que los sedimentos del río presentan un mayor contenido de carbonatos y de partículas finas (arcillas y limos) que retienen a este elemento en su superficie. Estadísticamente, ninguna propiedad de los sedimentos interviene en la disponibilidad de este elemento para las plantas.

6.6.9 Zinc

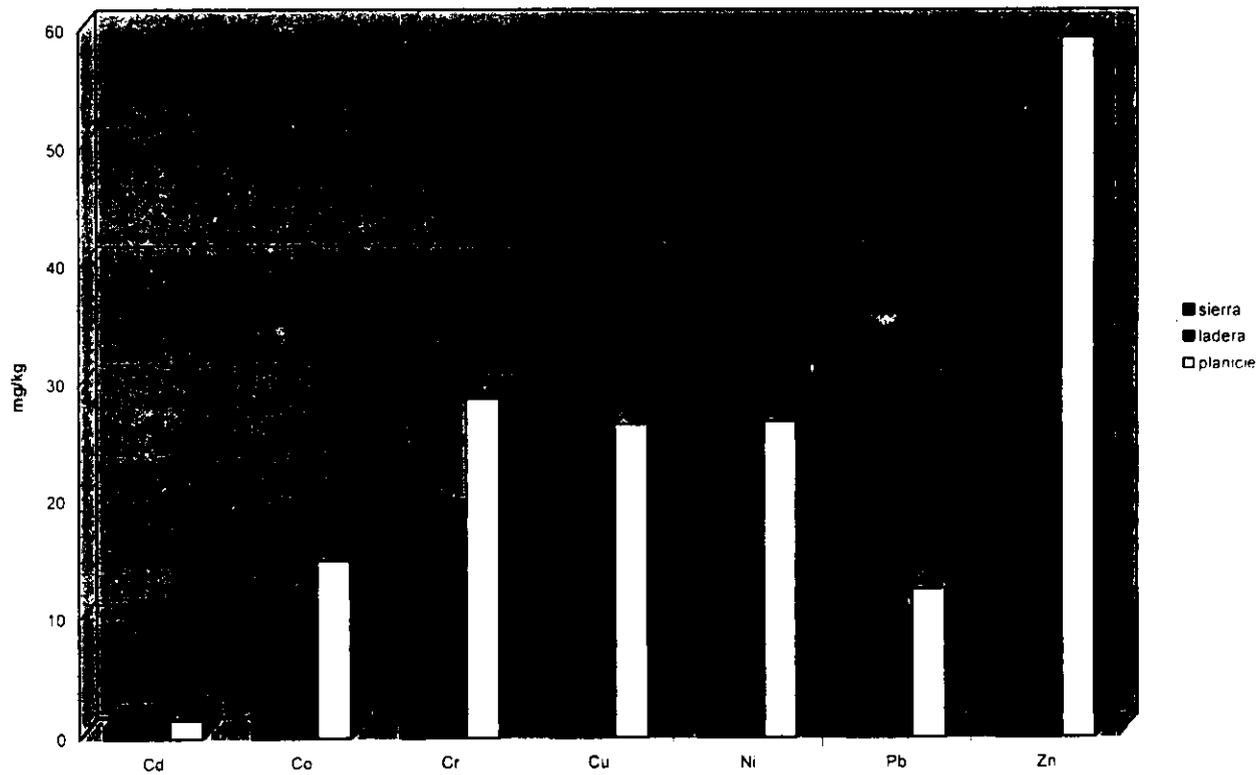
Las concentraciones de zinc en los sedimentos son bajas y están en un rango de 39 a 79 mg/Kg, niveles muy por debajo de los reportados por Alloway (op cit.). También, con el zinc se presentaron diferencias significativas entre el valor promedio de la concentración en los arroyos de la sierra (52.86 mg/Kg) y el contenido promedio en los sedimentos del Río en la planicie (59.55 mg/Kg) ($t_{cal}= 7.11$, $t_{0.05}$, $gl_{25}= 1.70$); siendo los sitios con el más alto contenido de este metal, y de la mayoría de los ellos: el No 44 (79.0 mg/Kg) y 49 (66.0 mg/Kg) ubicados en la zona de planicie (Gráfica 6). Las propiedades que presentaron una relación altamente significativa con el zinc son: capacidad de intercambio catiónico ($r= 0.52$, $P< 0.01$), contenido de arcillas ($r= 0.55$, $P< 0.01$), y contenido de limos ($r= 0.40$, $P< 0.05$), pues este elemento también parece adsorberse en el complejo de cambio y en los limos de estos sedimentos.

El contenido de zinc disponible se encuentra en un rango que va de 0.40 a 2.22 mg/Kg. Los sitios del Río Silao presentan un grado de disponibilidad con un valor promedio de 0.81% y los sitios de la sierra presentan un valor promedio de 1.14%, debido a las mismas características mencionadas para el caso del Pb. La disponibilidad de este elemento no parece estar relacionada con ninguna propiedad de estos sedimentos.

Tabla 6. Concentración de metales pesados en forma total y disponible en muestras de sedimentos del Río Silao y arroyos atadaños (mg/Kg)

Sito	Cd t	Cd	Co t	Co	Cr t	Cr	Cu t	Cu	Fe t	Fe	Mn t	Mn	Ni t	Ni	Pb t	Pb	Zn t	Zn
1	1.3	0.1	6.0	1.0	4.5	0.5	7.0	0.9	12295	12.6	132.0	25.0	7.5	1.2	5.50	1.8	44.5	0.5
5	1.5	0.1	15.5	0.8	36.0	0.6	11.5	0.7	25875	28.3	417.0	42.6	28.0	1.7	17.0	1.7	76.5	1.3
6	0.9	0.3	6.5	0.7	6.0	0.5	7.0	0.4	16855	25.0	304.5	26.3	4.0	1.0	1.5	1.3	46.0	0.4
8	0.9	0.1	3.5	0.6	3.5	0.5	4.0	0.4	13830	28.4	161.0	21.0	2.0	1.0	2.0	1.4	47.0	0.7
10	0.7	0.3	7.5	0.6	6.0	0.5	12.5	0.6	19725	24.5	318.0	16.1	3.5	0.9	16.0	1.6	60.0	0.6
10*	0.9	0.3	7.5	0.6	6.5	0.5	22.0	0.5	20110	19.0	309.5	18.3	3.5	1.2	5.0	1.4	52.0	0.9
13	0.8	0.3	14.0	0.7	37.0	0.6	10.5	0.6	23470	19.0	256.0	18.3	29.0	1.2	7.5	1.0	39.0	0.9
14	1.1	0.4	15.0	0.8	29.5	0.6	11.5	0.6	28240	35.1	325.5	35.4	25.0	1.5	8.0	1.1	52.5	0.6
15	0.7	0.1	12.5	0.7	42.5	0.5	9.5	0.7	27380	14.3	371.5	16.7	39.0	1.2	4.0	1.2	45.0	0.6
17	0.9	0.3	5.0	0.7	9.0	0.6	17.0	0.6	16095	41.9	174.5	31.4	3.0	1.2	10.0	1.5	48.5	0.7
18	1.4	0.4	9.0	0.8	13.0	0.6	8.0	0.6	24950	31.7	301.5	28.8	7.5	1.4	13.5	1.3	65.0	0.9
19	0.8	0.2	11.0	0.8	12.5	0.5	43.0	1.1	30750	15.3	958.0	36.5	25.5	1.1	2.0	1.3	52.5	0.9
22	1.0	0.4	14.5	0.7	28.0	0.6	23.5	0.6	30315	20.1	430.5	30.9	25.0	1.3	7.5	1.2	57.0	0.5
23	1.1	0.2	16.0	0.8	29.5	0.6	30.0	1.4	32740	23.3	569.0	36.3	28.5	1.2	4.0	1.2	58.0	0.6
24	1.5	0.4	13.5	0.9	20.2	0.7	34.0	1.1	27790	41.0	452.5	40.0	25.5	1.6	10.5	1.8	65.5	1.5
24*	1.3	0.4	11.0	0.7	16.0	0.6	17.0	1.1	21510	10.6	635.0	21.0	22.0	1.5	6.0	1.2	54.0	0.7
26	1.6	0.3	11.0	0.8	18.0	0.6	28.0	1.1	25535	14.2	448.0	32.5	21.5	1.5	8.5	1.2	58.5	0.5
28	2.6	0.7	28.0	1.1	82.5	0.7	47.5	1.2	44170	14.3	626.5	41.3	50.0	1.9	13.0	1.5	49.5	0.5
29	1.6	0.6	9.5	0.8	11.0	0.6	12.0	1.1	19325	25.0	309.0	26.3	8.0	1.5	10.5	1.3	43.0	0.6
30	0.8	0.2	15.0	1.1	34.0	0.6	34.5	2.3	23595	11.2	483.0	55.9	30.0	2.1	14.5	2.3	67.0	2.2
30*	0.8	0.2	11.5	0.6	15.0	0.5	17.5	1.4	22190	35.0	403.0	18.5	15.5	1.4	8.0	1.4	55.5	0.5
33	1.6	0.6	27.5	1.0	101	0.7	56.5	1.3	36860	26.8	628.0	32.5	58.5	1.8	9.5	1.3	39.0	2.3
35	1.0	0.2	17.5	0.8	39.5	0.5	42.5	1.1	32555	33.8	671.5	41.2	36.0	1.5	15.0	0.9	67.0	0.4
44	1.5	0.1	18.5	0.9	30.0	0.6	24.0	1.7	28850	19.2	808.5	37.0	29.5	1.5	21.5	1.7	79.0	0.6
49	2.6	0.0	20.5	0.8	53.5	0.6	38.5	1.3	32275	52.0	633.0	49.0	48.0	1.5	8.0	1.7	66.0	0.7
53	2.2	0.1	20.0	0.5	35.5	0.7	26.0	1.0	28955	29.5	844.0	38.8	33.0	1.3	20.0	2.1	59.0	0.5
53*	1.9	0.1	11.5	0.4	23.5	0.7	16.0	0.8	18450	29.5	517.0	31.4	20.0	1.3	7.0	2.2	41.0	0.4

GRÁFICA 6. CONCENTRACIÓN PROMEDIO DE METALES PESADOS TOTALES EN SEDIMENTOS



GRÁFICA 7. CONCENTRACIÓN PROMEDIO DE Fe TOTAL EN SEDIMENTOS



GRÁFICA 8. CONCENTRACIÓN PROMEDIO DE Mn TOTAL EN SEDIMENTOS



VII CONCLUSIONES

- La distribución de los metales pesados en los suelos y sedimentos de la subcuenca del Río Silao no fue homogénea, hubo mayores concentraciones de todos los elementos en la zona de planicie que en la zona de sierra, para ambos.
- Hubo cierta movilidad de metales pesados en algunos perfiles de suelo, atribuido a las texturas arenosas y a los bajos contenidos de materia orgánica que permitieron el movimiento descendente de la mayoría de los metales.
- La propiedad del suelo que intervino en la retención y acumulación de algunos metales pesados fue el contenido de materia orgánica y el contenido de arcillas y limos. En sedimentos la retención se asoció al contenido de carbonatos y, en menor medida, al contenido de arcillas, limos, y el valor de pH.
- La asociación entre las propiedades de los suelos y sedimentos con los diferentes metales pesados fue débil y positiva, excepto el valor de pH y contenido de carbonatos que mostraron asociaciones débiles y negativas con la disponibilidad de los elementos.
- Los sitios ubicados en la zona de planicie presentaron mayor concentración de los metales pesados en comparación con los sitios de la zona de sierra lo que se asoció a los factores antropogénicos.
- El grado de disponibilidad, basado en la relación: metal pesado disponible/metal pesado total, fue la siguiente:

En suelos:

Cd> Pb> Mn> Co> Ni> Cu> Cr> Zn> Fe

En sedimentos:

Cd> Pb> Ni> Mn> Co> Cu> Cr> Zn> Fe

En perfiles de suelo:

Pb> Cd> Ni> Co> Cu> Mn> Cr> Zn> Fe

- El porcentaje de disponibilidad de todos los elementos fue bajo, lo que indica que los suelos y sedimentos favorecen la retención de dichos elementos. Esto establece que los metales no ocasionan actualmente problemas de toxicidad en los cultivos de la región. Sin embargo, sería conveniente que se lleven a cabo monitoreos, sobre todo con los elementos Cd, Pb y Ni que mostraron mayor grado de biodisponibilidad.
- Los bajos contenidos de materia orgánica y las texturas arenosas de los suelos no son muy favorables para el cultivo; sin embargo, la aplicación de fertilizantes los convierte en

suelos fértiles y productivos, aunque exista el riesgo de contaminarlos con elementos tóxicos que conlleven dichos fertilizantes.

- La fuente principal de metales pesados en la zona de sierra es el material parental; mientras que, en la zona de planicie participan los factores antropogénicos como el uso intensivo de fertilizantes, agroquímicos y el riego con aguas de baja calidad.

- En la subcuenca del Río Silao aún no se presentan problemas de contaminación, evidenciados por los contenidos totales de metales pesados que presentaron valores considerados como normales. Sin embargo, se debe tomar en cuenta el riesgo que existe en la zona por el tipo de actividades que se desempeñan (agrícola, minera e industrial).

VIII BIBLIOGRAFÍA

- Alloway, B.J. 1995. Heavy metals in soils. Blackie Academic Professional. London. 2ª edición. 368 pp.
- Banin, A., Navrot, J., Noi, Y., and Yoles D. Accumulation of heavy metlas in arid - zone soils irrigated with treated sewage effluents and their uptake by Rhodes grass. Journal Environ. Qual. 1981, 10 (4): 536-540.
- Black, C.A., Evans, D.D., White, J.L., Clark, F.E. and Ensminger, L.E. 1965. Methods of Soils Analysis. Part 2 Chemical and Microbiological Properties. American Society of Agronomy, Inc., Publisher. USA. pp 1397-1400.
- CANACINTRA. 1993. Delegación Irapuato. Directorio Industrial. pp 35-110.
- CETENAL, 1989. Carta Topográfica Silao. F14 -C52. Segunda impresión. Escala 1:50 000. Secretaría de Programación y Presupuesto.
- CETENAL, 1989. Carta Topográfica Nuevo Valle de Moreno. F14 -C42. Segunda impresión. Escala 1:50 000. Secretaría de Programación y Presupuesto.
- Chapman, H.D. 1973. Cation Exchange Capacity. pp 891-901. In: Black, C.A. *et al.* (Eds). Methods of Soil Analysis. Part 2. Agronomy 9. Am. Soc. Agronomy, Inc., Madison, Wis. pag. 891-900.
- Daniel, W.W. 1982. Bioestadística. Base para el análisis de las ciencias de la Salud. Limusa. México. 485 pp.
- Ecoplán del Municipio de Silao, Guanajuato. 1981. Desarrollo Urbano. Secretaria de asentamientos humanos y obras públicas. Gobierno del Estado de Guanajuato.
- Fergusson, J.E. 1990. The heavy elements. Chemistry, Environmental, Impact and Health Effects. Pergamon Press. New York. 614 pp.
- FitzPatrick, E.A. 1984. Suelos: su formación, clasificación y distribución. Continental, México.
- Flores, D.L, Hernández, S.G, Alcalá, M.R, Maples, V.M. Total contents of Cadmium, Copper, Manganese and Zinc in Agricultural Soil Irrigated with Wastewater from Hidalgo, México. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. México. 1992, 8 (1): 37-46.
- Galeano, A, Duarte, M y Marcialés. Evaluación de los contenidos de Hierro y Manganeso en sedimentos de la Bahía de Cartagena. Revista Colombiana de Química. Colombia. 1990, 19 (2): 73-81.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

- Galvao, L.A, y Corey G. 1987. Cromo. Serie de vigilancia 5. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud. México. 66 pp.
- Garcia, Z.A y Morales, A.A. 1986. Caracterización de algunos suelos cultivados con aguacate y su estado nutricional en la zona de Nepantla, Edo. de México. Tesis de Licenciatura. Biología. Escuela de Estudios Profesionales Zaragoza. UNAM. México. 128pp.
- Garrison, S, and Lond, L.J. Trace metal chemistry in Arid-zone field soils Amended with Sewage Sludge: Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd and Pb in solid phases. Soil Science Society Am J. 1982, 46, pp 260-264.
- Gutiérrez, G, y Flores, M. Metales pesados en sedimentos de la Costa Fronteriza Baja California (México)- California (EUA). Ciencias Marinas. 1994, 20 (1) : 105-121.
- Gutiérrez, R.E, y Villalobos, P.M. Chromium pollution evaluation in groundwaters of north Mexico City. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. México. 1990, 6 (1): 5-18.
- Gutiérrez, R.M. 1982. Estudio del contenido de iones inorgánicos y sus interacciones en suelos y plantas de los distritos de riego 03 y 08. Tesis Maestría. Facultad de Química, UNAM. México.
- Hernández, S.G., Maples, V.M., Hernández, S.D., Solorio, M.G., y Villarreal, L.G. Tendencias en la acumulación de metales pesados en los suelos del Distrito de Desarrollo Rural 063, Estado de Hidalgo, por efecto de riego con aguas negras. Primer Simposio Nacional sobre Degradación del Suelo. Instituto de Geología. UNAM. 1990. México. pp 46-49.
- Hutchinson, T.C, and Meema, K.M. 1987. Lead, Mercury, Cadmium and Arsenic in the Environment. Scientific Committee on Problems of Environment (SCOPE 31). New York. 360 pp.
- INEGI. 1990. Anuario Estadístico del Estado de Guanajuato.
- INEGI 1994. Cuaderno Estadístico Municipal. Silao, Estado de Guanajuato. 117 pp.
- Jarvis, S. C. The forms of occurrence of manganese in some acidic soils. Journal of Soil Science. 1984, 35 (3): 421-429.
- Kabata- Pendias, A, and Pendias, H. 1992. Trace elements in soils and plants. 2ª edición. CRC press. London. 365 pp.
- Katyal, J.C, and Sharma, B.D. DTPA extractable and total Zn, Cu, Mn and Fe in Indian soils and their association with some soil properties. Geoderma. 1991, 49, 165-179.
- Labra, Q.M. 1988. Exploración Geológica de la zona operativa en la mina Peregrina, Guanajuato, Gto. Tesis Licenciatura. Facultad de Ingeniería. UNAM. México. Pp 78.

- **Lester, N.J.** 1987. Heavy metals in wastewater and sludge treatment processes. Vol 1. CRC. Press, Inc. pp 31-58.
- **Mascareño, C.F.** 1974. Estudio preliminar sobre contaminación de los suelos y de la producción agrícola en el Distrito de Riego 03, por el uso de aguas negras de la ciudad de México. Universidad Autónoma de Chapingo , Colegio de Postgraduados, México. Tesis de Maestría, 114 pp.
- **Munsell.** 1954. Munsell Color Company Inc.
- **McLaren, R.G., Lawson, D.M., and Swift, R.S.** Sorption and desorption of cobalto by soils and soil components. Journal of Soil Science. 1986. 37 (3): 413-426.
- **Méndez, G.T.** 1982. Estudio sobre contaminación de suelos agrícolas del Valle del Mezquital, Hidalgo, por A.B.S, Boro y metales pesados por el uso de aguas negras de la ciudad de México. Tesis Licenciatura. Facultad de Ciencias. UNAM. México. 134 pp.
- **Miller, W.P., Mcfee, W.W., and Kelly, J.M.** Mobility and retention of heavy metals in sandy soils. Journal Environ. Qual. 1983, 12 (4): 579-584.
- **Mogollón, J.L, y Bifano, R.C.** Contaminación por Cu, Ni y Zn en sedimentos de la cuenca del Lago de Valencia. Acta Científica Venezolana. Venezuela. 1989, 40 (2): 157-158.
- **Morales, P.I.** 1980. Determinación de los elementos pesados más importantes como agentes de contaminación atmosférica por el método de espectrofotometría de absorción atómica y sus efectos en la salud del hombre. Tesis de Licenciatura. Facultad de Química. UNAM. México. 89 pp.
- **Moreno, D.R.** 1970. Clasificación tentativa del pH del suelo y de aguas agrícolas. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, SAG. Departamento de Suelos. 4 pp.
- **Navarro, N., Pedroso, A., y Almogoea, S.** Características químicas de los suelos dedicados al cultivo continuo del arroz. Ciencias de la Agricultura, Cuba. 1990, No. 40, pp 93-99.
- **Ortiz, V.B, y Ortiz, S.C.** 1980. Edafología. Universidad Autónoma Chapingo. México. 331 pp.
- **Piotrowska, M, Dudka, S, Ponce, H. R, and Witek, T.** The spatial distribution of lead concentrations in the agricultural soils and main crop plants in Poland. The Science of the Total Environment. 1994, 158, pp 147-155.
- **Ponce, V.M.** 1989. Evaluación de metales pesados en sedimentos recientes y tejidos del ostión *Crassostera virginica* (gmelin 1791) de la laguna de Términos Campeche, México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. UNAM: México. 70 pp.

- **Ramírez, J, Sequeira, M.A, y Chacón B.** Metales pesados en los Ríos Virilla y Grande de Tarcoles, Costa Rica. Ingeniería y Ciencia Química. Costa Rica. 1987, 11 (2-3): 57-59.
- **Richards, L.A.** 1974. Diagnóstico y Rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Limusa. México. pp 108-112
- **Sánchez, Z.A.** 1985. Contribución al conocimiento de la contaminación por algunos metales pesados en un cultivo de maíz en Cuautitlán, Estado de México. Tesis de licenciatura. Biología. Facultad de Ciencias. UNAM. México. 86 pp.
- **SECOFI.** 1995. Secretaría de energía, minas e industria paraestatal. Dirección General de Minas. Delegaciones regionales de Querétaro y Guanajuato.
- **Secretaría de Gobernación y Gobierno del Estado de Guanajuato.** 1988. Los municipios de Guanajuato, México. Vol. 11 pp 191-195.
- **SEDUE.** 1980. Gobierno del Estado de Guanajuato Ecoplán del Estado de Guanajuato. Desarrollo Urbano.
- **Tamhane, R.V., Motiramani, D.P., y Bali, Y.P.** 1978. Suelos: su química y fertilidad en zonas Tropicales. México. Diana. pp 240-245.
- **Villanueva, F.S, y Botello, V.A.** Metales pesados en la zona costera del Golfo de México y Caribe Mexicano: una Revisión. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. México. 1992, 8 (1): 47-61.
- **Villegas,S.M; Aguilera,H.N y Flores, D.L..** Método simplificado de análisis para la clasificación granulométrica de los minerales del suelo. Revista Instituto de Geología. UNAM. México. 1978, 2 (2) pp 188-193.
- **Wolf, B.** An. Improved universal extracting solution and its use for diagnosing soil fertility. Commun. in Soil Science. Plant Analytic. 1982, 13 (12): 1005-1033.
- **Zimny, H., Wysocki, C.Z., and Korzeniewska, E.** Heavy metals content in the plant biomass of lawns in city residential districts. Chemistry for the Protection of the Environment. Nueva York. 1991, pp 197-203.

IX APÉNDICE

One-Way Analysis of Variance

Data: LUZSED.muestra

Level codes: LUZSED.Cutot

Labels:

Means plot: LSD

Confidence level: 99

Range test: LSD

Analysis of variance

Source of variation	Sum of Squares	d.f.	Mean square	F-ratio	Sig. level
Between groups	5224.5000	22	237.47727	12.257	0.0128
Within groups	77.5000	4	19.37500		
Total (corrected)	5302.0000	26			

0 missing value(s) have been excluded.

One-Way Analysis of Variance

Data: LUZSED.muestra

Level codes: LUZSED.Zntot

Labels:

Means plot: LSD

Confidence level: 99

Range test: LSD

Analysis of variance

Source of variation	Sum of Squares	d.f.	Mean square	F-ratio	Sig. level
Between groups	5077.0000	23	220.73913	2.943	0.2032
Within groups	225.0000	3	75.00000		
Total (corrected)	5302.0000	26			

0 missing value(s) have been excluded.

Multiple range analysis for SILAOSUE.cict

Method: 99 Percent LSD			
Level	Count	Average	Homogeneous Groups
27	2	2.420000	X
18	2	5.695000	X
23	2	5.695000	X
46	2	5.695000	X
19	2	8.930000	X
49	2	8.955000	X
35	2	10.545000	X
44	2	10.545000	X
41	2	11.405000	X
54	2	11.405000	X
38	2	13.850000	X
3	2	16.715000	X
36	2	17.850000	X
271	2	18.725000	X
42	2	21.145000	X
45	2	21.145000	X
37	2	22.810000	X
43	2	22.820000	X
52	2	29.320000	X
28	2	30.130000	X
53	2	34.215000	X
47	2	35.855000	X
471	2	36.855000	X

Multiple range analysis for SILAOSUE.caco3

Method: 99 Percent LSD			
Level	Count	Average	Homogeneous Groups
3	2	1.3200000	X
18	2	1.5950000	X
27	2	1.7250000	X
19	2	1.7550000	X
35	2	1.7550000	X
49	2	2.1100000	X
38	2	2.4000000	X
41	2	2.7050000	X
54	2	2.7550000	X
36	2	2.8050000	X
271	2	2.9550000	X
52	2	2.9750000	X
23	2	3.1000000	X
53	2	3.5100000	X
47	2	3.5250000	X
37	2	3.5450000	X
45	2	3.5550000	X
46	2	3.7400000	X
471	2	4.0200000	X
28	2	4.0800000	X
42	2	4.2250000	X
44	2	6.2100000	X
43	2	7.1700000	X

* denotes a statistically significant difference.

Multiple range analysis for LUZSEDRE.Fetot

Method: 99 Percent LSD			
Level	Count	Average	Homogeneous Groups
1	2	12295.000	X
8	2	13830.000	XX
17	2	16095.000	XXX
6	2	16855.000	XX
531	2	18450.000	XX
29	2	19325.000	XX
101	2	19725.000	XXX
10	2	20110.000	XXX
241	2	21510.000	XXX
303	2	22190.000	XXXX
13	2	23470.000	XXXX
301	2	23595.000	XXXX
18	2	24950.000	XXXX
26	2	25535.000	XXXX
5	2	25875.000	XXX
15	2	27380.000	XXX
24	2	27790.000	XX
14	2	28240.000	XXX
44	2	28850.000	XXXX
53	2	28955.000	XXXX
22	2	30315.000	XXX
19	2	30750.000	XXX
49	2	32275.000	XX
35	2	32555.000	X
23	2	32740.000	X
33	2	36860.000	X
28	2	44170.000	X

Multiple range analysis for LUZSEDRE.Zntot

Method: 99 Percent LSD			
Level	Count	Average	Homogeneous Groups
13	2	39.000000	X
33	2	39.000000	X
531	2	41.000000	X
29	2	43.000000	XX
1	2	44.500000	XXX
15	2	45.000000	XXXX
6	2	46.000000	XXXX
8	2	47.000000	XXXXX
17	2	48.500000	XXXXXX
28	2	49.500000	XXXXXXX
101	2	52.000000	XXXXXXX
14	2	52.500000	XXXXXXX
19	2	52.500000	XXXXXXX
241	2	54.000000	XXXXXX
303	2	55.500000	XXXXXX
22	2	57.000000	XXXXXX
23	2	58.000000	XXXX
26	2	58.500000	XXXX
53	2	59.000000	XXXX
10	2	60.500000	XXX
18	2	65.000000	XX
24	2	65.500000	XX
49	2	66.000000	XXX
35	2	67.000000	XX
301	2	67.000000	XX
5	2	76.500000	XX
44	2	79.000000	X

* denotes a statistically significant difference.

Multiple range analysis for SILAO11.ph by SILAO11.sitio

Method: 99 Percent LSD

Level	Count	Average	Homogeneous Groups
52	2	7.3500000	X
521	2	7.5000000	X
522	2	7.5500000	X

contrast	difference	+/-	limits
52 - 521	-0.15000		0.33723
52 - 522	-0.20000		0.33723
521 - 522	-0.05000		0.33723

* denotes a statistically significant difference.

Multiple range analysis for SILAO11.mo by SILAO11.sitio

Method: 99 Percent LSD

Level	Count	Average	Homogeneous Groups
522	2	0.9450000	X
521	2	1.5350000	X
52	2	2.1250000	X

contrast	difference	+/-	limits
52 - 521	0.59000		0.04130 *
52 - 522	1.18000		0.04130 *
521 - 522	0.59000		0.04130 *

* denotes a statistically significant difference.

Multiple range analysis for SILAO11.cict by SILAO11.sitio

Method: 99 Percent LSD

Level	Count	Average	Homogeneous Groups
52	2	29.335000	X
521	2	29.335000	X
522	2	30.155000	X

contrast	difference	+/-	limits
52 - 521	0.00000		0.04130
52 - 522	-0.82000		0.04130 *
521 - 522	-0.82000		0.04130 *

* denotes a statistically significant difference.

Multiple range analysis for SILA011.caco3 by SILA011.sitio

Method: 99 Percent LSD

Level	Count	Average	Homogeneous Groups
522	2	2.7850000	X
52	2	2.9750000	X
521	2	3.1000000	X

contrast	difference	+/-	limits
52 - 521	-0.12500		0.03372 *
52 - 522	0.19000		0.03372 *
521 - 522	0.31500		0.03372 *

* denotes a statistically significant difference.

Multiple range analysis for SILA011.arcillas by SILA011.sitio

Method: 99 Percent LSD

Level	Count	Average	Homogeneous Groups
52	2	30.895000	X
521	2	32.710000	X
522	2	32.720000	X

contrast	difference	+/-	limits
52 - 521	-1.81500		0.05332 *
52 - 522	-1.82500		0.05332 *
521 - 522	-0.01000		0.05332

* denotes a statistically significant difference.

Multiple range analysis for SILA011.limos by SILA011.sitio

Method: 99 Percent LSD

Level	Count	Average	Homogeneous Groups
522	2	39.950000	X
521	2	45.400000	X
52	2	47.100000	X

contrast	difference	+/-	limits
52 - 521	1.70000		0.53320 *
52 - 522	7.15000		0.53320 *
521 - 522	5.45000		0.53320 *

* denotes a statistically significant difference.

Análisis de prueba de t

$$t = \frac{|\bar{X}_1 - \bar{X}_2|}{\sqrt{\frac{(n_1-1)s_1^2 + (n_2-1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} (1/n_1 + 1/n_2)}}$$

$$S^2 = \frac{\sum X_i^2 - (\sum X_i)^2}{n - 1}$$

$$t_{gl} = n_1 + n_2 - 2$$

Suelos. Propiedades fisicoquímicas $t_{0.05, gl_{21}} = 1.72$

sierra

pH	M.O	CICT	CaCO ₃	arcillas	limos
n= 10	n= 10	n= 10	n= 10	n= 10	n= 10
\bar{x} = 7.48	\bar{x} = 1.47	\bar{x} = 15.92	\bar{x} = 3.12	\bar{x} = 16.12	\bar{x} = 26.72
s^2 = 0.08	s^2 = 1.16	s^2 = 67.40	s^2 = 2.85	s^2 = 63.04	s^2 = 67.70

planicie

pH	M.O	CICT	CaCO ₃	arcillas	limos
n= 13	n= 13	n= 13	n= 13	n= 13	n= 13
\bar{x} = 7.56	\bar{x} = 1.26	\bar{x} = 18.72	\bar{x} = 3.25	\bar{x} = 21.30	\bar{x} = 25.92
s^2 = 0.09	s^2 = 0.56	s^2 = 141.37	s^2 = 1.41	s^2 = 13.97	s^2 = 169.26
t= 0.05	t= 0.157	t= 2.05	t= 0.08	t= 3.10	t= 0.62

metales pesados

sierra

Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
n= 10	n= 10	n= 10	n= 10	n= 10	n= 10	n= 10	n= 10	n= 10
\bar{x} = 1.28	\bar{x} = 15.6	\bar{x} = 34.0	\bar{x} = 27.54	\bar{x} = 30652.5	\bar{x} = 425.8	\bar{x} = 33.6	\bar{x} = 10.16	\bar{x} = 67.0
s^2 =0.21	s^2 =86.8	s^2 =186	s^2 =212	s^2 =1.49 ⁸	s^2 =3895	s^2 =673	s^2 =207	s^2 =475

planicie

Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
n= 13	n= 13	n= 13	n= 13	n= 13	n= 13	n= 13	n= 13	n= 13
\bar{x} = 1.48	\bar{x} = 17.4	\bar{x} = 43.83	\bar{x} = 31.97	\bar{x} =32500	\bar{x} = 560.8	\bar{x} = 34.74	\bar{x} = 14.63	\bar{x} = 69.86
s^2 =0.24	s^2 =6.70	s^2 =465	s^2 =49.9	s^2 =2262	s^2 =1187	s^2 =45.5	s^2 =44.0	s^2 =347
t= 0.14	t= 0.72	t= 3.35	t= 2.59	t= 937.8	t= 84.3	t= 0.45	t= 2.96	t= 2.02

Matriz de correlaciones de las 15 variables evaluadas para metales en forma total (suelos agrícolas).

	pH	M.O	CICT	CaCO ₃	arcillas	limos	Fetot	Cutot	Zntot	Mntot	Pbtot	Cdtot	Crtot	Cotot	Nitot
	suelo H ₂ O	(%)	cmol(+)/kg	(%)	(%)	(%)									
pH	0.000*	0.190	0.457	0.075	0.389	0.680	0.495	0.180	0.884	0.957	0.598	0.510	0.066	0.209	0.130
	1.000**	-0.28	-0.16	0.378	-0.18	-0.09	0.149	0.289	-0.03	-0.01	0.115	-0.14	0.389	0.271	0.324
M.O		0.000	0.100	0.388	0.032	0.042	0.322	0.071	0.025	0.008	0.348	0.116	0.374	0.037	0.015
		1.000	0.351	0.188	0.447	0.427	0.215	0.383	0.466	0.538	0.204	0.336	0.194	0.435	0.497
CICT			0.000	0.050	0.000	0.000	0.706	0.397	0.046	0.242	0.159	0.035	0.472	0.699	0.934
			1.000	0.413	0.925	0.861	-0.08	0.185	0.419	0.253	0.303	0.439	-0.15	0.085	0.018
CaCO ₃				0.000	0.077	0.010	0.935	0.255	0.215	0.492	0.095	0.169	0.485	0.351	0.576
				1.000	0.375	0.521	0.017	0.247	0.268	0.150	0.356	0.296	0.153	0.203	0.122
%arc.					0.000	0.000	0.771	0.306	0.066	0.112	0.166	0.080	0.720	0.454	0.572
					1.000	0.748	-0.06	0.223	0.551	0.339	0.298	0.372	-0.07	0.163	0.124
%limo						0.000	0.648	0.122	0.064	0.182	0.702	0.018	0.909	0.179	0.525
						1.000	0.100	0.331	0.391	0.287	0.084	0.486	0.025	0.290	0.139
Fetot							0.000	0.000	0.009	0.005	0.377	0.833	0.000	0.000	0.000
							1.000	0.696	0.528	0.555	-0.19	0.046	0.761	0.773	0.703
Cutot								0.000	0.006	0.005	0.692	0.753	0.000	0.000	0.000
								1.000	0.547	0.555	-0.08	0.069	0.833	0.846	0.838
Zntot									0.000	0.000	0.303	0.507	0.168	0.005	0.013
									1.000	0.667	0.224	0.145	0.297	0.559	0.505
Mntot										0.000	0.814	0.407	0.029	0.000	0.000
										1.000	0.051	0.181	0.454	0.708	0.644
Pbtot											0.000	0.106	0.367	0.158	0.522
											1.000	0.345	-0.19	-0.30	-0.14
Cdtot												0.000	0.861	0.566	0.680
												1.000	0.038	0.126	0.090
Crtot													0.000	0.000	0.000
													1.000	0.815	0.822
Cotot														0.000	0.000
														1.000	0.912
Nitot															0.000
															1.000

* Nivel de Significancia

** Coeficiente de correlación

Matriz de correlaciones de las 15 variables evaluadas para metales en forma total (sedimentos).

	M.O (%)	pH suelo.H ₂ O	CICT cmol(+)/kg	arcillas (%)	limos (%)	CaCO ₃ (%)	Fetot	Cutot	Zntot	Mntot	Pbtot	Crtot	Cdtot	Cotot	Nitot
M.O	0.000*	0.179	0.001	0.168	0.000	0.568	0.710	0.106	0.174	0.210	0.330	0.941	0.279	0.795	0.930
	1.000**	-0.26	0.585	0.272	0.674	0.114	-0.07	-0.31	0.269	-0.24	0.194	-0.01	-0.21	-0.05	0.017
pH		0.000	0.283	0.278	0.816	0.048	0.190	0.083	0.245	0.188	0.205	0.287	0.047	0.057	0.249
		1.000	0.214	0.216	0.046	0.383	0.260	0.339	0.231	0.261	0.251	0.212	0.384	0.370	0.229
CICT			0.000	0.000	0.000	0.002	0.392	0.744	0.005	0.225	0.007	0.172	0.996	0.112	0.063
			1.000	0.718	0.731	0.567	0.171	0.065	0.517	0.241	0.505	0.270	0.001	0.312	0.361
%arc.				0.000	0.040	0.297	0.858	0.882	0.003	0.111	0.002	0.803	0.914	0.333	0.271
				1.000	0.396	0.418	0.035	0.029	0.547	0.313	0.554	0.050	0.021	0.193	0.219
%limo					0.000	0.016	0.795	0.604	0.039	0.954	0.019	0.646	0.958	0.484	0.596
					1.000	0.457	0.052	0.104	0.397	0.011	0.446	0.092	-0.01	0.140	0.106
CaCO ₃						0.000	0.037	0.096	0.468	0.105	0.096	0.027	0.054	0.014	0.010
						1.000	0.403	0.326	0.145	0.318	0.326	0.423	0.054	0.465	0.482
Fetot							0.000	0.000	0.180	0.000	0.116	0.000	0.019	0.000	0.000
							1.000	0.750	0.265	0.664	0.309	0.801	0.447	0.833	0.851
Cutot								0.000	0.511	0.000	0.326	0.000	0.027	0.000	0.000
								1.000	0.132	0.708	0.196	0.684	0.424	0.745	0.730
Zntot									0.000	0.095	0.000	0.845	0.618	0.498	0.545
									1.000	0.327	0.648	-0.03	0.100	0.136	0.121
Mntot										0.000	0.062	0.020	0.045	0.000	0.000
										1.000	0.363	0.443	0.388	0.643	0.641
Pbtot											0.000	0.206	0.112	0.061	0.218
											1.000	0.251	0.312	0.364	0.244
Crtot												0.000	0.009	0.000	0.000
												1.000	0.491	0.898	0.921
Cdtot													0.000	0.003	0.010
													1.000	0.548	0.481
Cotot														0.000	0.000
														1.000	0.922
Nitot															0.000
															1.000

* Nivel de Significancia

** Coeficiente de correlación

Matriz de correlaciones de las 15 variables evaluadas para metales en forma total (perfiles de suelo).

	pH	M.O	CICT	CaCO ₃	arcilla	limos	Fetot	Cutot	Zntot	Mntot	Pbtot	Cdtot	Crtot	Cotot	Nitot
	suelo H ₂ O	(%)	cmol(+)/kg	(%)	(%)	(%)									
pH	0.000*	0.030	0.313	0.018	0.515	0.674	0.186	0.029	0.503	0.086	0.408	0.720	0.025	0.013	0.016
	1.000**	-0.35	-0.17	0.386	-0.11	-0.07	0.222	0.357	0.113	0.285	0.140	-0.06	0.367	0.401	0.390
M.O		0.000	0.039	0.071	0.110	0.150	0.192	0.235	0.044	0.091	0.094	0.206	0.515	0.353	0.439
		1.000	0.340	0.300	0.266	0.241	0.219	0.199	0.332	0.281	0.278	0.212	0.110	0.157	0.131
CICT			0.000	0.006	0.000	0.000	0.303	0.026	0.018	0.016	0.234	0.035	0.026	0.960	0.360
			1.000	0.441	0.842	0.686	-0.17	-0.36	0.384	0.390	0.200	0.347	-0.36	-0.00	-0.15
CaCO ₃				0.000	0.029	0.044	0.480	0.459	0.000	0.019	0.039	0.279	0.695	0.186	0.493
				1.000	0.358	0.332	0.119	0.125	0.560	0.382	0.340	0.182	0.066	0.222	0.116
%arc.					0.000	0.000	0.372	0.608	0.005	0.010	0.084	0.176	0.113	0.782	0.599
					1.000	0.579	-0.15	-0.08	0.444	0.415	0.287	0.227	-0.26	0.074	-0.08
%limo						0.000	0.502	0.951	0.003	0.001	0.591	0.053	0.380	0.118	0.888
						1.000	0.113	0.010	0.464	0.497	0.091	0.320	-0.14	0.260	0.023
Fetot							0.000	0.000	0.001	0.000	0.599	0.722	0.000	0.000	0.000
							1.000	0.800	0.508	0.524	-0.08	-0.06	0.813	0.825	0.850
Cutot								0.000	0.011	0.002	0.755	0.382	0.000	0.000	0.000
								1.000	0.421	0.484	-0.05	-0.14	0.852	0.835	0.910
Zntot									0.000	0.000	0.037	0.339	0.250	0.004	0.028
									1.000	0.537	0.344	0.161	0.193	0.453	0.361
Mntot										0.000	0.378	0.100	0.014	0.000	0.001
										1.000	0.149	0.274	0.398	0.825	0.517
Pbtot											0.000	0.871	0.392	0.169	0.028
											1.000	0.027	-0.14	-0.29	0.361
Cdtot												0.000	0.506	0.550	0.486
												1.000	-0.11	0.101	-0.11
Crtot													0.000	0.000	0.000
													1.000	0.799	0.921
Cotot														0.000	0.000
														1.000	0.858
Nitot															0.000
															1.000

* Nivel de Significancia ** Coeficiente de correlación