

DISPERSIÓN DE Ni y Cr EN SEDIMENTOS Y SUELOS SUPERFICIALES DERIVADOS DE PIROXENITAS, SERPENTINITAS Y BASALTOS DE LA CUENCA SAN JUAN DE OTATES, ESTADO DE GUANAJUATO, MÉXICO

Gilberto Hernández-Silva¹,
Gregorio Solorio-Munguía¹,
Luis Vasallo-Morales¹,
Lourdes Flores-Delgadillo²,
Mireya Maples-Vermeersch¹,
Daniel Hernández-Santiago², y
René Alcalá-Martínez²

RESUMEN

El objetivo particular de este trabajo es determinar las características de dispersión de Ni y Cr totales en sedimentos y suelos superficiales, derivados de rocas ultramáficas en el sistema hidrológico San Juan de Otates, Estado de Guanajuato así como confirmar si existe dispersión de estos elementos hacia las cuencas vecinas. Generalmente ambos elementos se asocian en la naturaleza a piroxenitas, serpentinitas y basaltos, rocas que se encuentran en la parte alta de la subcuenca. Para su análisis, la zona de estudio fue dividida en cinco subcuencas. Para determinar los niveles de estos elementos, se muestrearon 56 sitios de sedimentos y 46 de suelos a una profundidad 0-20 cm; los sitios de muestreo se escogieron con base en la geología, geoforma, pendiente, drenaje, unidades de suelos, uso del suelo, así como tipo y características de obras de ingeniería civil. Para establecer la asociación mineralógica con los iones metálicos, se utilizó la técnica macroscópica. Las muestras fueron digeridas en un horno de microondas, utilizando agua regia para cada muestra, como extractante. Las concentraciones fueron determinadas por espectrometría de absorción atómica de flama, con límite de detección de 0.004 mg/kg⁻¹ para Ni y 0.002 mg/kg⁻¹ para Cr. Para elaborar el mapa de la distribución de iones metálicos se utilizó el sistema de información geográfica ILWIS. El análisis estadístico no mostró diferencias significativas en los contenidos de Ni y Cr tanto en suelos como en sedimentos. Los mayores niveles de Cr se localizaron en la subcuenca San Juan de Otates; en tanto que el Ni mostró una mayor concentración en tres subcuencas en relación a las otras dos restantes. A partir de la fuente principal de Ni y Cr, la distribución de estos se torna geográficamente irregular. En El Bajío, el canal Santa Ana del Conde, que une los arroyos San Juan de Otates y El Juache, ha visto incrementar últimamente sus contenidos de los elementos en estudio. Finalmente, se encontró que, a nivel de suelos y sedimentos superficiales, no existe dispersión de estos elementos hacia subcuencas vecinas.

Palabras clave: Dispersión de Ni y Cr, suelos y sedimentos, piroxenitas, serpentinitas y basaltos, cuenca de San Juan de Otates, Guanajuato, México

ABSTRACT

The particular aim of this work is to determine within the hydrologic San Juan de Otates system, State of Guanajuato, Mexico, the dispersion characteristics of total Ni and Cr in sediments and surficial soils derived from ultramaphic rocks, and also to confirm if there is dispersion of these elements towards neighboring subbasin. Usually both of these elements are found in nature associated to piroxenites, serpentinites and basalts, rocks which are all found in the upper part of the basin. For the sake of analysis the area under study was divided into five subbasins. In order to determine the concentration levels of these elements 56 sediment sites and 46 soil sites were chosen at a depth of 0-20 cm; the sampling sites were selected considering geology, geoform, slope, drainage, soil unities, land use, and civil engineering works. In order to stablish the association existing between mineralogy and metallic ions the macroscopy technique was used. The samples were digested in a microwave oven, utilizing aqua regia as extractant. Concentrations were determined by atomic absorption flame spectrophotometry, with detection limits of 0.004 mg/kg⁻¹ for Ni and

¹ Unidad de Investigación en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Apartado postal 1-742, Querétaro, Qro. 76001 México

² Departamento de Edafología, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Cd. Universitaria, 04510 México, D. F.

0.002 mg/kg for Cr. The ILWIS geographical information system was used for mapping the distribution of metallic ions. The statistical analysis did not show significant differences in the mean Ni and Cr contents both in soils and sediments. The greater Cr levels were found in the San Juan de Otates subbasin, while Ni showed a greater concentration in three subbasins in comparison with the rest of the area. The multivariate analysis pointed out that the two variables used (Ni and Cr) were not sufficient to make a proper choice of sampling sites in the different subbasins. According to mean world wide range reported for Ni and Cr, there are areas with natural contents higher than the ones found in San Juan de Otates basin. The Ni and Cr dispersion from its source point, shows geographical irregularity. In El Bajío, the channel of Santa Ana del Conde, which joins the arroyos of San Juan de Otates and El Juache, has lately increased the contents of the elements studied. Finally, the maps of Ni and Cr show, with respect to superficial soils and sediments, that there does not exist dispersion of these elements towards neighboring subbasins.

Keywords: Ni and Cr dispersion, soils and sediments, pyroxenites, serpentinites and basalts, San Juan de Otates basin, Guanajuato, Mexico.

ANTECEDENTES

Este trabajo es parte de un estudio regional más amplio que abarca cuatro cuencas hidrológicas que se encuentran dentro del sistema Lerma-Chapala, uno de los más importantes de México, y cuya finalidad es determinar si hay aportaciones de metales pesados entre ellas y, de éstas, con respecto al río Lerma. Para los fines de este proyecto, cada una de las subcuencas es considerada como unidad de estudio, debido entre otros aspectos, a la relación que guarda este concepto con los ecosistemas, y a la interdependencia que mantiene con el ciclo hidrológico, ya que permite detectar funciones múltiples y alteraciones que suceden en ella, además de que en buena medida, determina la interrelación que guardan entre sí (Sarukhán y Maas, 1990). El Ni y Cr fueron escogidos para este estudio, por la relación que guardan con la geología de la porción septentrional de la cuenca (Martínez-Reyes, 1992); también por la similitud de distribución del Ni y Cr sobre la superficie de la tierra (Nriagu y Nieboer, 1988) y porque, los contenidos más altos de Ni y Cr se encuentran en rocas ultramáficas (Kabata-Pendías y Pendías, 1992).

Las rocas ultramáficas como la peridotita, dunita y piroxenita, tienen las mayores concentraciones de Ni, seguidas por las rocas máficas como gabro y basalto, siendo las rocas alcalinas y sedimentarias las que se encuentran en los niveles más bajos (McGrath y Smith, 1996). Aunque el Ni no es un constituyente mayor de las rocas, es posible encontrarlo en forma de sulfuros y arseniuros, en la mayoría de los casos, en los minerales ferromagnesianos, reemplazando al Fe (Aller et al., 1989). En suelos, el Ni puede variar de 5 a 500 mg/kg⁻¹, dependiendo del material parental; en suelos derivados de rocas ígneas ácidas, el contenido puede ser inferior a 50 mg/kg⁻¹ (Berrow y Reaves, 1986); en suelos derivados de rocas básicas, las concentraciones de Ni pueden ser elevadas cuando provienen de rocas básicas, volcánicas y serpentinas (Nriagu, 1980); mientras que de acuerdo a Brooks (1987) el Ni en suelos puede variar de 5 a 5,000 mg/kg⁻¹, dependiendo del material parental. De acuerdo a McBride (1994), el rango medio mundial de Ni en suelos va de 4.0 a 55.0 mg/kg⁻¹.

Holmegren y colaboradores (1993) reportaron concentración media de 94 mg/kg⁻¹ de Ni en un área de California, Estados Unidos, debido a la influencia de piroxenitas en la región.

El contenido de Cr en rocas ácidas y sedimentarias comúnmente varía de 5 a 120 mg/kg⁻¹; en contraste, los contenidos altos de Cr se encuentran en suelos derivados de basaltos y serpentinas, con rangos que varían de 5 a 3,000 mg/kg⁻¹ (Bowen, 1979). Bloomfield y Pruden (1980) reportan valores entre 1,000 y 3,000 mg/kg⁻¹ en suelos derivados de serpentinas. Shacklette y Borngen (1984) encontraron rangos que van de 1 a 2,000 mg/kg⁻¹. La acumulación se da principalmente en suelos superficiales, aunque se han encontrado a 3 m de profundidad, con concentraciones que van de 112 a 10,000 mg/kg⁻¹ (McClellan et al., 1987). Por otro lado, Bohn y colaboradores (1985) consideran que el rango normal de Cr en suelos puede variar de 5 a 1,000 mg/kg⁻¹. Según McBride (1994), el rango medio mundial para Cr va de 7 a 221 mg/kg⁻¹. Para la Unión Europea, la concentración máxima permisible de Cr en suelos es de 50 mg/kg⁻¹, y para Canadá se estableció en 120 mg/kg⁻¹ (Kabata-Pendías y Pendías, 1992). Para Cr total en sedimentos, Müller y colaboradores (1992) estiman en 90.0 mg/kg⁻¹ el límite máximo permisible.

LOCALIZACIÓN Y FISIOGRAFÍA

La zona de estudio se encuentra al noreste del sistema hidrológico Lerma-Chapala; abarca una superficie de 1,152 km². Los límites son: al norte, la cuenca del río La Laja; al oeste y sur, la cuenca del río Turbio; al este, las cuencas de los ríos Silao y Guanajuato (Figura 1). El sistema San Juan de Otates descarga sus aguas en el río Guanajuato y éste en el río Lerma.

La porción norte del área estudiada, se encuentra dentro de la sierra de Guanajuato, que a la vez, se ubica en la parte meridional del Altiplano Mexicano. La sierra de Guanajuato está constituida por elevaciones de hasta 2,850 m de altitud, así como por mesetas drenadas por valles más o menos paralelos, que se caracterizan por su convexidad vertical, lo que indica diversas etapas de erosión, resultado de movimientos

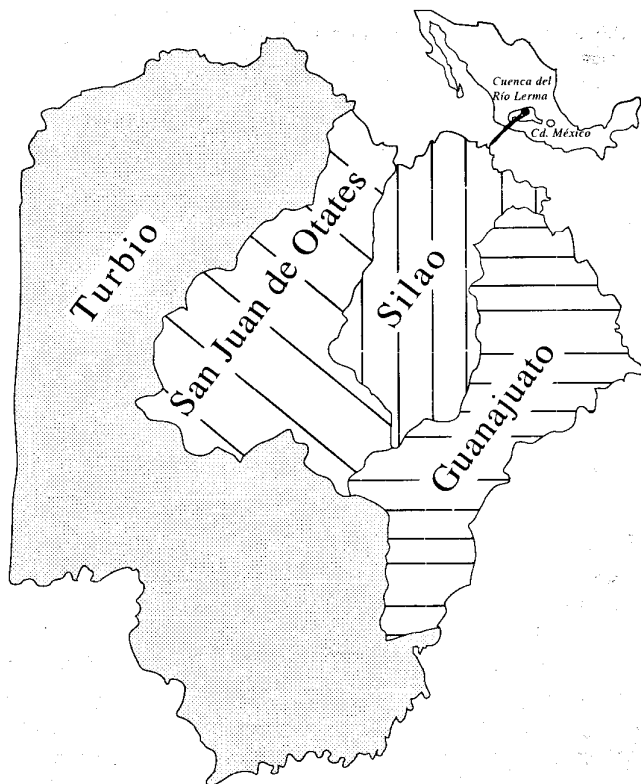


Figura 1. Mapa esquemático de las cuencas hidrográficas tratadas en este estudio.

tectónicos. Una gran falla que corre del NW al SE entre los 1,890 m y 1,900 m al sur de la sierra de Guanajuato, sirve de límite con el resto de la cuenca: el graben de El Bajío, constituido por un valle estructural de origen tectónico, relleno con material transportado por las corrientes que bajan de la sierra. En esta área se encuentran ignimbritas, basaltos, riolitas, andesitas, areniscas y conglomerados, cuyas altitudes van desde 1,900 m en el centro, hasta 2,160 m al SW de la cuenca. Entre estas elevaciones se hallan grandes extensiones agrícolas de riego, cuyas altitudes varían desde 1,850 m en la porción cercana a la falla, hasta los 1,730 m en la confluencia con el río Guanajuato (INEGI, 1983).

HIDROGRAFÍA

En la parte de la sierra de Guanajuato, el drenaje está formado por un sistema paralelo, modelado por los arroyos San Juan de Otates, Juache y Grande. Cada uno de ellos conforma un sistema dendrítico con escasos y cortos afluentes. Los dos primeros establecen, aguas abajo, el sistema canal Santa Ana del Conde, que se une al río Guanajuato y éste, al Lerma. El arroyo Grande se pierde en la planicie de El Bajío. Diversas obras de ingeniería han modificado la conducta del drenaje natural de la cuenca, como es el caso de la construcción de presas y canales, tanto para control de avenidas e inundaciones, como para el riego de tierras agrícolas.

GEOLOGÍA

Desde el punto de vista estratigráfico (Martínez-Reyes, 1992), la sierra de Guanajuato está constituida por dos conjuntos litológicos claramente definidos: uno inferior, mesozoico (con batolito granítico asociado, K-Ar = 51 Ma, Stein *et al.*, 1993) y otro superior, cenozoico volcano-sedimentario continental. Las rocas mesozoicas en su parte basal presentan varios plutones de edades diferentes K-Ar = 110-145 Ma (Otriz-Hernández y Martínez-Reyes, 1993), así como rocas de diferente composición (de ultramáficas a félsicas) y rocas volcano-sedimentarias con metamorfismo de bajo grado y plegamientos de diferentes grados, ocurridos tanto en el Mesozoico como en el Plioceno. El Oligoceno está representado por intrusivos ácidos (pórfidos riódacíticos) de dimensiones pequeñas en formas de cuellos volcánicos y/o domos. Las principales formaciones geológicas son (Figura 2):

Mesozoico. Está formado por secuencias representativas de dos ambientes paleogeográficos diferentes: una volcano-plutónica alóctona, perteneciente a un arco insular intra-oceánico (Arco de Guanajuato) y otra, volcanosedimentaria paraúctona, perteneciente a una cuenca oceánica: Cuenca de Arperos (Monod *et al.*, 1990; Lapierre *et al.*, 1992).

Piroxenita San Juan de Otates. Es una roca verde oscuro, constituida principalmente por piroxenos (augita), hornblenda, olivino y plagioclasas cálcicas, con diferentes grados de serpentización. Los análisis realizados a estas rocas para el presente trabajo, mostraron concentraciones de Ni que van de 170 a 520 mg kg⁻¹ y de 2,830 a 3,025 mg kg⁻¹ de Cr.

Complejo Volcanosedimentario Sierra de Guanajuato. Comprende tanto rocas terrígenas como volcánicas del Cretácico Inferior (Dávila-Alcocer y Martínez-Reyes, 1987). En este complejo abundan las grauvacas. Las rocas volcánicas incluyen lavas almohadilladas de composición basáltica, sills doleríticos, dacitas y tobas básicas. La geoquímica de estas rocas muestra una afinidad magmática alcalina, relacionada con una corteza oceánica.

Cenozoico. Abarca depósitos de ambiente continental, donde diversas fases de volcanismo y plutonismo son acompañadas por fases de sedimentación. Entre el conjunto basal mesozoico y la cubierta volcanosedimentaria cenozoica, se encuentra un intrusivo de composición ácida, conocida como granito Comanja, que aflora a lo largo de casi toda la Sierra de Guanajuato. No muestra metamorfismo regional, pero sí una amplia aureola de metamorfismo de contacto que produjo varios tipos de rocas, de acuerdo a la roca encajonante intrusiva (Vassallo y Martínez-Reyes, 1988).

Conglomerado Basal Terciario. Al norte del poblado Duarte, aparece una roca de estratificación masiva, bien consolidada, de color rojo, constituida por clastos de naturaleza volcánica, plutónica y sedimentaria y/o metamórfica, con matriz arenosa como cementante. El conglomerado descansa discordantemente sobre la secuencia volcanosedimentaria Sierra de

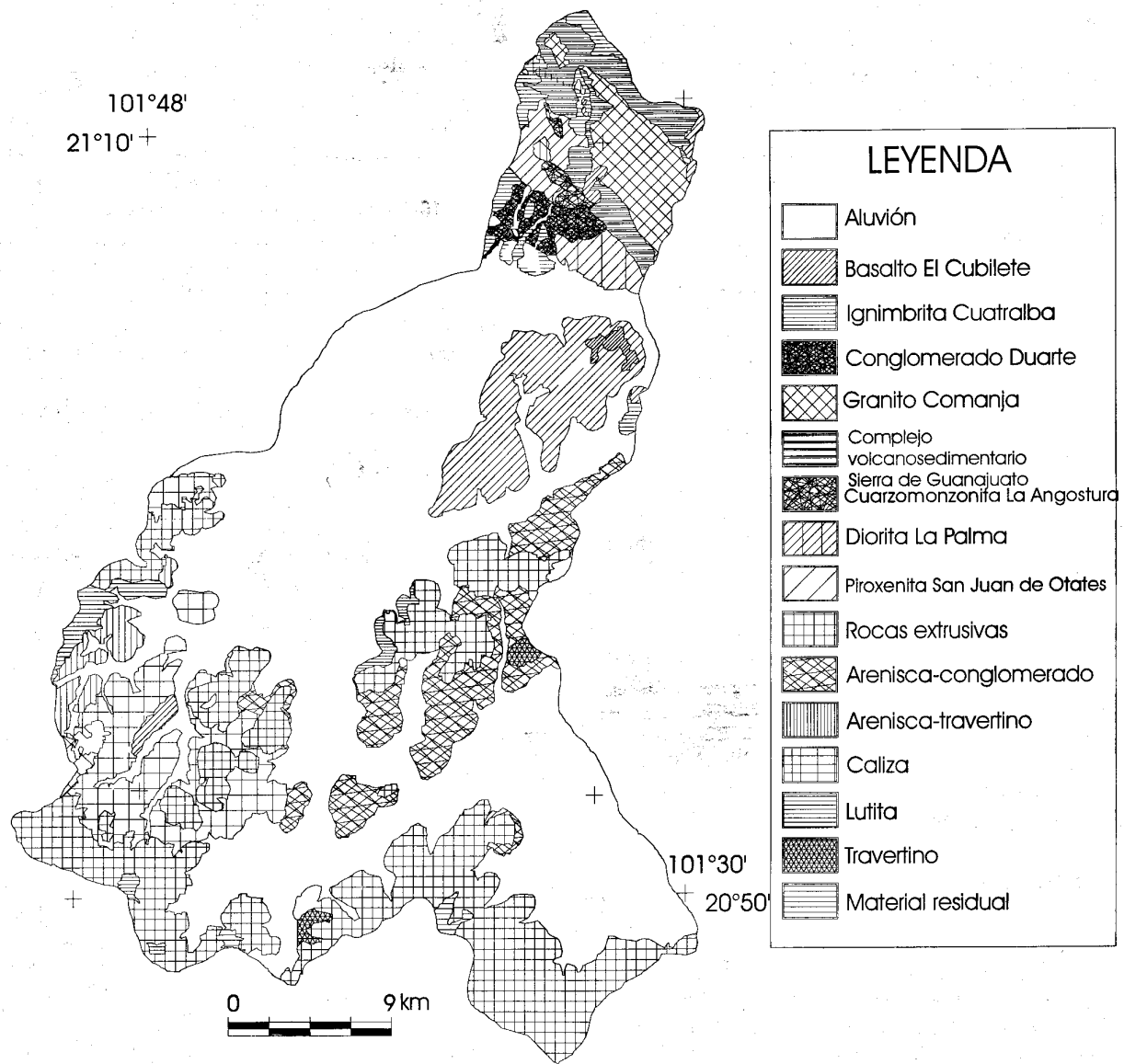


Figura 2. Mapa geológico del área de estudio [modificado de Martínez-Reyes, 1992 (parte norte), e INEGI, 1983 (parte sur)].

Guanajuato. Es equivalente al Conglomerado Rojo de Guanajuato (Edwards, 1955).

Riolita El Ocote. Representada principalmente en la Sierra del Ocote con formas dómicas y con altos contenidos de topacio.

Ignimbrita Cuatralba. En esta unidad se agrupan todas las rocas de naturaleza piroclástica que cubren amplias extensiones, tanto en la Sierra de Guanajuato como en El Bajío. Se trata de rocas de composición riolítica, que consisten en tobas soldadas de color rosado y blanco poco consolidadas. Su posición estructural es horizontal en la mayoría de los casos, con una edad de 28 Ma (Nieto-Samaniego *et al.*, 1996).

SUELOS

Los suelos localizados en la sierra de Guanajuato, correspondiente a la cuenca San Juan de Otates, se caracterizan por intemperismo químico moderado, como el principal proceso formador del suelo, siendo su distinción principal, el escaso desarrollo. La presencia de óxidos de Fe (removidos) muestran un mayor porcentaje en los suelos provenientes de las piroxenitas y, menor proporción, en los derivados de granitos. Los rangos de capacidad de intercambio iónico varían de 12.79 (granito) hasta 55.69 cmol kg^{-1} en los suelos provenientes de

ignimbritas-basaltos. La relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ sugiere que los suelos desarrollados sobre ignimbritas-basaltos y granitos se generan más rápidamente; en contraste, los suelos derivados de las rocas ultrabásicas son menos desarrollados. En las partes bajas de los valles predominan los Faeozems háplicos y Vertisoles pélicos que son los que más se emplean para la agricultura de riego. En forma asociada, sobre las fuertes pendientes, existen Regosoles eútricos y Litosoles, derivados de rocas intemperizadas *in situ*. La clase textural es media, predominando las fases líticas (Hernández-Silva *et al.*, 1990).

METODOLOGÍA

MUESTREO

La cuenca fue dividida en cinco subcuencas para un mejor control y análisis del muestreo (Figuras 3 y 4). La localización de los sitios de muestreo se hizo con base en las características geológicas, geoformas, sistema de drenaje, pendientes, unidades de suelos, obras de ingeniería y usos del suelo. Se colectaron muestras de sedimentos activos a través de recorridos de 100 m como promedio; cada sitio representa una muestra compuesta por un promedio de 7 submuestras superficiales (Ridgway *et al.*, 1994). Los materiales fueron tomados con una pequeña pala de plástico hasta reunir 4 kg de muestra. Para El Bajío, las muestras de sedimentos de ríos y arroyos fueron tomadas a partir de los planos de inundación y terrazas aluviales, siendo la profundidad promedio de 20 cm; se recogieron 5 muestras en un transecto de 50 m, se mezclaron, obteniéndose de esta manera, una muestra representativa de 4 kg. En los canales, los sedimentos fueron colectados a lo largo de ellos, en recorridos de aproximadamente 100 m. Los suelos fueron muestreados de acuerdo a las unidades de suelos y a sus diferentes usos; en parcelas agrícolas de control, se tomaron 4 muestras a profundidades de 0-25 cm, se mezclaron y se obtuvo una muestra representativa. En total, se tomaron 56 sitios de sedimentos y 46 de suelos. La colecta de los materiales se llevó a cabo durante el verano, otoño e invierno de 1994, e invierno de 1995.

MÉTODOS ANALÍTICOS

Para la identificación de los diferentes minerales, se utilizó la técnica macroscópica; el material obtenido con malla 49 ó 60 fue utilizado para hacer el conteo en un microscopio binocular estereoscópico. Con la malla -100 se separaron los minerales pesados. Las muestras de sedimentos y suelos (0.5 g) fueron molidas en un mortero de ágata y digeridas en un horno de microondas (marca CEM, modelo MDS 200) para extraer Ni y Cr totales. Sin embargo, se hizo una prueba adicional de extracción con $\text{HF-HNO}_3\text{-HCl}$ en algunas muestras representativas, con el objeto de comparar diferencias de extracción. Con el método del HF se extrajo en promedio el

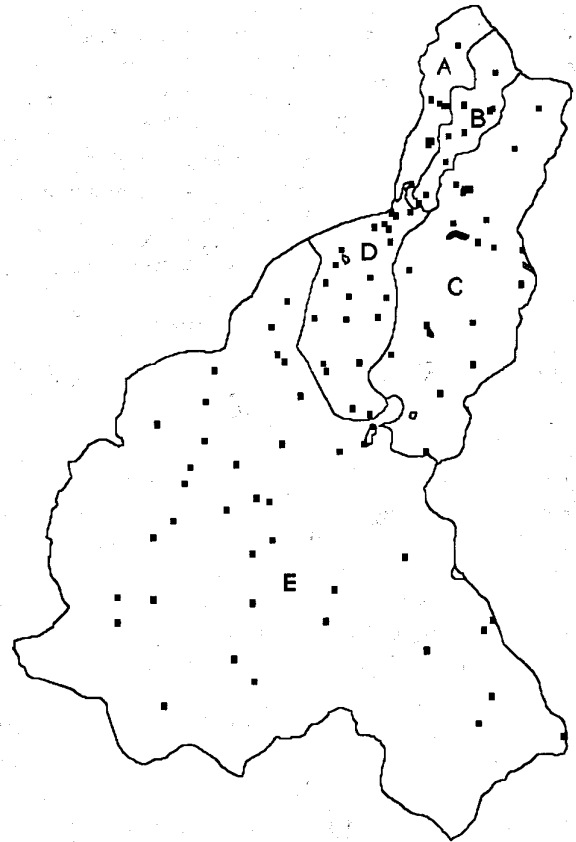


Figura 3. División de cuencas y sitios de muestreo.

70 % del contenido total de Ni y el 50 % del contenido total de Cr. No obstante, se considera que la técnica empleada en este trabajo es adecuada, entre otras razones, porque es aceptada internacionalmente y porque es más práctica para el análisis de una gran cantidad de muestras. La digestión de las muestras se llevó a cabo durante 15 minutos en vasos cerrados con 10 ml de agua regia. La presión en el horno de microondas fue de 130 psi. Las concentraciones de los elementos fueron determinadas con un espectrofotómetro de absorción atómica de flama, marca Perkin Elmer modelo 372, con límite de detección de 0.004 mg kg^{-1} para Ni y 0.002 mg kg^{-1} para Cr. Los resultados se reportan en mg kg^{-1} . La calidad de los datos fue controlada a través del uso de un estandar internacional certificado (GBW-07408, MC). La precisión fue avalada, analizando dos repeticiones de todas las muestras, resultando un coeficiente de variación menor al 6 %.

Aunque los sedimentos no son suelos, pueden ser considerados como una matriz sólida que muestra una similitud con los suelos en términos de una interacción de Ni y Cr (Förstner y Wittman, 1981). Por esta razón, los sedimentos y suelos fueron considerados como una sola unidad para la elaboración de los mapas de distribución de estos elementos. Para la elaboración de los mapas de dispersión se utilizó el sistema de información geográfica ILWIS, v.1.4, que sirvió para digitalizar los mapas, y para realizar el análisis espacial,

empleando para ello, el método de interpolación del vecino más cercano. También se usó el sistema AUTOCAD para el control de escalas de salida y, el COREL DRAW para la edición de mapas. Para normalizar las poblaciones, las concentraciones de metales en sedimentos y suelos fueron convertidos en su logaritmo equivalente. Se usó el programa GEO-EAS para calcular semivariogramas direccionales para describir la heterogeneidad espacial de las diferentes concentraciones entre las distintas cuencas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cada corriente, arroyo o río que conforma una subcuenca puede constituir un escenario diferente de transporte de materiales en función de las rocas que atraviesa e intemperiza. Esto permite diferenciar el papel que juega cada una de ellas, en la dispersión de los metales en suelos y sedimentos; por ello, las subcuencas y los sitios de muestreo fueron agrupados de la manera que, de modo esquemático, se muestra en la Tabla 1.

La división de la cuenca San Juan de Otates en subcuencas se hizo en función de una delimitación hidrológica natural, hecho que no tiene control sobre el tamaño de cada microcuenca y por consiguiente, como en este caso, la proporcionalidad del número de muestras por microcuenca, no tiene un efecto deseable en el manejo estadístico. Por otro lado, las subcuencas A y B son de menor extensión pero son donde, precisamente se encuentran las mayores proporciones de piroxenitas y serpentinitas, en comparación con el resto de la cuenca.

La parte que corresponde a la Sierra de Guanajuato tiene una superficie de 128.5 km². De esta superficie, 30.4 km² (23.6 %) corresponde al área de captación del arroyo El Juache; 38.4 km² (29.9 %) al San Juan de Otates y 59.7 km² (46.5 %) al arroyo Grande. La importancia de la aportación de materiales intemperizados hacia las partes bajas de la cuenca, se centra en el hecho de que las piroxenitas de San Juan de Otates ocupan sólo 7.7 km² (5.59 %) y El Juache 4.89 km² (3.80 %). En el arroyo Grande no existe este tipo de afloramientos. Esta distribución puede dar una idea de la baja proporción superficial del material que puede ser intemperizable, en función de la superficie de captación de la subcuenca e independientemente del gradiente de intemperismo de cada tipo de roca.

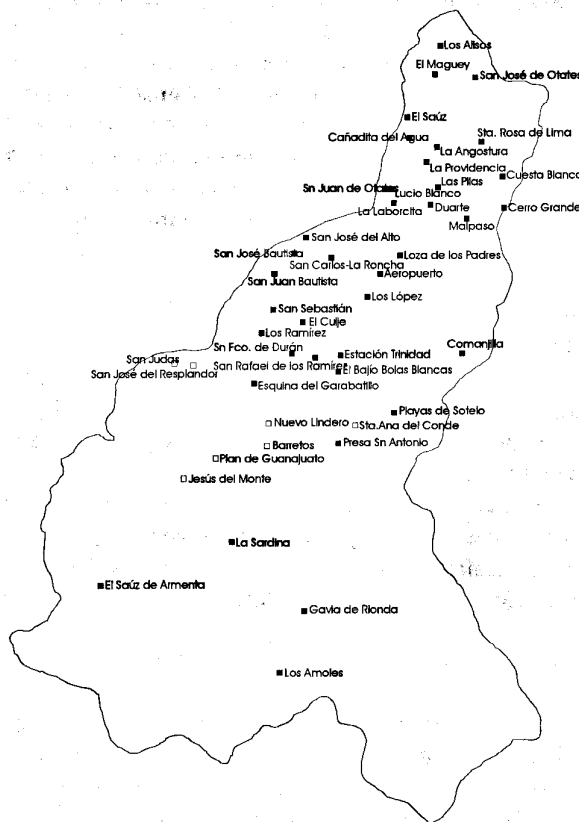


Figura 4. Mapa de ubicación de poblaciones.

LA MINERALOGÍA EN FUNCIÓN DEL Ni Y Cr

A. Arroyo San Juan de Otates

En esta subcuenca, las rocas predominantes en orden de importancia son: granitos, volcanosedimentarias, piroxenitas, serpentinas y dioritas; muy escasas riolitas y tonalitas. Los minerales derivados de estas rocas son principalmente: ortoclasa > cuarzo > augita > serpentina > plagioclasa >> hornblenda > olivino > talco. Como puede verse en la Tabla 2, los valores medios más altos de Ni y Cr totales se encuentran en el área de las piroxenitas, mientras que los valores mínimos se ubican al norte de esta área.

Tabla 1. Número de sitios de muestreo en cada una de las subcuencas del área de estudio.

Subcuenca	Drenaje	Geoforma	Sitios
A	Arroyo San Juan de Otates	sierra	11
B	Arroyo El Juache	sierra	9
C	Arroyo Grande	sierra y planicie	19
D	Arroyo la Llave	planicie	39
E	Canal Santa Ana del Conde	planicie	24
Total			102

B. Arroyo El Juache

Predominan granitos, piroxenitas, rocas volcano-sedimentarias. En menor proporción, se hallan serpentinitas y riolitas. Los minerales asociados a estas rocas son: ortoclasa > cuarzo > plagioclasa > augita >> hornblenda > piroxena > serpentina. Los valores medios para sedimentos y suelos también corresponden a la zona con material parental constituido por piroxenitas (Tabla 2).

C. Arroyo Grande

Las rocas más importantes de esta subcuenca son: granito, metandesitas, metabasaltos, unidades calcáreas, diorita, cuarzomonzonita y riolita. La mineralogía de esta área está representada por: cuarzo > ortoclasa > plagioclasa > biotita >> hematita > limonita > piroxenas > hornblenda. La media para Cr es la más baja; la media para Ni, es la segunda más baja en sedimentos en toda la zona de estudio. Para Ni y Cr en suelos, tienen los segundos valores más bajos (Tabla 2).

D. Arroyo La Llave

Los materiales característicos de esta microcuenca son: aluvión (gravas y arenas), clastos polimícticos; en menor proporción, cuarzomonzonita, riolita y piroxenitas. Los minerales derivados de estas rocas son: cuarzo > ortoclasa > plagioclasa >> jaspe > limonita > goethita > granate > epidota > ilmenita > hornblenda > adularia. Los valores medios para Ni en sedimentos y suelos, así como Cr en suelos, fueron los más bajos en toda la cuenca (Tabla 2).

E. Canal de Santa Ana del Conde

Las unidades predominantes en esta área son: aluvión, piroxenita y andesita y, con menores proporciones, granodiorita y riolita. Los minerales derivados de estas rocas están dominados por: plagioclasa > ortoclasa > cuarzo >> augita > serpentina > hornblenda. Esta subcuenca tiene los valores medios más altos en El Bajío, tanto de Ni como de Cr.

DISCUSIÓN

Como puede verse en esta descripción mineralógica general de la cuenca de San Juan de Otates, el Ni y Cr siguen un patrón de distribución en función de la roca de origen, drenaje y topografía. Los dos últimos factores conforman las bases para definir las características del transporte de los materiales y su posterior depositación. A nivel de cuenca, la distribución de los elementos estudiados, siguen un patrón que puede ser establecido así: el Ni (sedimentos) en San Juan de Otates, con una media de 125.5 mg kg⁻¹, más el Ni (sedimentos) de El Juache, con una media de 121.4 mg kg⁻¹, al unirse al canal de Santa Ana del Conde, el Ni (sedimentos) desciende con una media de 70.2 mg kg⁻¹, en cambio el Ni (suelos), asciende a una media de 107.3 mg kg⁻¹.

El Cr en sedimentos se comporta de manera similar. En San Juan de Otates la media es 120.5 mg kg⁻¹, en El Juache 77.8 mg kg⁻¹ y en el canal de Santa Ana del Conde 74.8 mg kg⁻¹. Los arroyos que bajan de la sierra concentran y dispersan los sedimentos a lo largo del canal (19 km de longitud). Sin embargo, en la distribución de Ni y Cr en suelos, han contribuido otros factores, como son los procesos fluviales, la erosión, depositación, geoformas, características morfo-

Tabla 2. Valores medios, máximos y mínimos de Ni y Cr totales (mg kg⁻¹) en suelos y sedimentos de la cuenca San Juan de Otates.

Subcuenca	SEDIMENTOS						
	NÍQUEL			CROMO			
	Media	Máximo	Mínimo	Media	Máximo	Mínimo	
A	125.5	208.1	40.6	120.5	224.5	35.4	
B	117.0	193.6	35.1	77.8	113.6	26.1	
C	34.5	91.4	4.4	30.7	93.7	3.0	
D	23.4	117.5	0.8	37.1	172.5	12.0	
E	68.2	162.6	7.8	74.8	132.7	18.6	
Subcuenca	SUELOS						
	A	395.7	539.4	35.6	229.3	615.0	27.1
	B	53.9	72.9	35.0	50.0	75.1	25.0
	C	24.8	64.0	8.5	24.7	39.3	13.5
	D	24.2	72.0	6.7	18.4	44.0	7.0
	E	107.3	164.0	30.1	104.6	139.5	87.3

genéticas y uso del suelo, tiempo, etc. Es por ello que, en términos generales (exceptuando el Cr en la Llave), en los suelos existe, un mayor contenido de estos elementos, comparado con los sedimentos (Tabla 2).

A nivel de subcuenca, la superficie que ocupan las piroxenitas en San Juan de Otates es mayor que la del Juache, por lo que es de esperarse en la primera de ellas, un mayor porcentaje de Ni y Cr totales, tanto en sedimentos como en suelos. Por esta razón, al comparar la distribución de estos elementos entre las subcuencas San Juan de Otates y El Juache, resultan parecidas. Como ya se ha mencionado, estas dos subcuencas se unen con el canal Santa Ana del Conde para depositar sus sedimentos en la zona más baja de la cuenca, conocida como Playas de Sotelo y debido a ello, actualmente en esta región existe un promedio de 80.8 mg kg⁻¹ de Cr y 107.0 mg kg⁻¹ de Ni en sedimentos y, Ni y Cr en suelos, 121.1 y 87.3 mg kg⁻¹, respectivamente. Estos niveles pueden incrementarse con el tiempo. Existen otras dos áreas pequeñas y aisladas relacionadas con Cr en sedimentos que rebasan las 100 mg kg⁻¹ como son las presas La Purísima (108.8 mg kg⁻¹) y La Sandía (172.5 mg kg⁻¹).

El perfil longitudinal del drenaje dendrítico, muestra pendientes escarpadas y cortas, con algunas mesetas aisladas y pendientes que se suavizan al llegar a El Bajío y que se caracterizan por la presencia de conos coluvio-aluviales de gravas, sepultados por materiales que se van tornando más finos conforme se aleja de la ruptura de pendiente, modificándose posteriormente por la influencia de las elevaciones que se presentan en el resto de la cuenca. En la sierra, los materiales intemperizados se han movido a través de los cauces de los arroyos, depositándose una parte en pequeñas terrazas aluviales y planos de inundación de relativa baja estabilidad; el resto, puede considerarse como sedimentos *en movimiento*. En El Bajío, debido a un menor gradiente topográfico, la dispersión de los sedimentos ha sido a través de los planos de inundación, que son de mayor amplitud y estabilidad. Al reducirse la pendiente del cauce, la velocidad de transporte disminuye sensiblemente, dando lugar a una velocidad mayor de sedimentación, entrando estos materiales posteriormente, a la dinámica morfogenética de los suelos.

NÍQUEL

Las concentraciones más elevadas de níquel total en suelos y sedimentos (Clase 3, entre 100.1 y 540.0 mg kg⁻¹) se localizan dentro de la sierra de Guanajuato, en el área comprendida entre El Maguey, este de Piedra del Coche, Cañadita del Agua, La Angostura, La Laborcita, hasta la confluencia de los arroyos Juache y San Juan de Otates. Otras zonas con contenidos altos de Ni total se encuentran entre San José del Alto y el aeropuerto internacional de Silao; también en la región comprendida entre San Rafael de los Morales, Playas de Sotelo, Santa Ana del Conde y presa San Antonio y, finalmente, la zona que abarca los poblados Los Ramírez, El

Cuije y San Agustín del Mirasol. Las regiones que cuentan con concentraciones medias, entre 30.1 y 100.0 mg kg⁻¹ (Clase 2), se localizan en la porción septentrional de la cuenca; norte de Malpaso, cerro Grande y Las Pilas; a lo largo del canal de Santa Ana; el área correspondiente a San Judas, San José del Resplandor y Esquina del Garabatlillo; entre Barretos y Nuevo Lindero; de manera aislada, este de Sauz de Armenta; la Sardina, Gavia de Rionda y Los Amoles y, finalmente, El Venado de San Lorenzo en la confluencia con el río Silao-Guanajuato (Figura 5).

Las concentraciones de Ni en los suelos y sedimentos de toda la cuenca fluctuaron entre 0.8 y 539.4 mg kg⁻¹, obteniendo una media geométrica en suelos de 33.7 mg kg⁻¹ y en sedimentos de 33.0 mg kg⁻¹. Al hacer una comparación de los valores medios de Ni en suelos y sedimentos se observó que no había diferencia significativa, por lo que no se podría considerar, tanto a los suelos como a los sedimentos, como materiales muy semejantes en cuanto a su contenido de níquel. Sin embargo, al analizar ambos materiales por separado se observa una mayor variación de los contenidos del elemento en los suelos (C.V. = 147 %), en comparación con la calculada en los sedimentos (C.V. = 94 %), presentando los suelos la concentración más alta observada en toda la cuenca (sitio 10, 539.4 mg kg⁻¹). Kabata-Pendias y Pendias (1992), reportaron un rango amplio para los suelos del mundo que va desde 0.2 hasta 450.0 mg kg⁻¹. Al analizar el contenido de Ni en cada una de las subcuencas tanto en suelos como en sedimentos, se observó que hay diferencias altamente significativas entre ellas, siendo la subcuenca A la que tuvo los contenidos promedio más altos, resultando significativamente diferente a las subcuencas C y D, que tienen las concentraciones promedio más bajas. Al mismo tiempo, se observa también una diferencia altamente significativa entre los contenidos promedio de Ni en la subcuenca A cuando se comparan tanto en suelo como en sedimento, lo que indica una acumulación importante de Ni en los suelos de esta subcuenca, ya que los sedimentos son arenosos, menos arcillosos, con menos materia orgánica y, en general, con valores de pH bajos.

CROMO

Los contenidos de Cr entre 100.0 y 615.0 mg kg⁻¹ (Clase 3) en suelos y sedimentos se localizan en primer lugar, en la región comprendida entre el Maguey, oeste de Sauz Seco, Piedra del Coche, Lucio Blanco, La Laborcita, a confluencia de los arroyos Juache y San Juan de Abajo, Los López y Estación Trinidad. También por arriba de los 100.0 mg kg⁻¹, se encuentra el área comprendida entre San Sebastián, El Cuije, Los Ramírez y San Agustín del Mirasol. Finalmente, un área situada entre el norte de Jesús del Monte y Plan de Guanajuato. El rango comprendido entre 54.0 y 100.0 mg kg⁻¹ (Clase 2) se localiza en una zona comprendida entre las poblaciones de San José del Alto, el aeropuerto internacional de Silao, San José Bautista y Los López; lo mismo que la región ubicada entre

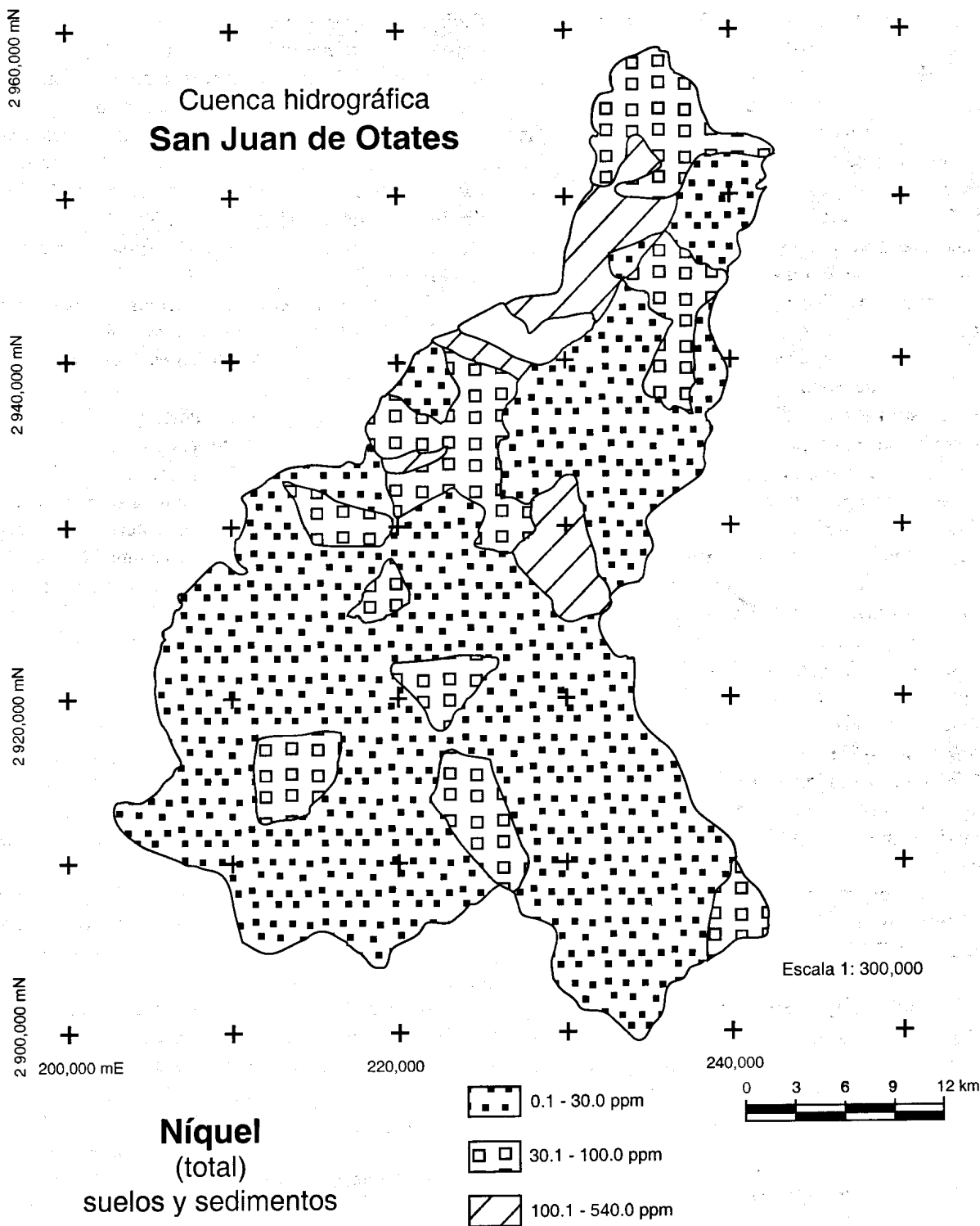


Figura 5. Contenido de níquel en la cuenca hidrográfica de San Juan de Otates (en partes por millón).

San Juan de Abajo, Estación Trinidad, El Cuije, El Resplandor, El Bajío de Bolas Blancas, Playas de Sotelo, Santa Ana del Conde, Nuevo Lindero, Barretos y presa San Antonio; es decir, una franja que corre primero de norte a sur y después, de este a oeste, que coincide con la trayectoria del canal Santa Ana del Conde (Figura 6).

Las concentraciones de Cr en los suelos y sedimentos de esta cuenca fluctuaron entre 3 y 615 mg kg⁻¹, con una media

geométrica de 32.0 mg kg⁻¹ en suelos y de 42.5 mg kg⁻¹ en sedimentos. Al igual que con el Ni, los contenidos promedio de Cr tanto en suelos como en sedimentos no presentaron diferencia significativa; es decir, ambos materiales mostraron valores muy semejantes en relación al contenido de cromo. También se observó una mayor variación del cromo en los suelos (C.V. = 168.5 %) en comparación con los sedimentos (C. V. = 82.0 %). Los suelos de la subcuenca A también

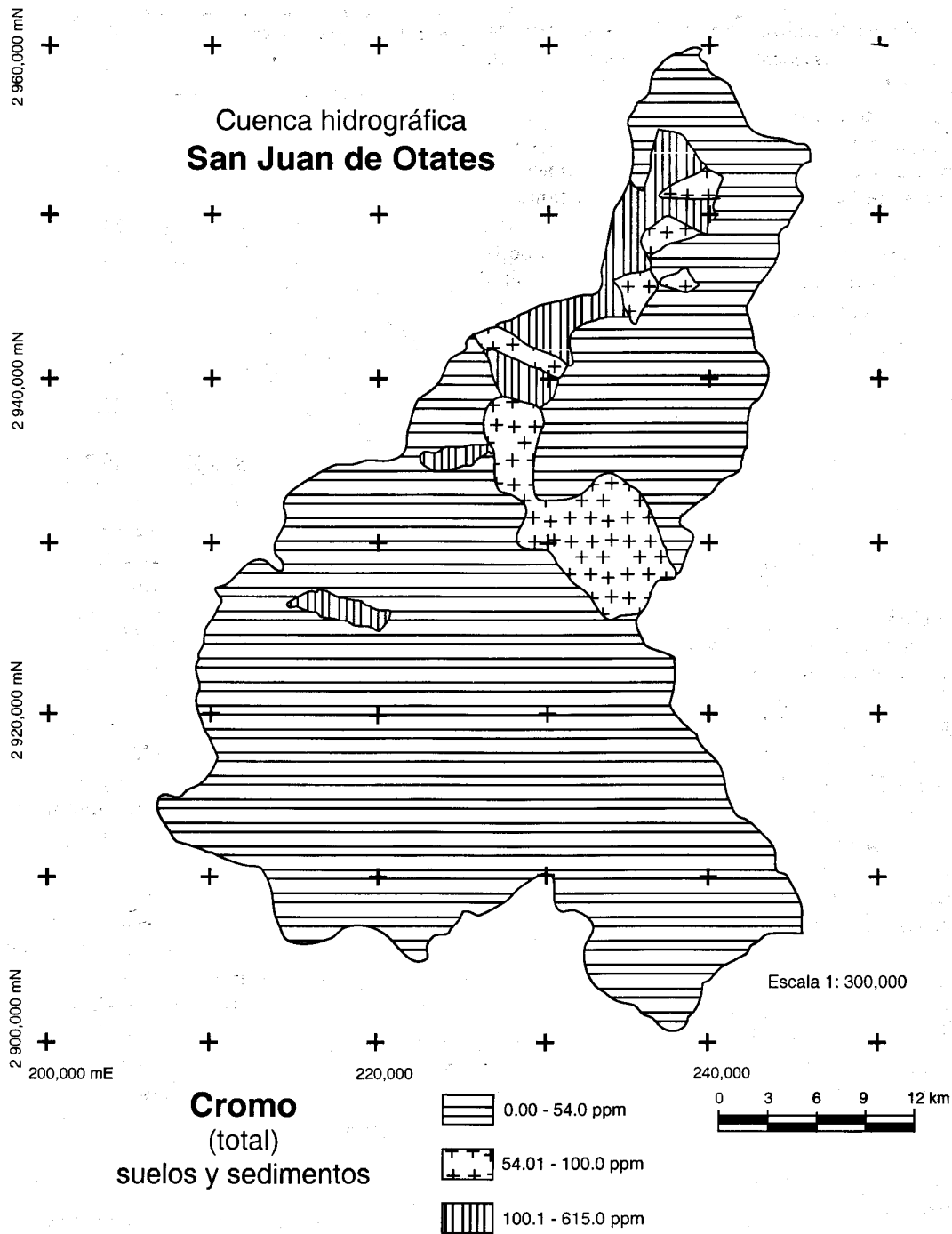


Figura 6. Contenido de cromo en la cuenca hidrográfica de San Juan de Otates (en partes por millón).

presentaron, en promedio, mayores contenidos de Cr, particularmente el sitio 10 con 615.0 mg kg⁻¹. Se detectó además, una diferencia altamente significativa entre el contenido promedio de Cr en los suelos de la subcuenca A y el de los sedimentos de la misma subcuenca, originada por las mismas características mencionadas en el caso del Ni.

Por otra parte, dentro del conjunto de técnicas multivariadas que la Estadística clásica ofrece, está el análisis

discriminante que se llevó a cabo con el objeto de determinar la pertenencia de cada suelo y sedimento a las poblaciones o subcuencas que previamente se habían determinado. Los resultados de estos análisis indicaron que la categorización de los suelos y sedimentos de acuerdo a las 5 subcuencas delimitadas no fue muy consistente; es decir, la división que previamente se hizo de la cuenca en 5 subcuencas con base en el sistema hidrológico y geológico, no coincide

perfectamente con la separación matemática o estadística que el análisis discriminante realizó. En la Tabla 3 se observan los valores medios y desviaciones estándar de Ni y Cr en cada una de las subcuencas.

Los valores promedio más altos de los dos elementos corresponden a la subcuenca A, en donde la acumulación en ambos materiales ha sido mayor. Se obtuvieron dos funciones discriminantes de las cuales sólo una fue altamente significativa ($P < 0.001$) con la que se logró obtener una separación de subcuencas y una explicación del 90 % de la varianza total de las variables. Los coeficientes estandarizados de esta función son los siguientes:

Subcuenca	Coefficiente
A	1.799
B	0.588
C	-0.508
D	-0.615
E	0.423

En cuanto a la asignación de los suelos y sedimentos con esta función se encontró que, sólo el 36 % de los casos se asignaron correctamente a la subcuenca A, el 43 % a la B, el 16 % a la C, el 59 % a la D y el 30 % a la E, teniendo la mejor asignación la subcuenca D. Con estos resultados puede decirse que hay un traslape, relativamente grande, entre las diferentes subcuencas, lo que es un reflejo de la gran variabilidad que presentan las concentraciones de Ni y Cr dentro de cada una de ellas. Las variables Ni y Cr no resultaron ser muy potentes para distinguir las subcuencas; lo que sugiere la incorporación de otro tipo de parámetros que puedan tener un mayor poder discriminatorio como son las variables geoquímicas, edáficas, etc.

CONCLUSIONES

Las concentraciones de Ni y Cr en suelos y sedimentos son resultado de las características del intemperismo geoquímico dominante, principalmente en la parte alta de la cuenca, donde la red de drenaje (natural y modificado) es reflejo del transporte y es éste quien rige su comportamiento, ya que no existe otro mecanismo de distribución, como podría ser por ejemplo, la contaminación. Los aluviones depositados en El Bajío, transformados en suelos a través de los procesos pedogenéticos, se han tornado en materiales más estables aunque en áreas aisladas, con mayores contenidos de Ni y Cr, al no estar sujetos a procesos de erosión y transporte.

Como era de esperarse, las piroxenitas y serpentinitas están asociadas a las mayores concentraciones de Ni y Cr, particularmente en la subcuenca San Juan de Otates. Los contenidos de Ni y Cr no mostraron diferencias significativas, tanto en suelos como en sedimentos, lo que permitió la elaboración de un solo mapa por elemento, tomando en cuenta

Tabla 3. Valores medios y desviación estándar de Ni y Cr totales (mg kg^{-1}) en cada una de las subcuencas.

Medias	A	B	C	D	E
Ni	158.5	99.0	30.9	23.4	83.5
Cr	173.4	76.5	28.1	26.1	83.7
Desv. estándar	A	B	C	D	E
Ni	143.9	59.1	25.5	21.9	47.1
Cr	172.5	39.0	19.7	27.0	38.6

ambos materiales. Las mayores concentraciones se relacionan con la cercanía de las piroxenitas, serpentinitas y basaltos. La dispersión de los dos elementos dentro de la cuenca es geográficamente errática, aunque en algunas regiones las obras de ingeniería han modificado el patrón de distribución, tendiendo ahora a concentrarse en la región conocida como Playas de Sotelo. No existe en la actualidad una aportación importante de Ni y Cr hacia las cuencas de los ríos Silao-Guanajuato. Por otro lado, los resultados que se tuvieron de la zona de transición entre lo que es el pedimonte de la Sierra de Guanajuato y El Bajío, mostraron que no hay aportación significativa de Ni y Cr hacia el río Turbio.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración que, en diversos aspectos de trabajos de laboratorio, realizaron las siguientes personas: M. en C. Sara Solís Valdez, M. en C. Ma. Esther Hernández Anguiano, Biól. Fernando Salinas Velázquez, Pas. Rubén Zamora Rojas, y Pas. Maribel Trejo Medina. Asimismo se agradece el apoyo del CONACYT al proyecto con clave 400324-5-1898 N.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aller, A.J., Bernal, J.L., y Nozal, M., 1989, Geoquímica de elementos traza: INIA, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, España, p. 5-28.

Berrow, M.L., y Reaves, G. A., 1986, Total chromium and nickel of scottish soils: Geoderma, Elsevier Science B.V., Amsterdam, v. 37, p. 15-17.

Bloomfield, C., y Pruden, G., 1980, The behavior of Cr (VI) in soils under aerobic and anaerobic conditions: Environmental Pollution, v. 37, p. 97-103.

Bohn, H.L., McNeal, B.L., y O'Connor, G.A., 1985, Soils chemistry: Wiley, New York, USA, 341 p.

Bowen, H. J., 1979, Environmental chemistry of the elements: Academic Press, London, p. 234-245.

Brooks, R.P., 1987, Serpentine and its vegetation: Crom Helm, London.

- Dávila-Alcocer, V.M., y Martínez-Reyes, J., 1987, Una edad cretácica para las rocas basales de la sierra de Guanajuato: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Simposio sobre la geología de la sierra de Guanajuato, Guanajuato, Gto., p. 19-20 (Resumen).
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1983, (Hojas) León (F14-C41), Nuevo Valle de Moreno (F14-C42), San Roque de Torres (F14-C51) e Irapuato (F14-C62), Edo. de Guanajuato: México, D.F. Instituto Nacional de Geografía e Informática, Cartas topográficas, escala 1:50,000, 3ª edición.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1983, (Hojas) León (F14-C41), Nuevo Valle de Moreno (F14-C42), San Roque de Torres (F14-C51) e Irapuato (F14-C62), Edo. de Guanajuato: México, D.F. Instituto Nacional de Geografía e Informática, Cartas geológicas, escala 1:50,000, 3ª edición.
- Edwards, D.J., 1955, Studies of some early Tertiary red conglomerates of central Mexico: United States Geological Survey, Professional Paper 264-H, p. 153-185.
- Förstner, U., y Wittman, G.T.W., 1981, Metal pollution in the aquatic environment: New York, Springer-Verlag, 486 p.
- Hernández-Silva, G., Flores-Delgado, L., Solorio-Munguía, G., y Aranda-Gómez, J., 1990, Estudio pedogenético de los suelos en función de algunas unidades litoestratigráficas de la sierra de Guanajuato: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Contribuciones a la Edafología Mexicana, p. 25-48.
- Holmgren, G.G.S., Meyer, M.W., Chaney, R.L., y Daniels, R.B., 1993, Cadmium, lead, zinc, copper, and nickel in agricultural soils of the United States of America: Journal of Environmental Quality, v. 22, p. 335-348.
- Kabata-Pendias, A., y Pendias, H., 1992, Trace elements in soils and plants: CRC Press Boca Raton, Ann Arbor London, 365 p.
- Lapierre, H., Ortiz, E., Abouchami, W., Monod, O., Coulon, C., y Zimmermann, J.L., 1992, A crustal section of an intra-oceanic island arc—the Late Jurassic-Early Cretaceous Guanajuato magmatic sequence, Central Mexico: Earth and Planetary Science Letters, v. 108, p. 61-77.
- Martínez-Reyes, J., 1992, Mapa geológico de la sierra de Guanajuato, con Resumen de la geología de la Sierra de Guanajuato: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología; Cartas geológicas y mineras 8, escala 1:100,000 (en color).
- McBride, M.B., 1994, Environmental chemistry of soils: Oxford University Press, 406 p.
- McClellan, K.S., Robinson, A.R., y McConnell, H., 1987, Effect of sewage-sludge on the heavy metal content of soil and plant tissue: Commun. in soil Sci. Plant. Anal., 8 (11), p. 1,303-1,316.
- McGrath, S.P., y Smith, S., 1990, Chromium and nickel, in Alloway, B.J., ed., Heavy metals in soils: John Wiley and Sons, p. 125-150.
- Monod, O., Lapierre, H., Chiodi, M., Martínez, J., Calvet, P., Ortiz, E., y Zimmermann, J.L., 1990, Reconstitution d'un arc insulaire intraocéanique au Mexique central—la séquence volcano-plutonique de Guanajuato (Crétacé inférieur): Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, v. 310, p. 45-51.
- Müller, W.H., Schwaigher, B., Santschi, P.H., y Bianchi, T.S., 1992, Heavy metal contents in river sediments: Water, Air and Soil Pollution, 72, p. 191-203.
- Nieto-Samaniego, A.F.; Macías-Romo, C., y Alaniz-Álvarez, S.A., 1996, Nuevas edades isotópicas de la cubierta volcánica cenozoica de la parte meridional de la Mesa Central, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 13, no. 1, p. 117-122.
- Nriagu, J.O., 1980, Nickel in the environment: John Wiley and Sons, 833 p.
- Nriagu, J. O., and Nieboer, E., (eds.), 1988, Chromium in the natural and human environments: John Wiley and Sons, 571 p.
- Ortiz-Hernández, L.E., y Martínez-Reyes, J., 1993, Geological structure, petrological and geochemical constraints for the central most segment of the Guerrero terrane (sierra de Guanajuato, Central Mexico): Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, First Circum-Pacific and Circum-Atlantic Terrane Conference, Guidebook of Field Trip C, p. 1-25.
- Ridgway, J., Flight, D., Martiny, B., Gómez, A., Macías-Romo, C., y Grealley, K., 1994, Overbank sediments in contamination assesment and regional geochemistry mapping: BGT Technical report WC794/4, Overseas Geology Series, 48 p.
- Shacklette, H.T., y Borngen, J.G., 1984, Element concentrations in soils and other surficial materials of the conterminous Unites States: United States Geological Survey, Profesional Paper 1,270. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Sarukán, J., y Maass, J. M., 1990, El sistema de cuencas hidrológicas, in Enrique Leff, ed., Medio ambiente y desarrollo en México: Universidad Nacional Autónoma de México, CIIH, p. 81-114.
- Stein, G., Lapierre, H., Monod, O., Zimmermann, J.L., y Vidal, R., 1993, Petrology of some Mexican Mesozoic plutons—sources and tectonic environments: Journal of South American Earth Sciences, v. 7, no. 1, p. 1-7.
- Vassallo, L. F., y Martínez-Reyes, J., 1988, Metamorfismo de contacto en la porción sudoriental del batolito granítico de la sierra de Guanajuato: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Simposio de Geología Regional de México, 3, Memoria, p. 78-80.

Manuscrito recibido: Septiembre 5, 1999

Manuscrito revisado recibido: Septiembre 28, 1999

Manuscrito aceptado: Octubre 12, 1999