

Distribución de Fe, Zn, Pb, Cu, Cd y As originada por residuos mineros y aguas residuales en un transecto del Río Taxco en Guerrero, México

Miriam Méndez-Ramírez¹ y María Aurora Armienta Hernández^{2,*}

¹ Universidad Nacional Autónoma de México. Posgrado en Ciencias de la Tierra,
UNAM CU, 04510, México D.F., México.

² Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geofísica,
UNAM CU, 04510, México D.F., México.

* victoria@geofisica.unam.mx

RESUMEN

El manejo inadecuado de los residuos del procesamiento de minerales es una de las principales fuentes de metales y arsénico hacia los ríos en los cuales pueden alcanzar niveles peligrosos para los seres humanos y los ecosistemas. El presente estudio se enfocó a determinar las concentraciones y las especies químicas disueltas o asociadas a partículas en suspensión de arsénico, cadmio, plomo, cobre, zinc y fierro presentes en el Río Taxco y Cacalotenango, aportadas tanto por residuos mineros como por aguas residuales urbanas. Se colectaron muestras de agua en época de secas y en época de lluvias. Los resultados indican que son aguas con valores de pH cercanos a la neutralidad o ligeramente básicos en la mayoría de los sitios. Las especies químicas principalmente encontradas fueron bicarbonato, sulfato, calcio, sodio, y magnesio. La muestra TX3, ubicada frente a uno de los depósitos de jales, presentó las concentraciones más altas de iones en temporada de secas y de lluvias, siendo los sulfatos (2497 y 599 mg/L respectivamente) y el calcio (472 y 208 mg/L respectivamente) los más representativos; también presentó las mayores concentraciones de metales en temporada de secas: Fe principalmente asociado a partículas suspendidas (54.5 mg/L) y Zn, Pb, Cu y Cd en forma disuelta (245.8, 0.21, 3.94 y 1.73 mg/L respectivamente). La cercanía de TX3 a los jales permite el arrastre de material por procesos de erosión hídrica y eólica al Río Taxco lo que aporta metales, iones y drenaje ácido, y altera la composición del agua principalmente en la temporada de secas (pH 2.8). Se observó un factor de dilución estacional en la composición química del río; en temporada de secas el flujo promedio del transecto estudiado fue de 0.05 m³/s y en lluvias de 1.45 m³/s. La influencia de la geología de la zona con presencia de calizas y los procesos de oxidación de sulfuros contenidos en los jales se reflejó en la especiación de los metales que fue calculada con el programa de modelación geoquímica WATEQ4F. Los resultados indicaron que los óxidos, oxihidróxidos y carbonatos son los principales compuestos que regulan la movilización/ inmovilización de los metales estudiados en este transecto. Las concentraciones de metales, que en muchos sitios son mayores a las normas ecológicas, y la influencia de las descargas urbanas y de los jales que alteran las condiciones fisicoquímicas del agua del Río Taxco han ocasionado que el mismo no pueda utilizarse directamente como fuente de agua potable ni para riego agrícola, principalmente en aquellos sitios cercanos a las fuentes de contaminación. Para la protección ambiental del río debe impedirse el ingreso de aguas residuales crudas así como el arrastre de las partículas de jales y del drenaje ácido producido, esto podría lograrse mediante la construcción de barreras físicas y sistemas de tratamiento.

Palabras clave; metales, arsénico, aguas residuales, Río Taxco, especiación, movilidad ambiental.

ABSTRACT

Inadequate waste disposal from ore processing is one of the main inputs of metals to rivers where they are transported either in dissolved or in particulate form. Heavy metals' and arsenic from metal-rich wastes may reach hazardous levels to humans and ecosystems, and constitute a negative influence on sustainable development. The present study focuses on determining the concentrations and speciation of dissolved and suspended particulate arsenic, cadmium, copper, lead, zinc and iron produced by the combined input of mine wastes and urban wastewater in the Taxco River. Water samples were collected along the river in both, dry and rainy seasons. Results showed near neutral or slightly basic pH values at most sites, dominated by bicarbonate, sulfate, calcium, sodium and magnesium as the main ions. The highest content of metals measured in the water at site TX3 close to tailings were: Fe and As, mainly in particulate form (54.5 mg/L and 0.047 mg/L respectively), Zn, Pb, Cu and Cd in dissolved form (245.83, 0.217, 3.94 and 1.73 mg/L respectively). Closeness of TX3 to mine tailings allows dragging of material by water and wind induced erosion. This process supplies metals, ions and acid drainage to the river water altering its composition mainly in the dry season (pH 2.8). A seasonal dilution factor was observed in the chemistry of the river, since in the dry season average flow of the studied transect was only 0.05 m³/s and in the rainy season the flow increased to 1.45 m³/s. Aqueous metal speciation, predicted using WATEQ4F software, reflected the influence of local geology, with presence of limestones, as well as sulfide oxidation of minerals within tailings. Speciation results data indicated that oxides, oxyhydroxides and carbonates are the main compounds controlling mobilization/immobilization processes of the studied metals. Metal concentrations over drinking water standards, as well as urban wastewater influence render the river water unsuitable for irrigation and as a drinking water source without a previous treatment, mainly at sites close to discharges and wastes. Environmental protection of the river implies avoiding direct wastewater discharges, as well as particle dragging and acid mine drainage input to the river that may be attained through the construction of physical barriers and water treatment systems.

Key words: metals, arsenic, wastewaters, Taxco River, speciation, environmental mobility.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento demográfico y el desarrollo industrial han generado gran cantidad de aguas residuales, las cuales son vertidas a diferentes cuerpos de agua: mares, lagos, ríos, etc., en muchas ocasiones sin ningún tratamiento. Las aguas residuales son de composición variada y provienen de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas (SEMARNAT, 1997). Debido a esta diversidad de fuentes pueden contener microorganismos patógenos, hidrocarburos y metales, entre otros contaminantes. El problema particular de los metales pesados es su persistencia en el ambiente ya que la masa total del metal se conserva (aunque los iones metálicos pueden encontrarse como diversas especies químicas, por ejemplo, como hidróxidos, carbonatos, sulfatos, etc., la cantidad total permanece constante), esto implica un serio problema de contaminación ya que a partir de ciertas concentraciones constituyen un riesgo para la flora, fauna y para el hombre (Bohn, 1993; Cheng y Allen, 2006; Kelderman y Osman, 2007).

El presente estudio se realizó en el Municipio de Taxco de Alarcón, Gro., México, que ha sido históricamente un importante centro minero. Una de las principales corrientes hidrológicas en esta región es el Río Taxco, el cual recibe aguas residuales que provienen de la cabecera municipal (aprox. 0.15 m³/s) y de los diferentes asentamientos humanos, así como aportes sólidos y líquidos de diversos jales

ubicados en sus riberas (más de 20 millones de toneladas de desechos sólidos en las inmediaciones de la ciudad de Taxco) (Armienta *et al.*, 2003; Talavera *et al.*, 2005). Internacionalmente, la industria minera se ha convertido en una de las fuentes primarias de metales pesados hacia el ambiente, afectando tanto ecosistemas terrestres como acuáticos. Los cambios en el paisaje, la destrucción de suelos agrícolas, el drenaje ácido de mina (DAM), originado por los depósitos de residuos mineros, minas abandonadas y la contaminación del aire por transporte de partículas suspendidas son, entre otras, evidencias significativas del impacto ambiental que ha generado dicha industria (Salomons *et al.*, 1995; Mendoza-Amézquita *et al.*, 2006; Gutiérrez-Ruiz *et al.*, 2007; Méndez-Ortiz *et al.*, 2007).

Los jales son residuos de los procesos de trituración y molienda de las rocas hasta la obtención del mineral deseado por diferentes procesos físicos y químicos. Estos jales pueden contener sulfuros, minerales de ganga (cuarzo, clorita, feldespatos, etc.) y residuos de los reactivos utilizados en los procesos de beneficio. Una vez expuestos a la intemperie es posible que se oxiden y generen drenaje ácido con un alto contenido de metales que en época de lluvia son arrastrados a los arroyos y ríos cercanos; mientras que en época de secas puede existir un arrastre de particulado fino (con altos contenidos de metales) por acción del viento al ambiente lo que también altera la calidad de las aguas en su entorno (Méndez, 2001; Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach, 2006; Romero *et al.*, 2008).

El objetivo del presente estudio consistió en evaluar

la calidad del agua a lo largo de un transecto del Río Taxco en relación con los contenidos de Zn, As, Fe, Pb, Cu y Cd, así como de indicadores de materia orgánica (demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de Oxígeno (DBO₅) y carbono orgánico disuelto (COD)). La distribución de los metales y arsénico en fase disuelta o particulada se relacionó con su comportamiento geoquímico, las características físico-químicas del agua, y los posibles aportes a lo largo del cauce con la finalidad de contribuir a determinar las posibles fuentes de contaminación por metales al Río Taxco así como los principales factores que influyen en su movilidad.

ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se efectuó en el área de Taxco de Alarcón que se encuentra en la región norte del estado de Guerrero (Figura 1). Se localiza en la Provincia de la Sierra Madre del Sur, subprovincia 67 en la Depresión del Balsas, con un sistema de toposformas de sierras con cañadas. Debido a la fisiografía del municipio, se presenta una variedad de climas que van desde cálido hasta templado subhúmedo con lluvias en verano (Acw₀) según la clasificación climática de Köppen. En la zona de estudio, la época de lluvias abarca los meses de junio a octubre, con una precipitación máxima en septiembre de 275 mm, mientras que en la época de secas la precipitación promedio es de 21.2 mm en el mes de febrero (de Cserna y Fries, 1981; Romero *et al.*, 2007).

La zona de estudio se localiza en la parte media superior de la cuenca hidrográfica del Balsas que muestra elevaciones hasta de 2,400 msnm hacia el norte y elevaciones de 1,200 msnm en las partes más bajas que se localizan en el sur; en la zona central hay presencia de cañadas. El río exhibe una orientación N-S (Barrera, 2001).

El Río Taxco se encuentra entre la Formación Mexcala

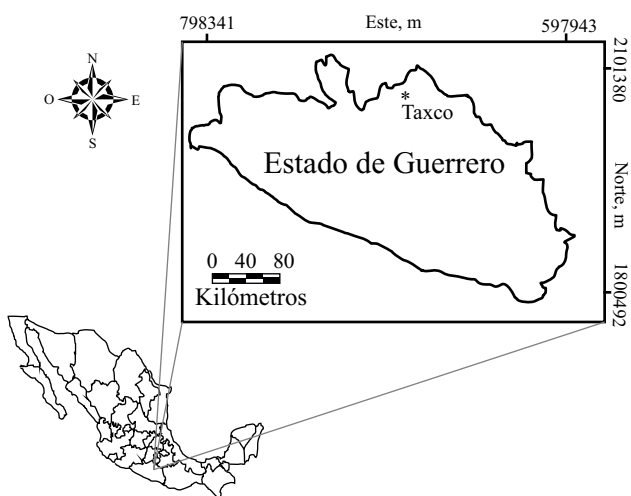


Figura 1. Mapa general de la zona de estudio en el estado de Guerrero, México.

y la Formación Morelos. La primera se caracteriza por la presencia de lutita, limonita, arenisca y un conglomerado de caliza de origen marino que corresponden al Cretácico Superior. La Formación Morelos se compone principalmente de caliza de plataforma con algunos horizontes dolomitizados (montículos arrecifales) que pertenecen al Cretácico Inferior (de Cserna y Fries, 1981; Bustamante-García *et al.*, 2004; Centeno-García *et al.*, 2008).

La hidrografía del área, se encuentra controlada por su litología. El drenaje desarrollado en las rocas volcánicas (riolita) es de tipo rectangular-angular condicionado por el sistema de fracturamiento interno de las rocas (diaclasamiento) que sufrieron al enfriarse. Las calizas presentan una red subdendrítica espaciada a errática controlada por la permeabilidad de estas rocas y por su capacidad de desarrollar estructura kárstica. Por otro lado, las lutitas y areniscas poseen un drenaje dendrítico abundante condicionado por la poca o nula permeabilidad que caracteriza a este tipo de rocas (Dótor, 2007).

Se ubicaron siete puntos de muestreo sobre el Río Taxco y sus afluentes elegidos en sitios donde se intersectan con el cauce principal y uno más a la salida de la ciudad (Figura 2, Tabla 1), de tal forma que fueran representativos de la problemática de contaminación por metales pesados; uno de estos puntos se encuentra a un lado de la pila de jales y otro de ellos pertenece al afluente del río Cacalotenango en el cual han sido reportadas altas concentraciones de plomo (Romero *et al.*, 2007; Arcega-Cabrera *et al.*, 2009).

MÉTODOS

Se tomaron muestras simples por triplicado durante la temporada de lluvias y secas en el 2008, las muestras de agua fueron colectadas de acuerdo a la Asociación Americana de Salud Pública (APHA, 2005).

Para evaluar la calidad de las aguas del Río Taxco se determinaron los siguientes parámetros: pH, C.E., temperatura, sólidos disueltos totales, CO₃²⁻, HCO₃⁻, Mg²⁺, Ca²⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, SDT, DQO, DBO₅, COD y algunos metales y metaloides como Zn, As, Fe, Pb, Cu y Cd.

En cada sitio de muestreo se midieron *in situ* el pH, C.E. y temperatura, utilizando un potenciómetro-conductímetro Conductronic PC18. Para la medición del pH se calibró el potenciómetro con soluciones buffer pH 4, 7 y 10 sumergidas en el río hasta estabilizar su temperatura. La conductividad eléctrica se determinó calibrando el conductímetro con una solución de referencia de NaCl (1,990 µS/cm) y posteriormente se sumergió el electrodo en el río permitiendo su estabilización. También se determinó la concentración de oxígeno disuelto mediante potenciometría con un equipo YSI modelo 51B. El flujo se midió con un equipo Water Global modelo FP201.

Las muestras en las que se llevó a cabo la determinación de metales fueron colectadas en botellas de polipropileno de 250 ml previamente lavadas con HCl 1 N y

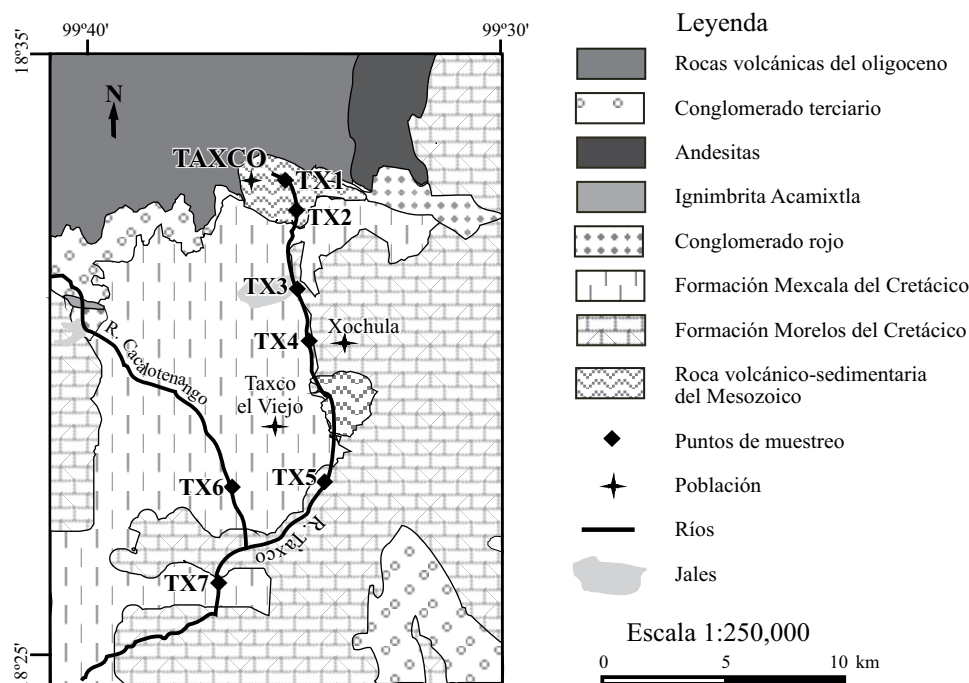


Figura 2. Mapa que muestra la zona de estudio, ubicación de los puntos de muestreo a lo largo del Río Taxco y litología de la zona. Mapa modificado de la carta Geológica Cuernavaca del Consejo de Recursos Minerales (Rivera-Carranza *et al.*, 1998), incluye datos de Alaniz-Álvarez *et al.* (2002).

enjuagadas con agua destilada. Para el análisis de metales totales, se acidificaron a pH 2 con HNO₃ concentrado para evitar problemas de adsorción y precipitación, también se tomaron muestras de agua sin acidificar que se filtraron posteriormente, para conocer la concentración de metales disueltos, los cuales se diferencian de los totales por ser aquellas especies que no son retenidas por filtración a través de una membrana de poro de 0.45 μm . Los metales en forma particulada se calcularon a partir de la diferencia de concentraciones de los metales totales menos los metales disueltos (Jain *et al.*, 2005). Todas las muestras se conservaron en refrigeración hasta su análisis.

Los análisis de cationes y aniones mayores se llevaron a cabo utilizando las técnicas descritas en Armienta *et al.* (1987) y APHA (2005). Para determinar las concentraciones de los metales se empleó un espectrofotómetro de absorción atómica con generador de hidruros modelo 2380 marca Perkin Elmer, un espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer AAnalyst 100 y horno de grafito modelo HGA 850. El análisis se realizó por espectrofotometría de absorción atómica con flama, con horno de grafito (Pb) y por generación de hidruros (As). Para asegurar la calidad analítica se utilizaron muestras certificadas "High Purity Standards" para la calibración. Los límites de detección

Tabla 1. Puntos de monitoreo y variación estacional del flujo promedio en el Río Taxco.

Clave de muestra	Descripción de la estación de muestreo	Latitud	Longitud	Flujo (m ³ /s)	
				Temporada de Secas	Temporada de Lluvias
TX1	Aguas provenientes del drenaje municipal de la ciudad de Taxco	18°33.944'N	99°36.019'W	0.02	0.24
TX2	Aguas mezcladas del drenaje municipal con agua del Río Taxco	18°33.017'N	99°35.727'W	0.05	1.05
TX3	Aguas del Río Taxco al pie de los jales Guerrero	18°31.645'N	99°35.370'W	0.02	0.24
TX4	Aguas del Río Taxco en el poblado de Xochula, uso domestico y de riego agrícola	18°31.499'N	99°35.180'W	0.05	1.74
TX5	Aguas de Río Taxco a la altura de la escuela de Ciencias de la Tierra	18°28.436'N	99°34.740'W	0.08	2.58
TX6	Aguas del Río Cacalotenango	18°28.428'N	99°34.787'W	0.01	2.48
TX7	Mezcla de aguas del Río Cacalotenango y Río Taxco	18°26.938'N	99°34.949'W	0.10	1.8

establecidos fueron: Zn (0.006 mg/L), As (0.005 mg/L), Fe (0.14 mg/L), Pb (0.003 mg/L), Cu (0.009 mg/L), Cd (0.05 mg/L). Así mismo se verificó que el error en el balance de los iones principales fuera inferior al 10% (en la mayoría de los casos fue menor al 5%).

Los resultados obtenidos se compararon con los límites permisibles para el agua potable establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas NOM-001-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT, 1997) y NOM-127-SSAI-1994 (SSA, 2000), así como por la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2004).

Para evaluar la cantidad de materia orgánica presente en el Río Taxco, se determinaron la DBO₅ de acuerdo a la norma mexicana NMX-AA-028-SCFI-2001 (SE, 2001a) y la DQO conforme a la norma NMX-AA-030-SCFI-2001 (SE, 2001b) por medio del método de reflujos abierto con dicromato de potasio; el Carbono orgánico Total (COT) se cuantificó en un equipo Tekmar-Dohrmann modelo 9000 con un detector de infrarrojo no dispersivo con una curva de calibración de ftalato de hidrógeno de potasio de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 60, 100, 150 y 200 ppm y modo TC-IC 1-400 ppm.

Se utilizó el código de especiación WATEQ4F Version 2.63 (Ball y Nordstrom, 1991) con la base de datos de 2004, el cual es un programa de modelación geoquímica que calcula la distribución de las especies acuosas, las actividades de iones y los índices de saturación de minerales que indican la tendencia de un agua para disolver o precipitar un mineral utilizando datos de campo como pH, Eh, oxígeno disuelto,

temperatura y el análisis químico de las muestras de agua (Hounslow, 1995). Los coeficientes de actividad son basados en la ecuación de Debye-Huckel o de Davis dependiendo de la fuerza iónica de la solución (Drever, 1988; Ball y Nordstrom, 1991).

Cuando un mineral se disuelve en agua los cationes y aniones que lo componen alcanzan una concentración específica, el producto matemático de sus actividades (que dependen de la fuerza iónica) elevadas a su coeficiente estequiométrico en el equilibrio es conocido como producto de solubilidad (K_{ps}), si en una solución se conocen las actividades de estos iones su producto es llamado producto de actividad iónica (PAI). El PAI es comparado con el producto de solubilidad del mineral de interés en donde la razón logarítmica es llamada índice de saturación ($IS = \log(PAI/K_{ps})$). El objetivo principal de WATEQ4F es calcular los índices de saturación (IS), que indican la tendencia a disolver si $PAI < K_{ps}$ ($IS < 0$) o precipitar si $PAI > K_{ps}$ ($IS > 0$), mientras que si el $IS = 0$ el agua está en equilibrio con respecto al mineral en cuestión (Hounslow, 1995).

RESULTADOS

Con base en los resultados obtenidos, en las Figuras 3 y 4, se puede observar que tanto en temporada de secas como de lluvias los principales aniones son los bicarbonatos y sulfatos, mientras que los cationes se encuentran representados principalmente por calcio seguido de sodio y magnesio. Sin

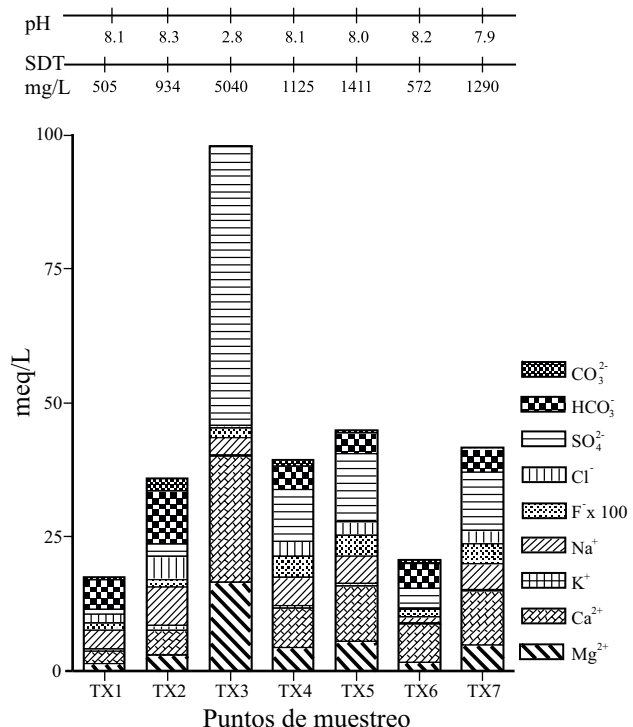


Figura 3. Distribución de elementos mayores en temporada de secas en el Río Taxco, su relación con el pH y con los sólidos disueltos totales (SDT).

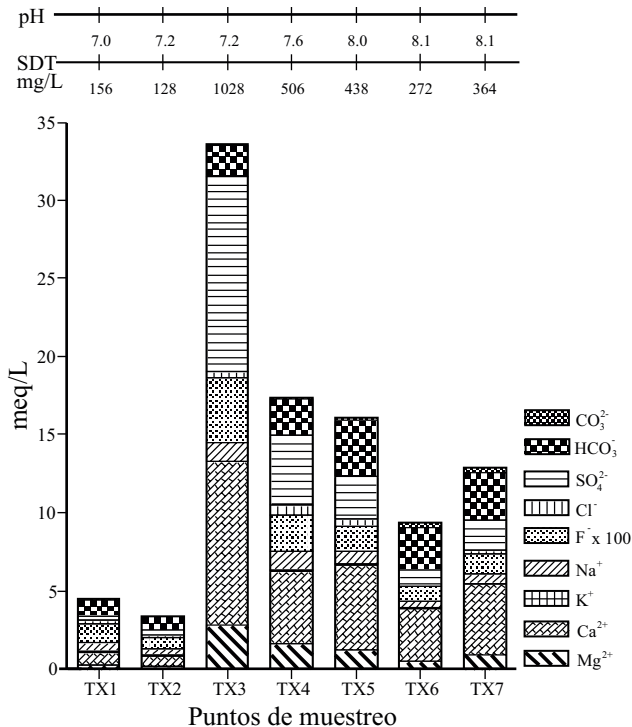


Figura 4. Distribución de elementos mayores en temporada de lluvias en el Río Taxco, su relación con el pH y con los sólidos disueltos totales (SDT).

embargo, de acuerdo a los SDT (sólidos disueltos totales) y a los flujos que se presentan en la Tabla 1, se puede observar que durante la temporada de secas el contenido de sólidos disueltos es mayor y el flujo menor en comparación con la temporada de lluvias en todo el transecto estudiado (Figura 3, Tabla 1); TX2 presentó un flujo de apenas 0.05 m³/s en temporada de secas, con una concentración de SDT de hasta 7 veces más que en época de lluvia, debido al aumento del caudal durante esta temporada (128 mg/L de SDT con un flujo promedio de 1.05 m³/s) (Tabla 1, Figuras 3 y 4). El flujo promedio en temporada de lluvia en TX3 ubicado en un afluente del Río Taxco es de 0.24 m³/s, mayor que en temporada de secas (0.02 m³/s), esta corriente al unirse con el Río Taxco en TX4 cuyo flujo promedio es mayor (1.74 m³/s y 0.05 m³/s en temporada de lluvias y secas respectivamente) permite la dilución de los protones y de sólidos disueltos, así como de los metales (Tabla 2, Figuras 3 y 4).

Cabe señalar que los valores de flujo que se presentan en la Tabla 1 no podrían ser utilizados para un balance hídrico, ya que en la zona existen sumideros, tales como fracturas y extracciones directas intermitentes e irregulares del agua por bombeo que se desvían para el riego de los suelos aledaños.

Se observó un factor de dilución de los iones mayores

disueltos en temporada de lluvias; para TX1=3, TX2=7, TX3=5, TX4=2, TX5=3 TX6=2 y TX7=3, con respecto a la temporada de secas.

Durante la temporada de secas se presentan valores de pH moderadamente alcalinos en casi todos los sitios. El único valor altamente ácido correspondió al punto TX3 con un pH de 2.84. Por otro lado, en temporada de lluvias el Río Taxco mostró valores de pH neutros a ligeramente alcalinos (Figura 3 y 4).

La concentración de materia orgánica disuelta (MOD) en aguas naturales comúnmente se mide como carbono orgánico disuelto (COD); las sustancias húmicas (SH) son los principales componentes de la MOD ya que constituyen de un 40 a 60 % del COD en ambientes acuáticos (Drever, 1988; Adriano, 1992; Senesi, 1993). Los resultados de DQO y DBO₅ reflejaron aportes de materia orgánica en las dos campañas muestreadas, con valores que corresponden en temporada de lluvias, según la clasificación de la Comisión Nacional del Agua (2008), a agua altamente contaminada para TX1 y TX2 (DQO >200) y contaminada para TX4 y TX5 (DQO entre 40 y 200) (Figura 5a y 5b). La influencia de las aguas residuales y de las calizas se refleja en las concentraciones de carbono orgánico e inorgánico con valores máximos en TX1 (CT= 131.9 ppm C) y TX2

Tabla 2. Concentraciones máximas en el Río Taxco.

Metal	Límite permisible (mg/L)			Concentraciones máximas (mg/L)			
	A	B	C	Secas		Lluvias	
				Disuelto	Particulado	Disuelto	Particulado
Fe	0.30	-	-	49.50 (TX3)	0.38 (TX1) 0.84 (TX2) 54.5 (TX3) 1.45 (TX4) 0.77 (TX5) 0.71 (TX7)		0.34 (TX1) 0.34 (TX2) 28.10 (TX3) 3.72 (TX4) 1.87 (TX5) 0.45 (TX6) 1.20 (TX7)
Zn	5.00	10	-	245.83 (TX3) 3.46 (TX5) 1.56 (TX7)	40.16 (TX4) 4.78 (TX5) 4.10 (TX7)	17 (TX3)	26.30 (TX3) 11.56 (TX4)
Pb	0.01	0.5	0.01	0.012 (TX1) 0.021 (TX2) 0.210 (TX3) 0.024 (TX4) 0.026 (TX5) 0.014 (TX6) 0.026 (TX7)	0.012 (TX4)	0.022 (TX3) 0.018 (TX4) 0.015 (TX5) 0.009 (TX6) 0.011 (TX7)	0.027 (TX3) 0.019 (TX4) 0.025 (TX5) 0.007 (TX6) 0.026 (TX7)
Cu	2.00	4.0	2.00	3.94 (TX3)	0.04 (TX3)		
Cd	0.005	0.2	0.003	1.73 (TX3) 0.020 (TX4) 0.030 (TX5)	0.05 (TX3) 0.32 (TX4) 0.05 (TX5) 0.05 (TX7)	0.2 (TX3) 0.08 (TX4)	0.12 (TX3) 0.05 (TX4)
As	0.025	0.2	0.01	0.014 (TX1) 0.022 (TX6)	0.02 (TX2) 0.015 (TX3) 0.017 (TX4)	0.005 (TX7)	0.047 (TX3) 0.016 (TX4) 0.007 (TX7)

A: NOM 127-SSA1-1994 (SSA, 2000), B: NOM-001-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT, 1997), C: WHO's Drinking Water Standards (WHO, 2004). * Límites permisibles para concentraciones de metales totales (metales disueltos + metales particulados).

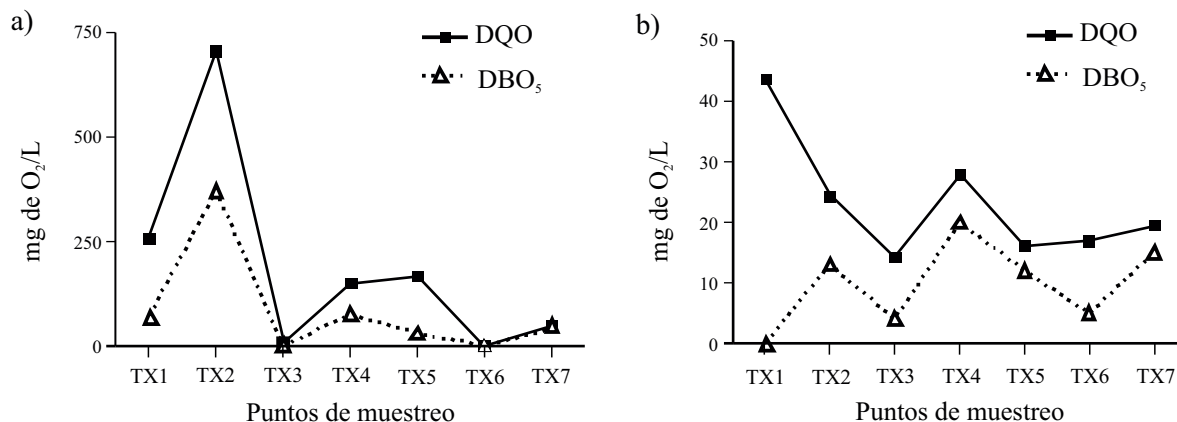
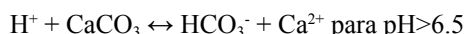


Figura 5. Distribución de materia orgánica en el Río Taxco en relación a la DQO y DBO. (a) corresponde a la temporada de secas y (b) corresponde a la temporada de lluvias. En donde DQO significa Demanda Química de Oxígeno y DBO₅ Demanda Bioquímica de Oxígeno.

(CT= 277.2 ppm C) en la época de secas (Figura 6a y 6b) debido al aporte de materia orgánica de las aguas crudas municipales de TX1, aunado a la disolución de caliza que incrementa la concentración de bicarbonatos aguas abajo (Figuras 3 y 4).



Los metales y metaloides analizados se encuentran distribuidos tanto en la fase disuelta como en la fase particulada, en las dos campañas de muestreo. Sin embargo, durante la temporada de secas se encontraron las mayores concentraciones.

El Fe (Figura 7a) total (hasta 28 y 104 mg/L en temporada de lluvias y de secas respectivamente) rebasó el límite permisible (0.3 mg/L) de acuerdo a la norma oficial NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 2000), en todos los puntos del transecto del Río Taxco (Tabla 2). En temporada de lluvia el Fe se encontró solamente en forma particulada (0.3 – 28 mg/L). Los resultados de la modelación geoquímica para el Fe indican que se encuentra principalmente como hidróxidos

de Fe hasta en un 84 % en temporada de lluvias, con IS>0 para la goetita y la ferrihidrita, a partir del punto TX3 a TX7 lo cual es favorecido por el pH y las condiciones redox en estos puntos de muestreo (Tabla 3). De igual forma en el periodo de secas el Fe se detectó principalmente en forma particulada en todas las muestras en un rango de 0.3 a 54 mg/L, sin embargo, en TX3 además de encontrarse en forma particulada se detectó en forma disuelta (49 mg/L).

El Zn está presente en todas las muestras del transecto del río (Figura 7b), pero en TX3 durante la temporada de secas se incrementa hasta 245 mg/L en forma disuelta rebasando el LMP por la NOM-127-SSA1-1994 de 5 mg/L (SSA, 2000) y la NOM-001-SEMARNAT-1996 de 10 mg/L (SEMARNAT, 1997) (Tabla 2) y continúa aguas abajo en altas concentraciones pero menores que en TX3. Con base en la simulación realizada con WATEQ4F el Zn²⁺ fue la principal especie presente en proporciones de hasta 61 % en temporada de secas y 50% en temporada de lluvias. Por otra parte, en la muestra TX6 que es el afluente que corresponde al río Cacalotenango, no se detectó Zn en temporada de secas y sólo 0.15 mg/L de Zn en temporada de lluvias en forma

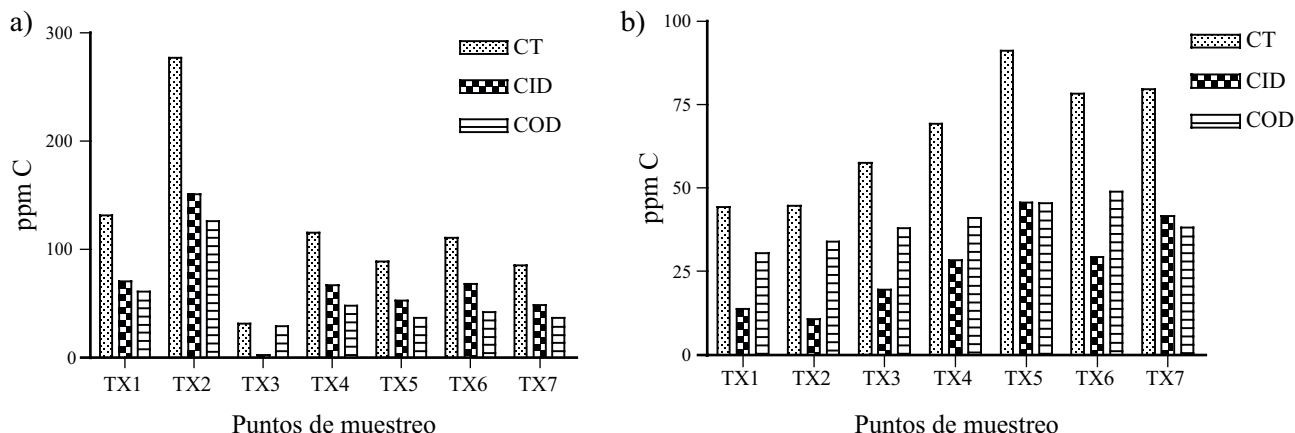


Figura 6. Distribución del contenido de materia orgánica basada en la determinación de carbono en el Río Taxco. (a) corresponde a la temporada de secas y (b) corresponde a la temporada de lluvias. En donde CT significa Carbono Total, CID Carbono Inorgánico Disuelto y COD Carbono Orgánico Disuelto.

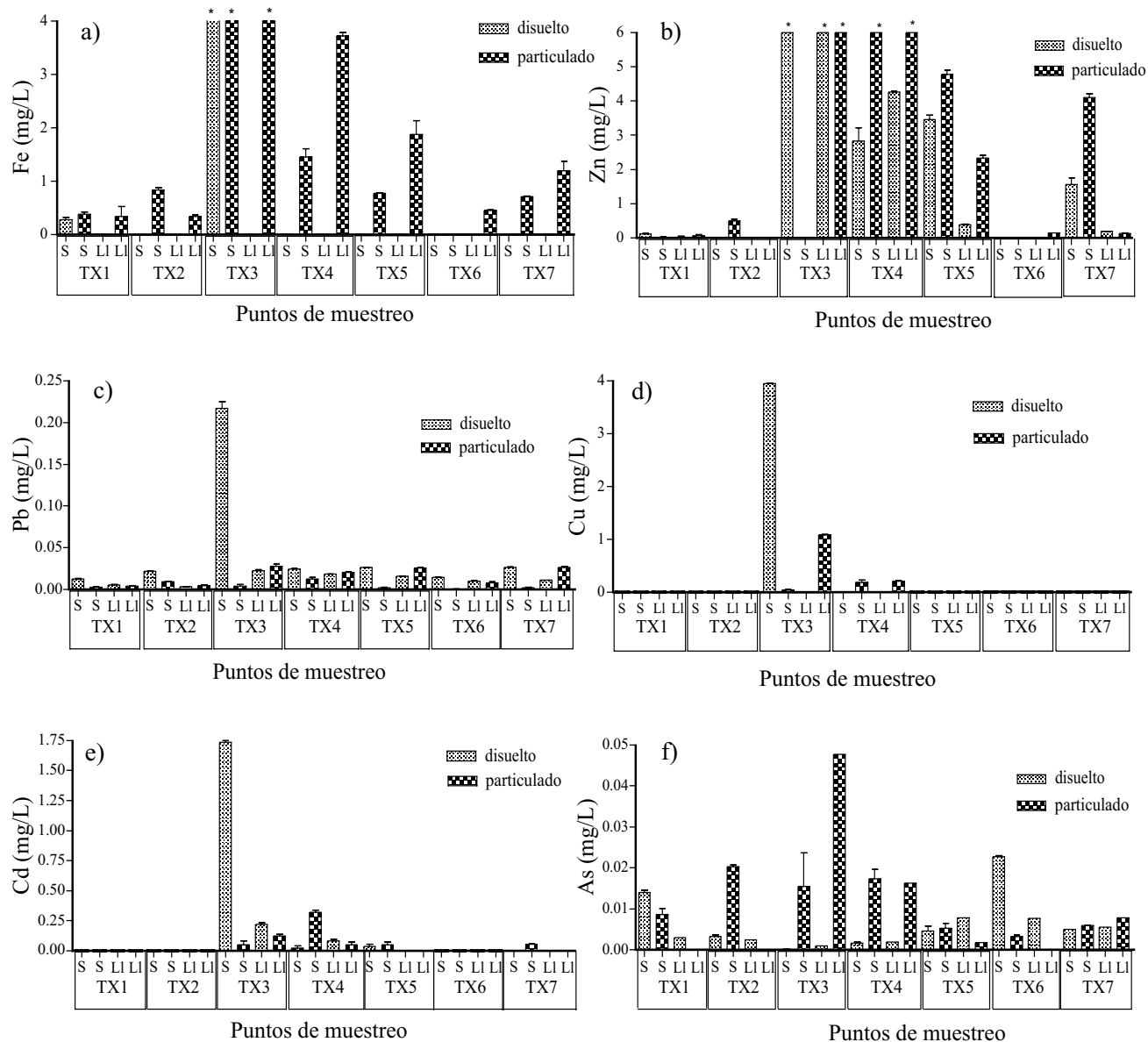


Figura 7. a: Distribución de Fe en el Río Taxco. S significa temporada de secas y LI temporada de lluvias. Los asteriscos (*) indican que los valores rebasan la escala que se muestra en el eje y sus valores son: 49.5 mg/L para TX3-S disuelto, 54.5 mg/L para TX3-S particulado y 28 mg/L para TX3-LI particulado. Los sitios en donde no se observa barra corresponden a concentraciones no detectables. b: Distribución de Zn en el Río Taxco, en donde S significa temporada de secas y LI temporada de lluvias. Los asteriscos (*) indican que los valores rebasan la escala que se muestra en el eje y sus valores son: 245.8 mg/L para TX3-S disuelto, 17 mg/L para TX3-LI disuelto, 26.3 mg/L para TX3-LI particulado y 40.1 mg/L para TX4-S particulado y 11.5 mg/L para TX4-LI particulado. Los sitios en donde no se observa barra corresponden a concentraciones no detectables. c: Distribución de Pb en el Río Taxco, en donde S significa temporada de secas y LI temporada de lluvias. Los sitios en donde no se observa barra corresponden a concentraciones no detectables. d: Distribución de Cu en el Río Taxco. La información adicional de la figura se encuentra en la leyenda de la Figura 7c. e: Distribución de Cd en el Río Taxco. La información adicional de la figura se encuentra en la leyenda de la Figura 7c. f: Distribución de As en el Río Taxco. La información adicional de la figura se encuentra en la leyenda de la Figura 7c.

particulada, principalmente como carbonatos hasta en un 45%, mientras que en el punto TX7 el cual es el producto de la mezcla de TX5 y TX6, se observó una disminución en la concentración de Zn con respecto a TX5.

Las concentraciones de plomo durante la temporada de secas se encontraron por arriba del límite permitido de 0.01 mg/L (SSA, 2000; WHO, 2004), en todos los sitios muestreados principalmente en la fracción disuelta (0.21

mg/L en TX3), mientras que en temporada de lluvias sólo a partir del punto TX3 (0.05 mg/L de Pb total) se rebasaron los LMP (Figura 7c, Tabla 2). Las especies potenciales son $PbCO_{3ac}$ hasta en un 93 %, mientras que en temporada de secas en TX3 se favorecen las especies de Pb^{2+} (38 %) y $PbSO_{4ac}$ (56 %).

El cobre (Figura 7d, Tabla 2) sólo se detectó en los puntos TX3 y TX4. En temporada de secas, el Cu se

Tabla 3. Índices de Saturación.

Muestra	Aragonita	Calcita	Yeso	Jarosita-K	Dolomita(c)	Esmiltonita	Ferrihidrita	Goetita	Cuarzo	Otros
<i>Temporada de secas</i>										
TX1	-0.55	-0.40	-2.13	1.90	-1.12	-1.92	3.02	8.51	1.12	Cerusita (-1.19), fluorita (-2.33), magnesita (-1.25), ZnSiO ₃ (1.45), siderita (-1.48), Fe ₃ (OH) ₈ (3.00)
TX2	0.64	0.79	-1.60	0.02	1.43	-0.89	2.52	8.20	0.98	Cerusita (-0.92), magnesita (0.07), Pb(OH) ₂ (-2.46), willemita (-0.53), zincita (-2.27), ZnSiO ₃ (2.90), Fe ₃ (OH) ₈ (4.38)
TX3	-	-	-0.08	-0.36 (Na)	-	-	-1.53	4.10	0.90	Magnetita (1.38), goetita (4.10), anglesita (-1.14) anhidrita (-0.32), cupreferrita (0.77)
TX4	0.11	0.26	-0.87	-0.44 (Na)	0.30	0.74	3.45	9.02	0.78	Cerusita (-0.80), magnesita (-0.51), zincita (-0.57) Pb(OH) ₂ (-2.29), Cu(OH) ₂ (-1.53) otavita (0.73), Fe ₃ (OH) ₈ (2.65)
TX5	0.38	0.53	-0.66	2.85	0.81	0.11	3.24	8.80	0.77	Cerusita (-0.90), fluorita (-0.98), magnesita (-0.28), zincita (-0.89), Pb(OH) ₂ (-2.09), otavita (0.26), Fe ₃ (OH) ₈ (0.56)
TX6	0.41	0.56	-1.17	-	0.48	-	-	-	0.63	Cerusita (-1.21), magnesita(-0.63), Pb(OH) ₂ (-2.56)
TX7	0.76	0.91	-0.72	1.69	1.52	0.12	3.22	8.80	0.76	Cerusita (-0.91), magnesita(0.06), zincita (-0.54), Pb(OH) ₂ (-1.75), otavita (0.45), Fe ₃ (OH) ₈ (0.48)
<i>Temporada de lluvias</i>										
TX1	-0.87	-0.72	-2.86	-1.91	-1.91	-1.81	2.54	8.32	0.79	Cerusita (-1.45), fluorita (-2.75), magnesita (-1.76), zincita (-2.05) Pb(OH) ₂ (-1.84), Fe ₃ (OH) ₈ (-2.05)
TX2	-1.12	-0.98	-2.90	-1.60	-2.64	-	2.77	8.41	0.74	Cerusita (-1.47), magnesita(-2.21), Pb(OH) ₂ (-1.97), Fe ₃ (OH) ₈ (-2.20)
TX3	0.26	0.41	-0.63	1.46 (Na)	0.35	0.82	4.41	10.23	0.65	Cerusita (-0.74), anhidrita (-0.86), magnesita (-0.63), Fe ₃ (OH) ₈ (2.91), Pb(OH) ₂ (-1.10), atacamita (-1.05), otavita (0.73), Zn(OH) ₂ SO ₄ (-1.94), ZnCO ₃ ·H ₂ O (1.11)
TX4	-0.17	-0.02	-1.24	-0.91 (Na)	-0.41	0.32	3.49	9.30	0.68	Cerusita (-0.86), fluorita (-1.68), magnesita (-0.96), zincita (-0.42), Pb(OH) ₂ (-1.76), Cu(OH) ₂ (-1.11), Fe ₃ (OH) ₈ (1.36)
TX5	0.60	0.75	-1.36	1.04	0.94	-0.08	3.30	9.08	0.61	Cerusita (-0.81), fluorita (-1.86), magnesita (-0.38), zincita (-0.55), Pb(OH) ₂ (-1.44), Fe ₃ (OH) ₈ (0.46)
TX6	0.43	0.58	-1.92	-1.99	0.37	-1.33	2.80	8.51	0.67	Cerusita (-1.39), magnesita(-0.77), zincita (-1.73), Pb(OH) ₂ (-1.95), Fe ₃ (OH) ₈ (-1.47)
TX7	0.71	0.85	-1.55	-0.49	1.09	-0.98	3.18	8.92	0.65	Cerusita (-0.93), magnesita (-0.33), zincita (-1.24), Pb(OH) ₂ (-1.34), Fe ₃ (OH) ₈ (-0.97)

encontró principalmente en forma disuelta (3.94 mg/L) rebasando los LMP de 2.0 mg/L establecidos por la norma oficial (SSA, 2000) y por los límites permisibles en agua para consumo humano internacionales (WHO, 2004) en TX3. El Cu forma complejos con ligandos orgánicos e inorgánicos en sistemas acuáticos, pero en ambientes ácidos (pH<7) y libres de materia orgánica como es el caso de TX3 el Cu²⁺ es la especie potencialmente dominante con aproxi-

madamente el 66% y en forma de CuSO_{4ac} con un 33% siendo las más disponibles. Por otro lado, en TX4 el Cu además de estar como carbonatos (30%), se encuentra asociado con las sustancias húmicas en un 41.95 % debido a la cantidad de materia orgánica y a las condiciones fisicoquímicas de este sitio (Figura 6).

En temporada de lluvias (pH 7.2) disminuye la concentración total de Cu (1.08 mg/L) respecto a la temporada

de secas y se encuentra en forma particulada principalmente como $\text{Cu}(\text{OH})_2$ en TX3 hasta en un 64 % y 16.88 % en la fracción húmica de acuerdo a los resultados obtenidos con WATEQ4F, sin embargo, gradiente abajo de los jales mineros su concentración disminuye, y en TX4 sólo lo encontramos en forma particulada (0.2 mg/L).

En lo que respecta al Cd no se detectó en el desagüe municipal ni en TX2, solamente a partir del punto TX3 (Figura 7e) se presentó principalmente en forma disuelta (1.7 mg/L) rebasando el LMP de 0.2 mg/L de la norma oficial mexicana (SEMARNAT, 1997) (Tabla 2). Sin embargo, su concentración disminuyó aguas abajo hasta 0.05 mg/L en TX7 en temporada de secas. La especiación del Cd no es afectada por los niveles de ligandos orgánicos normalmente encontrados en aguas naturales (Bodek *et al.*, 1988), pero sí por las partículas de Fe con cuya concentración se observó correlación ($r = 0.94$) en temporada de secas.

El As (Figura 7f) se encontró en temporada de secas y de lluvias (Tabla 2), en todos los puntos del transecto del Río Taxco. En los puntos TX1 y TX6 una proporción importante se transporta en forma disuelta (0.014 y 0.022 mg/L respectivamente), mientras que en TX2, TX3 y TX4, predomina la forma particulada (0.02, 0.015 y 0.017 mg/L respectivamente) en época de secas, rebasando el LMP de 0.01 mg/L (WHO, 2004). De acuerdo a los datos obtenidos de la modelación con WATEQ4F, las principales especies son el HAsO_4^{2-} y el H_2AsO_4^- .

DISCUSIÓN

Los rangos de pH observados en el Río Taxco, son acordes a la geología de la zona con presencia importante de roca caliza perteneciente a la Formación Morelos (Figura 2). Sin embargo, las condiciones ácidas y altos contenidos de sulfatos (2497 mg/L) en temporada de secas en TX3, indican la influencia de la oxidación de pirita y otros minerales sulfurosos que están presentes en los jales depositados en la ribera de este punto de muestreo. Mientras que durante la época de lluvias, el punto TX3 tuvo un pH neutro y presentó la mayor proporción de sulfato y calcio respecto a los otros sitios (Figura 4). Estas características se deben a la neutralización de aguas con influencia de drenaje ácido (con elevadas proporciones de sulfatos y pH ácido) por caliza y dolomita, así como a la disolución directa del yeso y anhidrita entre otros, que se encuentran en los sedimentos de este río (Armienta *et al.*, 2004) y cuyas concentraciones en el agua indicaron condiciones cercanas a la saturación (Tabla 3).

En el transecto estudiado del Río Taxco, se pudieron identificar puntos de descarga de aguas residuales con una alta carga de materia orgánica y carbono orgánico disuelto, principalmente en TX1 y TX2 que corresponden a las aguas crudas que provienen del drenaje municipal, y río abajo en TX4 en el cual se encuentran algunos asentamientos humanos y actividades de pastoreo. Durante la temporada de

secas existe hasta 5 veces más materia orgánica (TX2) que en temporada de lluvias (Figuras 5 y 6), ya que durante esta última época existe un flujo promedio mayor (1.05 m^3/s), lo que favorece la oxigenación y por lo tanto la oxidación de la materia orgánica. Mientras que en época de secas el flujo promedio fue de 0.05 m^3/s , que propicia el estancamiento y la acumulación de materia orgánica.

En lo que respecta a los metales, el Fe aunque no es considerado tóxico, es de gran importancia ambiental ya que interacciona con otros metales. Esta interacción se debe a la formación de óxidos e hidróxidos de hierro los cuales tienen una gran capacidad de adsorción (Bodek *et al.*, 1988), y cuya formación está favorecida en el Río Taxco como lo indican los índices de saturación calculados (Tabla 3). Con sustancias orgánicas el Fe (III) a pH 6.8, forma complejos más estables que el Fe (II), y además se acompleja con Cl^- , F^- , SO_4^{2-} y PO_4^{3-} (Adriano, 1992; Gaillardet *et al.*, 2005). Las altas concentraciones de Fe en forma disuelta en TX3 en temporada de secas, son promovidas por las condiciones de pH (2.8) que en este punto favorecen la disolución de los compuestos de Fe, principalmente de hidróxidos de hierro, las cuales son más solubles en condiciones ácidas; mientras que la disolución de sales férricas sulfatadas con una K_{ps} baja (FeSO_4 $k_{ps} = 6.3 \times 10^{-18}$ a 25 °C), no es influida por los cambios de pH en los medios naturales debido a que el SO_4^{2-} es una base débil y por lo mismo tiene poca tendencia a combinarse con un protón (Brown y Lemay, 1985). Con base en lo anterior el Fe no se encuentra disponible ya que tiende a precipitar formando compuestos más estables, a excepción del punto TX3.

Por otra parte, la disminución de Zn en la columna de agua en TX7 podría deberse a su sorción sobre oxihidróxidos de hierro y la formación de carbonatos y silicatos como lo indican los índices de saturación para la esmitsonita y la zincita en varios de los sitios (Tabla 3) y su posterior depósito en los sedimentos favorecido por las condiciones alcalinas (pH 8.1) y la disminución del flujo (1.8 m^3/s) en este punto. El coeficiente de correlación calculado para el Fe-Zn fue de 0.96 en temporada de secas y de 0.94 en temporada de lluvias; con base en lo anterior, podemos decir que en ambas estaciones del año un gran porcentaje de Zn se encuentra inmovilizado/movilizado en hidróxidos de Fe; sin embargo, debido a las condiciones físico-químicas en TX3 y TX4, existe una mayor movilidad y riesgo potencial de este elemento en estos puntos, ya que se encuentra en forma de Zn^{2+} .

El plomo forma complejos con ligandos inorgánicos (OH^- , CO_3^{2-} , Cl^-) y orgánicos (ácidos húmicos y ácidos fúlvicos) que se encuentran en los sistemas acuáticos. La estabilidad relativa de los compuestos de plomo está dada en la siguiente serie en orden decreciente (Fergusson, 1990):

Pb(II) inorgánico > compuestos orgánicos de Pb(IV) >
Pb(IV) inorgánico > Pb(II) orgánico

La principal forma del plomo inorgánico en el ambien-

te son las especies de Pb(II), mientras que las formas orgánicas son las de Pb tetravalente (Bradl, 2005). Con base en la modelación realizada con WATEQ4F para el Río Taxco, la mayoría del Pb se encuentra como $\text{PbCO}_{3\text{ac}}$ en todos los sitios estudiados hasta en 93 %, lo que refleja la influencia importante de caliza en la zona de estudio. Los complejos como el PbHCO_3^+ y PbCO_3^0 están presentes cuando existe una alta concentración de Pb(II) total disuelto y presencia de carbonatos.

Tanto en temporada de secas como de lluvia, TX6 rebasa los LMP para Pb, debido al arrastre de material particulado proveniente de los jales “La Concha” y “El Fraile” que se encuentran gradiente arriba, los cuales contienen altas concentraciones de Pb y minerales como la plumbosiderita y anglesita (Romero *et al.*, 2007; Arcega-Cabrera *et al.*, 2009). Sin embargo, el Río Cacalotenango presentó un flujo promedio ($0.01 \text{ m}^3/\text{s}$) que permite la sedimentación de sólidos como lo reporta Arcega-Cabrera *et al.*, (2009) evitando la entrada de estas partículas al Río Taxco, como se observa en TX7 (Figura 7c) donde se encontraron concentraciones similares al sitio TX5 (0.03 mg/L) situado sobre el Río Taxco aguas arriba de la confluencia con el Río Cacalotenango (Tabla 2).

El Cu sólo se detectó en los puntos TX3 y TX4, debido a la influencia de los jales mineros ya que el Cu se encuentra en la naturaleza principalmente en forma de óxido y de sulfuros, su forma más abundante es la calcopirita (CuFeS_2) que contiene 34 % en peso de Cu, la cual ha sido identificada en jales de Taxco (Talavera *et al.*, 2005). Las condiciones de acidez del sitio TX3 favorecen la presencia de Cu^{2+} como especie potencialmente dominante, lo cual es un riesgo para las plantas, ya que su forma iónica forma complejos estables con los grupos amino y carboxílicos, dificultando los procesos de transporte a través de las paredes celulares (Bradl, 2005). La presencia de materia orgánica en TX4 favorece el transporte del Cu en forma soluble a través de la formación de complejos.

El Cd se encuentra ampliamente distribuido gradiente abajo de los jales Guerrero (TX3), lo que indica su origen a partir de los mismos. La modelación con WATEQ4F indica, que el Cd se encuentra potencialmente disponible siendo la principal especie Cd^{2+} hasta en 63 % y $\text{CdSO}_{4\text{ac}}$ en 35 % en TX3, debido a su asociación a minerales sulfurosos que se oxidan en los jales y bajo las condiciones de pH que permiten su disolución en este punto. Sin embargo en condiciones alcalinas el Cd es adsorbido a materia particulada que puede sedimentar posteriormente, estos factores disminuyen la movilidad del Cd a lo largo del río y por lo tanto su disponibilidad (Figura 7e).

El As encontrado en las muestras del Río Taxco es resultado de la oxidación de minerales sulfurosos como la proustita (Ag_3AsS_3), la cual se ha reportado en la zona de estudio, aunado a su presencia en minerales de ganga en los jales mineros como la arsenopirita (AsFeS) (Armienta *et al.*, 2003), sin embargo, las bajas concentraciones de arsénico en la fase soluble se deben posiblemente a reacciones

de co-precipitación y sorción en oxihidróxidos de hierro, estos últimos de baja solubilidad. Mientras que durante la época de lluvia se favorece el arrastre de partículas por los escurrimientos superficiales sobre los jales hacia el río, favoreciendo la fracción particulada. En estas aguas según la modelación geoquímica, las principales especies de As son arseniatos (V), y no arsénico (III) que es más móvil, soluble y más tóxico para organismos superiores respecto al As (V) (Bradl, 2005).

CONCLUSIONES

El material geológico de la zona lutita, arenisca, limonita y caliza influye en la composición y favorece las condiciones neutras-alcalinas que presentan las aguas del Río Taxco. Los elementos que se encontraron por arriba de la norma fueron Fe, Zn, Cu y Cd. Conforme a las condiciones fisicoquímicas encontradas en el transecto estudiado y a los índices de saturación calculados podemos decir que los metales tienden a precipitar como carbonatos o hidróxidos o adsorberse sobre partículas sólidas en suspensión, principalmente hidróxidos de hierro, y se incorporan rápidamente en los sedimentos lo que disminuye su concentración total río abajo a partir de TX3. Sin embargo, el Zn, Cu y Cd representan un riesgo potencial, ya que por su impacto ambiental las especies solubles de los metales son más relevantes, dado que en esta forma son más móviles y su alcance tóxico mayor. Por lo que se sugiere implementar medidas que regulen la acidez del agua y atenúen las concentraciones de Zn, Cu, Cd, Pb, Fe y As, así como la de sulfatos principalmente en TX3. De acuerdo con la modelación, la influencia de la materia orgánica sólo fue significativa para la movilidad del cobre. Por lo tanto, debe impedirse el arrastre de las partículas de jales y del drenaje ácido producido, esto podría lograrse mediante la construcción de barreras físicas para las partículas y con sistemas de tratamiento pasivos para el drenaje ácido.

Las condiciones ácidas y la mineralogía de los jales del punto TX3 favorecen las altas concentraciones de Fe, Zn, Cd, Cu y Pb en el río. El aporte de este afluente al Río Taxco en temporada de secas es apenas de $0.02 \text{ m}^3/\text{s}$ y en lluvias de $0.24 \text{ m}^3/\text{s}$. Sin embargo, la contribución de metales a partir de TX3 al río es evidente.

Los valores de DQO y DBO mostraron que el agua no es adecuada para consumo humano, principalmente en aquellos sitios cercanos a las descargas urbanas, por lo que es indispensable su tratamiento antes de ser vertidas al Río Taxco.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a DGAPA, proyecto PAPIIT: Movilidad de metales y metaloides tóxicos en el Río Taxco (IN114908). A O. Cruz, N. Ceniceros y A. Aguayo

(Laboratorio de Química Analítica, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México), por su apoyo en la realización de los análisis químicos y a M. Hernández de la Unidad de Análisis Ambiental (Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México) por el apoyo en la determinación de CT. Agradecemos así mismo las valiosas sugerencias y observaciones de los árbitros, las cuales han enriquecido sustancialmente este trabajo.

REFERENCIAS

- Adriano, D.C., 1992, Biogeochemistry of trace Metals: USA, Lewis Publishers, 513 pp.
- Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego, A.F., Morán-Zenteno, D.J., Alba-Aldave, L., 2002, Rhyolitic volcanism in extension zone associated with strike-slip tectonics in the Taxco region, southern Mexico: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 118, 1-14.
- American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Environment Federation (WEF), 2005, Standard methods for the Examination of Water and Wastewater: Washington, D.C., American Public Health Association, Vol. 1, 21th ed., 900 pp.
- Arcega-Cabrera, F., Armienta, M.A., Daesslé, L.W., Castillo-Blum, S.E., Talavera, O., Dótor, A., 2009, Variations of Pb in a mine-impacted tropical river, Taxco, Mexico: use of geochemical, isotopic and statistical tools: Applied Geochemistry, 24, 162-171.
- Armienta, M.A., Zamora, V., Juárez, S.F., 1987, Manual para el Análisis Químico de Aguas Naturales, en el Campo y en el Laboratorio: México D.F., Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Comunicaciones técnicas, Serie Docencia y Divulgación No. 4, 83 pp.
- Armienta, M.A., Talavera, O., Morton, O., Barrera, M., 2003, Geochemistry of Metals from Mine Tailings in Taxco, México: Environmental Contamination and Toxicology, 71, 387-393.
- Armienta, M.A., Talavera, O., Villaseñor, G., Espinosa, E., Pérez-Martínez, I., Cruz, O., Ceniceros, N., Aguayo, A., 2004, Environmental behaviour of metals from tailings in shallow rivers: Taxco, Central Mexico: Applied Earth Sciences, 113, 76-82.
- Ball, J.W., Nordstrom, D.K., 1991, User's manual for WATEQ4F, with revised thermodynamic data base and test cases for calculating speciation of major, trace, and redox elements in natural waters, U.S. Geological Survey Open-file Report, 91-183, Abril 2001, (en línea), <<http://www.wr.cr.usgs.gov/projects/GWC.../wq4fdoc.p>>
- Barrera, M., 2001, Geoquímica de Metales Pesados en los Jales de El Fraile. En el Municipio de Taxco, Guerrero: México, D.F., Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de maestría, 59 pp.
- Bodek, I., Lyman, W., Reehl, W., Rosenblatt, D., 1988, Environmental Inorganic Chemistry: Properties, processes, and estimation methods: New York, Pergamon, 1199 pp.
- Bohn, L., 1993, Química del Suelo: México, Ed. Limusa, S.A. de C.V., 370 pp.
- Bradl, H.B., 2005, Heavy Metals in the Environment: Origin, interaction and Remediation, Interface Science & technology: Amsterdam, Elsevier Academic, 269 pp.
- Brown, T.L., Lemay Jr.H.E., 1985, Química La Ciencia Central: México, Prenticell-Hall Hispanoamericana, S.A., 893 pp.
- Bustamante-García, J., Ramírez-Espinosa, J., Miranda-Huerta, A., 2004, Carta Geológico-Minera Taxco E14-A68, escala 1:50,000: Pachuca, Hidalgo, México, Secretaría de Economía, 1 mapa.
- Centeno-García, E., Guerrero-Suastegui, M., Talavera-Mendoza, O., 2008, The Guerrero Composite Terrane of western Mexico: Collision and subsequent rifting in a Supra-subduction zone: The Geological Society of America Special Paper, 436, 279-308.
- Cheng, T., Allen, H.E., 2006, Comparison of zinc complexation properties of dissolved natural organic matter from different surface waters: Journal of Environmental Management, 80, 222-229.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2008. Estadísticas del Agua en México 2008. México D.F., Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 233 pp.
- Cserna, Z. de, Fries, C., 1981, Hoja Taxco 14 Q-h (7), Geología de los Estados de Guerrero, México y Morelos: México D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Cartas Geológicas de México serie 1:100,000, 1 mapa con texto.
- Dótor, A., 2007, Fraccionamiento Geoquímica de Zn, Cu, Fe, Pb y As en Sedimentos del Río Cacalotenango en el Distrito Minero de Taxco: México D.F., Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de maestría, 107 pp.
- Drever, J.I., 1988, The Geochemistry of Natural Waters: New Jersey, Prentice Hall, 437 pp.
- Fergusson, J.E., 1990, The Heavy elements: Chemistry, Environmental impact and Health effects: Oxford, Pergamon, 614 pp.
- Gaillardet, J., Viers, J., Dupre, B., 2005, Trace Elements in River Waters, en Davis M.A. (ed.), Treatise on Geochemistry: Amsterdam, Elsevier, Vol. 5, Chapter 6.
- Gutiérrez-Ruiz, M., Romero, F. M., González-Hernández, G., 2007, Suelos y sedimentos afectados por la dispersion de jales inactivos de sulfuros metálicos en la zona minera de Santa Bárbara, Chihuahua, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 24 (2) 170-184.
- Hounslow, A.W., 1995, Water Quality Data: Analysis and Interpretation: New York, Lewis Publishers, 397 pp.
- Jain, C.K., Singhal, D.C., M.K. Sharma, 2005, Metal Pollution Assessment of Sediment and Water in the River Hindon, India: Environmental Monitoring and Assessment, 105, 193-207.
- Kelderman, P., Osman, A.A., 2007, Effect of redox potential on heavy metal binding forms in polluted canal sediments in Delft (The Netherlands): Water Research, 41, 4251-4261.
- Méndez, R.M., 2001, Fraccionamiento de arsénico en Jales de Zimapan, Hgo.: México D.F., Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de maestría, 64 pp.
- Méndez-Ortiz, B.A., Carrillo-Chavez, A., Monroy-Fernández, M.G., 2007, Acid rock drainage and metals leaching from mine waste material (tailings) of a Pb-Zn-Ag skarn deposit: environmental assessment Through static and Kinetic laboratory tests: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 24(2), 161-169.
- Mendoza-Amézquita, E., Armienta, M.A., Ayora, C., Soler, A., Ramos-Ramírez, E., 2006, Potencial lixiviación de elementos traza en jales de las minas La Asunción y Las Torres, en el Distrito Minero de Guanajuato, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 23(1), 75-83.
- Ramos-Arroyo, Y.R., Siebe-Grabach, C.D., 2006, Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: estudio de caso en el Distrito de Guanajuato, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 23(1), 54-74.
- Rivera-Carranza, E., De la Teja-Segura, M.A., Miranda-Huerta, A., Lemus-Bustos, O., Motolín-García, O., León-Ayala, V., Moctezuma-Salgado, M.D., 1998, Carta Geológico-Minera Cuernavaca E14-5, escala 1:250,000: Pachuca, Hidalgo, México, Consejo de Recursos Minerales, 1 mapa.
- Romero, F.M., Armienta, M.A., González-Hernández, G., 2007, Solid-phase control on the mobility of potentially toxic elements in an abandoned lead/zinc mine tailings impoundment, Taxco, México: Applied Geochemistry, 22(1), 109-127.
- Romero, F.M., Armienta, M.A., Gutiérrez, M.E., Villaseñor, G., 2008, Factores geológicos y climáticos que determinan la peligrosidad y el impacto ambiental de jales mineros: Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 24(2), 43-54.
- Salomons, W., Förstner, U., Mader, P., 1995, Heavy metals: problems and Solutions: Berlin, Springer Verlag, 412 pp.
- Secretaría de Economía (SE), 2001a, NMX-AA-028-SCFI-2001, Análisis de agua - Determinación de la Demanda Bioquímica de oxígeno en aguas Naturales, Residuales (DBO₅) y Residuales tratadas - Método de prueba (cancela a la NMX-AA-028-SCFI-1981). Diario Oficial de la Federación. 17 de abril del 2001.

- Secretaría de Economía (SE), 2001b, NMX-AA-030-SCFI-2001, Análisis de agua - Determinación de la Demanda Química de oxígeno en aguas Naturales, Residuales y Residuales tratadas - Método de prueba (cancela a la NMX-AA-030-1981). Diario Oficial de la Federación. 17 de abril del 2001.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 1997, Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de agua residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación. 6 de enero de 1997.
- Secretaría de Salubridad y Asistencia (SSA), 2000, Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, salud ambiental, Agua para uso y consumo humano, Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Diario Oficial de la Federación. 22 de noviembre de 2000.
- Senesi, N., 1993, Nature Interactions Between Organic Chemicals and Dissolved Humic Substances and the influence of Environmental Factors, *en* Beck A.J., Hayes M.H.B. Mingelgrin U. (eds), Organic Substances in soil and water: Natural constituents and their influences on contaminant Behaviour: London, Royal Society of Chemistry, 73-101.
- Talavera, M.O., Yta, M., Moreno, T.O., Dótor, A.A., Flores M.N., Duarte G.C., 2005. Mineralogy and geochemistry of sulfide-bearing tailings from silver mines in the Taxco, México area to evaluate their potential environmental impact: *Geofísica Internacional* 44, 49-64.
- World Health Organization (WHO), 2004, Guidelines for drinking water quality. Vol1, Recommendations: Geneva, World Health Organization, 3ª edición. 515 pp.
- Manuscrito recibido: Agosto 31, 2011
Manuscrito corregido recibido: Marzo 18, 2012
Manuscrito aceptado: Marzo 21, 2012