

Revista Electrónica Nova Scientia

Discriminación de sedimentos contaminados
con jales mineros por medio de la forma de
granos de cuarzo

Discrimination of sediments contaminated with
mine tailings using quartz grain shape

**Raúl Miranda-Avilés¹, María Jesús Puy-Alquiza¹, y Yanmei
Li¹**

¹Departamento de Minas, Metalurgia y Geología, Universidad de Guanajuato

México

Raúl Miranda-Avilés. E-mail: rmiranda@ugto.mx

Resumen

En este trabajo se presenta un método alternativo al análisis geoquímico para identificar la existencia de jales mineros en sedimentos y/o suelos por medio del análisis digital de imagen y parámetros de forma de cristales de cuarzo. El método se aplicó a jales mineros, sedimentos naturales y antropogénicos del Distrito Minero de Guanajuato. El parámetro que mejor discriminó los 3 grupos de granos de cuarzo (jales, antropogénico y natural) es la circularidad (C). La (C) promedio de cuarzo natural es 0.73, mientras que los cuarzos de jales presentan un promedio de 0.64 y los cuarzos de origen antropogénico presentan una (C) entre 0.66 a 0.67. La metodología empleada puede aplicarse en la identificación de antiguos depósitos de jales mineros que actualmente estén mezclados y/o cubiertos por la mancha urbana en antiguos distritos mineros, donde no se cuenta con referencias de su distribución. También en zonas de cultivo que contengan jales mezclados y que potencialmente aporten metales. Otra aplicación potencial puede ser en sondeos de suelos como complemento a la geoquímica, permitiendo la identificación de jales e interpolación en horizontes donde solo se cuente con pocas muestras geoquímicas.

Palabras clave: jales, factor de forma, cuarzo, análisis de imagen, ImageJ, distrito minero Guanajuato

Recepción: 04-02-2014

Aceptación: 06-08-2014

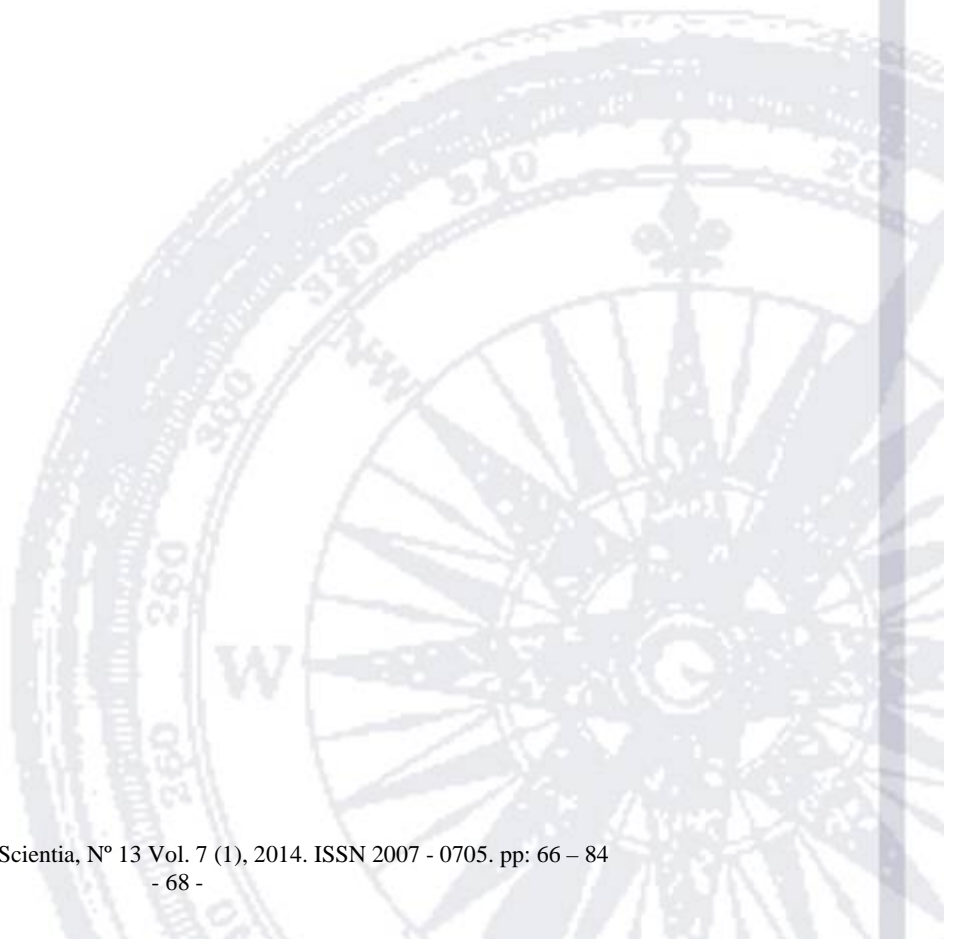
Abstract

This paper presents a method to identify mine tailings in sediments and / or soils through digital image analysis and shape parameters of quartz. The method was applied to tailings, natural and anthropogenic sediments from the Guanajuato Mining District.

The parameter that better discriminates the three groups of quartz (tailings, anthropogenic and natural) was the circularity (C). The (C) from natural quartz is 0.73, while quartz from tailings

has averaged 0.64 and anthropogenic between 0.66 and 0.67. The methodology can be applied to identify old tailings deposits covered by the urbanized areas in old mining districts, where there are no precise data on its distribution, as well as in areas of cultivated soils potentially containing tailings than can provide metals. Another potential application might be in soil profiles together with the soil geochemistry, allowing interpolation in tailings horizons without geochemical samples.

Keywords: tailings, shape factor, quartz, image analysis, ImageJ, Guanajuato mining district



Introducción

A lo largo de la historia, la actividad minera extractiva ha beneficiado minerales de interés económico. El proceso de beneficio genera residuos durante las etapas de la trituración y molienda que son sucesivamente depositados en forma de materiales denominados jales mineros. Existen zonas mineras, donde los jales han sido depositados en canales de ríos, planicies de inundación o en patios de las antiguas haciendas de beneficio. Los sedimentos con jales mineros se caracterizan por contener altas concentraciones de metales pesados por lo que en los últimos años se han realizado diversos estudios en distritos mineros de México como en Guanajuato (Ramos-Ramírez., 1991; Carrillo-Chávez *et al.*, 2003; García-Meza *et al.*, 2004; Miranda-Avilés *et al.*, 2007; 2009; 2012; Mendoza-Amézquita *et al.*, 2006; Ramos-Arroyo *et al.*, 2006; Ramos-Gómez *et al.*, 2012), Taxco (Armienta *et al.*, 2004; Talavera *et al.*, 2006; Talavera *et al.*, 2008; Romero *et al.*, 2007; Romero *et al.*, 2008; Ruiz E. A., y Armienta A., 2012), Zacatecas (Figueroa *et al.*, 2010), y Zimapan (Méndez M. y Armienta M.A., 2003; Espinoza *et al.*, 2009).

Los jales mineros contienen minerales de ganga que dependiendo del tipo de yacimiento, generalmente están constituidos hasta por un 60% de cuarzo, y en menor proporción por feldespatos, calcita, dolomita y arcillas como caolinita y esmectita. En muchos jales mineros los sulfuros por lo general no exceden el 2% , como el caso de los jales mineros del Distrito Minero de Guanajuato, donde existe de 1 a 2% de pirita (Fe_2S), marcasita (FeS_2), esfalerita [(Zn,Fe)S], calcopirita (CuFeS_2), galena (PbS), pirargirita (Ag_3SbS_3), arsenopirita (FeAsS) y pirrotita (FeS) (Vassallo, 1988).

Tomando en cuenta que un alto porcentaje del contenido de jales es cuarzo, partimos de la hipótesis donde la forma de los fragmentos de cuarzo puede emplearse como base para discriminar sedimentos que contengan o no jales mineros. Esto es considerando que durante el proceso de beneficio y separación los cristales de cuarzo son quebrados mecánicamente, lo que les confiere una forma angular, mientras que los cristales de cuarzo separados y transportados por procesos naturales tendrían formas más redondeadas.

Los parámetros clásicos de caracterización de forma de grano se basan principalmente en las dimensiones geométricas del grano, considerando la longitud del eje mayor, eje menor, el

perímetro y la aproximación al círculo (Wadell, 1932; Krumbein y Pettijohn, 1938; Lees, 1964). Estos métodos permiten caracterizar la forma de materiales granulares cuyas dimensiones son posible medir manualmente o por medio de tablas comparativas. En años recientes debido a los avances en la adquisición de imágenes digitales y a los algoritmos para el análisis de imágenes, es posible analizar un gran número de partículas en 2D con el uso de imágenes digitales adquiridas con microscopio petrográfico o lupa estereoscópica (Cox y Budhu, 2008).

El objetivo del presente trabajo fue proponer un método alternativo al análisis geoquímico para identificar la existencia o no de jales mineros en sedimentos y/o suelos por medio del análisis de imagen digital y parámetros de forma de cristales de cuarzo. El método se aplicó a tres grupos de sedimentos (naturales, jales y antropogénicos) del Distrito Minero de Guanajuato (DMG) (**Figura 1**) cuya edad, sedimentología y geoquímica fue analizada previamente por Ridgway *et al.* (1995) y Miranda-Avilés *et al.*, 2007; 2009; 2012. En este trabajo nos referimos a sedimentos naturales a los que fueron formados y depositados por procesos naturales previos a la actividad minera del DMG. En este caso los sedimentos naturales sirvieron de referencia y se definieron como tales con base en edades isotópicas ^{14}C que oscilan entre 7460 ± 40 a. C. y 500 ± 50 a. C., estudiados previamente por Miranda-Avilés *et al.* (2009). Los sedimentos antropogénicos, fueron definimos como aquellos que están constituidos por una mezcla de jales mineros y sedimentos naturales, es decir sedimentos depositados en épocas históricas relacionados con la actividad minera del Distrito Minero de Guanajuato. Los sedimentos antropogénicos estudiados, fueron depositados por procesos fluviales al menos desde el año 1660 ± 40 d. C. en la planicie aluvial del Rio Guanajuato (Miranda-Avilés *et al.*, 2007) (Fig.1).

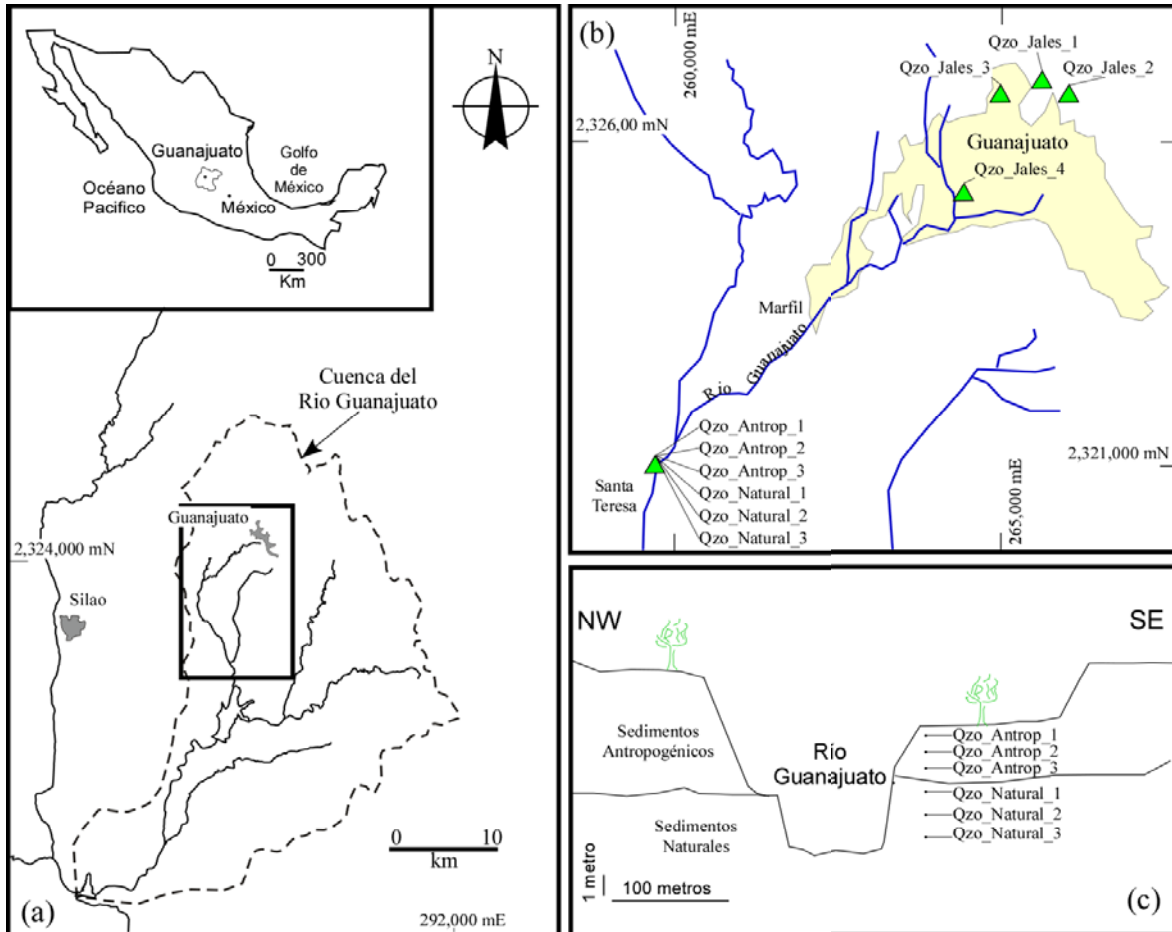


Fig.1. Localización del área de estudio. (a): Recuadro indicando el área de muestreo; (b): Ubicación de las muestras estudiadas; (c): Sección transversal de las terrazas fluviales y ubicación de muestras.

Método

Muestras analizadas

Las muestras estudiadas pertenecen a tres grupos de sedimentos (naturales, antropogénicos y jales) del Distrito Minero de Guanajuato estudiados previamente por Ridgway *et al.* (1995) y Miranda-Avilés *et al.* (2007; 2009; 2012). Se emplearon 4 muestras de jales, 3 muestras de sedimentos naturales y 3 muestras de sedimentos antropogénicos, contabilizando un total de 10 muestras (**Fig.1**). Las muestras de jales se obtuvieron de los patios de la mina de Cata (Qzo_Jales_1) (UTM 2,326, 961 mN, 265,714 mE), de Rayas (Qzo_Jales_2) (UTM 2,326,777 mN, 266,134 mE), de la Ex Hacienda de San Matías (Qzo_Jales_3) (UTM 2,326,783 mN, 265,061mE) y de los patios Nieto Piña (Qzo_Jales_4) (UTM 2,325,236 mN, 264,396 mE).

Las muestras de sedimentos naturales (Qzo_Natural_1, Qzo_Natural_2, Qzo_Natural_3) y antropogénicos (Qzo_Antrop_1, Qzo_Antrop_2, Qzo_Antrop_3) se tomaron de terrazas fluviales localizadas al suroeste del Distrito Minero de Guanajuato (UTM 2,320,899 mN, 259,687 mE) (**Fig.1**). La certeza para definirlos como tales (antropogénicos o naturales) se basa en los antecedentes históricos, sedimentología, facies y edades isotópicas ^{14}C que oscilan entre 7460 ± 40 a. C. y 500 ± 50 a. C. para los sedimentos naturales y depositados al menos desde el año 1660 ± 40 d. C. para los antropogénicos (Miranda-Avilés *et al.*, 2012).

Todas las muestras se tamizaron en húmedo separando la fracción de 0.5 a 0.25 mm, de la cual se extrajeron al menos 100 granos de cuarzo de cada una, contabilizando un total de 1000 granos. Los granos de cuarzo se montaron en un portaobjetos con cinta adhesiva de doble cara.

Parámetros de forma

Los parámetros de forma más conocidos son la redondez y la esfericidad. La redondez se relaciona a la curvatura o angulosidad del perímetro de la partícula o a la aproximación al círculo. Mientras que la esfericidad relaciona el volumen y la aproximación a la esfera (Wadell, 1932; Krumbein y Pettijohn, 1938; Lees, 1964). En análisis de imagen los parámetros de forma se limitan a las 2 dimensiones, por lo que los más usados son la redondez, la circularidad (C), compacidad y solidez (Cox y Budhu, 2008; Prakongkep, *et al.*, 2010). En el presente trabajo se estimó la redondez y la circularidad (C) o Factor de Forma de acuerdo a Wadell, 1932, donde los valores próximos a 1 se asemejan más al círculo (**Tabla 1**). La compacidad y solidez se estimó de acuerdo a Landini, (2006) (**Tabla 1**) mientras que la relación entre ejes (RE) se obtuvo dividiendo la longitud del eje mayor entre eje menor de la partícula.

Tabla 1. Parámetros de forma calculados

Parámetro de forma	Descripción	Comentario
Circularidad/factor de forma	$(4*\pi*A)/(P^2)$	A=área, P=perímetro
Redondez	$(4*A)/(\pi*L^2)$	L=eje mayor
Compacidad	$(\sqrt{4*A})/\pi/L$	L=eje mayor
Solidez	A/Ac	Ac=área del círculo que más se ajusta a la partícula

Captura de la imagen digital y procesamiento

Las imágenes de cada una de las muestras fueron capturadas utilizando un microscopio petrográfico marca Olympus BX41 con cámara digital integrada de marca Infinity con 3 megapíxeles de resolución.

Existen muchos software comerciales disponibles que capturan y procesan imágenes tomadas en microscopio. Sin embargo uno de los propósitos de nuestro trabajo fue emplear un software accesible y de dominio público (libre). Por lo que se utilizó el software desarrollado por el Instituto Nacional de la Salud en Estados Unidos (NIH) denominado ImageJ (Rasband, 2004). ImageJ tiene diferentes funciones que permiten editar y procesar las imágenes capturadas en microscopio por medio de rutinas personalizadas en java (plugins). En el presente trabajo utilizamos la rutina “Particle_8_Plus” desarrollado por Landini, (2006) que permitió determinar los parámetros de forma mostrados en la **Tabla 1**. Las imágenes capturadas originalmente en color o escala de grises son transformadas posteriormente a imágenes blanco y negro de 8 bits. Cada imagen fue revisada visualmente con el objeto de eliminar partículas de polvo o material extraño adherido en la etapa de montaje. Finalmente el perímetro de cada grano de cuarzo es vectorizado automáticamente, calculando los parámetros de forma con la rutina “Particle_8_Plus” (**Figura 2**).

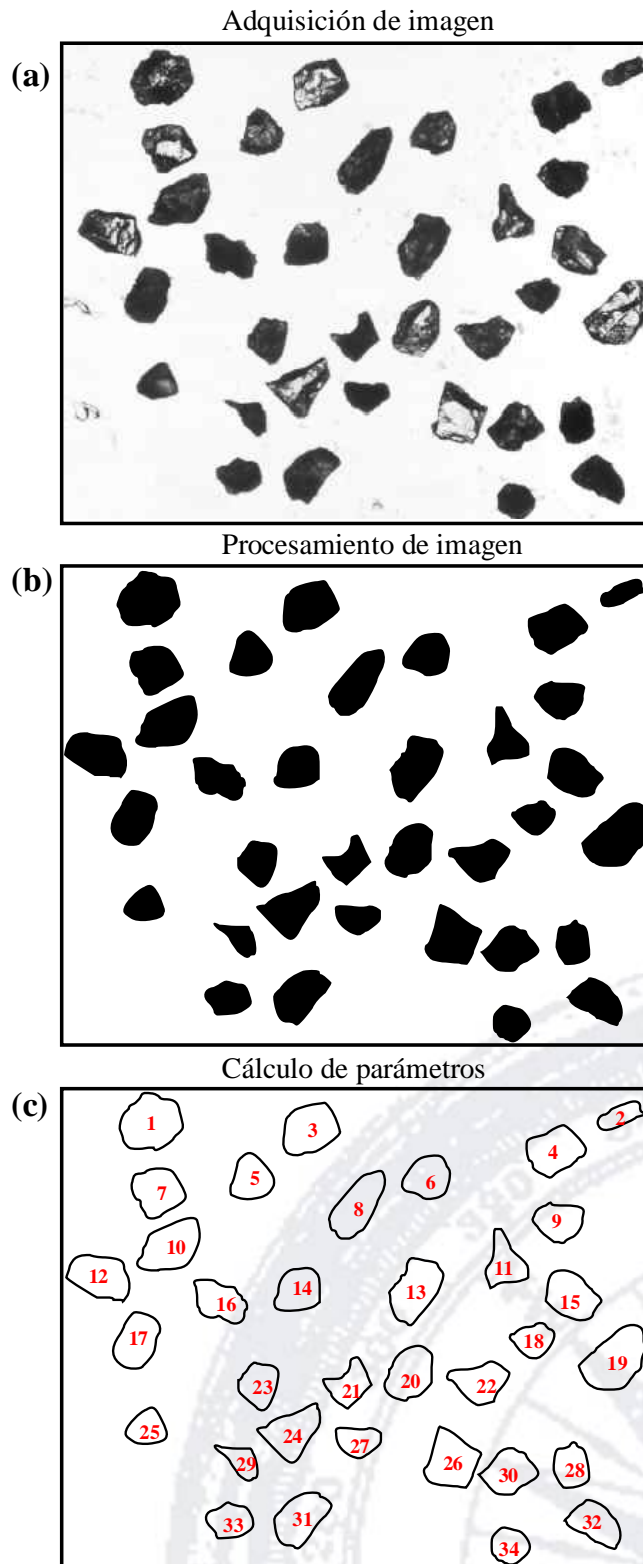


Figura 2. Imagen de granos de cuarzo de terrazas fluviales históricas que contienen jales y sedimentos fluviales. (a): Imagen originalmente adquirida; (b): Imagen procesada con ajuste de contraste y convertida a blanco y negro de 8 bits con el software ImageJ; (c): Construcción automático del perímetro de partículas y cálculo de los parámetros de forma con la rutina “Particle_8_Plus”.

Analisis estadístico

Se analizaron los resultados estadísticamente por medio del análisis de contrastes de medias por la prueba t de Student (**Tabla 3**). El nivel de significación estadística <0.05 . Al mismo tiempo con el objeto de comparar la dispersión se determinó el rango o amplitud intercuartil (*RIC*) con la diferencia entre los cuartiles 3° ($Q_{75\%}$) y 1° ($Q_{25\%}$). Los cálculos estadísticos se realizan con el programa SPSS19.

Tabla 3. Contrastes de medias por la prueba t de Student de muestras conjunta. DS: desviación estándar; X:media; DM: diferencia de medias.

Parámetro de forma	Grupo	Descriptivos			Student		DM
		n	X	DS	t	p	
Solidez	Naturales	306	0.94	0.03	4.20	0.00	0.01
	Antropogenicos	305	0.93	0.03			
	Naturales	306	0.94	0.03	4.20	0.00	0.01
	Jales	413	0.93	0.04			
	Antropogenicos	305	0.93	0.03	-0.99	0.32	0.00
	Jales	413	0.93	0.04			
Compacidad	Naturales	306	0.79	0.07	2.78	0.01	0.02
	Antropogenicos	305	0.77	0.08			
	Naturales	306	0.79	0.07	4.41	0.00	0.02
	Jales	413	0.76	0.08			
	Antropogenicos	305	0.77	0.08	-1.44	0.15	0.01
	Jales	413	0.76	0.08			
Redondez	Naturales	306	0.62	0.11	2.96	0.00	0.03
	Antropogenicos	305	0.60	0.11			
	Naturales	306	0.62	0.11	4.27	0.00	0.04
	Jales	413	0.59	0.11			
	Antropogenicos	305	0.60	0.11	-1.00	0.32	0.01
	Jales	413	0.59	0.11			
Circularidad	Naturales	306	0.73	0.06	11.51	0.00	0.06
	Antropogenicos	305	0.67	0.07			
	Naturales	306	0.73	0.06	16.89	0.00	0.09
	Jales	413	0.64	0.07			
	Antropogenicos	305	0.67	0.07	-5.18	0.00	0.03
	Jales	413	0.64	0.07			
Relacion Ejes	Naturales	306	1.35	0.19	-4.33	0.00	-0.09
	Antropogenicos	305	1.44	0.29			
	Naturales	306	1.35	0.19	-4.48	0.00	-0.09
	Jales	413	1.44	0.29			

Antropogénicos	305	1.44	0.29			
Jales	413	1.44	0.29	-0.04	0.97	0.00

Resultados

Los parámetros de forma obtenidos (**Tabla 1 y tabla 2**) fueron analizados por medio del contraste de medias con la prueba t de Student $\alpha < 0.05$ (**Tabla 3**). Los parámetros de forma empleados (solidez, compacidad, redondez y relación entre ejes) no presentan variaciones significativas para discriminar cuarzo antropogénico de cuarzo de jales (**Tabla 3**). Sin embargo los promedios graficados muestran ser más bajos en jales que en los cuarzoes naturales (**Figura 3**). En cuanto al parámetro de redondez, éste discrimina a los cuarzoes de origen natural de los jales con una diferencia de medias de 0.04 (**Tabla 3**). La relación entre ejes discrimina a los cuarzoes de origen natural, pero no es así entre los antropogénicos y jales (Fig.3c).

Tabla 2. Promedios de parámetros de forma de las muestras individuales analizadas.

Muestra	Origen	n	Solidez	Compacidad	Redondez	Circularidad	Relación Ejes
Qzo_Jales_1	Jales Cata	105	0.92	0.76	0.58	0.65	1.42
Qzo_Jales_2	Jales Rayas	101	0.93	0.76	0.59	0.63	1.45
Qzo_Jales_3	Jales San Matías	103	0.92	0.77	0.60	0.63	1.44
Qzo_Jales_4	Jales Nieto piña	104	0.93	0.76	0.58	0.64	1.45
Qzo_Natural_1	Fluvial Antiguo	101	0.93	0.78	0.63	0.71	1.35
Qzo_Natural_2	Fluvial Antiguo	101	0.94	0.78	0.61	0.75	1.30
Qzo_Natural_3	Fluvial Antiguo	104	0.94	0.79	0.63	0.71	1.35
Qzo_Antrop_1	Fluvial contaminado	101	0.93	0.77	0.60	0.66	1.43
Qzo_Antrop_2	Fluvial contaminado	100	0.92	0.75	0.57	0.66	1.49
Qzo_Antrop_3	Fluvial contaminado	104	0.93	0.78	0.61	0.67	1.41

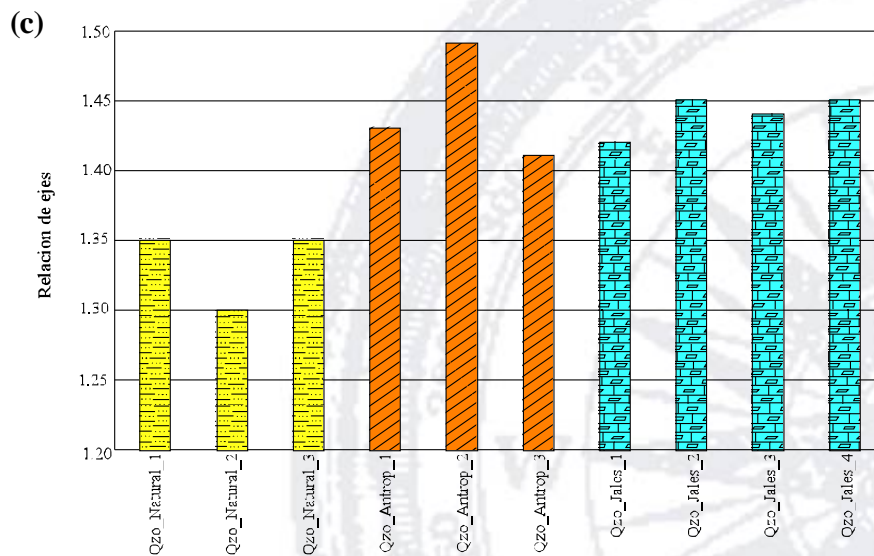
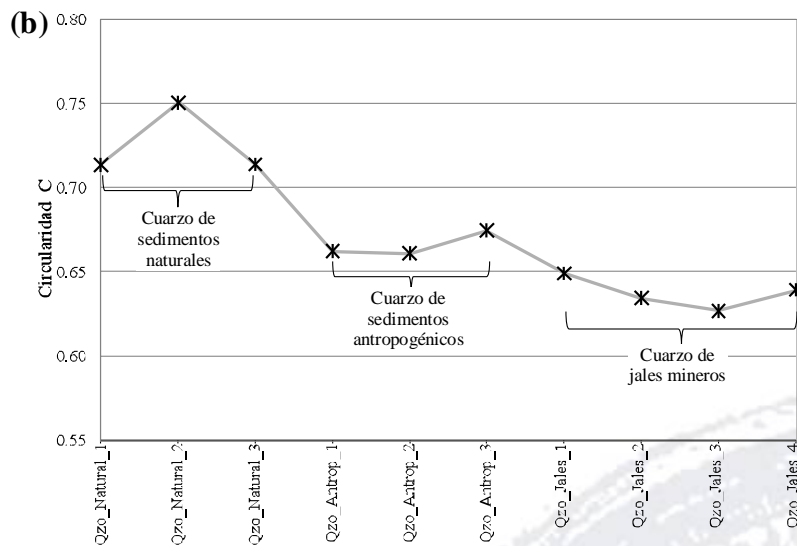
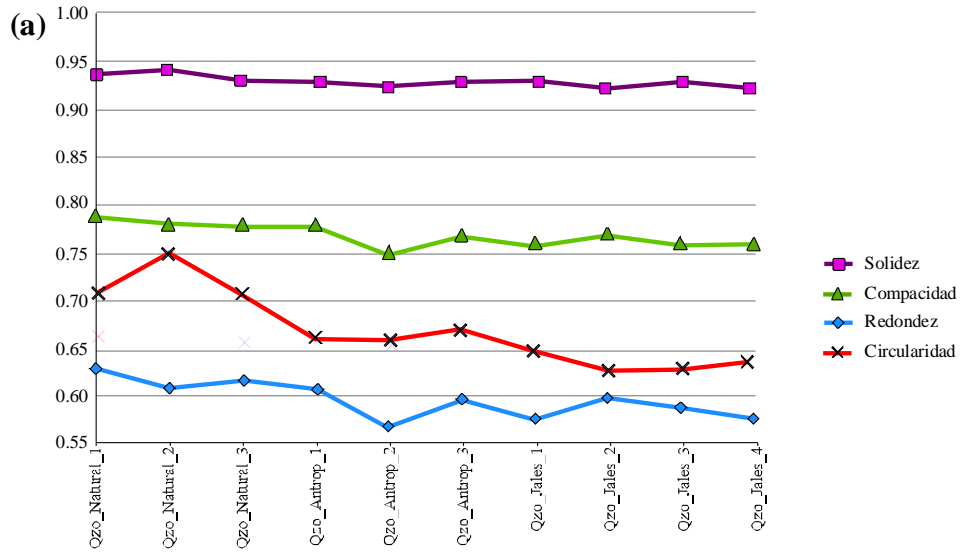


Figura 3. (a): Promedios de los parámetros de forma calculados; (b): Promedios de Circularidad (C) indicando la naturaleza de las muestras; (c): Histograma de la relación de ejes de los granos de cuarzo.

El parámetro circularidad (C) resultó ser significativo estadísticamente (**Tabla 3**) para los 3 grupos de muestras por lo que se graficó ampliando la escala en la **Fig.3b**.

El promedio de la circularidad (C) de cuarzo natural es de 0.73, el cuarzo antropogénico es de 0.67, mientras que el cuarzo de jales es el más bajo con 0.64. (**Fig.3b**). La distribución de los valores de circularidad de cuarzo natural para muestras individuales muestra un comportamiento unimodal simétrico con un rango de error intercuartil (RIC) (0.67-0.79) (**Figura 4a, b, c y l**), mientras que los jales tienen distribución simétrica o bimodal asimétrica sesgada a los valores de circularidad bajos con un rango de error intercuartil (RIC) (0.57-0.70) (**Figura 4d, e, f, g y l**). La distribución del cuarzo antropogénico es bimodal simétrica o bimodal asimétrica sesgada a los valores de circularidad bajos con un rango de error intercuartil (RIC) (0.62-0.72) (**Figura 4h, i, j, k y l**). Los polígonos de frecuencia graficados en su conjunto, muestran claramente las tendencias de como los cuarzos de sedimentos naturales están centrados hacia los valores ≥ 0.7 , mientras que los cuarzos de jales se centran a los valores ≤ 0.7 y sesgados a valores de circularidad menores hasta 0.4.

Con el propósito de contrastar los resultados de la circularidad (C) con la geoquímica, se graficaron los valores de Zn y Pb reportados previamente para las mismas muestras por Miranda-Avilés *et al.*, 2012 y Carrillo-Chávez *et al.*, 2003 para jales (Figura 5). Los resultados graficados en la figura 5 muestran que el parámetro de circularidad discrimina claramente los granos de cuarzo naturales, de jales y antropogénicos que a su vez muestran diferencias claras en las concentraciones de Zn y Pb.

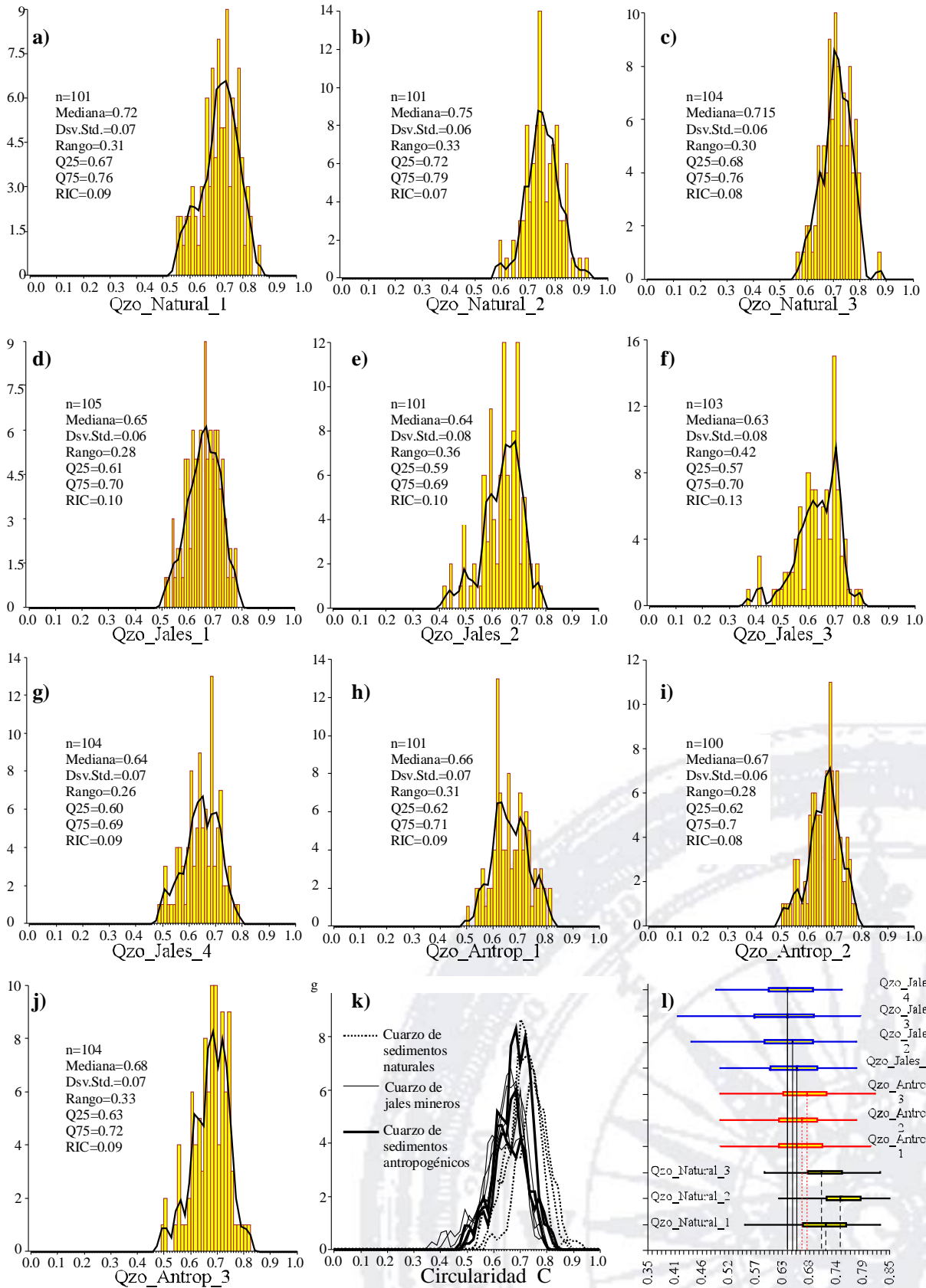


Figura 4. Distribución de la Circularidad (C) de los 3 grupos de muestras estudiadas; (a), (b) y (c): Muestras de granos de cuarzo natural; (d), (e), (f) y (g): Muestras de granos de cuarzo de jales; (h), (i) y (j): Muestras de granos de cuarzo antropogénico; (k): Polígonos de frecuencia de Circularidad graficados en su conjunto; (l): Gráfica de caja de la Circularidad, con proyección de la mediana.

Discusión

El método empleado resultó ser útil y económico tomando en cuenta que el proceso de selección de granos de cuarzo y el procesamiento de las imágenes es relativamente simple. Para las muestras de jales se invirtió en cada muestra al menos 3 horas desde el tamizado, montaje, adquisición de la imagen y procesamiento, mientras que en las muestras de sedimentos naturales y antropogénicos fueron necesarias 4 horas en todo el proceso. La metodología empleada que se basa en el uso de ImageJ ha sido aplicada por otros autores para discriminar diferentes orígenes de granos de cuarzo (Prakongkep, *et al.*, 2010; Cox M.R. y Budhu., 2008) o para caracterizar la forma de pepitas de oro (Crawford y Mortensen., 2009).

El parámetro que discriminó los 3 grupos de granos de cuarzo (natural, jales y antropogénico) y que es significativa estadísticamente es la circularidad (C). La circularidad promedio de cuarzo natural es de 0.73 con distribución unimodal simétrica, mientras que los cuarzos de jales presentan un promedio de 0.64 con una distribución simétrica o bimodal asimétrica sesgada a los valores de circularidad bajos hasta 0.4 (**Figura 4d, e, f, g y l**). Esta diferencia de los valores de circularidad entre los cuarzos naturales y los de jales mineros se explica por el proceso de separación de los cristales de cuarzo. Los cuarzos de jales mineros son quebrados mecánicamente durante el proceso de beneficio de los minerales, lo que les proporciona una forma angular, mientras que los cristales de cuarzo natural son separados y transportados por procesos naturales que involucra intemperismo, erosión, que durante su transporte les confiere formas redondeadas. Por otra parte los cuarzos de origen antropogénico tienen circularidad comparable a los jales, aunque la mediana es mas alta, variando de 0.66 a 0.68 con una distribución bimodal simétrica o bimodal asimétrica sesgada a los valores de circularidad bajos hasta 0.5 (**Figura 4h, i, j, k y l**). Lo que puede explicarse por el aporte de cuarzo natural y de jales mineros observable en las muestras Qzo_Antrop_1 y Qao_Antrop_2 (**Figura 4h, i**). También la geoquímica de Zn y Pb reportada por Miranda-Avilés *et al.* (2009; 2012), para las mismas muestras (**Fig.5**), resalta la firma geoquímica de los jales (valores altos de Zn y Pb) y naturales (valores bajos de Zn y Pb). En la misma **figura 5** se muestra que la circularidad (C) discrimina los sedimentos antropogénicos de los naturales. Las 3 muestras de cuarzos antropogénicos fueron tomadas de

terrazas fluviales constituidas de sedimentos depositados en épocas históricas al menos desde el año 1660 ± 40 d. C., determinado por métodos isotópicos ¹⁴C por Miranda-Avilés et al. (2012). Estas terrazas fluviales contienen cuarzo natural y jales mineros debido que en periodos de inundación el cuarzo de jales era transportado y mezclado con cuarzo natural de la cuenca del río Guanajuato.

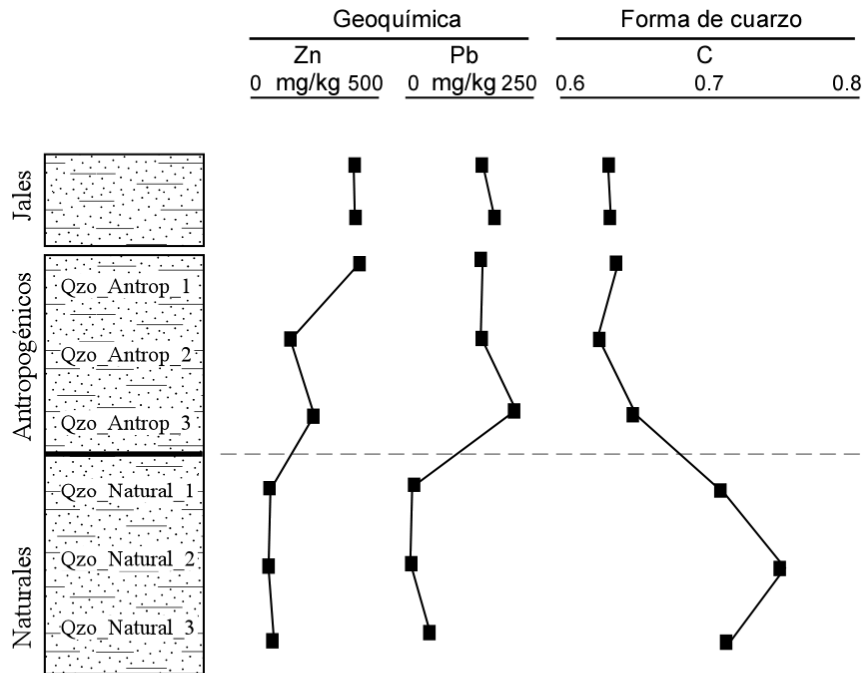


Fig. 5. Parámetros de forma (C) y RE de granos de cuarzo, comparados con la concentración de Zn y Pb reportada por Miranda-Avilés *et al.* (2009; 2012) en las muestras estudiadas.

Es importante mencionar que si bien es cierto el método empleado discrimina los sedimentos naturales de jales mineros por medio de la forma de cristales de cuarzo, el mismo tiene sus limitantes. Para su aplicación es necesario contar con antecedentes de la existencia de jales mineros que fueron colocados, erosionados y redepositados en la cuenca de drenaje estudiada. Tener muestras de referencia de cuarzo natural depositado en la misma cuenca y usarlo como parámetro comparativo para discriminar, por ejemplo, en muestras de suelos donde se desea comprobar la existencia de jales mineros en la misma cuenca. Este método podrá comprobarse con análisis geoquímicos de un número representativo de muestras, asumiendo que si las muestras analizadas reportan valores anómalos de metales asociados a los jales, el método podrá considerarse útil.

Conclusiones

El estudio de parámetros de forma de cristales de cuarzo por medio de análisis de imagen resulto ser útil para discriminar sedimentos que contienen o no jales mineros del Distrito Minero de Guanajuato. La circularidad (C) discrimina los 3 grupos de granos de cuarzo (jales, antropogénico y natural).

La circularidad promedio de cuarzo natural es de 0.73, mientras que los cuarzos de jales presentan un promedio de 0.64. Los cuarzos de origen antropogénico tienen circularidad promedio de 0.67 con una distribución bimodal simétrica o bimodal asimétrica. Lo que puede explicarse por el aporte de cuarzo natural y de jales mineros. La metodología empleada puede aplicarse en la identificación de antiguos depósitos de jales mineros que actualmente están mezclados y/o cubiertos por la mancha urbana en antiguos distritos mineros, donde no se cuenta con referencias de su distribución. También en zonas de cultivo que contengan jales mezclados y que potencialmente aporten metales. Otra aplicación potencial puede ser en sondeos de suelos como complemento a la geoquímica, permitiendo la identificación de jales e interpolación en horizontes donde solo se cuente con pocas muestras geoquímicas.

Referencias

- Armienta M.A., Talavera O., Villaseñor G., Espinosa E., Pérez-Martínez I., Cruz O., Ceniceros N. y Aguayo A. (2004). Environmental behavior of metals from tailings in shallow rivers: Taxco, central Mexico. *T. I. Min. Metall. B.* 113, 76–82.
- Carrillo-Chávez, A., Morton-Bermea, O., González-Partida E., Rivas-Solorzano, H., Oesler, G., García-Meza, V., Hernández, E., Morales P., y Cienfuegos, E. (2003). Environmental geochemistry of the Guanajuato Mining District, México. *Ore. Geol. Rev.* 23, 277-297.
- Cox M.R. y Budhu M. (2008). A practical approach to grain shape quantification. *Eng. Geol.* 96, 1-16.
- Crawford, E.C. y Mortensen, J.K. (2009). An ImageJ plugin for the rapid morphological characterization of separated particles and an initial application to placer gold analysis. *Comput. Geosci.* 35, 347–359.
- Espinoza E, Armienta MA, Cruz O, Aguayo A. y Ceniceros N. (2009). Geochemical distribution of arsenic, cadmium, lead and zinc in river sediments affected by tailings in Zimapán, a historical polymetallic mining zone of Mexico. *Environ. Geol.* 58, 1467–1477.

Figuroa F., Castro-Larragoitia J., Aragón A. y García-Meza J.V. (2010). Grass cover density and metal speciation in profiles of a tailings-pile from a mining zone in Zacatecas, North-Central México. *Environ. Earth Sci.* 60, 395-407.

García-Meza J. V., Ramos E., Carrillo-Chávez A. y Durán-de-Bazúa C. (2004). Mineralogical and Chemical Characterization of historical mine tailings from the Valenciana Mine, Guanajuato, Mexico: environmental implications. *B. Environ Contam. Tox.* 72, 170-177.

Krumbein, W.C. y Pettijohn, F.J. (1938). *Manual of Sedimentary Petrography*. Appleton-Century-Crofts, Inc., New York. 549 pp.

Landini, G. (2006). Particle8_Plus plugin in ImageJ. Available at: <http://www.dentistry.bham.ac.uk/landinig/software/software.html>

Lees, G. (1964). A new method for determining the angularity of particles. *Sedimentology*. 3, 2–21.

Méndez M. y Armienta M.A. (2003). Arsenic phase distribution in Zimapán mine tailings, México. *Geofís. Int.* 42,131-140.

Mendoza Amézquita E., Armienta M.A., Ayora C., Soler A. y Ramos E. (2006). Potencial lixiviación de elementos traza en jales de las minas La Asunción y Las Torres, en el distrito minero de Guanajuato, México. *Rev. Mex. Cienc. Geol.* 23, 75-83.

Miranda-Avilés, R., Puy-Alquiza, M. J., Ramos-Arroyo, Y. R. y Navarro-Barrera, R. (2007). Distribución y evolución histórica de las terrazas fluviales del valle de Santa Teresa Guanajuato. *Invest. Geogr.* 63, 93-104.

Miranda-Avilés, R., Puy-Alquiza, M. J. y Caudillo-González, M. (2009). Evidencias estratigráficas y geoquímicas de la variación temporal de sedimentos naturales y antropogénicos en la planicie aluvial del río Guanajuato. *Rev. Mex. Cienc. Geol.* 26(3), 564-574.

Miranda-Avilés R., Puy-Alquiza M.J. y Pérez-Arvizu, O. (2012). Anthropogenic metal content and natural background of overbank sediments from the mining district of Guanajuato, Mexico. *Soil Sediment. Contam.* 21, 604-624.

Pourghahramani P. y Forssberg E. (2005). Review of applied particle shape descriptors and produced particle shapes in grinding environments. part ii: the influence of comminution on the particle shape. *Miner. Process. Extr. M.* 26, 167–186.

Prakongkep, N. Suddhiprakarn, A. Kheoruenromne, I. y Gilkes R.J. (2010). SEM image analysis for characterization of sand grains in Thai paddy soils. *Geoderma*, 156, 20–31

Ramos-Arroyo, Y.R. y 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. *Rev. Mex. Cienc. Geol.* 23, 54-74.

Ramos-Ramírez, R.E., 1991, Reconstrucción mineralógica de los jales de Guanajuato y el estudio sobre el seguimiento de las especies químicas contenidas en sus componentes no metálicos. Tesis de maestría, Universidad de Guanajuato, Guanajuato, Guanajuato, México.

Ramos-Gómez M., Avelar J., Medel-Reyes A., Yamamoto L., Godinez L., Ramirez M., Guerra R., y Rodríguez F. (2012). Movilidad de metales en jales procedentes del distrito minero de Guanajuato, México. *Rev. Int Contam. Ambie.* 28, 49-59.

Rasband, W.S. (2004). ImageJ. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA. Available at: <http://rsb.info.nih.gov/ij/>.

Ridgway, J., Flight, D.M.A., Martiny, B., Gomez-Caballero, A., Macias-Romo, C. y Grealley, K. (1995). Overbank sediments from central Mexico: an evaluation of their use in regional geochemical mapping studies of contamination from modern and historical mining. *Appl. Geochem*, 10, 97-109.

Ruiz E. A., y Armienta Ma. A. (2012). Acumulación de arsénico y metales pesados en maíz en suelos cercanos a jales o residuos mineros. *Rev. Int Contam. Ambie.* 28, 103-117.

Romero F.M., Armienta M.A. y González-Hernández G. (2007). Solid-phase control on the mobility of potentially toxic elements in an abandoned lead/zinc mine tailings impoundment, Taxco, México. *Appl. Geochem.* 22, 109-127.

Romero F.M., Armienta Ma. A., Gutiérrez M.E., y Villaseñor G. (2008). Factores geológicos y climáticos que determinan la peligrosidad y el impacto ambiental de jales mineros. *Rev. Int Contam. Ambie.* 24, 43-54.

Talavera O., Armienta M.A., García A. J. y Flores M.N. (2006). Geochemistry of leachates from the El Fraile sulfide tailings piles in Taxco, Guerrero, Southern Mexico. *Environ. Geoch. Health.* 28, 243-255.

Talavera O., Díaz V.E. y Ramírez G.A.H. (2008). Impacto de los jales mineros en los recursos naturales en la región de Taxco, Guerrero. *Bol. Min.* 18, 65-66.

Vassallo, L.F. (1988). Características de la composición mineralógica de las menas de la Veta Madre de Guanajuato: *Rev. Inst. Geol.* 7, 232-243.

Wadell, H. (1932). Volume, shape and roundness of rock particles. *J. Geol.* 40, 443-451.