

# LA SUPERFICIE: EFECTO EN VARIABILIDAD DE CIERTOS PARÁMETROS EN PERFILES DE TRES PRESAS DE JALES DE CONCEPCIÓN DEL ORO, ZACATECAS

Figuroa-Cervantes F<sup>1</sup>, Castro-Larragoitia J<sup>2</sup>, García-Meza JV<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Metalurgia, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Sierra Leona 550, Lomas 2°, 78210 San Luis Potosí, SLP, jvgm@uaslp.mx

<sup>2</sup> Instituto de Geología, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí

## INTRODUCCIÓN

Los jales son desechos mineros generados durante el proceso de beneficio de minerales, conformados por partículas finas, que contienen residuos minerales, cantidades variables de metales y metaloides provenientes del material procesado, además de restos de reactivos químicos utilizados en el beneficio, y que son depositados en las llamadas presas o pilas de jales. Ya que éstas no siempre poseen una cubierta en su superficie, son susceptibles a la erosión hídrica y eólica, representando un foco de dispersión del material constituyente.

En el Distrito Minero de Concepción del Oro, Zacatecas, importante productor de Cu, Pb, Zn y Ag desde el siglo XVII, se han explotado yacimientos tipo Skarn, con cantidades variables de cuarzo, calcita, sulfuros metálicos (pirita, calcopirita, esfalerita y otros) y material magnetoferoso. Resultado de la actividad minera, es la presencia de 5 pilas de jales que abarcan 22 Ha, con diferente época de abandono, mineralogía y estratigrafía. Según Castro-Larragoitia (2000), la presencia de elevadas cantidades de Cu, As, Pb y Zn en suelos y sedimentos de arroyos de la zona, sugiere que la dispersión de metales se debe a la alteración de los sulfuros presentes en las pilas de jales, como lo evidencian las alteraciones observadas en los minerales sulfurosos de las laderas de las pilas, expuestas a condiciones oxidantes.

Si la alteración (oxidación) de los sulfuros presentes en el material de las presas de jales es favorecida bajo condiciones oxidantes, es evidente encontrar una mayor alteración en los estratos superiores, en contacto con el aire. Ya Blowes y Jambor (1990) han documentado la variabilidad del estado de oxidación en un mismo depósito, con una zona superficial de oxidación completa, una intermedia de oxidación activa y una inferior donde no hay oxidación. Sin embargo, no es clara si las características del material de presas de jales así como la presencia de coberturas superficiales, naturales, intervienen en la alteración de los sulfuros presentes en estratos inferiores (no superficiales). Dichas coberturas pueden ser cierto tipo de vegetación (que han colonizado los desechos) o las mismas costras de desecación (sales). Lo anterior tiene relevancia para el diseño de estrategias de prevención de la dispersión de metales y As desde jales históricos hacia cuerpos receptores.

En el presente trabajo se buscó establecer una relación entre las características superficiales de cuatro presas de Concepción del Oro y ciertas características fisicoquímicas y mineralógicas a lo largo de un perfil y su posible efecto en la movilidad de metales y As.

## MÉTODO

### *Colecta*

La colecta del material se realizó del 26 al 27 de agosto de 2005. Para ello, en las zonas elegidas, se cavaron perfiles de hasta 1 m de profundidad, se reconocieron los diferentes estratos y se tomaron 1.0-1.5 kg de cada uno, evitando tomar muestra de la superficie (5-10 cm) con mayor grado de alteración, así como la contaminación de material entre los estratos. En algunos perfiles, sólo se colectó hasta cierta profundidad del último sustrato, a partir del cual las características eran homogéneas. Se colectaron en total 20 muestras, en 7 diferentes puntos de colecta de 3 depósitos (presas 2, 3 y 5). Cada estrato fue colocado en una bolsa de plástico y se mantuvo en refrigeración hasta su análisis.

### *Caracterización mineralógica de la muestra*

Previo caracterización, las muestras de cada estrato fueron secadas, homogeneizadas, cuarteadas y tamizaron (malla 250 µm) por separado. Posteriormente, se realizó un análisis mineralógico cualitativo por difracción de rayos X (DRX) y espectrofotometría de infrarrojo (FT-IR), así como por

microscopio electrónico de barrido (MEB) con un detector acoplado de electrones secundarios, previo tratamiento de las muestras (tamaño de partícula <2 µm).

#### *Análisis fisicoquímicos*

Se determinaron: color seco (Munsell Color Soil Chart); textura por difracción láser (Shimadzu SALD-1100), pH y conductividad eléctrica (C) según Richards (1974); humedad por pérdida de peso a 110°C; materia orgánica (MO) por pérdida de peso por calcinación a 500°C, así como potencial de neutralización (PN), por el método de Sobek modificado por Cepeda (2003).

#### *Análisis estadístico*

Se realizó un análisis de componentes principales (PCA) para el conjunto de datos; se calculó el índice de correlación de Pearson ( $r$ ) entre los parámetros determinados para el conjunto de muestras (XLSTAT V.5.1). Las diferencias significativas entre los tratamientos se estimaron mediante la prueba no paramétrica Kruskal y Wallis, a niveles de significancia  $p < 0.05$ .

## **RESULTADOS Y DISCUSIONES**

Los resultados de DRX y FR-IRS, indican la presencia de andradita [ $\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3$ ], calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y yeso ( $\text{FeSO}_4$ ), mayoritariamente, así como diversos óxidos de Fe. La proporción de estos minerales cambia sólo en algunas presas, como se mencionará más adelante. Cabe decir que por MEB se detectaron además, pirita, pirrotina, molibdenita, calcopirita, galena y esfalerita así como arseniatos de Cu y Zn. Elementos en forma metálica y/o asociados a andradita, principalmente, fueron Zn, Cu, Fe y Pb, así como Bi y W (Figura 1).

La composición mineralógica determina el predominio del color café, debido a la presencia de minerales de Fe y de andradita; el color rojo de la única muestra colectada de la presa 3 (P3-I-14-45) se asocia con el alto contenido de óxidos de Fe (33%), mientras que los tonos grises se relacionan al elevado contenido de carbonatos, cuarzo y otros minerales en relación al contenido de óxidos de Fe.

En la tabla 1 se resumen los datos de colecta y de ciertos parámetros fisicoquímicos de cada uno de los estratos muestreados. En la tabla se aprecian características comunes a los diferentes estratos analizados, independientemente de la presa y la profundidad a las cuales fueron colectados, tales como el carácter ligeramente alcalino ( $7.83 \pm 0.16$ ), elevado PN ( $176.08 \pm 28.14$ ), bajo contenido de materia orgánica (MO) ( $0.24 \pm 0.08\%$ ) y bajos valores de conductividad ( $0.74 \pm 0.52$  mS/cm) y de porcentaje de humedad (de 1.97 a 0.02%). El elevado PN se explica por el alto porcentaje de carbonatos alcalíneo-térreos (11.6-48.5%) en relación a los sulfuros (<1%), solo detectados por MEB. Bajo estas condiciones, se puede afirmar que los estratos no son generadores de drenaje ácido con metales y As disueltos. Más aún, lo anterior podría estar explicando por que son tan bajas las concentraciones de Pb, Zn y Cu (<4.4, <6.9 y <18 ppm, respectivamente) en las fracciones no residuales (obtenidas por extracción secuencial) de las muestras, que se realizaron de manera preliminar (Figueroa-Cervantes, *com. pers.*).

Otro dato importante de la Tabla 1, es el predominio de estratos arenosos; este resultado podría incidir en la movilidad de metales, de darse la oxidación de los sulfuros portadores, desde los estratos arenosos hacia los arcillosos, donde serían retenidos por las arcillas, coloides con cargas negativas, que retienen metales en su forma iónica.

Los promedios previamente indicados, sin embargo, no incluyen los datos de la muestra P3-I-15-45, por las particularidades que en ésta se manifiesta: pH ácido, PN bajo, elevados valores de conductividad y MO (Tabla 1). Se trata de una presa que en toda su superficie evidencia un proceso avanzado de oxidación de los sulfuros minerales presentes y, a pesar de que se colectó a partir de los 15 cm, dicha oxidación era generalizada no solo en la superficie, sino hasta 100 cm de profundidad. Lo anterior puede explicarse como consecuencia de su textura arenosa (arenas: 96.92%), que facilita la percolación de agua a sustratos no superficiales. La muestra P2-I-35-70 también posee un elevado contenido de arenas; sin embargo, se trata de un sitio con alta cobertura vegetal y la muestra detenta el mayor contenido de carbonatos, valor que se refleja en su altísimo PN (Tabla 1). Otros estratos con alto porcentaje de arenas, no son los más superficiales (p.e. P5-II-55-63). Aunado a su textura, la muestra P2-I-35-70 está constituido por óxidos y sulfatos de Fe, lo que refleja la oxidación de los sulfuros minerales presentes, tales como pirrotina, pirita, energita;

cabe mencionar la presencia de arsenatos de Cu y Zn en estas muestras, que indican un proceso antropogénico en la oxidación de minerales de As.

Al analizar las características de los perfiles P2-IV, P5-I y P5-II, se observa que ciertos parámetros varían de un estrato a otro, independientemente de la profundidad a la cual fueron colectados, pero también de las características de los estratos contiguos. Por ejemplo, en P2-IV, se observa un estrato arenoso, gris oscuro, con los valores más altos de PN y humedad del perfil (P2-IV-24-57) entre un estrato superior franco, café oscuro y de elevada conductividad (P2-IV-10-24) y uno inferior, migajonoso y café (P2-IV-57-80); ambos estratos, el superior e inferior, con menor humedad que el intermedio (Tabla 1). De hecho, la humedad y la textura se correlaciona de una manera significativa ( $r < 0.8$ ,  $\alpha = 0.05$  y  $n = 40$ ) de acuerdo a los resultados obtenidos, pero no con la bibliografía. Pareciera que los estratos arcillosos, arcillo-arenosos o migajón-arenosos están actuando como barreras semipermeables, impidiendo el paso de la humedad, una vez que fueron depositados sobre sustratos arenosos, más húmedos.

Nuevamente, al analizar el PN de los perfiles P2-IV, P5-I y P5-II, así como los P2-II y P2-III, se observa una tendencia de incremento del PN hacia los estratos más profundos. Si bien ello puede ser consecuencia del tipo de material depositado, también sugiere que los carbonatos son consumidos en la superficie. De ser así, es posible que la oxidación de los sulfuros continúe avanzado y se liberen los elementos presentes, tales como el Cu, Pb, Zn y As.

Es importante resaltar el elevado PN reportado para P1-35-70 (Tabla 1), punto de colecta (P2-I) con abundante cobertura vegetal y presencia de raíces en los primeros 35 cm. Sin que sea posible sacar conclusiones al respecto, pareciera que la presencia de vegetación evita el consumo de carbonatos y, por lo tanto, la oxidación futura del material mineral presente, de hecho, ésta fue la muestra con menor contenido de óxido de Fe (1.21%), después de la muestra P5-I-4-11 (0.33%).

La presencia de cobertura vegetal sólo parece incidir en un contenido ligeramente mayor y significativo ( $p = 0.05$ ) de MO entre, p. e., la MO de los sitios de colecta P2-I, P2-II y P2-III comparadas con P5-I y P5-II. Adicionalmente, la presencia de costras de desecación en la presa 3-I, ricas en sulfato precipitado ( $\text{CaSO}_4$ ), debido a que el agua se estanca durante el período de lluvias, se relaciona con el grado de oxidación de ésta; lo anterior, sin embargo, no se aplica a P5-II, con sulfato en su superficie, pero con un estrato superficial de 5 cm muy compacto y estratos inferiores (5-81 cm), con elevado PN y pH.

## CONCLUSIONES

La mineralogía encontrada en el sitio es acorde con la ganga que acompaña a los yacimientos tipo skarn (calco-silicatos y sulfuros); la presencia de pirita se observó en todas las muestras, lo que puede resultar en su oxidación y generación de DAR (por la exposición a oxígeno y agua); además en la presa 3-I se reportan otros minerales, como enargita ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ) y posibles productos de la oxidación de este mineral, como arseniato de Cu ( $\text{CuAsO}_4$ ), lo que evidencia que se dio un proceso de oxidación.

Los resultados obtenidos muestran que los jales son heterogéneos, incluso entre los estratos de un mismo perfil. Sin embargo, ciertos parámetros poseen valores similares. Las diferencias más significativas entre estratos se dan en la textura y, por lo tanto, en la humedad; en menor grado, las diferencias entre pH y conductividad de un estrato a otro, son significativas. Estas diferencias pueden deberse a la antigüedad de las presas y a los diversos eventos de depósito (p.e. tipo de material procesado). La muestra con diferencias más marcadas es P3-I-15-45, fundamentalmente arenosa entre los 1 y 100 cm, en la cual el proceso geoquímico más relevante es la oxidación de sulfuros, indicado por el alto contenido en yeso, la presencia de óxidos y sulfatos de Fe y que se refleja en la conductividad ( $6.24 \text{ mS/cm}^{-1}$ ); además del pH y el PN, éste último indica bajo contenido de carbonatos disponibles para neutralizar la acidez del medio, que pudieron consumirse o bien, el estar en muy baja proporción en el material depositado.

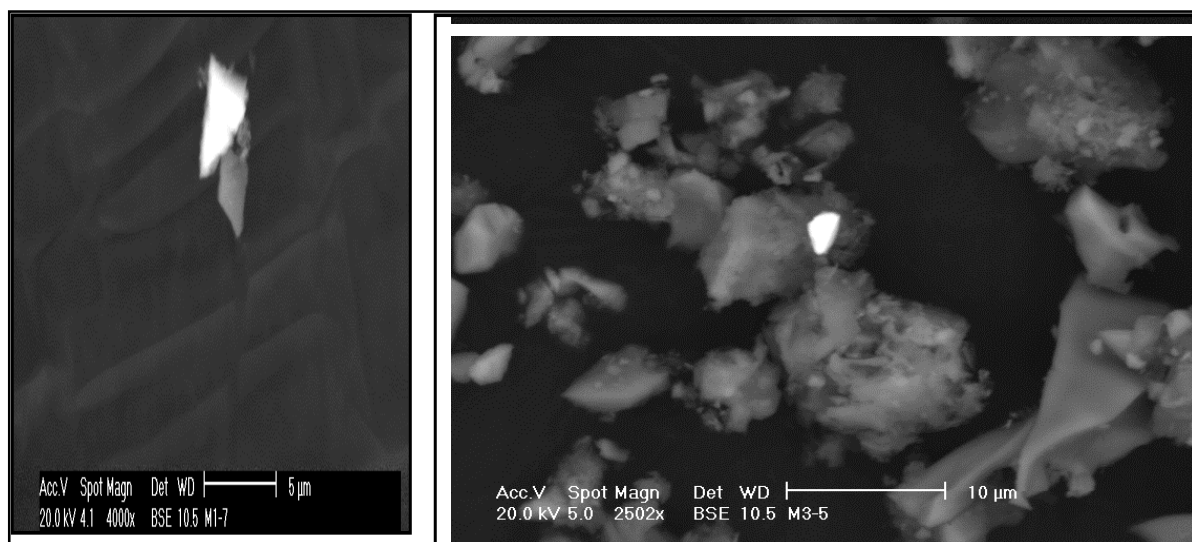
Los parámetros que probablemente estén controlando las diferencias entre los estratos son la textura y la humedad. Sin embargo, el PN es el parámetro que mejor refleja las diferencias entre la presa de oxidación generalizada (P3) y las restantes. Aparentemente, una abundante cobertura vegetal, favorece valores más elevados del PN. Adicionalmente, el PN fue el único parámetro que tiende a incrementar hacia los estratos inferiores, sugiriendo un mayor consumo de carbonatos en la superficie.

Al evidenciarse el proceso avanzado de oxidación en P3-I, se propone la remediación de las demás (P2, P5) con el objetivo de prevenir la oxidación de sulfuros y por tanto la posible movilización de metales y As. Así, los resultados del presente indican que se puede predecir la movilidad de metales y As en las presas y delimitar las zonas donde se lleva a cabo en mayor o menor proporción el proceso de oxidación (horizontal y verticalmente), que permita plantear estrategias de prevención y remediación para el control de la movilización de metales y As, particularmente por la oxidación de sulfuros en los estratos y en función de las características del sitio (p.e. ausencia o presencia y abundancia de hidróxidos de hierro, yeso, carbonatos, cobertura vegetal).

Un trabajo posterior incluirá resultados de extracciones secuenciales de metales y As, para analizar las relaciones entre las características superficiales, los parámetros determinados y las fracciones residuales y no residuales de los elementos por analizar.

## REFERENCIAS

- Castro-Larragoitia GJ. 2000. Efecto de la actividad minera sobre el medio ambiente en distritos mineros del centro-norte de México. Informe Técnico del proyecto CONACYT 25602-T. Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL, NL.
- Cepeda BMC. 2003. Guía y criterios para la gestión ambiental de residuos de operaciones mineras de sulfuros polimetálicos. Tesis de Maestría, Instituto de Metalurgia, Facultad de Ingeniería, UASLP, SLP.
- García-Meza JV. 2003. Caracterización fisicoquímica del desecho minero (Jal) La Valenciana, Guanajuato, previa y posterior a bioensayos diagnósticos enfocados a la generación de propuestas para su remediación. Tesis Doctor en Ciencias, UNAM, México DF
- Ramos Arroyo R, Siebe-Grabach C, 1998. Variabilidad espacial de condiciones geoquímicas en presas de jales. Instituto Nacional de Geoquímica, A.C., México. Actas INAGEQ, 4(1998): 51-63.
- Ramos Arroyo R, Siebe-Grabach C, Prol-Ledesma R.M., 2004. Características geológicas y mineralógicas e historia de extracción del Distrito de Guanajuato, México. Posibles escenarios geoquímicos para los residuos mineros. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 21(2):268-284.
- Richards, L.A. 1974. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Limusa, México D.F.
- Tamhove RV, Motiramani DP, Boli YP. 1978. Suelos: química y fertilidad en zonas tropicales. Diana. México DF
- Tamhove RV, Motiramani DP, Boli YP. 1978. Suelos: química y fertilidad en zonas tropicales. Diana. México DF



**Figura 1.** Izquierda: partícula de óxido de hierro, muestra P3-I-15-45. Derecha: partícula muy brillante de W de ~2 µm, rodeada de andradita y pirita, muestra P5-II-63-71

**Tabla 1.** Puntos de muestreo en 3 depósitos de jales mineros (presas) de Concepción del Oro y ciertas características fisicoquímicas de los estratos colectados. Datos: promedio  $\pm$  desviación estándar (n=3), excepto para CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>

Presa	Características Presa	Punto colecta	Características superficiales	Perfiles	Color (seco)	% arenas	% limos	% arcillas	% hum	C (mS/cm)	pH	PN	% CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>					
2	Presa reciente	P2-I	Alta cobertura vegetal; suelo (0-35 cm)	P2-I-35-70	Café oscuro	84.56 +0.05	9.85 +0.48	5.59 +0.42	0.91 +0.07	0.63 +0.10	7.90 +0.04	492.81 +95.90	48.5					
					Café oscuro	53.05 +0.18 14.14 +1.29	21.57 +3.03 67.91 +6.71	25.39 +3.21 17.94 +5.42	0.23 0 0.99 +0.04	1.40 +0.09 1.93 +0.01	7.8 +0.03 7.55 0	153.13 +0.88 192.50 +7.07	0 9					
		P2-II	Mediana cobertura vegetal	P2-II-33-45 P2-II-45-80	Café oscuro	43.22 +0.31	31.46 +0.85	25.32 +0.54	0.37 +0.08	1.20 +0.01	7.66 +0.04	187.50 0	11					
					Gris oscuro	95.44 +0.003	3.27 +0.01	1.29 +0.01	1.72 +0.38	0.84 +0.42	7.92 +0.10	205.00 +33.59	8					
		P2-III	Baja cobertura vegetal	P2-III-10-40 P2-III-40-80	Café oscuro	38.76 +0.14	41.70 +0.53	19.54 +0.39	0.53 +0.18	1.19 +0.04	7.52 +0.07	193.75 +17.68	6					
					Gris oscuro	83.01 +0.05	10.88 +0.46	6.11 +0.41	1.09 +0.13	0.37 +0.01	8.00 +0.03	225.00 +17.68	11.3					
					café	53.29 +0.26	31.42 +1.86	15.29 +1.60	0.57 +0.07	0.40 +0.02	8.04 +0.01	173.12 +20.32	9.3					
		P2-IV	Nula cobertura vegetal	P2-IV-10-24 P2-IV-24-57 P2-IV-57-80	Café oscuro	96.92 +0.001	0.96 +0.03	2.13 +0.03	1.00 +0.12	6.24 +0.20	2.08 +0.02	-12.50 0	0					
					Rojo amarillo	35.39 +0.10 72.87 0.11 21.58 +0.48 94.57 +0.004 45.19 +0.04 52.58 +0.15	37.50 +4.60 19.11 +0.47 34.76 +6.71 3.50 +0.07 18.73 +1.00 27.34 +1.98	27.11 +4.49 8.02 +0.36 43.66 +7.20 1.93 +0.07 36.08 +0.96 20.08 +2.13	0.21 +0.04 0.85 +0.03 0.15 +0.07 1.26 +0.08 0.38 +0.13 0.39 +0.04	2.67 +0.08 2.84 +0.01 0.80 +0.06 2.45 +0.07 1.13 +0.22 2.49 +0.03	7.68 +0.02 7.68 +0.06 8.00 +0.02 7.83 +0.01 7.91 +0.04 7.79 +0.03	141.25 +1.77 120.63 +2.65 163.75 +3.54 165.62 +15.03 165.62 +0.88 160 +12.37	7 12.6 5 9 10.8 12.7					
		3	Elevado grado de oxidación	P3-I	Precipitado de sulfatos (yeso) superficial, rojizo	P3-I-15-45	Rojo amarillo	64.68 +0.13 35.79 +0.36 96.88 +0.003 89.46 +0.05 47.68 +0.04	20.79 +1.22 13.08 +8.09 1.98 0 7.57 +0.08 20.57 +0.56	14.53 +1.09 51.13 +7.73 +1.14 0 2.97 +0.03 31.75 +0.51	0.82 +0.15 0.22 +0.14 1.78 +0.21 1.38 +0.08 0.21 +0.01	2.51 0 0.95 +0.01 2 +0.74 2.22 +0.34 0.49 +0.22	7.77 0 7.96 +0.01 7.92 +0.02 7.81 +0.01 8.09 0	140.62 +0.88 186.25 +1.77 200.63 +11.49 207.5 0 187.5 0	8.6 7.5 6.4 11.5 14.4			
0																		
5	Superficie compacta						P5-I	Superficie muy compactada	P5-I-4-11 P5-I-11-18 P5-I-18-24 P5-I-24-31 P5-I-31-73 P5-I-73-98	Café oscuro	64.68 +0.13 35.79 +0.36 96.88 +0.003 89.46 +0.05 47.68 +0.04	20.79 +1.22 13.08 +8.09 1.98 0 7.57 +0.08 20.57 +0.56	14.53 +1.09 51.13 +7.73 +1.14 0 2.97 +0.03 31.75 +0.51	0.82 +0.15 0.22 +0.14 1.78 +0.21 1.38 +0.08 0.21 +0.01	2.51 0 0.95 +0.01 2 +0.74 2.22 +0.34 0.49 +0.22	7.77 0 7.96 +0.01 7.92 +0.02 7.81 +0.01 8.09 0	140.62 +0.88 186.25 +1.77 200.63 +11.49 207.5 0 187.5 0	8.6 7.5 6.4 11.5 14.4
											0							
5	Superficie compacta						P5-II	Superficie compactada con precipitado de sales (yeso) con evidencia de oxidación	P5-II-5-16 P5-II-16-55 P5-II-55-63 P5-II-63-71 P5-II-71-81	Café oscuro amarillo	64.68 +0.13 35.79 +0.36 96.88 +0.003 89.46 +0.05 47.68 +0.04	20.79 +1.22 13.08 +8.09 1.98 0 7.57 +0.08 20.57 +0.56	14.53 +1.09 51.13 +7.73 +1.14 0 2.97 +0.03 31.75 +0.51	0.82 +0.15 0.22 +0.14 1.78 +0.21 1.38 +0.08 0.21 +0.01	2.51 0 0.95 +0.01 2 +0.74 2.22 +0.34 0.49 +0.22	7.77 0 7.96 +0.01 7.92 +0.02 7.81 +0.01 8.09 0	140.62 +0.88 186.25 +1.77 200.63 +11.49 207.5 0 187.5 0	8.6 7.5 6.4 11.5 14.4
											0							
											0							
											0							
											0							

Claves: **hum**: humedad; **C**: conductividad; **PN**: potencial de neutralización (meq CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>/ton); **CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>**: carbonatos alcalíneo-térreos; **MO**: materia orgánica