

# EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL ATAQUE ALCALINO DE ROCAS METAMÓRFICAS EN FUNCIÓN DEL GRADO DE DEFORMACIÓN, A TRAVÉS DEL ESTUDIO DE IMÁGENES DIGITALIZADAS

F. Locati<sup>1</sup>, S. Marfil<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CICTERRA – CONICET – UNC. Av. Vélez Sarsfield 1611 (X5016GCA), Córdoba, Argentina. [flocati@efn.uncor.edu](mailto:flocati@efn.uncor.edu); <sup>2</sup> INGEOSUR - Dpto. de Geología – UNS. San Juan 670 (8000), Bahía Blanca, Argentina. [smarfil@uns.edu.ar](mailto:smarfil@uns.edu.ar)

## Resumen

En trabajos previos se estudió el comportamiento de rocas metamórficas de las Sierras Chicas de Córdoba frente a la reacción álcali-sílice (RAS) a través de estudios petrográficos, el método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674) y la determinación de la sílice disuelta según lo establecido en el método de ensayo químico (IRAM 1650).

Se concluyó que la potencial reactividad de las rocas aumenta con la deformación plástica, debido a la generación de discontinuidades intracristalinas en el cuarzo así como por el desarrollo de estructuras planares como es la foliación gnésica o milonítica. También se observó que el avance de los procesos metamórficos disminuiría la reactividad de la roca por recristalización y remoción de dislocaciones.

Para evaluar el desarrollo de estos procesos se pulió una porción de muestra y se atacó con una solución de NaOH 1 N a 80 °C durante 72 hs. Se realizaron observaciones con microscopio petrográfico, (con luz reflejada) cada 24 hs y se compararon con la muestra natural utilizada como patrón.

Las imágenes obtenidas se procesaron considerando la luminosidad. Cada imagen tiene una resolución de 760 x 570 píxeles lo que equivale a 433.200 puntos, y una resolución por unidad de área de 100 ppp (puntos por pulgada). Con las matrices subyacentes de cada imagen se calcularon las diferencias entre las muestras patrón y las atacadas, se realizaron perfiles, se reconstruyeron imágenes 2D con un gradiente del azul al rojo y modelos 3D.

Los contactos entre granos, las zonas con reducción en el tamaño de grano, las porciones donde todavía prevalece material vítreo asociado al proceso de fusión por fricción en las pseudotaquilitas y los sectores ricos en cuarzo y con evidencias de fuerte deformación se muestran como los sectores que presentan más diferencias entre las muestras naturales y las atacadas.

El análisis de imágenes 2D azul al rojo (y en menor medida los perfiles y los bloques 3D) determinan el siguiente orden de ataque CAN 33>CAN 31>CAN 32>CAN1A. Esta tendencia es coincidente con los valores de expansión y con las observaciones petrográficas de estudios anteriores.

Si bien la metodología utilizada presenta ventajas y desventajas, los resultados obtenidos permiten reconstruir un modelo de corrosión para cada uno de los materiales en cada etapa del ataque y finalmente efectuar un modelo evolutivo del proceso. Este procedimiento es útil para estudiar el comportamiento de rocas potencialmente reactivas y ha sido efectivo para evaluar rocas afectadas por procesos de deformación de variada intensidad así como para identificar las áreas de mayor susceptibilidad al ataque y disolución en medio alcalino. Sin embargo es necesario profundizar los estudios a fin de corroborar su eficacia.

**Palabras clave:** cuarzo tensionado, reacción álcali-sílice, ataque alcalino, digitalización

## Introducción

Los triturados pétreos que poseen cuarzo tensionado en su composición han sido motivo de numerosos estudios relacionados con la tecnología del hormigón desde la década del '50 (Mielenz 1954, 1958; Brown 1955) y en la actualidad siguen siendo motivo de estudio (Wenk et al. 2008). En general esos trabajos se han enfocado en la evaluación de la reactividad alcalina potencial de dichas rocas cuando son utilizadas como agregados en el hormigón.

Comprender la evolución del proceso de ataque de soluciones alcalinas sobre rocas que han sufrido deformación es de fundamental importancia para comparar con los procesos de ataque que pueden producirse dentro del hormigón y ocasionar daños en las estructuras por el desarrollo de reacciones expansivas.

En estudios previos (Locati et al. 2008, 2010) se evaluó la reactividad de una roca metamórfica de las Sierras Chicas de Córdoba que sufrió procesos de deformación a intensidades variables con el fin de evaluar la incidencia de los procesos de deformación en el desarrollo de la RAS.

La roca estudiada es un ortogneis piroxénico (Freguglia 2004), ubicado en cercanías de localidad de La Calera en la provincia de Córdoba (Figura 1). En sectores localizados esta roca fue afectada por fajas de deformación dúctil a frágil-dúctil produciendo modificaciones en su textura y microestructura.

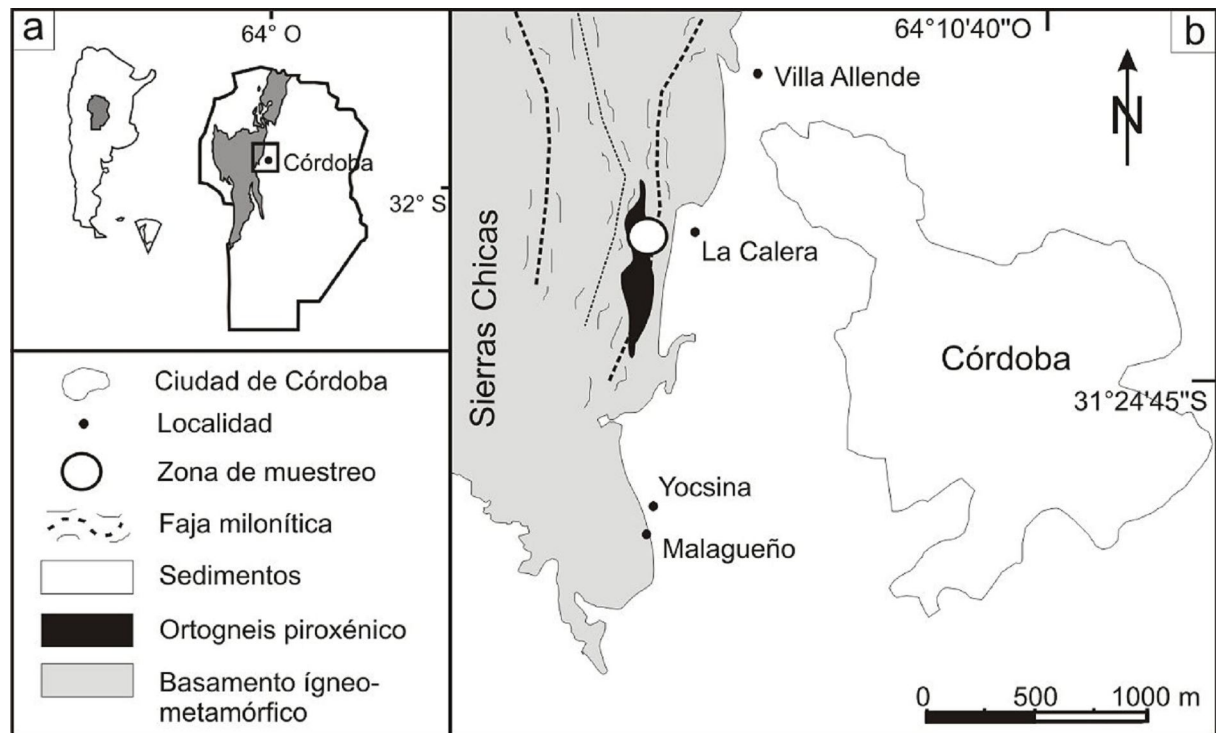


Figura 1.- Ubicación de la zona de muestreo. a) Área de estudio en la Provincia de Córdoba. b) Zona de muestreo en las Sierras Chicas de Córdoba.

Además se realizaron estudios de corrosión sobre superficies pulidas de roca y se evaluó el grado de ataque experimentado por cada muestra mediante análisis estadísticos utilizando el método de análisis de varianza (ANOVA) de dos vías jerárquicamente diferentes (split plot). (Steel and Torrie 1981). Con el fin de comparar los cambios en la superficie corroída de cada muestra a diferentes tiempos, se utilizó la Mínima Diferencia Significativa de Fisher (LSD) (Steel and Torrie op. cit.). Los resultados de este ensayo, indican que la única muestra que mostró diferencias significativas ante la corrosión es la roca afectada por milonitización, cataclasis y que además presenta desarrollo de venas de pseudotaquiliticas (Muestra CAN 33).

Todos los análisis revelaron que la reactividad de las rocas estudiadas aumenta con el grado de deformación plástica sufrido por las mismas, y que esto posiblemente se debe a la generación de discontinuidades intracrystalinas en el cuarzo así como al desarrollo de estructuras planares como es la foliación gnéisica o milonítica. Además se observó que el avance de los procesos metamórficos disminuiría la reactividad de la roca por recristalización y remoción de las dislocaciones. Estas observaciones coinciden con lo observado por Wigum (1995) en rocas miloníticas de la península Escandinava. Por último se observó que la superposición de eventos frágiles y dúctiles aumentan en gran medida la potencial expansión del hormigón elaborado con esos agregados.

El propósito del presente trabajo es analizar la relación entre la corrosión superficial en medio alcalino de rocas que tienen cuarzo con diferente grado de deformación, y sus características texturales y microestructurales a través del análisis de imágenes digitalizadas.

## Materiales y Métodos

Se trabajó con un ortogneis piroxénico que contiene entre 10 y 15% de cuarzo (Gordillo, 1958) de la zona de La Calera. Las cuatro muestras analizadas (CAN 1A, 31, 32 y 33) corresponden a sectores localizados afectados por fajas de deformación dúctil a frágil-dúctil que afectan su textura y microestructura y que manifiestan reactividad, según estudios previos (Locati et al. 2008, 2010).

En la Tabla 1 se resumen los resultados obtenidos en trabajos anteriores sobre las características petrográficas de las rocas, el porcentaje de expansión con el método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674) a 16 y 28 días, y la sílice disuelta determinada según lo establecido en el método de ensayo químico (IRAM 1650).

Tabla 1.- Petrografía, expansión y sílice disuelta de las muestras analizadas (Locati et al. 2008, 2010).

Muestra	Características petrográficas	Expansión (%)		Sílice disuelta (mmol/litro)
		16 días	28 días	
CAN 1A	<b>Ortogneis:</b> Tamaño de grano 1 a 3 mm, ligera extinción ondulante, subgranulado incipiente (Figura 2a).	0.136	0.188	11.00
CAN 31	<b>Ortogneis débilmente milonitizado:</b> Tamaño de grano 1 a 2 mm, fuerte extinción ondulante, bandas de deformación y subgranulado. Aparecen escasos pseudo-granos de algunas decenas de micras (Figura 2b).	0.201	0.265	19.66
CAN 32	<b>Ortogneis fuertemente milonitizado:</b> Marcada foliación. La distribución del tamaño de grano es bimodal con fragmentos relícticos de 1 a 6 mm y bandas de cuarzo compuestas de subgranos de cuarzo y granos recristalizados de ~30 micras (Figura 3a).	0.183	0.231	20.66
CAN 33	<b>Ortogneis afectado por milonitización, cataclasis y desarrollo de venas pseudotaquiliticas:</b> Presenta microestructuras similares a las muestras CAN 31 y 32 pero además aparece cuarzo pulverizado por cataclasis con granos de ~10 micras y desarrollo de venas vítreas de pseudotaquilitas. El material vítreo se localiza en los bordes de las venas y rodeando clastos relícticos en el sector central de las mismas (Figura 3b).	0.307	0.371	39.42

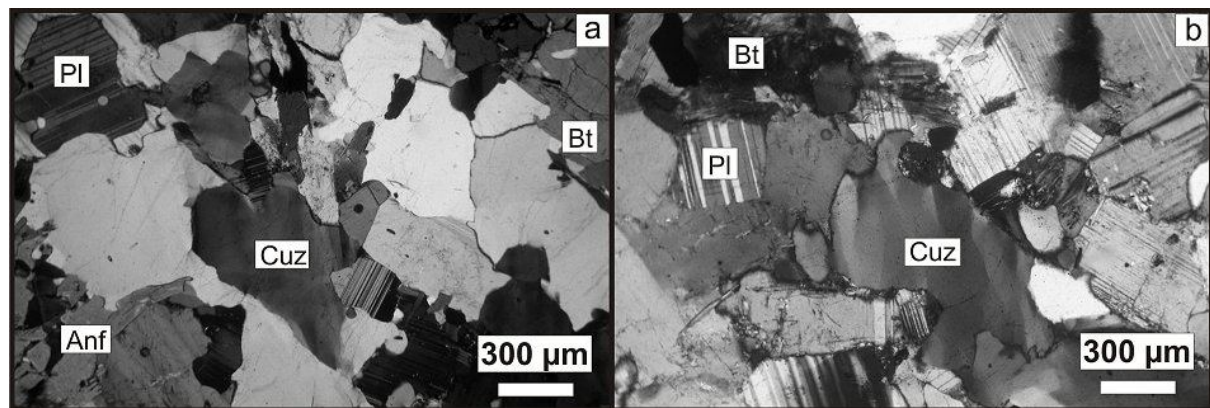


Figura 2.- Fotomicrografías. a) Muestra CAN 1A. Ortogneis sin deformación a excepción de algunos granos de cuarzo con leve extinción ondulante. b) Muestra CAN 31. Ortogneis poco deformado con algunos granos de cuarzo con bandas de deformación y de bordes irregulares. Pl: Plagioclasa, Anf: Anfíbol, Cuz: Cuarzo, Bt: Biotita, Cal: Calcita, Bt + Fel: Biotita más Feldespato potásico, V: Material vítreo.

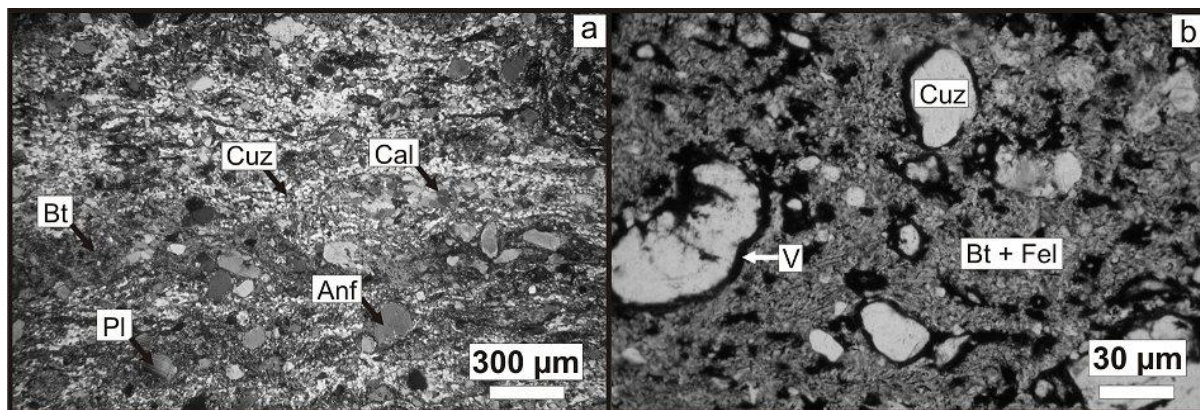


Figura 3.- Fotomicrografías. a) Muestra CAN 32. Ortogneis con fuerte disminución en el tamaño de grano producto de la intensa deformación. Se observan bandas ricas en cuarzo. b) Muestra CAN 33. Sector central de la vena pseudotaquilítica donde se observan clastos relícticos bordeados de material vítreo.

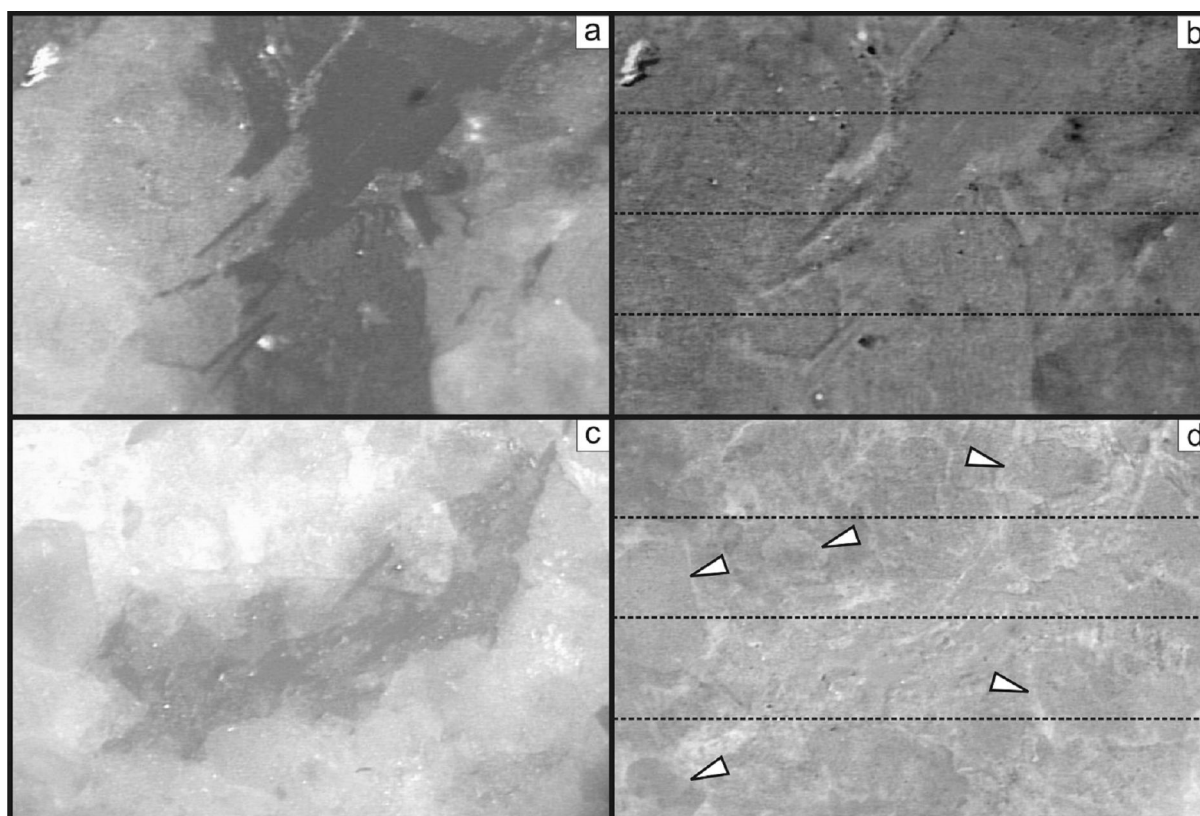


Figura 4.- Imágenes de microscopio con luz reflejada de las muestras naturales (no atacadas) y sus equivalentes luego del ataque (72 hs) y el posterior procesamiento. Muestra CAN 1A natural (a) y procesada (b), muestra CAN 31 natural (c) y procesada (d). En líneas de puntos (en negro) se indican los sectores en donde se realizaron los perfiles (a 25%, 50% y 75% de cada imagen).

Se trabajó sobre trozos de roca de 2 x 4 x 0,4 cm pulidos con abrasivos malla 1000 (10 micrones). Se sumergieron en una solución de NaOH 1N y se llevaron a estufa a temperatura constante de 80 °C durante 72 hs. Cada 24 hs se retiraron de la estufa, se lavaron y se observaron con microscopio petrográfico con luz reflejada. Se trabajó con la muestra posicionada siempre en el mismo sector y con la misma iluminación. Las imágenes obtenidas se compararon con las muestras naturales (tomadas como referencia) (Marfil et al. 1998, Maiza et al. 1999, Locati et al. 2010).

Con cada imagen se forma una matriz de 760x570 pixeles, lo que da un total de 433,200 puntos, y una resolución por unidad de área de 100 ppp (puntos por pulgada). Cada punto tiene un color y la profundidad de color de cada pixel depende de la cantidad de bits.

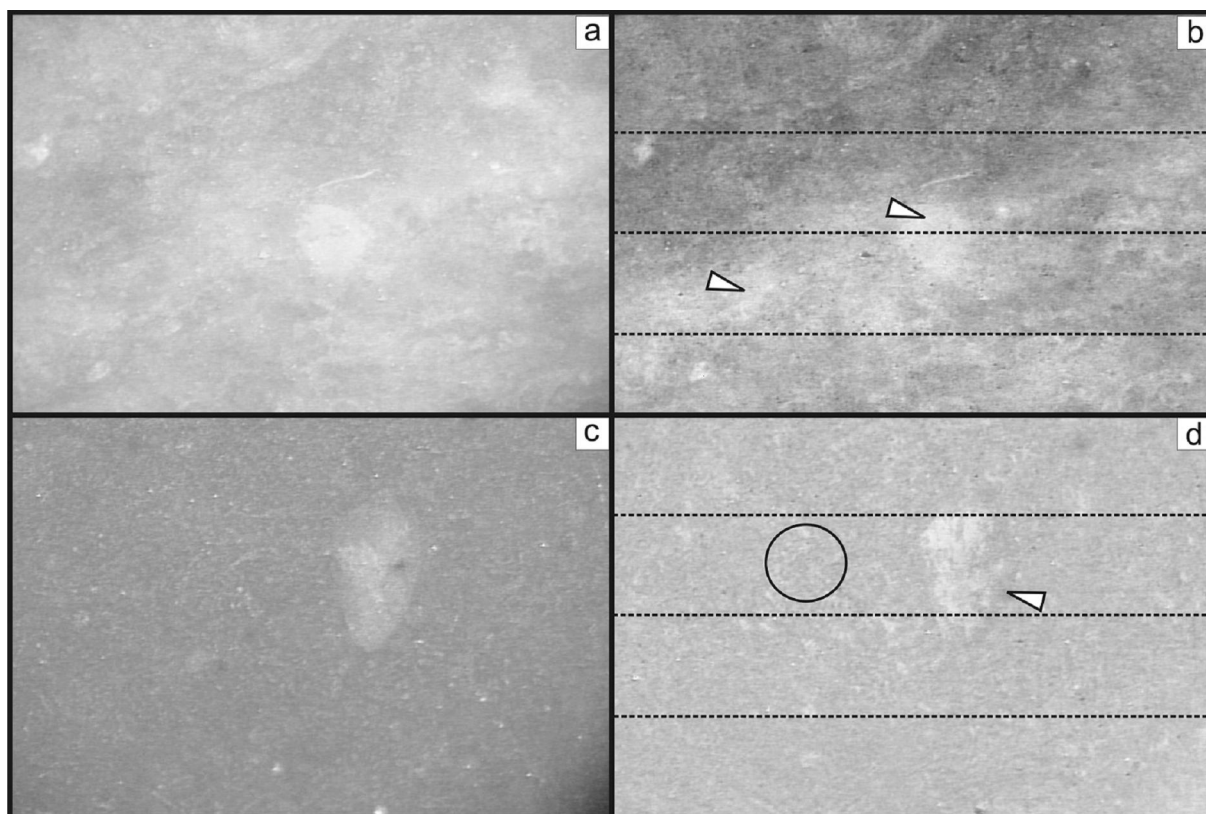


Figura 5.- Imágenes de microscopio con luz reflejada de las muestras naturales (no atacadas) y sus equivalentes luego del ataque (72 hs) y el posterior procesamiento. Muestra CAN 32 natural (a) y procesada (b), muestra CAN 33 natural (c) y procesada (d). En líneas de puntos (en negro) se indican los sectores en donde se realizaron los perfiles (a 25%, 50% y 75% de cada imagen).

Con esos valores se construye una nueva matriz y se obtiene el valor máximo y mínimo de sus elementos. Con esto se determina un rango con su mínimo y máximo y se divide ese rango en “n” intervalos. Se recorre la matriz de diferencias comparándola con los intervalos y se determina el índice del vector de intervalos. Con ese índice se aplica una función de gradiente (de azul a rojo) a cada uno de esos intervalos a través de una función que descompone los colores en sus tres componentes RGB (rojo, verde y azul) y se obtiene una nueva matriz gradiente con la que se recrea la nueva imagen. El extremo azul de ese gradiente corresponderá a la mayor diferencia negativa y el rojo a la mayor diferencia positiva, siendo los colores intermedios los sectores que presenten menos variación. Debido a que la presente publicación es en blanco y negro, las imágenes procesadas se pasaron a escalas de grises (Figura 4b, 4d, 5b y 5d), por lo que el extremo rojo aparece en blanco, el extremo azul en negro y los intermedios en diferentes escalas de grises.

Por otra parte y con el objeto de analizar la variación del “relieve” de cada muestra se tomaron 3 filas a 25, 50 y 75 % de la altura de cada imagen (en las muestras naturales y atacadas) y se construyeron perfiles también en función del valor de cada píxel. Se calcularon las diferencias en cada fila entre la muestra atacada y la natural para visualizar en la matriz de diferencia la variación en la “topografía” (se obtuvieron 12 perfiles).

Por último se elaboraron modelos 3D con cada una de la imágenes y para evitar errores de interpretación debido a características texturales propias de las rocas, se calcularon también los modelos 3D de las diferencias entre las muestras atacadas y las naturales.

## Resultados

En las Figuras 4 y 5 se comparan las imágenes de las muestras naturales (Figuras 4a, 4c, 5a, 5c) con las atacadas y procesadas (Figuras 4b, 4d, 5b, 5d) según el método antes descripto. En línea de puntos se marcaron las posiciones a 25, 50 y 75% donde se realizaron los perfiles.

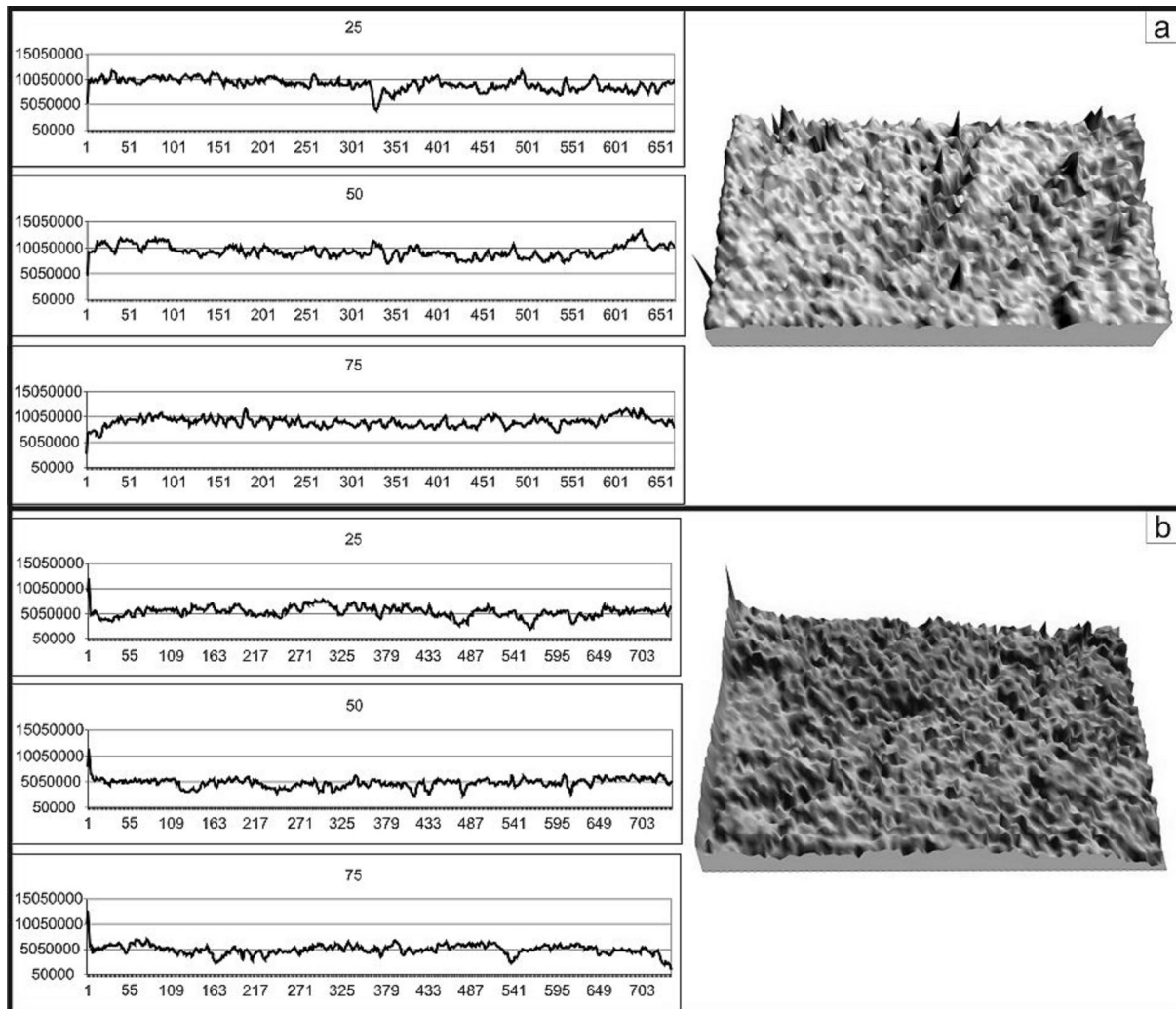


Figura 6.- Perfiles y bloques 3D calculados a partir de los valores de diferencia entre las muestras naturales y atacadas (hasta 72 hs). a) Perfiles a 25, 50 y 75% de la muestra CAN 1A (izquierda) y bloque 3D (derecha). b) Perfiles a 25, 50 y 75% de la muestra CAN 31 (izquierda) y bloque 3D (derecha).

La muestra CAN 1A (Figura 4b) muestra muchos puntos azules pero también son abundantes las zonas intermedias. La muestra CAN 31 (Figura 4d) posee muchos puntos rojos y pocos azules. La muestra CAN 32 (Figura 5b) posee muchos puntos rojos pero también hay gran cantidad de valores intermedios. Por último, la muestra CAN 33 (Figura 5d) posee muchos puntos rojos y muchos azules. En las Figuras 6 y 7 se muestran los 12 perfiles (3 por cada muestra) calculados como la diferencia entre las imágenes de las rocas atacadas y las naturales. Solamente los perfiles realizados sobre la muestra CAN 33 (Figura 7b) mostraron variaciones significativas (picos muy altos y muy bajos). También se muestran los bloques 3D generados a partir de las diferencias entre las muestras atacadas y las naturales.

Es importante aclarar que ni los perfiles ni los bloques 3D representan topografías reales ya que se obtuvieron a partir de valores de luminosidad y no por métodos de medición de la escala vertical (ej.: mediante láser). A su vez, tanto los perfiles como los bloques 3D muestran valores de diferencia entre las muestras naturales y atacadas por lo que no pueden tomarse como superficies topográficas post-ataque.

## Discusión

Del análisis de las imágenes en azul y rojo (Figura 4b, 4d, 5b y 5d) se puede observar que las mayores diferencias (y por ende los mayores ataques) se producen en los contactos entre granos de cuarzo

(evidente en la Figura 4d, flechas blancas), en zonas donde se ha producido una fuerte reducción en el tamaño de grano (Figura 5d, círculo negro), en sectores donde todavía prevalece material vítreo asociado al proceso de fusión por fricción en las pseudotaquilitas (Figura 5d, flecha blanca) y en bandas elongadas ricas en cuarzo tensionado y recrystalizado (Figura 5b, flechas blancas).

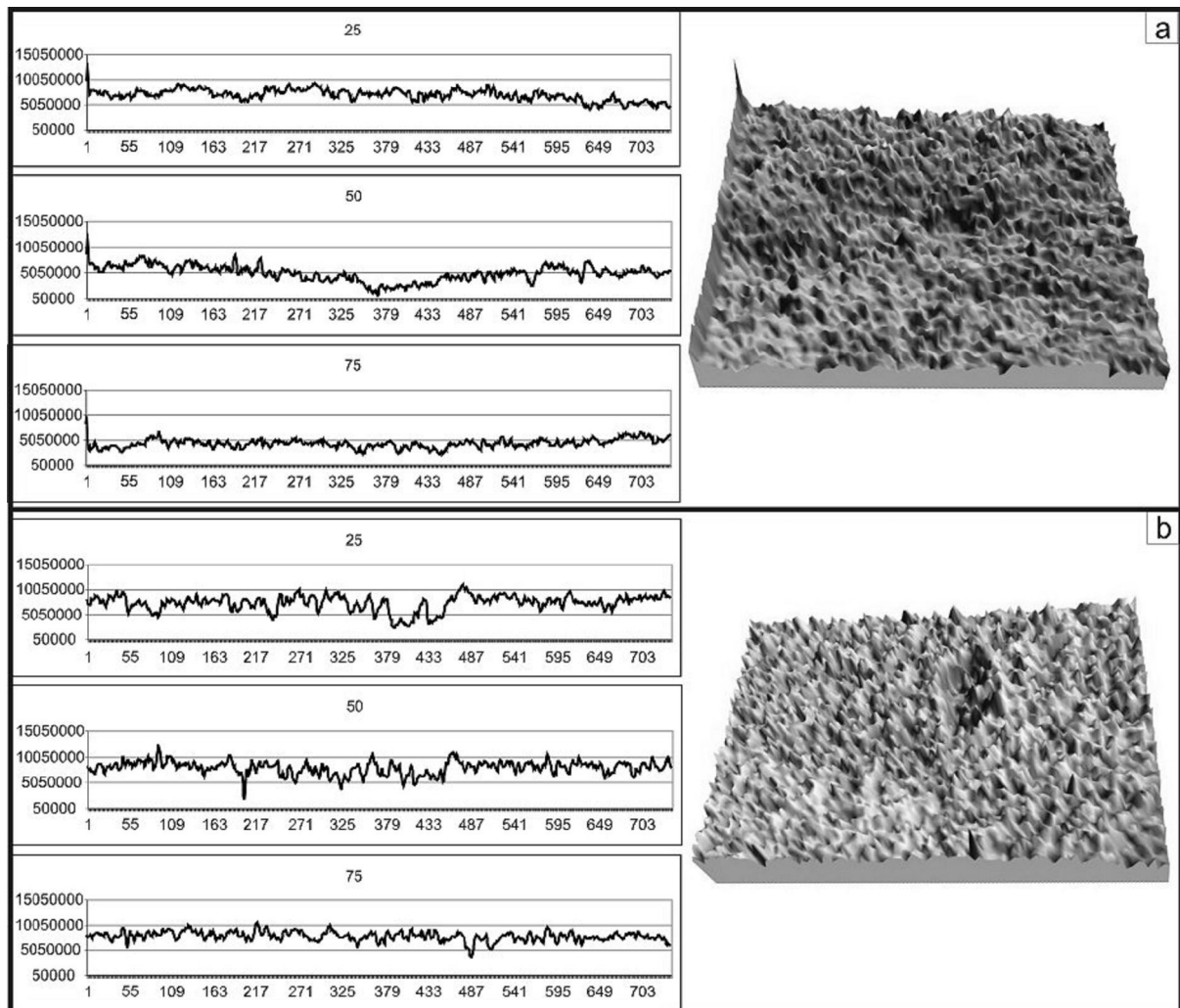


Figura 7.- Perfiles y bloques 3D calculados a partir de los valores de diferencia entre las muestras naturales y atacadas (hasta 72 hs). a) Perfiles a 25, 50 y 75% de la muestra CAN 32 (izquierda) y bloque 3D (derecha). b) Perfiles a 25, 50 y 75% de la muestra CAN 33 (izquierda) y bloque 3D (derecha).

Esto es coincidente con lo observado mediante microscopía óptica de polarización sobre secciones delgadas de las mismas muestras en trabajos anteriores (Locati et al. 2010).

Los perfiles de la muestra CAN 33 (Figura 7b) presentan fuerte variación con picos muy altos y muy bajos evidenciando sectores con fuerte diferencia entre los valores de luminosidad de la muestra natural y la atacada. El bloque 3D evidencia esas variaciones pero en ocasiones puede resultar confuso.

El análisis de las imágenes tipo azul al rojo resulta más efectivo debido a su claridad y puede dar una mejor información respecto de los sectores y de la intensidad del ataque alcalino.

Es importante tener sumo cuidado en el lavado de la muestra una vez extraída de la solución alcalina y puesta debajo del microscopio para la toma de imágenes ya que restos de material en la superficie podrían alterar los valores de luminosidad. Asimismo, la generación de nuevas fases de distinta coloración, la exposición de fases antes ocultas por remoción de material, la aparición de planos con fuerte reflexión, etc., deberán tenerse en cuenta a la hora del procesamiento de las imágenes y la interpretación de los resultados.

## Conclusiones

En este trabajo se propone un método para estudiar el fenómeno de reacción de rocas con cuarzo deformado en soluciones alcalinas, en función del análisis de imágenes digitalizadas. Este método permite evaluar la influencia de las características texturales de la roca y microestructurales del cuarzo en el proceso reactivo.

Los sectores que presentan más diferencias entre las muestras naturales y las atacadas están relacionados con bordes de grano, zonas con reducción en el tamaño de grano, porciones donde todavía prevalece material vítreo asociado al proceso de fusión por fricción en las pseudotaquilitas y sectores ricos en cuarzo y con evidencias de fuerte deformación.

El orden de reactividad evidenciado principalmente en las imágenes tipo azul - rojo fue CAN 33>CAN 31>CAN 32>CAN1A. Esto es coincidente con los valores de expansión y con las observaciones petrográficas de estudios anteriores.

El método se presenta como una buena herramienta para evaluar los sectores de las rocas que son propensos al ataque de soluciones alcalinas (similares a las presentes en la solución de poros del hormigón). Las imágenes de tipo azul - rojo fueron las que arrojaron datos más útiles y más confiables. Sin embargo se necesitan de mayores estudios para corroborar su eficacia.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Sr. Rodolfo Salomón por el desarrollo del software y el procesamiento de las imágenes; a la Universidad Nacional del Sur, Universidad Nacional de Córdoba, CIC de Buenos Aires y CONICET por su apoyo.

## Referencias

- Brown, L.S., 1955. Some observations on the mechanics of alkali-aggregate reaction. *ASTM Bull.* 205, p. 40.
- Freguglia, E., 2004. La metabasita piroxénica de Villa El Diquecito. La Calera, Sierra Chica de Córdoba. Trabajo Final, FCEFyN – Universidad Nacional de Córdoba. Inédito.
- Gordillo, E.C., 1958. Estudio químico-petrográfico de las rocas intrusivas de la Quebrada del Río Primero, Córdoba, Argentina. *Boletín de la Academia Nac. de Ciencias*, Tomo 40, 141-170.
- IRAM 1674 (Norma), 1997. Agregados. Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método acelerado de la barra de mortero, p. 14.
- IRAM 1650 (Norma), 1968. Reactividad alcalina en áridos. Método de ensayo químico, p. 15.
- Locati, F., Marfil, S., Baldo, E., 2010. Effect of ductile deformation of quartz-bearing rocks on the alkali-silica reaction. *Engineering Geology* (En prensa).
- Locati, F., Marfil, S., Baldo, E., Batic, O., 2008. Comportamiento de rocas metamórficas con venas de pseudotaquilitas de las Sierras Chicas de Córdoba, frente a la reacción álcali-sílice. *Memorias del III Congreso Internacional de la AATH, 17ª Reunión Técnica, Córdoba*, 257-264.
- Maiza, P.J., Salomón, R.C., Marfil, S.A., 1999. Susceptibilidad a la corrosión de agregados pétreos para hormigón a partir del estudio sobre superficies pulidas. *XIV Congreso Geológico Argentino, Salta, Actas II*, 416-418.
- Marfil, S.A., Maiza, P.J., Salomón, R.C.J., 1998. Evaluación de la corrosión superficial de un agregado cuarcítico en un medio alcalino mediante el estudio estadístico de imágenes digitalizadas. *Revista Hormigón* 32, 11-16.
- Mielenz, R.C., 1954. Petrographic examination of concrete aggregate. *ASTM Proc.* 54, 1188-1218.
- Mielenz, R.C., 1958. Petrographic examination of concrete aggregate to determine potential alkali-reactivity. Report No. 18-C, Highway (Transportation) Res. Board, 29-38.
- Steel, R.G.D. and Torrie, J.H., 1981. Principles and procedures of statistics. Mc. Graw Hill, Singapore.
- Wenk, H.-R., Monteiro, P.J.M., Shomglin, K., 2008. Relationship between aggregate microstructure and mortar expansion. A case study of deformed granitic rocks from the Santa Rosa mylonite zone. *J. Mater. Sci.* 43, 1278-1285.
- Wigum, B.J., 1995. Examination of microstructural features of Norwegian cataclastic rocks and their use for predicting alkali-reactivity in concrete. *Engineering Geology* 40, 195-214.