

Impactos en Mauritania: nuevos datos mineralógicos, texturales y geoquímicos de las megabrechas de Richat y del cráter meteorítico de Aouelloul

Impacts in Mauritania: new mineralogical, textural and geochemical data about the Richat megabreccias and the Aouelloul meteorite crater

J. Martínez Frías¹, F. García Talavera², F. Rull^{1,3}, F. López-Vera⁴, R. Capote del Villar⁵, J.M. Navarro Latorre², L. Sánchez-Pinto², J. López Rondón², J.A. Rodríguez Losada⁶, M.T. Fernández Sampedro¹, M.P. Martín Redondo¹ y C. Menor-Salvan¹

- 1 Centro de Astrobiología, CSIC/INTA, asociado al NASA Astrobiology Institute, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, Ctra. de Ajalvir, km. 4, 28850 Torrejón de Ardoz, Madrid. E-mail: martinezfj@inta.es
- 2 Museo de Ciencias Naturales, Organismo Autónomo de Museos y Centros, c/ Ramón y Cajal, 3, Edificio Salesianos, Semisótano 20, 38003 Santa Cruz de Tenerife, Tenerife, Islas Canarias.
- 3 Cristalografía y Mineralogía, Unidad Asociada CSIC-Universidad de Valladolid, Facultad de Ciencias, Valladolid, 47006, Spain
- 4 Departamento de Geología y Geoquímica, Facultad de Ciencias, C-VI, Universidad Autónoma de Madrid, Ciudad Universitaria de Cantoblanco, Ctra. de Colmenar km. 15, 28049 Madrid
- 5 Departamento de Geodinámica, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid
- 6 Departamento de Edafología y Geología, Universidad de La Laguna, 38206 La Laguna (Tenerife), Islas Canarias

Resumen: Se presentan los primeros resultados de la campaña científica Mauritania' 2007, en relación con la investigación de cráteres y eventos de impacto. Los estudios se centraron en la caracterización, mediante microscopía de luz transmitida y reflejada, DRX, SEM-EDX, ICP-MS, FT-IR y espectroscopia Raman, de las megabrechas de la espectacular (aunque controvertida) estructura de Richat y en el cráter meteorítico de Aouelloul. Los minerales identificados en las brechas son cuarzo, analcima, goethita, hematites, calcita, dolomita y sulfuros (pirita). Sus texturas incluyen bandeados y agregados colomorfos, texturas anubarradas, rellenos fisurales con recristalizaciones de cuarzo y fragmentos heterométricos de los granos/cristales de cuarzo con bordes y golfos de corrosión. En algunas muestras de Richat se ha observado mosaicismo de los granos de cuarzo y carbón amorfizado. Las brechas muestran heterogeneidad geoquímica con variaciones importantes de algunos elementos (principalmente Na, K, Ti, Cr, V, Co, Cu, Sr, Ba y Ni). En Aouelloul se han caracterizado las rocas intensamente deformadas del interior del cráter (se ha detectado mosaicismo) y los fragmentos ferruginizados (goethita y cuarzo) que aparecen dispersos alrededor de la estructura. También se ha realizado espectroscopia Raman de los fragmentos vítreos ricos en sílice, que muestran clara amorfización.

Palabras clave: Aouelloul, crater, Richat, megabrechas, impactos.

Abstract: This contribution presents first results from the research on meteorite impact craters and events in Mauritania. Megabreccias from the remarkable (and controversial) Richat structure and materials from the Aouelloul impact crater were studied by the combination of transmitted and reflected light microscopy, XRD, SEM-EDX, ICP-MS, FT-IR and Raman spectroscopy. Quartz, analcime, goethite, haematite, calcite, dolomite and sulphides (pyrite) were identified as main minerals of the megabreccias. Their textures comprise collomorphous layers and aggregates, cloudy textures, infillings of veins and cracks and quartz recrystallization, and heterometric quartz grains showing corroded gulfs. Some samples from Richat show mosaicism in quartz and amorphized carbon. In general, the megabreccias are geochemically heterogeneous, displaying significant variations in some elements (mainly Na, K, Ti, Cr, V, Co, Cu, Sr, Ba y Ni). Intensely deformed rocks (quartz mosaicism), and iron rich and glass fragments from the Aouelloul impact crater were also studied.

Key words: Aouelloul, crater, Richat, megabreccias, impacts.

INTRODUCCIÓN

La incorporación de España a los programas internacionales IMPACT (Response to the Earth System to Impact Processes), de la European Science Foundation y CAI (Comet and Asteroid Impacts and Human Society), del International Council for Science, ha promovido la colaboración multidisciplinar y la realización de estudios sistemáticos sobre una línea de

investigación que venía realizándose en nuestro país, de manera importante, aunque dispersa: el estudio de los eventos de impacto meteorítico. Entre otros aspectos, se han abordado los siguientes temas: 1) reconocimiento de eventos de impacto en el registro geológico de España; 2) evaluación de la posible potencialidad impactogénica de determinadas estructuras (ej. Azuara), zonas y materiales (ej. El Gasco), cuyo origen sigue aún siendo objeto de debate; 3) el estudio detallado, desde

distintas perspectivas, de determinados ‘límites geológicos’, principalmente el K/T; 4) la revisión de los principales criterios geoquímicos, que permiten la identificación de este tipo de eventos; 5) su caracterización como potencial riesgo natural y las conexiones bólidos-meteoritos; 6) la realización de experimentos controlados de impactos y simulaciones computerizadas, y 7) el estudio de estructuras de impacto existentes en la Tierra, por su importancia adicional como análogos en exploración planetaria. En este contexto se enmarcó la campaña científica Mauritania’ 2007, promovida y coordinada desde el Museo de Ciencias Naturales de Tenerife, en relación con su programa de investigación sobre Macaronesia, y gracias a la cual se ha iniciado el estudio de cráteres y eventos de impacto meteorítico en el NO de África. Los primeros resultados científicos de dicha campaña se presentan en esta contribución, centrados en la caracterización mediante microscopía de luz transmitida y reflejada, DRX, SEM-EDX, ICP-MS, FT-IR y espectroscopía Raman de las megabrechas de la espectacular y controvertida estructura de Richat y en el cráter meteorítico de Auouelloul (Fig. 1).

ANTECEDENTES

De las 174 estructuras de impacto confirmadas en nuestro planeta, registradas en la prestigiosa *Earth Impact Database* de la Universidad de New Brunswick (Canadá, <http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/>), 57 se encuentran en América del Norte, 37 en Europa (ninguna de ellas en España), 27 en Asia, 26 en Australia, 19 en África y 8 en Sudamérica).

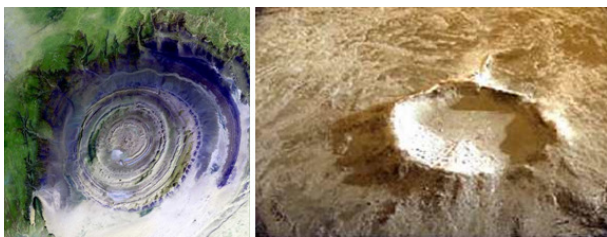


FIGURA 1. Estructura de Richat (izquierda) ($21^{\circ} 04' N$; $11^{\circ} 22' W$; \varnothing : 40 km), NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS, U.S. y Japan ASTER Science Team y cráter meteorítico de Auouelloul (derecha) ($20^{\circ} 15' N$; $12^{\circ} 41' W$; \varnothing : 390 m, NASA/JPL).

Desde los primeros trabajos en el NO de África del explorador y naturalista francés Théodore Monod, en Mauritania se han reconocido 6 estructuras geológicamente singulares, para las que se ha propuesto y discutido un posible origen ligado a impactos meteoríticos: *Aouelloul*, *El Mrayer*, *Gogui*, *Tenoumer*, *Temimichat* y *Richat*. Sin embargo, sólo *Aouelloul* y *Tenoumer* han sido aceptadas, de manera inequívoca, como impactogénicas y aparecen registradas en la base de datos canadiense como parte de los 19 cráteres meteoríticos identificados y confirmados, hasta el momento, en el continente africano.

A pesar de su singularidad y origen enigmático, los estudios previos sobre Richat (Fig. 1) son relativamente escasos, y las hipótesis propuestas para explicar su

génesis cubren prácticamente todas las posibilidades: a) debida a un impacto meteorítico; b) colisión de “mirror matter”; c) el resultado de ajustes tectónicos del basamento; d) un origen plutónico granítico ligado a doming litosférico, y e) más recientemente, procesos de karstificación hidrotermal sobre un complejo alcalino cretácico (ver, entre otros, Cailleux *et al.*, 1964; Fudali, 1969; Monod & Pomerol, 1973; Matton *et al.*, 2005).

Con respecto al cráter de Auouelloul, las investigaciones realizadas hasta el momento se han centrado en: a) evaluar las dificultades para la determinación del origen impactogénico, inherentes a este tipo de estructuras de pequeñas dimensiones que carecen de rasgos metamórficos clásicos de impacto y b) la caracterización de los vidrios de impacto existentes en el área, utilizando distintas técnicas (catodoluminiscencia, inclusiones fluidas, Raman, isótopos Re-Os, etc.) (Monod & Pourquie, 1951, entre otros).

MARCO GEOLÓGICO

La estructura de Richat es un complejo anular de unos 40 km de diámetro, localizado en la región del Adrar de Mauritania (desierto del Sahara occidental) y desarrollado en una secuencia de materiales del Proterozoico superior-Ordovícico. El efecto de la erosión diferencial ha remarcado una serie de cuestas circulares, representadas básicamente por tres anillos, que buzan hacia el exterior de la estructura. De acuerdo con Netto *et al.* (1992), Richat se encuentra en la intersección de dos redes de fracturación regional: aproximadamente N-S y E-W, las primeras relacionadas con el denominado ‘evento Pan-Africano’ (~ 600 Ma) y las segundas, más jóvenes, cortando las anteriores. En las partes más exteriores de Richat existen fallas tangenciales y radiales y la zona norte está seccionada por un sistema de fallas orientado 30° NE (Fig. 1). Las cuarcitas definen las crestas de materiales más resistentes. El centro de la estructura está formado por calizas-dolomías y meta-arcosas, rodeadas por una cresta de materiales altamente silicificados, que constituyen una espectacular megabrecha de escala kilométrica, estudiada en detalle en el presente trabajo (Figs. 2 y 4). De acuerdo con Matton *et al.* (2005) los fragmentos de las brechas son polimícticos e incluyen chert de color gris a blanco, areniscas ricas en cuarzo, nódulos de chert y calizas estromatolíticas silicificadas. Los fragmentos están cementados por cuarzo microcristalino equidimensional. Estos mismos autores, aplicando análisis fractal, detectan la existencia de bimodalidad en los fragmentos de chert, y sugieren sobre la base de dicho análisis, la existencia de dos fases de formación de brechas. En Richat se han reconocido diques basálticos y carbonatíficos, intrusiones de tipo kimberlítico y rocas volcánicas alcalinas, así como hidrotermalismo (Monod & Pomerol, 1973; Matton *et al.* 2005). La datación de apatitos de los diques carbonatíficos indica una edad de 85 ± 5 Ma (Cretácico superior) (Netto *et al.*, 1992).

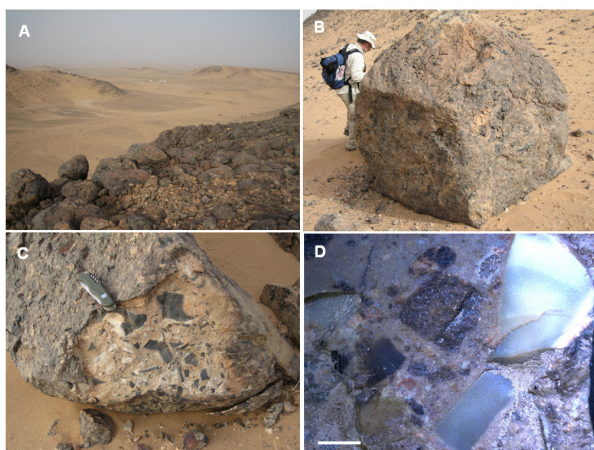


FIGURA 2. Las brechas de Richat se concentran masivamente en el anillo interno de la estructura y se presentan en forma de crestas con niveles (A) en los que se diferencian “bolas” (B) de tamaño incluso métrico. C: Detalle, sobre el terreno, de la superficie externa e interna de una de las brechas de Richat. D representa una de estas brechas, fundamentalmente silíceas, bajo la lupa binocular. Tamaño de la barra: 1 cm. Obsérvese el carácter heterométrico de los fragmentos (ver texto para más información sobre composición y texturas).

El cráter de Aouelloul fue descubierto desde el aire por A. Pourquié en 1938 y visitado por primera vez por Monod en 1950 (Koeberl *et al.*, 1998) (Figs.1 y 3). Al igual que Richat, se encuentra en la región del Adrar de Mauritania (desierto del Sahara occidental) y, con su diámetro de aproximadamente 390 m, es uno de los cráteres confirmados de impacto meteorítico más pequeños de nuestro planeta (Fig. 3).

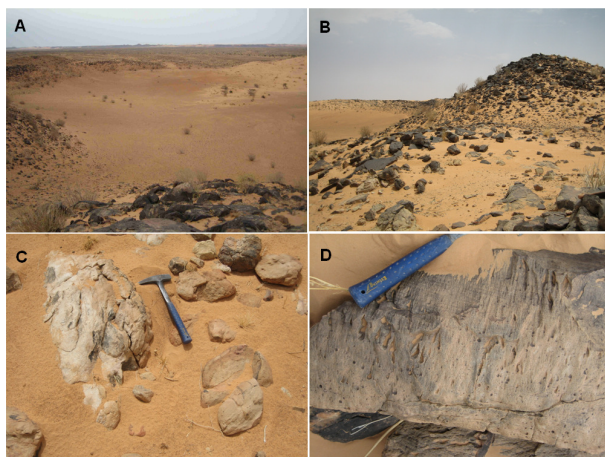


FIGURA 3. A y B: Fondo y anillo de borde del cráter meteorítico de Aouelloul. C: Areniscas intensamente deformadas del interior del cráter. D: Estrías y otras texturas de deformación relacionadas con el impacto en las rocas del anillo del borde del cráter.

Aouelloul se ha desarrollado sobre areniscas y cuarcitas ordovícicas y se encuentra relleno de materiales arenosos. Presenta un anillo bien definido, que varía entre 15 a 25 m con respecto a la topografía local y 53 m sobre el fondo del cráter (Fig. 3B). Alrededor de la estructura pueden encontrarse fragmentos de óxidos de hierro generalmente con texturas botroidales y fragmentos vítreos. Estos últimos se han identificado como vidrios de impacto (Koeberl *et al.*, 1998), algunos de ellos con *esférulas* de Fe-Ni.

Dataciones mediante K-Ar de los vidrios indican edades que varían entre los 3.1 ± 0.3 y los 10-15 Ma (Matsubara *et al.*, 1991).

MEGABRECHAS DE RICHAT

Nuestros estudios verifican, tal y como indica Matton *et al.* (2005), que la megabrecha de Richat es un cuerpo lenticular de unos 3 km de diámetro y unos 40 m de potencia, que se acuña lateralmente hasta alcanzar tan solo unos pocos metros. Sin embargo, además del cuerpo brechoide lenticular (cresta) (Fig. 2A) se observan también “bolas” individualizadas de tamaño incluso métrico (Fig. 2B), con colores rojos y negros y fragmentos centimétricos angulosos a subredondeados (Fig. 2C). Las “bolas” se presentan a veces facetadas (Fig. 2B) y usualmente deformadas y con el aspecto de materiales, altamente silicificados (Fig. 2D). En la parte superior de la cresta central del cuerpo brechoide (Fig. 2A), las “bolas” son de menor tamaño (y también sus fragmentos); en general son más ferruginosas, mostrando “de visu” texturas típicas de oxidación del hierro, con colores rojos y amarillentos. En esta zona también aparecen brechas silíceas de tonos mucho más claros, casi blancos e intercalaciones de areniscas con texturas en “corteza de pan”. Principalmente en el área central de Richat —aunque también en otras zonas— se observan materiales (actualmente en estudio) con texturas que se asemejan a las de los “augen gneisses”, así como venas hidrotermales (α : N178°E y β : 44°W) de tamaño métrico de jaspes bandeados.

Nuestra caracterización detallada de las brechas, tiene en cuenta la disposición espacial y el espectro composicional y textural anteriormente expuesto. Los minerales identificados son cuarzo, analcima, goethita, hematites, calcita y dolomita. Las texturas de las brechas (Fig. 4) incluyen bandeados y agregados colomorfos, texturas anubarradas, rellenos fisurales con recristalizaciones de cuarzo y formación de sulfuros de hierro (pirita), y fragmentos heterométricos de granos/cristales de cuarzo con bordes y golfos de corrosión, en los que coexisten caras planas y curvas. Es importante destacar que en algunas muestras del área de Richat se ha observado mosaicismo de los granos de cuarzo (Fig. 4C).

Asimismo, se ha detectado carbón amorfizado, mediante espectroscopia Raman, en el material fragmentario de tamaño centimétrico, rico en goethita y sílice, que aparece generalmente disperso alrededor del anillo central de Richat.

Análisis geoquímicos mediante ICP-MS de las brechas indican que muestran una gran heterogeneidad con variaciones importantes de algunos elementos: Na: 57-122 ppm, K: 62-298 ppm, Ti: 4-639 ppm, Cr: 2-11 ppm, V: 3-13 ppm, Co: 1-93 ppm, Cu: 3,5-14 ppm, Sr: 8.6-52 ppm, Ba: 312-372 ppm. El Ni aparece de manera significativa en las brechas (entre 1225-5017 ppb) y alcanza, en algunas muestras, las 16 ppm.

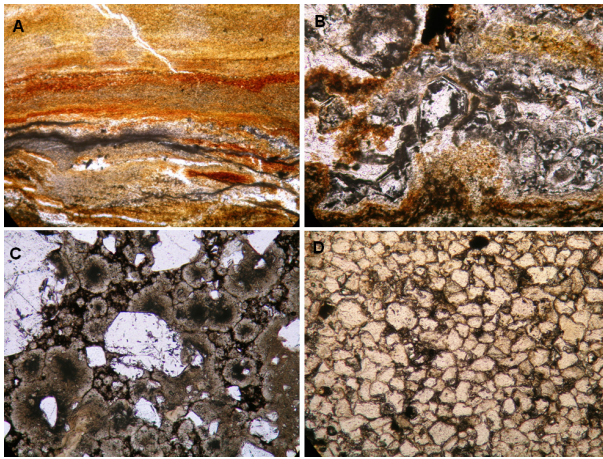


FIGURA 4. Algunas texturas representativas que aparecen en Richat. A: Textura bandeada de óxidos de Fe (goethita) e intercalaciones silíceas, en las que, en ocasiones, se aprecian cristales micrométricos idiomorfos de cuarzo (B). C: Asociación de granos y cristales subidiomorfos de cuarzo y analcimas. D: Aspecto al microscopio (nícoles paralelos) del mosaicismo de cristales de cuarzo (Richat).

AOUELLOUL

Nuestros estudios en Aouelloul se centran en la caracterización de las rocas intensamente deformadas del interior del cráter (Fig.3C) y en el análisis de los óxidos de Fe que aparecen dispersos alrededor de la estructura (Fig. 5). También se ha realizado espectroscopia Raman de los fragmentos vítreos ricos en sílice. Los materiales intracráter muestran texturas en “corteza de pan”, con cuarteados de la corteza superficial que al microscopio se refleja en forma de mosaicismo de los cristales de cuarzo (Figs. 5C y 5D).

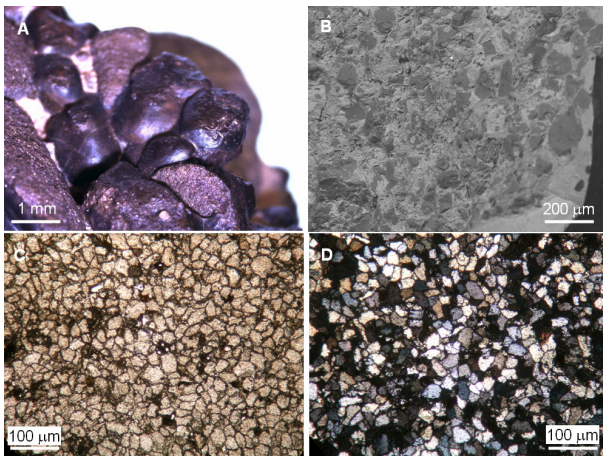


FIGURA 5. Zona de Aouelloul. A: Concreciones ferruginosas (principalmente goethita) que aparecen en los alrededores del cráter meteorítico. B: Foto SEM de detalle de una de las esferas de A, donde se observa que realmente se trata de una asociación de goethita-cuarzo. C y D: Aspecto al microscopio del mosaicismo de los cristales de cuarzo (nícoles paralelos y cruzados respectivamente) de las rocas intensamente deformadas presentes en el interior del cráter. Nótese su similitud con las texturas de la Fig. 4C del área de Richat.

Geoquímicamente, presentan concentraciones significativas de Fe: 313 ppm, Ti: 792 ppm y Pb: 24 ppm. El Ni alcanza las 2334 ppb. Las concreciones ferruginosas que aparecen dispersas en los alrededores del cráter, con texturas usualmente botroidales (Fig. 6A)

están constituidas por una mezcla de goethita y cuarzo (Fig. 6B). Una fina pátina de barniz salino (barniz del desierto) recubre ambos minerales. La sílice de los fragmentos vítreos se encuentra claramente amorfizada.

CONCLUSIONES

Aunque, como ya se ha indicado, se trata de una investigación en desarrollo, los primeros resultados han permitido la caracterización mineralógica, textural (destacando el mosaicismo de los granos de cuarzo) y geoquímica de las brechas de Richat. Asimismo, se ofrecen, por primera vez, espectros Raman de las principales fases minerales. En Aouelloul se han caracterizado las rocas deformadas del interior del cráter (también se ha detectado mosaicismo) y los fragmentos ferruginizados (goethita y cuarzo) que aparecen dispersos alrededor de la estructura. Los análisis mediante espectroscopia Raman de los fragmentos vítreos ricos en sílice, indican clara amorfización.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Embajada de Mauritania el permiso para el desarrollo de la campaña científica, y el respaldo institucional de la Embajada de España en Mauritania. Gracias también a Binter Canarias por su apoyo logístico, y a un referee anónimo por su revisión detallada de la presente contribución.

REFERENCIAS

- Cailleux, A., Guillemaut, A., and Pomerol, C. (1964): Presence de coesite, indice de hautes pressions dans l'accident circulaire des Richat (Adrar Mauritanien): Paris, *Académie des Sciences. Comptes Rendus*, v. 258 : 5488–5490.
- Fudali, R.F. (1969): Coesite from Richat dome Mauritania-A Misidentification, *Science* 166/3902: 228
- Koerberl, C., Reimold, W.U. and Shirey, S.B. (1998): The Aouelloul crater, Mauritania: On the problem of confirming the impact origin of a small crater, *Meteoritics & Planetary Science* 33: 513-517.
- Matsubara, K., Matsuda, J., & Koerberl, C. (1991): Noble-gases and K-Ar ages in Aouelloul, Zhamanshin, and Libyan desert glasses. *Geochimica et Cosmochimica Acta.* 55-10: 2951-2955.
- Matton, G, Jebrak, M & Lee, J.K.W. (2005): Resolving the Richat enigma: Doming and hydrothermal karstification above an alkaline complex. *Geology* 33-8: 665-668.
- Monod, T. y Pourquié, A. (1951): The Aouelloul crater Adrar, western Sahara (en francés). *Bulletin de l'Institut Fondamental d'Afrique Noire*, 13: 293-311.
- Monod, T., and Pomerol, C. (1973): *Contributions a l'étude de l'accident circulaire des Richat (Adrar de Mauritanie): Sci. de la Terre. Memoires* 28: 191 p.
- Netto, A.M., Fabre, J., Poupeau, G, y Champenois, M (1992): Fission-track dating of the Richat annular structure (Mauritania) *Compte Rendus De l'Academie des Sciences. Serie II.* 314-11: 1179-1186.