

EL CONDROITO CARBONÁCEO AGUAS ZARCAS: BÓLIDO, CAÍDA Y RECUPERACIÓN DE UN METEORITO EXTRAORDINARIO DEL TIPO CM2

THE AGUAS ZARCAS CARBONACEOUS CHONDRITE: BOLIDE, FALL AND RECOVERY OF AN EXTRAORDINARY CM2 TYPE METEORITE

Oscar H. Lücke^{1*}, Pilar Madrigal¹ y Gerardo J. Soto^{2,3}

¹ Universidad de Costa Rica, Escuela Centroamericana de Geología, Sección de Petrografía y Geoquímica, San José, Costa Rica

² Universidad de Costa Rica, Escuela Centroamericana de Geología Escuela, San José, Costa Rica

³ Universidad de Costa Rica, Red Sismológica Nacional, San José, Costa Rica

*Autor para contacto: oscar.luckecastro@ucr.ac.cr

(Recibido: 12/9/2019; aceptado: 07/11/2019)

RESUMEN: El 23 de abril del 2019 a las 21:08, se observó un bólido en una dirección sureste a noroeste en el centro-norte de Costa Rica, registrado por cámaras. En San Carlos se reportó un sonido explosivo (fragmentación en la atmósfera), y luego se dio una lluvia de meteoritos en los distritos Aguas Zarcas y La Palmera de San Carlos. El primer fragmento (1071 g) fue recuperado en una vivienda en La Caporal de Aguas Zarcas, a la que le horadó el techo, se rompió en algunos pequeños fragmentos, para un peso total de 1152 g. En los días siguientes, hacia el noroeste de Aguas Zarcas, en La Cocaleca, Santa Rosa, La Palmera, y alrededores, se recuperaron fragmentos con peso desde <1 g hasta el mayor de 1875 g. El total recuperado se estimó en casi 30 kg. El área de caída tiene una forma de elipse orientada SE-NW, de ~6,5 km por 3 km. Se propuso el nombre Meteorito Aguas Zarcas, que fue aprobado por la *Meteoritical Society* el día 30 de mayo. Las masas principales por encima de ~50 g, muestran regmaglitos (muchos con superficies iridiscentes). Otros fragmentos tienen formas de gota, plato, elípticos, patrones aerodinámicos, y de domo frontal. El interior de los especímenes analizados muestra cóndrulos en porcentajes variables, una matriz gris oscuro a negro, inclusiones ricas en calcio y aluminio (CAI), cristales submilimétricos de plagioclasas, piroxenos, olivino, y hojuelas metálicas o de sulfuros. La superficie de fusión es muy evidente, presenta microfracturas, es levemente magnético y tiene un olor orgánico particular. Los análisis químicos e isotópicos llevados a cabo por las universidades de Costa Rica, Arizona y Nuevo México, entre otras, y las características texturales observadas y geoquímicas analizadas, lo clasifican como pétreo condritico carbonáceo, del tipo CM2: minerales hidratados, en medio de una matriz fina, componentes con carbón, sulfuros con níquel, con características muy similares en composición general e isotópica de oxígeno similares a los valores solares. Los condritos carbonáceos solo constituyen ~4% del total de los meteoritos recuperados en la Tierra, y preservan la composición geoquímica, isotópica y mineralógica de los primeros millones de años de historia del Sistema Solar, lo que hace que el evento de Aguas Zarcas sea extraordinario y de gran interés científico a nivel nacional e internacional.

Palabras clave: cóndrulos, regmaglitos, carbón, impacto, meteorítica, corteza de fusión.

ABSTRACT: On April 23rd, 2019 at 21:08 local time, a fireball was observed crossing the night sky of central Costa Rica with a general southeast to northwest direction, in an event registered by both witnesses and cameras. A subsequent explosive sound (fragmentation in the atmosphere) was reported near San Carlos, followed by a meteorite shower in the districts of Aguas Zarcas and La Palmera, of San Carlos. The first recovered fragment (1071 g) came from a house near La Caporal in Aguas Zarcas, where the impact bored a hole in the ceiling breaking the meteorite in smaller pieces adding up to a total weight of 1152 g. In the following days several other fragments were recovered towards the northwest of Aguas Zarcas, in the towns of La Cocaleca, Santa Rosa, and La Palmera, with weights ranging from <1g to 1875 g. The total recovered mass of the meteorite was estimated in roughly 30 kg. After proper revision by the *Meteoritical Society*, the official name “Aguas Zarcas Meteorite” was approved on May 30th, 2019. The main masses of the meteorite, in excess of ~50 g, show regmaglypts (some with iridescent surfaces). Other fragments display drop, platy, and elliptical forms, with aerodynamic patterns, and showing a frontal dome. The inner parts of the analyzed specimens show chondrules on varying areal percentages, within a dark-gray to black matrix. Calcium-Aluminum rich inclusions (CAI), sub-millimetric crystals of plagioclase, olivine, and sulphide and metallic flakes are also present in the matrix. A clear fusion crust is evident in some fragments showing cooling microfractures. It is slightly magnetic and expels a particular organic-like odor. Geochemical and isotopic analyses performed at the Universities of Costa Rica, Arizona and Nuevo Mexico, among others, and the observed textural characteristics of the meteorite, indicate that it belongs to the Carbonaceous Chondrite classification of rocky meteorites, type CM2 which entails the presence of hydrated minerals within a fine matrix composed of carbon, and nickel-rich sulphides components. CM2 meteorites also show general compositions and oxygen isotope compositions similar to the primitive solar nebula. Carbonaceous chondrites represent only ~4% of the total recovered meteorites worldwide and they preserve the geochemical, isotopic, and mineralogical composition of the first millions of years of the history and evolution of the Solar System, making the Aguas Zarcas Meteorite an extraordinary event, and sparking national and international scientific interest.

Keywords: Mioceno, Istmo de Panamá, GAARlandia, GABI, América del Norte, América del Sur.

INTRODUCCIÓN

El día 23 de abril del año 2019, aproximadamente a las 21:08 hora local de Costa Rica, se observó un bólido sobre Costa Rica con dirección aproximada SE-NW. Su avistamiento fue reportado en varios sitios de Costa Rica y fue documentado por cámaras de vigilancia en el Pacífico Central (Quepos, Esparza), Valle Central, Cordillera volcánica Central (cámaras de vigilancia volcánica en los volcanes Poás y Turrialba) y otras localidades. Posteriormente, esta misma noche, una residente del pueblo de Aguas Zarcas de San Carlos, reportó el impacto de un objeto de aspecto rocoso que perforó el techo de la terraza trasera de su casa de habitación.

A partir de este reporte, surgen numerosos otros indicios de recuperación de piezas de un meteorito asociado con el bólido anteriormente mencionado. Esto causa gran conmoción debido a

la atención de los medios, sobre todo por su enfoque y especulación acerca de su posible valor económico. Inmediatamente después del reporte de caída, numerosos especuladores y caza-meteoritos nacionales e internacionales se trasladaron a la zona de San Carlos y comenzaron a hacer ofertas económicas por fragmentos. Esto creó un mercado de especulación que ha abierto la posibilidad a posibles falsificaciones o afirmaciones erróneas sobre material rocoso que puede o no ser parte del meteorito que causó el bólido. Además, se generan centenares de solicitudes del público en general a la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica con el fin de establecer si cualquier material rocoso que particulares tenían en su posesión, se trata de un meteorito.

A pesar de que sobre la Tierra caen unos 25 meteoritos cada día, aquellos que son vistos caer y recuperados alcanzan solo unos 5 a

10 al año. De hecho, para Costa Rica solo existía el antecedente de un meteorito visto pasar como bólido, caído, recuperado y analizado: el meteorito Heredia, el 1° de abril de 1857 (Soto, 2004). El caso del meteorito de Heredia era el único antecedente de un meteorito oficial ante la Sociedad Meteorítica para el territorio de Costa Rica (<https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php?code=11875>). De tal manera que el Meteorito Aguas Zarcas, que cayó la noche del 23 de abril del 2019 como una lluvia de centenas o miles de fragmentos, es solo el segundo oficialmente registrado en la historia de Costa Rica.

En el caso del meteorito de Heredia, se trató de un meteorito tipo H5 lo que significa que es un condrito ordinario rico en hierro. Esta clasificación indica además que posee un alto porcentaje de cóndrulos con solo un 10 a 15% de matriz y cuyos componentes han sido intensamente metamorfizados. El meteorito Aguas Zarcas, como se discutirá en secciones posteriores de este trabajo, posee una composición muy diferente al de Heredia. Es precisamente su composición lo que lo hace extraordinario en términos de meteoritos recuperados en nuestro planeta.

Esta investigación se ha enfocado en analizar y documentar el material directamente asociado con la caída de Aguas Zarcas y contribuir a la formalización de la caída ante la Sociedad Meteorítica (*Meteoritical Society*). En este trabajo, se presentan las características morfológicas y petrográficas de los fragmentos analizados en el sitio de la caída y material facilitado en préstamo para análisis no destructivos.

EL BÓLIDO Y CAMPO DE CAÍDA

La noche del 23 de abril del año 2019, a las 21:07:44 hora local, el bólido fue reportado como visto en varios sitios de Costa Rica y fue documentado por cámaras de vigilancia en el Pacífico Central (Quepos, Esparza), Valle Central occidental,

Cordillera Volcánica Central (cámaras de vigilancia volcánica en los volcanes Poás y Turrialba) y otras localidades en la zona norte (Fig. 1). En el cantón de San Carlos, se reportó una intensa iluminación, y un sonido fuerte parecido a una explosión, que documenta posiblemente la fragmentación de la roca en la atmósfera, y luego se dio la lluvia de fragmentos del meteorito.

La figura 1 muestra una secuencia de capturas de video de dos cámaras de monitoreo de la Red Sismológica Nacional ubicadas en el Volcán Turrialba. La secuencia A muestra el bólido primero como un destello que satura la imagen (Figs. 1, A2 y A3) y posteriormente al alejarse, se aprecia el bólido como un punto con un rastro luminoso (Figs. 1, A5 y A6). Esta cámara apunta en una dirección azimut 264° y tiene una ubicación latitud 10,0182 y longitud -83,7598. La secuencia de la figura 1B muestra el resplandor (B2) y posteriormente el bólido en la esquina superior derecha, detrás de la marca de agua (Fig. 1 B4). Hacia el final de este video se observa un destello secundario y la fragmentación del bólido en al menos dos puntos luminosos. Esta cámara tiene una ubicación latitud 10,0192 y longitud -83,7564 y apunta en una dirección 270°. Se aclara que el tiempo que muestra la marca de agua en la cámara #2 (Fig. 1 B) no es correcto, el resplandor del bólido es captado por la cámara del volcán Poás a las 21:07:44 hora local. La cámara en la secuencia A de la figura 1, cuenta con tecnología tipo *Starlight* que optimiza la luz ambiental, por lo que se infiere que los colores del resplandor y el bólido observados son fieles a los percibidos en realidad. Estos concuerdan con los relatos de los reportes del bólido.

En primera instancia, solo se notó con certeza uno de los principales fragmentos, que impactó el techo de una casa en el norte del poblado de Aguas Zarcas. Posteriormente se documentó que la lluvia de los meteoritos cayó en los distritos de Aguas Zarcas y La Palmera de San Carlos. El primer fragmento, con una masa principal de 1071 g,

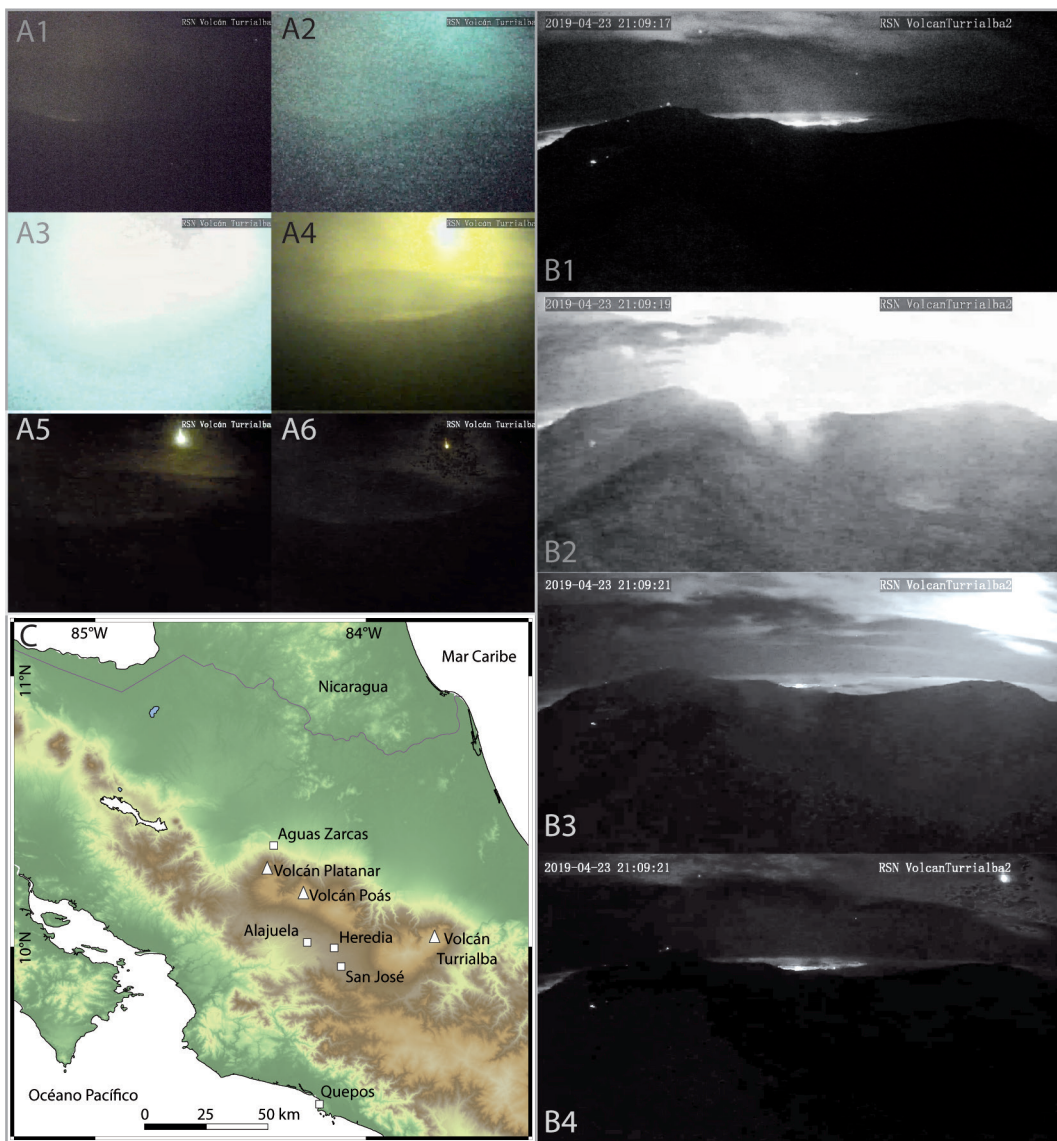


Fig. 1: A y B: Captura del bólido por la cámara de vigilancia volcánica de la Red Sismológica Nacional en el volcán Turrialba el día 23 de abril a las 21:07:44 hora local. Se aclara que el tiempo que muestra la marca de agua en la cámara #2 (Fig. 1 B) no es correcto, el resplandor del bólido es captado por la cámara del volcán Poás a las 21:07:44 hora local. C: Localidades con reportes de avistamiento del bólido.

fue recuperado por la dueña de una vivienda en el barrio La Caporal de Aguas Zarcas. Al impactar, horadó el techo de la parte posterior de la casa (Figs. 2A, 2B), quebró una cercha de madera y golpeó unas mesas plásticas (Figs. 2C, 2D), donde se rompió en algunos pequeños fragmentos, para un peso total recuperado de 1152 g.

Al día siguiente, y en parte gracias a la noticia dada del primer impacto, otros vecinos hacia el noroeste de Aguas Zarcas, principalmente en La Cocaleca y en Santa Rosa de La Palmera, y alrededores, en pastizales, potreros, predios de casas, caminos y bosques, recuperaron fragmentos con un peso desde menos de un gramo hasta el mayor

de 1875 g, con varios fragmentos en el orden de 1 kg. Un fragmento de 280 g traspasó el techo de la casa de un perro, pero no lo hirió. Los cráteres de impacto vistos fueron superficiales y de

menos de 20 cm de diámetro (Fig. 2E). El total recuperado hasta fines de mayo de 2019 se estima en 27 kg. El área de caída de los diferentes fragmentos tiene una forma de elipse orientada

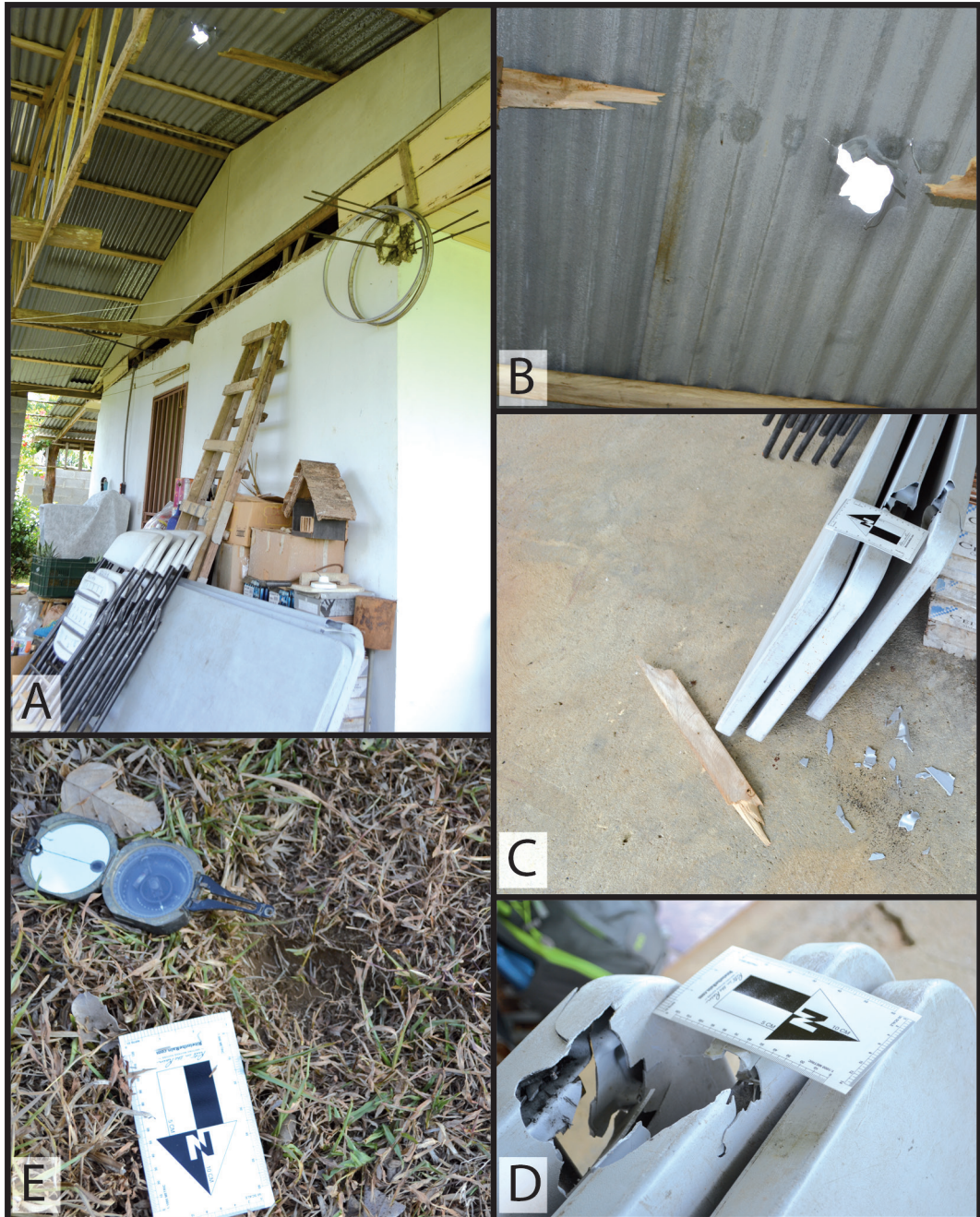


Fig. 2: Indicios de impacto de fragmentos del meteorito en la zona de Aguas Zarcas.

SE-NW, de unos 6,5 km de eje mayor y unos 3 km de eje menor (Fig. 3). El área principal donde se reporta la recuperación de fragmentos se extiende entre el norte del poblado de Aguas Zarcas y La Palmera. Sin embargo, existen áreas densamente vegetadas donde la recuperación de fragmentos se dificulta como es el valle del río Aguas Zarcas. Además, debido a la especulación sobre el posible valor económico de los fragmentos, muchos hallazgos no fueron reportados o su localidad específica fue mantenida en confidencialidad.

CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS

Durante el ingreso a la atmósfera, los meteoroides son sometidos a temperaturas por encima de los 1500°C, suficientes como para fundir la superficie rocosa del cuerpo, por lo que se preserva

una corteza de fusión vidriosa con indicadores de la dirección de caída y morfologías conocidas como regmagliptos (Lin y Qun, 1987). Estas características usualmente son indicios inequívocos para reconocer un meteorito. Estas estructuras se ven muy bien desarrolladas en las masas principales del Meteorito Aguas Zarcas, por encima de unos 50 g de peso, y particularmente en las masas mayores recuperadas.

El fragmento de La Caporal indica claramente tres generaciones de regmagliptos (Fig. 4), lo cual ofrece una evidencia clara de la secuencia de dos ocasiones de fragmentación de la pieza recuperada en su caída antes de tocar tierra. La figura 4A muestra la primera generación de regmagliptos con un mayor desarrollo por pérdida de masa por desprendimiento y fusión, así como una corteza de fusión bien desarrollada y leve iridiscencia en los bordes. En esta vista se aprecia la forma aerodinámica con mayor desarrollo de

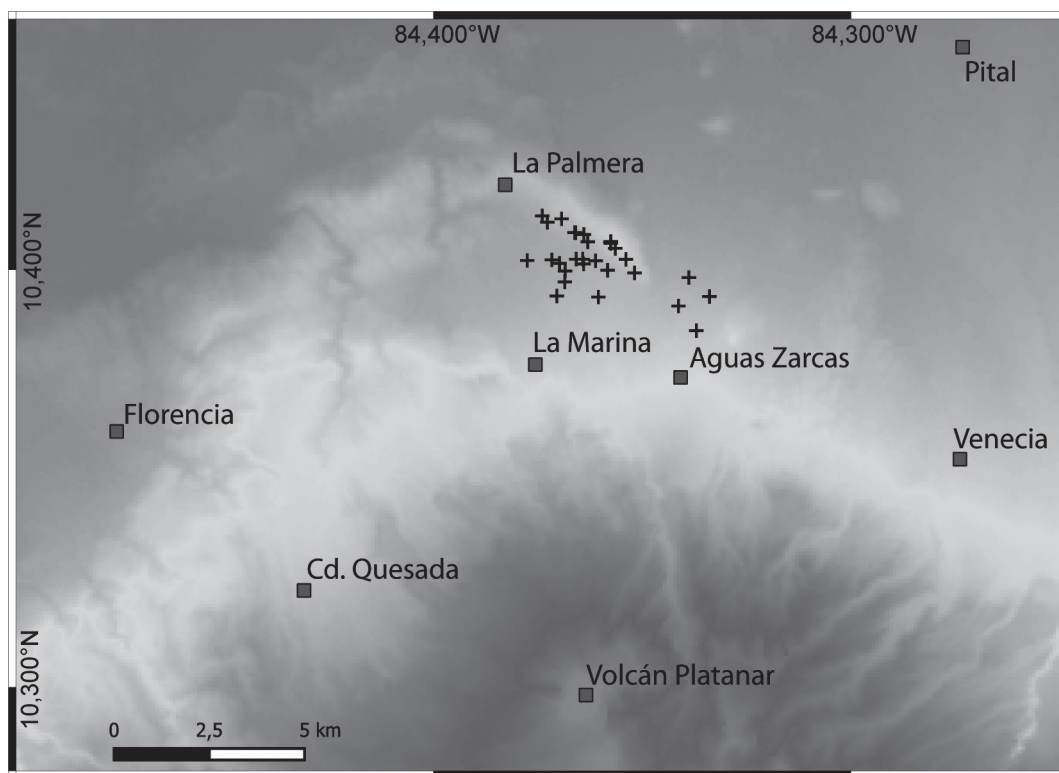


Fig. 3: Sitios confirmados de caída de fragmentos del meteorito de Aguas Zarcas (marcados por cruces negras). Algunas localidades han sido aportadas por: Lilliana Rodríguez (Universidad Técnica Nacional), Wilfredo Rojas y Luis Alonso Zeledón.

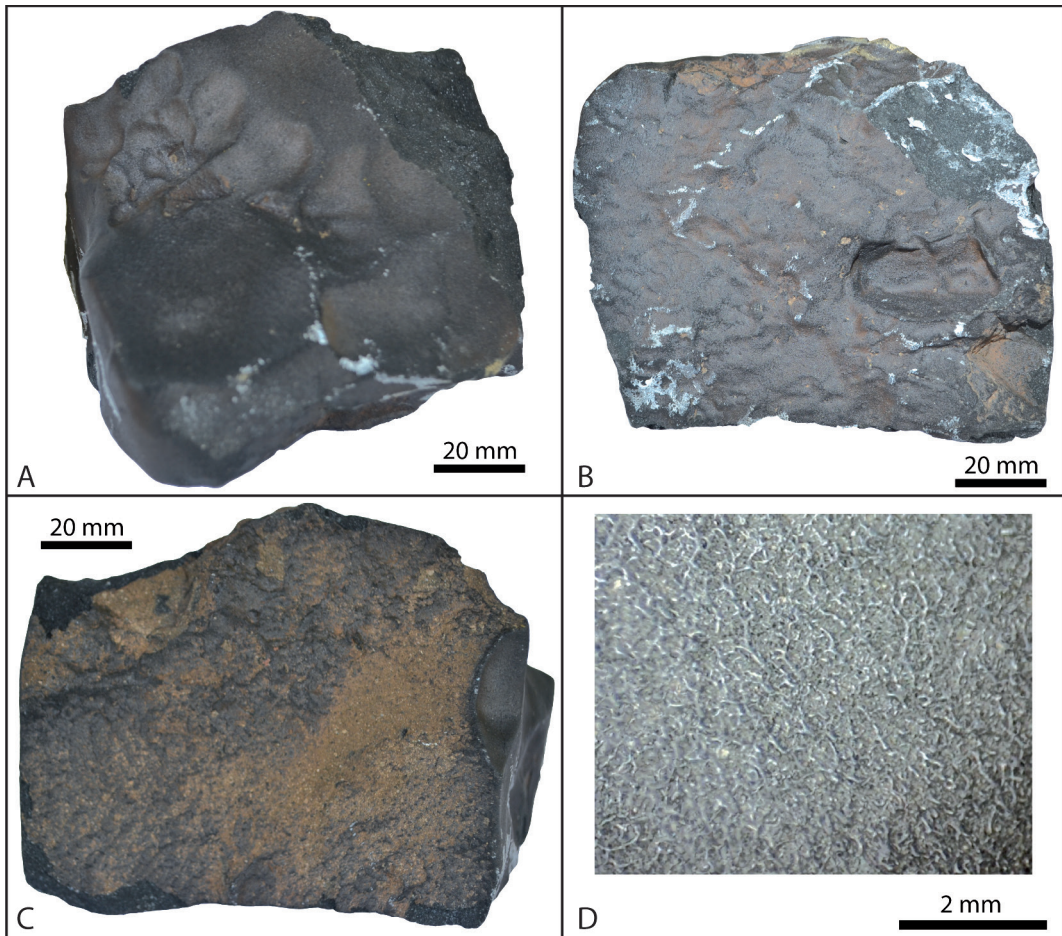


Fig. 4: Regmagliptos en el fragmento del primer reporte de caída en Aguas Zarcas. Se observan tres generaciones de desarrollo de regmagliptos. El recuadro A muestra el estado más desarrollado, seguido por el B y C. El recuadro D muestra la textura de la corteza de fusión.

corteza de fusión en la parte frontal. Ambas características indican la dirección en la que viajaba el fragmento por la atmósfera cuando se desarrolló la primera generación de regmagliptos. La figura 4B muestra la segunda generación, que presenta un color violáceo-naranja y un buen desarrollo de corteza de fusión. En la imagen se aprecian zonas color gris claro que corresponden con plástico que el fragmento incorporó al impactar las mesas (Fig. 2 D). La figura 4C muestra la tercera y última generación de regmagliptos para este fragmento. Presenta un color naranja por alteración de la matriz. La figura 4D muestra un acercamiento a la corteza de fusión que microscópicamente, asemeja

la superficie de lavas cordadas. Para este fragmento, se preparó un modelo tridimensional a partir de fotogrametría que se puede consultar en el repositorio de información digital de esta revista.

El fragmento reportado de mayor masa es el de 1875 g. Este fragmento muestra poco desarrollo de regmagliptos, con superficies planares y de aspecto trapezoidal (Fig. 5). Se aprecia claramente la corteza de fusión y en partes iridiscencia. Este fragmento impactó en un campo lodoso y la superficie de impacto está impregnada con fango y materia vegetal. La corteza de fusión muestra un mayor desarrollo en la cara trapezoidal con sus bordes iridiscientes. Los sectores fracturados muestran la

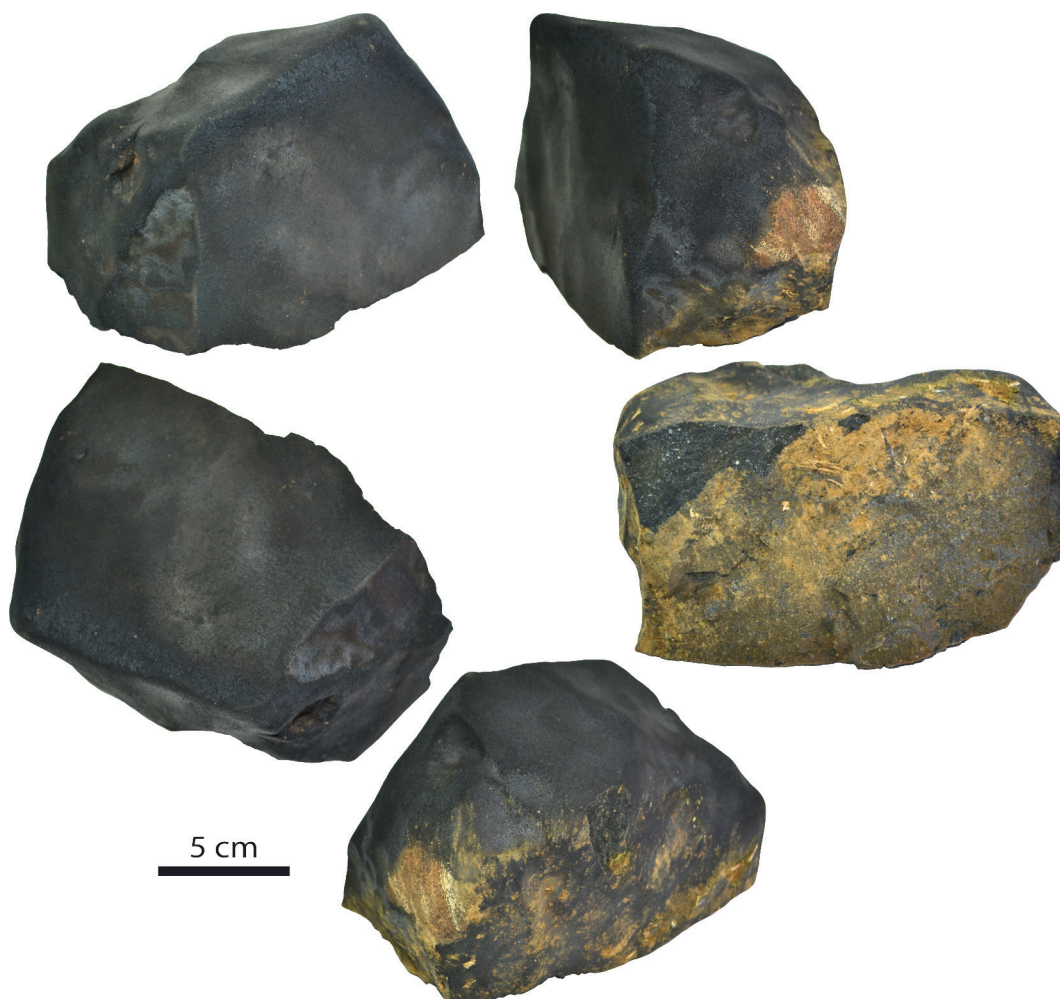


Fig. 5: Diferentes vistas del fragmento recuperado de mayor masa con aproximadamente 1875 g, visto desde distintas perspectivas. La coloración café se debe a impregnación de lodo al impactar el suelo.

textura característica con bajo porcentaje de cóndrulos en una matriz vítrea color negro. Este fragmento en particular fue adquirido por coleccionistas y posteriormente donado por Terry y Evan Boudreaux al *Field Museum* de Chicago, Estados Unidos (https://sites.google.com/fieldmuseum.org/pritzkercenter/home#h.p_vmSBLnHKOxV2 y <https://news.wttw.com/2019/10/08/field-museum-s-new-meteorite-contains-stardust-predates-solar-system>).

Existen muchos otros fragmentos con formas de plato (Fig. 6A), gota (Fig. 6B), elípticos, y con frecuentes patrones aerodinámicos (Fig. 6C), así como formas de domo frontal. La superficie de

fusión es muy evidente en la mayoría de los casos (Fig. 6) y presentan microfracturas. Muchos de los fragmentos muestran regmaglitos con superficies iridiscentes (el tono de luz varía de acuerdo con el ángulo desde el que se observe el fragmento). En general, el material es levemente magnético y tiene un olor particular detectado desde su caída e inspección y reportado en el boletín de la Sociedad Meteorítica como “tipo Murchison” haciendo referencia al meteorito homónimo, uno de los más estudiados en el ámbito de la meteorítica (Cronin y Chang, 1993) (<https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php?code=16875>).

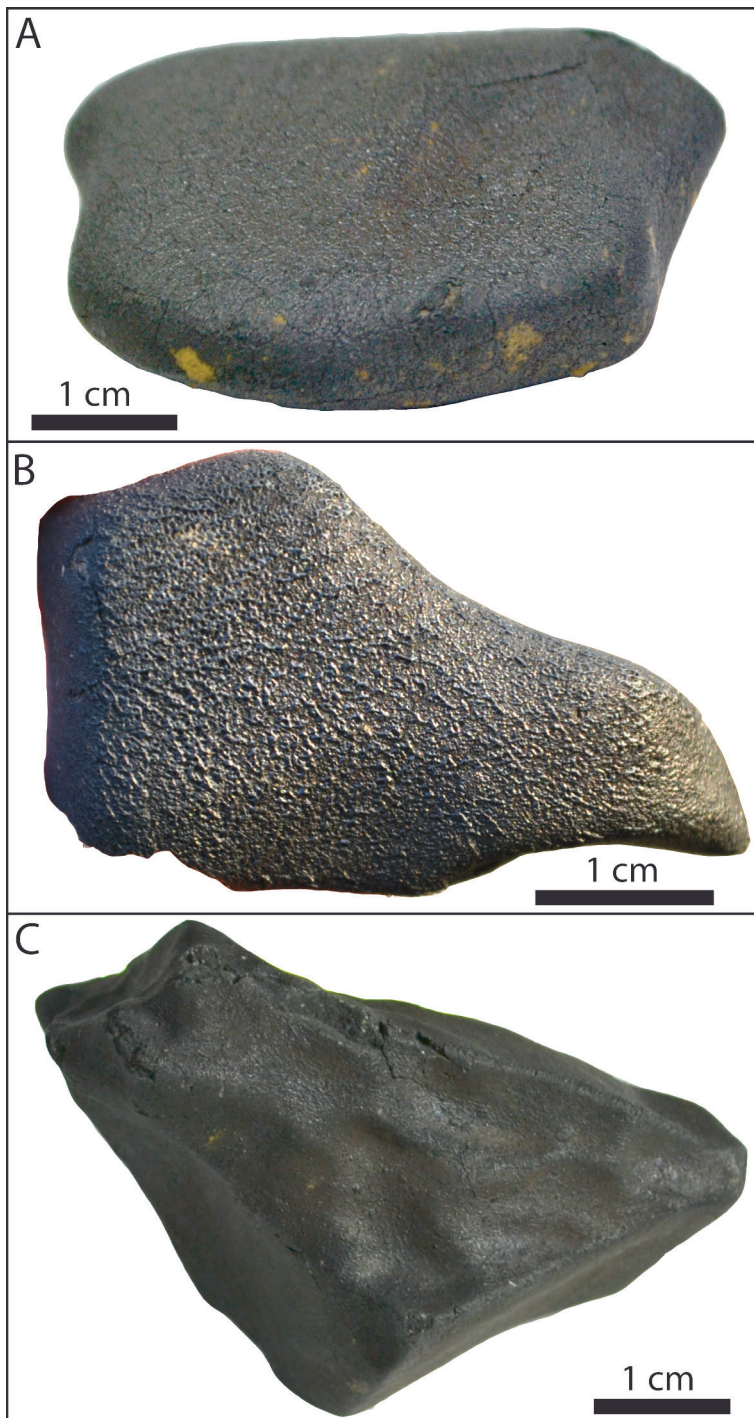


Fig. 6: A: Fragmento centimétrico de forma discoidal. B: Fragmento con forma aerodinámica. C: Fragmento centimétrico con desarrollo de regmagliptos. Todos estos fragmentos presentan una corteza de fusión bien desarrollada.

PETROGRAFÍA

Los especímenes observados muestran una baja abundancia de cóndrulos, entre 5% y 15% del área expuesta, en una matriz vítrea color gris oscuro. Sin embargo, L. Garvie indica en el Boletín de la Sociedad Meteorítica sobre el meteorito Aguas Zarcas (<https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php?code=69696>), que existen también piezas ricas en cóndrulos donde estos ocupan hasta 40% de la superficie. El interior de los especímenes analizados muestra muy claramente cóndrulos de tamaño submilimétrico a milimétrico, en porcentajes variables, como se menciona anteriormente, en medio de la matriz gris oscuro, que también contiene inclusiones ricas en calcio y aluminio (conocidas por su acrónimo inglés: CAI *Calcium-Aluminium Rich Inclusions*), cristales *submilimétricos* de plagioclasas, piroxenos, olivino, y cristales octahédricos y espículas con brillo metálico y color latón, posiblemente de sulfuros. Algunos especímenes se encuentran brechiados.

Con el fin de preservar las muestras, pues la mayoría de ellas fueron facilitadas con carácter de préstamo para su estudio, se estudió la superficie mediante técnicas no destructivas. Principalmente, se observaron los fragmentos bajo iluminación episcópica en un microscopio Nikon Eclipse NV100 Pol equipado con lentes específicos para este tipo de iluminación, Nikon TU Plan Fluor EPI de 5x, 10x, 20x, 50, y 100x. Estos lentes no requieren inmersión en aceite lo que permite mantener la muestra sin contaminación. Otros análisis no destructivos que están siendo llevados a cabo durante la preparación de este artículo son la Espectroscopía RAMAN, Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR por sus siglas en inglés) y análisis bajo el microscopio electrónico de barrido y espectroscopía de rayos-X por energía dispersiva. El trabajo en estos análisis continúa en la actualidad y sus resultados se presentarán en trabajos posteriores al presente artículo.

La figura 7A muestra las características texturales generales de la superficie expuesta,

donde se nota el bajo porcentaje de cóndrulos en la matriz oscura. La figura 7B muestra un posible CAI con su borde irregular y poco desarrollo de estructuras cristalinas. En esta figura se aprecia un borde negro, vítreo irregular con menor presencia de inclusiones cristalinas en la matriz. La figura 7C muestra la superficie esférica externa de un cóndrulo, preservada al desprenderse la matriz. La figura 7D muestra una sección transversal de un cóndrulo compuesto por plagioclasa (euhédrica, tabular) y olivino. La figura 7E muestra un cristal octahédrico cuya superficie tiene brillo metálico y color dorado congruentes con las características de sulfuros de hierro y níquel (Rubin y Ma, 2017). La figura 7F muestra un cóndrulo con una clara textura de olivino en barra (*barred olivine texture*) característica en meteoritos y que asemeja la textura *spinifex* en materiales terrestres como lavas ultramáficas (Connolly, Jones, y Hewins, 1998; Lofgren y Lanier, 1990; Tsuchiyama, Osada, Nakano, y Uesugi, 2004).

La matriz tiene una apariencia vítrea en macroscopía pero bajo aumento se distingue un agregado microcristalino donde se observan cristales vítreos de olivino y plagioclasa así como minerales metálicos. Los especímenes recuperados en el campo, posterior a las lluvias, muestran el rápido desarrollo de pátinas color naranja consistente con la alteración de sulfuros y óxidos de hierro. Aún los fragmentos recuperados antes de ser expuestos a la lluvia, desarrollan rápidamente una pátina similar por lo que deben ser conservados en una atmósfera inerte.

CONCLUSIONES: CLASIFICACIÓN Y SU ORIGEN

En términos generales, existen tres clases de meteoritos: los férreos o metálicos, compuestos principalmente de hierro y níquel; los pétreos, que son los más abundantes, compuestos principalmente de silicatos densos de hierro y

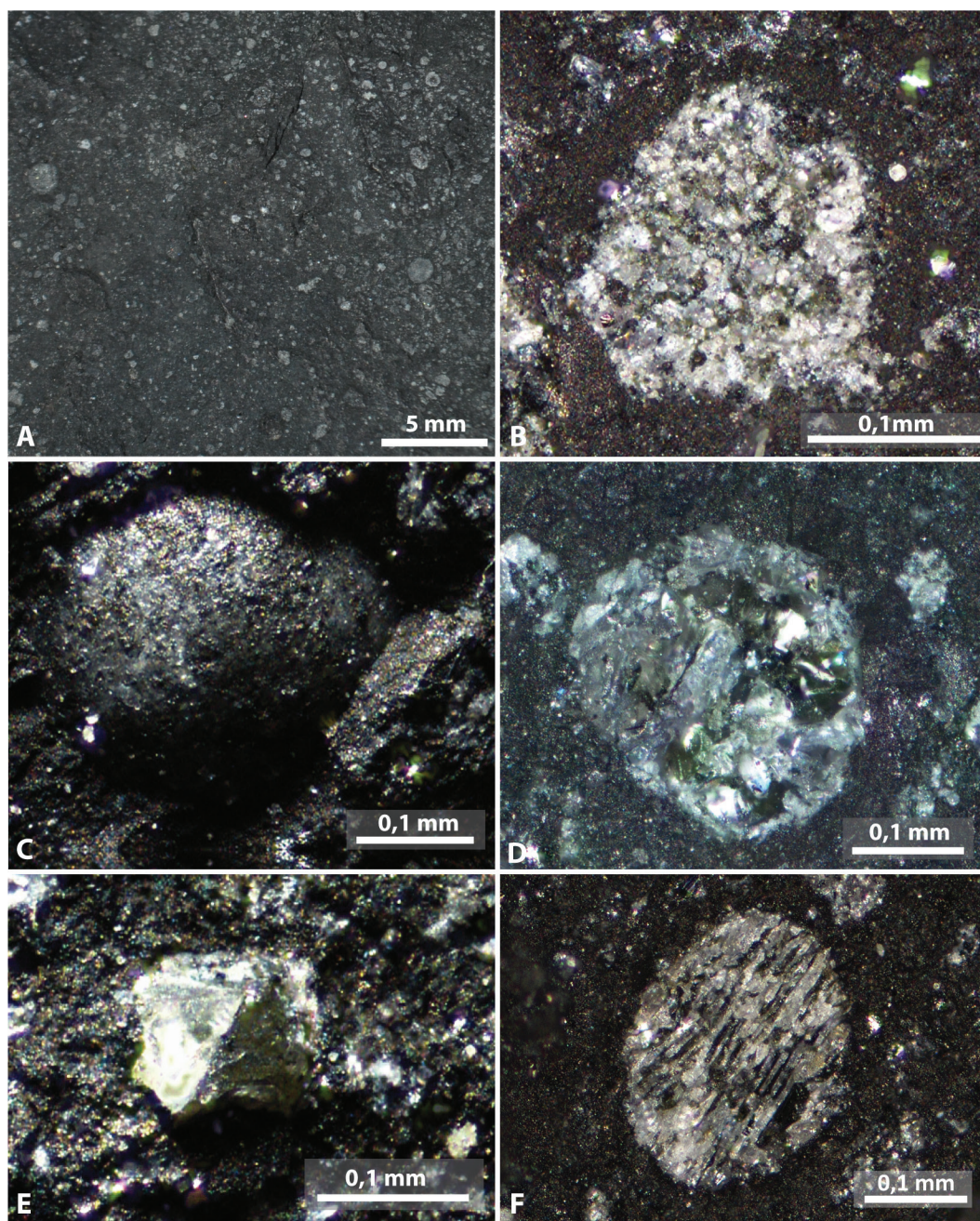


Fig. 7: Algunas características petrográficas sobresalientes del meteorito Aguas Zarcas. A: textura general de la matriz y cóndrulos. B: inclusión refractaria, posible CAI. C: superficie externa de un cóndrulo. D: cóndrulo con cristales euhédricos de plagioclasa y olivino. E: cristal octahédrico de sulfuro. F: textura de olivino en barra.

magnesio, y los férreo-pétreos, intermedios entre los anteriores (Krot, Keil, Scott, Goodrich, y Weisberg, 2014). Asimismo, existe una amplia variedad de clasificaciones para los meteoritos pétreos, que toman en cuenta su composición química, composición isotópica y petrología. Sin embargo, la clasificación más básica es dividirlos entre meteoritos condriticos (o condritos) y meteoritos no-condriticos (o acondritos) (Krot et al., 2014). La principal característica de un meteorito condritico es la presencia de cóndrulos, los cuales constituyen agregados cristalinos de escala milimétrica a submilimétrica que contienen minerales silicáticos como olivinos, piroxenos y feldspatos (Scott y Krot, 2014). Estos se formaron como pequeñas esferas de fundido durante procesos de alta temperatura producto de la acreción de partículas de la nébula que dio origen al Sistema Solar y la Tierra, así como por fusión y metamorfismo por procesos de impacto durante su trayectoria anterior a la caída a la Tierra (Friend, Hezel, y Mucerschi, 2016; Hezel y Palme, 2007; Hezel y Palme, 2010). La matriz ha sido incorporada *a posteriori* de la formación de los cóndrulos, y se ha mezclado con el metal remanente de la formación de estos (van Kooten, Moynier y Agranier, 2019). Estos cóndrulos están presentes en el meteorito Aguas Zarcas. Por otro lado, se identifican los anteriormente mencionados CAI. La presencia de los CAI significa que parte del material que conforma el meteorito no ha sido afectado por procesos de diferenciación intensos posteriores a su formación, es decir, no ha cambiado desde la formación del Sistema Solar y se trata de un material primitivo (MacPherson, 2014; Russell et al., 1998).

Los análisis llevados a cabo por la Universidad de Costa Rica fueron complementados por sofisticados análisis químicos e isotópicos, sobre todo en las universidades de Arizona y Nuevo México, entre otras. Con base en las características texturales observadas y geoquímicas analizadas, el meteorito Aguas Zarcas ha sido clasificado oficialmente por la Sociedad Meteorítica como tipo CM2 (<https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php?code=69696>). Esto implica que es un condrito (por la presencia de cóndrulos e inclusiones refractarias de Ca y Al), carbo-

náceo (por la presencia de carbón en la matriz), del tipo 2 debido a la presencia de minerales hidratados y sulfuros ricos en Ni (Braukmüller, Wombacher, Hezel, Escoube, y Münker, 2018; Nanne, Nimmo, Cuzzi, y Kleine, 2019). De acuerdo con los análisis realizados por K. Ziegler de la Universidad de Nuevo México (<https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php?code=69696>), la composición de isótopos de oxígeno indica que el meteorito Aguas Zarcas no tiene relación con los cuerpos rocosos de la Tierra, Luna y Marte pues la relación de los isótopos de O^{17} y O^{18} se encuentra por debajo de la línea de fraccionamiento terrestre (Tyra, Farquhar, Guan, y Leshin, 2012; Ushikubo, Tenner, Hiyagon, y Kita, 2017; Young y Russell, 1998). Su composición isotópica se asemeja a aquella de la nébula primordial del Sistema Solar por lo que se infiere una edad de aproximadamente 4,57 Ga (Connelly, Bollard, y Bizzarro, 2017).

El origen de los meteoritos carbonáceos implica efectos de alteración acuosa a bajas temperaturas, lo cual en conjunto con otras características solo puede ocurrir en un cuerpo parental (McSween, 1999). La isotopía de O, H y N en materia orgánica insoluble indicaría que estos cuerpos parentales se acrecionaron principalmente en la nébula protosolar, posiblemente por disociación fotoquímica de precursores ricos en C (Tartèse, Chaussidon, Gurenko, Delarued, y Roberte, 2018).

Se asocia, a partir de las comparaciones espectrofotométricas, que los asteroides tipo C, como Ceres, Pallas y similares, dentro del cinturón principal de asteroides, son los cuerpos parentales de los meteoritos condriticos carbonáceos (McSween, 1999; MacSween et al., 2018), como Aguas Zarcas, en donde Ceres es el principal candidato como cuerpo parental de este meteorito.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los pobladores de Aguas Zarcas, La Palmera y zonas de San Carlos quienes nos permitieron analizar fragmentos que tenían en su posesión y quienes han preferido permanecer anónimos. Se agradece a aquellos que mediaron para establecer contactos con gente que recuperó fragmentos, sobre todo

la M.Sc. Lilliana Rodríguez de la Universidad Técnica Nacional quien sirvió de enlace con los pobladores de la zona y facilitó las localizaciones precisas de algunos sitios donde se recuperaron fragmentos. Wilfredo Rojas, Aristides Alfaro (padre) y Luis Alonso Zeledón proveyeron y compartieron información valiosa que obtuvieron en el campo, lo cual se agradece. Solicito la inclusión de la siguiente frase en los agradecimientos: Este artículo es una contribución al proyecto B9-195 adscrito al Centro de Investigaciones en Ciencia e Ingeniería de Materiales (CICIMA) de la Universidad de Costa Rica.

REFERENCIAS

- Braukmüller, N., Wombacher, F., Hezel, D. C., Escoube, R., y Münker, C. (2018). The chemical composition of carbonaceous chondrites: Implications for volatile element depletion, complementarity and alteration. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 239, 17-48. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gca.2018.07.023>
- Connelly, J. N., Bollard, J., y Bizzarro, M. (2017). Pb–Pb chronometry and the early Solar System. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 201, 345-363. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gca.2016.10.044>
- Connolly, H. C., Jones, B. D., y Hewins, R. H. (1998). The flash melting of chondrules: an experimental investigation into the melting history and physical nature of chondrule precursors. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(15), 2725-2735. doi:[https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(98\)00176-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(98)00176-8)
- Cronin, J. R., y Chang, S. (1993). Organic matter in meteorites: Molecular and isotopic analyses of the Murchison meteorite. In *The chemistry of life's origins* (pp. 209-258): Springer.
- Friend, P., Hezel, D. C., y Mucerschi, D. (2016). The conditions of chondrule formation, Part II: Open system. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 173, 198-209. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.10.026>
- Hezel, D. C., y Palme, H. (2007). The conditions of chondrule formation, Part I: Closed system. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(16), 4092-4107. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.06.035>
- Hezel, D. C., y Palme, H. (2010). The chemical relationship between chondrules and matrix and the chondrule matrix complementarity. *Earth and Planetary Science Letters*, 294(1-2), 85-93.
- Krot, A. N., Keil, K., Scott, E. R. D., Goodrich, C. A., y Weisberg, M. K. (2014). 1.1 - Classification of Meteorites and Their Genetic Relationships. In H. D. Holland y K. K. Turekian (Eds.), *Treatise on Geochemistry (Second Edition)* (pp. 1-63). Oxford: Elsevier.
- Lin, T. C., y Qun, P. (1987). On the formation of regmaglypts on meteorites. *Fluid Dynamics Research*, 1(3), 191-199. doi:[https://doi.org/10.1016/0169-5983\(87\)90004-9](https://doi.org/10.1016/0169-5983(87)90004-9)
- Lofgren, G., y Lanier, A. B. (1990). Dynamic crystallization study of barred olivine chondrules. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(12), 3537-3551. doi:[https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90303-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90303-3)
- MacPherson, G. J. (2014). 1.3 - Calcium–Aluminum-Rich Inclusions in Chondritic Meteorites. In H. D. Holland y K. K. Turekian (Eds.), *Treatise on Geochemistry (Second Edition)* (pp. 139-179). Oxford: Elsevier.
- Mason, B. (1963). Olivine composition in chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 27, 1011-1023.
- McSween Jr., H.Y. (1999). *Meteorites and Their Parent Planets* (Second edition). Cambridge: Cambridge University Press.

- McSween Jr., H. Y., Emery, J. P., Rivkin, A. S., Toplis, M. J., Castillo-Rogez, J. C., Prettyman, T. H., De Sanctis, M. C., Pieters, C. M., Raymond, C. A., y Russell, C. T. (2018). Carbonaceous chondrites as analogs for the composition and alteration of Ceres. *Meteoritics y Planetary Science*, 53 (9), 1793-1804. <https://doi.org/10.1111/maps.12947>
- Nanne, J. A. M., Nimmo, F., Cuzzi, J. N., y Kleine, T. (2019). Origin of the non-carbonaceous–carbonaceous meteorite dichotomy. *Earth and Planetary Science Letters*, 511, 44-54. doi:<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.01.027>
- Rubin, A. E., y Ma, C. (2017). Meteoritic minerals and their origins. *Geochemistry*, 77(3), 325-385. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemer.2017.01.005>
- Russell, S. S., Huss, G. R., Fahey, A. J., Greenwood, R. C., Hutchison, R., y Wasserburg, G. J. (1998). An Isotopic and Petrologic Study of Calcium-Aluminum-Rich Inclusions from CO3 Meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(4), 689-714. doi:[https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(97\)00374-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(97)00374-8)
- Scott, E. R. D., y Krot, A. N. (2014). 1.2 - Chondrites and Their Components. In H. D. Holland y K. K. Turekian (Eds.), *Treatise on Geochemistry (Second Edition)* (pp. 65-137). Oxford: Elsevier.
- Soto, G. J. (2004). Meteoritos y meteoros en Costa Rica (verdaderos, posibles y falsos). *Revista Geológica de América Central*, 31, 7-23.
- Tartèsea, R., Chaussidonb, M., Gurenkoc, A., Delarued, F., y Roberte, F. (2018). Insights into the origin of carbonaceous chondrite organics from their triple oxygen isotope composition. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115 (34), 8535–8540. doi: www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1808101115
- Tsuchiyama, A., Osada, Y., Nakano, T., y Uesugi, K. (2004). Experimental reproduction of classic barred olivine chondrules: open-system behavior of chondrule formation I Associate editor: C. Koeberl. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(3), 653-672. doi:[https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(03\)00448-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(03)00448-4)
- Tyra, M. A., Farquhar, J., Guan, Y., y Leshin, L. A. (2012). An oxygen isotope dichotomy in CM2 chondritic carbonates—A SIMS approach. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 77, 383-395. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.10.003>
- Ushikubo, T., Tenner, T. J., Hiyagon, H., y Kita, N. T. (2017). A long duration of the 16O-rich reservoir in the solar nebula, as recorded in fine-grained refractory inclusions from the least metamorphosed carbonaceous chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 201, 103-122. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gca.2016.08.032>
- van Kooten, E. M. M. E., Moynier, F., y Agranier, A. (2019). A unifying model for the accretion of chondrules and matrix. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116 (38), 18860–18866. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1907592116
- Young, E. D., y Russell, S. S. (1998). Oxygen Reservoirs in the Early Solar Nebula Inferred from an Allende CAI. *Science*, 282(5388), 452-455. doi:10.1126/science.282.5388.452

