

Fulguritas: observaciones sobre el rayo petrificado

Fulgurites: Observations on the petrified lightning

JESÚS DUQUE MACÍAS

Universitat Illes Balears. Departament de Ciències de la Terra. IES Politècnic de Palma de Mallorca. c/Menorca 1. Palma de Mallorca 07011. E-mail: ctsprofe@gmail.com

Resumen El término “observaciones” del título expresa el tratamiento multidisciplinar dado al tema. La primera parte está dedicada a las características generales de las fulguritas: definiciones, historia, génesis, morfologías, mineralogía.... La somera descripción de cinco fulguritas de referencia ocupa la segunda parte del artículo. Se esbozan, en la tercera, aplicaciones de los estudios de las fulguritas, destacando su utilización para paleoclimatología. Por último, se describen y comentan las propuestas didácticas y los intentos de modelizar y fabricar fulguritas llevados a cabo en el IES Politècnic de Palma de Mallorca.

Palabras clave: Fulgurita, rayo, vidrio, lechatelierita, máquina de descargas.

Abstract The term “observations” in the title reflects the multidisciplinary treatment that has been given to the subject. The first part is related to the general characteristics of fulgurites: definitions, history, genesis, morphology, mineralogy.... A brief description of five reference fulgurites appears in the second part of the article. The applications of the studies of fulgurites are outlined in the third part, highlighting their use for paleoclimatology. And last but not least, we describe and discuss the didactic proposals and attempts to model and manufacture fulgurites conducted at the IES Politècnic of Palma de Mallorca.

Keywords: Fulgurite, lightning, glass, lechatelierite, lightning machine.

“De natura es fría y húmeda mucho, y a los ramos, los unos gruesos y los otros delgados, y son trabados so tierra unos con otros, a manera de raíces de árboles.”
Descripción de la piedra del signo de escorpión mazintarican

LAPIDARIO DE ALFONSO X EL SABIO (1.221-1.284)

INTRODUCCIÓN

Los rayos provocan emociones contradictorias, temor y fascinación. Fascinación por su luminosidad deslumbrante y cegadora y temor por su carácter amedrentador y aleatorio.

Aún cuando no se comprendía, la mente colectiva ha tenido consciencia de su poder; así, para los griegos, el rayo era el arma destructora que utilizaba Zeus para castigar a los mortales. Los romanos dieron características parecidas a Júpiter, venerado como dios de la lluvia, el rayo y el relámpago. Thor, dios del trueno y creador supremo en la mitología escandinava, blandía un martillo mágico, llamado *Mjollnir*, que representaba el rayo. De este poder divino de la fuerza del rayo queda como vestigio el jueves dedicado a Júpiter, o en inglés, Thursday, a Thor.

En la vida cotidiana asumimos su rapidez cuando decimos que algo es “más veloz que el rayo” o su capacidad destructiva cuando indicamos “¡que te parta un rayo!”. Sabemos que dejan rastro, calcinan árboles, producen ozono y matan a animales y personas. Tenemos nociones de cómo protegernos: en el coche y el avión no nos afectan porque son una jaula de Faraday; no debemos arrimarnos a un árbol ni a un edificio alto sin pararrayos. También sabemos que el pararrayos lo diseñó Benjamín Franklin, porque un rayo había matado a su hermano. Incluso sabemos que no solamente se producen en las tormentas. Hemos visto cómo en la erupción del volcán islandés Eyjafjallajökull, que ha producido problemas en el tráfico aéreo europeo, se producían grandes descargas eléctricas junto al cráter en erupción formando maravillosos rayos. Incluso aparecen en grandes incendios forestales si generan suficiente polvo para crear carga

estática. Fue de gran impacto social el experimento de Miller donde la energía de los rayos provocaba la síntesis de moléculas orgánicas simples.

Pero hay aspectos más desconocidos, como el Rayo de Catatumbo cerca del venezolano lago de Maracaibo, donde entre 140 y 180 días al año se producen relámpagos de forma ininterrumpida, casi todos entre nubes; este evento meteorológico fue declarado Patrimonio Natural de Zulia en 2005 y propuesto para Patrimonio Mundial. Se han presentado evidencias de descargas eléctricas en el Planeta Marte, en tormentas de polvo no asociadas a nubes cargadas de agua (Ruf., *et al*, 2009).

En general tenemos una cultura alrededor de este fenómeno, solo hay que navegar por Internet para apreciar la cantidad de páginas que tratan el tema desde diversos puntos de vista, aunque de lo menos tratado sea lo que acontece cuando un rayo impacta directamente sobre la superficie sólida terrestre. En este artículo vamos a seguir ese rastro: las fulguritas.

En los últimos decenios han aparecido en los medios de comunicación informaciones puntuales sobre fulguritas, principalmente cuando se encontraba alguna con record de tamaño. Los artículos científicos han ido diversificando su contenido, ya no solamente con descripciones y morfologías macroscópicas de las fulguritas, sino que cada vez es más habitual encontrarlos con datos petrológicos, mineralógicos, geoquímicos o geofísicos, obtenidos mediante las técnicas más modernas de laboratorio. Aún así, son escasas las investigaciones con un trabajo continuado y preciso sobre fulguritas.

En septiembre de 2009 se ha creado un grupo de trabajo en el IGME (Instituto Geológico y Minero de España) tras la publicación, en la revista *European Journal of Mineralogy*, de la descripción petrográfica de una enorme fulgurita encontrada un par de años antes en la frontera portuguesa (Martín Crespo., *et al*. 2009). La nota de prensa del IGME sobre el evento tuvo repercusión en los medios de información nacionales y algunos internacionales. Cabe destacar que “casi” todos los titulares hacían referencia a que era, en tamaño, la mayor fulgurita del mundo. Tal vez el grupo de trabajo más activo del mundo en el estudio de fulguritas es el del Seminario mexicano de Meteorítica de la UNAM (Universidad Nacional Autónoma de México). La recopilación sobre fulguritas de Allan McCollum tiene gran interés, por el número y variedad de publicaciones recogidas. Colaboraron el Museo de Arte Contemporáneo y el Museo de Ciencia e Industria de Tampa de la Universidad de Florida Sur. Se publicó en el 2000 para homenajear a una fulgurita record encontrada en Florida (Wright, 1998). Mezcla artículos científicos con otros artísticos, pero siempre con el rayo como línea argumental.

¿Qué son las fulguritas?

El término “*fulgurite*” fue acuñado por el francés Dominique François Jean Arago en 1821. En inglés



las fulguritas ya se conocían como “*lightning tube*” (tubos de rayos) (Fronde, 1962).

En el diccionario de la RAE (Real Academia Española) aparece con una sola acepción y con un contenido casi idéntico al original de Arago: “**fulgurita**. (Del lat. *fulgur*, rayo). f. Tubo vitrificado producido por el rayo al penetrar en la tierra fundiendo las sustancias silíceas con que se tropieza.” Esta definición, aún siendo válida queda anticuada.

Según Lozano *et al*, 2007: “El término fulgurita designa las rocas formadas por la acción de descargas eléctricas atmosféricas sobre un suelo o roca.” “Tubo mineral que se halla en arenas o rocas y que es el resultado de la caída de rayos atmosféricos”.

En la actualidad el término fulgurita se aplica tanto a las rocas fundidas como a los agujeros producidos por rayos.

BREVE HISTORIA DEL ESTUDIO DE LAS FULGURITAS

Según el Sistema de detección Mundial de Meteorología, diariamente en la Tierra se producen unas 44.000 tormentas que generan más de 8.000.000 de rayos (www.int-sl.ad/pdf/rayos y cambio climatico.pdf). Estos datos hacen pensar que se

Fig.1. Volcán islandés Eyjafjallajökull, el 18 de abril de 2010. Rayos acompañan a la erupción. En un rayo el potencial eléctrico es tan grande que el aire se convierte en conductor eléctrico. Foto: Ragnar Th. Sigurdsson/Artic-images.com/FocusOnNature

Fig.2. Magnífica fulgurita con la típica forma de raíz de árbol. Desierto de Libia. Foto: Ciencia popular.com



Fig. 3. Ilustración de la piedra 206 del Lapidario de Alfonso X El Sabio, donde aparecen las posibles fulguritas. Patrimonio Nacional. Real Biblioteca del Monasterio de El Escorial.



deben originar gran cantidad de fulguritas, aunque las que se conservan son muy pocas.

No obstante las fulguritas se conocen desde hace tiempo. Tal vez la primera referencia se encuentre en el Lapidario de Alfonso X El Sabio, del siglo XII (García-Guinea, *et al*, 2009), en la ilustración que acompaña a la descripción de la piedra 206 del signo de Escorpión. El texto medieval que acompaña a la ilustración trata cuestiones esotéricas y de curandería, pero puede intuirse que la piedra llamada en caldeo *mazintarican* es una fulgurita. Primero, por sus formas ramificadas y, segundo, por el texto: “cosa que es gobernada por friura” y “son trabados so tierra unos con otros, a manera de raíces de árboles”. Si la intuición fuese cierta, sería la representación más antigua de fulguritas.

Para la gran mayoría de autores, siguiendo a Petty (1936), el descubridor de las fulguritas es el pastor alemán David Hermann (1706), aunque algunos abogan por el Dr. Hentzen como la primera persona que reconoce *tubos de vidrio* como producto del impacto de rayos, en dunas de arena cerca de la ciudad alemana de Padderborn (Gailliot, 1980). La primera publicación en la que se describe de forma precisa una fulgurita se debe a Fiedler (1817) siendo estudiante en Gottingen.

Hitchcock, publica en 1861 el hallazgo de un *tubo de vidrio* encontrado por el Dr. Cobb en Massachusetts; se considera la primera referencia a una fulgurita en Estados Unidos.

William Hallock, de la Universidad de Nueva York, observó la caída de un rayo, en agosto de 1900, sobre una montaña cercana al Lago Champlain. Informó que en la zona había un pino roto y en las rocas circundantes incrustaciones blancas en líneas zigzagueantes, que considera una fulgurita.

La historia sobre fulguritas de 1910 escrita por Barrows, representó un hito porque a la descripción de los eventos conocidos hasta entonces adjunta una amplia bibliografía.

Publicación pionera sobre petrología de fulguritas fue la de Myers y Peck de 1925, donde describen una encontrada en South Amboy (New Jersey, USA). Se trataba de una fulgurita producida en un suelo arenoso-arcilloso, con un centro de cuarzo rodeado de un borde de cristobalita y unas manchas negras de óxidos de hierro. Esa descripción ha servido de

modelo para publicaciones posteriores. Como curiosidad decir que al recogerla se les rompió en pedazos; *el mayor tenía seis pulgadas*.

Por la trascendencia del autor, merece una mención especial la descripción realizada por Charles Darwin, en el diario del 26 de julio de 1832 de su viaje en el Beagle. Bajo el título “*Tubes formed by lightning*” (*Tubos formados por rayos*), describe tubos de vidrios en unos montículos de arena silícea cerca de Maldonado, en la ribera del Plata. Utiliza como referencia una publicación del Dr. Priestly en 1790, en *The Geological Transactions*, de una fulgurita encontrada en Cumberland. La descripción de Darwin sobre esas fulguritas, realizada un año después del comienzo del viaje, pone de manifiesto que “*la única capacitación formal del joven Charles, aunque breve, era en Geología y se consideraba a sí mismo –básicamente- un geólogo*” (King y Kennett, 2010).

En general, las referencias en la literatura a la descripción y génesis de fulguritas son escasas pero como hemos visto se conocen desde hace siglos.

ORIGEN DE LOS VIDRIOS NATURALES

Las fulguritas se forman por solidificación no cristalina, cuando el fundido (nuestro diminuto magma) provocado por el impacto del rayo se transforma en vidrio (materia no cristalina, sin ordenamiento interno) en respuesta a un rápido sobreenfriamiento. Otros vidrios se originan en fracturas (pseudotaquilitas), o en rocas impactadas por meteoritos (vidrios de shock). Se incluye en la solidificación no cristalina las transformaciones de geles a sólidos amorfos, como de gel de sílice a ópalo (López y Bellos, 2006).

De acuerdo a O'Keef (1984), los vidrios de origen natural son:

- volcánicos*, por enfriamiento rápido de un magma,
- de impactos*, fusión y enfriamiento rápido por impacto meteorítico,
- diapléticos*, tectonificación por presión de impacto o choque,
- tectitas*, fusión y mezcla de la zona superficial del bólido al atravesar la atmósfera,
- fulguritas*, fusión por impacto de descargas eléctricas de alto voltaje, rayos,
- de combustión-metamórfico*, fusión por combustión subterránea de sedimentos orgánicos.

La materia vítrea no solo se forma por enfriamiento súbito sino que se puede producir por destrucción de la estructura cristalina en choques de cuerpos rocosos.

En general, existen tres procesos naturales de formación de vidrio en la Tierra: volcánicos, impactos meteoríticos y caídas de rayos (Lozano *et al*, 2007). El primero forma materiales tipo obsidiana, el segundo vidrios de brechas de impacto, y el tercer

proceso fulguritas. Aunque las fulguritas sean poco abundantes, representan una forma especial de producción de vidrios naturales en la Tierra.

FORMACIÓN Y TIPOS DE FULGURITAS

Cuando el rayo cae en la superficie deja una marca, a modo de rúbrica, que acredita el efecto de la extraordinaria liberación de su energía. A veces esa firma es contundente, en forma de fulgurita.

La formación de fulguritas depende de la dirección e intensidad del *golpe eléctrico* y de la composición, humedad y textura de la superficie de impacto. Aunque no se ha cuantificado la influencia de estos parámetros (Vavrek *et al.*, 2004) se puede alcanzar la temperatura de fusión de los sedimentos o rocas ($\geq 2.000^{\circ}\text{C}$) en milisegundos.

Las fulguritas se clasifican en dos grupos: de suelo arenoso, (Petty, 1936; Rogers, 1946; Galliot, 1980; Wright, 1998) y de roca dura (Purdum, 1966; Libby, 1986).

Las más frecuentes y conocidas son las producidas en sedimentos arenosos de carácter silíceo en desiertos de arena y dunas litorales, dada la facilidad del rayo para penetrar en materiales no consolidados. Esta tipología de fulgurita suele mostrar una sección circular o elíptica (con o sin hueco central), y una morfología tubular vertical a veces ramificada, pudiendo llegar a varios metros en casos extraordinarios.

Las fulguritas de roca dura son tubulares más pequeñas (centímetros) y menos comunes que las anteriores, porque desaparece el vidrio por alteración, aunque suele quedar el hueco. Perforaciones mayores se pueden producir en zonas de debilidad de la roca (diaclasado).

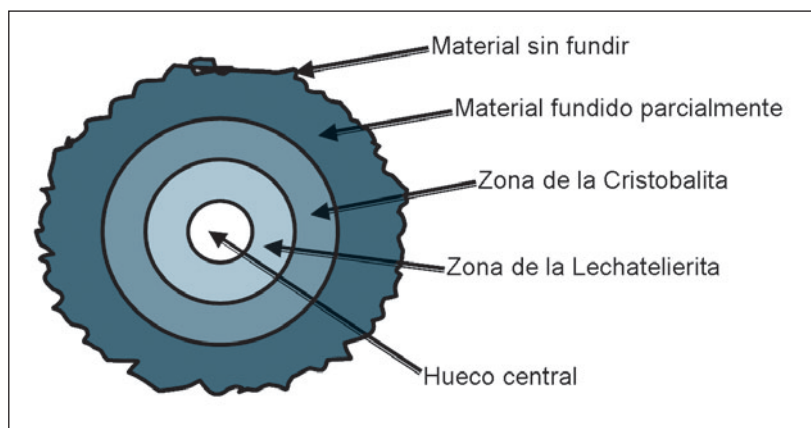
Se han descrito fulguritas no penetrantes en rocas y suelos caracterizados por surcos horizontales donde se produce, a pequeña escala, la fusión del material (Mohling, 2004).

Hay propuestas de nuevas tipologías de fulguritas en suelos arcillosos (Gifford, 1999) y en otros suelos, pero son muy pocas las inventariadas porque la actividad edáfica las altera rápidamente.

ESTUDIO DE LAS FULGURITAS: MORFOLOGÍA, COMPOSICIÓN Y PETROLOGÍA

Las fulguritas tienen gran variedad de formas pero las más abundantes son tubulares o tubulares ramificadas. En su interior suelen conservar un hueco rodeado de vidrio con burbujas, que las hace frágiles.

La estructura final de las fulguritas responde a una fusión y enfriamiento rápido, sin tiempo suficiente para la cristalización de fases minerales. El resultado es una masa de vidrio desestructurada, aunque se han descrito estructuras de flujo turbulento (Goedeke y Techmer, 1987). Es muy común la formación de burbujas de diferentes tamaños de



bidas a la expansión de los gases, aire y el vapor de agua, generadas por las altas temperaturas en el impacto del rayo. Las arenas de cuarzo funden entre 1.600 y 2.000°C dependiendo de la humedad; el enfriamiento rápido origina sílice vidrializada en forma tubular, denominada lechatelierita, en honor a Henri le Chatelier que la describió en 1915.

En las fulguritas no penetrantes sobre rocas, el surco contiene una capa vítrea a modo de barniz incoloro, blanco o amarillo, de no más de tres milímetros de espesor.

Al microscopio se observa, a veces, además de las burbujas, microlitos de neoformación y restos no fundidos. En el exterior de las fulguritas como "cobertura" suelen aparecer minerales parcialmente fundidos, aunque los más refractarios quedan sin afectar. Hay que tener en cuenta que el vidrio se forma al fundirse sólo los ingredientes de menor temperatura de fusión; esto es válido para todo tipo de fulguritas.

El tubo fulgurítico

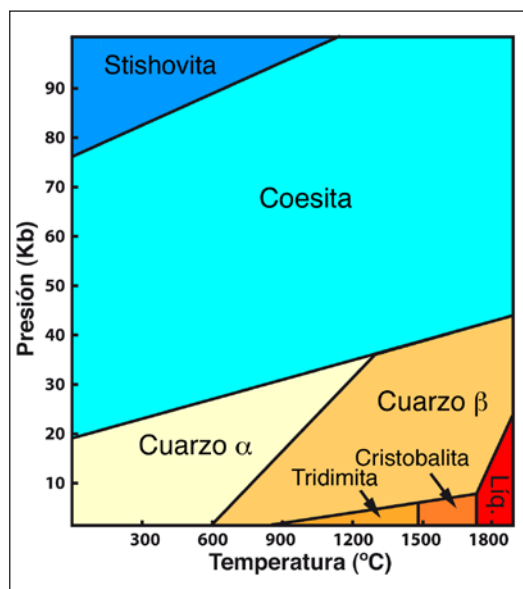
Ya se ha indicado que las fulguritas más comunes son las producidas en arenas silíceas formando tubos verticales con interior hueco y frágil y exterior

Fig.4. Corte transversal idealizado de una fulgurita silícea. Modificado de Naito y Nakamura (1993a).



Fig.5. Fulgurita tubular con burbujas y ramificación. En: <http://carlosalasia.blogspot.com/2010/02/fulguritas-los-rayos-de-piedra.html>

Fig.6. Polimorfos de la sílice. La tridimita y cristobalita son las formas de alta temperatura y baja presión. En: http://ocw.uniovi.es/file.php/39/iC_C11812_A/contenidos%20en%20pdf%20para%20descargar/9.pdf



poroso (Daly *et al.*, 1993). La morfología del tubo es el reflejo de la trayectoria del rayo cuando penetra en el suelo (Viemeister, 1983). Generalmente tienen una longitud media de diez centímetros y una sección circular o elíptica más o menos aplanada por la presión de la arena circundante cuando el material fundido está muy caliente y plástico. La cavidad central hueca se debe a la expansión de los gases.

Los tubos verticales, pueden penetrar metros en la arena, ramificándose al descender. El material vídrio con vacuolas puede contener granos de cuarzo (dependiendo de la temperatura). Los análisis muestran que la lechatelierita de neoformación es más rica en sílice que los sedimentos o rocas madres debido a que algunos minerales se han disuelto en el vidrio en lugar de fundir directamente en el instante del impacto del rayo. A veces se observan finas hebras de vidrio que se extienden desde la superficie del tubo, como si se hubiesen proyectado porciones fundidas hacia el exterior. La temperatura de mezcla para la formación del vidrio debe ser en el primer instante entre 1.900 y 2.700° C (Essene y Fisher, 1986).

Los granos de cuarzo que no se han fundido totalmente se vuelven muy blancos y semiopacos. Los granos que han tenido contacto con el vidrio muestran, usualmente, una solución parcial. En ocasiones se observa, al microscopio, una cristalización incipiente, dando pequeños microlitos dentro de la matriz hialina, que se disponen en líneas o haces (Alasia, 2009).

Según el Dictionary of Geology (Tomkeieff, 1983), los tubos silíceos varían de color dependiendo de la composición de la arena en donde se formaron. Se han encontrado de color negro, grisáceo, amarillo, café, bronce, verde y blanco translúcido. Los negros sin burbujas recuerdan microscópicamente a la obsidiana negra. La parte interna suele presentar un aspecto brillante liso con finas burbujas mientras que la externa es rugosa debido

a los fragmentos de minerales o roca que no han llegado a fundir. También las hay con el exterior liso, con surcos y con excrescencias en forma de hilo y/o vesicular. En conjunto tienen apariencia de raíz y a menudo muestran pequeños agujeros (Fron del, 1962).

Composición y mineralogía de las fulguritas

En la mayoría de las fulguritas conservadas la composición varía entre el 85 y 99% de SiO₂ (Essene y Fisher, 1986). La química global de las fulguritas depende del protolito o material madre que por el impacto del rayo sufre violentos cambios en la presión, temperatura y densidad, provocando mezclas, vaporizaciones, fundidos, transformaciones mineralógicas y deformaciones (Brook *et al.*, 1962; Hill, 1971; Uman y Knider, 1989; Newcott, 1993). La mineralogía de las fulguritas es el reflejo de esas condiciones extremas.

Los principales minerales encontrados en las fulguritas son los polimorfos de la sílice (tridimita, cristobalita) de alta temperatura y baja presión. La tridimita rómbica o hexagonal suele aparecer maclada y la cristobalita tetragonal o cúbica se presenta en pequeños cristales octaédricos (Dana-Hurlbut, 1960). Rara vez aparecen óxidos de Zr (Fron del, 1962), grafito, fulerenos (Daly *et al.*, 1993), minerales de hierro, titanio y fósforos (Essene y Fisher, 1986).

Según Deer *et al.* (1993), el cuarzo pasa a tridimita por encima de los 870° C y ésta a cristobalita a partir de los 1.470° C. Las altas temperaturas a las que se producen las fulguritas quedan reflejadas por la presencia de esos polimorfos y, a veces, de clinopiroxenos, ya que la clinostatita coexiste con la cristobalita a temperaturas de alrededor de 1.570° C (Mysen, 1988).

La vaporización del oxígeno durante el proceso de ebullición proporciona las condiciones idóneas para la génesis de minerales silíceos (Ortiz y Hernández, 1996). Estudios realizados con microscopios ópticos, microscopía electrónica, análisis de rayos X por difracción y fluorescencia, y espectroscopía Raman, revelan que en los minerales silíceos de fulguritas que han experimentado una extrema reducción, los tetraedros de sílice contienen elementos como Fe, Al, Ti, B, P, Sn y otros (Feldman, 1987). Estos minerales son consecuencia de un proceso de inmiscibilidad entre la fase vítrea y la metálica (Essene y Fisher, 1986), evidenciadas por las exsoluciones de plagioclasas y tridimitas de la parte vítrea y por la forma esferoidal de los agregados metálicos que sugieren desmezcla del líquido metálico a partir del silicatado (Essene y Fisher, 1986).

Otras investigaciones muestran que la mineralogía de fulguritas de suelos tipo vertisoles con abundante arcilla (montmorillonita) aportan a la sílice alúmina, carbonatos y restos de materia orgánica (DETENAL, 1982).

DESCRIPCIÓN SOMERA DE ALGUNAS FULGURITAS

Las fulguritas son difíciles de encontrar y extraer debido a su fragilidad, aunque son bastante abundantes en lugares especialmente expuestos a rayos. Siguiendo técnicas que recuerdan a la paleontología se han conseguido buenos ejemplares. Una de las históricas mejor conservadas es un tubo fulgurítico de 1.940 que se encuentra en la Academy of Natural Sciences de Filadelfia.

A continuación se describen de forma somera cinco fulguritas.

- a) Fulguritas de Zacatecas (México)
- b) Fulgurita de la Florida (USA)
- c) Fulgurita de Bustarviejo (Madrid, España)
- d) Fulgurita de Torre de Moncorvo (Portugal)
- e) Pseudofulgurita El Rosario (Estado de Hidalgo, México)

a) Fulguritas de Zacatecas (México)

Un equipo multidisciplinar (geólogos, astrónomos y geofísicos) del Seminario mexicano de Meteorítica de la UNAM encabezado por A. Reyes Salas, realizó en 2006 un magnífico estudio petrográfico, geoquímico y mineralógico de fulguritas encontradas en Fresnillo (Zacatecas). A continuación se resumen algunas de sus observaciones.

Estas fulguritas son estructuras tubulares vítreas de 1 mm a ~20 cm formadas en un suelo silíceo-calcáreo.

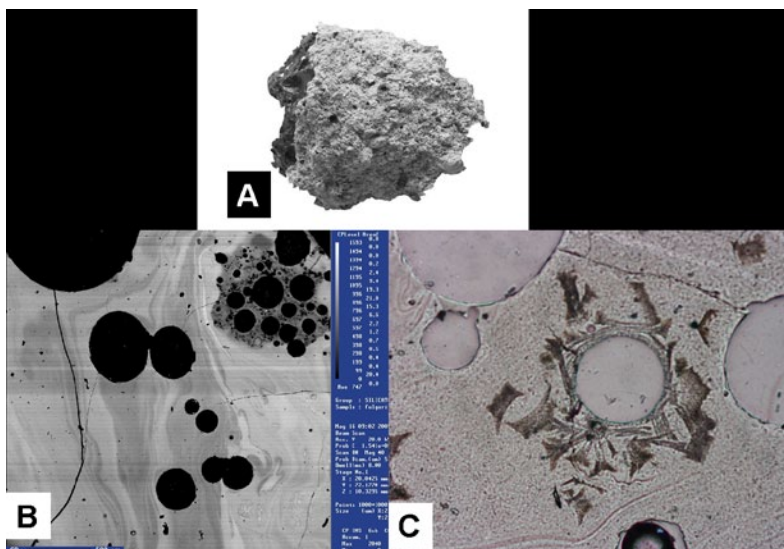
Análisis por fluorescencia de rayos X y microscopía electrónica indican que el vidrio está empobrecido en agua y calcio con respecto al suelo madre. La composición del vidrio es heterogénea, de tipo dacítico rico en calcio con vesículas y estructuras de flujo. Contiene fases cristalizadas de dos tipos: una esferoidal de Si, y otra formada por pequeños cristales arborescentes de Si-Ca.

Las interpretan como producidas en un ambiente muy reductor, por la pérdida de agua y los cambios químicos que impidieron la homogeneización del vidrio. El material cristalizado que aparece en la matriz vítrea es debido a la fusión parcial de granos de cuarzo, lo que indica temperaturas superiores a 1.700°C.

En las fulguritas de Zacatecas observaron aleaciones metálicas, poco comunes, de Si-Fe. Los cálculos termodinámicos (Essene y Fisher, 1986), indican que esas aleaciones se forman en condiciones muy reductoras con volatilización extrema y temperaturas muy altas, por encima de los 1.800°C.

b) Fulgurita de La Florida (USA): ¿La fulgurita más grande del mundo?

Investigadores de la Universidad de Florida, supervisados por el geólogo Daniel Cordier en-



contraron en el norte de Florida (EEUU) una fulgurita en 1999 que inscribieron en el Guinness de los records como la fulgurita más larga del mundo.

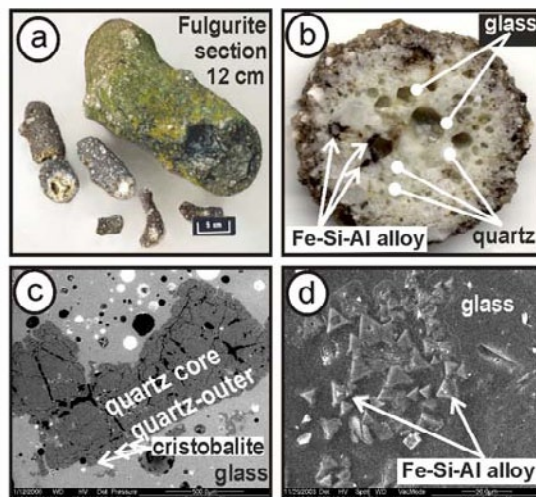
El grupo comenzó su excavación en el verano de 1996. La fulgurita se produjo sobre un suelo silíceo y consiste en tubos huecos de material vidrioso que se bifurcan en dos ramas, una de 4,86 metros y la otra de 5,20 (Wright, 1998). Lo destacable de esta fulgurita es el tamaño porque su composición es la típica de tubo de vidrio silíceo.

Fig.7. Fulgurita de Zacatecas, A) aspecto de un trozo de fulgurita tubular, B) y C) imágenes con microscopio en lámina delgada mostrando vesículas y estructuras de flujo y glomérulo de sílice con pequeños fragmentos de aleaciones metálicas de Si-Fe y Au en matriz vítrea. Fotos: Reyes et al 2006.



Fig.8. A la izquierda, aspecto en campo de la fulgurita de Florida, la furgoneta da una idea del tamaño. A la derecha, trozo de tubo fulgurítico de unos 25 cm. Fotos de la University of Florida Lightning Research Laboratory. En Wright (1998).

Fig.9. Ilustraciones
a) fragmentos de la fulgurita de Bustarviejo (Madrid); b) sección con la distribución mineralógica; c) morfología de los cristales de cuarzo; d) aleaciones de Fe-Si-Al. Imágenes de García-Guinea et al. (2009).



c) Fulgurita de Bustarviejo (Madrid, España)

Fulgurita, de 12 cm de diámetro en su rama mayor, encontrada en una arena arcósica que cubre los granitos de la localidad de Bustarviejo en la Comunidad de Madrid.

De la descripción pormenorizada de García-Guinea et al. (2009) podemos resumir que se trata de una fulgurita cuarzofeldespática con vidrio silíceo-alumínico, cuarzos deformados y neoformación de cristobalita. Contiene cavidades esféricas, de micras a centímetros, donde aparecen aleaciones de neoformación con diferentes proporciones de Si-Fe-Al, inmiscibles con el fundido rico en silicatos alumínicos.

Respecto a su génesis, se ha formado por el impacto de un rayo que ha producido la fusión de are-

na arcósica con rápida volatilización y extrema reducción en temperaturas que superaron los 2.000^o C. La cantidad de vesículas es mayor de las que se forman en arenas cuarcíferas.

d) La fulgurita de Torre de Moncorvo (Portugal)

Una nota de prensa del IGME el 10 de agosto de 2009 hacía referencia a que investigadores de esa institución habían descrito la que posiblemente fuese la fulgurita más grande del mundo (Martín Crespo., *et al.* 2009). En 1998 sobre tierras de labor en Torre de Moncorvo (Portugal), muy cerca de la frontera con Salamanca, se encontró una fulgurita de un tamaño excepcional. “Normalmente, en suelos graníticos como éste, son centimétricas, pero la fulgurita de Torre Moncorvo tiene una estructura dendrítica de unos 2 metros de profundidad con un diámetro de 75 centímetros y 3 ramificaciones horizontales de hasta 7 metros de longitud y 60 centímetros de diámetro, que incluyen otras ramificaciones menores” (Rafael Lozano, investigador del IGME).

Pero reconocen que la caída del rayo fue inducida por la presencia de una columna metálica de unos 20 metros de altura que sustentaba el tendido eléctrico de la zona, y que tras la descarga, se mantuvieron las altas temperaturas y una fuerte electricidad estática durante unas 48 horas. Por tanto, podría ser considerada una pseudofulgurita (fulgurita inducida o distorsionada por actividad antrópica).

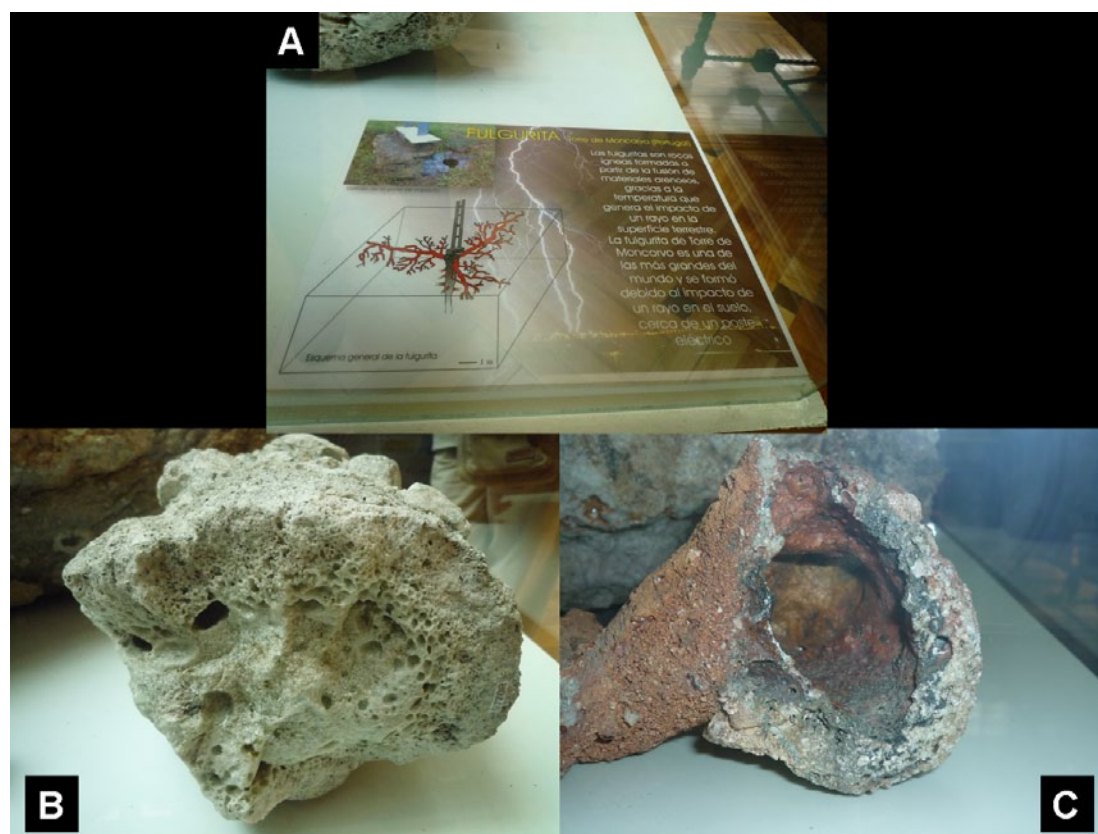


Fig.10. Fulgurita de Torre de Moncorvo, A) Esquema de la Fulgurita donde se observa la columna metálica y las tres ramificaciones de la fulgurita en ángulos de unos 120^o, B) fragmento de una rama menor donde se observa el fundido y la distribución vacuolar, C) aspecto en sección de un tubo fulgurítico menor de Torre Moncorvo. Museo IGME Madrid.

e) Pseudofulgurita El Rosario (Estado de Hidalgo, México)

En un magnífico artículo realizado por Ortiz y Hernández en 1996, describen una fulgurita producida el 21 de mayo de 1995 en el Ejido El Rosario, cerca de Tepatepec en el estado mexicano de Hidalgo. Recogen un fragmento mayor de 6,5 kg de aspecto vítreo de color verde oliva y brillo resinoso con oquedades y algunas esferas metálicas grisáceas rodeada de escoria brechosa negruzca. En la parte vítrea encuentran polimorfos de la sílice. El análisis químico muestra enriquecimiento en componentes refractarios respecto al suelo donde se formó que era material arcilloso y limoso. La composición química y la mineralogía son coherentes con las descripciones sobre fulguritas (Feldman, 1987). Impregnaciones blancas de calcita, óxido de calcio y feldespatos, sugieren adición de calcio suministrado por las raíces de la vegetación existente en el terreno de cultivo o por la carbonatación de las tobas del cual procede el suelo arcilloso y limoso implicado. Se sabe, en efecto, que los productos formados por la silicificación de raíces de plantas están compuestos de carbonato de calcio, limonita y calcedonia (Fronde, 1962).

La conclusión es que ese vidrio exótico, aunque terrestre, y de composición diferente a las formaciones geológicas adyacentes debe su origen a la descarga eléctrica producida por la ruptura de una línea de alta tensión (13.000 volts) que impactó sobre la superficie del terreno de cultivo, por lo que se cataloga como una pseudofulgurita.

APLICACIONES DEL ESTUDIO DE LAS FULGURITAS

El IGME y el Instituto de Geología Económica CSIC-UCM, tras el trabajo realizado sobre la fulgurita de Torre Moncorvo tienen un proyecto que pretende trasladar el conocimiento adquirido, hacia el campo de la conservación del patrimonio histórico construido en granito, ya que, hasta el momento, el impacto de rayos en edificios y los incendios derivados de las altas temperaturas generadas no ha sido estudiado en detalle.

Otros investigadores pretenden utilizar los estudios de fulguritas en los procesos de vitrificación que puedan llevar a la fabricación de materiales mediante nuevos procesos. El descubrimiento por espectrografía de masas de fulerenos en muestras de fulguritas, estaría en ese camino (Daly *et al.*, 1993).

Un rayo petrificado da pistas sobre el clima del pasado

La aplicación de las fulguritas con mayor repercusión en los medios de comunicación ha sido la publicación en *Science* en el año 2007 de Navarro-González y colaboradores. Estos autores analizaron

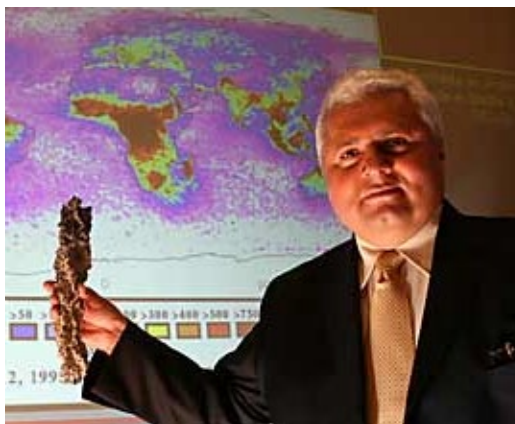


Fig.11. El astrobiólogo Rafael Navarro, académico de la UNAM, muestra el pedazo de fulgurita analizada en México. Foto: Diario Expreso, viernes 16 de Febrero de 2007. Sección Ciencia.

la composición de los gases atrapados en una fulgurita del Desierto de Libia, cuyos datos usaron para la reconstrucción paleoecológica de la zona. En el estudio, encabezado por el mexicano Navarro-González, participaron científicos de Francia, Nigeria, India y Estados Unidos.

Trabajaron sobre una fulgurita adquirida en París y que les llamó la atención por no tener hueco central. Al cortarla con rayos infrarrojos observaron gran cantidad de vacuolas que contenían gases procedentes de su formación.

El equipo, tras estudiar la mineralogía de la fulgurita, y comprobar que eran polimorfos de sílice, analizaron los gases contenidos en las vacuolas y vieron que contenían: dióxido de carbono, monóxido de carbono y óxido nítrico. Estos gases son interpretados como producto de la oxidación de materia orgánica, es decir de origen biológico.

La prueba mediante termoluminiscencia reveló que la fulgurita se había formado hace unos 15.000 años.

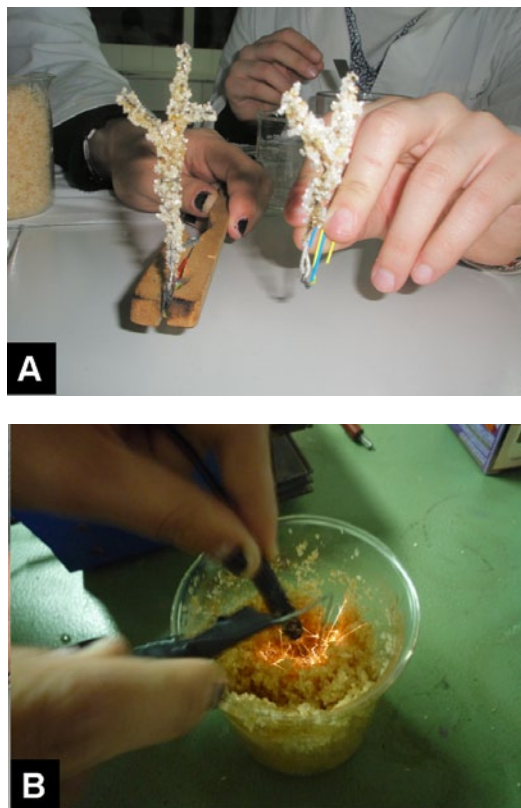
La conclusión del estudio es que el clima del noreste de África y en concreto en la actual zona del Desierto de Libia en el Pleistoceno tardío era semiárido con la suficiente cantidad de lluvia para permitir la existencia de vegetales. En 15 milenios se ha ido desertizando, desapareciendo la cubierta de vegetación.

Hay otros intentos de utilizar las fulguritas como indicadores paleoambientales. Este mismo equipo está trabajando con una fulgurita fósil de hace 250 M.a.; también tienen un proyecto de búsqueda de fulguritas en Marte (López, 2007).

SÍNTESIS DE LA APLICACIÓN DIDÁCTICA DE LAS FULGURITAS EN EL IES POLITÈCNIC DE PALMA DE MALLORCA

En el curso 2008/09 surgió de forma espontánea el tema de las fulguritas en la optativa Técnicas Experimentales del Bachillerato Científico Nocturno del Institut Politècnic de Palma. Era una cuestión no habitual y fuera de toda programación; tal vez lo insólito del tema exacerbó la imaginación en los alumnos. A partir de ese momento se siguió un pro-

Fig.12. Modelos de fulgurita en laboratorio, A) Resultado de la modelización por calor ¡Parecen fulguritas!, B) Intento de conseguir modelos de fulguritas por fricción con electricidad.



ceso improvisado, primero buscando información para responder a las preguntas que se planteaban, después modelizando fulguritas en laboratorio y por último intentando fabricarlas construyendo un "disparador de rayos".

Primera fase: Documentación

La formación de fulguritas, para uso didáctico, se esquematizó en los siguientes pasos: impacto del rayo, fusión, enfriamiento rápido y producto (fulgurita). Este simple esquema mental fue suficiente para que de forma propedéutica los alumnos realizaran trabajos bibliográficos utilizando Internet como principal fuente de información. Los temas de trabajo fueron provocados por cuestiones a modo de ejercicios y actividades. Algunas preguntas: ¿qué son las fulguritas? ¿qué sustancias de uso común pueden producir algo similar a las fulguritas? ¿por qué tienen muchas veces forma de raíz? ¿qué factores influyen en la formación de una fulgurita? ¿se producen muchas fulguritas en la Tierra a lo largo de un año? ¿pregunta en tu entorno, si alguien ha visto los efectos de la caída de un rayo? ¿por qué en las fulguritas se producen vidrios y no cristales? ¿qué es la lechatelierita? ¿qué son los polimorfos de la sílice? ¿en qué nos podemos basar para intuir que la imagen de la piedra zo6 del Lapidario de Alfonso X El Sabio puede ser una fulgurita? ¿qué es el IGME? ¿cómo se pueden relacionar las fulguritas con el estudio del paleoclima? ¿cuándo y donde describe Charles Darwin fulguritas? ¿qué criterios se utilizan para saber la temperatura que alcanza el sustrato en la formación de fulguritas? ¿qué significa que un

mineral es más refractario?. Otras actividades más complejas fueron: ¿qué es la ceraunología?, busca información sobre el Rayo de Catatumbo, ¿qué aparatos y técnicas se utilizan en la investigación de fulguritas?, documenta alguna fulgurita importante y realiza una ficha técnica de ella, busca otros acontecimientos similares a la formación de fulguritas, ¿a qué le llaman los científicos pseudofulguritas?, diseña una investigación para fabricar las fulguritas.

Las respuestas a todas estas cuestiones y actividades supusieron una recogida de información tipo dossier que los alumnos expusieron en clase. Pero, querían más.

Segunda fase: Modelizar fulguritas.

Una vez concluida la recogida de información se pasó a diseñar una práctica para realizar modelos de fulguritas en el laboratorio. Como no encontramos bibliografía sobre el tema se diseñó una sencilla práctica. Material necesario: vaso de precipitados, pinza de madera, clips metálicos, azúcar, sal, agua destilada y mechero. Procedimiento: en el vaso de precipitados mezclamos sal, azúcar y lo humedecemos con agua destilada. Dimos a los clips forma arborescente y cogidos con pinzas de madera los calentamos al rojo vivo, inmediatamente los enterramos en el vaso de precipitado que contenía la mezcla de sal y azúcar. En segundos sacamos el clip y obtuvimos un modelo de fulgurita. ¡Alegría! Habíamos conseguido algo que se parecía mucho a una fulgurita. Pero ¿qué tiene de real? Solamente un cierto parecido morfológico, porque el proceso de formación había sido totalmente diferente a lo que ocurre en la realidad, por lo que el resultado no nos podía servir ni como modelo. Se trata de un tipo de modelo, muy común en propuestas didácticas, en los que una cierta semejanza del producto nos hace pensar en que estamos reproduciendo su naturaleza. La práctica gustó a los alumnos, sobretodo por su sencillez, pero esto no debe hacernos olvidar la validez de la misma.

Utilizando las mismas sustancias, se realizó un segundo intento, esta vez produciendo calor y chispazos con una corriente eléctrica de bajo voltaje. En este caso el proceso era más válido pero el resultado final es que no obtuvimos nada parecido a una fulgurita. Estamos en el caso contrario al anterior. Otro intento fallido pero ¿esta práctica es menos válida? Desde un punto de vista didáctico está claro que no.

Tercera fase: Intento de fabricación de Fulguritas: Disparador de Rayos

Por iniciativa de los alumnos llegamos a la tercera fase con formato de tarea didáctica. Objetivo: fabricar fulguritas con materiales reales (arenas silíceas o carbonatadas y limos y arcillas). Contactamos con profesores y alumnos del Ciclo Formativo Superior de Sistemas de regulación y control automático, para construir un disparador

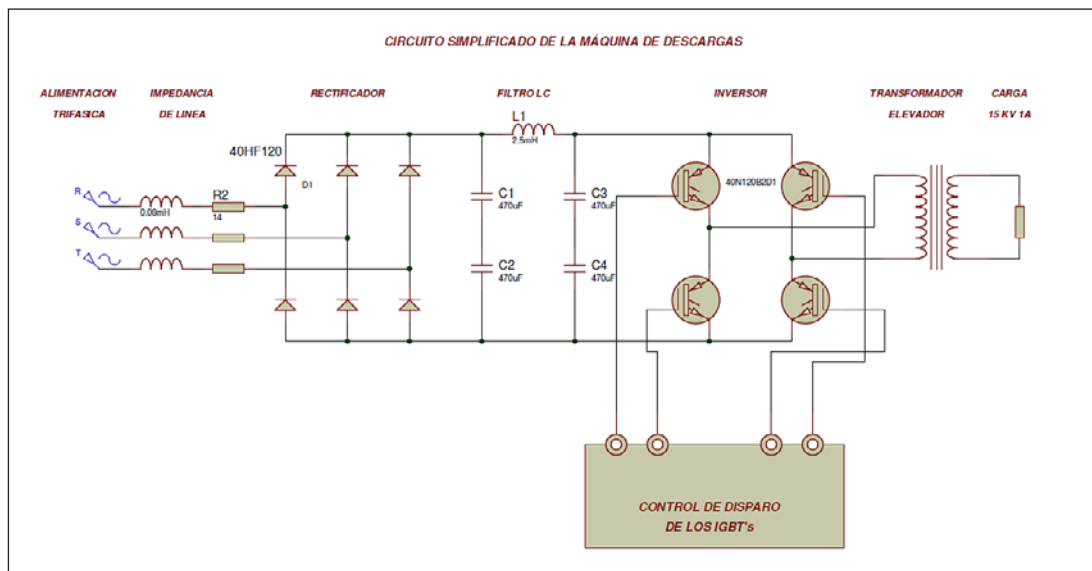


Fig. 13. Circuito de la máquina de descargas realizado por S. Climent (2010).

Alimentación: formado por la red trifásica de 400 V de tensión compuesta y 50Hz, y una impedancia en serie correspondiente a la inductancia y resistencia de la red y el transformador de alimentación.

Rectificador: convierte la tensión alterna de la red en tensión continua pulsante. Está formado por 6 diodos de potencia (modelo 40HF120) capaces de soportar 40 A de CC y 1200 V de tensión inversa.

Filtro: convertirá la tensión continua pulsante en tensión continua (550V CC) con un pequeño valor de rizado. Cada condensador es de 470uF y soporta 400 V; son condensadores electrolíticos de aluminio.

Inversor: se trata de una configuración en puente en H de cuatro interruptores electrónicos (IGBT's modelo 40N120B2D1, soportan 70 A y 1200V) que transformarán la tensión continua en tensión alterna de 400V de tensión compuesta y 500 Hz de frecuencia.

Transformador: elevará la tensión de 400V a 15.000V y deberá tener una potencia de salida de 15.000 VA. Posee un primario de 25 espiras con cable en paralelo de 6mm² de sección y 930 espiras en el secundario con cable esmaltado de 0.7mm² de sección. Tiene una sección del núcleo de 120 cm² y está formado por chapas apiladas de 0.5 mm² de espesor por 80 mm de longitud.

El control de disparo: es la parte electrónica encargada de gobernar la puesta en conducción y la desconexión de los IGBT's, y también de controlar la potencia que se le entrega a la carga.

de rayos (técnicamente máquina de descargas) con la suficiente potencia para lograr nuestro objetivo. Descartamos la posibilidad de utilizar el arco voltaico de un tubo de televisión y llegamos a la conclusión que el mejor método era construir el artefacto desde cero. Para el diseño del circuito se utilizaron las referencias de los propuestos por Arai (1968) y Naito y Nakamura (1993a y 1999b). Se mejoró y construyó de forma artesanal en los talleres del IES Politècnic de Palma. La potencia sería de 15.000 VA, considerada como suficiente

para producir fulguritas. La ilusión nos hizo pensar en llevar la máquina de descargas a la Feria de la Ciencia de Baleares para hacer demostraciones y presentarla como taller en el Simposio de Enseñanza de la Geología de Teruel.

Descripción “máquina de descargas”, resumen.

El circuito está dividido en las siguientes partes: alimentación, rectificador, filtro, inversor, transformador y carga. En la figura 13 se describen brevemente cada una de las partes.

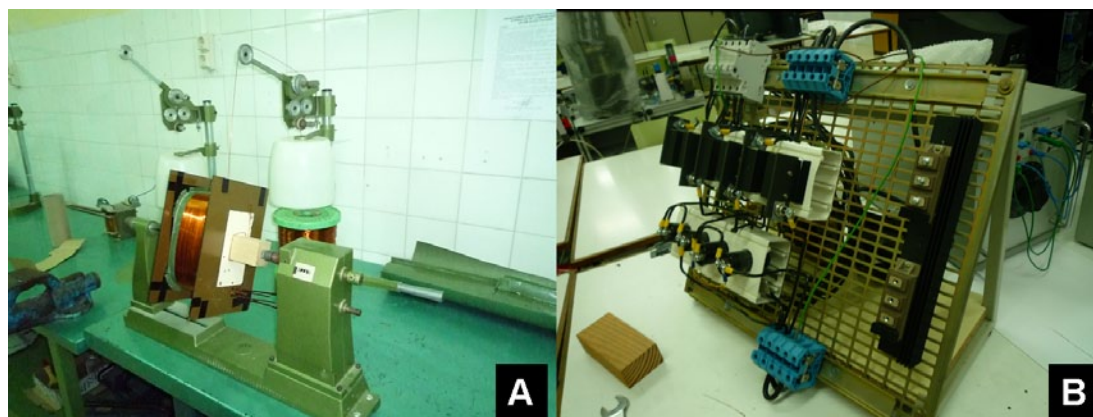


Fig.14. Partes de la máquina de descargas, A. bobinado para construir el transformador, B) aspecto del rectificador y filtro.

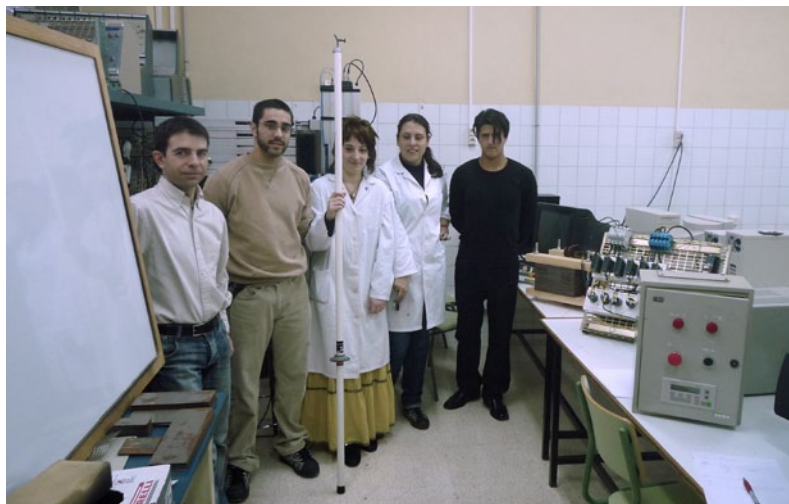


Fig.15. Alumnos/as colaboradores con el Prof. Salvador Climent (a la izquierda). A la derecha el cuadro de mando, detrás el rectificador y el transformador. La alumna central muestra la pértiga para las descargas.

Una vez construida la máquina de descargas aparecieron problemas de cortocircuitos en los IGBTs (transistores) al generar la corriente alterna por simultaneidad en su apertura y cierre cuando deberían desfasarse unos milisegundos. Al ponerlo en marcha saltó la instalación del Centro por el tirón del cortocircuito. Por otra parte consideramos peligroso la utilización de la pértiga aislante ya que podría saltar un arco eléctrico de más de un metro con riesgo de electrocución. Por lo que estamos diseñando un sistema de aislamiento completo tanto para la zona de las descargas como para los transformadores que sumergiremos en aceite aislante. Esto es caro y nos llevará bastante tiempo, pero la seguridad debe primar. Todos estos problemas impidieron su puesta en funcionamiento. ¿Un fracaso? o ¿El intento es suficiente como recurso didáctico?

CONCLUSIONES

Las fulguritas constituyen un buen recurso didáctico. Analizando el trabajo realizado, tal vez el supuesto fracaso no lo sea tanto. Se puede considerar un éxito, que la implicación de los alumnos lleve a plantearnos cuestiones fundamentales como: ¿cuál es el verdadero carácter de la ciencia? ¿qué hacemos o dejamos de hacer en los laboratorios de los Institutos? ¿debemos enseñar todo ya prefabricado? ¿qué ocurre cuando ni el profesor conoce los resultados de una práctica? ¿esto incentiva o retrae a los alumnos? ¿es posible una colaboración entre profesores de Formación Profesional y de Bachillerato? En este artículo no se dan respuestas a esas cuestiones, solamente se plantean. Casos como el descrito en este artículo hacen pensar en que las programaciones demasiado cerradas pueden impedir el desarrollo de iniciativas por parte de los alumnos y perderse procesos de azar o serendípicos muy importantes para mejorar la creatividad. En todo caso, siempre el instigador de este tipo actuaciones educativas ha de ser el profesor y para ello ha

de contar con los medios necesarios y la suficiente flexibilidad en las programaciones para llevarlas a cabo, sobretodo cuando tengan la forma de tarea didáctica e impliquen distintos sectores del mundo educativo y su proyección hacia el exterior. Es indudable que este tipo de acciones harán a nuestros alumnos más competentes.

AGRADECIMIENTOS

Al Prof. Salvador Climent por el diseño y coordinación en la construcción de la máquina de descargas y a sus alumnos del Ciclo Formativo de Grado Superior de Sistemas de Regulación y Control Automático por la elaboración de los elementos del disparador de rayos. A las alumnas del Bachillerato Científico del Nocturno, Asía Preto y Helena Ruiz por las modelizaciones de fulguritas y su interés y apoyo al proyecto. A Pedro Alfaro y David Brusi por sus consejos y correcciones. Y a los que han tenido que aguantar mis neuras sobre el tema, en especial a mi compañera Profesora M^a Ángeles Mateos Vázquez.

BIBLIOGRAFÍA

- Arago, D.F.J. (1821). Sur des Tubes vitreux que paraissent produits par des coups de Foudre. Ann. de Chim. et de Phys, 19, 290-303.
- Arai, B. (1968). The preliminary experiment of the artificial fulgurite. Departmental Bulletin Paper. Yokohama National University, 18-24.
- Barrows, W.L. (1910). A Fulgurite from the Raritan Sands of New Jersey with an Historical Sketch and Bibliography of Fulgurites in General. Sch. Mines Quart., 31, 294-319.
- Brook, M., Kitagawa, N. y Warman, E. (1962). Quantitative study of strokes and continuing currents in lighting discharges to ground. Journal of Geophysical Research, 67(2), 649-659.
- Dana, H. (1960) Manual de Mineralogía 2^a Edición. Ed. Reverte. Barcelona, 476-485.
- Darwin, Ch. (1832). Tubes formed by Lightning. En Journal of Researches into the Natural History and Geology of the various country visited during the voyage around the world of HMS Beagle under the command of Captein Fitzroy, R.N. London, 1939 Chapter 3 – Maldonado (excerpt) Journal entry, July 26, 1832.
- Daly, T.K., Buseck, P.R., Williams, P. y Lewis, Ch.F. (1993). Fullerenes from a Fulgurite. Science. 259, 1501, 1599-1601.
- Deer, W.A., Howie, R.A. y Zussman, J. (1966). An introduction to the rock-forming minerals. Pearson Educational Limited. Essex. Inglaterra, 1993. 696.
- DETENAL (Dirección de Estadística del Territorio Nacional). (1982). Síntesis Geográfica del Estado de Hidalgo. México, D.F. Secretaría de Programación y Presupuesto. Dirección de Estudios del Territorio Nacional, 134.
- Essene, E.K. y Fisher, D.C. (1986). Lightning-strike fusion: Extreme reduction and metal-silicate liquid immiscibility. Science. 236. 189-193.
- Feldman, V. (1987). Comparative characteristics of impactite, tektite and fulgurite glasses. En Second Interna-

tional Conference on Natural glasses. Charles Universitha. Praga, Kanta, J., ed. 435.

Fiedler, K.G. (1817). Über die Blitzrohren und ihre Entstehung. *Ann. Der Phys*, 55, 1817. 121-164.

Fronde, C. (1962). *Silicaminals "Dana's System of Mineralogy"*. 3. New York: Wiley & Sons, 321-329.

Gailliot, M.P. (1980). Petrified Lightning a discussion of sand fulgurites. *Rocks and Minerals*, 55. 13-17.

García-Guinea, J., Fueio, M., Fernández-Hernan, M., Bustillo, M.A., Crespo-Feo, E., Corcher, V., Sánchez-Muñoz, L. y Matesanz, E. (2009). The quartzfeldspatic fulgurite of Bustaviejo (Madrid): Glassy matrix and silicon phases. *Micro-Raman Spectroscopy and Luminescence Studies*, 1163.128-134.

Goedeke, D. y Techmer, K. (1987). Partial melting in fulgurites from Little Ararat (Turkey) and Dissistock (Swiss Alps). *Uman MA, Int. Geophys. Series*, 39.

Gifford, A.C. (1999). Clay soil fulgurites in the Eastern Goldfields of Western Australia. *Journal of the Royal Society of Western Australia*, 82, 165-168.

Hallock, W. (1901). Peculiar Effects due to a Lightning Discharge on Lake Champlain in August, 1900: *Jour. Geol*, 9, 671-672.

Hill, R.D. (1971). Channel heating in return-stroke lightning. *Journal of Geophysical Research*, 76, 3, 637-645.

Hitchcock, E. (1861). Note on finding of Fulgurite at Northfield Farms, Mass. *American Journal of Science*, 31, 302.

King, Ch. y Kennett, P. (2010). "Darwin geólogo": una selección de actividades de Earthlearningideas y Herat Science Education Unit. *Rev. Enseñanza de la Ciencias de la Tierra*, 18(2), 182-193.

O'Keef, J.A. (1984). *Natural Glasses*. Pye, L.D., O'Keef, J. A. & Frechette, V.D. North Holland. Amsterdam. 1-17.

Ortiz, L.E. y Hernández, I. (1996). Pseudofulgurita El Rosario: Un agregado vítreo exótico en el Estado de Hidalgo. Artículo pdf en: <http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/epoca03/ortiz-hdz..pdf>. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana (1996).

López, J.P. y Bellos, L.I. (2006). Texturas y estructuras de la rocas ígneas: significado petrológico e implicancias en la condiciones de formación de la rocas. *INSUGEO, Miscelánea*, 15, 7-57.

López, P. (2007) Consigue mexicano fechar un relámpago. *Reforma*. Ciudad de México 16/2/2007 en www.presidencia.gob.mx

Lozano Fernández, R.P., González Laguna, R. y Martín Crespo, T. (2007). Descripción Macroscópica de la Fulgurita de Torre de Montecorvo (Portugal). *Geogaceta*, 42, 139-142.

Libby, C.A. (1986). Fulgurite in the Sierra Nevada. *California Geology*. 39.11. 262.

Martín Crespo, T., Lozano Fernández, P. y González Laguna, R. (2009). The fulgurite of Torre de Moncorvo (Portugal): description and analysis of the glass. *European Journal of Mineralogy*, 21(4), 783-794.

McCollum, A. (2000). The Event: Petrified lightning form Central Florida. Project. Contemporary art museum University of South Florida, Museum of science and industry. Tampa. Florida. 2.000. En <http://homepage.mac.com/allanmcnyc/amcpdfs/theeventpress.pdf>

Mohling, J.W. (2004). Exogenic fulgurites from Elko County, Nevada: a new class of fulgurite associated with

large soil-gravel fulgurite tubes. *Rocks and Minerals*, 79, 334-340.

Myers, W.M., y Peck, A.B. (1925). A Fulgurite from South Amboy, N. J. *Amer. Mineral*, 10, 152-155, 1925.

Mysen, B.O. (1988). Structure and properties of silicate melts. *Developments in Geochemistry*. 4. Elsevier. New York, 345.

Naito, K. y Nakamura, K. (1993a). Fulgurite and its artificial production in laboratory. 8th International Symposium on high voltage engineering proceedings.3. Yokohama. Japan. En: http://www.usfcam.usf.edu/cam/exhibitions/1998_12_McCollum/supplemental_didactics/15.VoltArtif.pdf

Naito, K. y Nakamura, K. (1993b). Production of artificial fulgurite byutilizing rocket triggered lightning. 8th International Symposium on high voltage engineering proceedings.3. Yokohama. Japan. En http://www.usfcam.usf.edu/cam/exhibitions/1998_12_McCollum/supplemental_didactics/16.VoltTrig.pdf

Navarro-González, R., Mahan, S.A., Singhvi, A.K., Navarro-Aceves, R., Raroj, J.L., McKay, Ch.P., Coll, P. y Raulin, F. (2007). Paleocology reconstruction from trapped gases in a fulgurite from the late Pleistocene of the Libyan Desert. *Geology*, 35(2), 171-174.

Newcott, W.R. (1993). Lightning Nature's high-voltage spectacle. *National Geographic*, 184(1), 82-103.

Petty, J.J. (1936). The origin and occurrence of fulgurites in theAtlantic coastal plain. *American Journal Science*, 31, 188-201.

Purdum, W.B. (1966). "Fulgurites from Mt. Thielsen, Oregon" *The Ore Bin*, 28(9), 153-159.

Real Academia Española. Diccionario de la lengua española. Vigésima segunda edición. www.rae.es/

Reyes Salas, A., Ortega Gutiérrez, F., Macías, C., Girón, P., Cervantes, K., Carcía, J., Flores, D. y Linares, C. (2006). Fulgurita de Zacatecas: un estudio petrográfico, geoquímico y mineralógico. *Sociedad Mexicana de Mineralogía. Boletín de Mineralogía*, 17, 67-73.

Rogers, A.F. (1946). Sand fulgurites with enclosed lechatelierite from Riverside Co. California. *Journal of Geology*, 54(2), 117-122.

Ruf, C., Renno, N.O., Kok, J.F., Bandelier, E., Sander, M.J., Gross, S., Skjerve, L., y Cantor, B.. (2009) Emission of Non-thermal Microwave Radiation by a Martian Dust Storm. *Geophys. Res. Lett.*, 36(13), L13202.

Tomkeieff, S.I. (1983). *Dictionary of Petrology*. Ed. Walton, Randal, Battey, Tomkeief. Wiley&Sons Ltd. New York. 680.

Uman, M.A. y Krider, Ph. (1989). Natural and artificially initiated lightning. *Science*, 246, 457-464.

Varrek, R.J., Holle, R.L. y Allsopp, J. (2004). Fulgurites: Glass from lightning. *National. Earth Science Teachers Association*, 20, 23-26.

Veimeister, P.E. (1972). *The Lightning Book*. The Mit Press. Cambridge.

Wright, F.W. JR (1998) Florida's fantastic fulgurite find. *Weatherwise*, 51(4), 28-31.■

Fecha de recepción del original: 14/11/10

Fecha de aceptación definitiva: 07/12/10