

El fuego del cielo

246

LA
CIENCIA
PARA
TODOS

FÍSICA

JOSÉ
ALTSHULER

Mito y realidad
en torno al rayo

30
ANIVERSARIO



EL FUEGO DEL CIELO



La Ciencia para Todos

En 1984 el Fondo de Cultura Económica concibió el proyecto editorial La Ciencia desde México con el propósito de divulgar el conocimiento científico en español a través de libros breves, con carácter introductorio y un lenguaje claro, accesible y ameno; el objetivo era despertar el interés en la ciencia en un público amplio y, en especial, entre los jóvenes.

Los primeros títulos aparecieron en 1986, y si en un principio la colección se conformó por obras que daban a conocer los trabajos de investigación de científicos radicados en México, diez años más tarde la convocatoria se amplió a todos los países hispanoamericanos y cambió su nombre por el de La Ciencia para Todos.

Con el desarrollo de la colección, el Fondo de Cultura Económica estableció dos certámenes: el concurso de lectoescritura Leamos La Ciencia para Todos, que busca promover la lectura de la colección y el surgimiento de vocaciones entre los estudiantes de educación media, y el Premio Internacional de Divulgación de la Ciencia Ruy Pérez Tamayo, cuyo propósito es incentivar la producción de textos de científicos, periodistas, divulgadores y escritores en general cuyos títulos puedan incorporarse al catálogo de la colección.

Hoy, La Ciencia para Todos y los dos concursos bienales se mantienen y aun buscan crecer, renovarse y actualizarse, con un objetivo aún más ambicioso: hacer de la ciencia parte fundamental de la cultura general de los pueblos hispanoamericanos.

Comité de selección de obras

Dr. Antonio Alonso
Dr. Francisco Bolívar Zapata
Dr. Javier Bracho
Dr. Juan Luis Cifuentes
Dra. Rosalinda Contreras
Dra. Julieta Fierro
Dr. Jorge Flores Valdés
Dr. Juan Ramón de la Fuente
Dr. Leopoldo García-Colín Scherer (†)
Dr. Adolfo Guzmán Arenas
Dr. Gonzalo Halffter
Dr. Jaime Martuscelli
Dra. Isaura Meza
Dr. José Luis Morán López
Dr. Héctor Nava Jaimes
Dr. Manuel Peimbert
Dr. José Antonio de la Peña
Dr. Ruy Pérez Tamayo
Dr. Julio Rubio Oca
Dr. José Sarukhán
Dr. Guillermo Soberón
Dr. Elías Trabulse

José Altshuler

EL FUEGO DEL CIELO

Mito y realidad en torno al rayo



La Ciencia para Todos / **246**

Primera edición, 2017

Primera edición electrónica, 2017

D. R. © 2017, Fondo de Cultura Económica

Carretera Picacho-Ajusco, 227; 14738 Ciudad de México



www.fondodeculturaeconomica.com

Comentarios:

editorial@fondodeculturaeconomica.com

Tel. (55) 5227-4672

Diseño de portada: Paola Álvarez Baldit

Fotografía de portada: iStock de Getty Images/krivosheevv

La Ciencia para Todos es proyecto y propiedad del Fondo de Cultura Económica, al que pertenecen también sus derechos. Se publica con los auspicios de la Secretaría de Educación Pública y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Se prohíbe la reproducción total o parcial de esta obra, sea cual fuere el medio. Todos los contenidos que se incluyen tales como características tipográficas y de diagramación, textos, gráficos, logotipos, iconos, imágenes, etc. son propiedad exclusiva del Fondo de Cultura Económica y están protegidos por las leyes mexicana e internacionales del copyright o derecho de autor.

ISBN 978-607-16-5178-5 (mobi)

Hecho en México - *Made in Mexico*

ÍNDICE

Prefacio

I. Los primeros tiempos

El rayo del temor y del absurdo
En busca de una explicación racional
Del poder de las puntas al pararrayos
El pararrayos domina las alturas y la imaginación
La polémica de las puntas

II. La atmósfera electrizada

El fuego de san Telmo
Imágenes sucesivas del rayo
El rayo, simulado y encarrilado
La nube de tormenta
Haciendo camino al andar
Un retorno relampagueante y atronador
Grandes corrientes y rayos petrificados
Variaciones sobre el tema
Los misteriosos rayos globulares
Geografía del rayo
Desconcierto de marinos e inspiración de electricistas
Rayos rigurosamente vigilados

III. Más allá del viejo pararrayos

Una protección relativa
Jaulas protectoras
En busca de una protección absoluta
Protegiendo los sistemas electroenergéticos
Vulnerabilidad de la microelectrónica
Barcos, automóviles, aeronaves y astronaves ante el rayo
La guerra de los pararrayos

IV. Huellas, peligros, precauciones

Tras la huella
Efectos indirectos
En tiempo de borrasca
De la ceraunomancia a la ceraunomedicina
Pararrayos humanos
Las otras caras del rayo

Colofón

Bibliografía

PREFACIO

Desde los tiempos en que vivía en las cavernas hasta el día de hoy, el ser humano se ha sentido fascinado por la espectacular caída de los rayos, con sus deslumbrantes relámpagos y ensordecedores truenos, a la vez que ha mantenido hacia ellos el saludable respeto que merece su poder destructivo. Nada de extraño tiene, pues, que durante decenas de miles de años se le atribuyera al rayo un origen sobrenatural, aunque unos pocos —poquísimos— llegaran a imaginar que se trataba de un hecho tan natural como la caída de la lluvia o la nieve, y no de la manifestación de la ira de alguna deidad celeste. Pero lo cierto es que fue solamente como resultado de las investigaciones científicas realizadas sobre el fenómeno a mediados del siglo XVIII, que el agudo Voltaire pudo hacer generalmente aceptable la definición del rayo como “un gran fenómeno eléctrico [que] Franklin obliga a descender tranquilamente sobre la tierra”.

Se trata, sin embargo, de algo bastante más complejo de lo que puede sugerir una breve definición, por ingeniosa que sea; entre otras cosas, porque ni las explicaciones científicas actuales sobre el fenómeno son totalmente satisfactorias, ni es absoluta la protección que ofrecen los sistemas de pararrayos al uso, todo lo cual es objeto de controversia por distintas razones, un debate que se inició en tiempos de Franklin y que continúa en nuestros días.

Confieso que lo que más me atrajo del asunto, en los ya lejanos tiempos de mi juventud, fue todo lo relativo a sus facetas históricas y culturales e incluso a sus anécdotas pintorescas. Me habitué a recortar y guardar cualquier cosa sobre el tema que apareciera en los periódicos y llamara mi atención. Pero no fue hasta que cayó en mis manos *The Flight of Thunderbolts* [El vuelo de los rayos] —la clásica obra de divulgación, publicada en 1950, del renombrado investigador sudafricano del rayo, Basil Schonland— que se avivó mi interés en conocer, siquiera a grandes rasgos, las peculiaridades científicas y tecnológicas del asunto. Lecturas posteriores en libros y revistas, complementadas con informaciones y criterios, a veces bastante heterodoxos,

suministrados por algunos especialistas experimentados, me convencieron de que no sería una mala idea preparar una versión resumida y simplificada —pero no sobresimplificada— de todo aquel conocimiento que resultara de interés y utilidad para jóvenes de vocación científica o tecnológica, y también para la generalidad del gran público lector.

Este pequeño libro aspira a cumplir con ese propósito, concentrando la exposición en cuatro breves capítulos. Al final de la obra hallará el lector una lista de referencias bibliográficas que podrán resultar de utilidad a quien se interese en profundizar su conocimiento de este o aquel tema incluido en el texto.

El primer capítulo es de carácter histórico y cultural; está salpicado de material anecdótico que, presumiblemente, animará a continuar la lectura. En el segundo se precisan, de la manera más afable que me ha sido posible, los aspectos físicos más destacados del fenómeno, algunos explicados ya por la ciencia de nuestros días y otros no. En el tercero se echa un vistazo a la problemática de los sistemas de protección, incluida la actualmente llamada “guerra de los pararrayos”. Por último, en el cuarto capítulo se presentan, aparte de uno que otro material complementario de interés general, unas cuantas recomendaciones que cualquiera querría tener en cuenta para protegerse ante la amenaza de una tormenta eléctrica y evitar que “lo parta un rayo”, como suele decirse. En cualquier caso, el lector constatará que la presente exposición incorpora no pocas noticias de interés sobre el tema, aparecidas en los medios en fechas tan recientes como apenas unos días antes de que se pusiera punto final a la obra.

En cuanto a las nada escasas ilustraciones y observaciones colaterales con las que tropezará aquí el lector, vale la pena aclarar que, aunque a veces no lo parezca, la gran mayoría está destinada a apoyar y precisar los conceptos de carácter científico y técnico que afloran en el texto. Sépase que no pretendo haber logrado siempre este propósito, y menos en un tema tan problemático como el estudio científico de todo lo concerniente al rayo. Pero ciertamente lo he intentado en la medida de las posibilidades de alguien que no es un genuino experto en la materia, y cuando no he hallado consenso entre los especialistas, he preferido dejar expuestas las opiniones encontradas, con el ánimo de que el lector profundice en el asunto y saque sus propias conclusiones.

Aprovecho la ocasión para dejar constancia de mi agradecimiento al editor de Ciencia, Tecnología y Salud del Fondo de Cultura Económica, Heriberto E. Sánchez Cortés, por su ilustrada y más que valiosa contribución a la publicación de este libro; a los profesores Juan José Saldaña, de la Universidad Nacional Autónoma de México, y Libertad Díaz Molina, de la Universidad del Caribe, en Cancún, por los importantes datos históricos que aportaron a esta obra, y al colega Enrique Gay Calbó, especialista en sistemas de protección contra los rayos, por haberme hecho partícipe de algunos de los “secretos del oficio”.

I. Los primeros tiempos

En las nubes retumba despeñado
el carro del Señor, y de sus ruedas
brotó el rayo veloz, se precipita,
hiere y aterra al suelo,
y su lívida luz inunda el cielo.

JOSÉ MARÍA HEREDIA,
“En una tempestad” (1822)

Comienzo a escribir estas líneas mientras una tormenta veraniega desencadena su violencia eléctrica sobre la ciudad. Frecuentemente los relámpagos se suceden en fracciones de segundo y los truenos también. De cuando en cuando, maravilla el deslumbrante trazo irregular que dibuja en el cielo algún rayo particularmente vistoso (figura 1.1). Pero, por más que un espectáculo así pueda tomarme por sorpresa, en definitiva no me aterra. Me limito, si acaso, a desconectar mi computadora de la línea telefónica para evitar que se dañe —como ya ocurrió una vez—, a abstenerme de utilizar un teléfono no inalámbrico, a salir del agua cuando me estoy bañando en la playa, a no ponerme junto a un árbol para resguardarme de la lluvia cuando estoy en el campo, y tener otras precauciones por el estilo.

En honor a la verdad, hay que decir que nunca está de más tomar precauciones cuando se aproxima una tormenta, porque los rayos constituyen una amenaza muy real para la vida de personas, animales y plantas, y pueden causar considerables daños materiales. En la foto reproducida en la figura 1.2 puede apreciarse parte del destrozo que ocasionó un rayo en el muro de la azotea del edificio de departamentos de 15 pisos donde resido. Por fortuna, los daños fueron relativamente pequeños en este caso, al contrario de lo que ocurrió no muy lejos del mismo lugar el 30 de junio de 1741, cuando el *Invencible*, un buque de guerra español que se hallaba atracado en un muelle de la bahía de La Habana, fue alcanzado por un rayo. El incendio que éste desató no tardó en ocasionar el estallido del polvorín de la nave, que “hizo volar [los] aparejos, arboladura y obras muertas, estremeciendo, al reventar el casco, toda [la] población”, según cuenta un testigo.¹ Causó grandes averías en las edificaciones de la ciudad, entre ellas en la iglesia parroquial mayor,² pese a que el lugar del accidente se encontraba a unos 500 metros de

donde se alza el bello edificio colonial que hoy alberga al Museo de la Ciudad.



FIGURA I.1. *Rayos en la noche. Imagen: iStock.com/disqis.*

El episodio mencionado nos cae como anillo al dedo para recordar que, en homenaje a santa Bárbara, el polvorín o compartimento de los buques antiguos donde se almacenaba la pólvora se denomina en español “santabárbara”. La asociación de aquella santa de la Iglesia católica con los rayos proviene de que, según la leyenda, allá por el siglo III un rayo fulminó a su padre como castigo divino por haberla denunciado, primero, y decapitado, después, cuando ella se negó a abjurar de su conversión al cristianismo. En los cultos religiosos de origen africano desarrollados en Cuba y Brasil, Changó, el dios del rayo y del trueno, se identifica habitualmente con santa Bárbara.



FIGURA I.2. Destrozo producido el 25 de junio de 2009 por un rayo, con la entrada a la bahía de La Habana al fondo y el autor captado junto al boquete.

EL RAYO DEL TEMOR Y DEL ABSURDO

En épocas pasadas la gente solía reaccionar de manera muy diferente a como lo hacemos hoy, y no sólo porque todavía no se habían inventado el teléfono ni la computadora. Se cuenta, por ejemplo, que un tormentoso viernes de cuaresma (en aquel entonces, día de riguroso ayuno de productos cárnicos y huevos para los católicos), a cierto magistrado francés del siglo XVII, notorio por su libertinaje, tanto le asustaron los terribles truenos que estremecían el mesón donde estaba comiendo una tortilla de tocino, que arrojó el plato por la ventana y mirando al cielo exclamó molesto: “¡Cuánto ruido por una tortilla de tocino!”, pese al descreimiento que se le atribuía.

Puesto que esto lo leí en un libro de anécdotas propias para contrarrestar el insomnio, pensé que se trataba, cuanto más, de un hecho aislado, como suponía yo que debía de suceder en una época que no tardaría mucho en merecer el título de la “Edad de la Razón”. Pero parece que estaba equivocado porque, tiempo después, topé con otro episodio de corte similar, sólo que protagonizado esta vez nada menos que por quien fue el eminente físico y químico irlandés del siglo XVII, Robert Boyle. En efecto, él mismo relata en su autobiografía que, siendo muy joven, se convirtió en un religioso muy ferviente después de haberlo sorprendido una noche de tormenta tan cargada de espantosos relámpagos y truenos que pensó que había llegado el fin del mundo y se acercaba el día del Juicio Final.³

Es muy antigua la idea del rayo como manifestación del poder divino. La mitología escandinava lo identificaba con el martillo-búmeran que Thor o Donar, el dios del rayo y del trueno, lanzaba contra sus enemigos; mientras que en el mundo grecolatino la caída de un rayo se tomaba por una de las principales indicaciones de la cólera del padre de todos los dioses, Zeus o Júpiter,⁴ que solía utilizar para castigar a los que habían provocado su ira (figura 1.3). Así, leemos en la *Iliada* que, durante el sitio de Troya, Zeus “tronó fuerte desde el monte Ida y les lanzó una ardiente centella a los aqueos, quienes al verla se pasmaron, sobrecogidos de pálido temor”.⁵



FIGURA I.3. *Imagen de Zeus o Júpiter, representado con el símbolo del rayo en la mano derecha.*
Imagen: Mary Harrsch, flickr.com/photos/mharrsch. CC BY-NC-SA 2.0.

El salmista bíblico David expresa una idea parecida cuando, al describir la ayuda divina que lo defendió contra sus enemigos, dice: “El Señor [...] hizo oír su voz de trueno desde el cielo [...] Lanzó sus flechas, sus relámpagos, y a mis enemigos hizo huir en desorden”.⁶

Íntimamente asociados al viento y a la lluvia, el rayo, el relámpago y el trueno se vinculaban a la deidad mexica Tláloc; a Chaac, entre los mayas, y a otras deidades que se suponía que castigaban a los hombres lanzándoles sus hachas de piedra en forma de rayos.

Nada tiene de extraño que los antiguos imaginaran que los rayos eran armas arrojadizas o proyectiles incandescentes lanzados desde las alturas, asociados de alguna manera a un gran ruido, como pudiera inferirse de la cita bíblica anterior, o del hecho de que, según la mitología grecolatina, fueran tres herreros fabulosos (cuyos nombres sugerían el relámpago, el trueno y la tormenta) quienes forjaban los rayos de Júpiter. Por cierto que, desde mucho antes, el poder de lanzar rayos-proyectiles a voluntad constituía también uno de los atributos de Baal, la deidad adorada por las tribus semitas establecidas entre el río Jordán y el mar Mediterráneo (figura 1.4).



FIGURA I.4. Estela de piedra caliza de los siglos XV-XIII a.C., que representa a la deidad cananea Baal empuñando una lanza-rayo.

En las más diversas regiones del planeta no faltan personas que cuando, dentro de alguna caverna o escarbando en el suelo, encuentran un objeto de forma parecida a una punta de flecha o a un hacha, lo llaman “piedra de rayo” o “piedra de trueno” y le atribuyen propiedades más o menos mágicas. Se trata, a no dudarlo, del eco tardío de una superstición universalmente generalizada en otros tiempos. Así lo sugiere el canto funerario de Cimbelino en la obra homónima de Shakespeare cuando dice: “No tengas miedo a la luz del relámpago, ni a la temida piedra de rayo”. La imaginación popular ha aplicado esta denominación a lo que hoy sabemos que son puntas de flecha, hachas u otras herramientas de sílex o de pedernal, fabricadas por el hombre en tiempos prehistóricos (o a algunos fósiles, meteoritos, etc., de aspecto similar), que también se han utilizado tradicionalmente como talismanes contra los daños causados por el mal tiempo. Para los indios de América del Norte, son los rayos —originados por un mítico “pájaro del trueno” (figura 1.5)— los que, al caer sobre la tierra, esparcen en todas direcciones “piedras de rayo” susceptibles de producir chispas cuando son golpeadas.

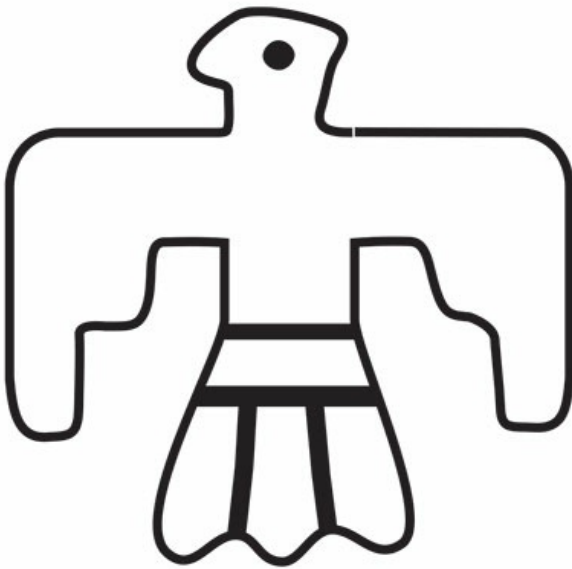


FIGURA 1.5. Imágenes del pájaro del trueno de los indios de América del Norte (izquierda) y de Tlaloc, deidad mexicana de la lluvia y la fertilidad, portadora del rayo (derecha). Imágenes: iStock.com/foofie y Colección E. Eug. Goupil, siglo XVII.

Según las antiguas leyendas, los dioses podían lanzar sus rayos, centellas, relámpagos y truenos con diferentes propósitos. Se cuenta, por ejemplo, que cuando Fidias terminó de esculpir su maravillosa estatua de Zeus en la ciudad de Olimpia, le pidió una señal de aprobación al padre de todos los dioses, y que éste se la hizo llegar lanzándole una centella muy cerca. Puede dudarse de la veracidad de semejante episodio, pero lo que sí ocurría efectivamente en tiempos del Imperio romano es que la gran mayoría de los habitantes de Roma pensaba que el divino Júpiter podía enojarse y echar mano a sus rayos para lanzarlos como señal de reprobación cuando le disgustaba la forma en que se conducían los asuntos del Estado. De todas las supuestas acciones de Júpiter en este sentido, la más violenta se refiere a un rayo que destruyó la estatua dorada de Rómulo, uno de los legendarios fundadores de Roma, monumento que se alzaba en lo alto de la Colina Capitolina. Este hecho se consideró de pésimo agüero y una fuerte indicación de que los asuntos de gobierno no andaban nada bien.

Naturalmente, algo tan complejo como la adivinación de los deseos de los dioses por medio de los signos y portentos del cielo tenía que ponerse en manos de personal especializado. En Roma se encargaba de ello un cuerpo muy respetado, conocido como el Colegio de Augures, cuyas interpretaciones de los designios de Júpiter podían afectar decisiones, reuniones públicas y elecciones de la mayor importancia. Los miembros del Colegio de Augures habían de serlo de por vida y se seleccionaban entre personas de mérito distinguido. Supuestamente, el augur ponía en evidencia el sentir de los dioses en asuntos de Estado mediante la observación de tres cosas que se ven esporádicamente en el cielo: rayos, pájaros y estrellas fugaces. Debía mirar al sur mientras cumplía con sus deberes oficiales, y si veía un relámpago pasar de izquierda a derecha, lo interpretaba como de buen agüero para los asuntos públicos. Pero si lo veía atravesar el firmamento de derecha a izquierda, el augur declaraba que Júpiter no otorgaba su aprobación a lo que se estaba haciendo en el foro o en algún otro lugar.

Con el tiempo, los informes de los augures se convirtieron en un utilísimo recurso político para posponer determinadas reuniones de la asamblea pública y anular los resultados de distintas elecciones que perjudicaban los intereses de la oligarquía dominante. Es más, cuando alguien proponía determinada medida a la que era opuesto personalmente el augur, éste simplemente lo amenazaba diciendo: “Vigilaré el cielo”, lo que en buen latín equivalía a un veto. Fue de esta manera que Bíbulo detuvo todo el programa legislativo de Julio César en el año 59 antes de nuestra era. Aunque al año siguiente se aprobó una ley contra estas tácticas, hay dudas de que se cumpliera en la práctica, porque todavía varios años después Cicerón comentaba sarcásticamente en su ensayo sobre la adivinación: “Consideramos un rayo a la izquierda como del mejor agüero para cualquier cosa salvo unas elecciones”.⁷

Durante la Edad Media y los siglos que siguieron hasta la invención del pararrayos a

mediados del siglo XVIII, el rayo fue para la mayoría un hecho de origen sobrenatural contra el cual no existía más remedio que la oración. “Del rayo y de la tempestad, de la plaga, la peste y el hambre; de la batalla y el crimen y de la muerte súbita, líbranos, Señor”, decía la plegaria.⁸ Durante muchos siglos, sin embargo, fue costumbre general en Europa complementar las oraciones con el repique violento de las campanas al acercarse una tormenta, por la creencia de que por esta vía se espantaban los espíritus malignos creadores de los rayos. De ahí que aparezca con frecuencia la inscripción latina *fulgura frango* (“rompo los rayos”) en las campanas medievales.

Como es de suponer, a la luz de lo que hoy sabemos, semejante costumbre no podía sino caer finalmente en desuso debido al gran número de campaneros fulminados durante el ejercicio de sus deberes en días de tormenta (figura 1.6). Con todo, aquella práctica no se extinguió fácilmente, como sugiere el hecho de que, todavía en el año 1786, el parlamento parisiense decidió prohibirla sobre la base de que en los 33 años previos habían perecido 103 campaneros al recibir la descarga eléctrica conducida por las sogas húmedas de las cuales tiraban para producir el repique de las campanas.

Que la mala costumbre se mantenía hacia 1870, al menos en un pueblecito aragonés, se infiere de una anécdota que relata el eminente científico español Santiago Ramón y Cajal, porque dice que, siendo niño, presencié cómo un rayo que había caído en la torre de la iglesia local fundió parcialmente la campana y electrocutó al párroco, “que creyó poder conjurar la formidable borrasca con el imprudente doblar de la campana”.⁹

EN BUSCA DE UNA EXPLICACIÓN RACIONAL

Cuando se ignoran las verdaderas causas de las manifestaciones de la naturaleza no es raro que muchos tiendan a seguir el camino más fácil y les atribuyan algún sentido en el dominio de lo sobrenatural, tanto más cuanto mayor sea su falta de familiaridad con el método científico y la espectacularidad del fenómeno. Pero aun en la Antigüedad no faltaron algunas personas ilustradas que rechazaban una actitud así y buscaban la manera de elaborar explicaciones racionales a los fenómenos de la naturaleza. Éste fue el caso de Lucrecio, poeta y filósofo romano del siglo I antes de nuestra era, que intentó encontrar un origen natural al rayo y al trueno, por analogía con fenómenos ordinarios a los que nadie les suponía procedencia sobrenatural.

Le Petit Journal

ADMINISTRATION
41, RUE LAFAYETTE, 41
Les annonces ne sont pas rendues
On s'abonne sans frais
Sans frais les bureaux de poste

5 CENT.

SUPPLÉMENT ILLUSTRÉ

5 CENT.

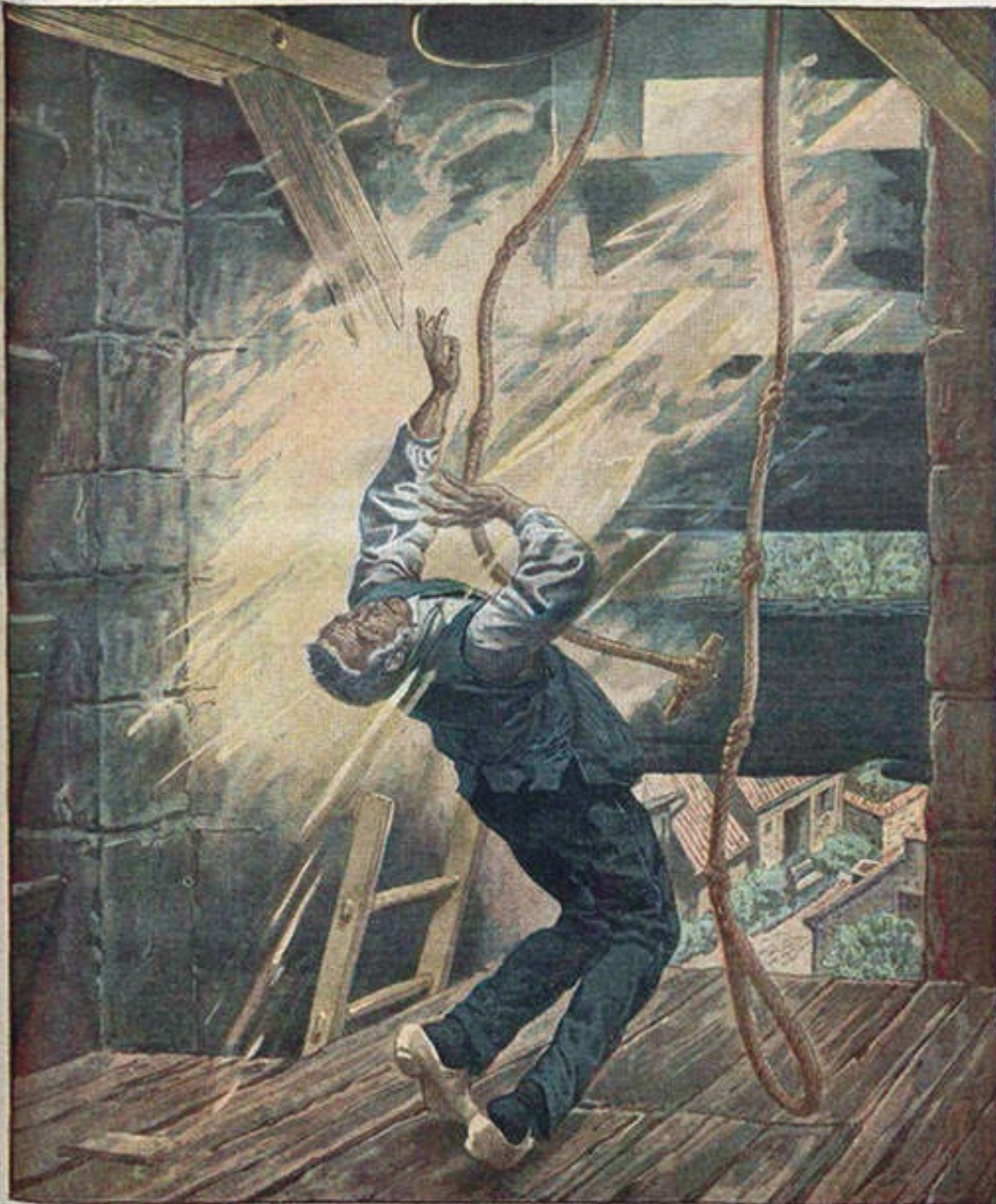
ABONNEMENTS

21^{me} Année

Numéro 1.074

DIMANCHE 11 SEPTEMBRE 1910

PARIS, 100 FR. AN
SEINE ET SEINE-ET-OISE... 2 fr. 50
DEPARTEMENTS... 2 fr. 50
ÉTRANGER... 2 fr. 50



UN SONNEUR DE CLOCHES FOUDROYÉ

FIGURA I.6. Campanero fulminado por un rayo.

Para empezar, rechazaba la idea de atribuir a Júpiter y a otras deidades el lanzamiento de los rayos, entre otras cosas porque no era concebible que los utilizaran para dañar templos y estatuas erigidos en su honor, como sucedía de vez en cuando:

[El rayo] se produce cuando el choque de las nubes hace brotar un gran número de átomos ígneos, de igual manera que cuando un guijarro es golpeado por otro guijarro o por un pedazo de hierro, salta la luz y dispersa brillantes chispas. Luego sigue el trueno, cuando nuestros oídos reciben lo que nuestros ojos vieron brillar. [Vemos] el relámpago antes de oír el trueno, que, sin embargo, parte al mismo tiempo que la llamarada, la cual proviene de la misma causa y resulta del mismo choque.¹⁰

Puede suponerse que Lucrecio habría preferido imaginar que los rayos no eran sino gigantescas chispas eléctricas generadas por fricción entre las nubes, o entre las nubes y las cumbres de las altas montañas, de haber vivido en la Europa del siglo XVIII, donde llegó a convertirse en un habitual espectáculo de salón la generación de grandes y ruidosas chispas eléctricas y la producción de violentas conmociones de origen eléctrico en personas y animales.



FIGURA I.7. *Demostración espectacular, organizada por Nollet, del efecto de la descarga de una botella de Leiden. Imagen: Frontispicio de Leçons de physique expérimentale.*

Las chispas se hicieron mucho más grandes y espectaculares después de que se descubrió, en 1745, cómo acumular o “condensar” cargas eléctricas mediante un dispositivo denominado “botella de Leiden”, precursor de los actuales capacitores o condensadores eléctricos. El francés Jean Antoine Nollet —más conocido como “el abate Nollet”— no tardó en utilizarlo para organizar grandes espectáculos, uno de los cuales consistió en hacer que el público se divirtiera de lo lindo viendo cómo 700 monjes tomados de las manos daban un gran salto convulsivo, todos a la vez, cuando se cerraba la cadena humana a través de las botellas de Leiden que una máquina electrostática cargaba a elevada tensión (figura I.7). En aquel tiempo, estas máquinas eran muy sencillas, pues se reducían esencialmente a un globo (o un tubo) de vidrio en rápido giro, que se cargaba por roce con la palma de la mano del experimentador, en un ambiente lo suficientemente seco (figura I.8).

Puesto que las chispas eléctricas que solían obtenerse en el siglo XVIII eran lo más parecido que pudiera tenerse a rayos en miniatura (figura I.9), nada tiene de extraño que distintos investigadores europeos imaginaran la posibilidad de que el rayo no fuera otra cosa que una gigantesca chispa eléctrica. En la orilla norteamericana del Atlántico, Benjamin Franklin (figura I.10) pensaba lo mismo.

Aunque nació en Boston, Franklin se había establecido desde muy joven en la ciudad de Filadelfia, donde llegó a destacar como hombre emprendedor y polifacético, notable por su sentido práctico que, entre otras cosas, lo llevó a inventar una estufa eficiente para la calefacción del hogar y a crear la primera compañía de seguros contra incendios. En su entorno, le dieron gran fama las incisivas máximas que publicaba en una imprenta de su propiedad, las cuales solían versar sobre las virtudes del ahorro y la laboriosidad, lo que, por cierto, contrasta con el sorprendente radicalismo sociopolítico que manifestaba a veces en su correspondencia personal.¹¹

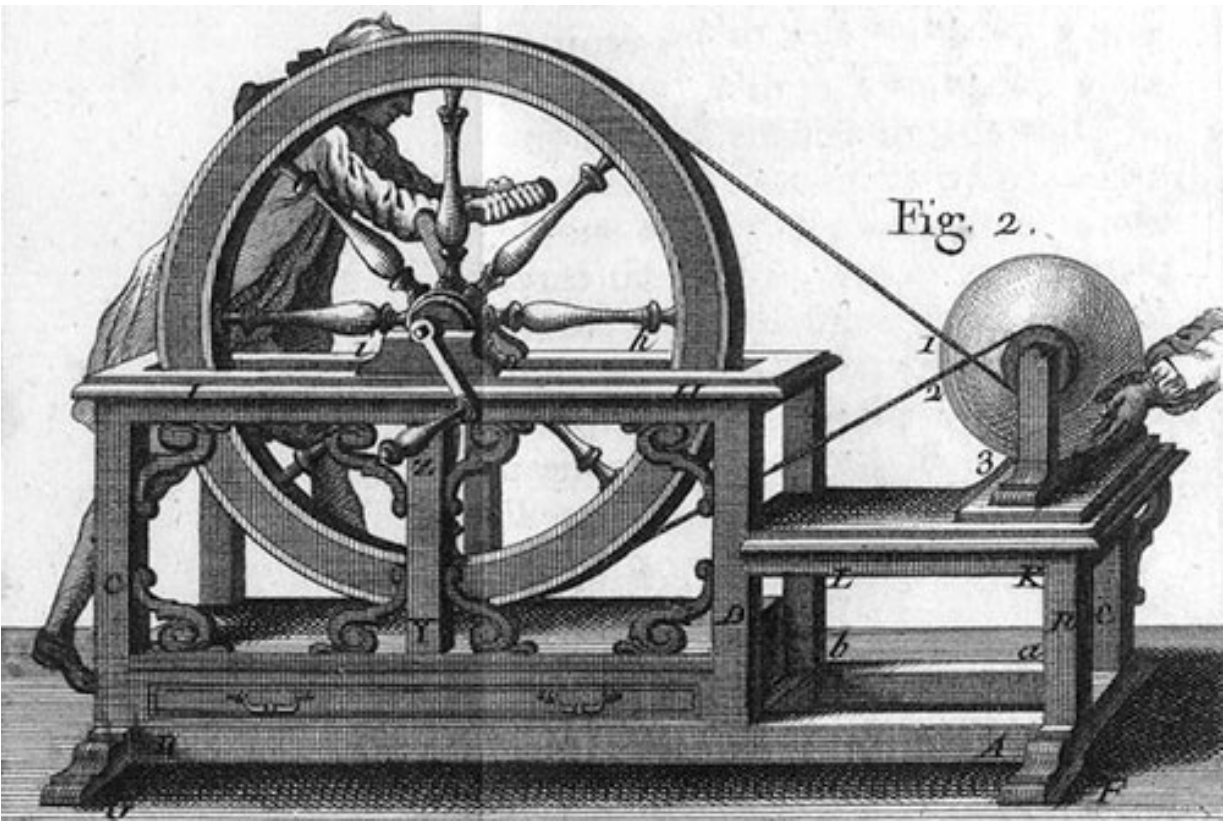


FIGURA I.8. *Máquina electrostática de Nollet en funcionamiento. Imagen del libro Essai sur l'électricité des corps.*

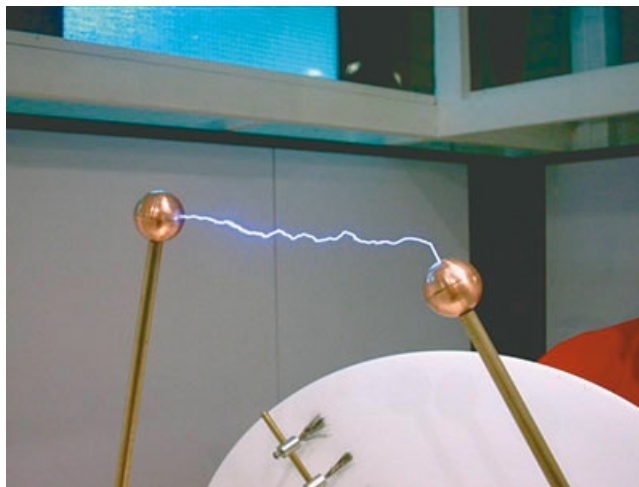


FIGURA I.9. *Chispa eléctrica generada por una máquina electrostática.*

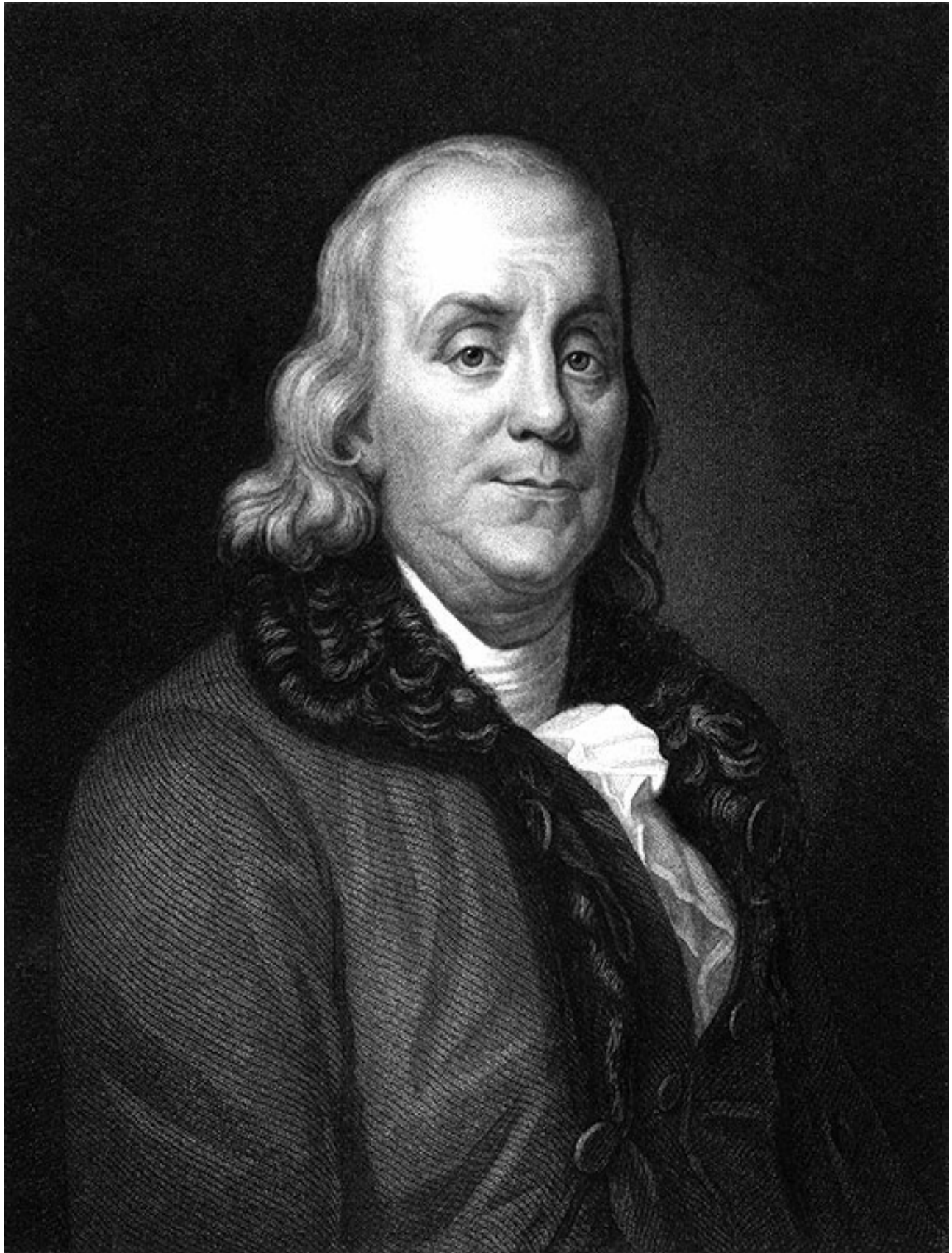


FIGURA I.10. *Benjamin Franklin (1706-1790). Imagen: Thinkstock/Hemera/Georgios Kollidas.*

Franklin tenía 40 años de edad cuando presenció en Boston algunos experimentos eléctricos efectuados torpemente por un individuo que utilizaba instrumentos y equipos traídos de Escocia. Entusiasmado con la novedad, los compró y de inmediato comenzó a servirse de ellos para repetir los experimentos que había visto y realizar además otros de su cosecha.

Lo malo era que continuamente se le llenaba la casa de gente deseosa de verlo repetir aquellos experimentos espectaculares, por lo cual decidió adiestrar a algunos amigos para que lo sustituyeran en las funciones de *showman* que lo reclamaban. Ebenezer Kinnersley, un vecino desempleado, le ayudó a montar un vistoso espectáculo eléctrico, con cobro por admisión. En su comentario sobre los éxitos de aquel hombre que había comenzado a vivir, literalmente, de la electricidad, Franklin escribió: “Sus conferencias tenían buena asistencia de público y daban gran satisfacción; y después de algún tiempo pasó por las colonias, presentándolas en cada ciudad capital, y recogió algún dinero. Por cierto que en las Indias Occidentales [las Antillas], los experimentos podían hacerse sólo con gran dificultad, debido a la humedad general del aire”.¹²

Ésta es una de las muy raras referencias de la época a los primeros pasos de la ciencia eléctrica en lugares que hoy se consideran del Tercer Mundo. Otra referencia, más rara aún, aparece en una carta remitida en 1748 a Franklin desde Jamaica por un monje rumano de la Iglesia ortodoxa griega, en la que éste pedía que le enviase algunos aparatos eléctricos a La Habana, desde donde planeaba continuar su viaje pasando por México, Manila, China, Persia y Turquía. Pero se ignora si recibió o no los aparatos pedidos.¹³

Por su parte, Franklin se dio a la tarea de estudiar a fondo los fenómenos eléctricos que en la actualidad se clasifican más específicamente como electrostáticos. Uno de ellos era el llamado “poder de las puntas”, fenómeno que si bien ya se conocía en aquel entonces, no se había estudiado en detalle ni se habían explorado sus posibles usos prácticos.

DEL PODER DE LAS PUNTAS AL PARARRAYOS

En una carta fechada el 27 de julio de 1750, Franklin había escrito a su amigo inglés Peter Collinson, que era miembro de la Real Sociedad de Londres: “Las puntas tienen la propiedad de atraer o expulsar el fluido eléctrico a distancias mayores de las que pueden hacerlo los cuerpos romos”. Así, un alfiler sujetado por la cabeza y con la punta puesta frente a un cuerpo electrizado le extraerá a éste su atmósfera (eléctrica) a una distancia de 30 cm; mientras que si le presentara la cabeza en lugar de la punta, no sucederá tal efecto (figura 1.11).¹⁴

A la luz de este experimento y otros similares que había realizado en 1749, Franklin se preguntaba si el conocimiento del poder de las puntas no podría utilizarse para

proteger casas, iglesias, barcos, etc., del rayo, [poniendo] en la parte más elevada de esas [estructuras], unas barras de hierro verticales aguzadas como una aguja y doradas para evitar que se oxiden, y [conectando el] pie de esas barras a un alambre que baje por el exterior del edificio hasta introducirse en la tierra, o que baje siguiendo una de las cuerdas y el costado de un buque hasta llegar al agua.¹⁵

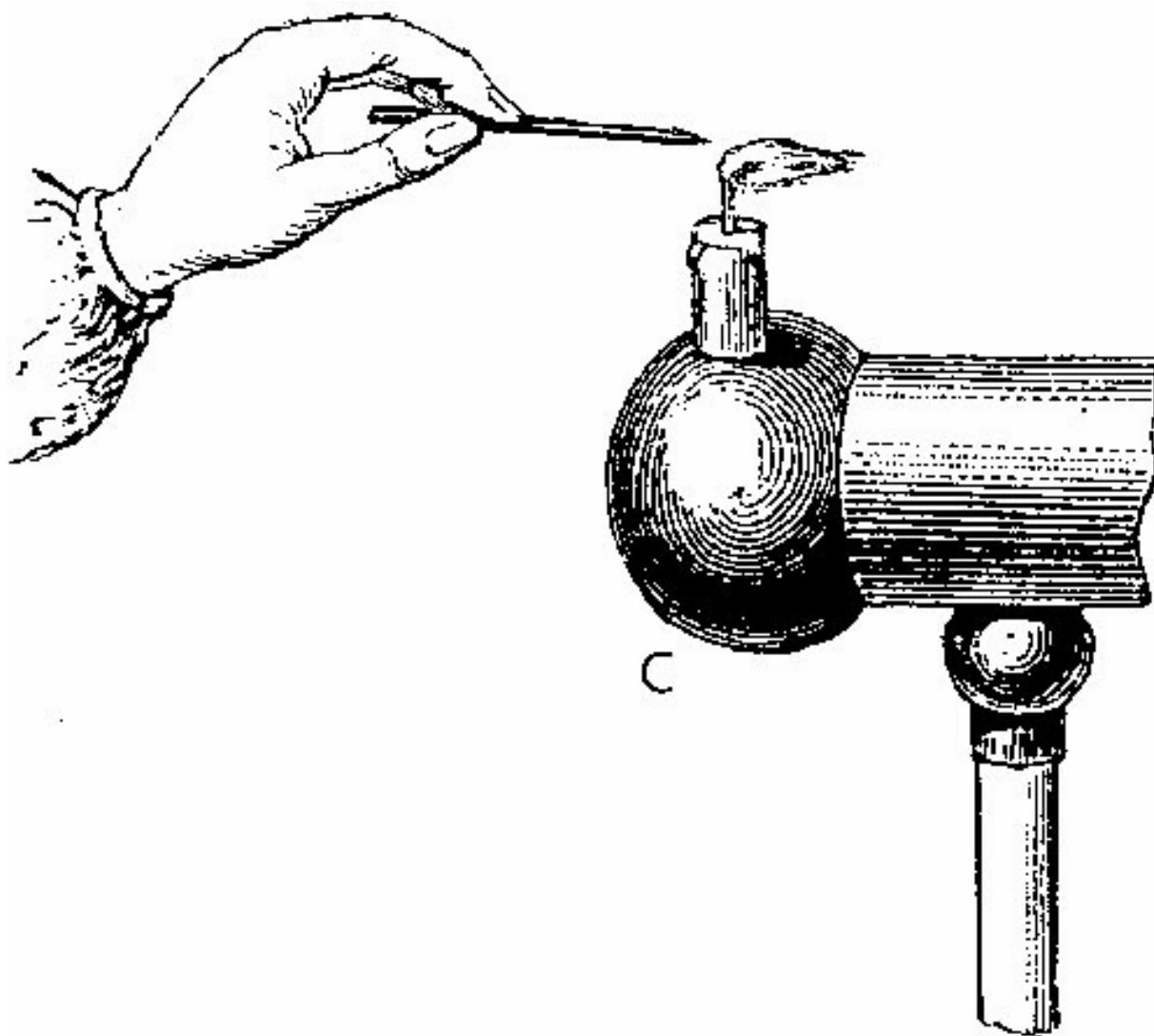


FIGURA I.11. Efecto del “viento eléctrico” producido por la punta de un objeto metálico sobre la flama de una vela adherida a un conductor (C) electrizado.

Si bien en esas líneas se brinda sucintamente una excelente descripción del dispositivo que hoy denominamos pararrayos, conviene recordar que Franklin no tenía muy claro el fundamento científico de su funcionamiento, como se desprende de las siguientes palabras, escritas a continuación de las que acaban de citarse: “¿No sería probable que estas barras puntiagudas extrajeran silenciosamente el fuego eléctrico de una nube antes de que fuese suficiente para golpear, y de esta manera nos salvaguardara de ése, el más súbito y terrible daño?”

El error aquí consiste en suponer que basta conectar a tierra una simple barra metálica puntiaguda dispuesta verticalmente para extraer de una nube de tormenta toda su carga eléctrica, o al menos una parte importante de ella, porque en realidad esa carga es muy grande y la nube se encuentra a demasiada altura como para que el pararrayos pueda hacerlo. Pero quedaba en pie el hecho decisivo, claramente enunciado por

Franklin, de que si un rayo tocaba el pararrayos, la descarga sería conducida a tierra por el conductor metálico sin afectar sensiblemente la estructura que se deseaba proteger.

Con todo, el asunto se mantenía en el terreno puramente especulativo, porque aún no se sabía a ciencia cierta si las nubes de tormenta donde se originaban los rayos estaban electrizadas o no. Para comprobar que sí lo estaban, Franklin propuso colocar verticalmente en lo alto de una torre o un campanario una lanza de hierro con la punta hacia arriba y su otro extremo apoyado en una banqueta bien aislada y situada dentro de una pequeña caseta para protegerla de la lluvia. En esas condiciones, el paso de una nube de tormenta relativamente baja sobre la caseta debía manifestarse dentro de ésta en forma de chispas eléctricas que saltaran entre la lanza y un objeto metálico conectado a tierra, situado por el experimentador en sus proximidades.

Estas ideas y otras, también vinculadas a la naturaleza eléctrica del rayo, estaban contenidas en unas cartas que Franklin dirigió a algunos de sus amigos y conocidos londinenses. Pero cuando se presentaron a la Real Sociedad, la gran mayoría de los expertos se rieron de ellas. Afortunadamente, también hubo quien se dio cuenta de su verdadero valor e insistió en que se publicaran. La primera edición de la colección de cartas de Franklin dirigidas a Collinson se publicó en Londres en 1751, en formato de libro, con adiciones del autor y un prólogo.

Mientras esto sucedía en Inglaterra, Franklin no se animaba a realizar su crucial experimento para determinar la presencia de electricidad en las nubes de tormenta, pues opinaba (equivocadamente) que no había en Filadelfia ninguna estructura lo suficientemente elevada para el caso. En vista de ello, organizó una rifa con el propósito de obtener los fondos necesarios para erigir la estructura que creía indispensable. Pero la demora causada por todo esto hizo que no fuera Franklin el primero en montar el dispositivo experimental que había ideado, sino el botánico y físico francés Thomas-François Dalibard, que se había aventurado a intentarlo inspirado en la lectura de la obra de Franklin, cuya traducción al francés había realizado antes él mismo (figura 1.12), instigado por su coterráneo, el conde de Buffon, eminente naturalista y popularizador de la ciencia.

Ex dono B. Nollet 1752
EXPÉRIENCES
ET
OBSERVATIONS
SUR
L'ÉLECTRICITÉ
FAITES
A PHILADELPHIE EN AMÉRIQUE
PAR
M. BENJAMIN FRANKLIN;
& communiquées dans plusieurs Lettres
à M. P. COLLINSON de la Société
Royale de Londres.
Traduites de l'Anglois.



A PARIS,
Chez DURAND, rue St. Jacques, au Griffon.

M. D. CC. LII.
Avec Approbation & Privilège du Roy.

FIGURA I.12. Página de un ejemplar (que perteneció a Nollet) del libro de Franklin traducido al francés en 1752.

En realidad, no fue Dalibard el primero que efectuó exitosamente el experimento, sino un viejo soldado de apellido Coiffier, a quien había dejado de guardia en espera de la aparición de una nube de tormenta. Tan pronto se presentó la primera, Coiffier corrió a la caseta y ejecutó la manipulación indicada, acción que le permitió obtener las anheladas chispas. Según Dalibard, acto seguido el improvisado experimentador

llamó a sus vecinos y mandó buscar al cura. Éste acudió a toda prisa; los parroquianos que vieron venir al cura corriendo creyeron que el pobre Coiffier había sido muerto por el rayo; la alarma se extendió en la aldea; el granizo no impidió que el rebaño siguiera a su pastor. El buen sacerdote se acercó a la máquina y sacó fuertes chispas.¹⁶

La experiencia se había efectuado en el pueblo de Marly-la-Ville, a cerca de 30 kilómetros de París, el 10 de mayo de 1752, entre las dos y las tres de la tarde (figura I.13).

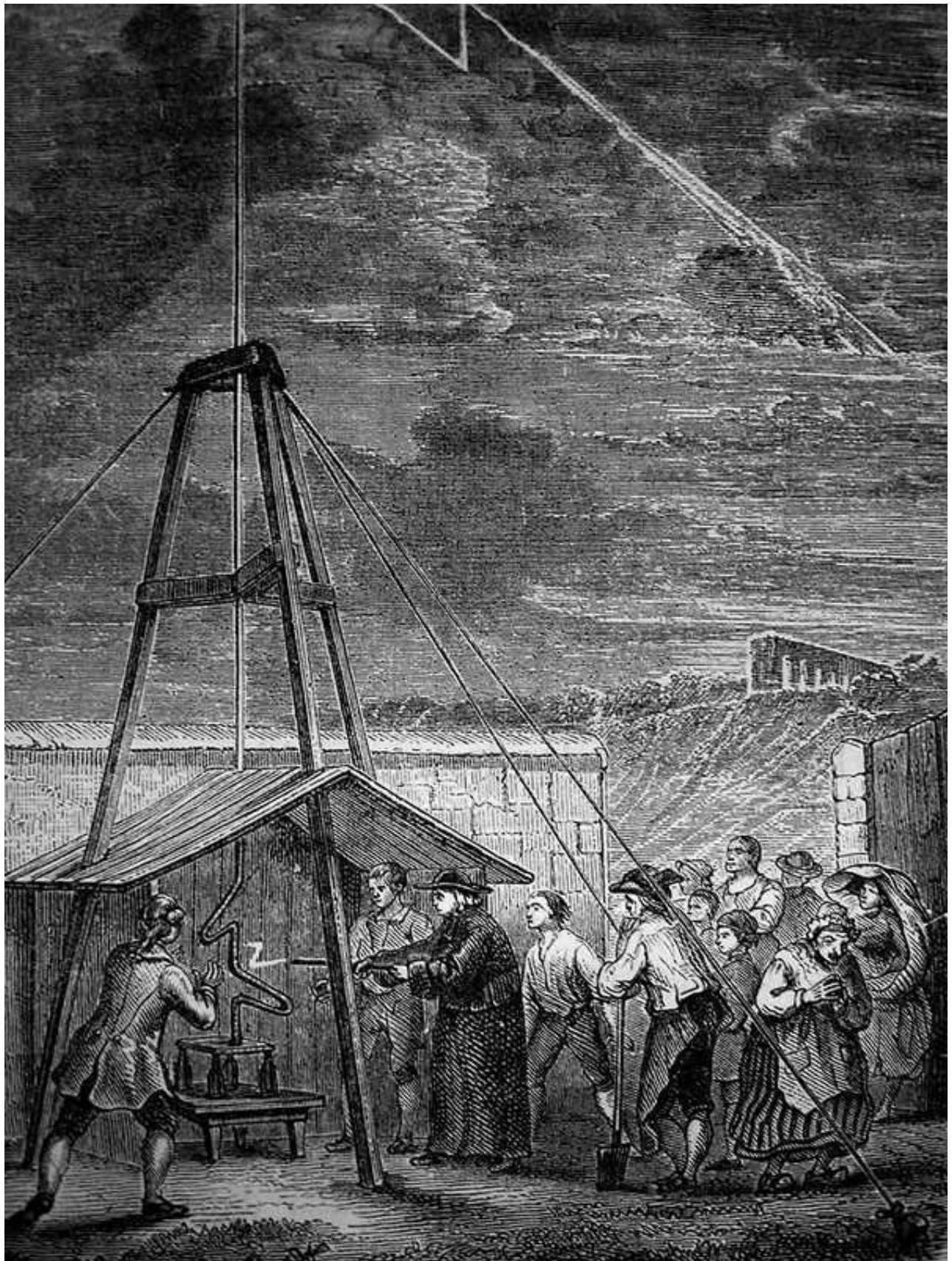


FIGURA I.13. Comprobación experimental de la electrización de las nubes de tormenta, el 10 de mayo de 1752, según un grabado antiguo.

Tres días después, Dalibard comunicó el acontecimiento a la Academia de Ciencias de Francia y reveló que se habían obtenido chispas azuladas hasta de casi 4 cm de largo, acompañadas de “la misma clase de conmociones que en los experimentos eléctricos comunes”, incluido su característico olor “sulfuroso” (que, seguramente, provenía del ozono producido y sus reacciones con otros componentes del aire). Poco después, Buffon y otro colega francés repitieron el experimento.

Mientras tanto, en Filadelfia, desconocedor de lo que habían logrado los franceses con sólo elevar la punta de la lanza a unos 12 metros sobre el terreno, Franklin no conseguía disponer de inmediato de un lugar lo suficientemente elevado como para realizar el experimento tal como lo tenía concebido, por lo que ideó un experimento alternativo, relativamente fácil de hacer, para demostrar la electrización de las nubes de tormenta.

Al efecto, fijó un alambre puntiagudo a un papalote o cometa, el extremo inferior de cuyo cordel de retención iba atado a su vez a una llave y a una cinta de seda (aisladora), cuyo otro extremo debía sujetarse firmemente en tierra, al abrigo de la lluvia (figura I.14). Al ver aproximarse una nube de tormenta, debía elevarse la cometa para que el alambre extrajera de ella el “fuego eléctrico”, que el cordel, mojado por la lluvia, conduciría hasta la llave, próxima al suelo. Franklin comprobó que ésta llegaba a electrizarse a tal punto que servía para efectuar todos los experimentos usualmente realizados “con un globo o un tubo de vidrio frotados, lo cual [demostraba] completamente la identidad de la materia eléctrica y la del rayo”. No se sabe a ciencia cierta la fecha de la primera realización de este famoso experimento, pero algunos calculan que fue en junio de 1752.¹⁷



FIGURA I.14. Benjamin Franklin, auxiliado por su hijo, realiza su famoso experimento del papalote para demostrar la electrización de las nubes de tormenta.

Comoquiera que haya sido, lo cierto es que en cuanto se enteraron del resultado del experimento sugerido por Franklin, y ejecutado en suelo francés, muchos investigadores europeos se dieron a la tarea de repetirlo.

Después de que Delor, un conocido *showman* parisiense de la electricidad, lo repitió ante el rey de Francia y su corte, “todos los curiosos de París se lanzaron a presenciarlo”, comentó el propio Franklin, que añadió en su autobiografía: “Mi libro se tradujo al italiano, al alemán y a las lenguas latinas; y la doctrina que contenía fue poco a poco adoptada universalmente por los filósofos de Europa, con preferencia a la del abate [Nollet], de modo que vivió para verse a sí mismo el último de su secta”.¹⁸



FIGURA I.15. El profesor Richmann fue fulminado por un rayo mientras intentaba repetir uno de los experimentos de Franklin. Imagen del libro *Électricité* de Max de Nansouty.

A reserva de volver enseguida sobre las ideas de Nollet, conviene señalar aquí que, en general, la realización de experimentos como el descrito o similares era muy peligrosa. Así lo evidencia el hecho de que al tratar de repetir uno de ellos en San Petersburgo, en agosto de 1753, el profesor Georg Richmann perdió la vida cuando su dispositivo, que no estaba conectado a tierra, fue alcanzado por un rayo (figura 1.15). Por esta razón, se le considera el primer mártir de la ciencia eléctrica. “No les es dado a todos los investigadores de la electricidad morir de una manera tan gloriosa como el justamente envidiado Richmann”, escribió en la historia de la electricidad que publicó en 1767 el químico, filósofo y teólogo inglés Joseph Priestley.

Aunque recordado muy raras veces, otro ejemplo significativo de la peligrosidad de los primeros experimentos sobre la electricidad atmosférica es uno que realizó en la antigua Nueva España el eminente hombre de ciencia y polígrafo mexicano José Antonio Alzate, al que éste alude como sigue en una nota publicada en febrero de 1790:

No obstante de que para el uso del cometa ó papelote eléctrico usé de todas las precauciones advertidas por los sábios electricistas en mi último experimento, que no reiteraré, me vi en los umbrales de la muerte, y aun conservo, y conservaré para el resto de mis días, cierta debilidad en el pecho, causada por la explosión eléctrica. Noticia que comunico para que sirva de precaucion á los que intenten reiterar semejantes experimentos *[sic]*.¹⁹

En el mismo artículo al que pertenece esta información Alzate invita al lector a ver el pararrayos construido por él, cuyos detalles prácticos presenta en un artículo posterior; entre ellos, la advertencia contra el uso de cadenas como bajantes.²⁰ Todo indica que él fue el primero que instaló un pararrayos en México (1768).²¹

EL PARARRAYOS DOMINA LAS ALTURAS Y LA IMAGINACIÓN

Los primeros pararrayos que, a partir de 1752, se instalaron en la ciudad de Filadelfia, recibieron su bautismo de fuego cuando cayó un rayo en uno instalado en la tienda de un comerciante local sin dañar la casa. Pero hubo de pasar cierto tiempo antes de que el nuevo invento fuese aceptado universalmente. La oposición tenía distintos orígenes. Algunos hombres de ciencia, como el abate Nollet, sostenían que las “varillas de Franklin” (figura I.16), lejos de tener una función protectora atraerían los rayos sobre los edificios en que se emplazaran, mientras que la gente supersticiosa proclamaba que no debían instalarse pararrayos para evitar interferencias con la ira divina.

Gradualmente, las objeciones de Nollet perdieron fuerza y se impuso el “franklinismo”, como lo indican las últimas palabras de Franklin citadas anteriormente. Pero el anecdotario de las prevenciones supersticiosas no deja de tener gracia, mirado con los ojos actuales. Así, por ejemplo, en la América del Norte protestante de inmediato surgieron voces contra la instalación de pararrayos, considerada por muchos un acto de presunción o soberbia humana que pretendía alzarse contra la ira de Dios. Nada de extraño tiene, pues, la advertencia de que “el tratar de protegerse del rayo no puede considerarse un acto de soberbia ni es incompatible con ninguno de los principios de la religión natural o revelada”,²² tal como aparece en el anuncio impreso de una conferencia sobre los fenómenos eléctricos y el pararrayos que, en abril de 1753, iba a impartir Kinnersley —el amigo de Franklin ya mencionado— en la isla caribeña de Antigua.

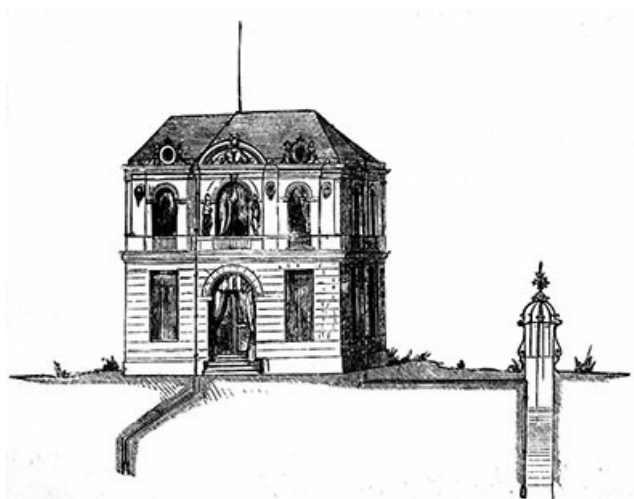


FIGURA I.16. Casa provista de un pararrayos de Franklin.

Entre las objeciones infundadas que se hicieron en aquel tiempo al franklinismo destaca la del reverendo Thomas Prince, para quien el terremoto que sacudió a Massachusetts en 1755 había sido causado por la alteración del equilibrio eléctrico de la tierra originado por la instalación de pararrayos. Este punto de vista fue refutado con argumentos científicos por el profesor John Winthrop, de la Universidad de Harvard.

John Adams, quien había de ser el segundo presidente de los Estados Unidos, anotó al margen de una de las páginas de su ejemplar del libro, publicado en 1755, que recogía las conferencias de Winthrop sobre el tema:

He oído decir a algunas personas del más elevado rango entre nosotros, que pensaban que la erección de puntas de hierro era un intento impío de robarle el trueno al Todopoderoso, de arrebatarse de la mano el rayo de la venganza; y a otras, que el trueno fue diseñado como [un medio de] ejecución de criminales al que ningún mortal puede sobrevivir.²³

En los países católicos de Europa la reacción popular ante la instalación de pararrayos fue similar. Por ejemplo, en 1776 se reunió en la ciudad francesa de Dijon una turba que reclamaba echar abajo los “conductores heréticos”, y sólo desistió de hacerlo cuando el secretario de la Academia de Ciencias local aseguró que las puntas doradas de las varillas de Franklin habían sido enviadas expresamente por el papa. En la misma época se produjo una reacción popular análoga en la ciudad italiana de Siena, cuando se decidió instalar un pararrayos en la catedral de la ciudad, que había sido averiada repetidamente por descargas eléctricas atmosféricas. Curiosamente, la instalación que se realizó no tardó en acreditar su eficacia, pues poco después de concluida la alcanzó una potente descarga sin que la edificación sufriera el menor daño.

Aunque cada vez con menos fuerza, los prejuicios persistían. Curioso ejemplo de ello fue la acusación de blasfemo que el alcalde del pueblo francés de Saint-Omer presentó en 1783 ante la justicia local contra el aristocrático propietario de una mansión por haber instalado en ella un pararrayos terminado en una espada. Luego de tres vistas, el tribunal absolvió al acusado en atención a las elocuentes razones alegadas por la defensa, entre ellas, la siguiente declaración de principios:

Las Artes y las Ciencias son el más rico presente que el Cielo les ha hecho a los hombres; ¿por qué fatalidad han tenido, pues, tantos obstáculos para establecerse sobre la tierra? [...] ¿Creeremos que el Todopoderoso tenga necesidad de este meteoro que nos atemoriza, y que sin él su brazo desarmado no nos puede alcanzar? ¿Creeremos que las nubes sean sus arsenales; que, semejante a esos dioses que produce la imaginación de los poetas [...] lanza el trueno cuando se irrita? [...] Desterremos esos vanos terrores [y] no creamos que el Cielo se irrita por los esfuerzos que hacemos para aliviarlos. No nos hagamos más desgraciados de lo que Él mismo ha querido; por el contrario, agradezcámosle su bondad, que nos ha inspirado la idea de sustraernos a un azote, tanto tiempo funesto para la humanidad: bendigamos a la Providencia benefactora que [...] nos presenta hoy conductores eléctricos para sustraernos a los estragos del rayo.²⁴



FIGURA I.17. Vista de la plaza veneciana de San Marcos. La elevada torre es el campanile, alcanzado por descargas eléctricas atmosféricas en numerosas ocasiones. Imagen: [iStock.com/sborisov](https://www.iStock.com/sborisov).

Quien expuso esos argumentos en aquel entonces era un oscuro abogado de provincia, que luego había de transformarse en el tan célebre como temido “incorruptible” de la Revolución francesa: Maximilien Robespierre.

Ciertamente, la eficacia del pararrayos se acreditó a lo largo del siglo XVIII gracias, sobre todo, a la fuerza de los hechos ejemplificada en varios casos notables. Uno particularmente impresionante fue el del famoso *campanile* (campanario) de la catedral veneciana de San Marcos (figura I.17). En 1388, cuando aún era una estructura de madera, fue casi destruido por un rayo; reparado e incluso reconstruido una y otra vez a lo largo de los años, por la misma causa quedó reducido a cenizas en 1417 y 1489, y recibió daños de consideración en 1548, 1565, 1653, 1745, 1761 y 1762. Pero desde que se le instaló un pararrayos, en 1766, dejaron de dañarlo gravemente las descargas eléctricas atmosféricas. Otro ejemplo convincente fue el caso de la iglesia neerlandesa de Nueva York, destruida en parte por un rayo en 1750 y gravemente dañada por otra descarga en 1763, que no volvió a sufrir estragos por la misma causa después de que se la protegió con una varilla de Franklin en 1765.²⁵

Surgieron argumentos adicionales a favor del uso del pararrayos cuando pudo explicarse racionalmente la hasta entonces desconcertante inmunidad a los efectos de las

descargas atmosféricas exhibida por algunas estructuras notables, como la catedral de Ginebra, que a lo largo de tres siglos nunca había sido dañada por el “fuego del cielo”, contrariamente a lo que le ocurría con cierta frecuencia a la vecina iglesia de Saint Gervais, pese a su menor altura. La explicación científica de tan singular comportamiento la halló en 1771 el naturalista y físico suizo Horace-Bénédict de Saussure en el hecho de que la torre central de la edificación, que era de madera, estaba totalmente recubierta de planchas de hierro soldadas unas a otras con estaño y unidas metálicamente a tierra.²⁶

Un ejemplo parecido lo suministraba el monumento al gran incendio de Londres de 1666, que tenía una altura de más de 60 metros. Inaugurado 11 años después del desastre, jamás había sido dañado por descargas atmosféricas, al contrario de lo que, a causa de éstas, solía ocurrirles a las iglesias cercanas. No fue difícil hallar una explicación científica del caso en el hecho de que el monumento estaba coronado por placas metálicas terminadas en punta (en representación de las llamas del fuego), adosadas a barras de hierro que a su vez sostenían la escalerilla interior, también de hierro, cuyos elementos estructurales se encontraban anclados al suelo.²⁷

Seguramente inspirado en argumentos parecidos, en 1783 un orientalista alemán llegó a la conclusión de que el legendario templo de Salomón, en Jerusalén, estaba protegido por un eficaz sistema de pararrayos. Fundamentaba su conjetura, por una parte, en que ningún documento antiguo registraba que la edificación hubiese sido dañada por un rayo jamás en 10 siglos, y por otra parte, en que, según el historiador Josefo, el domo del templo estaba revestido de una cubierta compuesta de placas metálicas erizadas de largos pinchos de hierro (para evitar que las aves se posaran en el techo y lo ensuciaran con sus excrementos) desde donde el agua de lluvia caída era conducida mediante tubos, también de hierro, a las cisternas del mismo metal enterradas en los patios. Ni qué decir referente a que una interpretación de este tipo es más que controvertible, pues se apoya en antiguos textos de dudosa confiabilidad.²⁸

En cualquier caso, desde mediados del siglo XVIII la instalación de pararrayos se extendió paulatinamente por todas partes. En 1782 se habían instalado varillas protectoras en 400 de las 4 800 casas con las que contaba entonces Filadelfia, donde cinco años antes la propia residencia del inventor había sido alcanzada por una descarga atmosférica, sin causar más daño que haber fundido la punta del pararrayos. En aquella ocasión comentó Franklin: “Con el tiempo, la invención ha sido de alguna utilidad para el inventor”, una irónica alusión, quizás, al hecho de haber rehusado solicitar en su momento una patente que le hubiera producido considerables ingresos.²⁹

En 1754 el ilustrado sacerdote Prokop Diviš, cura de un pequeño pueblo moravo a unos 50 kilómetros de la ciudad de Brno, había instalado en su casa un dispositivo diseñado por él, que probablemente fue el primer pararrayos que entró en

funcionamiento en Europa.³⁰

La varilla de Franklin no llegó a Inglaterra sino hasta 1760, cuando se instaló una en el nuevo faro de Eddystone, erigido para sustituir al anterior de madera, que una descarga atmosférica había incendiado. En 1768 se instaló en Hamburgo el primer pararrayos de la región alemana, pero no fue sino hasta 1773 cuando se hizo lo mismo en Francia, para proteger el edificio de la Academia de Ciencias de Dijon, donde posteriormente se produjo el episodio de rechazo al que nos referimos anteriormente.³¹

El temor a que los pararrayos atrajeran las descargas eléctricas y por ello hicieran más mal que bien, como sostenía Nollet, retardó considerablemente su difusión en suelo francés. Con base en la misma presunción, la Compañía de las Indias Orientales (neerlandesa) ordenó eliminar el sistema de pararrayos que se había instalado para proteger un polvorín de su propiedad en la isla de Sumatra, con el resultado de que poco después, en 1782, le cayó un rayo que hizo estallar los 400 barriles de pólvora guardados allí.³²

A propósito del tema de los polvorines, no está de más recordar el caso, comentado al principio, de los considerables daños que en 1741 ocasionó en los inmuebles de la ciudad el estallido de la santabárbara del buque de guerra *Invencible*, como consecuencia de haber sido alcanzado éste por un rayo en la bahía habanera. Pero aquello fue insignificante en comparación con el estallido de las 100 toneladas de pólvora almacenadas en las cámaras subterráneas de la iglesia de San Nazario, en la ciudad italiana de Brescia, que en 1769 ocasionó la muerte de 3 000 habitantes y la destrucción de la sexta parte de la ciudad.³³ En general, merece atención especial el hecho de que las altas torres de las iglesias cuyas criptas solían usarse para guardar explosivos en el siglo XVIII, y aún en el XIX, al igual que los elevados mástiles de los antiguos buques de guerra, resultaban particularmente peligrosos durante las tormentas si no se protegían con sistemas de pararrayos adecuados.



FIGURA I.18. La dama parisina porta un sombrero pararrayos con cadena al piso, mientras que el caballero de la derecha se cubre con un paraguas pararrayos. Éste resultaba particularmente

peligroso, no sólo porque su punta se elevaba por encima de la multitud, sino por el pobre contacto del bajante con el suelo. Imágenes: Figuiet, Les Merveilles de la science.



Con el tiempo, no sólo se generalizó la instalación de pararrayos en los edificios de toda Europa, sino que se puso de moda su uso con carácter “personal”, inspirado quizás en una explicación deficiente de cierto episodio curioso que se afirmaba había sucedido en las Islas Británicas. Se contaba, en efecto, que una dama inglesa contemplaba una tormenta desde una ventana cuando cayó un rayo, cuyo único efecto fue reducir a cenizas la cofia con la que la señora cubría su cabeza. Cierta viajero de apellido Brydone creyó encontrar una explicación al hecho suponiendo que el alambre utilizado para mantener la forma de la cofia y sujetar sus partes blandas había atraído la descarga eléctrica, conclusión de la que extrajo la siguiente recomendación: “Que todas las damas deberían traer consigo una pequeña cadena o hilo de alambre de latón y, durante una tormenta, colgarla de los alambres de su sombrero, con lo cual la materia fulminante pudiera pasar a la tierra, en lugar de atravesar la cabeza y otros miembros”.³⁴

Inspiradas o no en semejante consejo, hacia 1788 no faltaron damas parisinas de alcurnia que incluyeran en su indumentaria un *chapeau-paratonnerre* (“sombrero pararrayos”) con un alambre en el borde, puesto a tierra por medio de una cadenita metálica colgante. Una variante posterior de la misma idea fue la peligrosa invención — atribuida a cierto amigo francés de Franklin— de un pararrayos portátil montado sobre un paraguas (figura I.18).

Entonces hacía ya tiempo que en América del Norte y Europa se había difundido considerablemente el uso del pararrayos de Franklin, a tal extremo que en una carta de 1772 dirigida al matemático, físico y filósofo D’Alembert, escrita desde el pueblecito francés de Ferney, a seis o siete kilómetros de Ginebra, el agudo Voltaire comentaba con sorna: “Os anuncio como novedad que aquí nos burlamos del rayo, que los pararrayos se han puesto tan a la moda como las píldoras de Kaiser.”³⁵

Cayó un Rayo Sobre un Par de Huevos Fritos

Por Prensa Unida Internacional

GUADALAJARA, España, septiembre 23.
—En la localidad de Centaloja, un rayo entró en la casa del vecino Gregorio Redondo por una ventana de la cámara en el momento en que iba el dueño a cerrarla, dejándolo tendido en el suelo sin conocimiento.

La chispa eléctrica atravesó la casa, penetró en otra, donde mató un borrico, y llegó a otra contigua, donde un vecino, que estaba desayunando un par de huevos fritos, vio con asombro y estupor que los huevos empezaron a arder, sin que él sufriera daño alguno.

FIGURA I.19. Copia facsimilar de una noticia sobre el curioso comportamiento de un rayo,

publicada en un periódico de septiembre de 1958.

En esto de burlarse del rayo, seguramente que Voltaire habría disfrutado muchísimo la lectura de la noticia sobre el curioso comportamiento de cierto rayo que casi dos siglos después reseñaron los periódicos, tal como se reproduce en la figura I.19.

LA POLÉMICA DE LAS PUNTAS

Pese a lo que parece sugerir el mordaz comentario de Voltaire, todavía había de transcurrir cierto tiempo antes de que resultara derrotada definitivamente la oposición al franklinismo de algunos científicos de la época. Así, por ejemplo, aunque fue perdiendo crédito el argumento original del abate Nollet en el sentido de que las varillas de Franklin atraerían los rayos sobre las construcciones, apenas dos años después del fallecimiento de su propugnador, el investigador inglés de la electricidad Benjamin Wilson echó a rodar una variante de aquella idea, que arraigó particularmente en Gran Bretaña.

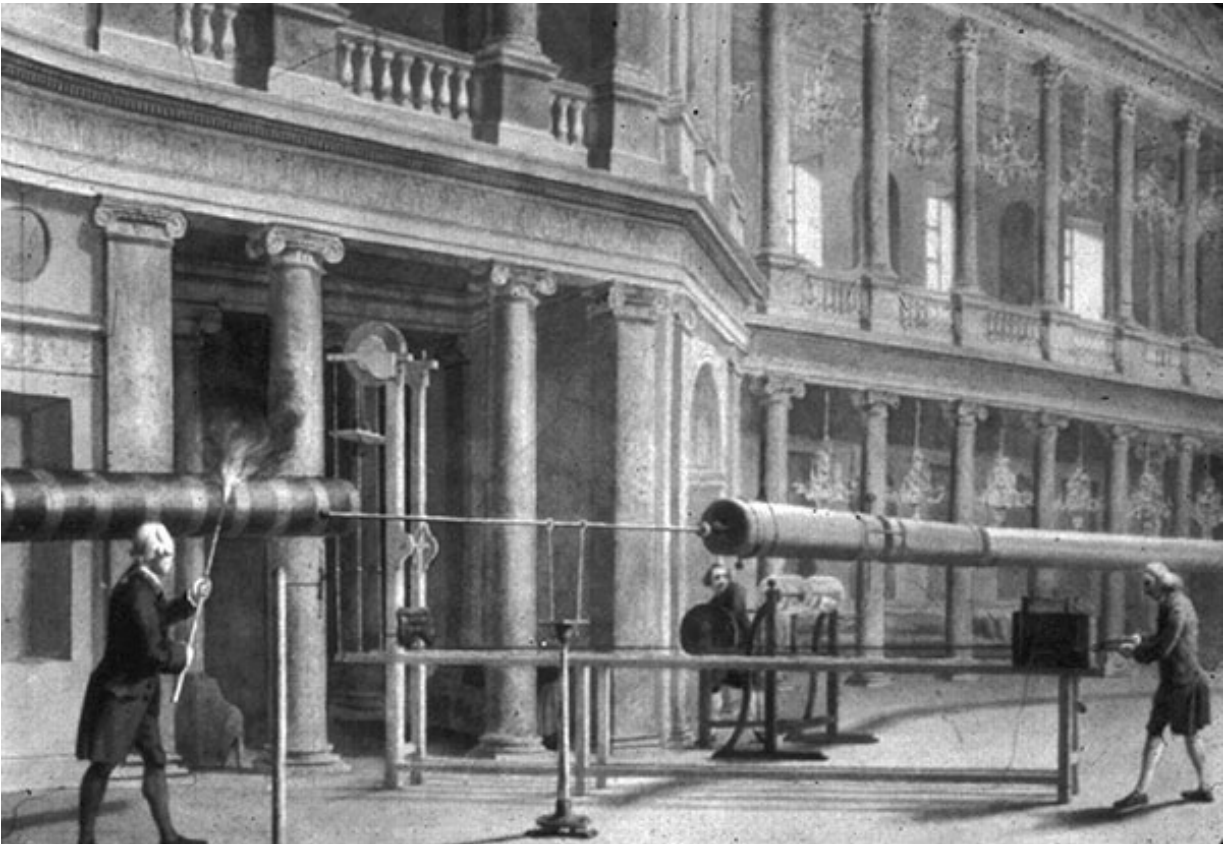


FIGURA I.20. Experimento de Benjamin Wilson, realizado con el objeto de demostrar la superioridad de los pararrayos terminados en bola sobre los puntiagudos.

Según aquella variante, para que un pararrayos tuviera carácter “defensivo” debía terminar en una bola metálica y no en una punta, porque ésta, según Wilson, lo convertiría en un dispositivo “ofensivo”, término con el que quería significar que el pararrayos puntiagudo tendería a provocar o atraer a los rayos.

En 1777 un rayo dañó ligeramente un polvorín británico cercano a Londres, al cual se le había instalado poco antes un pararrayos de Franklin. De inmediato, Wilson aprovechó la coyuntura para promover sus ideas contrarias a las terminaciones en punta, favorecidas, en cambio, por otros hombres de ciencia británicos, como Cavendish, Watson, Nairne y Robertson.³⁶ Al efecto, se dio a la tarea de realizar experimentos públicos que parecían darle la razón. En uno de ellos empleaba una maqueta del polvorín afectado, sobre el cual pendían a cierta altura unos cilindros móviles muy grandes que cargaba eléctricamente para simular el efecto de las nubes de tormenta (figura 1.20).³⁷

Luego de presenciar los experimentos, el rey Jorge III mandó sustituir por bolas de cobre las puntas de los pararrayos instalados en el palacio de Buckingham, seguramente atraído no sólo por los resultados experimentales de Wilson sino también por la influencia de éste en la corte, donde no se ocultaba para expresar su criterio acerca de que a Franklin no debía considerársele ya un súbdito británico porque se estaba “convirtiendo en uno de los jefes de la Revolución [de las colonias norteamericanas]”. Los siguientes intentos de la Corona por politizar el asunto hallaron, sin embargo, la resistencia de los principales científicos británicos de la época, al extremo de que, ante la disyuntiva de tener que tomar partido, el presidente de la Real Sociedad renunció al cargo por considerar que las prerrogativas reales “no se [extendían] a alterar las leyes de la naturaleza”.³⁸

En realidad, el hecho de que en un laboratorio ordinario pueda demostrarse, como lo hizo Wilson, que las chispas que saltan de un cuerpo cargado eléctricamente lo hacen preferentemente a un electrodo terminado en punta en lugar de hacerlo a otro romo o terminado en bola, es menos relevante de lo que pudiera parecer a primera vista, puesto que, a la distancia que se encuentra un pararrayos de una nube de tormenta real, es de suponer que carece de importancia que el extremo libre del dispositivo tenga una forma u otra. Este argumento pareció zanjar la discusión hasta los últimos años del siglo XX, cuando aparecieron evidencias experimentales de cierto peso en el sentido de que las varillas romas resultaban algo más eficaces que las puntiagudas o las terminadas en bola, lo cual podía explicarse por las características de la situación eléctrica producida en el entorno inmediato del extremo libre de las varillas. Como resultado, la tendencia actual es instalar varillas terminadas en punta roma, si bien las regulaciones vigentes se abstienen de tomar partido en el asunto.³⁹

A fin de cuentas, poco a poco se impusieron las ideas fundamentales de Franklin, al menos en esencia, puesto que con el progreso de la investigación científica se fue comprendiendo cada vez mejor el fenómeno del rayo y se elaboraron métodos cada vez más eficaces para la protección contra sus efectos destructivos, como se verá en los próximos capítulos.

II. La atmósfera electrizada

Si cuanta cosa se mueve continúa moviéndose a lo largo de la línea de su comienzo, ¿qué es lo que hace que el movimiento de la flecha del rayo se desvíe bruscamente y se tuerza en tantas direcciones mientras aún se encuentra en el aire? [Una posible explicación sería] que al ser comprimido ante la furia de su llegada, el aire le oponga resistencia y esto haga que se desvíe el movimiento. [O pudiera ser] que la sustancia del rayo se descargara ora a la derecha, ora a la izquierda, ora hacia arriba, ora hacia abajo, actuando de la misma manera que lo hace la chispa que salta del carbón encendido.

LEONARDO DA VINCI, *Notas*

La atmósfera terrestre —la capa que cubre la superficie de nuestro planeta— se compone esencialmente de una mezcla de gases (78% de nitrógeno, 21% de oxígeno, 1% de otros gases) y de pequeñísimas partículas sólidas y líquidas en suspensión, en forma tal que 99% de la masa atmosférica se concentra por debajo de unos 30 kilómetros de altura sobre el nivel del mar. Entre los 80 y los 325 kilómetros existe una región no sólo muy enrarecida sino también fuertemente ionizada por la radiación solar,¹ denominada *ionosfera*, cuya existencia (postulada por A. E. Kennelly y O. Heaviside a comienzos del siglo XX) permitía explicar el inesperado alcance intercontinental de las señales radioeléctricas emitidas en unos famosos experimentos que realizó Marconi en 1901. Se calcula en alrededor de 300 000 voltios el valor promedio de la tensión eléctrica existente entre el límite inferior de la ionosfera y la superficie terrestre, en ausencia de lluvia y otros fenómenos meteorológicos.²

Un médico y botánico francés apellidado Le Monnier fue quizás el primero en observar, a mediados de 1752, que podían producirse manifestaciones eléctricas en la atmósfera, incluso en ausencia de relámpagos, truenos o nubes de tormenta. Esta conclusión, que al principio no se consideró convincente, resultó confirmada meses después en el curso de un experimento similar al célebre de Franklin, realizado

independientemente por el magistrado francés De Romas, un apasionado de las ciencias físicas, que utilizaba una enorme cometa en sus experimentos. Otro experimentador aficionado, un príncipe ruso de la casa Golitsin, quien a partir de 1775 se había dado a la tarea de estudiar cuidadosamente la electricidad atmosférica, confirmó que la atmósfera presentaba siempre algún grado de electrización, cualquiera que fuese el estado del tiempo.³

Investigaciones posteriores realizadas por el físico escocés Charles T. R. Wilson hacia 1920 pusieron de manifiesto que, en condiciones normales (sin lluvia, nubes de tormenta, etc.), la intensidad del campo eléctrico a nivel del suelo varía con la hora local y se comporta como si la tierra estuviese cargada *negativamente*,⁴ de suerte que una carga eléctrica puntiforme colocada a una cierta altura sobre la superficie terrestre, es atraída hacia ésta si es positiva, y repelida si es negativa. Pero tal estado de cosas, prevaleciente bajo un cielo despejado, experimenta un cambio drástico cuando hay nubes de tormenta sobre el lugar; y no sólo esto, sino que la intensidad del campo eléctrico a nivel del mar, que tiene un valor promedio de alrededor de 130 V/m en condiciones normales,⁵ en tiempo borrascoso suele llegar a unos 10 000 V/m en las llanuras y a 25 000 V/m en lo alto de una montaña, como el Pic du Midi de los Pirineos franceses, que tiene una altura de unos 2 880 metros.⁶ Lo anterior no obsta para que, durante una tormenta, la intensidad del campo eléctrico fluctúe violentamente y pueda tomar valores mucho mayores (por ejemplo, de un millón de voltios por metro) en los instantes que preceden inmediatamente a la caída de un rayo.

EL FUEGO DE SAN TELMO

Cuando, por alguna razón, la intensidad del campo eléctrico alcanza un valor de unos 100 000 V/m en la vecindad de un objeto, puede producirse en torno a éste una luminosidad especial, bien conocida desde los tiempos más remotos, pero cuyo origen permaneció en el misterio hasta que, en 1749, Benjamin Franklin puso de manifiesto el carácter puramente eléctrico que tiene en realidad.

Sucedía a veces, por ejemplo, que poco antes de una tormenta, durante la misma o en su fase final, aparecían, en la punta de los mástiles y otros palos de los antiguos barcos de vela, llamativos penachos luminosos blancoazulados semejantes a pequeñas lenguas de fuego, acompañados por un zumbido característico, y que, sin embargo, no quemaban. En general, el efecto solía presentarse preferentemente en objetos que eran buenos conductores de la electricidad con puntas o bordes afilados.

En torno a aquel fenómeno meteorológico, que ya en nuestra era recibió la denominación de “fuego de San Telmo” (referida al santo patrón de los marinos; véase la figura II.1), se desarrollaron las más extrañas supersticiones. A título de ejemplo, vale la pena recordar un curioso episodio ocurrido a bordo de la carabela en la que Cristóbal Colón viajaba por segunda vez hacia el Nuevo Mundo, la noche del 26 de octubre de 1493, relatado por un hijo del almirante en los siguientes términos:

Se vio el cuerpo de san Telmo, con siete velas [penachos] encendidas, encima de la gavia, con mucha lluvia y espantosos truenos; quiero decir, que se veían las luces que los marineros afirman ser el cuerpo de san Telmo, y le cantan muchas letanías y oraciones, teniendo por cierto que en las tormentas donde se aparezca, nadie puede peligrar.⁷

De aquí el uso popular español de la frase “aparecerse con san Telmo en la gavia”, para indicar que alguien se presenta de repente o pasado el peligro.

Muchos siglos atrás, los marinos griegos y romanos de la Antigüedad solían considerar de buen augurio el mismo fenómeno cuando éste se presentaba en sus naves en forma de dos penachos luminosos, que identificaban con los gemelos Cástor y Pólux, deidades mitológicas protectoras de marinos y guerreros. Pero cuando aparecía un solo penacho lo consideraban señal de mal agüero y lo identificaban con Helena, la hermana de los gemelos.

En los textos antiguos puede reconocerse la presencia del mismo tipo de luminosidad, asociada a las situaciones más variadas. He aquí cómo se la describe en una crónica de la campaña de Julio César en África: “A cosa de las nueve de la noche se levantó una gran tempestad de agua mezclada con granizo [y] andaban los soldados

dispersos y aturdidos por el campo, cubriendo las cabezas con los escudos. Esa misma noche se vieron arder en vivo fuego las puntas de las picas de la quinta legión”.⁸

No falta quien interprete como una manifestación del mismo fenómeno físico el conocido episodio que en el libro del Éxodo de la Biblia hebrea se relata en los siguientes términos: “El ángel del Señor se le apareció [a Moisés] en una llama de fuego, en medio de una zarza. Moisés se fijó bien y se dio cuenta de que la zarza ardía con el fuego, pero no se consumía”.⁹



FIGURA II.1. *Fuego de san Telmo en la arboladura de un buque. Imagen: © 2014-2017 AshleyKerins, deviantart.com.*

Se ha descrito la aparición de efectos luminosos similares en las cumbres de las montañas, los remates en punta y bordes afilados de los edificios, las partes salientes de los aviones, la punta de los cuernos del ganado e incluso la punta de los dedos de las personas.

A propósito del mismo fenómeno, resulta particularmente interesante el comentario de Michael Faraday al relato de un sobrino de su esposa, en el que éste describía cómo había estado a punto de ser alcanzado por un rayo caído muy cerca de él:

Envidio tu tormentoso paseo nocturno —le escribió el genial experimentador inglés—, y pienso que de haber estado juntos habríamos podido hacer algunas observaciones muy interesantes. No pongo en duda nada de tu descripción, y pienso que las manifestaciones sibilantes y luminosas que viste eran las preparaciones naturales y precursoras de la descarga [eléctrica] que ocurrió inmediatamente después. ¿Observaste alguna manifestación luminosa sobre ti mismo? No dudo que si hubieras extendido la mano, habría aparecido una luz en la punta de cada dedo. Quizás, sin embargo, fue mejor que no lo hicieras [pues] no creo que tu situación careciera de peligro y estoy muy contento de que escaparas, para consuelo de tus padres y familia.¹⁰

Obsérvese que en todas las situaciones que acaban de reseñarse los fenómenos espectaculares descritos se manifiestan a partir de objetos más o menos puntiagudos y filosos cuando la electrización atmosférica es particularmente elevada, puesto que un objeto así puede entonces ionizar intensamente el aire circundante y producir efectos luminosos y sonoros llamativos.

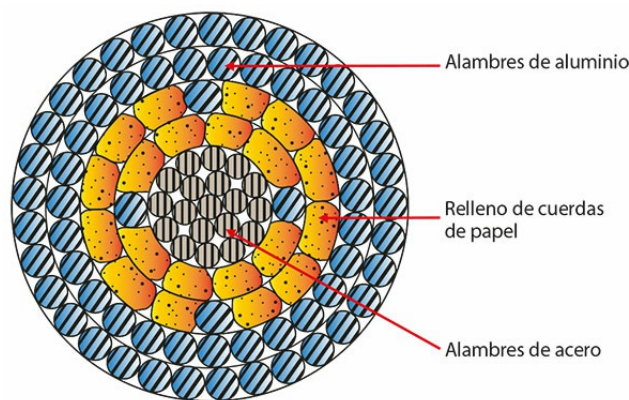


FIGURA II.2. Sección transversal de un conductor utilizado en líneas de muy alta tensión para reducir el efecto corona.

Que, al margen de cualquier explicación científica, hubo en el pasado remoto quien no sólo se percató de la correlación existente entre la aparición de dichos efectos y la presencia de una atmósfera tormentosa, sino que extrajo de ello conclusiones muy prácticas, es algo que se deduce del método que, quizás desde el siglo XVI, se utilizaba en el castillo de Duino, junto a la costa del mar Adriático, para detectar la proximidad de una tormenta eléctrica. El *modus operandi* consistía en que cada vez que el centinela de

guardia viera acercarse nubes sospechosas, debía aproximar el filo de su alabarda a la punta de hierro de una pica con su mango de madera hincado en el suelo. Si al hacerlo saltaban chispas o se producían efluvios luminosos entre aquel filo y la punta de la pica, el guardia debía hacer sonar una campana para alertar de la inminencia de una tormenta a los campesinos y pescadores de la zona.¹¹

Hoy se conciben los fenómenos que acabamos de referir como manifestaciones particulares de lo que se conoce en física como *efecto corona*, que también suele presentarse en las líneas eléctricas de muy alta tensión (por el fuerte campo eléctrico que producen en torno a ellas), ya sea como una luminosidad uniforme o en forma de penachos luminosos allí donde existen rugosidades o irregularidades menores de las líneas. Comoquiera que dicho efecto da lugar a pérdidas de transmisión adicionales y también produce ruido eléctrico en los sistemas de radio y televisión, se toman medidas para eliminarlo. Una de ellas consiste en utilizar conductores especialmente diseñados, de mayor diámetro (y, por consiguiente, menor curvatura) que el normalmente empleado en las líneas de menor tensión que conducen corrientes de igual valor, para disminuir así la intensidad del campo eléctrico en sus proximidades (figura II.2).

IMÁGENES SUCESIVAS DEL RAYO

Aunque desde los tiempos de Franklin se sabía que tanto el fuego de san Telmo como el rayo eran fenómenos eléctricos con manifestaciones llamativas que, hasta cierto punto, podían reproducirse en los laboratorios, transcurrió más de siglo y medio antes de que se hicieran nuevos aportes significativos al conocimiento científico de estos fenómenos naturales. El caso del rayo resultaba elusivo en extremo, puesto que consistía en una serie de procesos rapidísimos y peligrosos para el observador, los cuales ocurrían de manera fortuita tanto en el espacio como en el tiempo. Pero la situación cambió de manera radical cuando, entrado ya el siglo XX, se pudo contar con las posibilidades ofrecidas por la oscilografía de rayos catódicos y la fotografía ultrarrápida.

Ciertamente, entre finales del siglo XIX y principios del XX, hubo investigadores que, haciendo girar con rapidez una cámara fotográfica ordinaria en torno a un eje para captar el desarrollo de los relámpagos en el tiempo, llegaron a la conclusión de que lo que aparentaba ser una única descarga eléctrica atmosférica en realidad solía componerse de varias descargas que tenían lugar en rápida sucesión a lo largo de la misma trayectoria nube-tierra, poco más o menos. También detectaron la existencia de descargas precursoras.¹² Pero no se obtuvieron resultados cuantitativos confiables hasta que pudo contarse con la cámara fotográfica inventada por Charles Vernon Boys en 1902, la cual estaba provista de dos lentes montadas diametralmente opuestas en un disco opaco que se hacía girar a gran velocidad frente a una placa fotográfica. Este dispositivo daba la posibilidad práctica de obtener imágenes sucesivas de la huella luminosa dejada por los rayos, de suerte que sus principales características macroscópicas podían medirse con excelente precisión.

A partir de 1933, en la ciudad sudafricana de Johannesburgo, Basil Schonland y sus colaboradores se dieron a la tarea de utilizar la cámara de Boys para estudiar sistemáticamente el desarrollo de los rayos, aprovechando lo frecuente de las tormentas eléctricas en la zona. Por esta vía obtuvieron resultados muy importantes sobre el tema, al contrario de lo acontecido con el propio inventor del dispositivo, que durante las tres décadas anteriores en Inglaterra no había logrado nada semejante, quizás porque allí las tormentas eléctricas veraniegas son relativamente infrecuentes. La figura II.3 muestra uno de los primeros juegos de cámaras utilizados por Schonland y su grupo, consistente en una cámara rápida de Boys cuyas dos lentes giraban a razón de 50 revoluciones por segundo, complementada con otra del mismo tipo cuya única lente demoraba un segundo en dar una vuelta completa, a la que se añadía una tercera cámara de tipo convencional.¹³

No resultaba fácil realizar la tarea, porque era necesario mantenerse en condiciones

de transportar el instrumental, de improviso y por la noche, a alguno de los distintos lugares seleccionados de antemano, lejos de las luces de la ciudad, de modo que el punto de observación quedara justo enfrente de la tormenta que se acercaba, para evitar que la lluvia y el granizo caídos de la nube desdibujaran las fotos. Según recuerda Schonland:

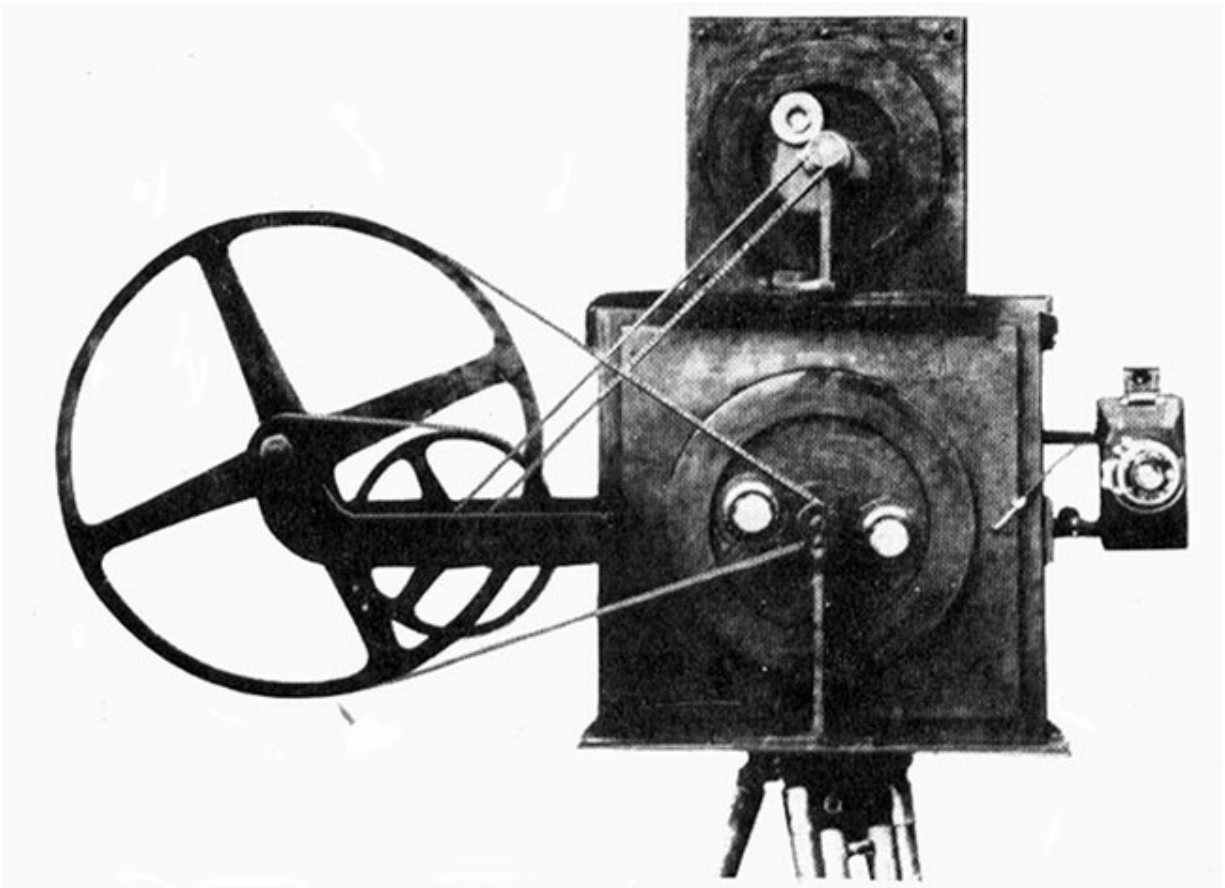


FIGURA II.3. Juego de cámaras usado por Schonland y su grupo. Al centro: cámara de Boys de doble lente; sobre ella: cámara de lente rotatoria única; a la derecha: cámara normal.

Después de haber obtenido nuestros primeros resultados y aprendido algo sobre los procesos de trazo más brillante, concluimos que debíamos concentrarnos en los relámpagos muy cercanos, porque sólo entonces estaríamos en condiciones de poder fotografiar algunos procesos importantes que emiten menos luz que los otros. Estos registros cercanos eran difíciles de obtener, pero tuvimos la buena fortuna de contar en nuestro equipo con el señor H. Collens, un ingeniero que dedicó la mayor parte de su tiempo libre a aquella tarea, a cuya realización incorporó la misma habilidad y la experiencia que antes lo habían hecho famoso como pescador de tiburones devoradores de hombres y experto en la captura de cocodrilos vivos. Por cada resultado exitoso, los miembros del equipo debieron pasar no pocas noches infructuosas bajo la lluvia y el granizo, pero al cabo de cuatro años conseguimos unos 150 buenos registros de relámpagos a tierra con la cámara de Boys.¹⁴

Del análisis de las imágenes fotográficas obtenidas, Schonland y el resto de su grupo concluyeron que en un rayo nube-tierra típico todo pasa como si, de manera parecida a lo

que ocurre con un meteorito al atravesar la atmósfera terrestre y ponerse incandescente, saliera de la nube una *centella-piloto* que se moviera hacia abajo dejando tras de sí un trazado débilmente luminoso, el cual denominaremos “trazadora descendente escalonada” (*stepped leader*, en la terminología de Schonland). Sólo que, al contrario de lo que sucede con los meteoritos, los cuales dejan una huella luminosa rectilínea, el trazado de la centella-piloto consiste en una línea irregular *poco luminosa*, con frecuentes bifurcaciones, compuesta de segmentos prácticamente rectilíneos cuya longitud promedia unos 50 metros, que la centella-piloto recorre en alrededor de un microsegundo (por tanto, a una velocidad de 50 000 km/s, aproximadamente).¹⁵ La centella parece detenerse entonces durante unos 50 microsegundos para volver a partir, iniciando el recorrido de un nuevo segmento que sigue una nueva dirección, o se divide en dos o más, que inician el recorrido de otros tantos nuevos segmentos con orientación general hacia el suelo, como se indica en los incisos *a* y *b* de la figura II.4. A partir de un cierto momento en este proceso de acercamiento al suelo, generalmente surgen y se desarrollan desde algunos puntos elevados de este último distintos efluvios débilmente luminosos —que denominaremos “trazadoras ascendentes”—, los cuales tienden a ir al encuentro de las centellas-piloto correspondientes (figura II.4, incisos *b* y *c*), con alguna de las cuales pueden toparse eventualmente en un punto de encuentro *K* (situado a una distancia entre 50 y 100 metros del suelo), como se indica en el inciso *c* de la figura II.4, donde se ve que el trazado final del fenómeno en la atmósfera semeja el de un río con sus afluentes.

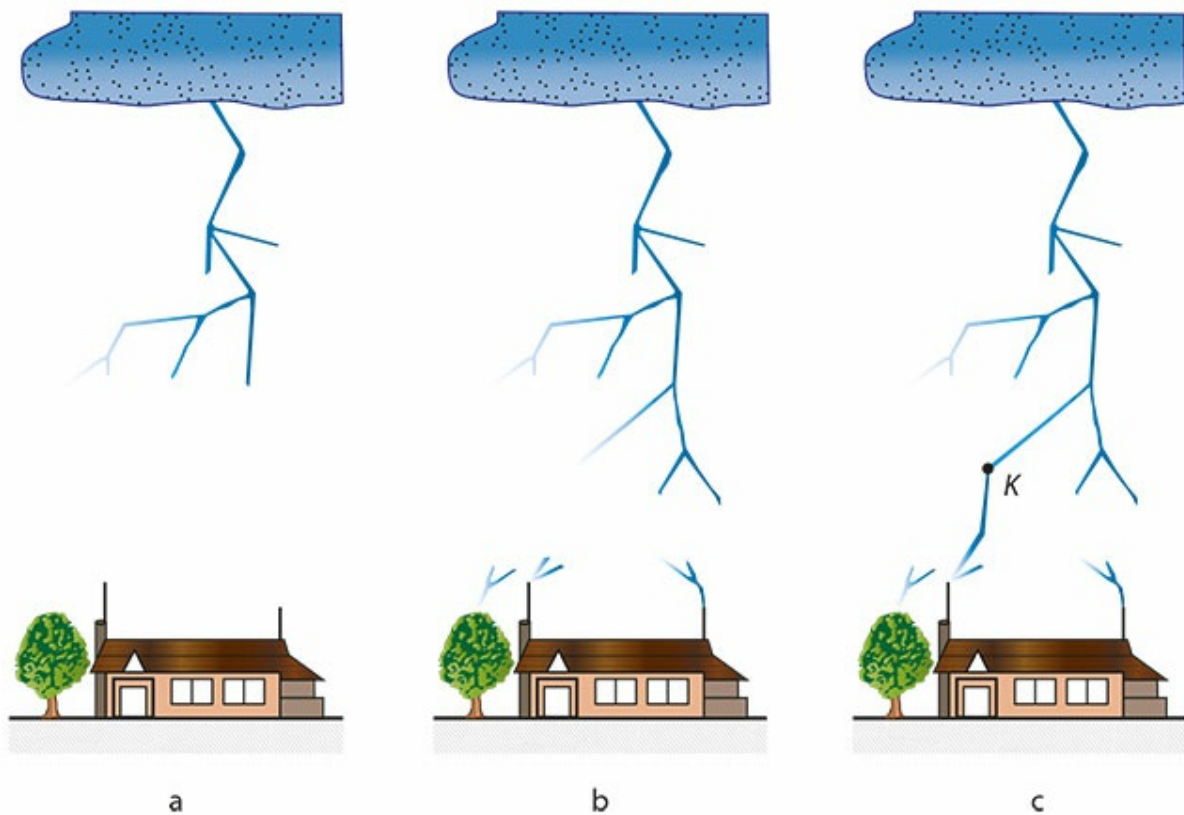


FIGURA II.4. Aproximaciones sucesivas (a, b, c) de una trazadora descendente escalonada a la superficie terrestre.

Inmediatamente después de establecida la conexión nube-tierra descrita, se observa que parte desde el *punto de impacto* (sobre uno de los pararrayos de la figura II.4, inciso c) un punto intensamente luminoso que recorre, en sentido inverso, el camino configurado por las trazadoras empalmadas en K, con una velocidad promedio de alrededor de 40 000 km/s, dejando tras de sí una trayectoria intensamente iluminada por unos instantes, cuyo avance progresivo hacia la nube se representa en línea gruesa en la figura II.5 y constituye la manifestación más espectacular de un fenómeno complejo que denominaremos “fulguración de retorno” (*return stroke*,¹⁶ *arc en retour*¹⁷).

Aun cuando un rayo puede consistir exclusivamente en una sola descarga eléctrica que exhibe las características reseñadas más arriba y resumidas esquemáticamente en las figuras II.4 y II.5, en general es mucho más frecuente que se componga de varias *descargas parciales* (denominadas *strokes* por Schonland), que se suceden una tras otra a intervalos de unas centésimas de segundo. Todas tienen características parecidas, pero no idénticas a la primera, y su número puede llegar a 40 o más, aunque suele ser de tres o cuatro.

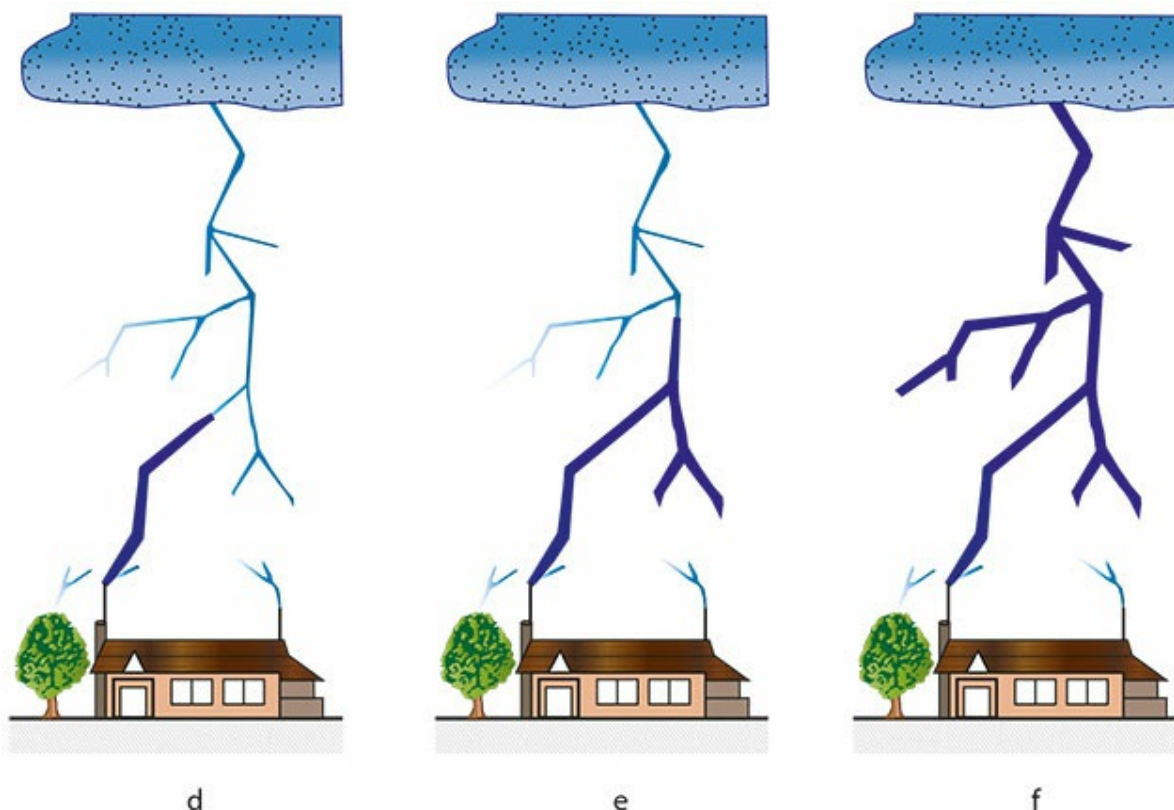


FIGURA II.5. De izquierda a derecha (d, e, f): avances sucesivos de la intensa luminosidad (representada en línea gruesa) de la fulguración de retorno subsiguiente a una descarga eléctrica nube-tierra inicial.

En el caso de un rayo de múltiples descargas parciales, todo ocurre como si después de haber sido producida la primera, como se ha descrito anteriormente, se desprendiera de la nube una nueva centella que bajara directamente hasta el suelo, a una velocidad media de unos 1 500 km/s, dejando tras de sí un trazado débilmente luminoso, que denominaremos “trazadora en flecha” (*dart leader*, según Schonland), coincidente con el sendero troncal descrito por la trazadora descendente escalonada (figura II.6, inciso g), de suerte que cuando la centella toca tierra se produce una fulguración de retorno similar a la descrita antes, salvo que asciende hasta la nube iluminando tan sólo el sendero troncal antes mencionado, como se indica en la figura II.6, inciso h. Algunas centésimas de segundo después no es raro que se produzca una tercera descarga parcial, que repite el proceso de forma casi coincidente con el anterior, y así sucesivamente.

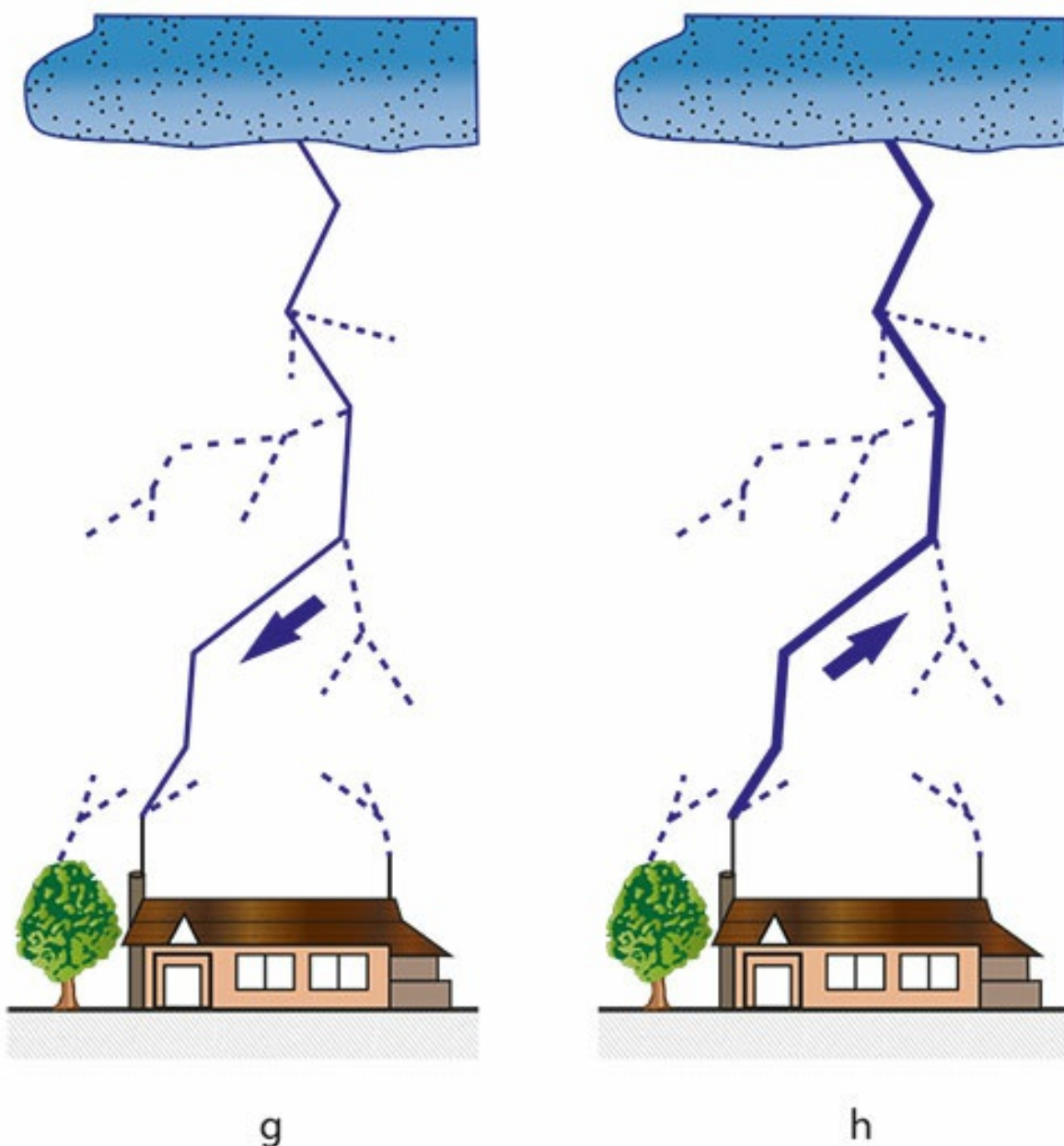


FIGURA II.6. Segunda descarga parcial de un rayo: trazadora en flecha (g) y su fulguración de retorno (h).

Del análisis fotográfico de los rayos se concluye que típicamente un rayo nube-tierra se compone de varias descargas parciales, la primera de las cuales es preparada por una trazadora descendente escalonada, que tras empalmar con una trazadora ascendente (o quizás más de una), da lugar a una fulguración que sube rápidamente hasta la nube, a la que pueden seguir varias descargas parciales similares, caracterizadas por sus respectivas trazadoras en flecha y sus fulguraciones de retorno acompañantes, no ramificadas. El parpadeo que a veces se aprecia en un relámpago es una indicación de que lo componen varias fulguraciones de retorno sucesivas.

A fin de cuentas no puede decirse que el comportamiento de una descarga atmosférica nube-tierra típica que acaba de reseñarse difiera esencialmente del de una descarga eléctrica de laboratorio. Pero hoy se tiene una visión más exacta de las peculiaridades del fenómeno, sin que ello signifique que las explicaciones actuales estén libres de elementos importantes no dilucidados aún. En lo que sigue, nos detendremos un momento a exponer algunas cuestiones que permiten situar el tema en una mejor perspectiva.

EL RAYO, SIMULADO Y ENCARRILADO

Hasta muy entrado el siglo XX había arraigado en la comunidad científica mundial la idea de que los rayos eran simples versiones a gran escala de chispas eléctricas como las producidas por las máquinas electrostáticas del siglo XVIII.

La mayor de aquellas máquinas había sido una construida por el neerlandés Martinus van Marum en la década de 1780, que era capaz de generar tensiones del orden de 330 000 voltios y producir chispas de unos 60 centímetros de longitud.¹⁸ Posteriormente, se lograron chispas hasta de nueve metros en la década de 1930 y hasta de 15 metros en 1949 (con una tensión de 10 y 15 millones de voltios, respectivamente) gracias al uso de generadores de muy alta tensión, especialmente diseñados para producir a voluntad “rayos artificiales” que permitieran simular la forma en que los rayos naturales podían afectar a los sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica.

Ciertamente, la simulación del rayo mediante chispas eléctricas de laboratorio ha ayudado, y todavía ayuda, a diseñar métodos y medios de protección de líneas de transmisión, transformadores y otros equipos y sistemas eléctricos, pero resulta insuficiente para estudiar muchos aspectos importantes del fenómeno. En vista de ello, en 1973 dos entidades estatales francesas, Électricité de France (EDF) y Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA), erigieron conjuntamente una estación experimental dedicada a provocar descargas atmosféricas a partir de nubes de tormenta y conducir las a un punto habilitado para estudiar sus efectos. El propósito fundamental de la EDF era investigar el comportamiento ante las descargas atmosféricas de las torres de las líneas de transmisión de alta tensión y sus conexiones a tierra, mientras que a la CEA le interesaba profundizar en el conocimiento de la fuerte ionización atmosférica vinculada con el rayo. Instalada la estación en la zona montañosa francesa de Saint-Privat-d'Allier, donde se producían frecuentes tormentas eléctricas, el procedimiento empleado consistía en inducir el desencadenamiento de un rayo, de modo que la descarga resultara conducida hasta el punto de interés. Para conseguirlo, cuando el campo eléctrico atmosférico a nivel del suelo alcanzaba un valor entre 5 y 10 kV/m, se lanzaba hacia una nube de tormenta considerada propicia un pequeño cohete que se elevaba hasta una altura de unos 200 a 300 metros, a la vez que iba largando un hilo conductor arrollado en su interior, uno de cuyos extremos permanecía anclado muy próximamente al blanco previsto. De esta manera se creaban condiciones favorables para que la descarga eléctrica pudiera llegar al punto de anclaje siguiendo la conexión directa que le ofrecía el hilo. Con la práctica, se lograba que esto ocurriera la gran mayoría de las veces.¹⁹

Instalaciones similares a la que acaba de describirse se establecieron posteriormente

en China, Japón y los Estados Unidos. En este último país, concretamente en la Florida, se erigió una a cargo del Centro Internacional para la Investigación y Ensayos del Rayo (ICLRT, por sus siglas en inglés), y se emplea regularmente en la manipulación de las descargas eléctricas atmosféricas (figura II.7) con el propósito de realizar mediciones muy precisas sobre el fenómeno, así como experimentos capaces de aportar datos útiles para la prevención de los distintos efectos negativos de éste.



FIGURA II.7. *Descargas atmosféricas encarriladas hasta la instalación del ICLRT.*

LA NUBE DE TORMENTA

Cuando, al comienzo del presente capítulo, nos referimos a la composición de la atmósfera terrestre, faltó mencionar explícitamente las gotitas de agua y las minúsculas partículas de hielo que los movimientos ascendentes del aire mantienen en suspensión, y que al resultar agrupadas masivamente en cientos de miles de toneladas, constituyen las nubes que se observan a simple vista. Los meteorólogos clasifican las nubes según la manera en que se originan y la altura a la que se encuentran, y las denominan tomando en cuenta su aspecto general. En el presente contexto, interesan particularmente las características de las denominadas cumulonimbus, que son grandes masas nubosas que se forman generalmente con la parte inferior situada a unos dos kilómetros de altura, mientras que su parte superior puede elevarse hasta 13 o 14 kilómetros, y a menudo se despliega adoptando la forma de un yunque. Este aspecto es típico de las tantas veces mencionadas “nubes de tormenta”, cuya fuerte electrización fue demostrada por los primeros experimentos franklinianos descritos en el capítulo anterior. Dado que, independientemente de su espectacularidad y trascendencia, los resultados obtenidos en aquellos experimentos constituían apenas una primera aproximación al estudio de la electrización de las nubes, surgió la necesidad de continuar profundizando en el asunto.

El primero en poner manos a la obra fue el propio Benjamin Franklin, quien poco después de enterarse de los resultados experimentales de Dalibard y otros en Europa, colocó verticalmente, en lo alto de la chimenea de su casa en Filadelfia, una varilla de hierro aislada, conectada a un alambre cuyo extremo libre llegaba cerca de la alcoba del investigador, a unos 15 centímetros del extremo libre de otro alambre puesto a tierra. Fijó entonces sendas campanillas metálicas a ambos extremos y colgó entre ellas una bolita de bronce suspendida de un hilo de seda, de manera que cuando pasaba sobre la casa una nube electrizada, ésta inducía en la campanilla conectada a la varilla aislada una carga eléctrica del mismo signo que la exhibida por la nube, lo cual hacía que la bolita de bronce golpeará alternativamente las campanillas, cuyo repiqueteo avisaba entonces sobre la presencia de la nube, y esto lo aprovechaba Franklin para darse a la tarea de determinar el signo de la carga inducida. Por esta vía llegó a la conclusión de que la mayoría de las veces las nubes presentaban una carga negativa, conclusión que no tardaron en confirmar otros investigadores.²⁰

Sin embargo, resultó mucho más complicado llegar a mayores precisiones sobre el estado eléctrico de las nubes, al extremo de que no fue sino hasta 1937 cuando pudieron determinarse las posiciones generalmente ocupadas por las cargas eléctricas positivas y negativas dentro de la masa nubosa.²¹

Hoy sabemos que, cuando ha alcanzado pleno desarrollo, la nube de tormenta típica se encuentra fuertemente electrizada (figura II.8), en tal forma que a unos seis kilómetros de altura contiene una región de algunos cientos de metros de espesor cargada negativamente (N) y dos regiones cargadas positivamente, una de las cuales (P) se extiende desde unos dos o tres kilómetros por encima de N , hasta el extremo superior de la nube, y otra bastante más pequeña (p), que se extiende en altura desde la base de la nube hasta uno o dos kilómetros por debajo de N .

Se han elaborado varios modelos para explicar esta peculiar forma de electrización, pero todos son polémicos porque los procesos físicos a escala microscópica que la originan no se conocen a fondo todavía.

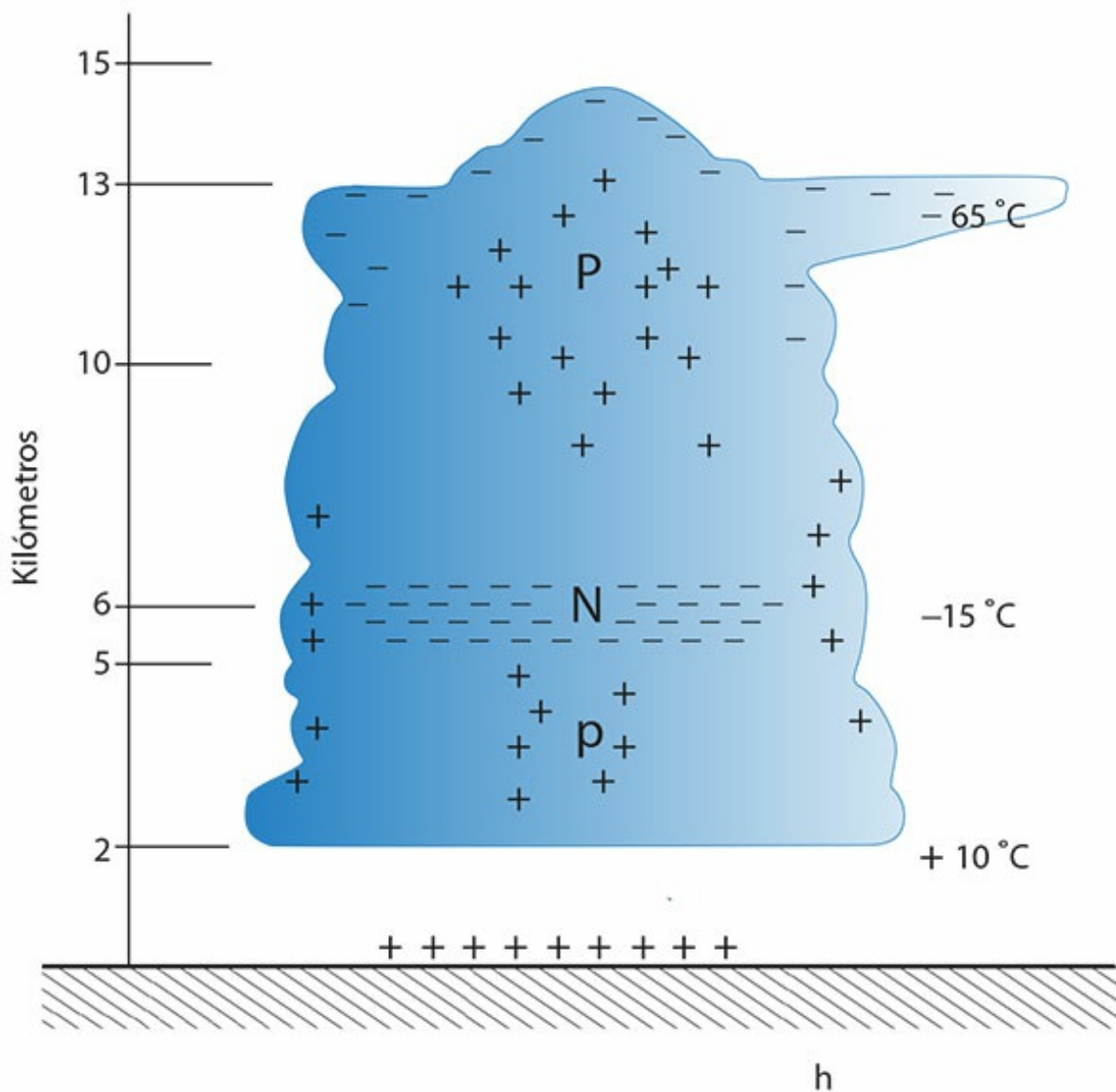


FIGURA II.8. Distribución de las cargas eléctricas y las temperaturas en una nube de tormenta desarrollada. Sobre la superficie terrestre, una carga especial positiva producida por efecto

Para que se tenga una idea de la complejidad del asunto, acotaremos que las nubes de tormenta contienen en suspensión gotitas de agua superenfriada y pequeñísimos cristales de hielo, así como partículas de hielo mucho más grandes, que caen debido a su mayor peso y al hacerlo chocan repetidamente con las otras partículas. Hay evidencia experimental de que dichas partículas, al chocar, adquieren una carga negativa a la temperatura de la región *N* ($-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ aproximadamente) o inferior, mientras que se cargan positivamente a temperaturas superiores, como las que prevalecen en la parte inferior de la nube.²²

Los estudios realizados indican que, por lo general, los rayos se originan en el seno de las nubes de tormenta como descargas eléctricas entre dos regiones electrizadas de signo contrario, como *N* y *p*. Pero como se ha comprobado que la intensidad del campo eléctrico dentro de una nube casi nunca supera los 200 kV/m, y se requieren por lo menos 300 kV/m para perforar el dieléctrico constituido por el aire, es necesario responsabilizar a algún otro factor por la producción de las descargas eléctricas en el interior de las nubes.

Según una interesante (aunque no universalmente aceptada) teoría, propuesta en 1992 por Alexander V. Gurévich y colaboradores,²³ la explicación del fenómeno reside en la interacción de los rayos cósmicos con la atmósfera superior de la Tierra, de modo que, pongamos por caso, al chocar a gran velocidad un protón procedente del espacio ultraterrestre con una molécula de alguno de los gases que componen nuestra atmósfera (posiblemente a unos 15 km de altura), el choque dará lugar a la producción tanto de radiaciones electromagnéticas como de una lluvia de partículas de alta energía —en particular, electrones— que al atravesar la parte superior de la nube y chocar con las moléculas en su interior producirán una avalancha de electrones rápidos. Éstos, a su vez, al ser acelerados por la fuerte intensidad de campo eléctrico existente entre las regiones *N* y *p*, generarán electrones tan numerosos y veloces, que se manifestarán como una violenta descarga eléctrica dentro de la nube; esta descarga desprenderá multitud de electrones de las partículas también hacia abajo, hasta salir de la nube en busca de la superficie terrestre (figura II.9).²⁴

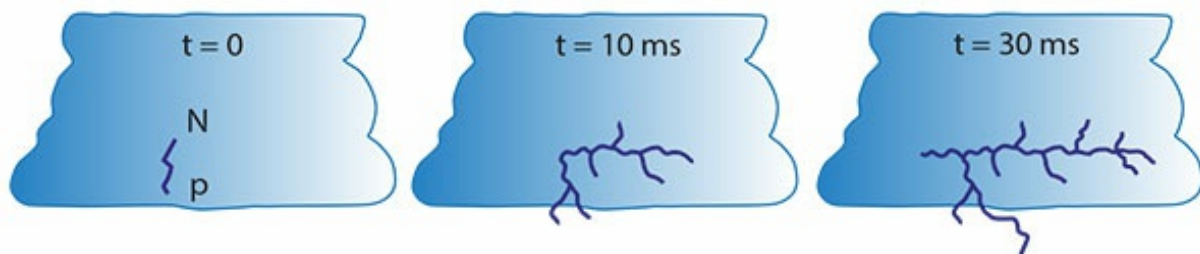


FIGURA II.9. *Descarga eléctrica originada en la parte inferior de una nube de tormenta. A título de referencia, se indica en milisegundos el tiempo transcurrido.*

Un estudio cuyos resultados se han divulgado ampliamente entre la comunidad científica internacional en fecha tan reciente como el 16 de mayo de 2014,²⁵ sugiere que cuando el viento solar es particularmente intenso, aumenta la frecuencia con la que se producen los rayos en la Tierra, lo cual puede deducirse al suponer que las partículas de alta velocidad emitidas por el Sol pueden provocar una intensificación localizada del campo magnético, lo cual lleva a algunas de las partículas a velocidades aún mayores. Estas llamadas partículas energéticas solares (SEP) —a diferencia de las que viajan a menores velocidades— tienen suficiente energía para penetrar el campo magnético de la Tierra y atravesar la atmósfera terrestre hasta las alturas a las que se forman las nubes de tormenta. Allí, dicen los investigadores, chocarían con los átomos y las moléculas del aire y generarían una cascada de partículas de alta energía.

Esta avalancha (*runaway breakdown*) sería suficiente para desencadenar rayos, dice Christopher Scott, un científico espacial que dirigió el último estudio.²⁶

HACIENDO CAMINO AL ANDAR

En esencia, lo que se desprende de la nube de tormenta es un gran aluvión de electrones que se mueven libremente a gran velocidad (unos 50 000 km/s), hasta que chocan con las moléculas del aire, cuya masa es mucho mayor. El choque frena momentáneamente a los electrones y hace que su trayectoria experimente una desviación brusca e incluso la aparición de dos o más ramas, de modo que continúan un viaje con rumbo distinto, hasta que chocan de nuevo y se repite el proceso anterior, en términos generales. Otros efectos importantes de los choques con las moléculas del aire son la emisión de rayos X y la liberación de nuevos electrones muy veloces.²⁷ Como resultado, se va aproximando a la superficie terrestre un flujo creciente de electrones que se trasladan a gran velocidad siguiendo la trayectoria zigzagueante y débilmente luminosa que hemos denominado anteriormente trazadora descendente escalonada, una de cuyas características es que en general incluye ramificaciones “en tenedor” o en “árbol invertido”, tal como se muestra en la figura II.4.

De esta manera los electrones “hacen camino al andar” —como diría el poeta— pues crean a su paso una red de conductos de aire fuertemente ionizado (plasma) poblados de manera esencial por: 1) los electrones libres con su carga eléctrica negativa, en rápido movimiento hacia abajo; 2) moléculas que han perdido algunos de sus electrones y que por ello constituyen iones positivos, los cuales se mueven en dirección a la nube con relativa lentitud por tener una masa mucho mayor que la de los electrones, y 3) moléculas neutras, entre ellas las reconstruidas como consecuencia de la captura de electrones por los iones positivos. En particular, el sendero troncal de la trazadora descendente escalonada constituye un conducto de plasma cuyo diámetro se ha estimado de tres centímetros o menos, aunque en las fotografías aparenta ser de hasta ocho o 10 metros, posiblemente a causa de la luminosidad que lo rodea por el efecto corona.²⁸

Por otra parte, a medida que la trazadora descendente escalonada se aproxima a la superficie terrestre, aumenta la densidad de carga positiva inducida en las zonas más próximas a las fuertes cargas negativas que se le acercan desde lo alto. En particular, cuando en dichas zonas existen prominencias, como árboles, torres altas o varillas de pararrayos, estos objetos se comportan como puntas electrizadas positivamente, que generan en sus proximidades campos eléctricos muy intensos cuando la avalancha de electrones de la trazadora descendente escalonada se les aproxima a unas decenas de metros del suelo. Eso ocasiona la aparición de efluvios constituidos por iones positivos a partir de las prominencias (como se indica en la figura II.4), algunos de los cuales pueden transformarse en trazadoras ascendentes en rápido avance hacia la trazadora descendente

escalonada, hasta que se encuentran con ésta —como se describió previamente— y (en un lapso de unos 20 a 50 milisegundos) se completa un conducto ionizado continuo nube-tierra.²⁹

Desde ese momento queda determinado el punto de impacto del rayo. El impacto será múltiple (como sugiere la figura 1.1) si se producen varios puntos de encuentro entre la trazadora descendente escalonada y dos o más trazadoras ascendentes.

UN RETORNO RELAMPAGUEANTE Y ATRONADOR

Un examen detenido de lo que sucede cuando se establece en K (figura II.4) un *punte conductor* como el descrito con anterioridad entre una nube de tormenta y la superficie terrestre, revela que ocurre un doble movimiento de cargas eléctricas. Sucede, en efecto, que mientras los iones positivos vinculados al suelo ascienden con rapidez por el puente, atraídos por la fuerte carga negativa de la avalancha de electrones que descienden, estos últimos se precipitan hacia el suelo (ya sea directamente o a través de un pararrayos u otra estructura) y penetran en él, todo lo cual da lugar a la circulación de fuertes corrientes eléctricas transitorias en la zona de impacto, que elevan súbitamente la temperatura tanto en ésta como en la parte del puente en contacto inmediato con ella, al extremo de conferirle una intensa luminosidad.

El impacto de los electrones en el suelo produce lo que L. B. Loeb llama una *onda de potencial* ³⁰ que viaja con gran celeridad hacia la nube por el conducto ionizado. Lo anterior se traduce en el incremento del flujo siempre descendente de electrones, con el consiguiente incremento de temperatura y luminosidad. Este incremento se propaga en sentido inverso, desde el suelo hasta la nube, en unos 100 microsegundos, con una velocidad de 35 000 a 100 000 km/s —que puede alcanzar un valor máximo de 140 000 km/s; es decir, casi la mitad de la velocidad de la luz en el vacío—³¹ a lo largo de prácticamente todo el tortuoso y ramificado camino ionizado abierto por las trazadoras, y lo ilumina con intensidad. En esto consiste propiamente la fulguración de retorno de la descarga.

La frecuente producción de descargas parciales subsiguientes suele explicarse suponiendo que en cuanto ocurre la descarga inicial, grupos de electrones procedentes de distintas regiones de la nube se precipitan uno tras otro por el conducto o canal ionizado troncal creado por la primera descarga, presumiblemente algo corrido por la acción del viento. Naturalmente, cada una de las respectivas fulguraciones de retorno produce su propio trazo luminoso, pero debido a la persistencia de las imágenes en la retina el ojo humano los percibe generalmente como el trazo luminoso único que llamamos *relámpago*.

Por otra parte, en el curso de cada fulguración de retorno, la alta temperatura que se propaga a lo largo de la trayectoria del rayo hace que los conductos de aire ionizado que la componen experimenten súbitamente un enorme incremento de temperatura y presión (digamos, a 30 000 °C y 10-100 atmósferas). Esto origina una *onda de choque* que se propaga en el seno del aire circundante y que, luego de recorrer una corta distancia, se

convierte en una *onda acústica*, la cual se percibe como un trueno.³² Su sonido podría describirse, a grandes rasgos, como una combinación en proporciones diversas de uno o más golpes secos de breve duración con un estruendo sordo y prolongado, que origina diversos efectos acústicos. Pero la forma específica en que se percibe un trueno depende de numerosos factores, como la presencia o ausencia de descargas parciales, la distancia y la orientación de los distintos tramos del conducto del rayo con respecto al observador, la atenuación, difracción y dispersión atmosféricas de las ondas sonoras, etc. Por otra parte, la experiencia indica que bajo un cielo despejado se puede oír retumbar los truenos a más de 25 kilómetros, pero raras veces a más de 10 kilómetros cuando el cielo está encapotado.³³

GRANDES CORRIENTES Y RAYOS PETRIFICADOS

Desde el punto de vista del daño físico que puede causar la caída de un rayo, reviste particular importancia la caracterización de las corrientes eléctricas asociadas al fenómeno.

Típicamente, en el punto de impacto de una descarga parcial se produce un impulso de corriente cuyo valor pico varía entre 10 000 y 20 000 amperios (lo cual no quita que en algunos casos éste pueda hacerse 10 veces mayor, como ya dijimos). La duración de los impulsos de corriente de las descargas parciales varía entre tres y seis diezmilésimas de segundo en alrededor de 50% de los rayos, pero el otro 50% incluye los llamados *rayos calientes* o *incendiarios*, que se caracterizan por mantener circulando durante una o dos décimas de segundo una corriente de baja intensidad relativa, característicamente de unos 100 amperios (figura II.10).³⁴ Se piensa que la mayor parte de los incendios forestales producidos por descargas atmosféricas se deben a rayos de este tipo.

En cualquier caso, sería erróneo imaginar que es gigantesca la cantidad de energía asociada a un rayo ordinario, porque si bien es cierto que en una descarga parcial es muy elevado el valor pico tanto de la tensión nube-tierra como de la corriente, ha de recordarse que debido a la brevísima duración de esta última, la energía en juego resulta generalmente del orden de apenas algunos kilovatios-hora (kWh).³⁵

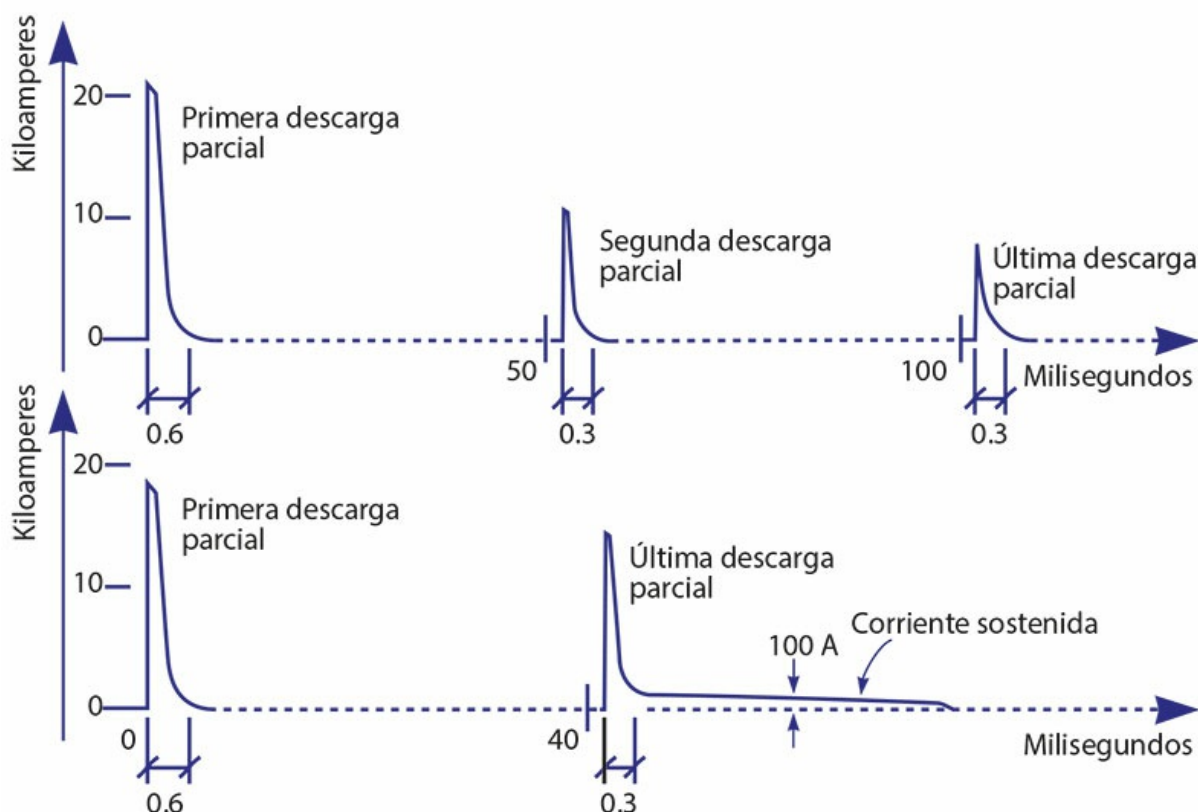


FIGURA II.10. Corrientes en el suelo originadas por una fulminación típica sin corriente sostenida, el llamado “rayo frío” (arriba), y con corriente sostenida, el llamado “rayo caliente” (abajo).

En cuanto al comportamiento de la descarga eléctrica atmosférica después de haber tocado la superficie terrestre, podría imaginarse que, por razón de simetría, penetrara en profundidad avanzando uniformemente en todas direcciones, en el supuesto de que el medio fuese eléctricamente homogéneo, como ocurriría con buena aproximación en una masa líquida. Pero en una masa de tierra ordinaria lo que sucede es que la corriente electrónica original se ramifica siguiendo preferentemente los caminos de menor resistencia eléctrica, determinados tanto por la naturaleza y disposición de los materiales presentes, como por la distribución de la humedad en el terreno. Como es sabido, los materiales se calientan al ser atravesados por una corriente eléctrica y puede ocurrir que la temperatura se eleve tanto que se fundan los materiales silíceos al paso de las corrientes, y al enfriarse queden creados en el terreno varios tubos vitrificados, más o menos ramificados y bastante frágiles (figura II.11), denominados fulguritas (de *fulgur*, que en latín significa “relámpago”, “resplandor” y también “rayo”). Estos “rayos petrificados”, que pueden alcanzar más de un metro de longitud, afectan no pocas veces el aspecto de una raíz vegetal, lo cual puede explicarse suponiendo que luego de impactar un árbol o un arbusto, la descarga atmosférica original se interna en el terreno

siguiendo el camino de baja resistencia eléctrica ofrecido por la raíz.



FIGURA II.11. *Aspecto de una fulgurita creada por la caída de un rayo en un suelo arenoso.*

VARIACIONES SOBRE EL TEMA

Hasta aquí hemos tomado como material de estudio un fenómeno que pocos vacilarían en catalogar como un rayo “típico”, consistente en una descarga eléctrica a tierra desde una o varias regiones de una nube de tormenta cargadas negativamente. Pero cuando se tienen objetos como un edificio muy alto o una torre de televisión erigida en un promontorio el fenómeno suele producirse en sentido inverso; esto es, iniciarse en la superficie terrestre y dirigirse hacia la nube, comenzando con una especie de fuego de san Telmo que se alarga desde una prominencia en el terreno hasta convertirse en una trazadora ascendente escalonada que va al encuentro de la nube y se ramifica hacia arriba como un árbol (figura II.12). Estudios estadísticos realizados sobre las descargas eléctricas atmosféricas que han afectado al rascacielos neoyorkino Empire State, indican que 75% de ellas eran ascendentes, proporción que se eleva a 80% en estudios similares realizados sobre la montaña suiza de Monte San Salvatore. En cambio, las descargas atmosféricas que afectan a las líneas de transmisión ordinarias parecen ser siempre descendentes.³⁶

Por otra parte, conviene tener presente que si bien las descargas eléctricas atmosféricas involucran preferentemente los puntos más elevados de las estructuras, a veces no ocurre así, como puede inferirse de la figura II.13, que registra la caída de un rayo sobre la plataforma de lanzamiento de un transbordador espacial (o quizás sobre un punto próximo a ella), muy por debajo de la cúspide de la estructura de apoyo.



En algunas ocasiones —muy raras, por cierto— ocurre una descarga eléctrica a tierra originada en la región electropositiva más elevada de la nube, como se muestra en la figura II.14, donde se indica lo que parece ser un rasgo característico del fenómeno: un gran desarrollo horizontal de la cima de la nube, que desborda ampliamente la zona de tormenta T , de modo que el punto de impacto de la descarga eléctrica R originada allí puede quedar alejado incluso a 10 o 20 kilómetros de T . Adviértase, de paso, que una descarga eléctrica como r , que impactase el suelo a una distancia menor de la zona de tormenta, también pudiera percibirse localmente como un rayo “caído de un cielo despejado o sereno”, por más que en realidad se haya originado en una zona elevada de la nube.



FIGURA II.12. Rayo de tierra a nube, desde la Torre Eiffel (imagen anterior) y desde el puente de San Francisco (arriba).

Los rayos como R , que se supone transfieren cargas positivas de las nubes a tierra, ocurren preferentemente en los meses de invierno y a comienzos de la primavera, pero aun así se ven muy pocas veces, lo cual obstaculiza considerablemente su estudio a fondo. Resulta de ello una situación desafortunada, porque dichas descargas adquieren con frecuencia la categoría de verdaderos superrayos, al generar en el punto de impacto

impulsos de corriente de gran intensidad y duración relativamente larga, que las hacen particularmente destructivas. Es ilustrativo al respecto el caso de un superrayo caído en agosto de 2005 en la ciudad de Phoenix, capital del estado estadounidense de Arizona, del que se afirma sonó como una explosión de dinamita, produjo grandes daños en una casa, se propagó a otras estructuras a través de las redes técnicas soterradas y el suelo húmedo, y dejó un saldo de 13 casas dañadas. Según una descripción aparecida en internet:



FIGURA II.13. *La plataforma del transbordador espacial Challenger, alcanzada por un rayo el 30 de agosto de 1983, en el Centro Espacial Kennedy. Imagen: NASA.*

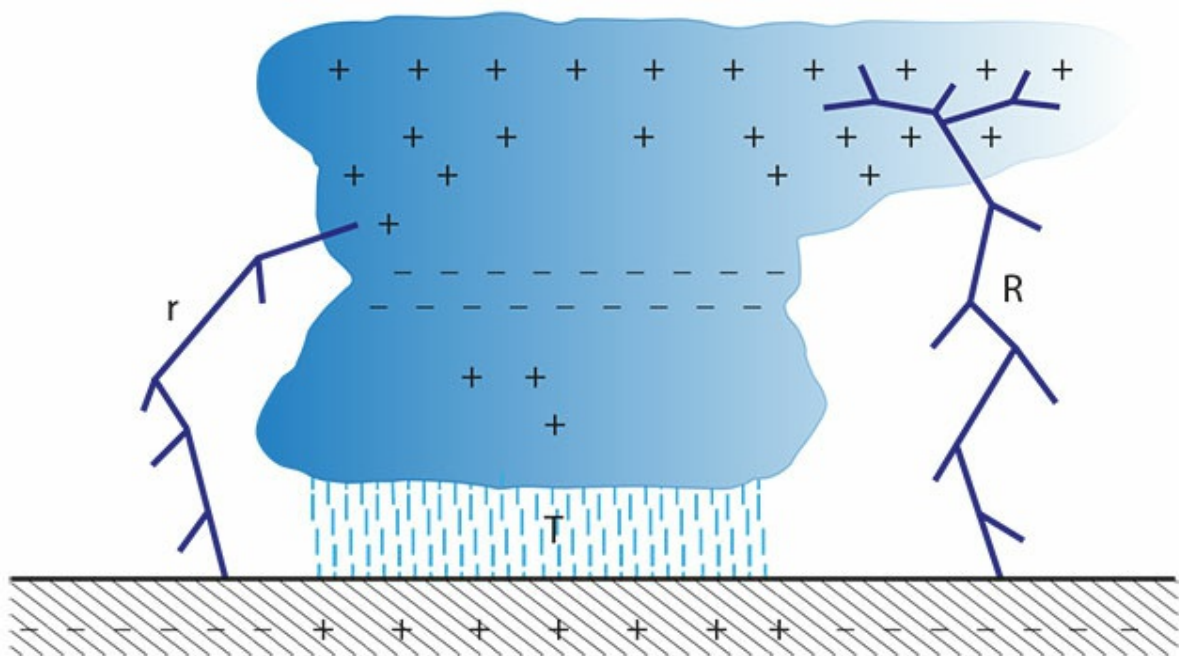


FIGURA II.14. Rayos originados en la parte superior de una nube de tormenta, con puntos de impacto alejados de la zona t de fuertes precipitaciones.

El intenso calor de la fuerza [sic] reventó los cables soterrados, incluso los de televisión, hizo erupción a través del suelo cerca de [una] casa y vomitó tierra y detritos como ceniza volcánica contra casas, árboles y vehículos estacionados. Las áreas en torno a los tiradores y cerraduras de bronce de las puertas quedaron chamuscadas [...] Los bomberos [...] dijeron que nunca habían presenciado nada [semejante. Declaró un experto:] “Esto va más allá de la norma. Es extraño. Nos intriga. Buscaremos la manera de entenderlo un poco más”.³⁷



FIGURA II.15. *Rayos asociados a una erupción del volcán Chaitén, Chile, en 2008.*

Los superrayos que ocurren en el globo terráqueo son, no obstante, insignificantes en comparación con los que se producen en Júpiter, a juzgar por las imágenes de descomunales relámpagos registrados en la atmósfera del planeta. Por otra parte, del análisis de las ondas radioeléctricas emitidas por Saturno y Urano, que tienen características semejantes a las de la familiar “estática” producida por los rayos en nuestra Tierra, se ha inferido que en la atmósfera de esos cuerpos celestes ocurren gigantescas descargas eléctricas. Descargas así también parecen posibles en los planetas Neptuno y Venus. En el caso de Venus, hubo un tiempo en que se supuso (contra el criterio generalmente aceptado en la actualidad) que las descargas eléctricas producidas estaban asociadas a la actividad de los volcanes de aquel planeta, al igual que suele suceder en el nuestro a partir de las nubes de material expelido durante las erupciones volcánicas (figura II.15).

En la Tierra se dan también otras situaciones en que se presentan rayos no asociados a nubes de tormenta, sino bajo determinadas condiciones a fenómenos como tornados (figura II.16), tormentas de arena o de nieve, y explosiones nucleares. Por otra parte, se piensa que, especialmente en las regiones tropicales, la gran mayoría de las descargas eléctricas atmosféricas (quizás de 70 a 80%) tiene lugar exclusivamente en el interior de las nubes, ya sea que resulten invisibles para el observador o que éste las perciba únicamente como una súbita iluminación más o menos general de la masa nubosa

(conocida como *fucilazo*), sin que le sea dable apreciar el trayecto de la descarga. En cambio, cuando se produce una descarga entre nubes, que es un fenómeno menos frecuente, se puede ver con gran claridad el trazado del caso, que puede alcanzar una longitud de varias decenas de kilómetros (figura II.17).

Además de los tipos de rayos mencionados hasta aquí, todos los cuales tienen lugar en la troposfera —es decir, entre 10 y 15 kilómetros de altura sobre la superficie terrestre—, alguna que otra vez —ciertamente no muchas— se han observado descargas eléctricas dirigidas “hacia el cielo” desde la parte superior de la nube de tormenta. Unas ofrecen el mismo aspecto de los rayos ordinarios antes descritos, sólo que en lugar de propagarse como éstos, por la troposfera, lo hacen verticalmente, por la estratosfera. En cambio, otras descargas se ven como penachos luminosos azules o rojos que parten de la nube y a medida que ganan altura se expanden y difuminan hasta desaparecer. Los penachos azules desaparecen en el seno de la estratosfera, pero los rojos avanzan tanto que llegan a penetrar la parte inferior de la ionosfera, hasta unos 80 km de altura o más.³⁸ La primera toma de video en colores de estos fenómenos se realizó desde un avión en el verano de 1994.³⁹



FIGURA II.16. *Rayo asociado a un tornado.*



FIGURA II.17. *Relámpagos producidos por descargas eléctricas entre nubes. Imagen: Richard Hurd, CC-BY 2.0.*

LOS MISTERIOSOS RAYOS GLOBULARES

Son muy antiguas las noticias que se tienen de otros fenómenos interesantes, generalmente asociados con las tormentas eléctricas, a los cuales se aplica la denominación genérica de “rayos globulares”, “rayos esféricos” o “rayos en bola” (figura II.18). A ellos se refiere un rico anecdotario, del cual forma parte la siguiente descripción, contenida en una carta al editor publicada en 1936 por un periódico inglés. Dice así:

Durante una tormenta vi bajar del cielo una bola al rojo vivo. Impactó en nuestra casa, cortó el hilo telefónico, quemó el marco de la ventana, y entonces se sumergió en una tina llena de agua que estaba debajo. El agua hirvió durante unos minutos, pero cuando se enfrió lo suficiente para que yo pudiera buscar, no encontré nada en ella.⁴⁰

En la sección de correspondencia de un número del año 1982 de la prestigiosa revista británica *Nature* puede leerse una descripción de lo que parece ser otra variante del mismo fenómeno:

Las tormentas eléctricas son frecuentes en la península de Entebbe, Lago Victoria (Uganda). Durante una de estas tormentas, que usualmente ocurren por la noche, hubo un relámpago y simultáneamente el estrépito del trueno asociado. Un segundo o menos después, varias bolas de unos 4-6 cm de diámetro [que emitían una] brillante luz azul, entraron en la habitación a través de una ventana que da al sur y “flotaron” en la habitación hasta salir por una ventana que da al este [...] Durante la misma estación lluviosa [volvió a ocurrir] lo mismo con el mismo efecto asombroso. Después de eso mantuvimos siempre cerradas las ventanas de un lado de la habitación y no volvimos a experimentar el fenómeno.⁴¹

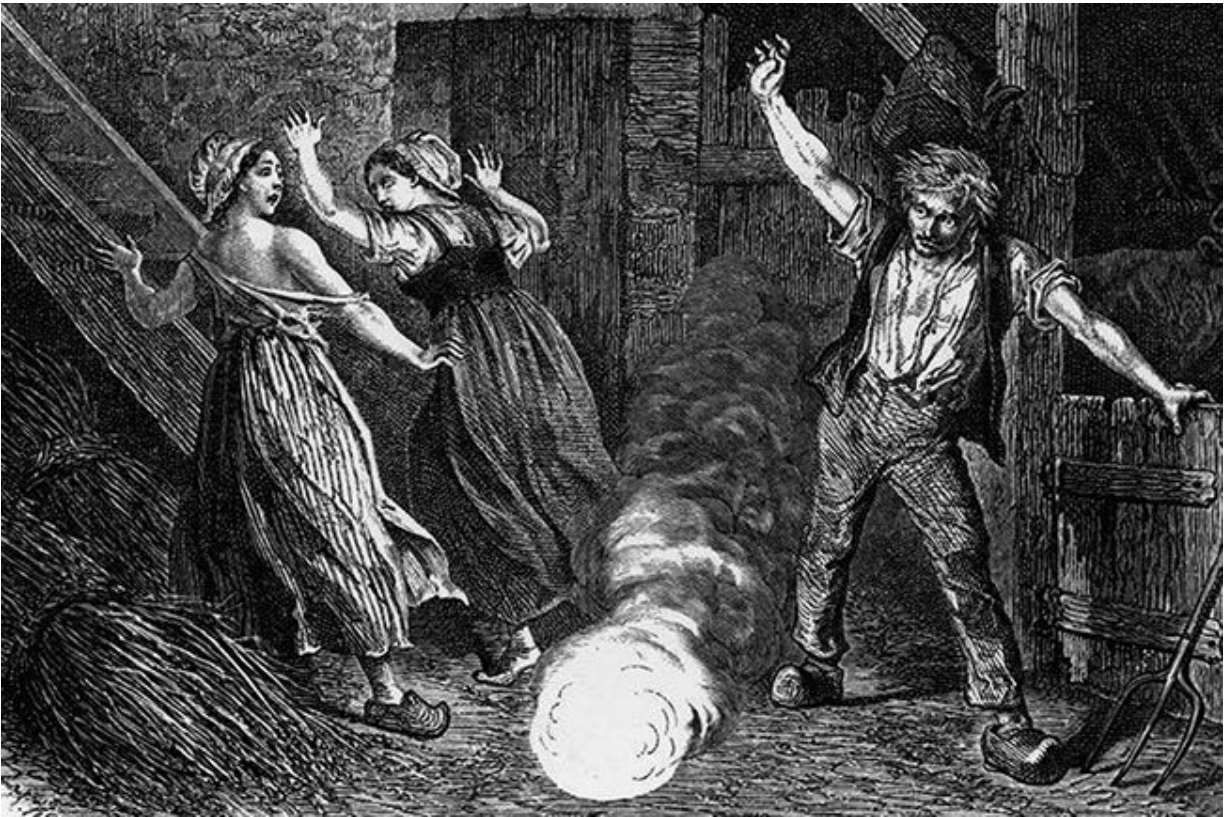


FIGURA II.18. *Un rayo globular atraviesa un granero, causando el espanto de todos, según un grabado francés del siglo XIX.*

Añadiré a lo dicho el extracto de una anécdota de finales de la década de 1960, que recoge el profesor Martin Uman, conocido experto en el tema del rayo. Se refiere a un piloto estadounidense que cuenta cómo una ocasión, mientras piloteaba un avión-cisterna (de los utilizados para abastecer de combustible en pleno vuelo a los bombarderos B-47) y se manifestaba la presencia de fuego de san Telmo alrededor de los bordes de las ventanillas delanteras del avión —un hecho familiar a los pilotos—

una bola de fuego de color amarillo-blanco de unos [45 cm] de diámetro emergió a través de los paneles centrales del parabrisas [, atravesó rápidamente la cabina y] avanzó hacia la parte trasera de la nave [...] Luego de aproximadamente 3 segundos de una reacción sorprendentemente tranquila por parte de los 4 miembros de la tripulación en el compartimento de vuelo, el operador [...] sentado al fondo de la nave llamó por el intercomunicador y describió con una voz nerviosa ¡una bola de fuego que había llegado rodando al compartimento de popa [...] y luego se salió del avión bailando sobre el ala derecha [hasta que desapareció] entre la noche y las nubes! Ningún ruido acompañó la llegada o la partida del fenómeno.⁴²

Se calcula que no menos de entre 5 y 10% de la población ha presenciado —o creído presenciar— alguna vez algo semejante a las situaciones que acaban de mencionarse, pero los testimonios disponibles suelen ser poco dignos de confianza, entre otras cosas porque pueden resultar de ilusiones ópticas ocasionadas en el observador por el

deslumbramiento de un relámpago, o por confusión con un fenómeno físico conocido, como la visión de una estrella fugaz o del arco voltaico que puede saltar entre los aisladores de una línea eléctrica afectada por un rayo.

Pese a que hace tiempo viene buscándose una explicación racional del fenómeno de los rayos globulares, y se han propuesto varias de ellas al efecto,⁴³ hasta el momento no se ha encontrado ninguna que sea generalmente aceptable para la comunidad científica. Según una hipótesis muy reciente, propuesta por dos especialistas neozelandeses, en ciertos casos el comportamiento de los rayos globulares pudiera explicarse suponiendo que éstos consisten en masas de pequeñísimas partículas incandescentes de silicio, producidas por las descargas eléctricas atmosféricas al penetrar en el terreno y vaporizar el material. Las partículas, que saldrían al aire agrupadas en forma de bola y serían arrastradas por el viento, podrían penetrar en una casa a través de las grietas y rendijas existentes en puertas y ventanas, sobre todo si se trata de construcciones antiguas. Naturalmente, queda por ver si esta explicación resulta avalada por la experiencia, y aun así, si es aplicable a todos los casos descritos o solamente a algunos de ellos.

GEOGRAFÍA DEL RAYO

Se denomina *nivel ceráunico* (del griego κεραυνός, *kerainós*, es decir, “rayo”) de una región del globo terráqueo al valor anual medio del número de días en que se ha “oído tronar” en la región. A falta de algo mejor, dicho valor puede tomarse como un índice de la frecuencia con la que ocurren las tormentas eléctricas locales.

Según un cálculo realizado en 1925, que hasta la llegada de la era espacial solía considerarse aceptable, a cada momento están ocurriendo unas 1 800 tormentas eléctricas en el planeta, las cuales aportan un total de aproximadamente 100 descargas eléctricas simultáneas por segundo,⁴⁴ cantidad que se reduce en la realidad a 44 (± 5), según los datos aportados por los satélites artificiales de la Tierra.⁴⁵

El nivel ceráunico de una región varía con la situación geográfica de ésta. Así, por ejemplo, mientras se observa que es muy pequeño en los lugares donde imperan altas presiones atmosféricas oceánicas o cuya latitud supera los 60 grados, dicho índice alcanza grandes valores en zonas de Indonesia, Uganda y la selva amazónica, con un máximo de 223 en la isla de Java. Un mismo país puede presentar regiones con grandes diferencias en su respectivo nivel ceráunico. Un buen ejemplo de ello es el caso de Estados Unidos, donde el nivel es cinco o menos en la costa del océano Pacífico, mientras que llega a 90 en la zona central de la península de la Florida, como se indica en el mapa de curvas isoceráunicas del territorio estadounidense, que aparece en la figura II.19;⁴⁶ ahí mismo se muestra la distribución de la actividad ceráunica en Francia y Córcega, y también se presenta la misma clase de información para Cuba, de manera particularmente detallada.

Pese a que los mapas de este tipo contienen información valiosa desde distintos puntos de vista, conviene tener presente que a la hora de proyectar un sistema de protección contra las descargas eléctricas atmosféricas en una localidad específica, más útil que la información que da el nivel ceráunico en la región correspondiente es el conocimiento del valor medio del número de rayos de nube a tierra por kilómetro cuadrado que caen anualmente en dicha región. En primer lugar, porque los truenos, que se toman como base para la elaboración de los mapas ceráunicos, pueden deberse tanto a rayos nube-tierra como a descargas eléctricas entre nubes o en el interior de ellas, especialmente en las regiones de alta latitud; y en segundo lugar, porque generalmente los truenos no son audibles a más de 15 km de donde se produce el rayo que los origina. Por esta razón, en la práctica resultan de particular interés los mapas que muestran la distribución del promedio anual de la densidad de rayos caídos, como el que se muestra en la figura II.20, que abarca la mayor parte del territorio mexicano.

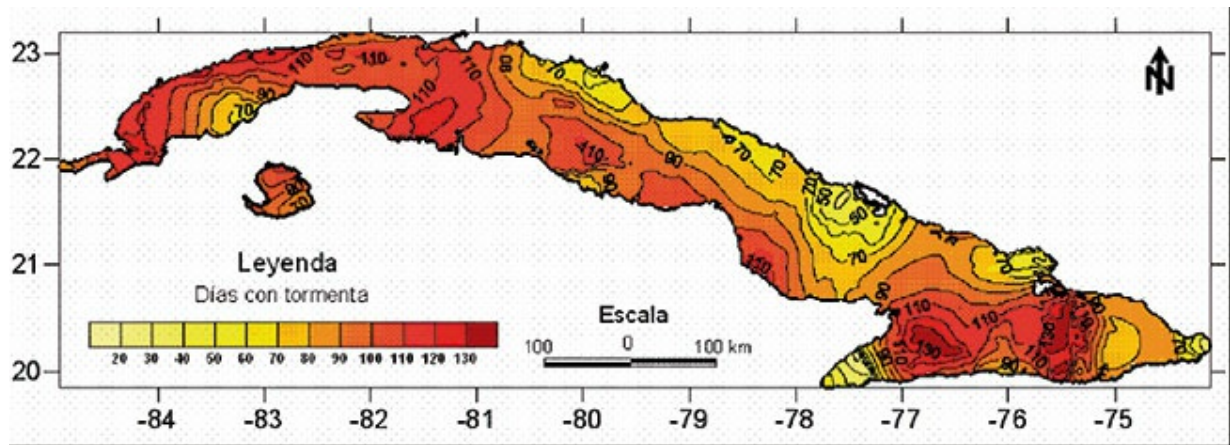
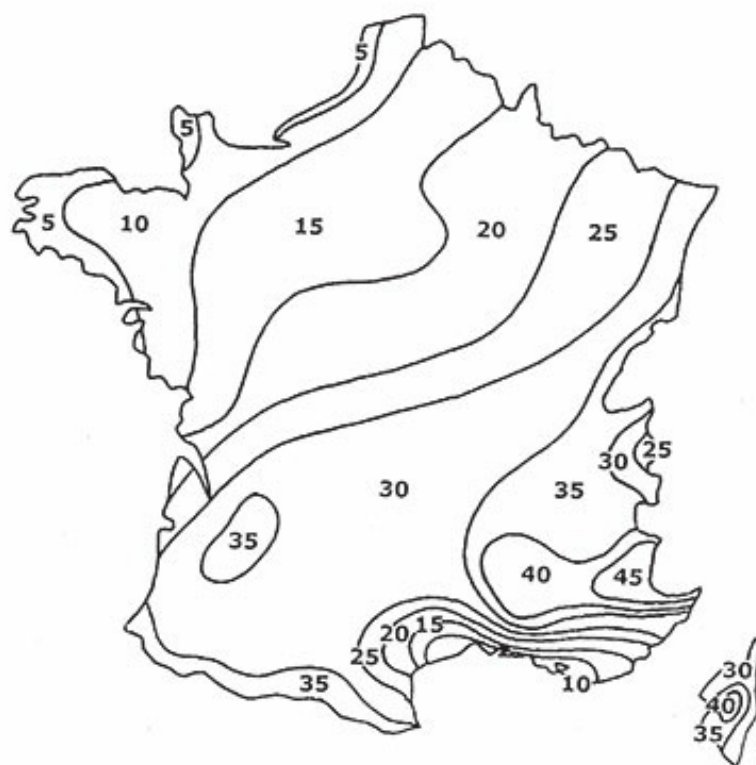
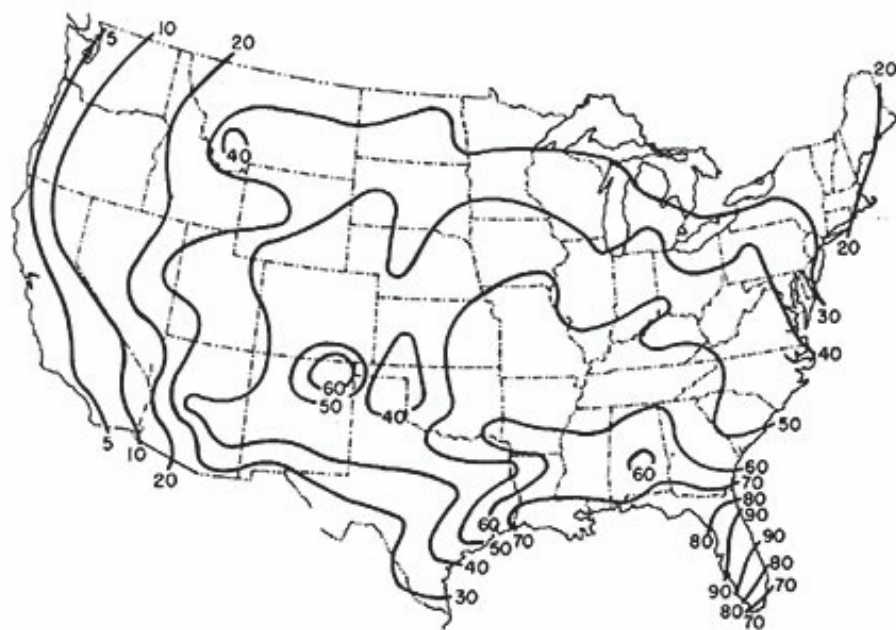


FIGURA II.19. Mapa de curvas y regiones isoceráunicas de Estados Unidos (página siguiente, arriba), Francia y Córcega (página siguiente, abajo), y Cuba (arriba).



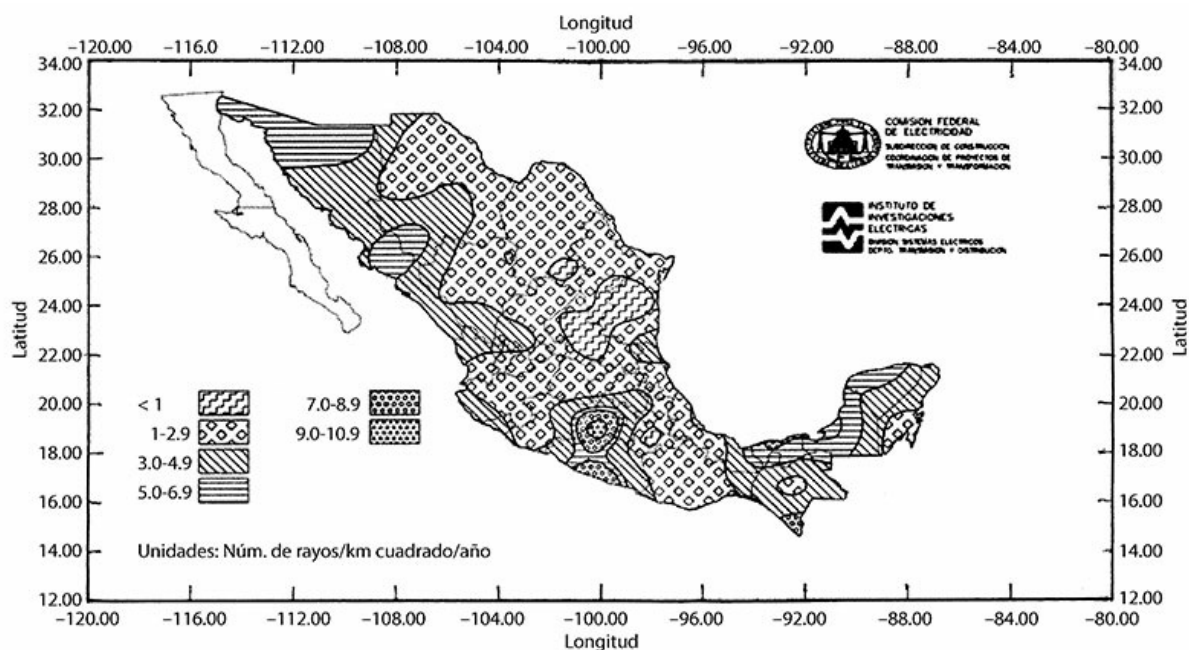


FIGURA II.20. Mapa del promedio anual de densidad de rayos en la mayor parte del territorio de México, elaborado a partir de los resultados de un proyecto conjunto del Instituto de Investigaciones Eléctricas (hoy INEEL) y la Comisión Federal de Electricidad, en el periodo 1983-1993.

A título de ejemplo ilustrativo señalaremos que mientras el nivel cerámico medio de Francia es 20, en promedio sólo caen al año sobre su territorio de uno a tres rayos por kilómetro cuadrado, valores estos últimos que, por cierto, son muy superiores en la generalidad de los países tropicales y en algunas regiones de África del Sur, América del Sur, México y Estados Unidos, que promedian anualmente 10 o 12 rayos por kilómetro cuadrado,⁴⁷ e incluso mucho más, como ocurre en un área de la Florida, entre Tampa y Orlando, conocida como “el callejón de los rayos”, donde dicha cifra llega a alrededor de 20. El segundo valor mayor a nivel mundial es de 158, cerca de la pequeña aldea congoleña de Kifuka, mientras que el primero (reconocido como récord Guinness en enero de 2014) es de unos 250 y corresponde a una zona de Venezuela próxima a la desembocadura del río Catatumbo en el lago de Maracaibo, al suroeste del mismo.

En este caso se asocia a un fenómeno meteorológico conocido como “relámpago del Catatumbo”, que el célebre geógrafo y explorador del siglo XIX, Alexander von Humboldt, describió como “explosiones eléctricas que son como fulgores fosforescentes”, y también se ha descrito como “un relámpago continuado que parece surgir del río”, resultado de múltiples sucesiones de descargas eléctricas, particularmente de nube a nube, que ocurren de noviembre a marzo y se manifiestan como un impresionante despliegue de relámpagos, generalmente no acompañados de truenos.⁴⁸ También en América del Sur (en torno a la ciudad de Teresina, situada al norte de Brasil)

se encuentra la tercera zona del mundo de mayor promedio anual de densidad de rayos, llamada “la llanura de los relámpagos”.

DESCONCIERTO DE MARINOS E INSPIRACIÓN DE ELECTRICISTAS

Era un hecho bien conocido por los marinos de siglos atrás que la caída de un rayo sobre un buque o cerca de él podía alterar considerablemente el funcionamiento de la brújula. Así, por ejemplo, hay constancia escrita de que en 1681, a bordo de un barco que navegaba rumbo a Boston, se comprobó por observación de las estrellas que el extremo de la aguja magnética que normalmente apuntaba al norte pasó a apuntar al sur luego de que la nave fue alcanzada por un rayo.⁴⁹ Cincuenta años después, la misma revista científica británica que había publicado aquella noticia describió cómo, en 1731, un rayo que penetró en el interior de una casa, además de derretir numerosas piezas de un juego de cubiertos que se guardaba en una caja, imantó varios cuchillos del mismo juego que parecían haber quedado intactos.⁵⁰

El conocimiento de hechos como los que acaban de mencionarse hizo inevitable que una vez convencidos de la naturaleza eléctrica del rayo, los hombres de ciencia sospecharan que todas las descargas eléctricas, cualquiera que fuese su origen, podían producir efectos magnéticos. El primero que trató de demostrarlo por vía experimental fue seguramente el propio Franklin, que en 1751 logró magnetizar una aguja de coser sometiéndola a la descarga de una botella de Leiden, pero el experimento no se consideró concluyente. La experimentación tomó una vía más promisoría cuando, a partir del comienzo mismo del siglo XIX, se dispuso de la pila de Volta, que permitía experimentar con corrientes eléctricas continuas, en lugar de las fugaces descargas obtenidas anteriormente mediante máquinas electrostáticas y botellas de Leiden.

Correspondió a un profesor de física y química danés, Hans Christian Ørsted, la gloria de haber hallado en 1820 la relación cuya existencia se sospechaba y que él mismo había estado buscando infructuosamente desde 1807. Al describir cómo habían sucedido las cosas, dijo que en el invierno de 1819 a 1820, en una clase de física que estaba impartiendo llamó la atención sobre “las variaciones de la aguja magnética durante una tormenta, y al mismo tiempo [expuso] la conjetura de que una descarga eléctrica pudiera actuar sobre una aguja magnética fuera del circuito galvánico”.⁵¹

En el curso de la clase realizó algunas manipulaciones experimentales sin que ocurriera nada particularmente interesante, pero al terminar se le ocurrió probar ver qué pasaba cuando se situaba paralelamente a una aguja magnética un alambre por el cual circulaba una corriente eléctrica. Cuando puso manos a la obra, la aguja giró sobre su eje y permaneció fuertemente desviada con respecto a su posición original mientras se mantuvieron las mismas condiciones (figura II.21). Luego se descubrió que la aguja

giraba exactamente al revés cuando se invertía el sentido de la corriente. Ørsted realizó experimentos adicionales para confirmar sus resultados, los cuales publicó en julio de 1820 y tenían un carácter esencialmente cualitativo, pero habrían de resultar de gran trascendencia para la ciencia porque después pasaron a constituir la base de lo que hoy se conoce como *electromagnetismo*.

El 11 de septiembre de 1820 marca el punto de partida de la elaboración de la teoría electromagnética, porque en aquella fecha el académico François Arago, recién llegado de un viaje al extranjero en el cual se había enterado de los hallazgos de Ørsted, los dio a conocer en una reunión formal de la Academia de Ciencias de Francia, información que despertó tal interés en otros miembros de la institución que el 18 de septiembre siguiente, exactamente una semana después, el académico André-Marie Ampère expuso ante sus colegas los primeros resultados de sus experimentos sobre el tema, a los que siguieron cuatro exposiciones sobre los descubrimientos experimentales que iba realizando, semana tras semana, acompañados de los respectivos principios teóricos que proponía, entre ellos la conclusión de que los campos magnéticos no eran otra cosa que manifestaciones de la “electricidad en movimiento” y que las propiedades de los imanes se debían a la existencia de corrientes moleculares que circulaban permanentemente alrededor de las partículas de materia: una genial anticipación de las futuras teorías electrónicas.



FIGURA II.21. Medalla conmemorativa del descubrimiento de Ørsted sobre la vinculación del magnetismo con la electricidad.

Hay que decir, sin embargo, que no fue Ampère el único investigador que obtuvo

resultados importantes a partir de la noticia del descubrimiento de Ørsted. Así, por ejemplo, el 25 de septiembre de 1820 el propio Arago dio a conocer su descubrimiento de que una corriente eléctrica que circula por un alambre es capaz de imantar permanentemente el acero y sólo momentáneamente el hierro dulce, con lo que estableció el principio del electroimán (que tardó poco en perfeccionarse hasta convertirse en la base de diversas aplicaciones electrotécnicas).⁵² Varias semanas después, Jean-Baptiste Biot y Félix Savart precisaron las características de la fuerza ejercida sobre un polo magnético por la corriente que circula a lo largo de un conductor rectilíneo, resultado que Laplace no tardó en generalizar.⁵³

Entre 1830 y 1831 Michael Faraday y Joseph Henry descubrieron, cada uno por su lado, que cuando la intensidad de una corriente eléctrica fluctúa también lo hace el campo magnético asociado a ésta, lo cual a su vez induce una fuerza electromotriz capaz de generar otra corriente eléctrica en cualquier conductor cercano. El valor pico de esta última resultará tanto mayor cuanto mayor sea la rapidez con que varíe la intensidad de la corriente inductora.

Faltaba, sin embargo, un cuerpo teórico que permitiera deducir como casos particulares del mismo los distintos fenómenos electromagnéticos individuales descubiertos por los investigadores. A ello dedicaron no pocos esfuerzos varios investigadores, pero fue James Clerk Maxwell quien, a partir de las concepciones de Faraday, elaboró en 1864 la teoría más productiva, en cuanto que permitía no sólo deducir de un único sistema de ecuaciones las leyes que regían los fenómenos aludidos, sino también predecir la propagación en el espacio de las perturbaciones electromagnéticas. El hecho de que la propagación se realizaba con la velocidad de la luz indicaba que lo que suele entenderse por luz no es otra cosa que la forma en que nuestra vista percibe las ondas electromagnéticas de determinadas frecuencias que se propagan por el espacio, lo cual no excluía la posibilidad de que existieran otras ondas cuyas frecuencias fueran imperceptibles para nuestros sentidos. Entre 1887 y 1888 Heinrich Hertz confirmó por vía experimental la existencia de ondas electromagnéticas de este tipo, las cuales hoy llamamos ondas radioeléctricas.⁵⁴

RAYOS RIGUROSAMENTE VIGILADOS

En 1895 Aleksandr S. Popov logró detectar ondas radioeléctricas emitidas por las descargas atmosféricas a una distancia de cinco o seis kilómetros, utilizando al efecto un dispositivo receptor muy sencillo conectado a un pararrayos empleado como antena receptora. La misma idea se desarrolló posteriormente con el propósito de avisar de la proximidad de tormentas eléctricas a empresas como, por ejemplo, las dedicadas a la fabricación de explosivos, a la operación de redes de telecomunicaciones, al suministro de energía eléctrica y al lanzamiento de naves espaciales, que podían resultar muy afectadas por los rayos (figura II.22).

En la actualidad se anuncian comercialmente equipos de alerta de rayos para ser instalados en áreas al aire libre frecuentadas por un público al que sería difícil de evacuar segura y rápidamente durante una tormenta eléctrica. Esos equipos suelen estar diseñados para medir automáticamente la componente vertical de la intensidad del campo eléctrico local, activar alarmas cuando registran valores característicos de una situación amenazante y enviar una señal de vuelta a la normalidad cuando pasa el peligro —por supuesto, el sistema no está exento de generar falsas alarmas—. ⁵⁵ También se comercializan pequeños detectores portátiles que ofrecen un cálculo de la distancia a la que ha caído un rayo midiendo la intensidad del impulso electromagnético generado.



FIGURA II.22. Antena destinada a la recepción de perturbaciones radioeléctricas originadas por rayos.

Ya sea empleando una estación de radar o dos estaciones de radiolocalización muy alejadas una de otra pero interconectadas telefónicamente, es posible determinar con buena precisión la posición de tormentas eléctricas distantes a cientos de kilómetros. Utilizando esta información, junto con la suministrada por redes de equipos de alerta de rayos como los ya mencionados, y otros de igual propósito a bordo de satélites artificiales, se han creado mapas, que se actualizan cada 10 minutos, en los cuales se muestran las zonas de un país o una región donde se considera que es mayor el peligro de ser alcanzado por un rayo.

Como complemento de lo que se ha expuesto hasta ahora y para concluir el capítulo, conviene recordar que las perturbaciones electromagnéticas transmitidas a gran distancia por los rayos tienen típicamente el carácter de impulsos irregulares de muy corta duración que ocurren al azar, los cuales, al llegar a la antena de un radiorreceptor, introducen en éste un “ruido de fondo” o “estática” que afecta negativamente la inteligibilidad de las señales que se desea captar. Estas perturbaciones pueden ser originadas tanto por las tormentas eléctricas locales como por las que ocurren a grandes distancias, incluso en otras regiones del planeta (particularmente en las zonas tropicales) y se propagan por reflexión en las capas fuertemente ionizadas de la atmósfera. El nivel de ruido resultante depende de la hora del día, las condiciones meteorológicas, la estación del año, la localización geográfica y la frecuencia a la que está sintonizado el receptor. En general, puede decirse que el ruido eléctrico atmosférico es mayor de noche que de día, disminuye al aumentar la latitud y deja de ser un factor limitante en la recepción cuando la frecuencia de las señales que se desea recibir supera los 30 MHz, es decir, cuando está más allá de la banda de las llamadas ondas cortas.

III. Más allá del viejo pararrayos

Él [el rayo] no es más que un gran fenómeno eléctrico [que] Franklin obliga a descender tranquilamente sobre la tierra.

VOLTAIRE, *Diccionario filosófico* (1770)

Decía yo en el primer capítulo que había comenzado a escribirlo en medio de una tormenta veraniega con su profusión de truenos y relámpagos, pero sin que aquello me alarmara en absoluto. Un par de años después de aquel comienzo sucedió que un buen día me interrumpió la siesta un tremendo trueno, el más ensordecedor que había oído en mi vida. “Seguro que fue muy cerca de aquí”, le comenté a mi media naranja, pero volví a conciliar el sueño como si tal cosa. Tres horas más tarde me llegó la noticia de que había caído un rayo bastante más cerca de lo que había imaginado, ¡nada menos que ocho pisos directamente por encima del mío, en el mismo edificio! Algo insólito, por cuanto en los cuarenta y tantos años que había vivido allí con mi familia nunca antes había tocado el inmueble una descarga eléctrica atmosférica. Al día siguiente se tomó la foto del destrozo ocasionado que aparece en la figura 1.2.

Por cierto que el edificio del cuento, cuya construcción data de la década de 1950, carecía de protección adecuada contra los rayos, quizás porque en aquel entonces se dejó el asunto... para más adelante. Había de transcurrir algo más de medio siglo antes de que la realidad nos recordara a todos los vecinos que el tema de la protección del inmueble contra el “fuego del cielo” no era cosa de juego.

El problema es más complicado de lo que pudiera parecer a primera vista. Así lo indica, en primer lugar, el hecho de que, en su tiempo, la adopción generalizada del pararrayos de Franklin no fue consecuencia indiscutible de una sucesión ininterrumpida de éxitos espectaculares que uno que otro fallo más o menos explicable no logró opacar. Si hubiera sido así, la persistencia de las objeciones que siguieron formulándose repetidamente durante años contra la difusión del nuevo dispositivo habría sido pura obsesión de fanáticos y tontos de capirote. Porque es innegable que los detractores del pararrayos también podían aducir a favor de su posición algunos casos de rayos que habían causado grandes estragos en construcciones supuestamente bien protegidas por las famosas varillas de Franklin.

Ciertamente, cuando se producían fracasos así, éstos podían atribuirse casi siempre a deficiencias en la instalación de los bajantes o en las conexiones a tierra. En consecuencia, al cabo de cierto tiempo se establecieron normas precisas para la colocación de sistemas de tierra eficaces y conductores (bajantes) adecuados. De estos últimos se requería, entre otras cosas, que tuvieran pocos y muy buenos empalmes y una sección transversal de área lo suficientemente grande como para que no se sobrecalentasen al paso de las grandes corrientes involucradas, así como que siguieran un trayecto tan corto y libre de curvas cerradas como fuese posible, para evitar que la autoinducción electromagnética obstaculizara sensiblemente el paso de la corriente. Con todo, la vida se encargó de demostrar que incluso si se seguían al pie de la letra las rigurosas normas establecidas, de ninguna manera resultaba absoluta la protección que ofrecían los pararrayos contra los efectos destructivos de las descargas atmosféricas. A decir verdad, no cabía extrañarse de la falta de unanimidad en las opiniones sobre el tema.

Consultado al efecto por el secretario principal de la Compañía de las Indias Orientales (británica), el insigne Michael Faraday respondió que estaba a favor del uso del pararrayos, aunque, acotaba, “también es muy cierto que uno [un pararrayos] mal erigido es peor que ninguno, y puede causar gran daño. Pese a estas consideraciones tengo la más fuerte convicción de que los conductores [pararrayos] *bien aplicados* son perfectos defensores de los edificios contra los daños causados por el rayo”.

Añadía que, en cuanto a las varillas,

no las pondría lejos de la extremidad superior de los edificios [y tomaría] especial cuidado en hacer extenso y bueno su contacto con la tierra húmeda mediante planchas de cobre [...] Una varilla que se elevara tres metros sobre cualquier parte del techo o las chimeneas de una casa pudiera defender esa casa perfectamente en las proximidades de la varilla, pero no a tres metros de ella.¹

En realidad, el problema era bastante más complejo de lo que imaginaba Faraday, como se vio después.

UNA PROTECCIÓN RELATIVA

Sobre la base de estudios estadísticos realizados, consideraciones económicas y otras, a partir de 1882 se estableció en Gran Bretaña como regla que, en general, una varilla de Franklin protegería “aceptablemente” sólo a los objetos incluidos en un cono de revolución imaginario (denominado “cono de protección”) cuyo vértice coincidiese con la punta de la varilla y cuya generatriz formase un ángulo de 45° con la vertical. Esta regla equivalía a tomar el radio R del círculo determinado sobre el terreno por el cono de protección, igual a la altura h a la que se encontraba la punta de la varilla. En los Estados Unidos y otros países se adoptó una modificación de dicha regla, consistente en hacer $R = 2h$, lo cual implicaba aceptar un aumento en la probabilidad de que un rayo pudiera dañar algún objeto situado dentro del cono de protección. Por el contrario, cuando se deseaba reducir significativamente esta probabilidad (como sería el caso de un almacén que contuviera productos inflamables o explosivos) solía tomarse $R = \frac{1}{2}h$.²

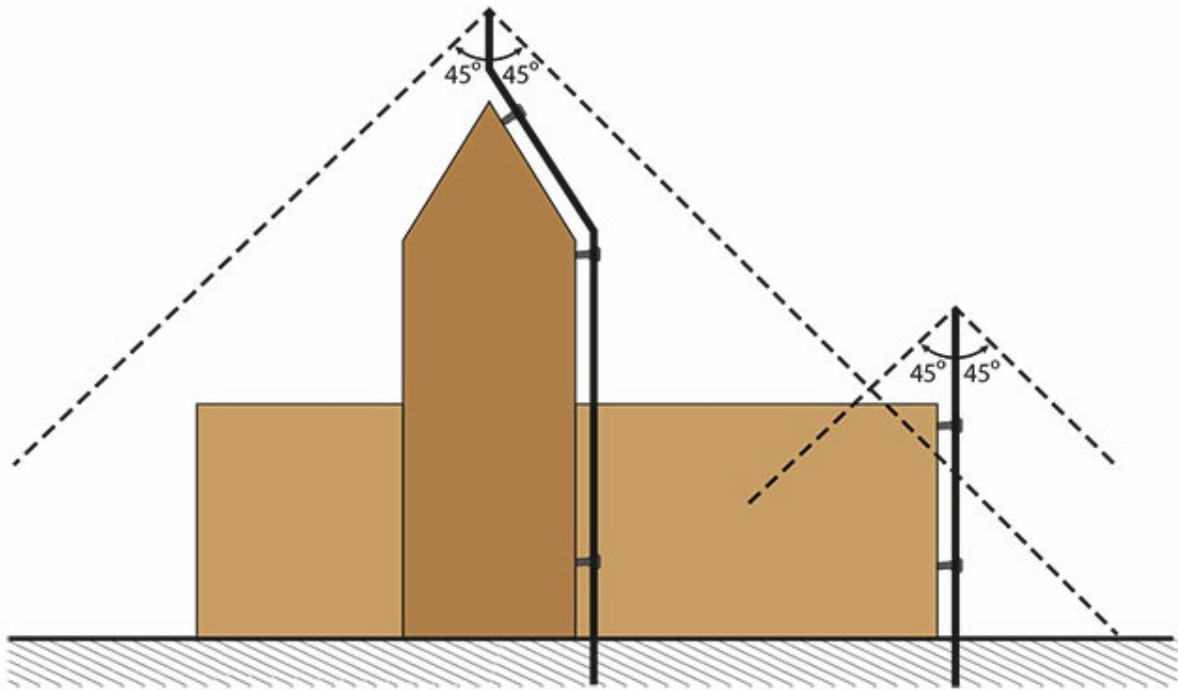


FIGURA III.1. Cono de protección de 45° aplicado al diseño de una instalación de pararrayos.

La aplicación práctica de uno u otro de los criterios mencionados a menudo requiere el empleo de sistemas constituidos por varios pararrayos provistos de varillas de dimensiones adecuadas, como se indica esquemáticamente en la figura III.1 para $R = h$.

En cualquier caso, convenía tener en cuenta que el hecho de ajustarse de manera estricta a las reglas establecidas no excluía por completo la posibilidad de que un rayo cayera en un punto supuestamente protegido a tenor de los paradigmas generalmente aceptados.

Los criterios relativos a la determinación de la zona de protección ofrecida por un sistema de pararrayos han variado con el tiempo. Así, por ejemplo, el *criterio de los 45°* que acaba de describirse se pensó durante mucho tiempo aplicable a edificaciones de cualquier altura, pero actualmente suele considerarse insatisfactorio cuando la altura supera los 20 metros. Para este caso se ha generalizado la aplicación del llamado *método de la esfera rodante*, cuyos detalles puede hallarlos el lector en obras especializadas, como la de Martin A. Uman titulada *The Art and Science of Lightning Protection*. Este método permite determinar los puntos de una estructura susceptibles de recibir una fulminación lateral directa, como ocurre a veces en estructuras cuya altura supera los 120 metros, y muy raramente cuando se elevan a menos de 60 metros sobre el suelo.³

JAULAS PROTECTORAS

En enero de 1836 Faraday construyó en el salón de conferencias de la Real Sociedad de Londres una especie de caja en forma de cubo de tres metros y medio de arista, cuya ligera armazón de madera descansaba sobre cuatro patas de vidrio. La mayor parte de la superficie interior de las paredes, que eran de papel ordinario, estaba recubierta de papel de estaño en contacto metálico con dos entramados de alambre de cobre, uno de ellos dispuesto sobre el techo y el otro sobre el piso del recinto. Entonces, escribe Faraday,

entré en el cubo y me acomodé en él, y utilizando velas encendidas, electrómetros y demás [medios de detección] de estados eléctricos, no pude hallar la menor influencia sobre ellos [...] aunque el exterior del cubo estaba fuertemente cargado todo el tiempo, y de su superficie exterior emanaban por todas partes grandes chispas y efluvios.⁴

El resultado de este experimento condujo a la importante conclusión de que las perturbaciones eléctricas originadas en el exterior de una caja metálica cerrada eran prácticamente imperceptibles en su interior. No tardó en comprobarse que bastaba sustituir las láminas metálicas de la caja por una red suficientemente tupida de hilos de cobre o de otro material buen conductor de la electricidad como para conseguir, en muchos casos, un blindaje eléctrico lo bastante bueno para los efectos prácticos: de ahí la denominación de *jaula de Faraday* con que se conocen los recintos de este tipo. Nada de raro tiene, pues, que tarde o temprano aquel resultado experimental inspirase el desarrollo de nuevos sistemas de protección contra las descargas eléctricas atmosféricas.

En armonía con semejante línea de pensamiento, combinada con las ideas originales de Franklin, el físico belga Louis Melsens propuso un sistema de protección contra los rayos consistente en una red de cintas o cables metálicos gruesos, cuidadosamente interconectados y puestos a tierra en varios puntos, que seguían los principales salientes afilados de la estructura que se deseaba proteger e incluían varias puntas captadoras o terminales aéreas, como se muestra en la figura III.2. Una variante de este sistema, recomendada en la década de 1930 para proteger un edificio genérico, se ilustra en la figura III.3.⁵

El sistema de Melsens se instaló por primera vez en 1865, en la casa consistorial de la ciudad de Bruselas, y luego se difundió ampliamente. Lo que no significaba que la protección ofrecida por el sistema fuese infalible, como se encargó de demostrar el incendio que en cierta ocasión originó una chispa inducida por un rayo al inflamar una fuga de gas en el interior del ya mencionado ayuntamiento de Bruselas, edificio que, en aquel entonces, se consideraba el mejor protegido del mundo contra las descargas

eléctricas atmosféricas.⁶

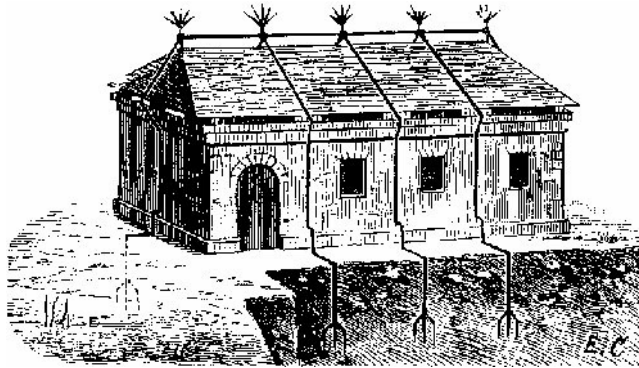


FIGURA III.2. *Instalación de pararrayos del sistema Melsens.*

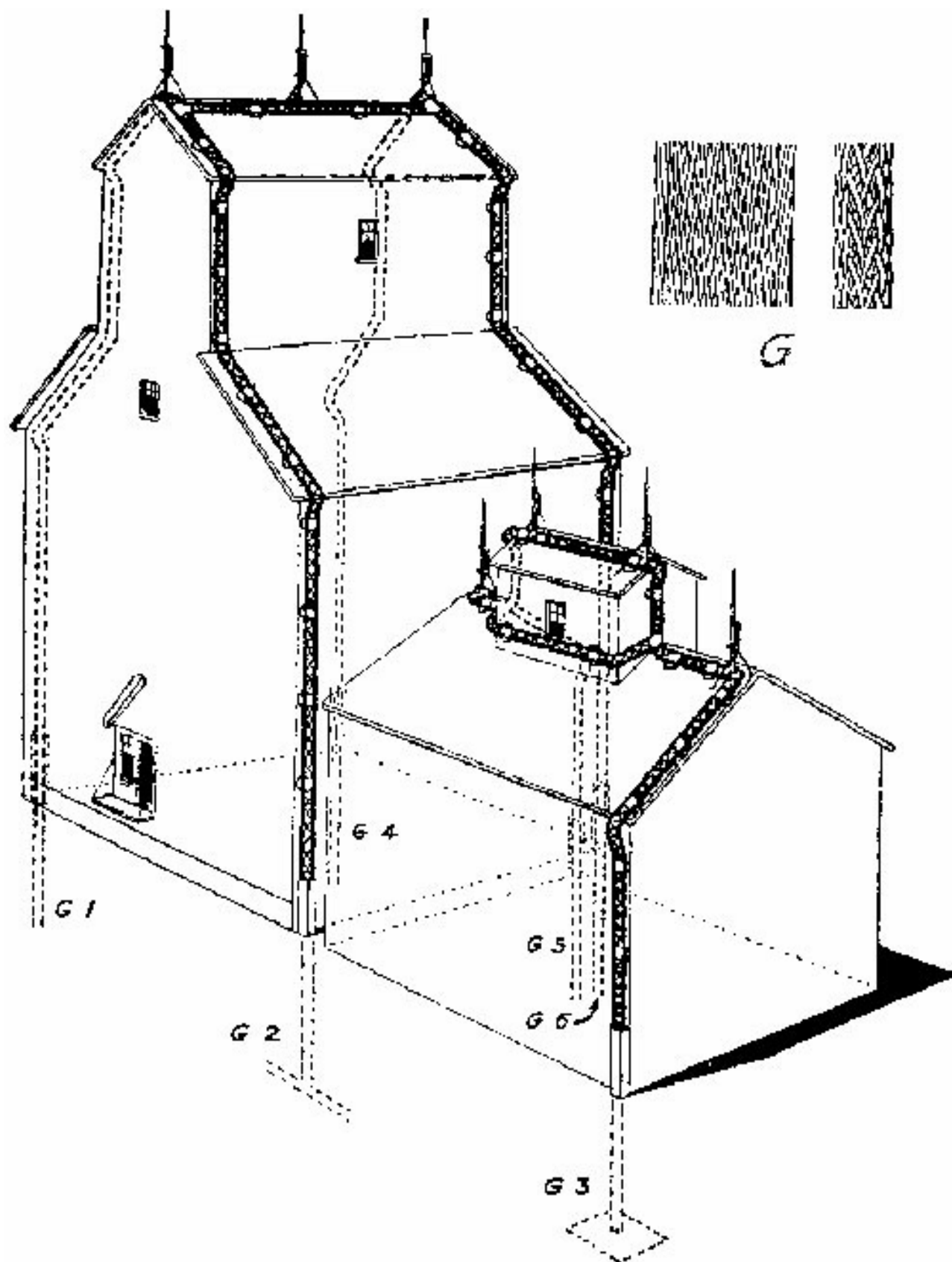


FIGURA III.3. Instalación de pararrayos inspirado en el sistema Melsens. Nótese los múltiples bajantes G1, G2..., G6 y la representación de tres formas de tomas de tierra: varilla hundida en

*tierra húmeda (G1), conexión a tubería metálica de agua (G2), plancha de cobre bajo tierra (G3).
Arriba, a la derecha: detalle de dos tipos de conductores trenzados utilizados comúnmente (G).*

Con el tiempo, distintas instituciones encargadas al efecto han establecido especificaciones que deben cumplir los sistemas de protección contra los rayos para mejorar su fiabilidad. Por ejemplo, instalar terminales aéreos a lo largo del muro perimetral de las azoteas a intervalos de unos seis o siete metros (como se indica en la figura III.4)⁷ complementados con terminales adicionales en medio de la azotea cuando las dimensiones de ésta superan los $15\text{ m} \times 15\text{ m}$. Asimismo se recomienda disponer simétricamente con respecto a la edificación los múltiples bajantes del sistema de pararrayos, con el doble propósito de disminuir la diferencia de potencial entre objetos y equipos conectados a los bajantes a diversas alturas, y de minimizar el daño a equipos electrónicos debido a eventuales sobretensiones por inducción electromagnética de las fuertes corrientes que puedan circular en los bajantes.⁸ Adviértase, sin embargo, que por razones económicas en lugar de bajantes individuales actualmente suele utilizarse para los mismos fines el acero estructural de las edificaciones que lo incorporan, a condición de que se tomen medidas estrictas, como el uso de soldadura en lugar de remaches, para garantizar una resistencia eléctrica suficientemente baja en las uniones metálicas.⁹

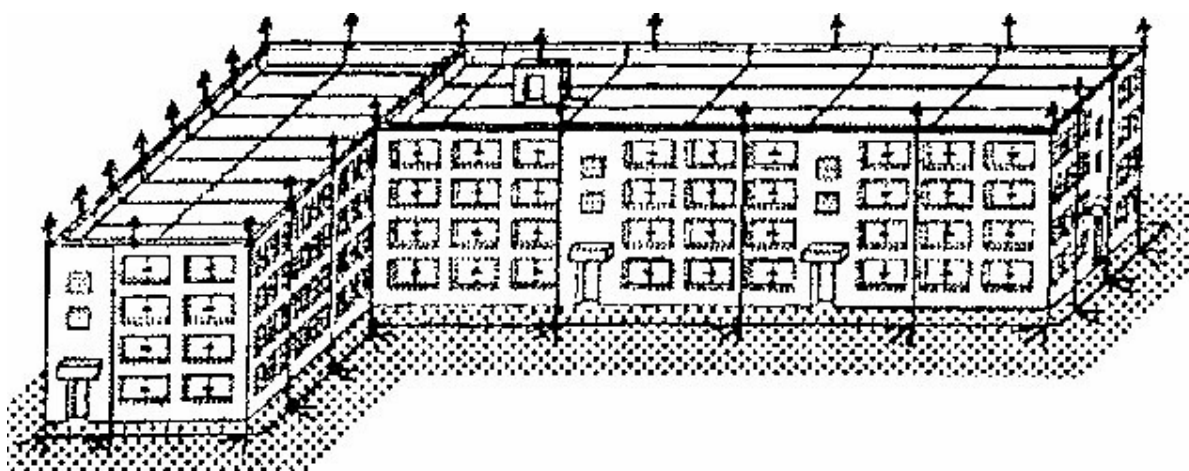


FIGURA III.4. Edificio de azotea protegido contra el rayo mediante un sistema tipo Melsens, diseñado de acuerdo con normas generalmente aceptadas en la actualidad, incluida la interconexión directa de las tomas de tierra individuales de los terminales aéreos.

Con todo, la famosa Torre Eiffel de París, construida en 1889 con piezas de acero remachadas, puede considerarse una eficaz jaula de Faraday, a tal punto que aun cuando en numerosas ocasiones ha sido alcanzada por rayos, jamás se ha registrado daño alguno a personas u objetos en su interior, aunque sí a elementos estructurales de la cúspide.

La figura III.5 muestra la que pudiera considerarse una variante del sistema de jaula

de Faraday instalada en el Centro Espacial Kennedy de la NASA. Consiste en una red de cables conductores puestos a tierra por sus extremos y sostenidos en alto por cuatro mástiles aisladores, que resulta muy conveniente para la protección de espacios abiertos carentes de apoyo arquitectónico.

En la figura III.6, se muestra una versión muy sencilla de la anterior, utilizada por la agencia espacial estadounidense para proteger de las descargas eléctricas atmosféricas sus transbordadores espaciales, mientras se encuentran estacionados en la plataforma de lanzamiento.



FIGURA III.5. Lanzador espacial Atlas V a punto de despegar en el Centro Espacial Kennedy en misión exploratoria a Plutón (Florida, EUA, enero de 2006), protegido contra los rayos mediante una red de cables conductores conectados a tierra y sostenidos sobre el lanzador por cuatro mástiles aisladores. Imagen: Kennedy Space Center Public Affairs.



FIGURA III.6. Transbordador espacial en su plataforma de lanzamiento, protegido contra las descargas eléctricas atmosféricas por un hilo de unos m de largo con ambos extremos fijos a tierra, que cuelga por su punto medio de lo más alto de la estructura de apoyo. Imagen: NASA/Frank Michaux.

EN BUSCA DE UNA PROTECCIÓN ABSOLUTA

En una conferencia que dictó en 1876 ante la British Association, James Clerk Maxwell (figura III.7), el creador de la teoría electromagnética que lleva su nombre,¹⁰ expresó su criterio de que para proteger una estructura de los efectos del rayo de manera absoluta

sería suficiente rodear [la estructura] de un material conductor, revestir el techo, las paredes y el piso con gruesas láminas de cobre, y entonces no tendría lugar ningún efecto eléctrico en su interior debido a una tormenta eléctrica exterior. No habría necesidad de ninguna conexión a tierra. Si [la estructura] fuese entonces alcanzada por un rayo, permanecería cargada durante algún tiempo, y una persona parada afuera sobre el terreno que tocara la pared pudiera recibir una descarga eléctrica, pero dentro no se percibiría ningún efecto eléctrico, ni aun con el electrómetro más delicado.¹¹

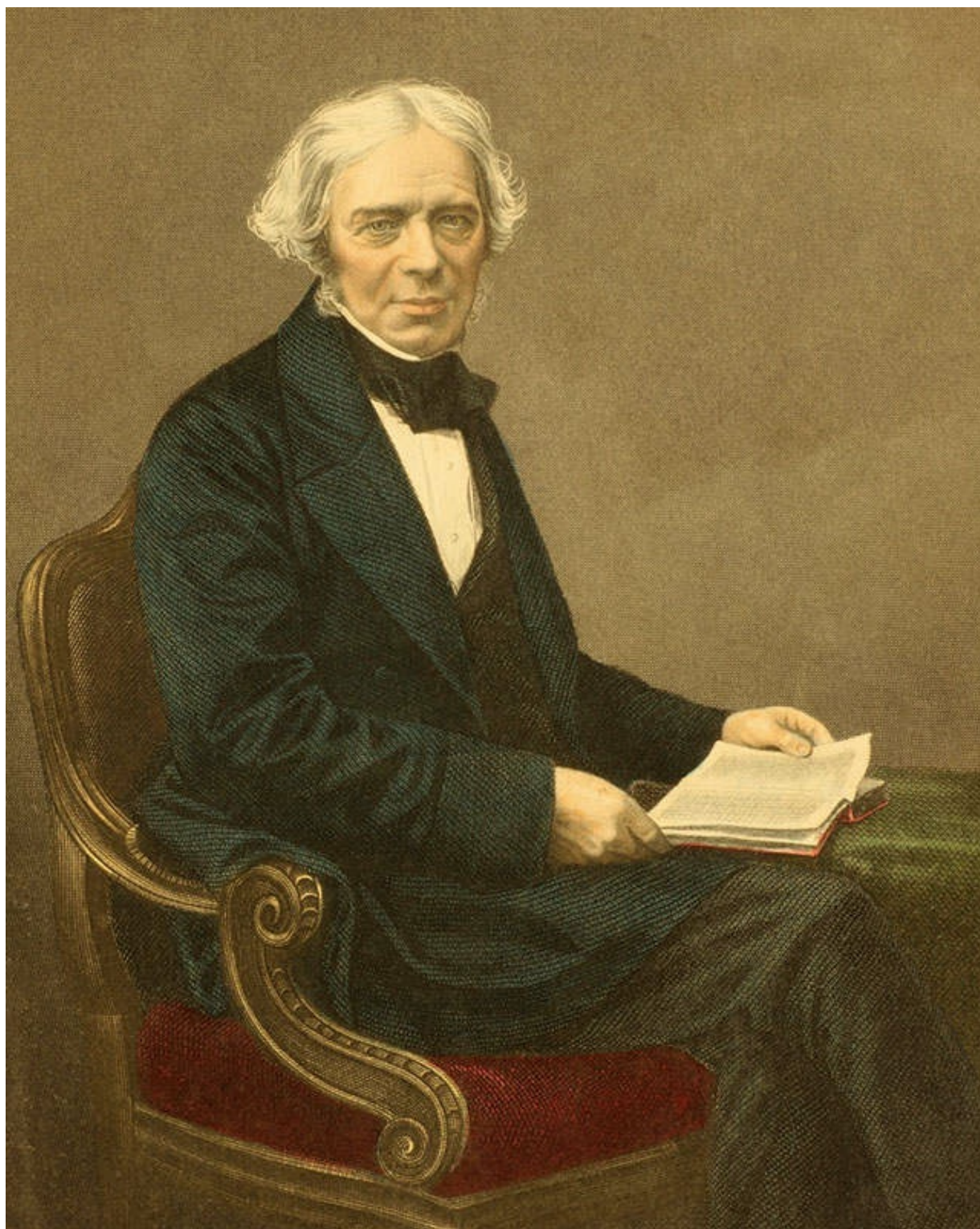


FIGURA III.7. Arriba: Michael Faraday (1791-1867) (imagen: iStock /Georgios.Art); enseguida: James Clerk Maxwell (1831-1879). Del laboratorio a la protección contra el rayo.



La mayoría de los autores que se ocupan de la teoría de la electricidad incluyen una justificación bastante detallada del “efecto pantalla” que ofrece un recipiente metálico al independizar su ambiente interior de los fenómenos electrostáticos que ocurren en el exterior,¹² como sería el caso, digamos, de la presencia de una nube de tormenta que se mantuviera prácticamente inmóvil y poseyese una gran carga eléctrica. Pero muy pocos advierten que cuando cambia la situación electrostática externa, el blindaje es sólo parcialmente efectivo, pues a las cargas eléctricas inducidas en el metal les toma cierto tiempo —brevísimo, por supuesto— reacomodarse para pasar de un estado electrostático a otro.¹³

Tampoco abundan los textos en que puede encontrarse una explicación teórica del efecto pantalla al que en realidad se refiere Maxwell, la cual difiere totalmente de la que acaba de mencionarse, pues el rayo no constituye un fenómeno de carácter electrostático sino electrodinámico, con la presencia de corrientes eléctricas transitorias y sus campos electromagnéticos variables asociados. Éstos inducen las llamadas corrientes parásitas o de Foucault en las paredes metálicas del recipiente de referencia, tales que tienden a cancelar cualquier efecto electromagnético en su interior, de modo que se obtiene un excelente (aunque no perfecto) blindaje electromagnético, siempre que el grosor de las paredes metálicas no sea mucho menor que un cierto grado determinable a partir del conocimiento de la rapidez con la que varían las corrientes asociadas a los rayos, y de las propiedades eléctricas y magnéticas de las paredes del recipiente.¹⁴ Añádase a ello que una pared metálica de grosor insuficiente puede ser horadada por una descarga eléctrica que incida directamente sobre ella.

Entendía Maxwell que, en la práctica, para lograr una protección suficientemente buena contra los rayos en las edificaciones, bastaba con sustituir las costosas láminas metálicas antes mencionadas por una red de gruesos alambres de cobre, los cuales podían empotrarse en las paredes “para evitar su robo”.

En esencia, aquella idea suele aplicarse en las actuales edificaciones de hormigón armado utilizando la armadura de acero de techos, pisos y paredes con sus elementos convenientemente soldados, para conseguir el equivalente a una jaula de Faraday, útil como protección contra los efectos del rayo, salvo, quizás, en puntos muy próximos a los espacios entre las barras de acero. Nada menos que en los locales de los laboratorios estadounidenses Lawrence, dedicados al ensayo e investigación de explosivos, en Livermore, California, se ha establecido que —entre otros requisitos— basta mantener materiales, equipos y personal a una distancia de las paredes de 15 o más centímetros para lograr un efecto pantalla tal que no sea necesario desalojar los locales durante una tormenta eléctrica, ante el temor de que desde una pared salte una chispa capaz de detonar alguna carga explosiva con la que se esté trabajando.¹⁵

Ahora bien, es difícil imaginar que sea factible prescindir de algunas conexiones con el exterior en un local protegido por una jaula de Faraday, puesto que para que se pueda trabajar en su interior por lo general deberán introducirse en él tuberías diversas, así como líneas de transmisión de energía eléctrica, telefónicas y de datos, lo cual puede degradar extraordinariamente la protección ofrecida contra las descargas eléctricas atmosféricas, si no se toman las medidas pertinentes. Ya en el último cuarto del siglo XIX el propio Maxwell advertía:

Si [...] cualquier conductor, tal como un hilo telegráfico o un tubo metálico de suministro de agua o de gas, entra al edificio desde el exterior, el potencial de dicho conductor puede ser diferente del potencial del edificio, a menos que se conecte a la envoltura conductora de éste. De aquí que los tubos de suministro de

agua o de gas, si alguno entra al edificio, tengan que conectarse al sistema de pararrayos, y puesto que conectar un hilo telegráfico con éste inutilizaría el telégrafo, deberá impedirse que [una línea telegráfica] entre desde el exterior a una fábrica de pólvora, aunque pueden tenerse campanillas eléctricas y otros aparatos telegráficos dentro del edificio.¹⁶

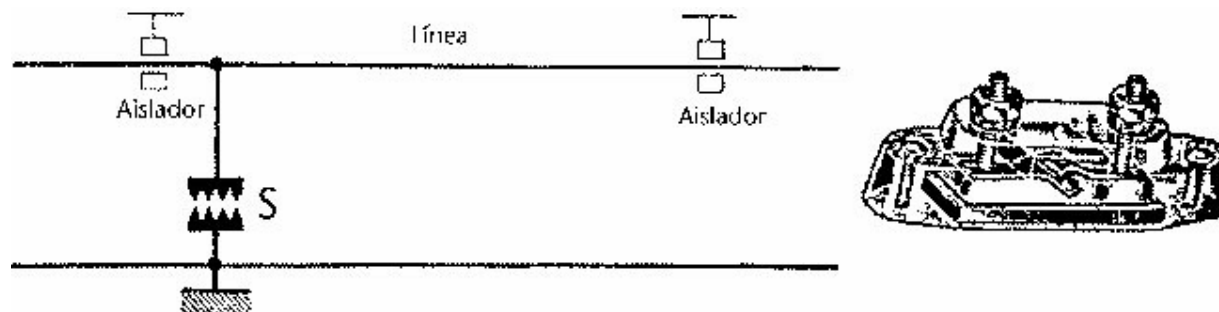


FIGURA III.8. A la izquierda: hilo eléctrico conectado a tierra a través de un supresor (S) de sobretensiones transitorias. A la derecha: sencillo dispositivo de este tipo, otrora utilizado ampliamente para puentear a tierra el extremo libre de los bajantes de antena.

Sin embargo, a mediados del siglo XIX se resolvió en la práctica el problema de introducir hilos telegráficos en un recinto protegido conectándolos a la envoltura protectora a través de un *limitador o supresor de sobretensiones transitorias* (figura III.8). Se trataba de un dispositivo que en condiciones normales se comporta eléctricamente como un excelente aislador, pero que, para todos los efectos prácticos, se convierte en un excelente conductor cuando la tensión o voltaje a su través alcanza momentáneamente un valor demasiado elevado, de tal manera que vuelve a su condición aisladora en cuanto cesa la sobretensión. Así se evita que la caída de un rayo en las proximidades de una línea telegráfica al aire libre produzca una chispa en el interior del recinto protegido.

Los primeros supresores de sobretensiones transitorias se utilizaron en las oficinas telegráficas.¹⁷ Consistían en dos electrodos metálicos en forma de sierra con sus dientes enfrentados y muy próximos entre sí, entre los cuales, por “efecto de punta”, debía saltar una chispa que condujera la descarga a tierra al producirse una sobretensión peligrosa, para volver a la normalidad al desaparecer la sobretensión.

Con posterioridad se han venido utilizando para el mismo propósito distintos dispositivos, entre ellos algunos que incorporan materiales sólidos cuya resistencia eléctrica decrece bruscamente con el súbito aumento del voltaje aplicado y recupera de inmediato su elevado valor original al restablecerse la normalidad. Dispositivos de este tipo se aplican no sólo a la protección de líneas de transmisión telefónicas, aparatos radorreceptores y otros equipos propios del campo de las telecomunicaciones y la informática, sino también a la protección de equipos eléctricos industriales, especialmente los relacionados con la transmisión y distribución de la energía eléctrica,

como veremos en seguida.¹⁸

PROTEGIENDO LOS SISTEMAS ELECTROENERGÉTICOS

En particular, las líneas aéreas de alta tensión que se utilizan para transportar la energía eléctrica de un punto a otro sobre grandes extensiones de terreno, son extremadamente susceptibles a los efectos de las descargas eléctricas atmosféricas que ocurren a lo largo de su trayectoria. Con el fin de interceptar los rayos que de otra manera caerían directamente sobre los conductores de alta tensión, por encima de éstos se tienden *conductores de guarda o de tierra*, así llamados porque se conectan firmemente a tierra a través de la estructura metálica de cada una de las torres de la línea, como se muestra en la figura III.9. De esta forma realizan la función de verdaderos pararrayos destinados a evitar graves daños a la línea.

Sin embargo, las fuertes perturbaciones eléctricas originadas por la caída de un rayo sobre algún punto de una línea de transmisión o muy cerca de ella originan fluctuaciones transitorias de la tensión eléctrica que pueden superar la capacidad de los medios de protección instalados en la línea para evitar que se propaguen. En tales condiciones, estas fluctuaciones viajan con extraordinaria celeridad por los conductores y pueden llegar a producir sobretensiones transitorias capaces de dañar permanentemente un transformador u otro equipo conectado a la línea de transmisión en un punto bastante alejado de donde se produjo la fulminación. Por esta razón suelen instalarse supresores de sobretensión adecuados, conectados directamente a los transformadores de las subestaciones y también a otros equipos de planta eléctrica exterior (figuras III.10 y III.11).



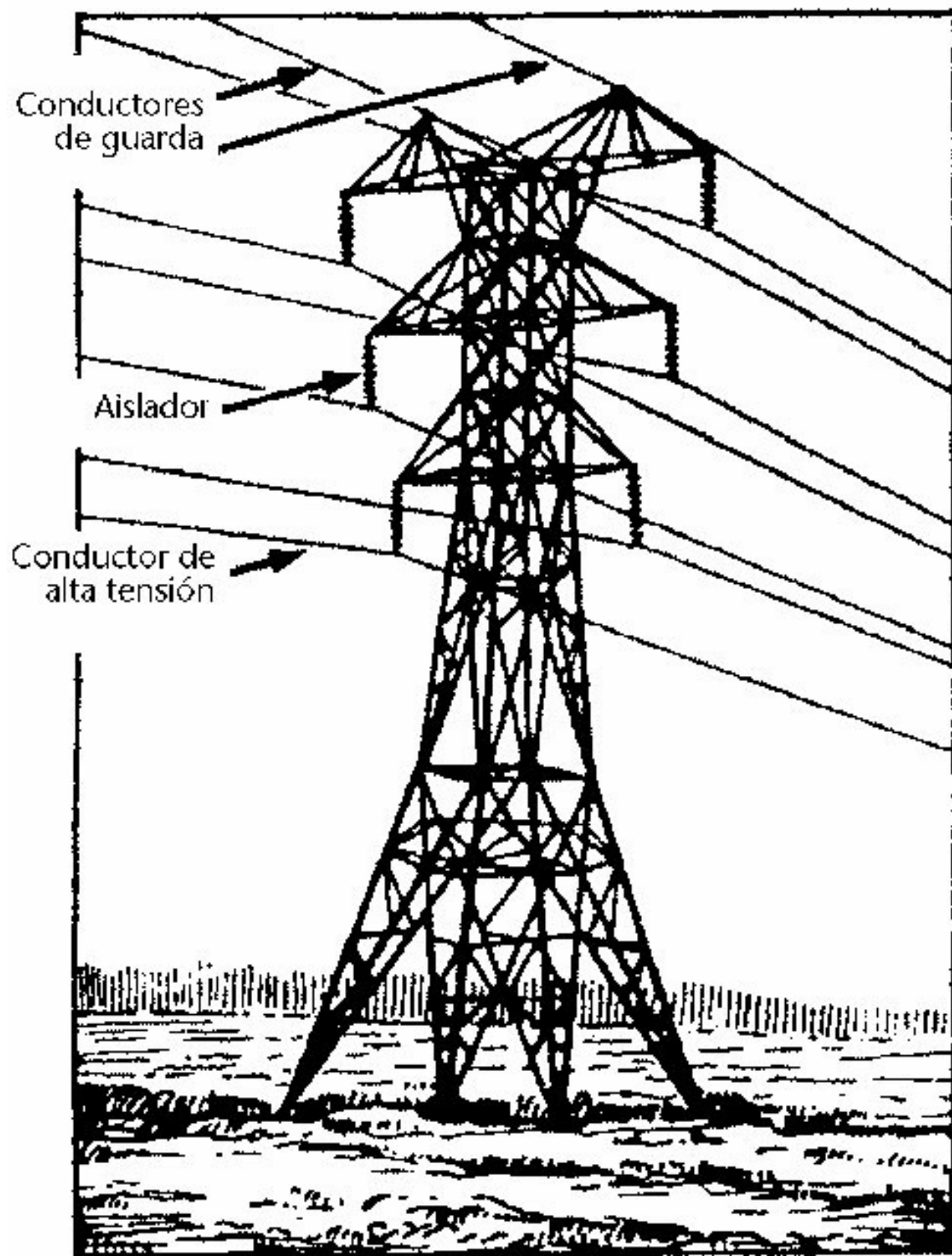


FIGURA III.9. Torre de acero de una línea de transmisión de alta tensión provista de conductores de guarda.

Añádase a esto que en las regiones donde se producen tormentas eléctricas más de 25 días al año, especialmente en las zonas rurales, suele exigirse la incorporación de supresores de sobretensiones en las instalaciones eléctricas de ámbito doméstico alimentadas por líneas aéreas.

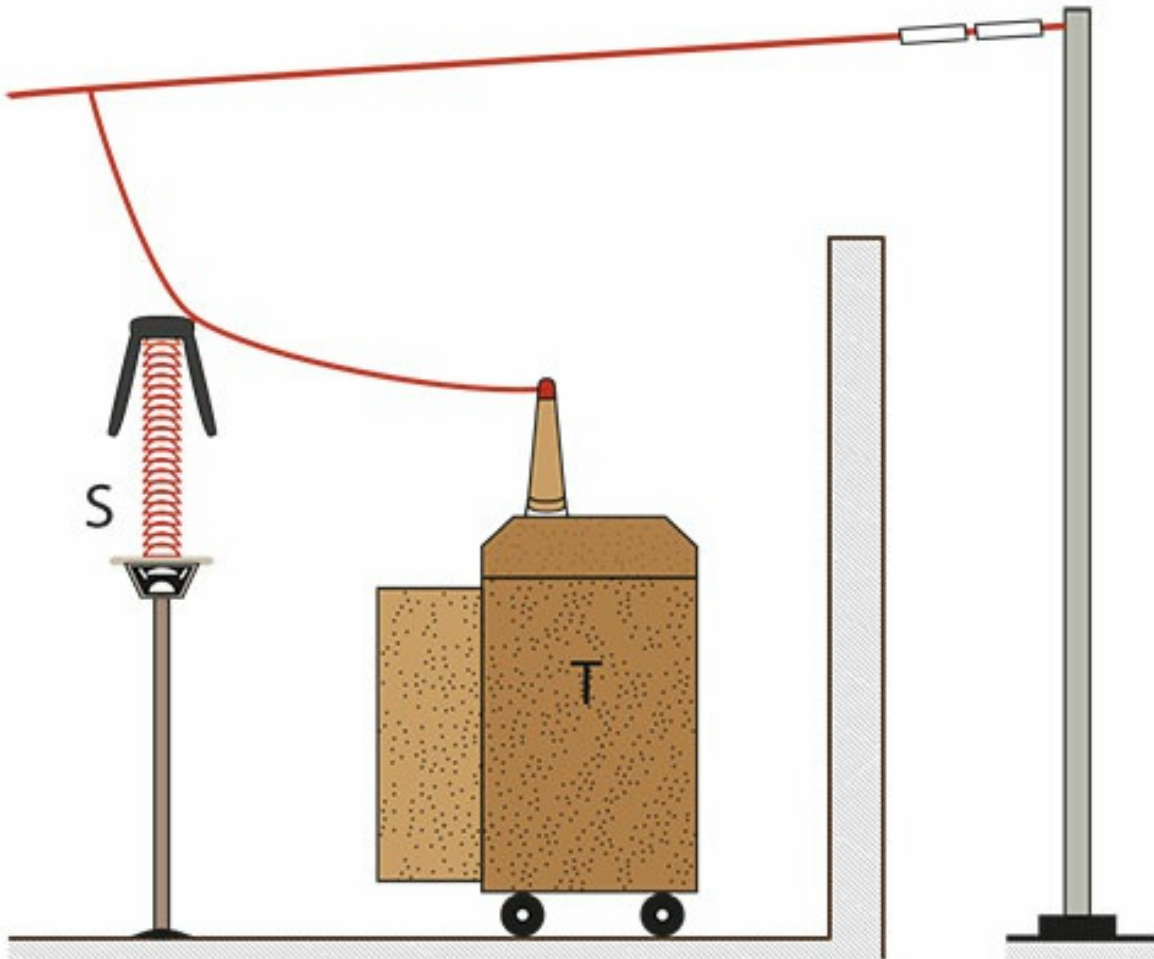
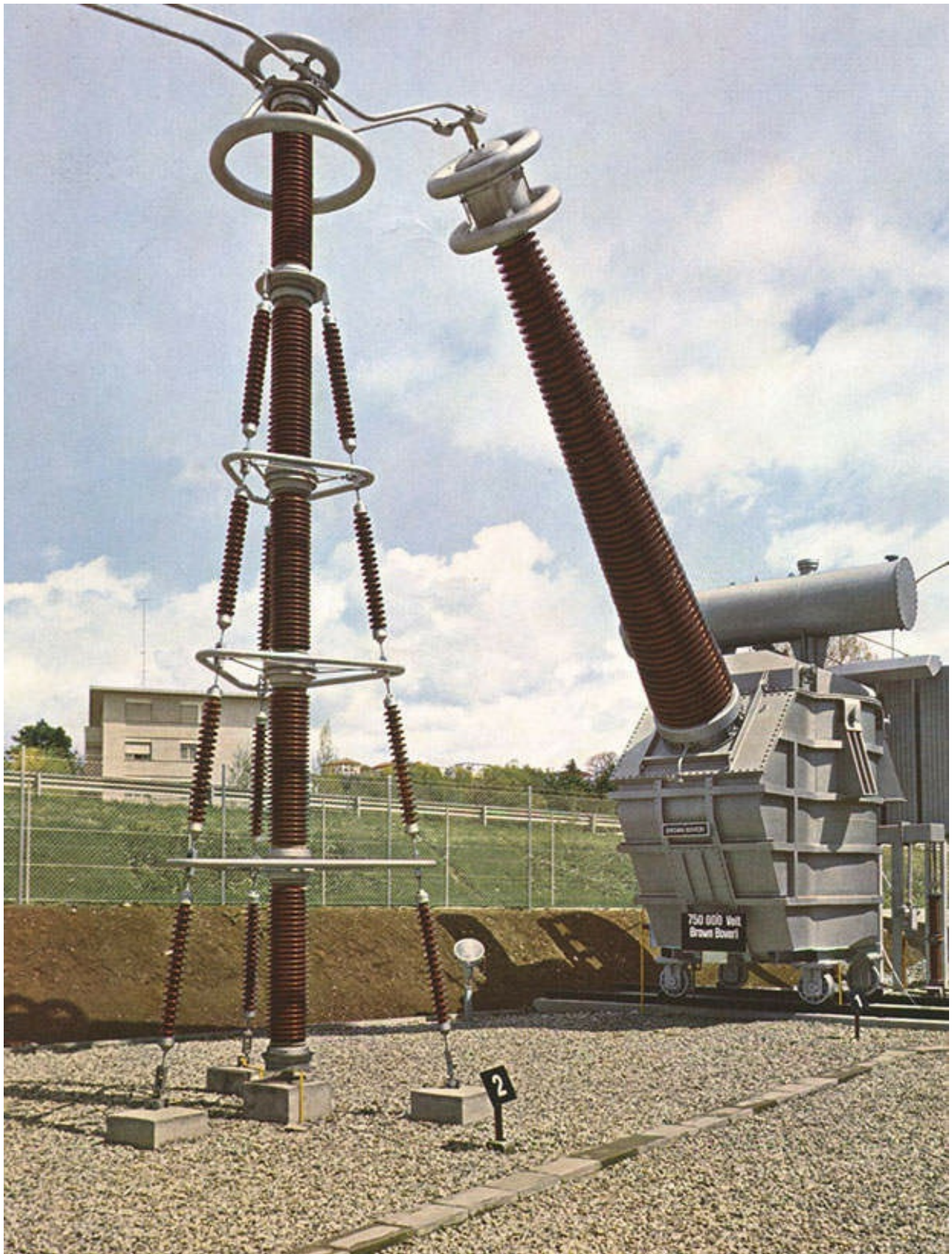


FIGURA III.10. Arriba: transformador (T) de una subestación eléctrica conectado a un supresor de sobretensiones transitorias (S). Enseguida: vista de un dispositivo de este tipo (en primer plano) destinado a proteger un transformador conectado a una línea de transmisión de 750 kV, perteneciente a la firma Brown, Boveri & Cie. (1964).

Con el propósito de mejorar la protección de los equipos y sistemas involucrados, es práctica general resguardar mediante sendos supresores de sobretensiones individuales cada uno de aquellos componentes del sistema eléctrico cuyo fallo interesa evitar a toda costa.

Aunque esas medidas de protección distan mucho de ser absolutas o perfectas, se aceptan generalmente como satisfactorias para proteger las instalaciones técnicas ordinarias. Pero el problema se complica enormemente cuando —pongamos como caso

extremo— se trata de laboratorios dedicados al ensayo de detonadores de bombas atómicas,¹⁹ donde no puede excluirse que la llegada de un impulso eléctrico inesperado sea capaz de desencadenar ¡nada menos que una explosión nuclear!



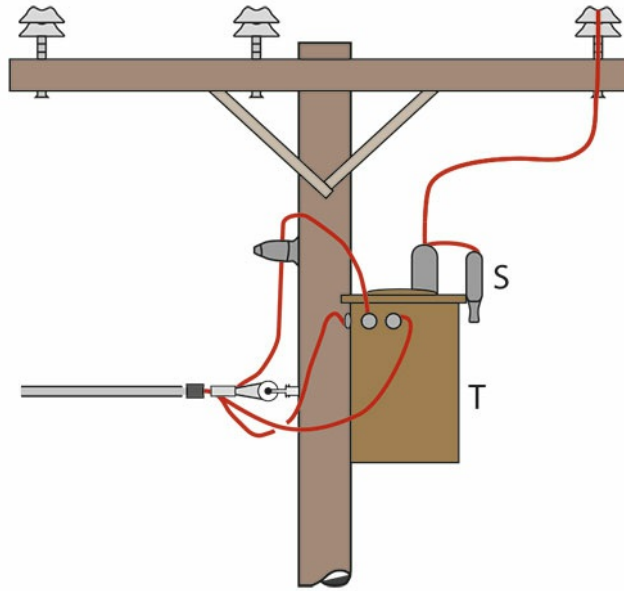


FIGURA III.11. *Supresor de sobretensiones transitorias (S) instalado en un transformador de distribución (T).*

En vista de cuanto acaba de decirse, entre 1979 y 1983 un equipo integrado por especialistas franceses y estadounidenses se dio a la tarea de realizar en la Florida ensayos de campo con el fin de minimizar la afectación al funcionamiento de una jaula de Faraday, que pudieran producir las descargas eléctricas atmosféricas sobre los conductores que penetran en la jaula. Al efecto, introdujeron en un recipiente metálico cerrado los extremos de varios cables, cada uno protegido por un blindaje metálico continuo que se conectaba sólidamente al recipiente, mientras que sus hilos conductores internos se conectaban a las paredes del mismo a través de supresores de sobretensión. Colocando el conjunto en una plataforma similar a la mostrada en la figura II.7, de modo que pudieran encarrilarse los rayos para que cayeran directamente sobre los tramos exteriores de los cables, se comprobó que mientras los coaxiales impedían por completo la transmisión de perturbaciones electromagnéticas al recipiente no ocurría lo mismo con los cables de hilos múltiples.²⁰

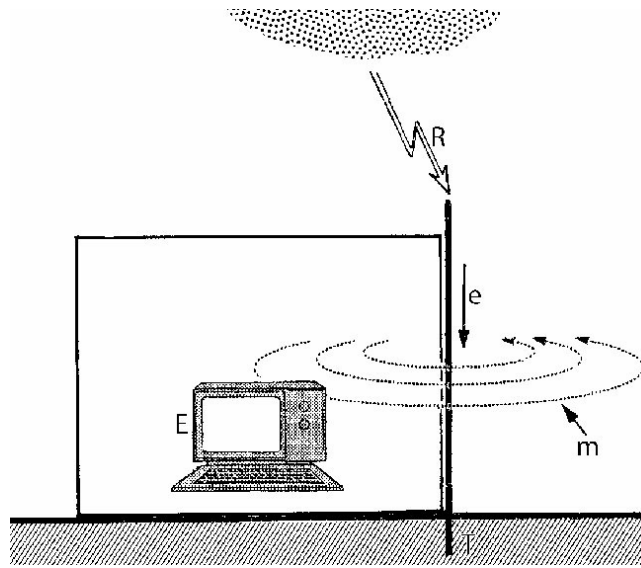


FIGURA III.12. El súbito flujo de electrones (e) que se precipita a tierra (T) por el bajante de un pararrayos tocado por un rayo (R) origina un campo magnético rápidamente variable (m) que puede inducir sobretensiones destructivas en los equipos electrónicos cercanos (E).

VULNERABILIDAD DE LA MICROELECTRÓNICA

Los componentes de los equipos electrónicos antiguos funcionaban con tubos electrónicos capaces de soportar sobretensiones considerables sin experimentar daño permanente apreciable. Pero los transistores que los sustituyeron resultaron bastante más sensibles a las variaciones de las tensiones eléctricas, circunstancia que se agudizó en el caso de los circuitos integrados de estado sólido, que incorporaban numerosos transistores en un espacio muy pequeño y operaban con corrientes y tensiones muy reducidas. Con la introducción de las actuales pastillas de estado sólido, que contienen una enorme cantidad de componentes microelectrónicos interconectados muy próximos entre sí, se hizo mayor aún la vulnerabilidad de los circuitos que los incorporan, pues para estropearlos suelen bastar incrementos de tensiones de algunas decenas de voltios de muy breve duración. Esto explica por qué se dice que los equipos y sistemas (micro)electrónicos son particularmente vulnerables a las sobretensiones, incluso a aquéllas que no ocasionan daño mayor en equipos eléctricos ordinarios y en los antiguos equipos que funcionaban con tubos electrónicos (figura III.12).

BARCOS, AUTOMÓVILES, AERONAVES Y ASTRONAVES ANTE EL RAYO

La construcción metálica de los grandes buques modernos permite dotarlos de una excelente protección contra los efectos destructivos de las descargas eléctricas atmosféricas gracias al uso de sistemas de pararrayos basados en los principios antes mencionados. En el caso de los veleros de casco y mástiles no metálicos es práctica usual protegerlos disponiendo un grueso alambre desde un punto a unos 15 centímetros por encima de la punta de cada mástil hasta una plancha metálica sumergida, adosada al casco. Se evita la eventualidad de descargas laterales uniendo a este sistema todas las masas metálicas a bordo.²¹

Salvo cuestiones de detalle (que, no obstante, eran importantes), el propio Franklin había expuesto ideas similares para la protección de los barcos de vela de su tiempo. En una u otra variante, éstas constituyeron el fundamento de los sistemas de pararrayos con los que se dotaron entre 1770 y 1840 tanto los buques de guerra británicos y franceses como algunos otros. Pero las deficiencias de los primeros sistemas utilizados a menudo los hacían bastante peligrosos. Así, por ejemplo, la práctica de no mantener permanentemente instalado el sistema de pararrayos, sino dejar al arbitrio del capitán de la nave la decisión de instalarlo o no al ver aproximarse una tormenta, ocasionó muchos desastres.

La carrocería metálica de los automóviles ordinarios no descapotables puede parecerse a una jaula de Faraday (aunque imperfecta debido a las grandes aberturas constituidas por las ventanillas y el parabrisas), de suerte que si un rayo cae sobre el vehículo o cerca de él las personas en su interior quedarán bastante protegidas, sin que los neumáticos impidan que la descarga pase a tierra, como se indica para el caso de un tren en la figura III.13. Por esta razón se recomienda que quienes viajen en un auto y sean sorprendidos en descampado por una tormenta eléctrica, se mantengan dentro del vehículo, teniendo el cuidado de separarse lo más posible de las ventanillas y las partes metálicas, así como de recoger las antenas para que éstas no se conviertan en puntas de pararrayos.

Cuando el relámpago golpea

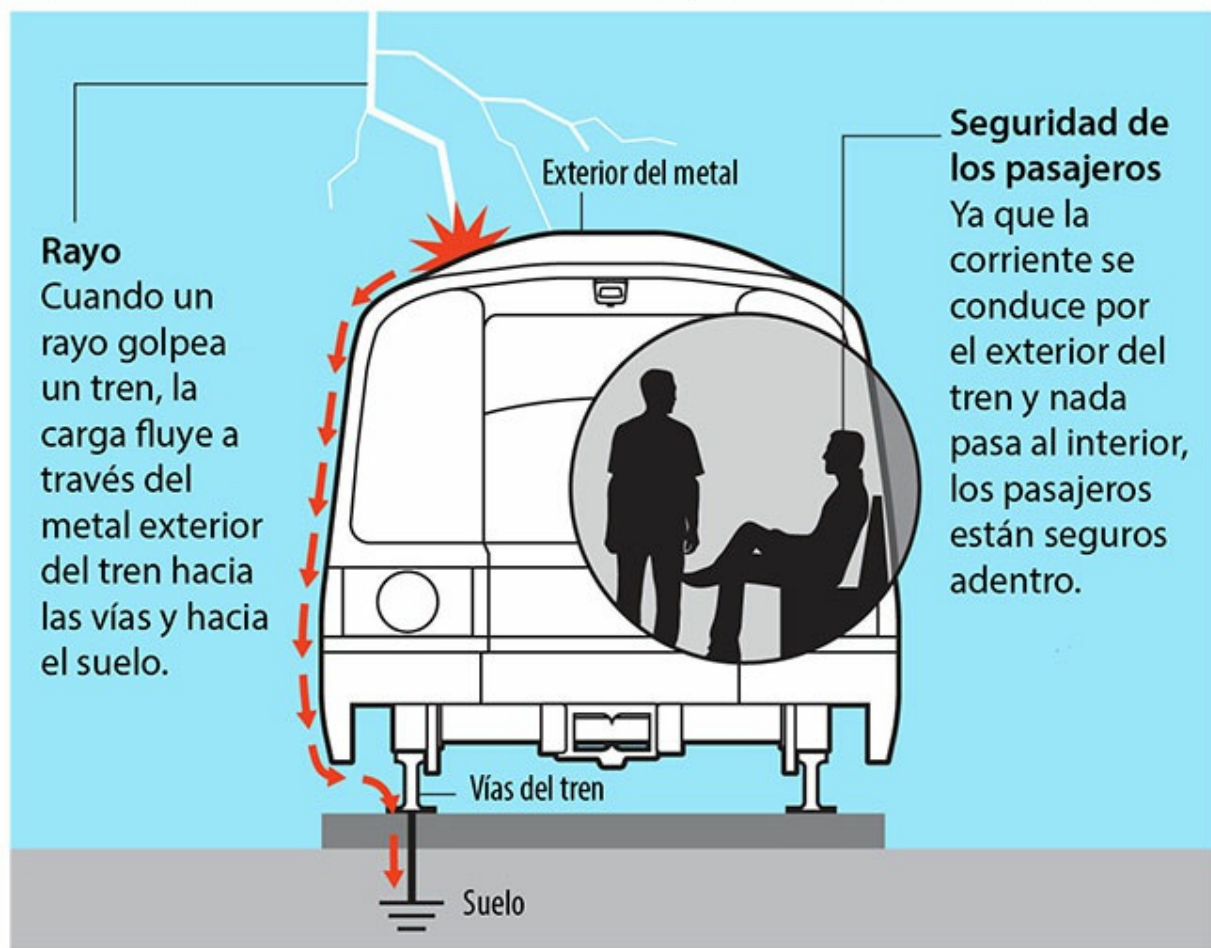


FIGURA III.13. *El tren como una jaula de Faraday.*

Desde el punto de vista eléctrico, el comportamiento de un avión de pasajeros en tierra es similar al de los automóviles que acabamos de reseñar, puesto que los grandes aviones comerciales se construyen casi totalmente de aluminio o de un material compuesto al que se incorpora una capa de fibras conductoras que ofrecen una baja resistencia al movimiento de las cargas eléctricas.

Por lo mismo, cuando un avión se aproxima durante el vuelo a una nube eléctricamente cargada, ésta induce en las paredes conductoras de la aeronave una separación de cargas que, por efecto corona, da lugar a la aparición de una o más trazadoras que, a partir de la nariz, las alas, etc., se dirigen del avión a la nube, y también generan la aparición de otra u otras trazadoras dirigidas de la nube a la aeronave, con una carga eléctrica de signo opuesto, de forma similar a como sucedería con un pararrayos

clásico, de suerte que al encontrarse ambas trazadoras circulará por el exterior del casco del avión una fuerte corriente eléctrica. La situación puede presentarse entonces en forma análoga a la que conduce a la caída de un rayo a tierra, donde el papel de la nube de tormenta lo representa la aeronave fuertemente electrizada, que a su vez origina una trazadora descendente escalonada, seguida de una o más descargas a tierra con sus correspondientes fulguraciones de retorno, tal como se indica en la figura III.14.

Ciertamente, es práctica general que se haga todo lo posible para evitar que los aviones vuelen dentro de zonas de tormenta de cierta intensidad cuyos fuertes vientos y descargas eléctricas puedan comprometer la seguridad de las aeronaves y sus ocupantes. Para ello se cuenta con la información meteorológica suministrada tanto por los aeropuertos como por los radares instalados a bordo, capaces de medir la dirección y la velocidad de las gotas de lluvia y otros objetos móviles. Con todo, se calcula que para un avión comercial en servicio regular lo más probable es que sea alcanzado por un rayo aproximadamente una vez al año. Un accidente de este tipo pocas veces ocasiona la interrupción del vuelo, gracias a las rigurosas medidas de protección incorporadas en los sistemas eléctricos y electrónicos de las aeronaves, así como en sus líneas y tanques de combustible cuya explosión pudiera ser provocada por una descarga eléctrica, en determinadas circunstancias.

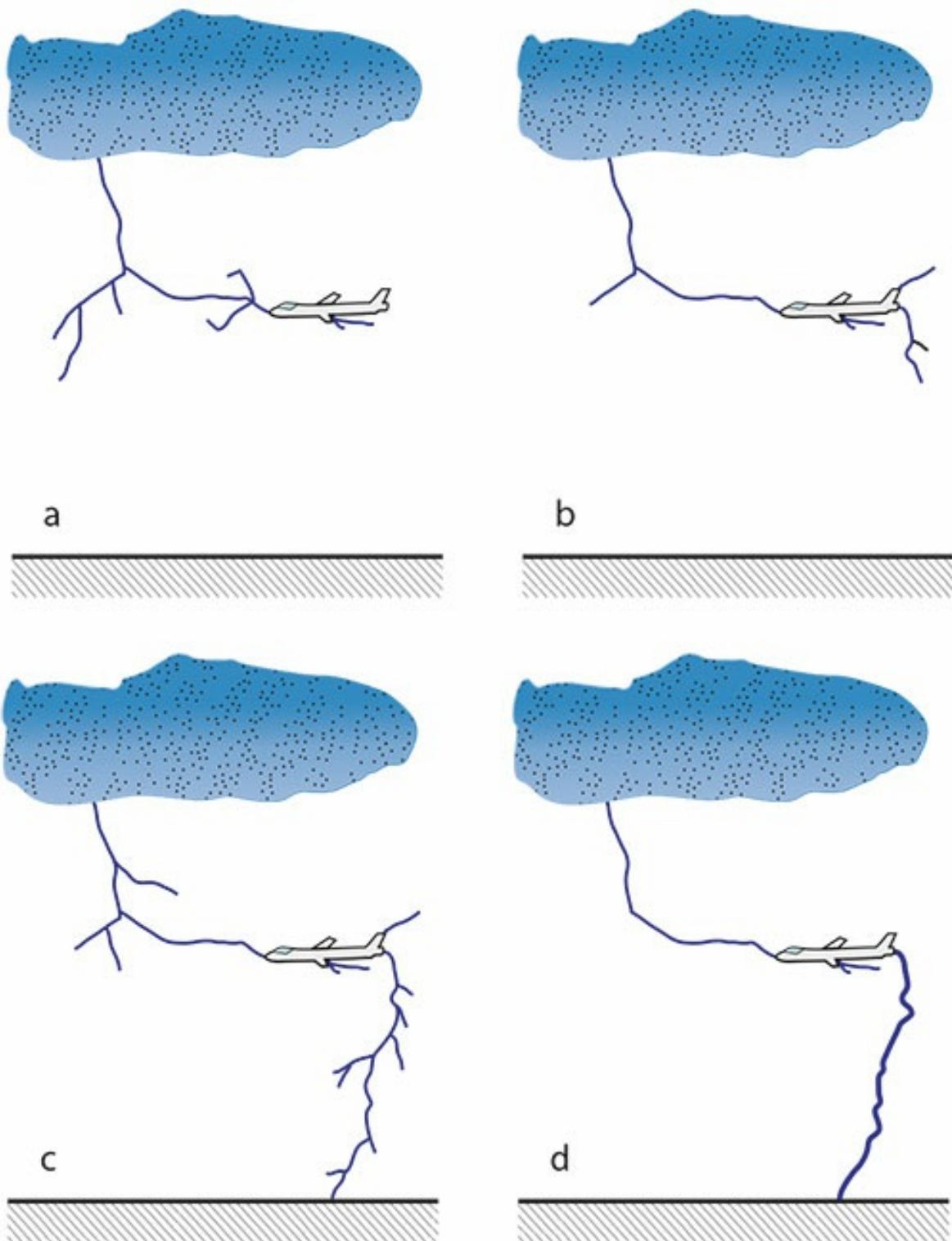


FIGURA III.14. *Influencia recíproca entre un avión y una nube de tormenta. Surgimiento (a) y encuentro (b) de trazadoras. Primera fulguración de retorno (c) y fulguración de retorno subsiguiente (d). Imagen basada en: A. Hermant y C. Lesage, L'Électricité atmosphérique et la foudre.*

La superficie metálica externa de los aviones que llevan muchas horas de vuelo

presenta habitualmente picaduras y huecos que marcan las zonas que han sido tocadas por rayos. La mayoría de los huecos tienen un diámetro del orden de un centímetro, pero algunos son bastante mayores y su diámetro puede llegar a unos 10 centímetros. El área destruida suele ser mucho mayor cuando la fulminación afecta a una zona no conductora, como la cúpula de material plástico que protege la antena de radar montada en la nariz de las aeronaves comerciales.²²

Las tormentas eléctricas también representan un peligro para los vehículos espaciales en vuelo, mientras no rebasan la capa de la atmósfera donde ocurren los fenómenos meteorológicos. Así, por ejemplo, en mayo de 1987 hubo que destruir en pleno vuelo un cohete, *Atlas Centauro*, que transportaba un satélite de comunicaciones de la Marina estadounidense cuando, a menos de un minuto de haber despegado del Centro Espacial Kennedy, un rayo ocasionado por el propio cohete perforó la cubierta de fibra de vidrio de la nariz, alteró el programa de computación que controlaba los motores y desvió el cohete del curso programado. Dieciocho años antes, otro rayo casi había hecho abortar la misión lunar tripulada *Apolo 12*, poco después de haber despegado del mismo lugar. En previsión de nuevos accidentes de este tipo, la NASA decidió dar un nuevo impulso a las investigaciones sobre las descargas eléctricas atmosféricas.²³ Producto de aquellas investigaciones fueron los sistemas de protección contra los rayos de los vehículos espaciales en su plataforma de lanzamiento que se instalaron posteriormente en el Centro Espacial Kennedy, a los que ya se hizo referencia en este capítulo (figuras III.5 y III.6), complementados con un sistema de monitoreo de la actividad eléctrica atmosférica local (figura II.22).

LA GUERRA DE LOS PARARRAYOS

En el capítulo I se mencionaron brevemente tanto la allí denominada “polémica de las puntas”, como la disputa sobre el empleo del pararrayos, entre los seguidores del abate Nollet y los partidarios de Franklin. Por las razones que se expondrán a continuación, ambos enfrentamientos bien pueden considerarse verdaderas batallas de la guerra a la que alude el título de la presente sección. Aquellas batallas se libraron esencialmente en el siglo XVIII, pero las que se entablan hoy con respecto al mismo tema comenzaron formalmente en el siglo XX,²⁴ aunque su origen puede rastrearse a veces hasta el propio siglo XVIII. Así ocurre con los llamados dispositivos disipadores o eliminadores de rayos que retoman una de las primitivas propiedades que (como vimos en el capítulo I) el propio Franklin le supuso erróneamente a su pararrayos, en el sentido de que una punta metálica dirigida hacia una nube de tormenta podía descargarla eléctricamente, siempre que la punta estuviese conectada a tierra. Éste parece haber sido el fundamento del artefacto (referido en el capítulo I) que Prokop Diviš construyó en 1754 y al que llamó “máquina meteorológica”.

Ya bien entrado el siglo XX se idearon, patentaron y comercializaron varios sistemas de protección contra las descargas atmosféricas, con base en el principio que acaba de describirse. Todos incluyen dispositivos como el representado en la figura III.15 a título de ejemplo, provistos de un gran número de agudas puntas metálicas, agrupadas de una u otra forma y puestas a tierra mediante un bajante ordinario, cuyo objeto declarado es liberar por efecto corona gran cantidad de cargas eléctricas. Se pretende de esta suerte: *a)* neutralizar la carga de signo contrario de cualquier nube de tormenta que pase por encima del dispositivo, o *b)* debilitar el campo eléctrico sobre éste, de modo que se elimine el surgimiento de una trazadora ascendente que vaya al encuentro de una trazadora descendente, y evitar así que la estructura que se desea proteger sea alcanzada por un rayo.

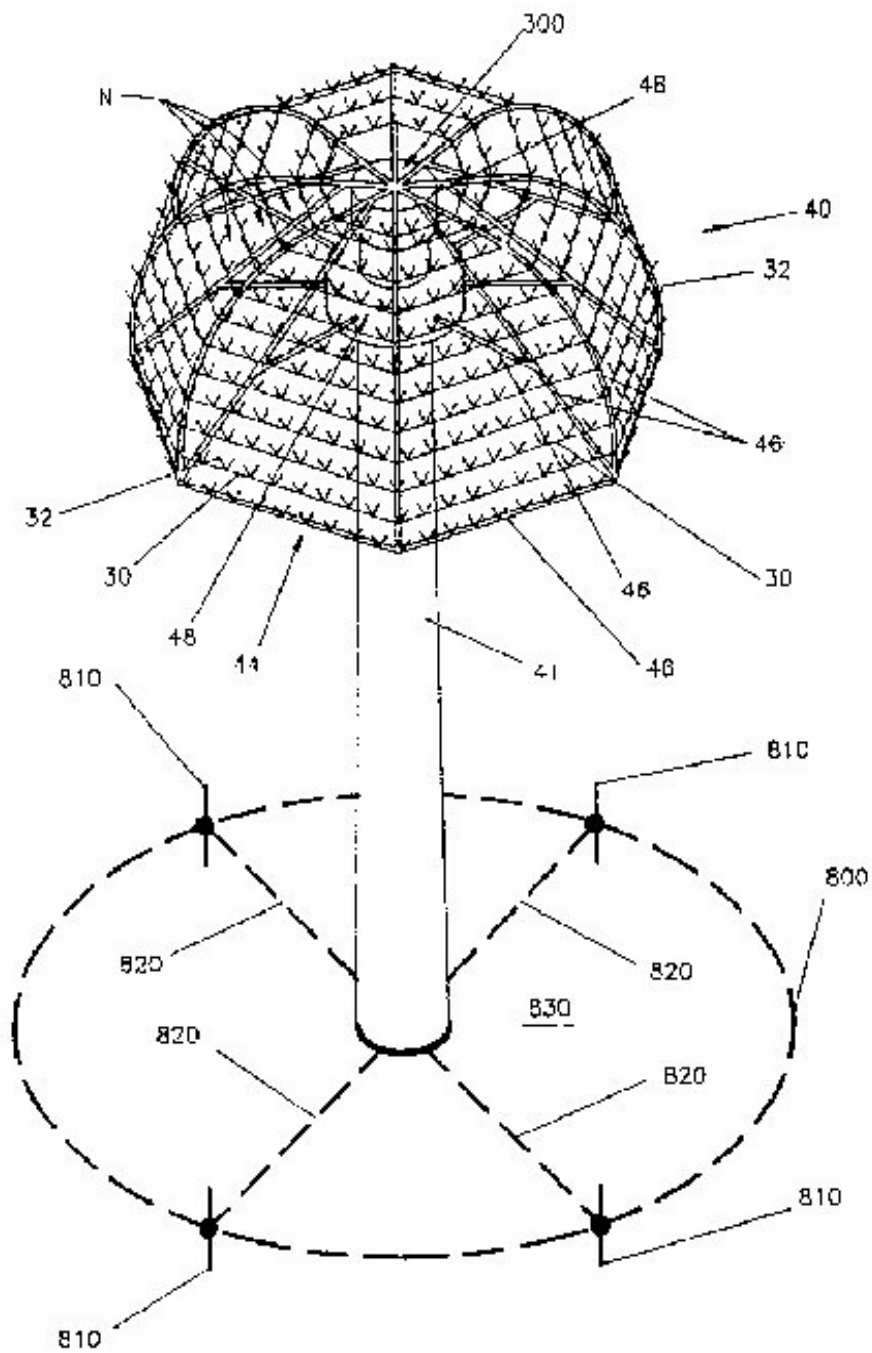


FIGURA III.15. Dispositivo descargador tipo paraguas.

Esta clase de sistemas no goza del favor de la mayoría de los especialistas, que aducen en su contra varios argumentos de peso, como el hecho de que aun cuando la hierba y los árboles producen un efecto corona más intenso que el de cualquiera de los artefactos propuestos, ello no inhibe en absoluto las descargas eléctricas atmosféricas. Por su parte, los defensores del sistema no se dan por vencidos, como sugiere el título de un trabajo sobre el tema, publicado en 2001 por D. W. Zipse bajo el sugerente título “Métodos de protección contra el rayo: una actualización y una vindicación de un sistema desacreditado”.²⁵

Otra alternativa a los terminales aéreos franklinianos tuvo su origen en 1914, cuando J. B. Szillard patentó la idea de colocar una pastilla de sales radiactivas cerca del extremo libre del terminal, con el propósito de incrementar la ionización en su entorno y aumentar así la eficacia del sistema de pararrayos, punto de vista que, sin embargo, fue objetado por la mayoría de los especialistas.

Pero a mediados de la década de 1970 otros argumentaron que aquel tipo de pararrayos debía resultar más eficaz que los terminales aéreos convencionales de la misma geometría, porque al aproximarse una trazadora descendente, originada en una nube de tormenta, el efluvio que partiría a su encuentro desde el pararrayos se adelantaría a cualquier otro que surgiera de objetos cercanos y conectaría con la trazadora para conducir con seguridad la descarga a tierra. Pararrayos de este tipo se comercializaron en muchos países hasta que, en la década de 1980, fueron prohibidos en algunos por el peligro de contaminación radiactiva del medio ambiente que representaban. Esto impulsó a ciertos especialistas, principalmente franceses, a diseñar un nuevo tipo de pararrayos que se apoyase en el principio general mencionado, pero sin utilizar materiales radiactivos. El resultado fue la creación de los terminales aéreos llamados “de cebado” o “de emisión temprana de efluvio” (*early streamer emission*), en los cuales se conseguía el efecto deseado generando, por medios eléctricos o electrónicos, chispas repetitivas entre pequeños electrodos y la punta de las varillas cuando la intensidad del campo eléctrico atmosférico aumentaba por encima de un cierto valor (figura III.16).



FIGURA III.16. *Terminal aéreo de cebado.*

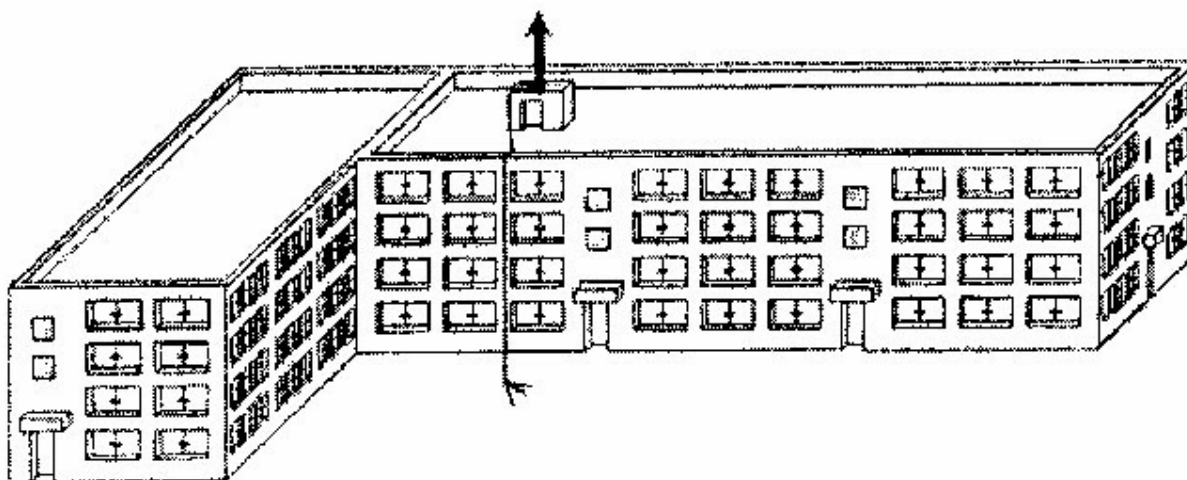


FIGURA III.17. Protección mediante un pararrayos con un solo terminal aéreo de cebado, supuestamente equivalente a la brindada por el sistema tradicional ilustrado en la figura III.4.

Como se recordará, en la figura III.4 se ilustra el caso de un edificio protegido contra los rayos mediante un sistema tipo jaula de Faraday con terminales aéreos convencionales implantados en los muros perimetrales de las azoteas, y las tomas de tierra individuales interconectadas mediante un cable conductor.

Según algunos, basta utilizar un solo pararrayos de cebado, instalado como se muestra en la figura III.17, para obtener una protección contra los rayos más o menos equivalente a la anterior, pero a un costo unas cinco veces menor.²⁶

Los criterios de los expertos en cuanto a la eficacia real de los pararrayos de cebado son muy discrepantes en la actualidad, como puede inferirse de las dos opiniones opuestas que reproducimos a continuación:

[Opinión a favor:] La elección entre pararrayos y jaula de Faraday [se inscribe en el] dominio económico o legal en los países que prohíben los dispositivos de pararrayos activos [de cebado] por razones más comerciales o políticas que técnicas y científicas. En ciertos países es preferible vender cobre que emplear los dispositivos de fuerte valor agregado que a veces sabemos inventar.²⁷

[Opinión en contra:] Si las varillas [de cebado] no funcionan de la forma que se anuncia, como opinan la mayoría de los miembros de la comunidad dedicada al rayo, el resultado es un grado de subprotección potencialmente peligroso.²⁸

Hasta aquí lo más sobresaliente que cabe decir sobre el asunto, salvo invitar al lector a que valore si es apropiado o no el título asignado a la presente sección.

IV. Huellas, peligros, precauciones

En los montes más levantados caen los rayos, y
adonde hallan más resistencia hacen más daño.

MIGUEL DE CERVANTES, *Los trabajos de Persiles
y Sigismunda* (1617)

Son muchos los rayos que destrozan cuanto
encuentran, pero también los hay benignos, que no
hacen más que lamer la superficie del cuerpo que
tocan.

BENITO J. FEIJOO, *Cartas eruditas
y curiosas*, IV (1753)

Ya hemos visto que, tal como los estudiosos de la electricidad de los siglos XVII y XVIII sospecharon en su momento, las investigaciones posteriores confirmaron que los rayos típicos de las tormentas eran, en esencia, versiones a gran escala de los chispazos eléctricos producidos por las máquinas electrostáticas de entonces, y no proyectiles lanzados desde las alturas por las deidades más o menos irritadas que imaginaban los antiguos.

Contribuían a aquella sospecha, además de la notoria semejanza física entre el rayo y la chispa de laboratorio, el hecho de que se sabía que esta última, al igual que las descargas eléctricas atmosféricas, era capaz de destrozar objetos sólidos, incendiar materiales inflamables, electrocutar animales e incluso ocasionar en los seres humanos determinados efectos neuromusculares, a veces reputados de saludables y hasta de curativos.

A continuación me detendré a precisar, un poco más que hasta ahora, las características de algunos de los efectos más notables producidos por las descargas eléctricas atmosféricas.

Para comenzar, recordaré que, visto desde el punto de impacto de un rayo, éste suele manifestarse como una sucesión de descargas parciales, cada una de las cuales origina una corriente eléctrica de gran intensidad pero de muy breve duración, con las características típicas expuestas en el capítulo II e ilustradas en la figura II.10. En virtud del llamado efecto Joule, dicha corriente calentará los cuerpos sólidos que atraviese, tanto más cuanto mayor sea su resistencia eléctrica y, sobre todo, cuanto más intensa y sostenida sea la corriente. Al menos en una primera aproximación, este hecho puede servir de base para explicar algunos de los efectos más frecuentes producidos por las descargas atmosféricas.

A título de ilustración de lo que acabo de decir me remitiré a la figura I.2, que muestra el boquete producido por un rayo en el muro perimetral de la azotea del edificio donde residí. El destrozo se explica suponiendo que las corrientes generadas por la descarga atmosférica calentaron la zona de impacto directo, a tal punto que ésta se hizo pedazos al vaporizarse explosivamente la humedad infiltrada en ella.

Pero hay más: si se observa atentamente la vista de la misma escena mostrada en la figura IV.1, se advierte que además de producir el estrago mencionado la caída del rayo causó en este caso la aparición de una grieta a lo largo de la parte del muro que se extiende a la izquierda del boquete. De nuevo, el hecho puede explicarse suponiendo en este caso que el agrietamiento se debió a la vaporización explosiva de la humedad en torno a la barra de acero de refuerzo dentro del muro, consecuencia a su vez del súbito aumento de la temperatura de dicha barra, cuya baja resistencia eléctrica con respecto a la del hormigón seguramente determinó la circulación del grueso de la corriente a su través.

En general, cuando cae un rayo sobre una masa de material de construcción compuesto de piedra, ladrillo, mortero, etc., en cuyos poros y fisuras se ha acumulado bastante humedad en el transcurso del tiempo, con frecuencia tiene lugar una vaporización explosiva del agua, lo cual causa daños estructurales semejantes a los antes mencionados, que pueden llegar a ser espectaculares o al menos bastante llamativos, como sucede con el desprendimiento del repello de la chimenea que se muestra en la figura IV.2.



FIGURA IV.1. *Vista del estrago causado por la caída de un rayo (mostrado parcialmente en la figura I.2). Nótese la grieta continua a la izquierda del boquete abierto y a nivel de la barra de acero de refuerzo del muro perimetral.*





FIGURA IV.2. *En la figura anterior: daño a una chimenea tocada por un rayo. Arriba: huella dejada por un rayo en la corteza de un árbol.*

Un fenómeno similar puede explicar las tiras, rectilíneas o helicoidales, que a veces arranca un rayo de la corteza de un árbol al ser éste fulminado por un rayo. Ocurre, en efecto, que cuando cae un rayo sobre la copa del árbol, las cargas eléctricas que trae fluyen hacia el suelo de modo que la corriente eléctrica sigue, en lo fundamental, el camino de menor resistencia, constituido por los elementos vasculares longitudinales interiores bajo la corteza, por donde circulan el agua y la savia, mucho más conductores que la madera, los cuales, al vaporizarse explosivamente, arrancan las tiras de corteza y madera más próximas a la superficie, dejando en el tronco cicatrices como la típica que se ve en la figura IV.2. De vez en cuando se encuentran árboles que permanecen vivos pese a que presentan dos o más de estas cicatrices; pero si la fulminación arranca una gran parte de la corteza, aunque el árbol sobreviva un tiempo, es de suponer que terminará por morir. Sin embargo, algunos especialistas aseguran que la mayoría de los árboles se recuperan “cualquiera que sea el daño que les haya ocasionado el rayo”,¹ como sugiere el poema antológico de Antonio Machado:

Al olmo viejo, hendido por el rayo
y en su mitad podrido,
con las lluvias de abril y el sol de mayo,
algunas hojas verdes le han salido.

Pero no siempre se alcanza un final tan feliz. En particular, el comportamiento de un árbol arruinado por un rayo puede resultar muy diferente cuando experimenta una nueva fulminación. Así lo evidencia la noticia que sigue, publicada en un periódico de agosto de 2006, que dice así:

Un árbol muerto explotó en pedazos al ser impactado por un rayo en una ciudad de Florida y dañó 17 residencias a dos cuadras a la redonda, dijeron los bomberos locales. El árbol, un pino de 12 metros de altura, explotó “casi como una bomba”. Antes, ya había sido impactado por otro rayo —aparentemente durante un huracán— y se descompuso, lo que probablemente hizo que se formaran bolsillos de gases en su interior que estallaron con la descarga eléctrica.²

Por otra parte, se asegura que hay árboles de corteza muy lisa —como el haya— en cuyo tronco el impacto de los rayos pocas veces deja alguna huella. En opinión de los expertos, esto se debe a que las corrientes propias de la fulminación suelen limitarse a circular por la superficie del tronco humedecida por la lluvia, sin penetrar en el interior de la planta.³

Algo parecido ocurre no pocas veces en los seres humanos cuando reciben una descarga eléctrica atmosférica que solamente produce quemaduras en la superficie de la piel, como se muestra en la figura IV.3. Suele explicarse el hecho suponiendo que éste

ocurre cuando la resistencia eléctrica ofrecida por la piel del accidentado es lo suficientemente baja como para que la mayor parte de la corriente de la fulminación no afecte el interior del cuerpo, sino que circule por su superficie, humedecida por la transpiración, la lluvia, etc. En estas condiciones, la intensa corriente periférica circulante puede producir la vaporización instantánea de la humedad en su entorno, al extremo de que la expansión violenta del vapor generado, unida quizás a las fuerzas electrostáticas presentes, llegue a desgarrar la vestimenta de la víctima e incluso a lanzar lejos los jirones arrancados.



FIGURA IV.3. Huella de quemadura superficial en el brazo de una persona fulminada por un rayo.

Todo lo antes descrito invita a mencionar por analogía (aunque la explicación del caso sea muy diferente) el hecho de que las corrientes típicas de los rayos no fluyen de manera más o menos uniforme por el interior del conductor que atraviesan, sino que tienden a concentrarse principalmente en las capas de éste más cercanas a la superficie. Se trata del fenómeno conocido por físicos e ingenieros como *efecto pelicular*, el cual no tiene nada que ver con ninguna vaporización ni cosa por el estilo, sino con el campo magnético asociado a las corrientes y con el hecho de que, en el caso del rayo, dichas corrientes no son continuas sino que experimentan variaciones bruscas de su intensidad. Desde un punto de vista científico, esto equivale a afirmar que tienen componentes

sinusoidales que oscilan a frecuencias relativamente elevadas.



FIGURA IV.4. *A la izquierda: huella en forma de fulgurita, dejada por un rayo que alcanzó un cable eléctrico a un metro bajo la superficie de un terreno (imagen: J. C. Diels et al., “Lightning Control with Lasers”). A la derecha: huella en forma de surco en el suelo sobre una tubería metálica soterrada, por la cual se ha propagado una descarga eléctrica atmosférica (imagen: lightningsafety.com).*

Pero volvamos al tema específico del rayo, esta vez para ocuparnos de lo que ocurre cuando la descarga atmosférica incide sobre la tierra misma, donde —como ya vimos en el capítulo II— a veces deja unas curiosas huellas permanentes denominadas fulguritas.

Sucede, en efecto, que cuando un rayo impacta sobre un punto de la superficie de un terreno (o de una masa líquida conductora), las corrientes eléctricas generadas no sólo se propagan por dicha superficie, sino que penetran en el interior de la masa, siguiendo las leyes del electromagnetismo. En particular, la heterogeneidad propia de los terrenos hace que el flujo de los electrones inyectados en ellos por la descarga tienda a seguir aquellos senderos interiores que ofrezcan la menor resistencia a su paso, incluso si, como muestra la figura IV.4, en ocasiones tiene que atravesar una gruesa capa de tierra hasta alcanzar un cable eléctrico soterrado. La misma figura ilustra otra evidencia del mismo fenómeno

por cuanto en ella se aprecia el surco dejado sobre una cañería metálica soterrada, a lo largo de la cual se ha propagado la corriente de un rayo caído sobre el terreno.

EFFECTOS INDIRECTOS

De cuanto acaba de decirse se concluye que aun cuando un conductor metálico —como un cable eléctrico o una cañería de gas o de agua— se encuentre bajo tierra, existe la posibilidad de que sea alcanzado indirectamente por un rayo que caiga sobre el terreno, con el consiguiente peligro de que en algún caso la descarga pueda transmitirse a un lugar supuestamente bien protegido contra los rayos.

Por otra parte, las corrientes de tierra (electrones) que se esparcen por un terreno a partir del punto de impacto de un rayo pueden afectar a personas y animales que se encuentren en las cercanías. Ello se debe a que el tránsito de dichas corrientes a través de los puntos de apoyo de las respectivas extremidades, como indica la figura IV.5, va acompañado de la aparición de una diferencia de potencial momentánea entre dichos puntos, denominada *tensión de paso*, tanto mayor cuanto mayor sea la separación entre los mismos, en igualdad de otras condiciones. Este hecho, unido a la circunstancia de que la circulación de corriente entre las patas delanteras y las traseras del animal atravesaría seguramente su corazón y otros órganos vitales, hace que en esta situación el peligro para la vida resulte particularmente elevado en el caso del ganado y mucho menor en el de un caminante. La experiencia acumulada indica que la tensión de paso es la principal causa de muerte accidental del ganado que pasta en campo abierto, pero que generalmente no afecta sensiblemente a las personas cuando se encuentran a 120 metros o más del punto de impacto de una descarga atmosférica.

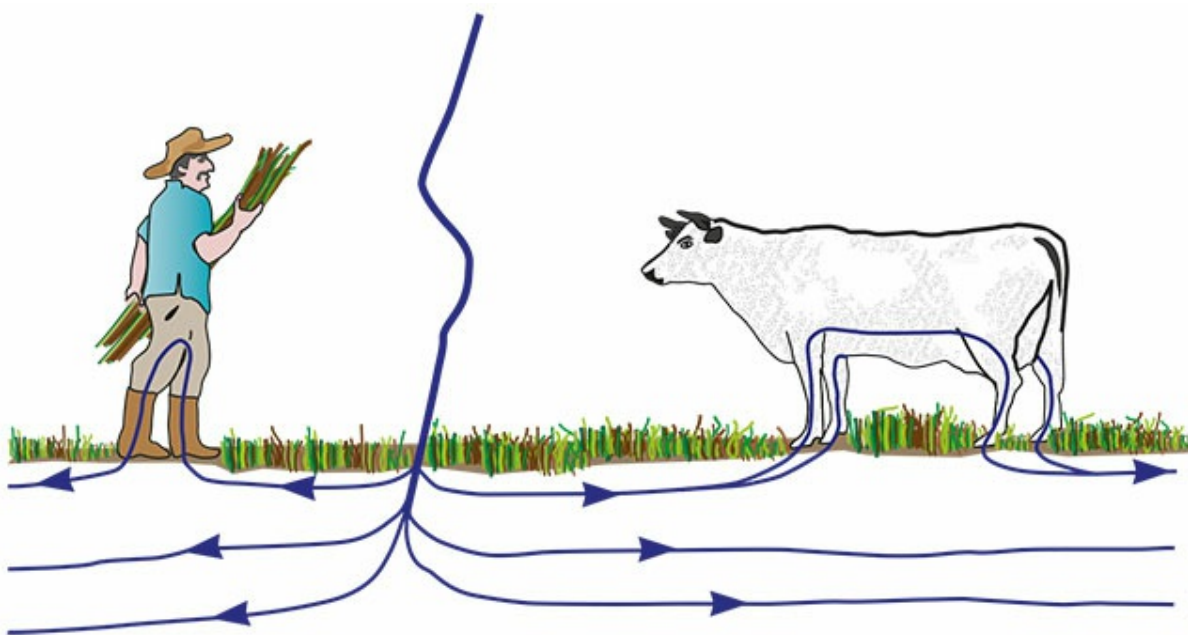


FIGURA IV.5. *Comportamiento, en presencia de una persona y un cuadrúpedo, de las corrientes de tierra originadas por un rayo caído en un punto cercano a ambos.*

A propósito de lo que acaba de decirse, vale la pena recordar, a título de ejemplo ilustrativo, que el 31 de octubre de 2005, en una finca de la localidad australiana de Dorrigo, murieron 68 vacas lecheras que pastaban cerca de un árbol sobre el que cayó un rayo, presumiblemente electrocutadas (al menos aquellas que estaban más alejadas del árbol) por las corrientes creadas, que se propagaron por el terreno. Más recientemente se puede encontrar la noticia periodística de agosto de 2016, en la que se informó que los 323 renos de un rebaño perdieron la vida en Noruega en circunstancias similares (figura IV.6).



FIGURA IV.6. *Rebaño de renos fulminados por un rayo en Noruega.*

Un rayo que cae en un terreno, ya sea directamente o a través de un árbol, crea un campo electromagnético que puede propagarse y, en determinadas condiciones, alcanzar una intensidad considerable incluso a cientos de metros de profundidad, al punto de hacer que salten chispas entre los conductores que encuentre bajo tierra. Todo indica que en enero de 2006 una chispa de este origen, producida en un cable eléctrico abandonado dentro de una galería sellada de la mina de carbón Sago, en los Estados Unidos, causó la deflagración del gas metano acumulado en aquella galería, dejando un saldo de 12 fallecidos como consecuencia de la explosión.⁴

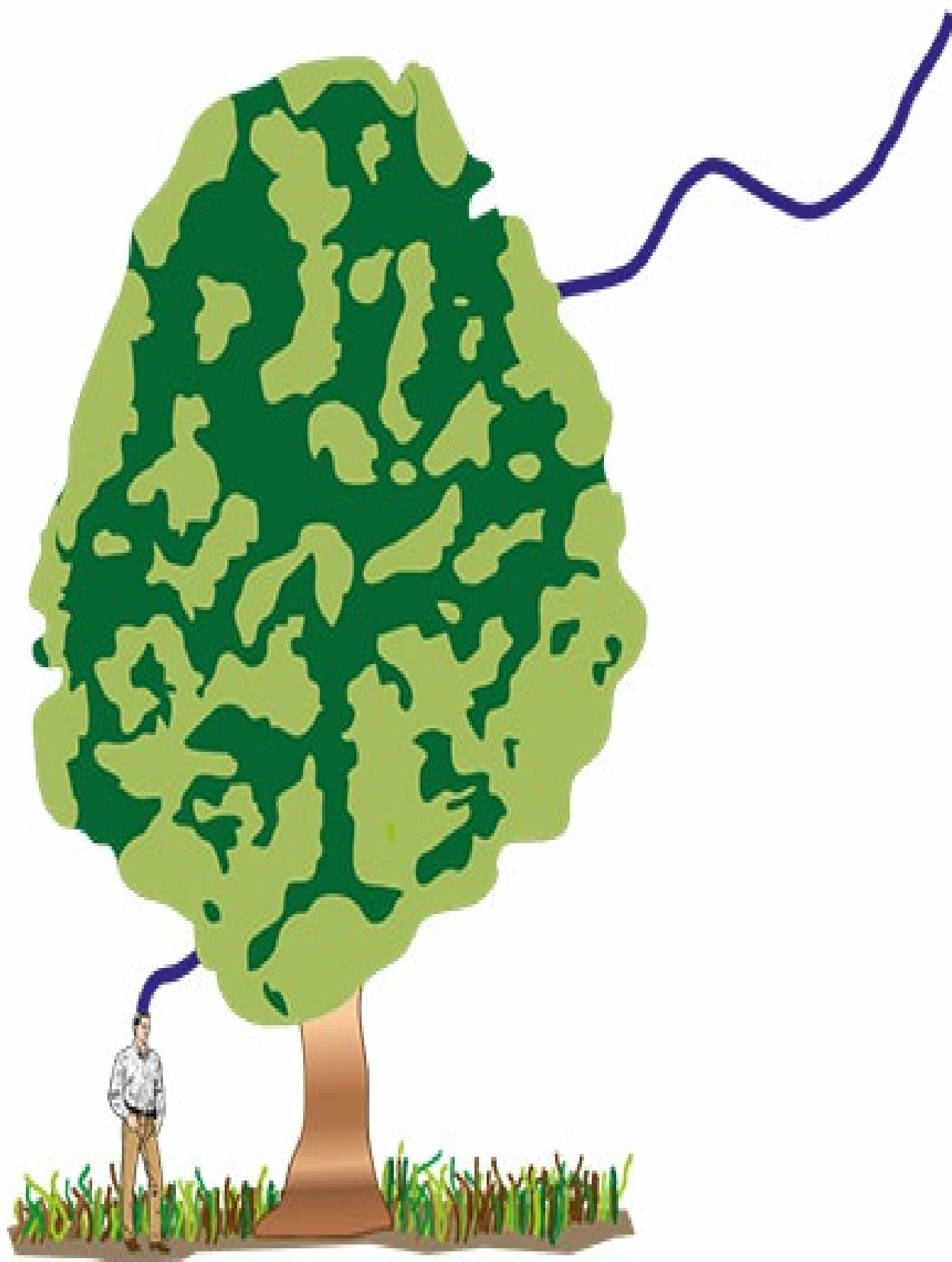


FIGURA IV.7. *Individuo fulminado por una descarga lateral derivada del tronco de un árbol fulminado por un rayo.*

Las situaciones que acaban de describirse, al igual que las que siguen, ejemplifican algunos casos de fulminación indirecta causados por descargas atmosféricas, los cuales, por cierto, son más frecuentes que los casos de fulminación directa.

La figura IV.7 muestra un individuo refugiado bajo la copa de un árbol, quien resulta fulminado indirectamente cuando el árbol es impactado por un rayo, por cuanto al descender la descarga por el tronco desde la copa se ha derivado una descarga lateral sobre la víctima, como indica la figura, seguramente porque esta vía ofrece menos resistencia al paso de la corriente que el tramo restante del tronco del árbol.

Un caso algo menos frecuente de fulminación indirecta se presenta cuando un rayo que cae cerca de un objeto metálico aislado de tierra, como el techo de lámina de hojalata sobre una armadura de madera, induce electrostáticamente una fuerte carga eléctrica en determinada zona del metal, capaz de fulminar a una persona que se encuentre suficientemente próxima a dicha zona, como se indica en la figura IV.8.

También se da el caso de personas lesionadas por la corriente de la trazadora ascendente que surge de ellas mismas al aproximarse la trazadora descendente de un rayo, aunque ambas trazadoras no lleguen a interconectarse.

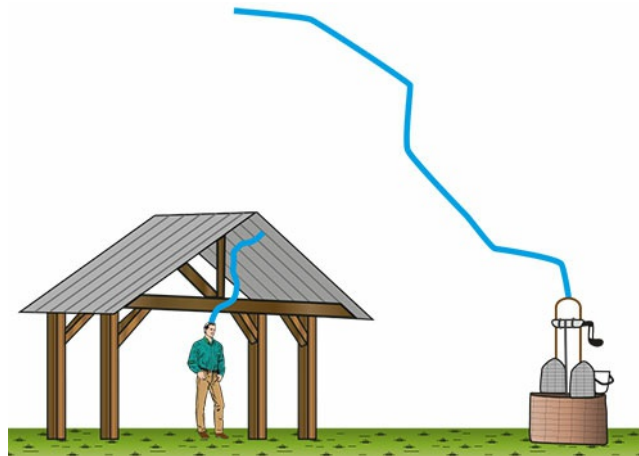


FIGURA IV.8. *La carga eléctrica inducida electrostáticamente por un rayo en un techo metálico cercano, aislado de tierra, puede causar indirectamente la fulminación de una persona, como se muestra aquí.*

Añádase a lo anterior el hecho de que las corrientes rápidamente variables características de las descargas eléctricas atmosféricas pueden generar a cierta distancia, por inducción electromagnética, chispas capaces de producir daños considerables, e incluso catastróficos en lugares inesperados. Así, por ejemplo, cuando hace algún tiempo un almacén de explosivos austriaco voló en pedazos al caerle un rayo al pararrayos que supuestamente lo estaba protegiendo, los expertos atribuyeron la catástrofe a chispas que posiblemente saltaron por inducción electromagnética entre las barras de refuerzo

interiores de las paredes de hormigón del recinto.⁵

Menos espectacular, pero mucho más frecuente, es la afectación a los equipos electrónicos modernos por inducción electromagnética de las descargas eléctricas atmosféricas (efecto ya mencionado en el capítulo III). Con el propósito de prevenir daños de este origen es práctica común instalar un limitador de sobretensiones transitorias en la salida telefónica de las computadoras personales y otro en su entrada de alimentación eléctrica para, en caso de que llegue por la línea telefónica o por la de suministro eléctrico una sobretensión transitoria originada por la caída de un rayo cercano, evitar que ésta dañe el módem o la tarjeta madre del equipo, aunque no se espera de estos dispositivos que logren impedir daños mayores si la sobretensión es demasiado grande.

EN TIEMPO DE BORRASCA

En promedio, una tormenta eléctrica produce de una a tres descargas nube-tierra por segundo. Por consiguiente, es natural que cualquier indicio de que una tormenta de esta clase está próxima a la zona donde nos encontremos, deba interpretarse como una señal de peligro a la cual conviene responder tomando de inmediato las precauciones del caso, como las que se indican a continuación, para resguardarse de los posibles efectos del rayo.

En la figura IV.9 se muestra una situación que puede tomarse como indicación de amenaza de una tormenta eléctrica, independientemente de que en la actualidad se comercializan detectores de mano para el mismo propósito, que pueden resultar de considerable utilidad para el usuario con tal de que hayan sido sometidos a una verificación rigurosa.

Por cierto que si se ve un relámpago más o menos lejano y poco después se oye el trueno correspondiente, basta suponer que la distancia a que cayó el rayo fue de alrededor de 1.7 km por cada cinco segundos transcurridos, dado que mientras el destello luminoso se propaga hasta nosotros casi instantáneamente, el sonido lo hace en el aire a razón de unos 340 metros por segundo. De aquí que se haya hecho popular la siguiente regla práctica: si usted se encuentra en descampado y pasan menos de 30 segundos entre el relámpago y el trueno asociado, apresúrese a protegerse de los rayos, porque están cayendo tan cerca que podrían causarle daño.



FIGURA IV.9. Efecto, sobre el cabello, del fuerte campo eléctrico atmosférico producido por una tormenta próxima a desencadenarse.

Riesgos y precauciones bajo techo

Aun encontrándose bajo un techo apropiado, conviene seguir las siguientes recomendaciones para protegerse de los efectos directos e indirectos de eventuales fulminaciones:

- Tan pronto perciba una amenaza de tormenta eléctrica, manténgase tan alejado como pueda de porches y terrazas, así como de puertas y ventanas que no pueda cerrar a tiempo, como debe hacerse. No se tienda sobre pisos de hormigón armado ni se apoye en paredes de este material.
- Evite el contacto físico con tomacorrientes, aparatos telefónicos y otros equipos conectados por hilos conductores a redes eléctricas exteriores o antenas exteriores. Pero si se desea proteger especialmente alguno de ellos desconectándolo de línea, esto debe hacerse solamente antes de que llegue la tormenta y no después (el uso de teléfonos inalámbricos no es peligroso).
- Evite el contacto físico con las redes de distribución de agua y de gas. En

condiciones de tormenta eléctrica es recomendable abstenerse de ducharse y de usar lavaderos y lavamanos.

Riesgos y precauciones al aire libre

En general, el riesgo de que una persona sea fulminada por un rayo durante una tormenta eléctrica es mucho mayor si la persona se encuentra al aire libre que si permanece en el interior de un recinto donde se cumplan las condiciones de seguridad antes expuestas.

Como bien se sabe, las zonas más elevadas del paisaje son más proclives a recibir una fulminación que las más bajas, de suerte que resulta particularmente peligroso para una persona hallarse en la cumbre de una montaña durante una tormenta, especialmente si sostiene un objeto metálico que le sobresale por encima. La noticia del accidente a que se refiere la figura IV.10 constituye un buen ejemplo de esta afirmación.

Se ha calculado que la probabilidad de que un objeto sea alcanzado por un rayo en descampado es proporcional al cuadrado de su altura, de suerte que resulta particularmente peligroso para una persona andar por el campo bajo una tormenta eléctrica cubriéndose con un paraguas, o empuñando un machete, un palo de golf, una escopeta, etc., cuya punta sobrepase la altura de la cabeza.



FIGURA IV.10. Noticia publicada en un diario del año 1958, que corrobora el alto riesgo de fulminación que se corre al aire libre cuando no se toman en cuenta las medidas de protección contra los rayos.

También se calcula que si una persona se para junto a un árbol aislado (más generalmente: muy próxima a un objeto elevado) la probabilidad de ser fulminada por un rayo es unas 50 veces mayor que si se mantiene de pie sobre el terreno, apartada de todo.

En general, cuando se está en descampado, conviene seguir las siguientes recomendaciones.

Si hay un refugio seguro cercano:

- En cuanto observe que se acumulan nubes oscuras amenazantes hacia donde usted se encuentra, oiga un trueno o vea un relámpago, parta en busca de un refugio (edificación segura, automóvil cerrado) y permanezca en él hasta pasados 30 minutos desde la última vez que oyó tronar, para evitar la posibilidad de que lo alcance un rayo “caído de un cielo sereno” (recuérdese lo explicado en el capítulo II).
- En cualquier caso, no camine a grandes zancadas, para minimizar el riesgo de sufrir daños por tensión de paso.
- Si se encuentra a bordo de una embarcación, trate de volver urgentemente a la orilla, a menos que esté muy lejos de ella. En este caso, tiéndase en el fondo de la embarcación si ésta no tiene mástil. De tenerlo, éste constituye un verdadero pararrayos protector, siempre que esté asegurada su continuidad eléctrica con el agua.
- Si se encuentra usted nadando en el mar, en un río, un lago, o una piscina, salga del agua, aléjese de ella lo más que pueda y busque un refugio seguro, de no estar éste demasiado lejos. En caso contrario, proceda como se indica a continuación.

UN RAYO SIEMBRA EL PÁNICO EN ALEMANIA

Un total de 43 personas resultaron heridas en la localidad de Parchim (este de Alemania) al impactar un rayo en una fiesta popular, mientras se celebraba el Día del Padre con acampadas festivas en todo el país. La mayoría de los afectados resultaron con quemaduras de menor grado, salvo en tres casos, en que sufrieron heridas de mayor consideración, informaron fuentes policiales. El impacto del rayo se produjo sobre el mediodía, cuando unas 500 personas estaban concentradas en el lugar y trataron de resguardarse de la lluvia bajo las carpas de la acampada y los árboles. (EFE)

FIGURA IV.11. Noticia publicada en un diario de mayo de 2013, que evidencia el alto riesgo de fulminación que se corre al aire libre cuando no se toman en cuenta las medidas preventivas recomendadas.

Si no hay un refugio seguro cercano:

- No se guarezca bajo un árbol, sobre todo si se trata de un árbol aislado, ni junto a un poste o estructura elevada, ni bajo un techo metálico sobre paredes aislantes, tiendas de campaña, colgadizos u otras pequeñas edificaciones sin buena conexión eléctrica a tierra. Manténgase a una distancia no menor de dos metros de cualquier objeto alto aislado. La noticia de la figura IV.11 ejemplifica lo peligroso de no tomar en cuenta estas recomendaciones.
- Si se le eriza el cabello o siente hormigueo en la piel, échese al suelo de inmediato, porque tales efectos pueden ser una señal de que está a punto de caerle un rayo.
- Si usted forma parte de un grupo de personas, haga que éstas se mantengan separadas varios metros unas de otras, al igual que de animales u objetos como cercas ganaderas, tendederos de ropa, cables aéreos, líneas de ferrocarril o de transmisión eléctrica, cañerías metálicas, etcétera.
- No toque objetos metálicos, como bicicletas, máquinas, etc., ni porte objetos como paraguas, cañas de pescar o palos de golf cuya punta sobrepase la altura de su cabeza.
- Póngase en cuclillas y de puntillas bajando la cabeza y poniendo las manos en ella,

como se indica en la figura IV.12, para minimizar el contacto de su cuerpo con el suelo, preferiblemente en una depresión del terreno. (La otra posición indicada en la figura IV.12 es una alternativa menos cansada, pero también algo menos recomendable porque pone en contacto con el suelo un área mayor del cuerpo.)



FIGURA IV.12. *A la izquierda: posición de mínimo contacto corporal con el suelo, recomendable si ha de permanecer en descampado bajo una tormenta eléctrica. A la derecha: posición de mínimo contacto corporal con el suelo, recomendable para las personas que no resisten permanecer en la posición anterior.*

A manera de resumen compacto de lo expuesto previamente con respecto a la protección de las personas contra los rayos cuando se encuentran en campo abierto, vale la pena remitirse a un cartel elaborado con el mismo propósito por la Asociación de Golf de los Estados Unidos (USGA), que dice así:

¿QUÉ HACER CUANDO EL RAYO ANDA CERCA?

EVITE

Árboles solitarios

Refugios para guarecerse de la lluvia y el sol

Áreas extensas y abiertas

Áreas húmedas

Áreas elevadas

Todos los objetos metálicos, incluyendo: palos de golf, carritos de golf, cercas, maquinaria eléctrica y de mantenimiento y líneas eléctricas

BUSQUE

Edificio grande, permanente

Vehículo metálico completamente cerrado
(automóvil, furgoneta o camioneta)

Área de menor elevación

Área densamente poblada de árboles o arbustos

Si los rayos se presentan de repente y tan cerca que no permiten la evacuación hacia un lugar más seguro, agáchese en la posición del receptor de pelota con los pies juntos y las manos sobre las rodillas.

En esencia, estas recomendaciones coinciden con las que se han dado antes, salvo la última, que no parece tan buena como la de la izquierda en la figura IV.12, por cuanto ésta tiende a hacer menos prominente el cuerpo de los individuos sobre el suelo, y también a proteger sus tímpanos de los truenos.

DE LA CERAUNOMANCIA A LA CERAUNOMEDICINA

En el primer capítulo se dijo algo sobre los augures de la antigua Roma y su vinculación adivinatoria con la observación de los rayos, el vuelo de las aves y demás. En aquel contexto la mayor autoridad estaba reservada a la *ceraunomancia*; esto es, a la adivinación por observación de los rayos.

Créese que el rayo tiene virtud soberana —escribió el filósofo Séneca en el siglo I de nuestra era—, porque cuando se presenta quedan anulados todos los demás presagios. Lo que él anuncia es irrevocable y no puede modificarlo ninguna otra señal. Todo lo que puede verse de amenazador en las entrañas [de los animales sacrificados] o en el vuelo de las aves, lo borra el rayo propicio; mientras que nada de lo que él presagia podría desmentirlo el vuelo de las aves ni las entrañas de las víctimas.⁶

Con el tiempo, la *ceraunomancia* y, en general, la labor de los augures romanos, fue desacreditándose (recuérdese la observación de Cicerón citada en el capítulo I) hasta que, finalmente, dejó de practicarse por completo en relación con las actividades públicas. En cambio, otra disciplina vinculada al rayo, la *ceraunomedicina*, que se ocupa de la atención médica a los pacientes afectados por alguna *ceraunopatía* —esto es, una enfermedad ocasionada por el rayo— ha tomado carta de naturaleza en los últimos tiempos, aun cuando todavía cuenta con pocos especialistas.

Algunos calculan que cada año mueren en el mundo varios millares de personas fulminadas por rayos y que son probablemente entre cinco y 10 veces más las que desarrollan graves problemas de salud por la misma causa.⁷ En opinión de la doctora Elisabeth Gourbière, del Departamento de Estudios Médicos de Électricité de France, solamente 20% de las víctimas de una fulminación mueren de inmediato por paro cardíaco o cardiopulmonar, pero la mayoría de los sobrevivientes no recibe un tratamiento adecuado porque muchos médicos no se encuentran muy al tanto de cómo tratar las afectaciones al organismo humano ocasionadas por el rayo, que no son necesariamente idénticas a las sufridas por las víctimas de accidentes eléctricos industriales. Las quemaduras derivadas de una fulminación no suelen ser tan peligrosas para la vida de la víctima como las de origen industrial, que pueden ser mucho más profundas. Por otra parte, según la especialista mencionada, 70% de los sobrevivientes de una fulminación experimentan secuelas como perforación de los tímpanos, quemaduras superficiales de la piel con un aspecto característico, parálisis temporal de ambas piernas (*ceraunoparálisis*), entumecimiento, hormigueo del cuerpo y debilidad general. Pueden desarrollarse otras secuelas con el paso del tiempo, como cataratas,

dolores crónicos, disfunciones sexuales y trastornos neuropsiquiátricos. Si la fulminación daña gravemente el cerebro del sobreviviente, éste puede entrar en coma. Según el *Manual Merck de información médica*, tras quedar inconsciente como consecuencia de haber sufrido una fulminación, “típicamente la persona se despierta pero no recuerda lo que ocurrió antes del accidente [...] puede sentirse confusa, pensar con lentitud, y tener dificultad en concentrarse y recordar sucesos recientes. [También] pueden ocurrir cambios de personalidad”.⁸

He aquí la descripción detallada de un accidente por descarga atmosférica, ocurrido en la antigua Unión Soviética a finales de la década de 1960, que tomamos de un artículo publicado en una revista francesa:

Durante una tormenta dos mujeres se habían guarecido bajo un abeto grande cuando a éste le cayó un rayo. Una de ellas, que murió de inmediato, tenía la espalda apoyada en el tronco. Sus ropas no se estropearon, pero los cabellos de la parte posterior derecha de su cabeza, ligeramente quemados, se pusieron grises como la ceniza en una extensión de unos 16 cm². El único daño aparente en el centro de esta zona era una ligera erosión de la piel. Una tira de la corteza del árbol de 4 a 6 cm de ancho había sido arrancada desde la cima del tronco hasta un punto situado a 1.58 m del suelo, es decir, a la altura de la víctima. De suerte que la corriente había descendido a lo largo del tronco hasta que abandonó la corteza para pasar a través de la persona que se apoyaba sobre ella.

La otra mujer, que sólo apoyaba la mano derecha en el tronco, perdió el conocimiento durante un cuarto de hora. Pero, después de haberlo recobrado, no pudo caminar durante varias horas, habiendo perdido toda sensación en los miembros inferiores. Aun cuando mostraba numerosas huellas de quemaduras desde la parte superior del cuerpo hasta los pies, pudo dejar el hospital al cabo de dos días y volver al trabajo dos días más tarde.⁹

En un número posterior, la misma revista de donde procede esta información publicó un apartado titulado “Noticia extravagante de una fulminación”, con esta curiosa reseña:

En 1971 el camionero estadounidense Edwin A. Robinson tuvo un accidente de carretera a consecuencia del cual quedó ciego y parcialmente sordo. El verano pasado [1980] se hallaba bajo un álamo cerca de su casa en Falmouth, Maine, buscando a su pollo mascota, pese a que rugía una tormenta. Entonces le cayó un rayo al álamo y Robinson quedó aturdido. Cuando volvió en sí, veinte minutos después, veía muy bien. Un examen oftalmológico realizado posteriormente reveló que su vista era perfecta, lo que ya era algo para un hombre de 62 años. Además, recuperó el sentido del oído. Pero la culminación del caso fue que Robinson, que era calvo desde hacía 35 años —sin relación con el accidente—, tiene actualmente el cráneo cubierto por una espesa pelambrera. La firma de televisión estadounidense ABC le ha consagrado un programa a Robinson.¹⁰

Independientemente del grado de fantasía que pueda haberse incorporado al reportaje anterior, lo cierto es que ocasionalmente se dan casos de víctimas del rayo que se recuperan de dolencias crónicas, como parálisis de los miembros, falta de visión, etc., lo cual puede explicarse suponiendo que se trata de casos de histeria, cuya solución también hubiera podido lograrse mediante tratamiento psiquiátrico.¹¹

Parece más difícil justificar de manera convincente lo del rebrote del cabello al que

se refiere; en cambio, es de suponer que pueda explicarse científicamente el “extraordinario efecto” de una fulminación ocurrida en el siglo XVIII en la ciudad española de Santiago de Compostela, que describe el padre Feijoo en los siguientes términos:

Estaba [yo] cerca de la parte donde [un rayo] hirió a un muchacho natural de la Villa de Avilés, que conozco, llamado Juan Francisco Menéndez Miranda. No le tocó la más leve chispa del rayo, ni sintió dolor en miembro alguno. Pero desde aquel momento empezó a caérsele el pelo, o vello que tenía en todas partes de su cuerpo, y prosiguió algunos días, hasta no quedarle el más leve hilo en la cabeza, cejas, barba, etcétera.¹²

En otro lugar de este texto se ha alertado sobre el riesgo que se corre cuando se conversa por un teléfono no inalámbrico durante una tormenta eléctrica. Las fuertes corrientes que circulan en una línea telefónica, originadas por la caída de un rayo, pueden afectar devastadoramente a la persona que está usando el aparato conectado a la línea. Típicamente, la víctima siente como un escopetazo que la lanza a distancia y la deja temporalmente inconsciente, entumecida, traumatizada y marcada con las lesiones cutáneas ramificadas y rojizas características de las fulminaciones (llamadas genéricamente “figuras de Lichtenberg”). En el peor de los casos, puede sobrevenir el fallecimiento de la persona afectada.

Según la doctora Mary Ann Cooper, del Departamento de Medicina de Emergencia de la Universidad de Illinois, los rayos pueden lesionar a un individuo por una o más de las siguientes causas:¹³

- Fulminación directa (3-5% de las lesiones).
- “Salpicadura” (descarga) lateral de otro objeto (30% de las lesiones).
- Contacto con un objeto cuando éste es fulminado (1-2% de las lesiones).
- Efecto de las corrientes de tierra (40-50% de las lesiones).
- Efecto de una trazadora ascendente que no se conecta con una trazadora descendente para completar un canal del rayo (20-25% de las lesiones).
- “Trauma directo” si una persona resulta lanzada, y “barotrauma” si se encuentra tan cerca de la fulminación que experimenta la fuerza explosiva del rayo.

Contrariamente a algunas creencias populares, las víctimas de los rayos no retienen carga eléctrica alguna, y no se considera peligroso entrar en contacto con ellas. Se recomienda prestarles los primeros auxilios de inmediato, sobre todo en el caso más grave de un paro cardiorrespiratorio, cuando la rápida aplicación de una reanimación cardíaca y respiratoria puede evitar la muerte del fulminado o la aparición de secuelas neurológicas. Para prevenir daños mayores en el caso de los traumatizados, también se recomienda evitar cualquier manipulación inútil de la víctima. En principio, toda persona

fulminada debe ser examinada por un médico y atendida clínicamente en un hospital habilitado de manera conveniente, en donde se aconseja mantener sobre ella, con carácter preventivo, una vigilancia continua durante 24 o 48 horas, incluso si todo parece ir bien y la persona mejora.¹⁴

PARARRAYOS HUMANOS

Hace algún tiempo, mientras le echaba un vistazo a algunos papeles de mi archivo personal sobre cosas del rayo, cayó de una carpeta un amarillento y arrugado recorte de periódico con una nota de la sección *Aunque usted no lo crea*, de Ripley, que bajo el título “¡Crimen vengado por un rayo!” decía así: “Miran Jaffer, de Bengala, India, asesinó a su soberano el 2 de julio de 1757 y en la misma fecha, durante los tres años siguientes, le cayó un rayo. El tercero lo mató.”

Confieso que me cuesta trabajo aceptar al pie de la letra la veracidad de todo lo que aquí se afirma. De lo que sí no cabe duda, porque está bastante bien documentado, es de que en los más variados lugares del planeta se registran casos de personas que han sufrido múltiples fulminaciones en el curso de su vida, como veremos en los siguientes ejemplos.

“Los rayos me persiguen”, le manifestó Jorge Márquez, pequeño agricultor de la localidad cubana de San Manuel, provincia de Las Tunas, a un periodista que lo entrevistó en septiembre de 2004. El primer rayo lo alcanzó la tarde del 5 de junio de 1982 cuando manejaba un tractor:

De pronto, siento aquello que entra por el [tubo de] escape del tractor. Yo sólo vi un hilo rojo del grueso de un cable [eléctrico] y una sensación de algo muy frío que penetró en mi cuerpo [...] Perdí el conocimiento y lo recuperé en el hospital. Los muchachos me contaron que al caer al suelo me sacaron la lengua rápidamente, pues según ellos me estaba poniendo bastante morado. El rayo me quemó el pelo y la espalda, tuve perforaciones en los tímpanos, me arrancó los empastes de las muelas, y me hizo otros daños, pero de poca consideración [En cambio] el motor del tractor no sirvió para nada más.¹⁵

Cinco años después, el 2 de junio de 1987, al asomarse a la puerta desde el interior de la casa de unos amigos en la que se hallaba de visita, Márquez experimentó una segunda fulminación que lo dejó sin conocimiento. La tercera, que se produjo en junio de 1988, así como la cuarta y la quinta, ocurridas en los primeros años de la década de 1990, no tuvieron consecuencias mayores, pero le dejaron un mal recuerdo. En cuanto a los rayos, “te aseguro que yo trato por todos los medios de evitarlos —le dijo al periodista—. No salgo de la casa o del lugar donde esté cuando truena bastante, pues temo mucho que un día cualquiera no pueda aguantar el sexto”.¹⁶

Que se sepa, ha habido al menos una persona que sobrevivió no sólo a una sexta, sino a una séptima fulminación recibida, razón por la cual su nombre figura en el afamado *Libro de récords Guinness*. Se trata de Roy Sullivan, un guardaparque del Parque Nacional de Shenandoah, en el estado norteamericano de Virginia, que fue víctima de

siete fulminaciones entre 1942 y 1977, como veremos a continuación.¹⁷

Sullivan resultó fulminado por primera vez en 1942, al salir corriendo de una torre de vigilancia de incendios en cuyo interior habían comenzado a saltar chispas ocasionadas por una tormenta eléctrica. La descarga le produjo una quemadura a lo largo de la pierna derecha, la caída de la uña de un pie y un agujero en la suela del zapato. La segunda fulminación, ocurrida en 1969 mientras conducía un camión por un camino de montaña, lo dejó inconsciente y le quemó las cejas, las pestañas y la mayor parte del cabello. Le volvió a ocurrir lo mismo en 1972, con posterioridad a haber recibido, en 1970, en el patio de su propia casa, una descarga que, luego de haber impactado un transformador de distribución cercano, lo alcanzó en el hombro.

Tras la cuarta fulminación (la de 1972), Sullivan se obsesionó con la idea de que alguna fuerza maligna lo estaba persiguiendo para destruirlo, por lo que tomaba todas las medidas de protección a su alcance en cuanto divisaba alguna nube de tormenta que suponía que lo estaba siguiendo. En particular, se las arreglaba para tener siempre a mano un recipiente con agua. Que no andaba nada descaminado en esto lo demuestra el hecho de que, en 1973, mientras realizaba su recorrido reglamentario por el parque, lo alcanzó una descarga eléctrica que, de nuevo, le incendió el cabello, sólo que ahora logró apagarlo de inmediato porque si bien la descarga le bajó por el brazo y la pierna izquierdos y le sacó violentamente el zapato del pie, pudo arrastrarse hasta su vehículo para alcanzar el agua que llevaba allí y echársela sobre la cabeza.

Las dos últimas fulminaciones experimentadas por Sullivan ocurrieron en 1976 y 1977, con efectos no muy diferentes de los anteriores, salvo que en el caso de la séptima y última, ocurrida mientras estaba pescando en una laguna, apareció un oso hambriento cuando se dirigía a su auto para echar mano al consabido recipiente con agua, y no pudo empaparse debidamente el cuero cabelludo hasta que logró espantar al animal pegándole con una rama de árbol.

El señor Sullivan, conocido en vida como “el pararrayos humano”, falleció en 1983, a los 71 años de edad, pero no como consecuencia de una octava fulminación, sino de un acto suicida provocado por la aflicción que le ocasionó un amor no correspondido, según se dice.

LAS OTRAS CARAS DEL RAYO

Nada tiene de gratuito que la sola mención de la palabra *rayo* evoque de inmediato en nuestra mente una idea de violencia y destrucción. Pero eso no debe llevarnos a olvidar que existen también algunos efectos constructivos asociados a las descargas eléctricas atmosféricas, como los que me propongo reseñar muy sucintamente a continuación.

Uno de ellos es la síntesis, a partir de las moléculas de nitrógeno en la atmósfera, de compuestos que pueden asimilar la mayoría de las plantas, ya que solamente algunas, como las leguminosas, en combinación con ciertos microorganismos del suelo, tienen la capacidad de absorber directamente del aire el nitrógeno que todas las plantas necesitan para su desarrollo.

Añádase a esto que se considera que la producción de fuegos forestales en remotas épocas prehistóricas fue un efecto particularmente importante de los rayos que favoreció la evolución biológica de las plantas en nuestro planeta, porque al quemarse la vieja vegetación decadente, ésta resultaba sustituida por otra más fuerte y exuberante, con más posibilidades de desarrollarse y evolucionar.

Por otra parte, se ha imaginado que muchísimo más atrás en el tiempo, cuando la vida en la Tierra era inexistente y su atmósfera contenía mucho hidrógeno, los rayos producidos en su seno posiblemente causaron la formación de moléculas orgánicas que constituyeron la base de la subsiguiente aparición de organismos vivientes. A partir de esta hipótesis propuesta por el profesor Harold Urey, su estudiante de doctorado Stanley Miller realizó en 1952 un experimento de laboratorio que le permitió obtener varios aminoácidos (componentes esenciales de las proteínas) sometiendo a descargas eléctricas una mezcla de agua, metano, amoníaco e hidrógeno, que simulaba esencialmente la composición de la atmósfera originaria, como se la concebía entonces. Este resultado armonizaba con la hipótesis de Aleksander Oparin y J. B. S. Haldane en el sentido de que las condiciones imperantes en la Tierra primigenia permitieron la síntesis química de compuestos orgánicos. Con todo, como acotaba en 1980 el profesor Carl Sagan, en su conocida obra *Cosmos*,

todavía hay mucho que entender sobre el origen de la vida, incluyendo el origen del código genético. Pero hace sólo unos treinta años que llevamos realizando tales experimentos. La naturaleza ha tenido cuatro mil millones de años de ventaja en la arrancada. A fin de cuentas, no lo hemos hecho tan mal.¹⁸

Lo que no significa que falten entendidos para quienes es inaceptable, por principio, la posibilidad de la abiogénesis —es decir, de la creación de organismos vivos a partir de materia inanimada—, e incluso cuestionan las conclusiones generalmente aceptadas del

experimento de Miller-Urey.

Mucho menos polémico es el papel decisivo que se atribuye a las descargas eléctricas atmosféricas en la conservación de la carga eléctrica negativa distribuida sobre la superficie del globo terrestre. Se ha supuesto, en efecto, que, como el aire atmosférico no es un aislante perfecto, dicha carga emigraría a su través hacia las capas superiores de la atmósfera en menos de una hora. Se ha atribuido al rayo el hecho de que las cosas no sucedan así, sino que la carga eléctrica terrestre se mantiene en un nivel esencialmente estable porque las numerosas tormentas eléctricas que a toda hora ocurren en nuestro planeta transfieren continuamente a la superficie del planeta una carga eléctrica negativa total que compensa la que emigra hacia las alturas.¹⁹

COLOFÓN

Entre las noticias breves que suelen aparecer en los medios de información masiva, sean actuales o de épocas pasadas, no faltan las que relatan algunos efectos del rayo, siempre referidas a casos muy concretos. En lo expuesto hasta ahora no he vacilado en utilizar algunas de ellas para ejemplificar este o aquel concepto y, de paso, amenizar un tanto la lectura. Pero entre las noticias que quedan en mi colección hay varias —unas confiables y otras que no lo son tanto— que me parece conveniente poner a disposición del lector; unas veces en calidad de valiosa información complementaria, y otras, de puro divertimento. Aquí van.

CAUSA DEL SONIDO EN EL TRUENO (*Scientific American*, 28/8/1845)

El trueno es una de las consecuencias que resultan del rayo y el rayo parece ser ocasionado por la combustión de algunas de las partículas inflamables del aire; o según opiniones más recientes, de una condensación de materia aérea que conduce la electricidad, por lo cual, en uno u otro caso, se crea un vacío. Los átomos a su alrededor que no son influidos por este cambio se aprietan fuertemente unos contra otros, obligados por todo el peso de la atmósfera; pero su naturaleza elástica hace que se expandan inmediatamente y adquieran su propiedad sonora. Se establece así una fuerza centrífuga que actúa igualmente en todas direcciones; pero a medida que se extiende el círculo, disminuye gradualmente su propiedad propulsiva, hasta que finalmente no se siente su presión ni se crea sonido...

FUEGO DEL CIELO (*La Ilustración Artística*, 15/9/1884)

En 1845 cinco habitantes de Heiltz-le-Maurupt, cerca de Vitry-le-François, se refugiaron, cuatro de ellos al pie de un álamo, y el quinto tuvo la malhadada ocurrencia de apoyarse contra un sauce, árbol que parece tener una afinidad particular con la materia fulgurante; al poco rato cayó sobre él un rayo. Sus compañeros notaban que brotaba una llama brillante de su ropa. “¡Que te quemas!, ¡que te quemas!, le dijeron; ¿no ves que estás ardiendo?”, mas como no se moviese, se acercaron a él, quedándose mudos de estupor al ver que su compañero era cadáver, aunque continuaba de pie.

[...] La mujer de un viticultor de las cercanías de Nancy estaba cogiendo flores para hacer un ramillete, cuando estalló una tormenta. Aquella infeliz fue herida por un espantoso rayo, y se la encontró de pie, teniendo aún en la mano una margarita que acababa de arrancar de su tallo.

[...] El 22 de enero de 1849 una cabra fue alcanzada por un rayo y muerta en el acto. Se la encontró de pie sobre sus patas traseras y teniendo todavía en la boca una ramita.

EL RAYO: PELIGRO PARA LOS AVIONES DEL FUTURO

(*Le Figaro*, 23/11/1986)

El rayo pudiera representar un peligro imprevisto para los aviones de la nueva generación porque los materiales compuestos utilizados para su construcción son más vulnerables que las estructuras metálicas de los aparatos tradicionales.

Según un informe presentado en el 2º Coloquio Internacional sobre Seguridad Aérea, celebrado en Tolosa, los progresos realizados en el dominio de los materiales compuestos y de la aviónica dan, en efecto, una nueva dimensión a la amenaza del rayo.

En promedio, un avión de línea es actualmente golpeado por este fenómeno una vez por año, sin ninguna consecuencia seria en la mayoría de los casos. Pero esta probabilidad corre el riesgo de agravarse con la nueva generación de aviones civiles y por ciertos aviones de combate.

ATERRIZA AVIÓN ALCANZADO POR UN RAYO

(EFE, 18/1/1992)

Un Boeing 767 de la compañía aérea japonesa All Nippon Airways (ANA) aterrizó sin novedad en el aeropuerto septentrional de Toyama, tras ser alcanzado por un rayo, que abrió un agujero en su fuselaje. El aparato llegó a su destino sin retraso con 75 pasajeros y seis tripulantes a bordo, luego de haber despegado de Tokio una hora antes.

RAYO MATA A EQUIPO DE FUTBOL

(BBC News, 28/10/1998)

Un rayo mató a todos los 11 miembros de un equipo de futbol pero dejó ileso al otro, ha reportado un periódico congolés. Otras treinta personas sufrieron quemaduras en el partido, celebrado en la República Democrática del Congo [...] El juego estaba empatado a un gol [...] cuando el rayo cayó sobre el equipo visitante [...] Con motivo de un accidente similar ocurrido durante el anterior fin de semana, un partido de *soccer* de gran liga que tenía lugar en Johannesburgo terminó abruptamente cuando cayó un rayo en el terreno [...] Varios jugadores se acurrucaron sobre el césped tapándose los ojos y oídos con las manos. Los espectadores y los entrenadores corrieron al campo para ayudar. Afortunadamente, nadie murió.

RAYO PELIGROSO

(EFE, 28/10/1999)

Un rayo cayó sobre el tendido eléctrico de una planta de enriquecimiento de uranio en la prefectura de Aomori, en el norte de Japón, y causó su detención automática y la liberación de gas hexafluoruro de uranio para evitar daños en el equipo. Se informó que no hubo pérdida de radiactividad y que la planta volvió a funcionar normalmente tras la reparación de los daños en los cables.

TREINTA Y UNA VACAS MUERTAS

POR UN RAYO EN DINAMARCA

(AFP, 19/8/2004)

Un rayo mató a 31 vacas que durante una violenta tormenta se habían refugiado bajo un gran árbol en un campo en Dinamarca, informó la televisión regional. El dueño de los animales, Kurt Nielsen, un granjero de Assing, al sur de Herning, estaba conmocionado por el espectáculo de las vacas muertas. “Puede ser que ame a mis animales, pero es demasiado duro perder 31 de una vez”, declaró. El libro Guinness de récords no tiene registrado un rayo tan devastador en el mundo.

RAYO MATA A FAMILIA PERUANA (Notimex, 21/1/2005)

Seis miembros de una familia murieron al ser alcanzados por un rayo en el surandino departamento peruano de Puno, frontera con Bolivia, afectado por tormentas eléctricas y lluvias, informó el diario *El Comercio*. Cuando el rayo cayó, las víctimas realizaban trabajos agrícolas y la tormenta eléctrica sobrevino junto con una fuerte lluvia, fenómeno que azota a Puno, a 1 333 kilómetros al sureste de Lima. Según fuentes locales, la descarga eléctrica pudo ser atraída por las herramientas de labranza que las víctimas —cuatro hombres y dos mujeres— tenían entre las manos. En la zona las lluvias caen con fuerza y no hay pararrayos que protejan a la población de este fenómeno natural.

AVIÓN ALCANZADO POR RAYO EN COLOMBIA (AFP, 17/8/2010)

Un avión comercial de la aerolínea colombiana Aires, que cubría la ruta comercial Bogotá-San Andrés, con 131 pasajeros, se partió en tres pedazos al aterrizar en la isla caribeña de San Andrés tras ser golpeado por un rayo, dejando una sola víctima fatal e hiriendo levemente al resto de los pasajeros. La nave fue impactada a escasos 80 metros de tocar tierra, y se estrelló en la pista de aterrizaje, desprendiéndose los motores.

BRASIL: CAYERON 38 000 RAYOS EN UN DÍA (ANSA, 3/2/2011)

Al menos 38 000 rayos cayeron en Brasil en tormentas registradas en 13 estados, informó el Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales. El Grupo de Electricidad Atmosférica señaló que anualmente caen en la nación sudamericana unos 60 millones de rayos, y a causa de estas descargas eléctricas mueren 132 personas. Los daños causados por las tormentas eléctricas a la infraestructura del país generan un perjuicio de unos 450 millones de dólares al año.

BRASIL: PAÍS DONDE CAEN MÁS RAYOS (Xinhua, 19/2/2013)

Brasil es el Estado del mundo en el que caen más rayos, según datos divulgados por el Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales, en los que se muestra que cada año más de 100 personas pierden la vida por su causa. Es el país tropical más extenso del planeta y por lo tanto es más fácil que se formen allí tormentas eléctricas. El periodo entre octubre y marzo es siempre el más crítico, con una mayor cantidad de rayos, que pueden alcanzar una potencia de 100 millones de voltios.

COMIENZAN OBRAS DE REPARACIÓN EN EL CRISTO REDENTOR DE RÍO

(EFE, 22/1/2014)

Las obras de mantenimiento y recuperación del Cristo Redentor de Río de Janeiro, el monumento más emblemático de Brasil, comenzaron este mes después de que la escultura fuera dañada por el impacto de varios rayos. Los trabajos, que está previsto duren un mes, los realizan operarios especializados en rapel y alpinismo, con el fin de evitar el uso de andamios, explicó la arquidiócesis, que vela por la escultura. El Cristo Redentor, elegido en 2007 como una de las siete maravillas del mundo moderno en una votación hecha por internet, fue alcanzado por un rayo la semana pasada, lo que provocó daños en el tercer dedo de su mano derecha.

MÁS RAYOS A CAUSA DEL CALENTAMIENTO GLOBAL

(*Muy Interesante*, 13/11/2014)

El calentamiento global incrementará significativamente la frecuencia con la que caen los rayos, de acuerdo con un nuevo estudio. Se estima que por cada dos rayos que cayeron en el año 2000 caerán tres en 2100. El aumento de las tormentas eléctricas podría tener consecuencias desastrosas.

El investigador David Romps, de la Universidad de California, Berkeley, y sus colegas se basaron en la información recolectada por la Red Nacional de Detección de Relámpagos de Estados Unidos durante un año [...] para calcular qué tanto aumentará la frecuencia de las tormentas eléctricas con cada grado extra de temperatura [...] Indican que por cada grado centígrado que aumente la temperatura global, la frecuencia de los relámpagos [se] incrementará 12%. Además de provocar más incendios naturales, las constantes tormentas eléctricas alterarán la composición química de la atmósfera [...]

Romps y sus colegas señalan que la temperatura “alimenta” las nubes para formar tormentas eléctricas. Conforme el planeta se caliente, habrá más energía para sustentar tormentas eléctricas más potentes. Se estima que durante el siglo XXI la Tierra se calentará 4 °C. Sin embargo, si esto sucede “los rayos serán la menor de nuestras preocupaciones”, declaró el líder del estudio. Los resultados han sido publicados en la revista *Science*.

MÉXICO OCUPA EL PRIMER LUGAR

EN MUERTES POR RAYOS

(*PL*, 24/11/2015)

México ocupa el primer lugar en muertes ocasionadas por los rayos, seguido de Tailandia y el sur de África. Guadalupe Matías Pérez, subdirectora del Centro Nacional de Prevención de Desastres, explicó que las tormentas eléctricas son de los fenómenos meteorológicos más peligrosos. De acuerdo con los especialistas, los daños causados en las personas impactadas por rayos son parálisis, quemaduras, dolor de cabeza intenso, pérdida de memoria y audición e incluso la muerte. Según la Organización Mundial de la Salud, cada año se reportan en México más de 250 víctimas fatales por fenómenos de este tipo.

BIBLIOGRAFÍA

- AFP, “Un muerto y 120 heridos en accidente de avión en San Andrés”, *La nación*, www.nacion.com, 16 de agosto de 2010.
- , “Árbol explosivo”, *Granma*, 42 (195): 4, 2006.
- Agencia de Xinhua, “Brasil es el país donde caen más rayos según estudio”, Brazilian Space, brazilianspace.blogspot.mx, 19 de febrero de 2013.
- Altshuler, José, “Maxwell y la extraña magia de sus ecuaciones”, en *A propósito de Galileo*, FCE, México, 2002, pp. 45-80.
- Álvarez Escudero, Lourdes, Israel Borrajero Montejó, Rosendo Álvarez Morales, Laura Aenlle Ferro y Maydes Bárcenas Castro, “Actualización de la distribución espacial de las tormentas eléctricas en Cuba”, *Revista Cubana de Meteorología*, 18 (1): 109-125, 2012.
- Alzate, José Antonio, “Contestación a D. M.”, *Gacetas de Literatura de México*, t. 1 [reimpresión a cargo de Manuel Buen Abad], Oficina del Hospital de S. Pedro, Puebla, 1831, pp. 229-230.
- Anónimo, “Comentario a la guerra de África”, en Julio César, *Obras completas*, El Ateneo, Buenos Aires, 1951, pp. 537-595.
- Arrate, José M. Félix de, *Llave del Nuevo Mundo, antemural de las Indias Occidentales. La Habana descripta: noticias de su fundación, aumentos y estados*, Comisión Nacional Cubana de la UNESCO, La Habana, 1964.
- Attwood, Stephen S., *Electric and Magnetic Fields*, J. Wiley, Nueva York, 1948.
- Beeman, Donald (coord.), *Industrial Power Systems Handbook*, McGraw-Hill, Nueva York, 1955.
- Beers, Mark H. (coord.), *The Merck Manual of Medical Information: Second Home Edition*, Merck Research Laboratories, Kenilworth [Nueva Jersey], 2003.
- Bernstein, Theodore, y Terry S. Reynolds, “Protecting the Royal Navy from Lightning: William Snow Harris and his Struggle with the British Admiralty for Fixed Lightning Conductors”, *IEEE Transactions on Education*, 21 (1): 7-14, 1978.
- Cajori, Florian, *A History of Physics*, Macmillan, Nueva York, 1919.
- “Cause of Sound in Thunder”, *Scientific American*, 1 (1): 1, 1845.
- Cervantes Saavedra, Miguel de, *Obras completas*, vol. II: *Novelas ejemplares, Los trabajos de Persiles y Sigismunda, Comedias y entremeses*, Juventud, Barcelona, 1964.

- Clark, Fiona, “Nothing Ventured, Nothing Gained: Lightning and Enlightenment in the *Gazeta de Literatura de México* (1788-1795)”, en Peter Heering, Oliver Hochadel y David J. Rhees (coords.), *Playing with Fire: Histories of the Lightning Rod*, American Philosophical Society, Filadelfia, 2009, pp. 71-93.
- Cohen, I. Bernard, “Prejudice Against the Introduction of Lightning Rods”, *Journal of the Franklin Institute*, 253 (5): 393-440, 1952.
- Colón, Hernando, *Historia del almirante don Cristóbal Colón por su hijo don Hernando*, Librería General de Victoriano Suárez, Madrid, 1932.
- Cooper, Mary Ann, “Lightning Injuries”, Medscape, medscape.com, 2009.
- , “Lightning Injury Facts: Myths, Miracles, and Mirages”, Lightning Injury Research Program, lightninginjury.lab.uic.edu, 1995.
- Day, Peter (comp.), *The Philosopher’s Tree: A Selection of Michael Faraday’s Writings*, Institute of Physics Publishing, Londres, 1999.
- Devaux, Pierre, *Histoire de l’électricité*, Presses Universitaires de France, París, 1958.
- Dibner, Bern, *Early Electrical Machines*, Burndy Library, Connecticut, 1957.
- Diels, Jean-Claude, Ralph Bernstein, Karl E. Stahlkopf y Xin Miao Zhao, “Lightning Control with Lasers”, *Scientific American*, 277 (2): 50-55, 1997.
- “Distribution of Lightning”, Wikipedia, en.wikipedia.org, 2014.
- Dobson, Gordon, *Exploring the Atmosphere*, Clarendon Press, Oxford, 1963.
- Dwyer, Joseph R., “A Bolt out of the Blue”, *Scientific American*, 292 (5): 64-71, 2005.
- , “Do Cosmic Rays Cause Lightning?”, *Scientific American*, 298 (4): 114, 2008.
- EFE, “Comienzan las obras para reparar el Cristo Redentor de Río”, Ideal, www.ideal.es, 22 de enero de 2014.
- , “Un rayo siembra el pánico en fiesta popular alemana”, *Granma*, 49 (111): 8, 2013.
- Eguren, Gustavo, *La fidelísima Habana*, Letras Cubanas, La Habana, 1986.
- Ellis, Warren, “Arizona Superlightning”, warrenellis.com, 22 de agosto de 2005.
- Fara, Patricia, *An Entertainment for Angels. Electricity in the Enlightenment*, Icon Books, Duxford, 2002.
- Feijoo, Benito J., “Carta xxv”, en *Cartas eruditas y curiosas*, t. 4, Imprenta Real de la Gazeta, a costa de la Real Compañía de Impresores y Libreros, Madrid, 1774, pp. 347-362.
- Few, Arthur A., “Thunder”, *Scientific American*, 233 (1): 80-90, 1975.
- Feynman, Richard P., Robert B. Leighton y Matthew Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Bilingua, Estados Unidos, 1964.
- Finn, Bernard S., “Output of Eighteenth-century Electrostatic Machines”, *The British*

- Journal for the History of Science*, 5 (19): 289-291, 1971.
- Fleury, Pierre, y Jean-Paul Mathieu, *Physique générale et expérimentale*, vol. 7, Eyrolles, París, 1958-1960.
- Franklin, Benjamin, *Autobiography*, Pocket Books, Nueva York, 1946.
- , “Carta del 18 de marzo a John Lining”, en *Experiments and Observations on Electricity*, s. e., Londres, 1769, pp. 319-328.
- Gilbert, T. C., “Protection against Lightning. A Detailed Review of Modern Practice in the Protection of Buildings Against Lightning Strokes, Based on Statutory Rules and Regulations”, *The Electrical Times*, 16: 822-824; 23: 857-858; 30: 899-900, 1937.
- Gillett, John. D., “Ball of Fire”, *Nature*, 299: 294, 1982.
- Golde, R. H., “A Plain Man’s Guide to Lightning Protection”, *Electronics and Power*, 15 (3): 84-86, 1969.
- González Quesada, Gerardo, “Los rayos me persiguen”, *Granma*, 40 (230): 8, 2004.
- Gourbière, Elisabeth, “La fulminación humana”, qsl.net, admin.qsl.net, 1999.
- Hedges, Killingworth, “Lightning Conductor”, en *Encyclopædia Britannica*, vol. 16, 11ª ed., Cambridge University Press, Cambridge, 1911, pp. 673-675.
- Heredia, José María, *Poemas*, Red Ediciones, Barcelona, 2016.
- Hermant, Alex, y Christian Lesage, *L’Électricité atmosphérique et la foudre*, Presses Universitaires de France, París, 1997.
- Herschbach, Dudley, “Ben Franklin in his Own Words”, *Physics Today*, 57 (11): 20, 2004.
- Hill, R. D., “Los rayos”, *Endeavour*, 31 (112): 3-9, 1972.
- Homero, *Iliada*, Arte y Literatura, La Habana, 1982.
- Kapitsa, Pyotr L., “Sobre la naturaleza del rayo esférico”, en *Experimento, teoría, práctica*, Mir, Moscú, 1985, pp. 68-75.
- La Biblia. Dios habla hoy, con deuterocanónicos*, 2ª ed., Sociedades Bíblicas Unidas, México, 1989.
- La Taille, Renaud de, “Le Paratonnerre absolu”, *Science et Vie*, 852: 78-82 y 168, 1988.
- , “Pourquoi le foudre tue”, *Science et Vie*, 732: 40-45, 161, 1978.
- Latham, John, “Thunder and Lightning”, en Vivian Fuchs (coord.), *Forces of Nature*, Thames and Hudson, Londres, 1977, pp. 57-80.
- “Lightning Damage Photos”, National Lightning Safety Institute, lightningsafety.com, 2009.
- “Lightning Kills Football Team”, BBC News, news.bbc.co.uk, 28 de octubre de 1998.
- Loeb, Leonard B., “The Mechanism of Lightning”, *Scientific American*, 180 (2): 22-27, 1949.

- Lucrecio Caro, Tito, *The Nature of the Universe*, Penguin Books, Middlesex, 1951.
[Versión en español: *La naturaleza*, presentación, traducción y notas de Francisco Socas, Gredos, Madrid, 2010.]
- M. A., “Fuego del cielo”, *La Ilustración Artística*, 3 (142): 303-304, 1884.
- Machado, Antonio, *Antología poética*, prólogo y notas de Joaquín Benito de Lucas, Ediciones EDAF, Madrid, 2003.
- Malan, D. J., “Relámpagos”, *Revista de Obras Públicas* [España], 1 (2933): 561-569, 1959.
- Marshall, Eliot, “Lightning Strikes Twice at NASA”, *Science*, 236 (4804): 903, 1987.
- “Más rayos a causa del calentamiento global”, *Muy Interesante*, www.muyinteresante.com.mx, 13 de noviembre de 2014.
- Maxwell, James Clerk, “On the Protection of Buildings from Lightning”, en *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, Dover Publications, Nueva York, 1890, pp. 538-540.
- McDonald, James, “The Earth’s Electricity”, *Scientific American*, 188 (4): 32-37, 1953.
- McEachron, Karl. B., “Lightning Protection since Franklin’s Day”, *Journal of the Franklin Institute*, 253 (5): 441-470, 1952.
- Mende, Stephen B., Davis D. Sentman y Eugene M. Wescott, “Lightning between Earth and Space”, *Scientific American*, 277: 56-59, 1997.
- Moore, Charles B., Graydon D. Aulich y William Rison, “A Modern Assessment of Benjamin Franklin’s Lightning Rods”, en Peter Heering, Oliver Hochadel y David J. Rhee (coords.), *Playing with Fire. Histories of the Lightning Rod*, American Philosophical Society, Filadelfia, 2009, pp. 256-268.
- Moskvitch, Katia, “Lightning Linked to Solar Wind”, *Nature*, nature.com, 16 de mayo de 2014, doi:10.1038/nature.2014.15229.
- Nailen, Richard L., “The Lightning Controversy Goes On”, *Electrical Apparatus*, febrero de 2001.
- Nollet, Jean-Antoine, *Leçons de physique expérimentale*, t. 1, 6ª ed., Durand, París, 1767.
- Notimex, “Rayo mata a familia peruana”, *Granma*, www.granma.cu, 21 de enero de 2005.
- Ong, Mike, *Lightning Protection for Explosive Facilities*, Office of Scientific and Technical Information-U. S. Department of Energy, Oak Ridge [Tennessee], 2001.
- Parker, Ann, “When Lightning Strikes at Site 300”, *Science and Technology Review*, diciembre: 20-21, 2005.
- Penning, Frans M., *Electrical Discharges in Gases*, Macmillan, Nueva York, 1957.
- “Physiologie. Bizarre histoire d’un coup de foudre”, *Science et Vie*, 761: 63, 1981.

- PL, “Ocupa México primer lugar en muertes por rayos, según expertos”, Radio Newred, www.radionewred.com, 24 de noviembre de 2015.
- Poggendorff, Johann Christian, *Histoire de la physique*, Dunod, París, 1883.
- Ramón y Cajal, Santiago, “Mi infancia y juventud”, en *Obras literarias completas de Santiago Ramón y Cajal*, Aguilar, Madrid, 1961, pp. 23-223.
- “Rayo mata a 31 vacas en Dinamarca”, *El Siglo de Torreón*, www.elsiglodetorreon.com.mx, 19 de agosto de 2004.
- “Relámpago del Catatumbo”, Wikipedia, es.wikipedia.org, 2014.
- Rocard, Yves, *Principles of Electricity and Magnetism*, Pitman & Sons, Londres, 1959.
- “Roy Sullivan”, Wikipedia, en.wikipedia.org, 2010.
- Sagan, Carl, “Una voz en la fuga cósmica”, en *Cosmos*, Penguin Random House, Nueva York, 1980, pp. 23-44.
- “Sandia Research Indicates that Lightning Was the Likely Cause of Sago Mine Explosion”, Sandia National Laboratories (SNL), share.sandia.gov, 29 de mayo de 2007.
- Schaffers, Victor, *Le Paratonnerre et ses progrès récents*, Presses Universitaires de France, París, 1931.
- Schonland, Basil, *Atmospheric Electricity*, Methuen, Londres, 1953.
- , *The Flight of Thunderbolts*, Oxford University Press, Londres, 1950.
- , “The Work of Benjamin Franklin on Thunderstorms and the Development of the Lightning Rod”, *Journal of the Franklin Institute*, 253 (5): 375-392, 1952.
- Schurmann, Paul F., *Historia de la física*, Nova, Buenos Aires, 1945.
- Segrè, Emilio, *From Falling Bodies to Radio Waves*, W. H. Freeman, Nueva York, 1984.
- Séneca, Lucio A., *Cuestiones naturales*, libro segundo, imperivm, im.perivm.org.
- Taylor, Lloyd William, *Physics, the Pioneer Science*, Dover, Nueva York, 1959.
- Uman, Martin A., *All about Lightning*, Dover Publications, Nueva York, 1986.
- , “Ball Lightning Wild and Wonderful”, *Nature*, 300: 578-579, 1982.
- , *The Art and Science of Lightning Protection*, Cambridge University Press, Nueva York, 2008.
- University of Alaska, Fairbanks, “Spectacular Lashes Recorded above Thunderstorms”, *Geophysical Institute Quarterly*, 12 (3): 1, 1994.
- Vecchi Appendini, Bruno de, y Carmen Espinosa de los Monteros de Vecchi, “La difusión de los adelantos de la electricidad en la Nueva España”, *Quipu. Revista Latinoamericana de Historia de las Ciencias y la Tecnología*, 13 (3): 359-377, 2000.
- Voltaire (François-Marie Arouet), *Cartas escogidas*, II, biografía y notas de Luis

- Moland, Garnier Hermanos, París, 1902.
- , *Diccionario filosófico*, Fontamara, México, 2010.
- Wagner, Carol. F., y G. D. McCann, “Lightning Phenomena”, en Central Station Engineers of the Westinghouse Electric Corp., *Electrical Transmission and Distribution Reference Book*, Westinghouse Electric Corp., East Pittsburgh, 1950, pp. 542-577.
- Whittaker, Edmund, *A History of the Theories of Aether and Electricity*, Thomas Nelson and Sons, Londres, 1951.
- Williams, Earle R., “The Electrification of Thunderstorms”, *Scientific American*, 259 (5): 48-52, 61-65, 1988.
- Wilson, Benjamin, “New Experiments and Observations on the Nature and Use of Conductors”, *Philosophical Transactions*, (68): 245-313, 1778.
- Zipse, Donald W., “Lightning Protection Methods: An Update and a Discredited System Vindicated”, *IEE Transactions on Industry Applications*, 37 (2): 407-414, 2001.

- ¹ J. M. F. de Arrate, *Llave del Nuevo Mundo, antemural de las Indias Occidentales*.
- ² G. Eguren, *La fidelísima Habana*.
- ³ F. Cajori, *A History of Physics*.
- ⁴ Es significativo que los nombres *Torsdag* —en sueco, noruego y danés—, *Thursday* —en inglés— y *Donnerstag* —en alemán—, derivados todos de Thor o Donar, sean los acuñados para el día de la semana que los romanos dedicaron a Júpiter o Jove; por eso lo llamaron *diēs Iovis*: de ahí el *jueves* del idioma español, el *jeudi* del francés y el *giovedì* del italiano.
- ⁵ Homero, *Iliada*.
- ⁶ *La Biblia*.
- ⁷ B. Schonland, *The Flight of Thunderbolts*.
- ⁸ *Idem*.
- ⁹ S. Ramón y Cajal, *Obras literarias completas de Santiago Ramón y Cajal*.
- ¹⁰ Lucrecio, *The Nature of the Universe*.
- ¹¹ D. Herschbach, “Ben Franklin in his Own Words”.
- ¹² B. Franklin, *Autobiography*.
- ¹³ B. Franklin, *Experiments and Observations on Electricity* (“Carta del 18 de marzo a John Lining”).
- ¹⁴ L. W. Taylor, *Physics, The Pioneer Science*.
- ¹⁵ B. Dibner, *Early Electrical Machines*.
- ¹⁶ P. F. Schurmann, *Historia de la física*.
- ¹⁷ B. Dibner, *Early Electrical Machines*.
- ¹⁸ B. Franklin, *Autobiography*.
- ¹⁹ J. A. Alzate, “Contestación a D. M.”
- ²⁰ F. Clark, “Nothing Ventured, Nothing Granted. Lightning and Enlightenment in the *Gazeta de Literatura de México* (1788-1795)”.
- ²¹ B. de Vecchi Appendini y C. Espinosa de los Monteros de Vecchi, “La difusión de los adelantos de la electricidad en la Nueva España”.
- ²² I. B. Cohen, “Prejudice Against the Introduction of Lightning Rods”.
- ²³ *Idem*.
- ²⁴ *Idem*.

- ²⁵ B. Schonland, *The Flight of Thunderbolts*.
- ²⁶ B. Dibner, *Early Electrical Machines*.
- ²⁷ B. Schonland, *The Flight of Thunderbolts*.
- ²⁸ P. Devaux, *Histoire de l'électricité*.
- ²⁹ A. Hermant y C. Lesage, *L'Électricité atmosphérique et la foudre*.
- ³⁰ J. C. Poggendorff, *Histoire de la physique*.
- ³¹ P. F. Schurmann, *Historia de la física*.
- ³² B. Dibner, *Early Electrical Machines*.
- ³³ B. Schonland, *The Flight of Thunderbolts*.
- ³⁴ J. Latham, "Thunder and Lightning".
- ³⁵ Voltaire, *Cartas escogidas*, II.
- ³⁶ J. C. Poggendorff, *Histoire de la physique*.
- ³⁷ P. Fara, *An Entertainment for Angels. Electricity in the Enlightenment*, y Benjamin Wilson, "New Experiments and Observations on the Nature and Use of Conductors".
- ³⁸ *Idem*.
- ³⁹ C. B. Moore *et al.*, "A Modern Assessment of Benjamin Franklin's Lightning Rods".

¹ Se dice que un medio está ionizado cuando contiene átomos o grupos de átomos que han adquirido una carga eléctrica neta por haber ganado o perdido electrones.

² E. R. Williams, “The Electrification of Thunderstorms”.

³ B. Dibner, *Early Electrical Machines*.

⁴ La intensidad del campo eléctrico en un punto de una región del espacio es una magnitud que se mide por la fuerza que experimenta una carga positiva unitaria, puntiforme y estática, colocada en ese punto. En el sistema de unidades MKS se expresa en newtons por culombio (N/C) o, más frecuentemente, en voltios por metro (V/m) o kilovoltios por metro (kV/m).

⁵ J. McDonald, “The Earth’s Electricity”.

⁶ V. Schaffers, *Le Paratonnerre et ses progrès récents*.

⁷ H. Colón, *Historia del almirante don Cristóbal Colón por su hijo don Hernando*.

⁸ Anónimo, “Comentario a la guerra de África”.

⁹ *La Biblia*.

¹⁰ P. Day (comp.), *The Philosopher’s Tree: A Selection of Michael Faraday’s Writings*.

¹¹ B. Schonland, *The Flight of Thunderbolts*.

¹² D. J. Malan, “Relámpagos”.

¹³ *Idem*.

¹⁴ B. Schonland, *The Flight of Thunderbolts*.

¹⁵ M. A. Uman, *All about Lightning*.

¹⁶ *Idem*.

¹⁷ A. Hermant y C. Lesage, *L’Électricité atmosphérique et la foudre*.

¹⁸ B. S. Finn, “Output of Eighteen-century Electrostatic Machines”.

¹⁹ A. Hermant y C. Lesage, *L’Électricité atmosphérique et la foudre*.

²⁰ B. Schonland, “The Work of Benjamin Franklin on Thunderstorms and the Development of the Lightning Rod”.

²¹ G. Dobson, *Exploring the Atmosphere*.

²² C. F. Wagner y G. D. McCann, “Lightning Phenomena”.

²³ J. R. Dwyer, “A Bolt out of the Blue”, y “Do Cosmic Rays Cause Lightning?”

²⁴ A. A. Few, “Thunder”.

- ²⁵ K. Moskvitch, “Lightning Linked to Solar Wind”.
- ²⁶ *Idem.*
- ²⁷ J. R. Dwyer, “A Bolt out of the Blue”.
- ²⁸ A. Hermant y C. Lesage, *L'Électricité atmosphérique et la foudre*.
- ²⁹ *Idem.*
- ³⁰ L. B. Loeb, “The Mechanism of Lightning”.
- ³¹ R. D. Hill, “Los rayos”.
- ³² A. A. Few, “Thunder”.
- ³³ A. Hermant y C. Lesage, *L'Électricité atmosphérique et la foudre*.
- ³⁴ M. A. Uman, *All about Lightning*.
- ³⁵ F. M. Penning, *Electrical Discharges in Gases*.
- ³⁶ C. F. Wagner y G. D. McCann, “Lightning Phenomena”.
- ³⁷ W. Ellis, “Arizona Superlightning”.
- ³⁸ S. B. Mende *et al.*, “Lightning between Earth and Space”.
- ³⁹ A. Hermant y C. Lesage, *L'Électricité atmosphérique et la foudre*; University of Alaska, “Spectacular Lashes Recorded above Thunderstorms”.
- ⁴⁰ M. A. Uman, “Ball Lightning Wild and Wonderful”.
- ⁴¹ J. D. Gillett, “Ball of Fire”.
- ⁴² M. A. Uman, *All about Lightning*.
- ⁴³ *Idem*; P. L. Kapitsa, “Sobre la naturaleza del rayo esférico”.
- ⁴⁴ B. Schonland, *Atmospheric Electricity*.
- ⁴⁵ *s. v.* “Distribution of Lightning”, en.wikipedia.org.
- ⁴⁶ A. Hermant y C. Lesage, *L'Électricité atmosphérique et la foudre*; M. A. Uman, *All about Lightning*; L. Álvarez *et al.*, “Actualización de la distribución espacial de las tormentas eléctricas en Cuba”.
- ⁴⁷ A. Hermant y C. Lesage, *L'Électricité atmosphérique et la foudre*.
- ⁴⁸ *s. v.* “Relámpago del Catatumbo”, es.wikipedia.org. En la *Dragontea*, el poema épico de Lope de Vega publicado en 1597, se alude a los efectos del relámpago del Catatumbo en relación con las correrías del corsario inglés Francis Drake por el Caribe.
- ⁴⁹ F. Cajori, *A History of Physics*.
- ⁵⁰ E. Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity*.
- ⁵¹ E. Segrè, *From Falling Bodies to Radio Waves*.

⁵² P. F. Schurmann, *Historia de la física*.

⁵³ E. Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity*.

⁵⁴ J. Altshuler, “Maxwell y la extraña magia de sus ecuaciones”.

⁵⁵ A título de ilustrativa curiosidad cabe citar el sistema de detección y advertencia instalado en parques y áreas de recreación de la pequeña ciudad floridana de Oviedo, ubicada en la zona conocida como la “capital del rayo” de Estados Unidos, según se anuncia en el sitio en internet de la ciudad (cityofoviedo.net). Allí se explica que tan pronto capta la presencia de una descarga atmosférica en las inmediaciones, dicho sistema emite una señal de alerta al público, que consta de un toque de sirena de 15 segundos acompañado de destellos de luz intermitentes. (Por lo visto, se trata de un desarrollo contemporáneo de la técnica empleada antiguamente con un propósito similar en el castillo de Duino, como se reseñó en la sección de este capítulo dedicada al fuego de san Telmo.)

- ¹ P. Day (comp.), *The Philosopher's Tree: A Selection of Michael Faraday's Writings*.
- ² M. A. Uman, *All about Lightning*.
- ³ M. A. Uman, *The Art and Science of Lightning Protection*.
- ⁴ P. Day (comp.), *The Philosopher's Tree: A Selection of Michael Faraday's Writings*.
- ⁵ T. C. Gilbert, "Protection against Lightning".
- ⁶ V. Schaffers, *Le Paratonnerre et ses progrès récents*.
- ⁷ Eleclive, eleclive.com
- ⁸ M. A. Uman, *The Art and Science of Lightning Protection*.
- ⁹ R. H. Golde, "A Plain Man's Guide to Lightning Protection".
- ¹⁰ K. Hedges, "Lightning Conductor".
- ¹¹ J. C. Maxwell, "On the Protection of Buildings from Lightning".
- ¹² R. P. Feynman *et al.*, *The Feynman Lectures on Physics*; Y. Rocard, *Principles of Electricity and Magnetism*.
- ¹³ S. S. Attwood, *Electric and Magnetic Fields*.
- ¹⁴ P. Fleury y J. P. Mathieu, *Physique générale et expérimentale*; Y. Rocard, *Principles of Electricity and Magnetism*.
- ¹⁵ A. Parker, "When Lightning Strikes at Site 300".
- ¹⁶ J. C. Maxwell, "On the Protection of Buildings from Lightning".
- ¹⁷ K. B. McEachron, "Lightning Protection since Franklin's Day".
- ¹⁸ D. Beeman (coord.), *Industrial Power Systems Handbook*.
- ¹⁹ M. Ong, *Lightning Protection for Explosive Facilities*.
- ²⁰ R. de La Taille, "Le paratonnerre absolu".
- ²¹ Por la misma razón, en el interior de los edificios se recomienda ampliamente poner a tierra tanto las masas metálicas de los equipos electrodomésticos como las canalizaciones técnicas.
- ²² M. A. Uman, *All about Lightning*.
- ²³ E. Marshall, "Lightning Strikes Twice at NASA".
- ²⁴ R. Nailen, "The Lightning Controversy Goes On".
- ²⁵ D. W. Zipse, "Lightning Protection Methods: An Update and a Discredited System Vindicated".
- ²⁶ *Idem*.

²⁷ A. Hermant y C. Lesage, *L'Électricité atmosphérique et la foudre*.

²⁸ M. A. Uman, *The Art and Science of Lightning Protection*.

- ¹ M. A. Uman, *All about Lightning*.
- ² AFP, “Árbol explosivo”.
- ³ A. Hermant y C. Lesage, *L'Électricité atmosphérique et la foudre*.
- ⁴ “Sandia Research Indicates that Lightning Was the Likely Cause of Sago Mine Explosion”, share.sandia.gov.
- ⁵ M. A. Uman, *The Art and Science of Lightning Protection*.
- ⁶ Séneca, *Cuestiones naturales*, libro segundo.
- ⁷ M. A. Uman, *The Art and Science of Lightning Protection*.
- ⁸ M. H. Beers (coord.), *The Merck Manual of Medical Information*.
- ⁹ R. de La Taille, “Pourquoi le foudre tue”.
- ¹⁰ “Physiologie. Bizarre histoire d'un coup de foudre.”
- ¹¹ M. A. Cooper, “Lightning Injury Facts”.
- ¹² B. J. Feijoo, *Cartas eruditas y curiosas* (“Carta XXV”).
- ¹³ M. A. Cooper, “Lightning Injury Facts” y “Lightning Injuries”.
- ¹⁴ E. Gourbière, “La fulminación humana”.
- ¹⁵ G. González Quesada, “Los rayos me persiguen”.
- ¹⁶ *Idem*.
- ¹⁷ s. v. “Roy Sullivan”, en.wikipedia.org.
- ¹⁸ C. Sagan, *Cosmos*.
- ¹⁹ J. McDonald, “The Earth's Electricity”; M. A. Uman, *All about Lightning*.

La tormenta perfecta: lluvia, viento, nubes y sobre todo el resplandor y el estruendo producidos por el rayo. A diferencia de otros fenómenos meteorológicos involucrados en la tempestad, el rayo es el que más se resiste a ser estudiado por la ciencia; su naturaleza azarosa y efímera ha provocado que se le tema y que no falte quien le otorgue una explicación sobrenatural. A pesar de ello —como nos muestra José Altshuler en este texto— se han realizado muchas investigaciones para explicar qué es un rayo, cuál es el origen de esta descarga eléctrica natural y cómo se puede prevenir su poder destructivo y en ocasiones mortal. Desde los experimentos de Benjamin Franklin hasta los gigantescos pararrayos empleados por la NASA, esta obra nos descubre los mitos y las realidades en torno al “fuego del cielo”.

José Altshuler es ingeniero electricista por la Universidad de La Habana y antiguo profesor titular de su Facultad de Tecnología. También es investigador de mérito, doctor en ciencias y miembro de honor de la Academia de Ciencias de Cuba. Actualmente preside la Sociedad Cubana de Historia de la Ciencia y la Tecnología.

LA
CIENCIA
PARA
TODOS

246



Índice

Prefacio	10
I. Los primeros tiempos	12
El rayo del temor y del absurdo	15
En busca de una explicación racional	22
Del poder de las puntas al pararrayos	30
El pararrayos domina las alturas y la imaginación	41
La polémica de las puntas	51
II. La atmósfera electrizada	53
El fuego de san Telmo	55
Imágenes sucesivas del rayo	60
El rayo, simulado y encarrilado	67
La nube de tormenta	70
Haciendo camino al andar	74
Un retorno relampagueante y atronador	76
Grandes corrientes y rayos petrificados	78
Variaciones sobre el tema	81
Los misteriosos rayos globulares	90
Geografía del rayo	93
Desconcierto de marinos e inspiración de electricistas	98
Rayos rigurosamente vigilados	101
III. Más allá del viejo pararrayos	104
Una protección relativa	106
Jaulas protectoras	108
En busca de una protección absoluta	114
Protegiendo los sistemas electroenergéticos	120
Vulnerabilidad de la microelectrónica	128
Barcos, automóviles, aeronaves y astronaves ante el rayo	129
La guerra de los pararrayos	134
IV. Huellas, peligros, precauciones	139
Tras la huella	140
Efectos indirectos	148
En tiempo de borrasca	154

De la ceraunomancia a la ceraunomedicina	161
Pararrayos humanos	165
Las otras caras del rayo	167
Colofón	169
Bibliografía	173