

Ensayo

La verdad es hija del tiempo

Truth is the daughter of time

 Horacio Torres-Sánchez

Grupo de Investigación PAAS – Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Resumen

Las descargas eléctricas atmosféricas que se generan entre las nubes y la ionosfera son fenómenos electromagnéticos que se vienen estudiando sistemáticamente a nivel mundial hace muy poco tiempo, cerca de 30 años. Su interés radica en las radiaciones de muy alta frecuencia (rayos gamma) que son muy diferentes a los rayos que hasta ahora se han estudiado en el rango de las radiofrecuencias. En este artículo se presentan los fenómenos denominados destellos de rayos gamma terrestres (*Terrestrial Gamma-ray Flash*, TGF) y eventos luminosos terrestres (*transient luminous events*, TLE), y se analiza el papel de los estudios que lleva a cabo en Colombia el grupo PAAS-UN y los beneficios que esta rigurosa y sistemática investigación representan para el futuro del conocimiento científico de los rayos en el país.

Palabras clave: Descargas eléctricas atmosféricas; Rayos gamma; Zona tropical.

Abstract

The atmospheric electrical discharges occurring between the clouds and the ionosphere are electromagnetic phenomena whose study worldwide started very recently, about 30 years ago. Its interest lies in the remarkably high-frequency radiation (Gamma-rays) that is very different from the lightning studied so far in the radio frequency range. This article presents the phenomena known as Terrestrial Gamma-ray Flashes (TGF) and Terrestrial Luminous Events (TLE) and the role of the scientific studies carried out by the PAAS-UN group in Colombia, as well as the benefits that this rigorous and systematic research will bring in the future as a contribution to the scientific knowledge of lightning in the country.

Key words: Lightning; Gamma Rays; Tropical Zone.

Introducción

La verdad es hija del tiempo, no de la autoridad, sentenciaba el célebre filósofo, político, abogado y escritor inglés Francis Bacon en el siglo XVI, cuando precisaba las reglas del método científico experimental.

Durante las cuatro décadas que el programa PAAS-UN de la Universidad Nacional de Colombia lleva investigando el fenómeno electromagnético del rayo, el grupo ha tratado de honrar la sentencia de Sir Francis Bacon. En este momento nos hemos embarcado conjuntamente con la firma Keraunos (empresa derivada que se desarrolló a partir del grupo PAAS-UN) en el desarrollo de una nueva etapa de investigación sobre los rayos nube-ionosfera: los destellos de rayos gamma terrestres (TGF) y los eventos luminosos terrestres (TLE) con base en la hipótesis de investigación planteada, estudiada y demostrada (Torres, 2015a) en torno a la variación espacial y temporal en los parámetros del rayo, la cual es aplicable en esta nueva etapa de investigación a los rayos nube-ionosfera, toda vez que la misión exploradora de la NASA *Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager RHESSI*, lanzada el 5 de febrero del 2002, demostró que una gran proporción de los TGF está estrechamente asociada con los sistemas de tormentas tropicales (Splitt, 2010) en un área que también es interesante por la probable aparición de fenómenos como los espectros rojos, los chorros azules y los elfos.

Citación: Torres-Sánchez H. La verdad es hija del tiempo. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(175):405-414, abril-junio de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1228>

Editor: Román Eduardo Castañeda Sepúlveda

Correspondencia:
Horacio Torres-Sánchez;
htorress@gmail.com

Recibido: 28 de mayo de 2020
Aceptado: 16 de febrero de 2021
Publicado: 17 de junio de 2021



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Los destellos de rayos gamma terrestres

Los llamados destellos de rayos gamma terrestres (TGF) son emisiones de partículas de alta energía que se detectan desde satélites en órbita alrededor de la tierra. La misión RHESSI detectó entre 10 y 20 TGF por mes, lo que corresponde a aproximadamente a 50 por día en todo el mundo, con espectros típicos de energía entre los 10 y 20 mega-electronvoltios (MeV), según **David, et al.** (2005).

Los TGF se han estudiado desde su descubrimiento y las diferentes observaciones de la radiación gamma hechas mediante los satélites, así como las emisiones de radio asociadas con los rayos, relacionan los dos eventos, ver **figura 1**. **Cummer, et al.** (2005) y **Williams, et al.** (2006) han estudiado los posibles tipos de descargas eléctricas atmosféricas como fuentes de TGF. En este sentido, los flujos ascendentes de líderes negativos, resultantes de los rayos positivos dentro de las nubes (rayos intranube) situadas a grandes altitudes, podrían constituir una fuente de TGF, aunque todavía se desconoce con exactitud cuál es el mecanismo de su producción.

Entre todas las posibles fuentes de electrones relativistas estudiadas por **Williams, et al.** (2006) solo los rayos intranube positivos en los que se producen flujos de electrones ascendentes aparecen como claros candidatos, lo que lleva a pensar en la posibilidad de que el mecanismo encontrado en el laboratorio por **March** (2011) sea común para la generación de descargas en el laboratorio y para las descargas eléctricas atmosféricas naturales y los TGF.

El origen terrestre de las intensas ráfagas de radiación gamma TGF descubiertas en la atmósfera es uno de los misterios de la física de los rayos que permanecen sin resolver. Desde el descubrimiento de la emisión de rayos gamma en la atmósfera terrestre, ha habido observaciones que relacionan la aparición de estas emisiones con la presencia de rayos. La misión del proyecto *Atmosphere Space Interaction Monitor* (ASIM) tiene por objeto clarificar este punto.

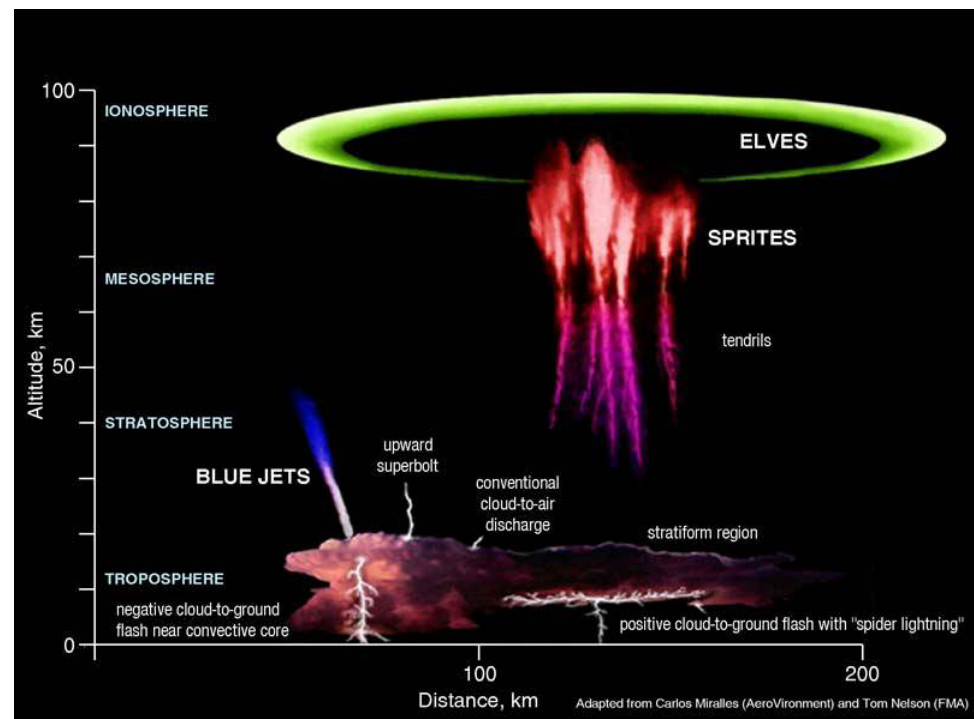


Figura 1. Representación de los TGF y los TLE en el espacio: *Blue jets*, *Red Sprites* y *Elves* (tomado de: <https://k05.kn3.net/176D156E0.jpg>)

Los eventos luminosos terrestres

El nombre de eventos luminosos terrestres (TLE) es la denominación genérica de un conjunto de fenómenos de corta duración (milisegundos a segundos), muy energéticos, observados desde hace más de 80 años entre la estratosfera y la ionosfera (20-100 Km) de la atmósfera terrestre y asociados con zonas tormentosas con abundancia de rayos. Sin embargo, los primeros registros reportados en la literatura son de la década de 1990 (Sentman & Wescott, 1993).

Los TLE se clasifican en tres tipos: *Blue jets*, *Red Sprites* y *Elves*, este último nombre, duendes luminosos, hace alusión a la obra de Shakespeare *Sueño de una noche de verano*. Son fenómenos mucho más habituales de lo esperado, que ocurren en toda la superficie terrestre en zonas con gran actividad de descargas eléctricas atmosféricas, como Colombia, y se generan entre la capa de nubes y la ionosfera. Su morfología y su dinámica son mucho más complejas de lo que pueda pensarse y su distribución en longitud indica que son más frecuentes sobre los continentes, en zonas tropicales como la nuestra.

Hipótesis, metodología y primeros resultados

La hipótesis de investigación (Torres, 1998) plantea que las magnitudes de los parámetros de la descarga eléctrica atmosférica varían espacial y temporalmente. La hipótesis se ha venido demostrando (Torres, *et al.*, 2015; Albrecht, *et al.*, 2016; Orville, 1990; Naccarato, 2006; Cooray, 2018; Williams, 1996) y sigue siendo válida para la investigación sobre los TGF, aunque seguramente aparecerán nuevos parámetros y desarrollos.

La metodología planteada para el desarrollo del proyecto ASIM incorpora preguntas que ciertamente han sido objeto de tesis de maestría y doctorado, y lo seguirán siendo. Entre dichas cuestiones se pueden mencionar la identificación de puntos de acceso de rayos a la tierra en regiones tropicales como Colombia, su aplicación en torres de comunicación, aerogeneradores, y torres de energía eléctrica, entre otras, y el mejor entendimiento de los procesos de electrificación durante tormentas en el trópico con equipamiento como el sistema de sensores *Lightning Mapping Array* (LMA) y la información de radares meteorológicos.

Un primer aporte (Castro, 2019) ha sido la determinación de la altura de los centros de carga eléctrica en el trópico, la cual fue calculada en 9,95 km, con una altura máxima de 15,9 km y una mínima de 3,5 km. Para ver la evolución de los centros de carga, se graficó la variación de su altura en función del tiempo durante todo el evento de tormenta. En la figura 2 se observa el diagrama de dispersión de la altura de los centros de carga

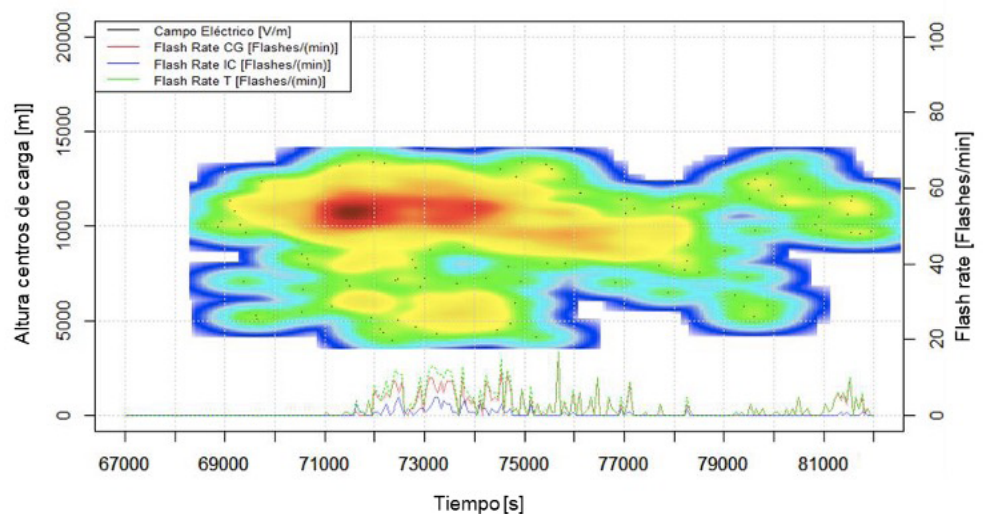


Figura 2. Altura centros de carga y *flash rate* (Castro, 2019)

eléctrica durante un evento de tormenta. Se evidencia que el modelo de carga puntual se ajusta para determinar la altura de la carga eléctrica, como lo comprobaron **Maggio, et al.** (2009), quienes evaluaron varios modelos con diferentes métodos teóricos y llegaron a la misma conclusión.

En la tesis de doctorado de **López** (2019) se presenta la caracterización de estructuras eléctricas y líderes de rayos en tormentas y su relación con los inicios de los TGF. La investigación aporta información detallada sobre las distribuciones de carga eléctrica, sus límites espaciales, su desarrollo vertical, la evolución durante su ciclo de vida, la identificación de centros de carga y las distribuciones de carga complejas.

La caracterización derivada de la tesis doctoral y los artículos asociados (**López**, 2017, 2019a) fue de gran interés, primero, para el estudio detallado de las estructuras eléctricas en tormentas tropicales; segundo, en el análisis de la propagación de los líderes de rayos en el trópico; tercero, para determinar las condiciones espaciales y las configuraciones de carga eléctrica que fueron recreadas mediante un modelo de líder y, por último, para el estudio de las condiciones eléctricas favorables en la producción de los TGF.

Por primera vez se instaló un sistema de alta precisión de detección de rayos, el LMA, en regiones tropicales (el caso de Colombia) en dos periodos de instalación: el primero en el 2015, en la ciudad de Santa Marta, y el segundo en el 2018, durante la reubicación del sistema en la ciudad de Barrancabermeja.

Para el estudio de las condiciones de origen de los TGF se tuvieron en cuenta las distribuciones de potencial eléctrico en los dos escenarios de simulación del modelo de líder. En el primer caso, el líder alcanzó un potencial óptimo de aproximadamente 340 MV, y en el segundo caso, de aproximadamente 590 MV, potenciales que concuerdan con los modelos de líderes de rayos recientemente publicados por **Skeltved, et al.** (2017, 2014). En ambos escenarios se introdujo un campo de ionización inicial con energías de 1 MeV y aproximadamente 1.000 electrones semilla en frente del canal del líder a una altura de 15 km.

A partir de los resultados obtenidos (**López**, 2019) puede concluirse que la interacción de un líder que se propaga a 15 km de altura con potencial aproximado de 590 MV y bajo una configuración eléctrica de carga compuesta por 4 capas que generan un campo eléctrico negativo de aproximadamente -874 kV/m, podría ser la condición en la que se originan los TGF.

En la **figura 3** es posible observar los espectros de luz de simulación de los TGF, con la curva de luz a lo largo de la trayectoria del líder negativo entre 14 y 16 km de altura.

En la tesis de **Chaves** (2021) se propone una metodología que utiliza algoritmos computacionales para el agrupamiento de zonas *hotspots*, las cuales se caracterizan por tener una alta densidad de rayos. En general, los criterios principales de la metodología consideran una región como *hotspot* si en ella se reporta un número determinado de rayos a tierra al año que se conserva durante todos los años de recopilación y análisis de la información, así como la combinación de la cantidad de años en los cuales ocurren dichas descargas y los filtros por intensidad de corrientes. **López** (2019), propone una metodología para la identificación de regiones o estructuras en las que el fenómeno se presenta de forma repetitiva. El criterio principal de la metodología es determinar aquellas zonas en las que se reporta al menos un número de rayos a tierra al año y su recurrencia se conserva durante todos los años evaluados. La metodología se validó con el análisis del comportamiento de los rayos registrados en el periodo de 2012 a 2018.

El estudio confirmó la poca actividad de descargas eléctricas atmosféricas sobre el océano, el ciclo diurno en la mayoría de las regiones continentales y la máxima densidad de relámpagos en la estación de verano, y, además, clasificó la densidad de la tasa de destellos para identificar los puntos de acceso a la Tierra. En el caso de Suramérica (**Figura 4**), el *hotspot* de mayor influencia se detectó sobre el lago Maracaibo en Venezuela, donde los rayos ocurren 297 días al año, con un pico en el mes de septiembre, seguido de Cáceres, el Tarra, Norcasia, Majagual, Turbo y Barrancas en Colombia, con una densidad de descargas a tierra entre 95,38 y 172,29 destellos-km²/año).

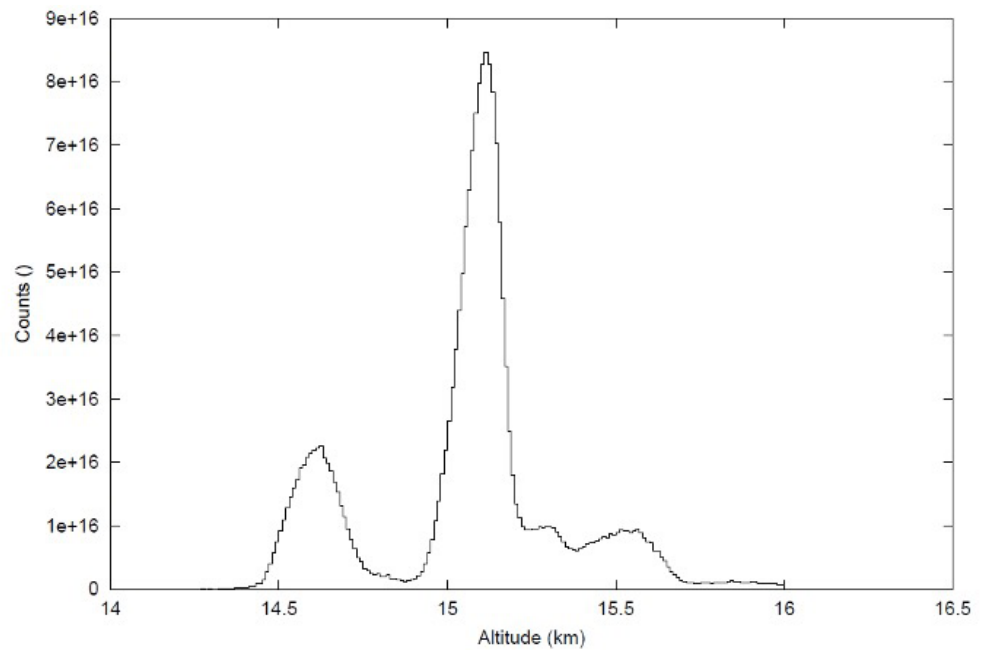


Figura 3. Espectros de luz de simulación de los TGF. Tomados de **Lopez J.A (2019)**



Figura 4. Clasificación de los principales *hotspots* en Suramérica (**Chaves, 2021**)

Por último, se presenta la evaluación de los impactos de rayos en estructuras elevadas localizadas en la región de estudio. Los impactos de rayos en estructuras elevadas se han considerado en un gran número de estudios teóricos y experimentales, pues se busca reducir los niveles de riesgo tolerables para evitar la exposición de las personas y las estructuras, así como reducir los costos de mantenimiento.

Con los resultados del *kit* de observatorio instalado en la Estación Espacial Internacional en el 2018, se están evaluando constantemente los nuevos parámetros, los cuales se contrastan con los resultados terrestres en la estación Dabeiba para así continuar con esta investigación que en los próximos años y décadas entregará nuevas interpretaciones y certezas sobre las descargas eléctricas nube-ionosfera en la región tropical.

El proyecto *Atmosphere Space Interaction Monitor (ASIM)*

El proyecto ASIM nació para tratar de entender los fenómenos electromagnéticos de los TGF y TLE; para ello hay que situar los instrumentos de medición fuera de nuestra atmósfera, en el espacio exterior, y desde allí estudiar las tormentas. La primera idea del proyecto data de 2003 y fue promovida por la Universidad Politécnica de Dinamarca, pero el proyecto comenzó a desarrollarse en el 2010.

Las universidades que lideran el proyecto son la de Dinamarca, la de Bergen (Noruega) y la Universitat de València - UV. En España, la UV coordina la labor de la Universitat Politècnica de Catalunya, el Instituto de Astrofísica de Andalucía, la Universidad Rey Juan Carlos y el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial.

El principal objetivo científico del proyecto ASIM es establecer la correlación espacio-temporal entre los fenómenos TLE, TGS y los rayos nube-tierra, así como desarrollar un modelo unificado que explique sus escalas extraordinariamente diferentes en términos de frecuencia (¿1-100 rayos nube-tierra por segundo?, ¿1 TLE por hora?, ¿1 TGF por día?).

El proyecto ASIM se ha beneficiado de la cooperación con la Universidad Nacional de Colombia (grupo de investigación PAAS-UN) desde el 2018 bajo la dirección del profesor Horacio Torres, con el fin de establecer una red de sistemas ópticos para monitorear la actividad de TLE de esta región. La Universidad tiene varios sitios disponibles que cubren áreas continentales como Santa Marta y en el mar Caribe, como la isla de San Andrés. La firma colombiana Keraunos apoya este proyecto con las redes de molinos de campo eléctrico y los datos de la red LINET de detección de rayos.

Para la medición de estos fenómenos fuera de nuestra atmósfera, la Agencia Aeroespacial Europea (ESA) recibió en Valencia, España, el *kit* de observatorio ASIM. Las universidades de Dinamarca y de Valencia en España se encargaron del diseño y la construcción de un sistema de fotografía, video y almacenamiento de estos fenómenos desde el espacio. El *kit* de observatorio fabricado se ubicó en la Estación Espacial Internacional (EEI) mediante el lanzamiento de un cohete SpaceX el 2 de abril de 2018 y quedó instalado en el módulo Columbus de la Agencia Aeroespacial Europea, ver **figura 5**. Una vez que el

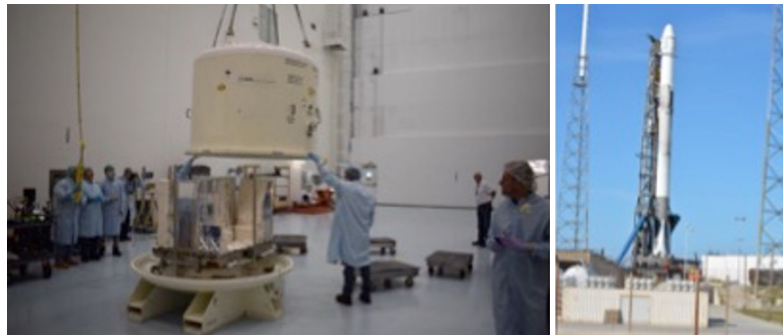


Figura 5. *Kit* de observatorio en las instalaciones de la NASA en Cabo Cañaveral, Florida, el 2 de abril de 2018?, instaladas en la EEI. Fotografías facilitadas por J. Montanyà (UPC, España).

kit fue adosado al Columbus, su misión ha sido medir los fenómenos que se registran por encima de las grandes tormentas. Su detector de altas energías permitirá obtener nuevos datos sobre los violentos estallidos de rayos gamma terrestres.

El *kit* de observatorio estará dedicado a la observación de la Tierra en los rangos ópticos UV, X y gamma de amplio campo (en el caso de los gamma en toda la Tierra) con equipos ópticos dotados de alta resolución espacial y muy elevada resolución temporal (10-5 segundos) para realizar observaciones simultaneas y sistemáticas de los TGF y los TLE desde el espacio a unos 400 km de distancia de la tierra.

La elección de la Estación Espacial Internacional (EEI) se consideró la más adecuada, ya que permite una operación más sencilla que la requerida con un satélite, así como la recuperación de la instrumentación y su mejora y del volumen de datos a almacenar antes de enviar a la Tierra (crítico en el caso de las cámaras con memoria de tbytes por segundo).

El *kit* de observatorio estará continuamente en operación obteniendo datos, pero solo almacenará el equivalente a 1 segundo de ellos cuando los fotómetros accionen el disparador. Los mecanismos de definición del disparador son críticos, al igual que los tiempos de reacción. Cuando el disparador se acciona, se almacena 1 segundo de datos (+0,5 segundos), tiempo más que suficiente para fenómenos entre los 1 a 2 milisegundos (TGF) y los 100 milisegundos de duración (espectros).

La cuestión del disparador es fundamental en el proyecto ASIM, ya que es absolutamente imposible enviar a tierra o guardar los datos de las cámaras del *kit*, que equivalen a 2 megapíxeles. Cuando producen imágenes por debajo del milisegundo generan Tbits por segundo de datos. El *buffer* de memoria almacena 1 segundo de datos en el sensor óptico, los cuales son reemplazados automáticamente.

La contribución de Colombia a través del grupo de investigación PAAS-UN de la Universidad Nacional y la firma Keraunos se concretó en la instalación en la ciudad de Santa Marta de un observatorio de antenas terrestres conocido como *Lightning Mapping Array* (LMA), que es un sistema tridimensional de localización de rayos totales (**Figura 6**), así como de la información de la red de datos de tormentas eléctricas atmosféricas LINET de propiedad de la firma Keraunos. El análisis de datos del observatorio LMA en



Figura 6. *Jet* gigante capturado en Colombia el 14 de agosto de 2017 cerca del aeropuerto de Santa Marta. Fotografía tomada por Oscar Van der Velde y J.A. López

Santa Marta y el proyecto de doctorado del ingeniero colombiano Jesús López han sido fundamentales para entender los fenómenos terrestres que luego han sido base del trabajo del proyecto ASIM en universidades europeas (Cataluña, Valencia, Dinamarca, Noruega) para el entendimiento del fenómeno terrestre, que ahora se espera desarrollar desde la Estación Espacial Internacional.

En el 2015 se montaron siete antenas alrededor de Santa Marta, desde donde se captura la actividad de descargas eléctricas nubes-ionósfera. Estas antenas fueron trasladadas en el 2018 a la ciudad de Barrancabermeja, pues se ha establecido que la zona del Catatumbo, incluida el área de Venezuela, es la de más alta actividad de rayos en el mundo (**Albrecht, et al., 2016**). A esta estación de investigación en rayos se le ha dado el nombre de Dabeiba, en honor a la bella princesa indígena, sabia y divinizada, de la tribu de los Emberá Katio, parientes de los Cuevas y los Chibchas, que viven en el norte del actual departamento de Antioquia, Colombia (**Galindo, et al., 2003**).

Conclusiones

Se presenta en este artículo la nueva etapa de la investigación sobre los rayos, cuyos primeros resultados auguran en el futuro el logro de nueva información comprobada en torno al fenómeno de las descargas eléctricas atmosféricas nube-ionosfera.

Con el apoyo de la Empresa Colombiana de Petróleos (Ecopetrol) y mediante una alianza estratégica con la Universidad Industrial de Santander (UIS), se mantiene actualmente la Estación Experimental Dabeiba en Barrancabermeja, que constituye uno de los mayores centros de medición de rayos del mundo con equipos desarrollados en Colombia, como los molinos de campo eléctrico, una red de antenas con tecnología LMA que ha recibido el nombre de COLLMA, y el sistema de medición de rayos con una red de 21 antenas LINET de propiedad de la firma colombiana Keraunos. Con los datos que aquí se generen y la información proveniente de la Estación Espacial Internacional de la NASA, podremos seguirle los pasos a los duendes luminosos o elfos, lo que podría arrojar luz en un futuro sobre las muchas preguntas y proyectos surgidos de esta investigación que lleva más de cuatro décadas en Colombia, entre los cuales se destacan los estudios sobre la relación de los fenómenos electromagnéticos TGF y TLE con el calentamiento global; la posibilidad de llevar a feliz término la idea de Tesla de principios del siglo XX sobre los rayos y la transmisión de potencia eléctrica sin hilos, y concretarla en una patente (Torres, 2018); el establecimiento de la correlación espacio-temporal entre estos fenómenos (TLE, TGS y rayos nube-tierra), y el desarrollo de un modelo unificado que explique sus escalas extraordinariamente diferentes en términos de frecuencia (ζ 1-100 rayos nube-tierra por segundo?, ζ 1 TLE por hora?, ζ 1 TGF por día?); el estudio de los líderes ascendentes originados por estructuras elevadas en tierra en regiones tropicales y las implicaciones que tendrían en la protección de aerogeneradores; la identificación de puntos de acceso de rayos a tierra en regiones tropicales como Colombia para proteger las torres de comunicación, los aerogeneradores, las torres de energía eléctrica, entre otras; la medición de la resonancia de Schumann y el potencial ionosférico en el trópico, y los estudios que permitan una mejor comprensión de los procesos de electrificación durante las tormentas en el trópico mediante sistemas como el LMA y la información de radares meteorológicos.

En el futuro será necesario desarrollar estudios más detallados de las condiciones meteorológicas durante la propagación de líderes de rayos utilizando el sistema LMA e incluyendo la información de los radares meteorológicos, especialmente en regiones tropicales, estudios que permitirían entender mejor los procesos de electrificación durante las tormentas en el trópico.

Estas y muchas más preguntas y proyectos encontrarán respuestas científicas que serán la base de innovaciones tecnológicas que apenas sospechamos. El trabajo continuo, sistemático y riguroso abrirá el camino a dichas respuestas, porque como bien lo señaló Sir Francis Bacon: *La verdad es hija del tiempo, no de la autoridad.*

Conflicto de intereses

Declaro no tener ningún conflicto de intereses real, potencial o aparente, ni ninguna relación económica, personal o política que pueda influir en mi juicio.

Referencias

- Albrect, R.I., Goodman, S.J., Buechler, D.E., Blakeslee, D.J., Christian, H.J.** (2016). Where are the lightning hotspots on Earth? *Bulletin of the American Meteorological Society*. **97**: 2051-2068. Doi: 10.1175/BAMS-D-14-00193.1
- Aranguren, D., López, J., Inampué, J., Torres, H., Betz, H.** (2017). Cloud-to-ground lightning activity in Colombia and the influence of topography. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. Edit Elsevier, Volume 154, February 2017, Pages 182-189.
- Castro, J.F.** (2019). Metodología para la identificación de la estructura eléctrica típica del rayo en el trópico. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Chaves, J.** (2021). Impactos de rayos en estructuras elevadas localizadas en zonas de alta actividad de rayos en Colombia. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2021.
- Cooray, V.** (2018). Latitude dependence of peak lightning return stroke current- A theoretical explanation. 34th Int. Conf. Light. Prot. ICLP 2018, pp. 4-6.
- Cummer, S. A., Zhai, Y., Hu, W., Smith, D. M., López, L. L., Stanley, M. A.** (2005). Measurements and implications of the relationship between lightning and terrestrial gamma ray flashes, *Geophys. Res. Lett.* **32**: L08811. Doi: 10.1029/2005GL022778
- Fabro F., Montanyà, J., Marisaldi, M., van der Velde, O. A., Fuschino, F.** (2015). Analysis of global Terrestrial Gamma Ray Flashes distribution and special focus on AGILE detections over South America. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. **124**: 10-20. Doi: 10.1016/j.jastp.2015.01.009
- Galindo, M., García, C.A, Valencia, J.** (2003). Mitos y leyendas de colombia: tradición oral indígena y campesina. Intermedio Editores, Círculo de Lectores. <http://unperiodico.unal.edu.co/pages/detail/hunting-energy-elves-emission-of-light-and-very-low-frequency-perturbations-ducto-electromagnetic/>
- López J.A.** (2019). Investigación de las estructuras eléctricas y líderes de rayos en tormentas. Aportaciones a las condiciones de inicio de rayos gamma terrestres. PhD Tesis Universidad Politécnica de Barcelona, España.
- López, J., Montanyà, J., van der Velde, O.A., Pineda, N., Salvador, A., Romero, D., Aranguren, D. Taborda, J.** (2019a). Charge structure of two tropical thunderstorms in Colombia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. **124**: 5503-5515. <https://doi.org/10.1029/2018JD029188>
- López, J., Pineda, N., Montanyà, J., van der Velde, O.A., Ferrán F., Romero, D.** (2017). Spatio-temporal dimension of lightning flashes based on Three-Dimensional Lightning Mapping Array. *Journal of Atmospheric Research*. **197**: 255-264.
- Mackerras, D. & Darveniza, M.** (1994). Latitudinal variation of lightning occurrence characteristics. *JFR*. Vol. 99, 1994. 20 May 1994, <https://doi.org/10.1029/94JD00018>
- Maggio, C.R., Marshall, T.C., Stolzenburg, M.** (2009). Estimations of charge transferred and energy released by lightning flashes. *J. Geophys. Res. Atmos.* **114** (14): 1-18.
- March, V.** (2011). Emisiones de rayos X en impulsos de alta tensión. Caracterización del mecanismo de producción de electrones de escape, Tesis para PhD. Universidad Politécnica de Barcelona, España.
- Naccarato, K.P.** (2006). Analysis of the lightning characteristics in the Southeast region of Brazil. PhD Thesis. INPE. 258 p.
- Orville, R.** (1990). Peak-current variations of lightning return strokes as a function of latitude. *Nature*. **343**: 149-151. <https://doi.org/10.1038/343149a0>.
- Sentman, D.D. & Wescott, E.M.** (1993). Observations of upper atmospheric optical flashes recorded from an aircraft. *Geophys. Res. Lett.* **20**: 2857-2860.
- Skelved, A. B., Østgaard, N., Carlson, B., Gjesteland, T., Celestin, S.** (2014). Modeling the relativistic runaway electron avalanche and the feedback mechanism with GEANT4. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **119** (11): 9174-9191. Published online 2014 Nov 3. doi: 10.1002/2014JA020504
- Skelved, A. B., Østgaard, N., Mezentsev, A., Lehtinen, N., Carlson, B.** (2017). Constraints to do realistic modeling of the electric field ahead of the tip of a lightning leader. *Journal of Geophysical Research*. **122** (15): 8120-8134. Published online 2017 Aug 5. doi: 10.1002/2016JD026206.

- Smith, D. M., Lopez, L., Lin, R.P., Christopher P., Barrington-Leigh.** (2005). Terrestrial Gamma-Ray Flashes Observed up to 20 MeV. *Rev Science* 18 Feb. **307** (5712): 1085-1088. DOI: 10.1126/science.1107466.
- Splitt, M.E., Lazarus, S. M., Barnes, D., Dwyer, J. R., Rassoul, H. K., Smith, D. M., Hazelton, B., Grefenstette, B.** (2010). Thunderstorm characteristics associated with RHESSI identified terrestrial gamma ray flashes. *JGR.* **115:** A06319. Doi: 10.1029/2009JA014622
- Stanford Encyclopedia of Philosophy. Science and Social Philosophy.** (2003). Francis Bacon punto 6. ÉNDOXA: Series Filosóficas, n.º 17. 2003. pp. 227-249. UNED, Madrid. ISSN (versión electrónica): 2174-5676
- Torres, H.** (2018). El enigma del electromagnetismo bajo la lupa. ISBN 978-620-2-15081-1. Editorial Académica Española. EAE Publishing LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG.
- Torres, H.** (2017). La interdisciplinariedad en la ciencia del rayo. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* **41** (159): 174-186. Doi: 10.18257/raccefyn.475
- Torres, H., Pérez, E., Younes, C., Aranguren, D., Montaña, J., Herrera, J.** (2015). Contribution to Lightning Parameters Study Based on Some American Tropical Regions Observations. *IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing.* **8** (8): 4086-4093.
- Torres, H.** (2015). El rayo en el trópico ISBN 978-958-775-454-4 Colección apuntes maestros, Ed. UN, Bogotá, Colombia, 2015a.
- Torres, H.** (1998). Espacio y tiempo en los parámetros del rayo, ensayo sobre una hipótesis de investigación. Trabajo de investigación presentado a la Universidad Nacional de Colombia para promoción a la categoría de Profesor Titular. Bogotá, UN.
- Torres H., Barreto T., Enciso L.** (1994). Multiple Time Series analysis in tropical lightning research. *Proceedings 22nd ICLP, Budapest - Hungary, Sep. 1994.* ISBN 963 420 441 4.
- Williams, E.R.** (2006). Problems in lightning physics-the role of polarity asymmetry. *Plasma Sources Sci. Technol.* **15:** S91-S108. Doi:10.1088/0963-0252/15/2/S12
- Williams, E., Boccippio, D., Petersen, W., Rutledge, S., Ishii, M., Hidayat, S., Torres, H., Jayaratne, R., Yair, Y., Levin, Z., Mackerras, D.** (1996). Latitude Dependence of Ground Flash Density in the Tropics and Subtropics. *Amer. Geo. Union. Meeting, San Francisco.*
- Younes, C.** (2006). Methodologies for correlating lightning parameters with geographical and meteorological characteristics – Colombian case (in Spanish) - PhD Thesis. National University of Colombia, Bogotá, Colombia.