

# ¿QUÉ RAYOS SABEMOS?

Por

**Horacio Torres-Sánchez\***

## Resumen

**Torres-Sánchez H.:** ¿Qué rayos sabemos? Rev. Acad. Colomb. Cienc. **34** (131): 193-208, 2010. ISSN 0370-3908.

Este trabajo ha sido elaborado para la presentación como Miembro Correspondiente de la Academia Colombina de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Tiene un enfoque sobre la importancia del entendimiento de los fenómenos naturales como el rayo en las culturas milenarias y específicamente en las precolombinas, las cuales tenían otro lenguaje diferente al científico, pero igualmente válido para conocer y aplicar estos conocimientos. Y un segundo enfoque sobre los aportes que el grupo de investigación PAAS de la Universidad Nacional de Colombia ha hecho al entendimiento del fenómeno del rayo.

**Palabras clave:** rayos, ciencia, mitos.

## Abstract

This work has been elaborated for the presentation as Corresponding Member of the Colombian Academy of Exact, Physics and Natural Sciences. It specifically has an approach on the importance of the understanding of the natural phenomena like the lightning in the millenarian cultures and in the pre-Columbian ones, which had another language different from the scientist, but equally valid to know and to apply these knowledge. And a second focuses on the contributions that the research group PAAS of the National University of Colombia has done to the understanding of the lightning phenomenon.

**Key words:** lightning, science, mythos.

## 1. Introducción

Es indudable que el conocimiento de los fenómenos naturales mediante lo que hoy en día llamamos ciencia, ha hecho fundamentales cambios en la vida humana moder-

na; pero el conocimiento e interpretación de tales fenómenos por culturas milenarias, como por ejemplo las indígenas precolombinas, no pueden ser subestimados a favor de la ciencia moderna. Dan Brown en su más reciente novela de ficción “El símbolo perdido” sostiene que “la clave

---

\* Profesor Titular y Emérito de la UN. Miembro correspondiente de la ACCEFYN. Correo electrónico: htorress@unal.edu.co

de nuestro futuro científico se oculta en nuestro pasado”. Nada más verdadero que ello para aplicarlo al conocimiento sobre el fenómeno del rayo. “El ser humano se hallará en el umbral de una nueva etapa cuando vuelva la mirada a la naturaleza y a las antiguas formas de hacer las cosas”.

El ser humano ha buscado, a través de los tiempos y en diferentes culturas, transformar la energía disponible en la naturaleza; desde la fricción para obtener fuego, hasta la utilización intrínseca de la materia para obtener energía nuclear o viajar en busca de nuevos mundos. En esa búsqueda ha tratado de conocer la naturaleza y sus fenómenos, expresando ese conocimiento en diferentes lenguajes como el mítico, la iconografía, hasta el moderno de nuestros días llamado científico. En cualquier época sus aportes han sido fundamentales para entender el porque de las cosas de la naturaleza.

Las manifestaciones del fenómeno eléctrico fueron conocidas desde la cultura Acadia y griega con la interpretación del fenómeno del rayo y los escritos de Tales de Mileto sobre la piedra imán, respectivamente. Para la cultura occidental, fueron los trabajos sistemáticos realizados por los “electricistas” del siglo 18 los que dieron las bases para el nacimiento del moderno mito de la electricidad y los usos que hoy conocemos.

## 2. El fenómeno del rayo en las culturas precolombinas

La riqueza mitológica del fenómeno del rayo en las culturas indígenas precolombinas, está representada ejemplarmente en el libro del Popol Vuh, traducido al español de la lengua autóctona de los indios Quichés de Guatemala por el padre dominico Francisco Ximénez, a principios del siglo 18.

El Popol Vuh constituye una plena realidad viva, donde se encuentran todas las tradiciones milenarias de los Quichés.

Los dioses de la lluvia en la cultura Maya eran los Chacs y se conocían con el nombre de los regadores. Eran ellos quienes producían los relámpagos, los rayos, las tempestades, las tormentas y la lluvia. Cuando iban a llevar las lluvias, los Chacs se reunían en su morada que se llamaba “al pie del cielo”, desde donde salían por una puerta llamada “trueno” que empezaba en la capa de las nubes. Con su jefe al frente atravesaban los cielos, cada uno con una calabaza de agua en una mano y en la otra algo parecido a una hacha de piedra bien pulida, la cual una vez lanzada sobre la tierra producía los rayos y los truenos; estos últimos originados por los gritos o los diálogos entre ellos. Los Chacs iban en las cuatro direcciones.

Un análisis moderno del significado de las invocaciones Mayas para la lluvia, muestra el conocimiento que parece ya tenían sobre la diferencia que actualmente se tiene entre rayos de nube a tierra y entre nubes, así como las relaciones no directas que hoy en día conocemos entre número de días con rayos y número de días con lluvia. Había meses y días especiales en que invocaban a los Chacs para la lluvia y en estas invocaciones utilizaban ciertos términos cuyo significado estaba relacionado con las lluvias. Por ejemplo: Lelemcaanchaac, “el dios de la lluvia látigo relampagueante...”, Mizencaanchaac, “Rayo que barre el cielo...” y Lelencanil, “tormenta de muchas nubes y poca agua”.

Mediante los códices Mayas se puede apreciar la representación de un perro relámpago que lleva dos antorchas encendidas cuya representación es la tempestad. Estas dos antorchas pueden significar los dos tipos de rayos diferentes que ellos alcanzaban a apreciar.

Para la cultura Inca el dios del rayo era Ilyapa. En Cuzco, capital del imperio, existía el Coricancha, el templo del oro, en donde se encontraban los templos de las principales deidades: El sol Inti, la luna Quilia y el rayo Ilyapa. Y cada templo tenía su propio sacerdote. Sus interpretaciones míticas nos muestran hoy en día el conocimiento claro que tenían sobre la diferencia entre la energía lumínica (relámpago) y la energía audible (trueno) producida por el rayo. Ilyapa era un hombre ataviado con reluciente vestido que llevaba en una mano una porra y en la otra una honda. El relámpago era el fulgor que despedía su vestido al moverse, el trueno la descarga de su honda y el rayo el proyectil de piedra.

Para ellos los dioses vivieron en otros tiempos en la tierra y después subieron al cielo para confundirse con las estrellas. Entre ellas estaban las Pleyadas que representaban para los Incas una divinidad suprema que se manifestaba mediante el rayo y era capaz de devorar el sol o la luna. Durante la conquista española de América hubo ciertos relatos que hicieron que, arrogantemente y sin respeto por el conocimiento, al rayo se le llamara Santiago. He aquí uno de estos:

“Dicen que lo vieron a vista de ojos, avajo el señor Santiago, con un trueno muy grande, como rRayo cayo del cielo a la fortaleza de ynga y como cayo en tierra se espantaron los yndios y digeron que abia caydo yllapa, trueno y Rayo del cielo y anci bajo el señor Santiago a defender a los cristianos. Desto echo a uir los yndios entonses los yndios al rRayo les llama y le dize Santiago porque el sancto cayo en tierra como Rayo yllapa”.

Después de la conquista española algunos indios continuaban haciendo culto a Ilyapa, pero esto era prohibido y castigado por los españoles con cárcel o trabajos forzados. Pero aún así, para los indios Ilyapa estaba presente en sus vidas y lo expresaban, por ejemplo en esta bella poesía quechua:

*“bella princesa,  
tu propio hermano  
rompe  
el vaso que llevas  
entonces  
luce un relámpago,  
gruñe el trueno,  
cae el Rayo.  
tu, princesa,  
nos das  
tu lluvia  
también, a veces, el granizo,  
y la nieve”.*

### 3. Dos lenguajes y una verdad

Si bien la ciencia moderna nos ofrece hoy en día la posibilidad de conocer y entender los fenómenos de la naturaleza, la historia nos proporciona similares interpretaciones en otro lenguaje: el mítico. Un ejemplo de la interpretación de un mismo fenómeno en dos lenguajes diferentes lo encontramos en la creación de la vida en el universo, al comparar la creencia mítica de la ancestral y milenaria cultura Maya con el resultado científico llevado a cabo en nuestro tiempo en la Universidad de Cornell, Estados Unidos, según las cuales el rayo es el detonante de la vida en el universo:

*“...El Rey, la Serpiente y el Corazón del cielo, a quien también se dice Juracán, dispusieron en las tinieblas la creación de la vida.*

*Caculjá Juracán que quiere decir “Relámpago”, Chipi Caculjá, cuyo significado es “Rayo pequeño” y Raza Caculjá, sinónimo de “Trueno”, constituyen la trinidad del Corazón del Cielo o Juracán...*

*...Se hicieron los valles. Y al instante brotaron los cipresales y pinares, para la alegría y beneplácito de Gucumatz, quien dijo:*

*-! Que buena ha sido la presencia del Relámpago, el Rayo pequeño y el Trueno!*

*Ellos respondieron:*

*- !Nuestra creación, nuestra obra será terminada!*

*En efecto, se dividieron las corrientes de agua, los arroyos fluyeron alegremente entre los cerros. Y las aguas quedaron separadas ante la presencia de las montañas y las cumbres.*

*De esta manera se perfeccionó la Obra”.*

Los resultados científicos se describen así en el lenguaje científico moderno:

*“... En mi laboratorio de la Universidad de Cornell mezclamos y sometimos a chispas los gases de la Tierra primitiva: hidrógeno, agua, amoníaco, metano, sulfuro de hidrógeno. Las chispas correspondían a los Rayos, presentes también en la tierra antigua y en el actual Júpiter. Al cabo de diez minutos de chispas aparece una colección muy rica de moléculas orgánicas complejas, incluyendo a las partes constitutivas de proteínas y ácidos nucleicos...”*

Para la cultura occidental las primeras interpretaciones sobre las descargas eléctricas atmosféricas se da a principios de 1700 cuando en Inglaterra se publica la primera especulación en la que se planteaba que los relámpagos y los truenos podían estar relacionados con la luz y el sonido, por las características de la chispa o arco eléctrico. Especulación esta que siglos antes ya había sido interpretada por la cultura Inca, mediante el dios Ilyapa

Anterior a Franklin el inglés Stephen Gray descubrió en 1729 que la electricidad podía ser comunicada a grandes distancias, por medio de contacto, es decir, descubrió la conductividad de los materiales y estableció la diferencia entre cuerpos conductores y no conductores.

Hacia finales del siglo 18, las mediciones precisas llegaron a ser un objetivo importante en los experimentos físicos, entonces el término “fluidos sutiles” (“*subtle fluids*”) fue usado para fenómenos que comenzaban a ser reemplazados por leyes cuantitativas, las cuales hacían a los fenómenos físicos más predecibles, o más entendibles.

El concepto de fluido sutil fue un paso necesario en el proceso de cuantificación. Un fluido “sutil” o “imponderable” era una sustancia que poseía propiedades físicas pero no era como una materia ordinaria. Los mejores ejemplos de fluidos sutiles fueron el calor y el fuego eléctrico o la electricidad.

### 4. Aportes de la investigación en Colombia al entendimiento del fenómeno del rayo

Más de quince parámetros mensurables han sido establecidos por diversos investigadores que han estudiado

la física del rayo. La escala de órdenes de magnitud espacial va desde los fenómenos atómicos que inician la electrificación de la nube de tormenta en una magnitud de 10-13 kilómetros, hasta el movimiento del aire de la nube de tormenta, que completa el proceso de carga, en una escala de decenas o centenas de kilómetros. Temporalmente los órdenes de magnitud van desde los 10-6 segundos que duran los pasos del líder escalonado, hasta la duración total de una tormenta en una escala de horas. El conocimiento de estos parámetros, en sus diferentes escalas, tiene importancia tanto científica como tecnológica. El conocimiento Científico nos facilita entender su comportamiento en el tiempo y en el espacio y sus relaciones con otros fenómenos naturales. En lo tecnológico su conocimiento permite el diseño óptimo y la protección adecuada de seres vivos y de equipo eléctrico y electrónico, así como el oportuno mantenimiento para garantizar una operación confiable, económica y segura.

##### **5. Hipótesis de variación espacial y temporal de los parámetros del rayo**

La hipótesis sobre variación espacial y temporal en los parámetros del rayo ha estado implícita en todos los trabajos realizados dentro del Programa de investigación PAAS. La hipótesis se fundamenta en los principios científicos planteados por C.T.R Wilson en 1920 y Whipple en 1929, sobre el Circuito Eléctrico Global y la contribución dominante, por una superposición de efectos, de las tres mayores zonas de Convección Profunda Tropical del planeta: Sur América Tropical, Centro de África y el Continente Marítimo (Sur Este de Asia y Australia).

Si bien las zonas de Convección Profunda Tropical fueron identificadas al principio del siglo XX como de alta actividad eléctrica atmosférica, hasta el presente la mayoría de la información disponible sobre las características y magnitudes de los rayos están basadas en estudios llevados a cabo en zonas semitropicales o templadas, pero muy pocos en Zonas Tropicales.

Con base en los principios de Wilson y Whipple se comenzó a desarrollar la comprobación de la hipótesis con las primeras estimaciones que hicimos del parámetro Nivel Ceráuneo en Colombia en 1982 y posteriormente con mediciones, análisis matemático y revisión bibliográfica de otros parámetros del Rayo.

La hipótesis de investigación puede explicitarse de la siguiente manera: *“las magnitudes de los parámetros de la descarga eléctrica atmosférica utilizados en aplicaciones en ingeniería (Nivel Ceráunico, Densidad de Rayos a Tierra, Polaridad, Corriente de Retorno de Rayo y*

*Rata de Ascenso de la Corriente de Rayo) varían espacial y temporalmente”.*

La perspectiva temporal significa que los parámetros del rayo se caracterizan por variar en diferentes escalas de tiempo: diaria, mensual, anual y multianual. Una perspectiva espacial significa que la magnitud de los parámetros del rayo varía global y localmente.

En el idioma inglés existe una diferencia entre los conceptos “climate” y “weather” que depende de las escalas de tiempo involucradas. El tiempo (atmosférico) de un lugar particular comprende las variaciones diarias locales de temperatura, precipitación, humedad y condiciones similares; el clima de un lugar es el promedio de tales parámetros sobre un mayor período de tiempo, meses, años o más. Por ejemplo, de la temperatura diaria (tiempo) medida en Enero para un número de años, se puede estimar el promedio mensual (clima) de Enero, como la sumatoria de todos los datos de temperatura diaria, dividido por el número de días registrados. Esto puede ser realizado para un sitio en particular, para una región específica o para todo el planeta; estas escalas se denominan locales, regionales y globales respectivamente. Se pueden comparar entonces estos promedios y caracterizar el clima de un lugar como, por ejemplo, caliente y seco, frío y seco, o caliente y húmedo. Se puede así proceder a clasificar las diferentes regiones del planeta en distintas categorías.

La Climatología es la ciencia que toma como objeto de estudio el estado físico de la atmósfera, identificando periodos de tiempo en sitios geográficos específicos. Las subdisciplinas de la Climatología pueden trabajar en cualquier escala espacial y sobre cualquier período largo de tiempo, lo suficiente para establecer un registro climático. La escala más pequeña de área, conocida como microclimatología, trata con el clima en un campo individual o alrededor de una edificación particular. Un microclima puede extenderse horizontalmente desde menos de 1 metro hasta 100 metros y verticalmente desde la superficie hasta 100 metros.

Un clima local comprende un número de microclimas dentro de un área de rasgos característicos de superficie, tales como un bosque o una ciudad. El tamaño de un clima local puede extenderse horizontalmente de 100 a 10.000 metros y verticalmente hasta 100 metros. Un mesoclima puede contener un número de tipos individuales de paisajes, sin embargo estos usualmente comparten una componente fisiográfica similar. Es así como, por ejemplo, estados vecinos en grandes planicies como en USA pueden ser parte del mismo mesoclima. La Macroclimatología trata del clima de los continentes y del planeta total.

Revisando la bibliografía sobre el desarrollo histórico de las mediciones y estimaciones de los parámetros del Rayo, se utilizó una metodología similar a la descrita en los párrafos anteriores para comparar promedios y caracterizar regiones. Por ejemplo, los datos de días tormentosos basados en observaciones humanas permitieron la primera comparación cuantitativa de ocurrencia de tormentas para regiones de un país, durante diferentes épocas del año y para diferentes sitios alrededor del mundo. Whipple y Brooks, caracterizaron zonas del planeta de mayor contribución al Circuito Eléctrico Global o, en otras palabras, de mayor actividad eléctrica atmosférica.

Sin embargo, cuando los investigadores en la física del rayo procedieron a clasificar las diferentes regiones de la Tierra, de acuerdo con los diferentes parámetros del Rayo medidos para aplicaciones en ingeniería, solo tuvieron en cuenta los datos de mediciones locales de Latitudes Norte y los generalizaron para todo el planeta.

Es así como hoy en día se tienen curvas de distribución de probabilidad para la Corriente de Retorno y la Forma del Impulso de la Corriente de Rayo, medidas en Europa, que se recomiendan tanto en la literatura especializada como en las normas internacionales, para ser utilizadas en diseño de protecciones contra Rayos, diseño de aislamientos en máquinas eléctricas, diseño de apantallamientos en líneas de transmisión, para cualquier parte del mundo. Esta práctica sería equivalente a clasificar climatológicamente la región Colombiana, según el científico alemán Köppen, como bosque húmedo tropical y, con base en ello, diseñar un equipo de aire acondicionado para un edificio en la ciudad de Bogotá.

Con el parámetro de Densidad de Descargas a Tierra sucede algo similar, la literatura especializada y las normas internacionales recomiendan ecuaciones en función del Nivel Cerámico que han sido desarrolladas para un sitio específico, pero se pretende generalizarlas para todo el mundo. Adicionalmente, como se analiza en este mismo capítulo, podrían esperarse en el trópico (escala global) valores de Densidad más bajos que en el subtrópico, pero, para propósitos de aplicaciones en ingeniería (escala local), los efectos orográficos locales y posiblemente la geología del lugar, pueden jugar un papel tan importante que las magnitudes de Densidad de Descargas a Tierra llegan a ser muy altas.

Para propósitos de aplicación a la ingeniería de protección contra rayos esta generalización trae como consecuencia diseños y construcciones de equipos y sistemas no apropiados al entorno, ni compatibles electromagnéticamente con las condiciones electromagnéticas locales generadas por la actividad de Rayos. La descarga eléctrica atmosférica y sus parámetros asociados, son un fenómeno meteorológico que, como tal, se manifiesta de una manera aleatoria. En sus aplicaciones en la protección, diseño, operación y mantenimiento de equipos y sistemas eléctricos o electrónicos, es necesario considerar, entonces, la dimensión estadística y la probabilidad de sus valores, es decir, explicitar la condición aleatoria del fenómeno.

## 6. Variación temporal del nivel cerámico

Varios siglos antes de Cristo, la cultura Caldea de Babilonia desarrolló un sistema de predicción de clima que incluía el conteo de truenos. En la Europa medieval se tiene conocimiento que hubo gente que rescató la práctica Caldea y crearon calendarios de truenos, que fueron usados para hacer predicciones de clima, basados en registros históricos de truenos oídos en días específicos.

En 1873, el Comité Meteorológico Internacional (IMC<sup>1</sup>), reunido en Viena adoptó una unidad que denominó “Día con trueno oído”<sup>2</sup>, mediante una resolución que rezaba:

*“Para obtener resultados que permitan comparación, se recomienda contar solamente como días de tormenta aquellos en los cuales un trueno es oído y un relámpago es observado”*<sup>3</sup>.

El relámpago sin trueno fue excluido para prevenir el registro de tormentas muy lejanas.

Hacia finales del siglo 19 se comenzaron a elaborar mapas donde, mediante líneas, se conectaban sitios en los cuales el primer trueno de una tormenta era oído. Estas líneas se llamaron líneas de igual número de truenos. El término Isocerámico<sup>4</sup> se comenzó entonces a usar hacia 1920 y se refería a una línea o isograma de igual frecuencia de días tormentosos.

Los datos de días tormentosos basados en observaciones humanas permitieron la primera comparación cuantitativa

1 *International Meteorological Committee.*

2 *Day with Thunder Heard* en inglés.

3 La versión en inglés reza: *“In order to obtain results which admit of comparison, it is recommended to enumerate only Days of Thunderstorm...Only days on which both thunder and lightning are observed should be counted as days of thunderstorm.”*

4 El término significa igual número de truenos y relámpagos.

de ocurrencia de tormentas para regiones de un país, durante diferentes épocas del año y para diferentes sitios alrededor del mundo.

### 7. Variación espacial del nivel cerámico por latitudes

Estudios locales sobre la actividad de rayos han sido realizados en diferentes países. Una recopilación de estos estudios, cuyos resultados se representan mediante mapas, permiten inferir que el nivel cerámico es mayor en latitudes tropicales que en latitudes templadas<sup>5</sup>, lo cual es coincidente con los resultados de los trabajos de Whipple y Brooks [1], [2].

El Trópico de Cáncer<sup>6</sup> señala el límite septentrional y el Trópico de Capricornio<sup>7</sup> señala el límite meridional de la llamada Zona Intertropical, comprendida entre estas dos latitudes. Si bien estos límites son astronómicos, no climáticos, la zona intertropical presenta unas características climáticas especiales que la diferencian de las otras cuatro zonas geoastronómicas (las dos zonas templadas y las dos zonas polares).

Veamos algunos de estos mapas comenzando por la zona templada.

En Francia, por ejemplo, el nivel cerámico promedio multianual es alrededor de 20. Es mayor a 25 al sur, en las áreas montañosas de los Alpes en frontera con Suiza y mayor a 30 en los Pirineos en frontera con España y en frontera con Italia y menor de 15 al norte, en las áreas costeras que bordean el Mar del Norte. La figura 1 presenta el mapa de niveles cerámicos de Francia con una presentación por sectores centrados en las estaciones de observación pertenecientes a la Compañía Eléctrica de Francia<sup>8</sup>. Los franceses consideran que es más apropiado este tipo de presentación para calcular el riesgo de descarga eléctrica atmosférica que la usual presentación en la forma de curvas isoceránicas.

En 1924, Alexander [5] presentó un mapa de Niveles Cerámicos promedios de los Estados Unidos para un período entre 1904 y 1923. La figura 2 presenta el mapa de niveles cerámicos promedio de los Estados Unidos, según los datos del Departamento de Comercio [3]. Estos dos mapas son muy similares, a pesar de tener datos distantes más de 40 años.

El mapa de la figura 2 presenta altos niveles cerámicos, entre 70 y 90 días tormentosos año, para la región semitropical en el estado de la Florida, mientras que las regiones más templadas, hacia el polo norte, en frontera con Canadá, el nivel cerámico es bajo, similar a los valores de esta misma latitud en Francia, 10 días tormentosos/año.

Los valores de nivel cerámico en zona semitropical, latitud sur, son similares a los de zona semitropical latitud norte (Florida, USA), entre 80 y 100 días tormentosos año, como se puede apreciar en el mapa de niveles cerámicos del estado de Minas Gerais, Brasil.



Figura 1. Mapa Niveles Cerámicos Francia. Adaptado de [3].

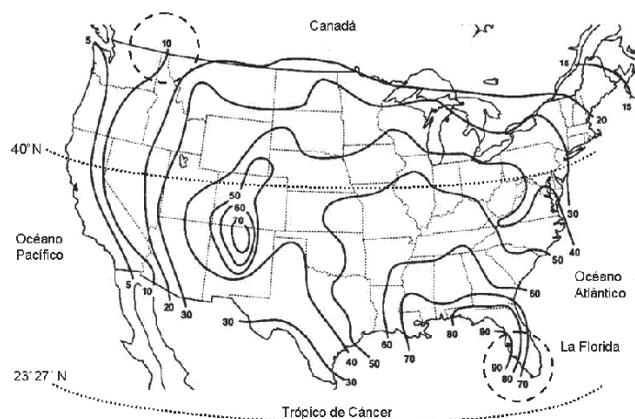


Figura 2. Mapa Niveles Cerámicos Estados Unidos. Adaptado de [4].

<sup>5</sup> Las zonas norte y sur del planeta a niveles de latitud media se conocen como zona templada.

<sup>6</sup> Ubicado en la latitud 23° 27' N.

<sup>7</sup> Ubicado en la latitud 23° 27' S.

<sup>8</sup> *Electricité de France*.

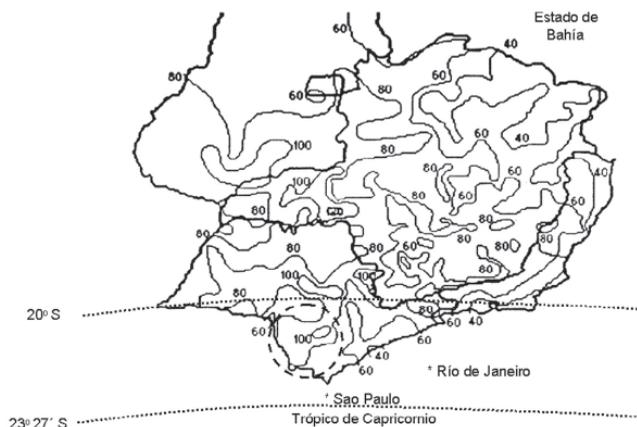


Figura 3. Mapa Niveles Cerámicos, Minas Gerais, Brasil.

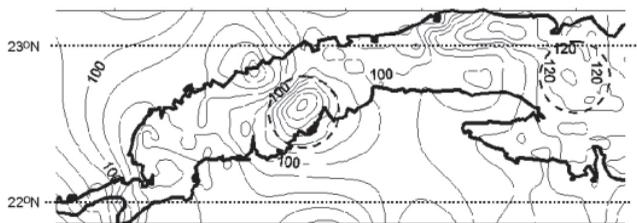


Figura 4. Mapa de Niveles Cerámicos de Cuba.

A continuación se presentan los mapas de Cuba y Colombia (promedio multianual 1997-2001), representativos de la región tropical, los cuales permiten inferir que el nivel cerámico es mayor en latitudes tropicales que en latitudes templadas.

A nivel espacial las influencias meteorológicas de tipo sinóptico en Colombia, como la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT) y la incidencia de los sistemas de vientos alisios del Noreste y Sudeste (asociados con la ZCIT), repercuten sobre las condiciones locales originando, por ejemplo, mayor nubosidad en áreas extensas y determinando en algunas regiones los periodos de mayor y menor incidencia de actividades de tormenta eléctrica atmosférica. También la actividad convectiva, por condiciones especiales de inestabilidad atmosférica, producto de factores térmicos y de la formación de lluvias por el factor orográfico, contribuye al aumento de la probabilidad de formación de tormentas.

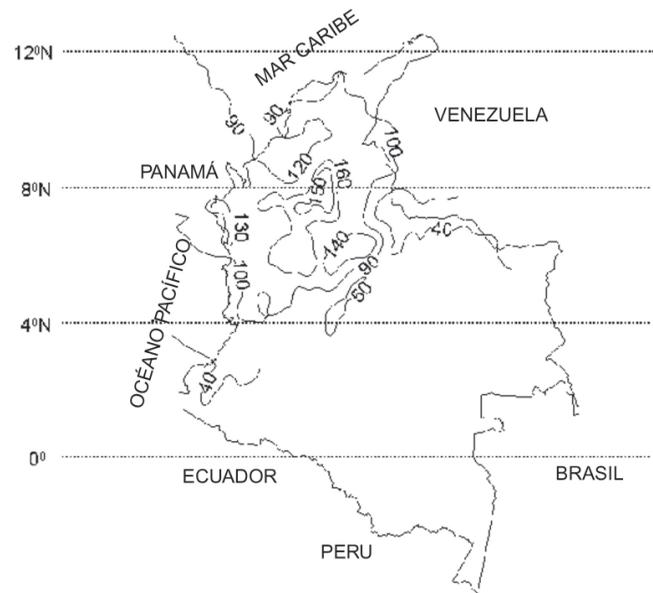


Figura 5. Mapa Niveles Cerámicos de Colombia (promedio multianual 1997-2001).

En Colombia, el estrechamiento de las cadenas montañosas, principalmente en las Cordilleras Oriental (Noroeste de Cundinamarca y Sudoeste de Boyacá) y Central (Noreste de Caldas, Sudeste de Antioquia), y los vientos que se aproximan a ellas, marcan la principal influencia en la definición del mayor o menor nivel cerámico y por tanto de la mayor actividad eléctrica atmosférica, como puede apreciarse en los gradientes más altos de Nivel Cerámico en los pie de montes de las cordilleras.

Alrededor de la Sierra Nevada de Santa Marta, en el Mar Caribe, se presenta un fuerte gradiente con niveles iguales o superiores a 90 días tormentosos/año. La parte media del Valle del Río Magdalena (o mejor conocido como Magdalena Medio) se caracteriza por la presencia de un sistema de alto nivel cerámico, con valores promedio entre 120 y 160, en la región conocida como Catatumbo en zona limítrofe con Venezuela.

La actividad de rayos en esta región llevó a Humboldt a llamar este fenómeno como el “rayo del Catatumbo”<sup>9</sup>. El naturalista y explorador alemán Alexander von Humboldt lo describe como “*explosiones eléctricas que son como fulgores fosforescentes...*”, siendo reseñado luego por el

9 El origen de este fenómeno está en el efecto orográfico de estas cordilleras que encierran los vientos alisios del noreste, produciéndose nubes de gran desarrollo vertical, concentradas principalmente en la cuenca del río Catatumbo.

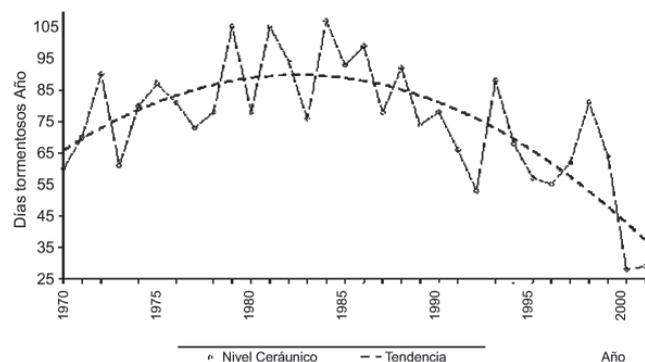
geógrafo Agustín Codazzi como un “*relámpago continuado que parece surgir del río Zulia y sus alrededores*”. El primer escrito donde se mencionó al “rayo del Catatumbo” fue el poema “La Dragontea” de Lope de Vega en 1597.

Una primera conclusión de las anteriores observaciones es la amplia variación espacial de la actividad eléctrica atmosférica en el mundo, desde valores promedios multianuales de 10 hasta más de 160 días tormentosos/año.

Una segunda conclusión es la alta actividad eléctrica atmosférica promedio multianual que, en términos generales presenta la zona tropical respecto a regiones de latitudes templadas, es decir, que podría afirmarse que los países ubicados geográficamente en zona tropical terrestre, presentan alta actividad eléctrica atmosférica. Esta afirmación corrobora la hipótesis planteada por Whipple en 1929, y Gish y Wait en 1950, sobre distribución no homogénea del Circuito Eléctrico Global y la contribución dominante de las tres mayores zonas de Convección Profunda Tropical del planeta.

Sin embargo, desde una perspectiva espacial - local, existen áreas en países tropicales donde la actividad eléctrica atmosférica es muy baja.

Esto nos conduce a una tercera conclusión: plantear la necesidad de diferenciar espacialmente los análisis y por ende las aplicaciones, de acuerdo con el objetivo buscado. Con lo expuesto anteriormente es viable afirmar que el nivel cerámico en zona tropical es mayor que en latitudes semitropicales o templadas. Sin embargo, si el objetivo es diseñar un sistema de protección contra rayos en una localidad definida, los datos anteriores no necesariamente son válidos y se requiere entonces estimar la magnitud de los parámetros del rayo del sitio en cuestión.



**Figura 6.** Comportamiento multianual del nivel cerámico en Bogotá, Colombia.

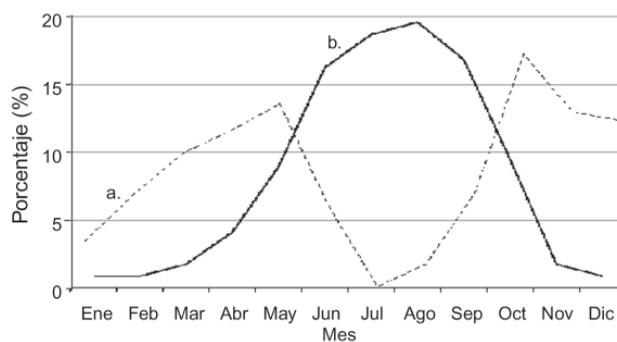
## 8. Variación temporal de la actividad de rayos

El conocimiento de la variación temporal de los parámetros del rayo tiene importantes implicaciones en el diseño, mantenimiento y operación de sistemas eléctricos y electrónicos. Si un diseño de protección contra rayos se realiza, por ejemplo, para un año determinado, es posible que unos años más tarde este mismo diseño pueda estar técnicamente sub o sobre dimensionado. Al conocerse su comportamiento multianual, el ingeniero de diseño puede tener en cuenta la variable tiempo y ajustar la protección para evitar sobrecostos en el diseño o problemas de fallas técnicas en el futuro.

Con base en el conocimiento de la variación temporal de la actividad eléctrica atmosférica, el ingeniero de mantenimiento o el personal de operación, por ejemplo, pueden hacer una programación con altos márgenes de seguridad por incidencia de rayos para el personal o buenos índices de confiabilidad en la operación de un sistema de potencia, que se traducen en una alta calidad de la energía eléctrica. Un ejemplo de esta afirmación se muestra en la figura 6, en la cual se presenta una serie de tiempo de 31 años (1970-2001) del nivel cerámico en la ciudad de Bogotá, Colombia. En este caso ilustrativo es detectable un ciclo; sin embargo, la confirmación de un patrón determinado debe ser hecha sobre la base de más años de observaciones.

Las figuras 7 a y b ilustran el comportamiento multianual mensual de la actividad eléctrica atmosférica en dos ciudades tropicales: Bogotá, Colombia, ubicada en la zona tropical andina continental y la Habana, Cuba, ubicada en el mar Caribe, zona tropical.

Esta figura muestra dos comportamientos complementarios: bimodal, en el caso de Bogotá y monomodal en el



**Figura 7.** Comportamiento multianual mensual de la actividad eléctrica atmosférica: a. Bogotá, Colombia, b. La Habana, Cuba.

caso de la Habana, Cuba. El comportamiento bimodal en el caso de Bogotá tiene su explicación en el desplazamiento de la zona de confluencia intertropical ZCIT. En la ZCIT confluyen dos masas de aire con baja presión relativa; se sitúa aproximadamente paralela al Ecuador y está ubicada entre dos núcleos de alta presión atmosférica.

En Colombia la ZCIT se desplaza, aproximadamente, entre 0° de latitud, posición más sur en la que se encuentra en los meses de enero-febrero y 10° de latitud norte, posición más norte que se puede alcanzar en los meses de julio-agosto, coincidente con la época de huracanes en el mar Caribe.

El desplazamiento de la ZCIT ocasiona que en la zona andina de Colombia (caso Bogotá) se presente, durante el año, un comportamiento bimodal de actividad de rayos. Es decir, la ZCIT pasa por el centro de Colombia (zona andina) dos veces al año: una primera vez, entre abril y mayo, cuando se desplaza hacia el norte y ocasiona la primera temporada de rayos, que va acompañada de alta pluviosidad y un pequeño descenso de las temperaturas medias, con una disminución de las temperaturas máximas y un aumento de las mínimas. Una segunda temporada de rayos, entre septiembre y octubre, cuando regresa de su posición más norte, alcanzada en julio-agosto, y se dirige al sur, originando el segundo período de rayos y lluvias que es el más fuerte y que también se acompaña de un descenso de las temperaturas medias, disminución de las temperaturas máximas y aumento de las mínimas.

Complementario al comportamiento bimodal, la zona Caribe, representada, por ejemplo, por La Habana, Cuba, solo tiene una temporada de rayos entre los meses de julio, agosto (ver figura 7 b), coincidente con la época de

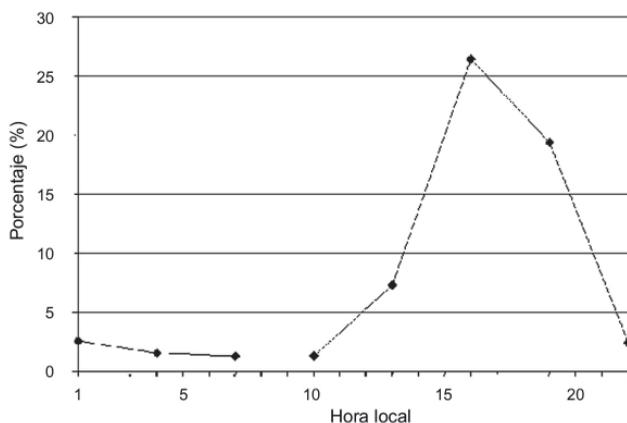


Figura 8. Comportamiento multianual horario de la actividad de rayos en la Habana, Cuba.

huracanes, cuando la ZCIT se encuentra en la zona más norte.

Otro análisis temporal tiene que ver con el comportamiento multianual horario, es decir, la hora del día en las que se presenta la actividad de rayos. Las figuras 8 y 9 ilustran 2 casos representativos de la zona tropical: La Habana, Cuba y 2 ciudades colombianas: Bogotá y Puerto Berrio.

El comportamiento horario de la actividad de rayos en Bogotá y la Habana es típico de la formación de nubes de tormenta por convección. La convección involucra la transferencia de enormes cantidades del calor absorbido por el agua; forma nubes de gran desarrollo vertical típicas portadoras de tormentas eléctricas. Si bien la gran mayoría de tormentas tienen formación por convección, las montañas modifican el flujo atmosférico a gran escala, cambiando el curso y la evolución de los sistemas de tormentas, generando su propio patrón de circulación de aire y alterando la distribución de la formación de nubes y el comportamiento horario de los rayos, como en el caso de la ciudad de Puerto Berrio, Colombia, donde la mayor actividad de rayos se presenta entre las 10 de la noche y las 2 de la madrugada.

## 9. Modelo bipolar tortuoso y ramificado

El inicio del rayo negativo se debe a la formación de penachos dentro de la nube, en la región inferior de carga negativa, a causa de los altos campos eléctricos allí presentes (de 0.1 a 1 MV/m) [6][7][8]. La propagación de estos penachos lleva a la recombinación de cargas en la base de la nube y a la formación de un canal eléctrico a partir del cual comienza a desarrollarse el líder del rayo. Aún no hay total

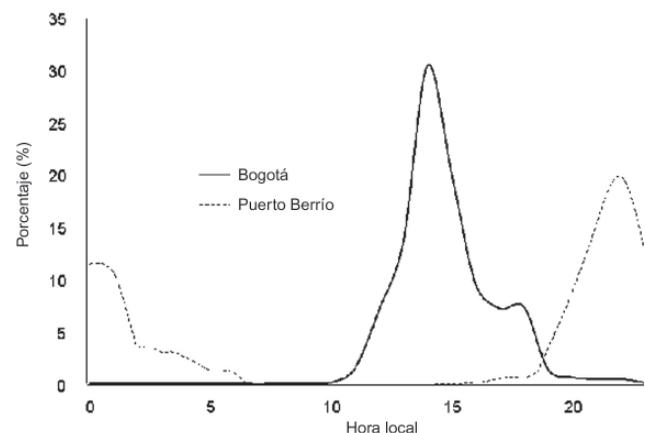


Figura 9. Comportamiento multianual horario de la actividad de rayos en Bogotá y Puerto Berrio, Colombia.

claridad de la forma exacta como se producen estos penachos dentro de la nube, ya que existen teorías diversas que se basan en la precipitación de hidrometeoros, en la interacción de gotas de agua y en la creación de electrones energéticos a causa de rayos cósmicos [7][8]. Sin embargo, la mayor discusión y controversia se concentra en la forma como se propagan, con dos principales modelos conceptuales existentes: el unipolar y el bipolar.

El concepto unipolar fue propuesto inicialmente por Schonland en 1938 [7], [9] y ha sido el más ampliamente usado en ingeniería. Asume que el rayo es iniciado por el desarrollo de penachos unipolares, se genera un líder unipolar y unidireccional que surge del centro de carga de la nube hacia tierra (ver figura 10 a) y por lo tanto, la carga eléctrica es transferida de la nube al canal del líder; sin embargo, no existe una explicación física para este mecanismo de transferencia de carga.

El concepto bipolar fue planteado por Kasemir en 1950 [7], [10], [11] y considera que el rayo es iniciado por penachos bipolares con carga neta cero y cuya fuente de energía es el campo electrostático. Ver figura 10 b. Posteriormente, Loeb aseguró que el rayo se iniciaba por la auto-propagación simultánea de penachos positivos ascendentes y negativos descendentes [12], es decir como penachos bipolares acorde con la teoría de Kasemir.

El concepto bipolar tiene más sentido físico y es una mejor aproximación del fenómeno real, ya que su mecanismo de propagación ha sido verificado con mediciones de campo usando cohetes para el inicio artificial de la descarga<sup>10</sup> y en mediciones con aeronaves.

Con el fin de contribuir al modelamiento del líder del rayo y al estudio de protección contra rayos, se desarrolló un trabajo doctoral en la Universidad Nacional de Colombia [13], utilizando un modelo electrostático del canal del líder para descargas negativas nube-tierra. Este modelo, que es aplicable tanto al líder escalonado (con tortuosidad y ramificaciones) como al líder dardo, aporta al mejor entendimiento físico del fenómeno del rayo y su aplicación a los sistemas de protección externa, teniendo en cuenta por primera vez en la investigación mundial sobre rayos, la tortuosidad y sus ramificaciones. Complementario al modelo del canal se describe el modelamiento de las estructuras en tierra y el proceso de enlace<sup>11</sup>, con base en diversos estudios previos y pruebas de laboratorio. La validación de cada una de estas etapas de modelamiento se hizo contrastando sus resultados con

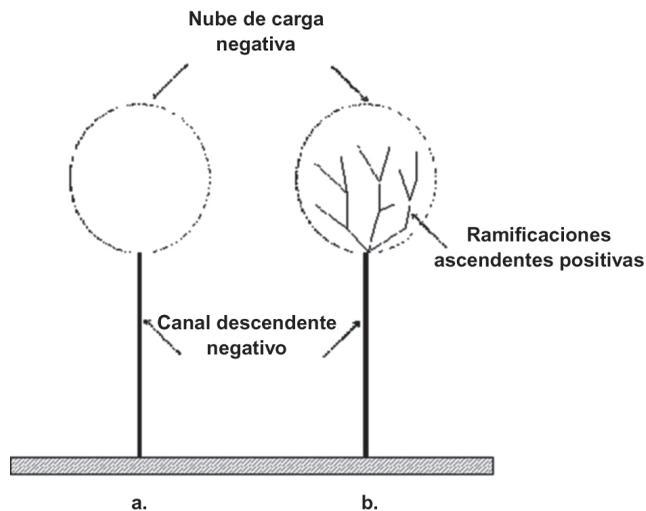


Figura 10. Modelos conceptuales del canal del líder (adaptado de [8]): a. unipolar / unidireccional, b. bipolar / bidireccional.

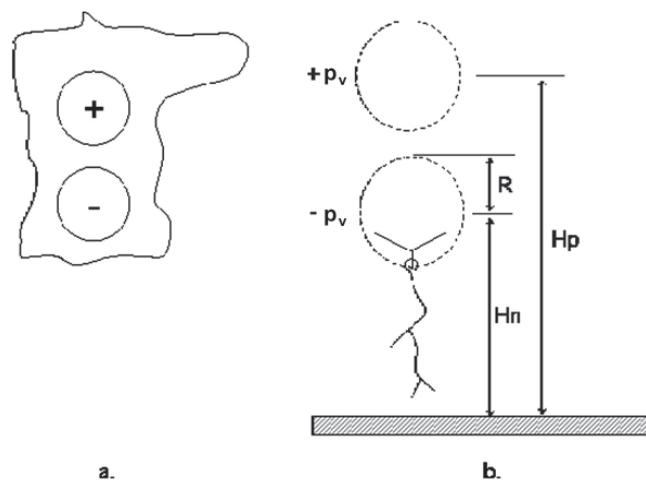


Figura 11. Modelo Bi-Líder: a. nube de tormenta, b. esquema general del modelo Bi-Líder donde el círculo representa el punto de inicio de la descarga.

observaciones y mediciones de campo y laboratorio, encontrando excelentes resultados concordantes entre ellos.

El modelo se desarrolló con base en una aproximación electrostática; aunque en la realidad el proceso es dinámico, esta suposición se considera válida debido al avance escalonado del líder descendente y a su baja velocidad de propagación con respecto a la luz, alrededor de 1000 veces menor. Lo anterior hace razonable asumir que durante cada paso el proceso de distribución de carga en el canal sea

<sup>10</sup> Triggered lightning en idioma inglés.

<sup>11</sup> Attachment process en idioma inglés.

**Tabla 1.6.** Los 10 sitios de más alta Densidad de Descargas a Tierra del mundo.

Rango	Lugar	País	Latitud [N]	DDT [rayos/km <sup>2</sup> -año]
1	Kamembe	Ruanda	-1,250	82,7
2	Boende	R. Dem. del Congo	0,250	66,3
3	Lusambo	R. Dem. del Congo	-4,750	52,1
4	Kananga	R. Dem. del Congo	-5,750	50,3
5	Kuala Lumpur	Malasia	3,250	48,3
6	Calabar	Nigeria	5,250	47,4
7	Franceville	Gabón	-2,250	47,1
8	Posadas	Argentina	-27,750	42,7
9	Ocaña	Colombia	8,250	39,9
10	Concepción	Paraguay	-23,250	37,0

electrostático y conforme al campo eléctrico del ambiente. El modelo es válido para descargas negativas nube-tierra.

Partiendo de la estructura eléctrica de la nube de tormenta, ésta se representó mediante dos regiones esféricas de carga, una positiva en la parte superior de la nube y otra negativa en la parte baja, como un dipolo, cada una con la misma densidad volumétrica de carga, (ver figura 11). El canal del líder se modeló con base en el concepto bipolar/bidireccional, asumiendo de esta manera que los canales se extienden con polaridad y dirección opuesta a partir de un punto de inicio y que la carga neta es igual a cero. Por lo tanto, el líder descendente negativo avanza hacia tierra mientras que ramas ascendentes positivas penetran en la nube, (ver figura 11). El canal del líder se consideró perfectamente conductor, teniendo en cuenta que su canal de plasma posee una muy alta conductividad [6], [8][14], y el punto de inicio se estableció en la parte inferior del centro de carga negativo.

### 10. Densidad de Descargas a Tierra - DDT

El concepto de nivel cerámico es muy rudimentario y débil para ser capaz de dar una medida utilizable de la severidad de las tormentas y para dar información sobre la existencia de áreas locales que son especialmente propensas a los rayos. Un concepto más riguroso de actividad eléctrica atmosférica, puede ser provisto por la severidad tormentosa, mediante el parámetro Densidad de Descargas a Tierra por kilómetro cuadrado - año - DDT.

Este parámetro ha sido determinado tradicionalmente por dos métodos:

- Mediante mediciones directas con equipos contadores de rayos, sistemas localizadores o, más recientemente, mediante sistemas satelitales y

- Mediante ecuaciones empíricas que relacionan la Densidad de Descargas a Tierra con el nivel cerámico.

El método de relacionar la DDT con el nivel cerámico ha sido trabajado por investigadores de diferentes partes del mundo, encontrándose diferentes ecuaciones empíricas de relación nivel cerámico, densidad de rayos a tierra.

Al comparar la medición directa con estas ecuaciones empíricas muestran variaciones de más del 100% entre ellas, lo cual lleva a concluir que son válidas para los sitios donde fueron desarrolladas. Para este estudio, la ecuación desarrollada dentro del Programa PAAS de la Universidad Nacional de Colombia es la que mejores resultados presenta con errores relativos despreciables.

Estos resultados llevaron a proponer en el comité de normalización de la IEC TC81 que la ecuación propuesta para la norma IEC62305-2, 2006 (DDT = 0.1NC) solo fuera válida para zona templada. Propuesta que fue aceptada y quedó explícita en la norma. La propuesta para zona tropical es utilizar las siguientes ecuaciones [15], [16], cuando no se tenga el dato de DDT obtenido de un sistema localizador o un equipo contador de rayos:

$$DDT = 0.024.NC1.12 \quad (\text{México})$$

$$DDT = 0.030.NC1.12 \quad (\text{Brasil})$$

$$DDT = 0.0017.NC1.56 \quad (\text{Colombia})$$

La similitud entre las ecuaciones encontradas en México y Brasil puede ser atribuida a la localización similar en términos de latitud, México: 16 a 28° N y Minas Gerais, Brasil: 18 a 22° S. Mientras que la ecuación encontrada en Colombia (2 a 10° N) está más cerca al ecuador, que presenta un comportamiento diferente.

Para el caso colombiano esta ecuación se obtuvo para áreas de 30x30 km<sup>2</sup>, por tanto es una aproximación gruesa

si se requiere diseñar un sistema de protección contra rayos, que generalmente se encuentra en áreas de algunos metros cuadrados; sin embargo esta aproximación es mejor cuando no se tiene dato alguno a disposición.

La distribución geográfica de la Densidad de Descargas a Tierra es, en general, cualitativamente concordante con la distribución climatológica del nivel cerámico. El valor pico medio anual fue estimado por mediciones satelitales en más 80 rayos/km<sup>2</sup>-año en la zona tropical africana en Kamembe, Ruanda, un sitio con un promedio de 221 días tormentosos por año, localizado en una latitud de 1,29° S [17].

En estas latitudes, mediante mediciones satelitales, las Densidades de Descargas a Tierra más altas del mundo fueron encontradas en las regiones tropicales de África y al norte de los andes colombianos [17], en zonas de convergencia como la ZCIT, coincidentes con la hipótesis de Wilson sobre las 3 principales zonas de convección profunda: Suramérica tropical, África y el Continente marítimo (Sureste de Asia y norte de Australia). La tabla 1.6 presenta los 10 sitios de más alta DDT del mundo [17].

### 11. La lógica difusa aplicada a la Densidad de Descargas a Tierra

La lógica difusa se basa en lo relativo de lo observado. En la lógica clásica una proposición sólo admite dos valores: verdadero o falso. Por ello se dice que la lógica usual es bivalente, mientras que la lógica difusa admite además

múltiples valores de verdad<sup>12</sup>. La lógica difusa permite representar de forma matemática conceptos o conjuntos imprecisos, tales como la DDT.

Con base en los conceptos de lógica difusa, Younes [18] propuso la Densidad de Descargas a Tierra difusa, la cual consiste en definir una región difusa  $M$  alrededor de un punto  $c$  de coordenadas  $(C_x, C_y)$  para el cálculo de la densidad en ese punto.

Aunque el valor de la DDT difusa resultante es un número *crisp*<sup>13</sup>, se adoptó el nombre de DDT difusa debido a que se utilizan técnicas difusas para calcularlo.

El método para el cálculo de la DDT difusa parte definiendo  $M$  como un círculo con una frontera difusa mediante la definición de un radio difuso. Luego se trabaja una función de pertenencia  $\mu_{r,R}$  trapezoidal para el radio difuso determinada por un radio menor  $r$  y uno mayor  $R$ , el cual al rotar genera un cono truncado como el mostrado en la figura 12.

El cálculo de la densidad difusa no es más que una estrategia de suavización de los valores de densidad. Como toda técnica de suavizado es posible abusar de ella hasta perder el detalle deseado de los datos originales. En general un suavizado excesivo tiende a homogeneizar los valores. Esto significa adicionalmente una reducción de los valores pico de densidad.

Por otra parte, un suavizado deficiente tampoco permite reconocer los patrones importantes y genera valores pico de densidad más altos.

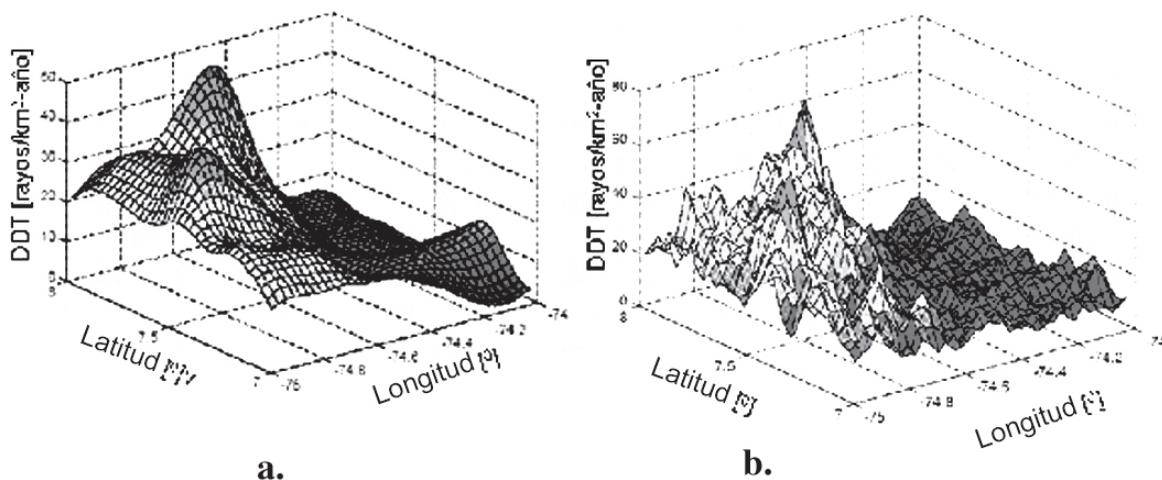


Figura 12. Superficies generadas con datos de: a. densidad difusa y b. densidad concreta (o *crisp*) en la región de mayor DDT en Colombia.

<sup>12</sup> Conocida en la literatura especializada como *lógica multivaluada*.

<sup>13</sup> Sinónimo de valor numérico "tradicional"; se contraponen al valor numérico expresado de acuerdo con la teoría de conjuntos fuzzy, donde al valor numérico se le asocia un grado de pertenencia.

De lo anterior se deduce que los criterios para la selección de los radios interno y externo deben estar ligados al grado de detalle con el que se espera representar el fenómeno.

Como reglas generales se sugiere [18]:

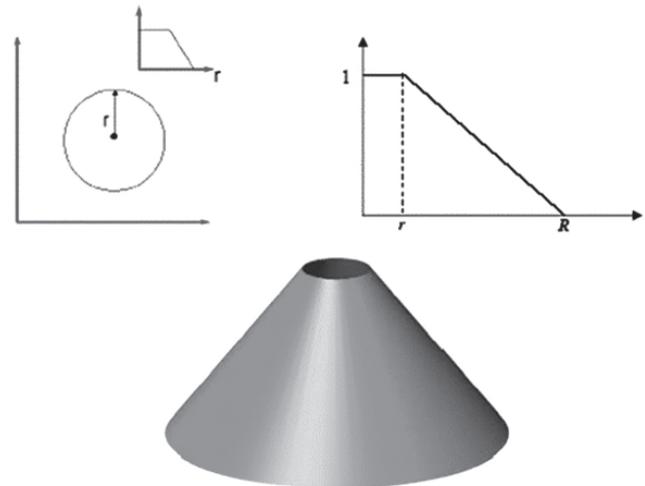
- Seleccionar un radio exterior mayor que la distancia máxima que pueda tener un punto en el plano al punto de la grilla en que se calcula la densidad más cercano a él.
- Seleccionar un radio interno mayor o igual que la exactitud en la localización estimada para el sistema de medición.
- Seleccionar un radio externo menor que el mínimo nivel de detalle que se desee representar.

La razón por la cual se adoptó esta función de pertenencia, tiene que ver con los estudios realizados sobre la exactitud en la localización de los parámetros del rayo, que arrojó resultados cercanos a 3 km. Adicionalmente, los 15 Km. de acción del radio, están relacionados con los parámetros del rayo en sí, donde a más de 15 Km. es poco probable escuchar un trueno, por lo que en ésta área se define el parámetro de nivel cerámico.

Con el fin de mostrar los resultados de aplicar el concepto de densidad difusa se tomaron los datos *crisp* de densidad en el área de mayor actividad de rayos sobre el territorio colombiano, se tomó un cuadrado de 1° de latitud (111.11 Km.) cuyo punto central está ubicado en las coordenadas (-74.5°W, 7.5°N)<sup>14</sup>. La función de pertenencia utilizada fue un trapecio, cuya área asociada es un círculo difuso con radio menor de 3 km y radio mayor de 15 km.

La razón por la cual se utilizaron los valores descritos anteriormente como radio menor y radio mayor está relacionado con la eficiencia en la detección de la red colombiana de medición de rayos, la cual está estimada en 3 Km. [19]. La figura 12 muestra las superficies generadas con los datos de densidad difusa y densidad concreta (o *crisp*). Se puede observar que la figura 12 a representa mucho mejor el fenómeno bajo estudio.

Las superficies generadas con el concepto de densidad difusa es mucho más adecuado, especialmente para problemas de ingeniería, como por ejemplo para la evaluación de riesgo por rayo o el diseño de sistemas de protec-



**Figura 13.** Funciones de pertenencia para el círculo difuso,  $\mu_R(z)$  y  $\mu_M(x, y)$  y como truncado generado por las mismas.

ción contra rayos. Cuando se usa el valor concreto (o *crisp*) de densidad es posible que se sobreestime o se subestime la magnitud del parámetro. Como se puede observar en la figura 12 a, se presentan fuertes variaciones entre puntos cercanos de la grilla, mientras que con el método difuso el comportamiento de la densidad alrededor del punto que se analice es más suavizado.

## 12. Amplitud de la corriente de retorno del rayo

La amplitud de la corriente de retorno del rayo es, frecuentemente referida, como el parámetro más importante para aplicaciones en ingeniería.

La descarga de retorno es la etapa del fenómeno que tiene mayor aplicación en la ingeniería del diseño y protección contra rayos de sistemas eléctricos y electrónicos, ya que presenta las mayores magnitudes de corriente eléctrica entre el centro de carga de la nube y tierra. Además, es el suceso ópticamente más brillante, visible y audible del rayo, donde se produce el mayor calentamiento del canal (aprox. 28.000°C) generando un fuerte gradiente térmico entre éste y el aire que lo circunda, produciendo la onda de choque que normalmente se escucha en una tormenta y que se conoce como trueno. Además, la descarga de retorno tiene un espectro electromagnético típico, el cual es usado en los sistemas de medición y localización.

Al igual que el parámetro DDT, la amplitud de la corriente de retorno del rayo puede ser estimada mediante

<sup>14</sup> La población más cercana a este sitio es la población de Nechí, Departamento de Antioquia, con una DDT estimada con mediciones del sistema colombiano de localización de rayos en áreas de 3x3 km<sup>2</sup> de más de 50 rayos/km<sup>2</sup>-año.

modelos matemáticos en función del campo eléctrico o magnético medido y la distancia o mediante mediciones directas.

El modelo matemático más aceptado por la comunidad internacional es el modelo modificado de línea de transmisión [20]:

$$i(t) = \frac{2\pi cr}{\mu_0 v} B_\varphi \left( \tau + \frac{r}{c} \right) t < t_0$$

Donde:

$\epsilon_0$  : Permitividad del espacio libre [F/m]

$v$  : Velocidad efectiva de la descarga de retorno [m/s]

$c$  : Velocidad de la luz [m/s]

$r$  : Radio de impacto de la descarga [m]

$t, \tau$  : Tiempo [s]

Como la corriente y el campo eléctrico tienen la misma forma de onda durante los primeros microsegundos de la descarga, la ecuación puede emplearse para calcular la corriente a partir de mediciones remotas de campo magnético radiado ( $B_\varphi$ ) o a partir de campo eléctrico a través de la relación

$$\frac{E_z}{B_\varphi} = c$$

A partir de los trabajos experimentales realizados por Rakov [21] con cohetes induciendo rayos, es razonable estimar la corriente de retorno pico del rayo a partir de mediciones de campo eléctrico  $E$  a una distancia  $D$ :

$$I = 1.5 - 0.037 D.E$$

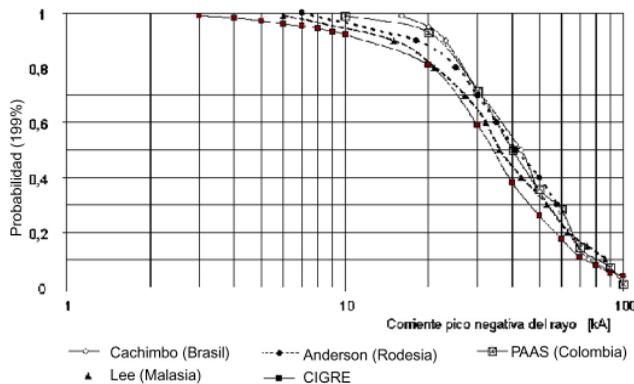


Figura 14. Probabilidad de la corriente de retorno pico de rayo para diferentes latitudes.

### 13. Magnitudes de corriente de retorno del rayo en diferentes latitudes

A partir de los primeras mediciones de magnitud de corriente de rayo realizadas en Europa en la década de 1950, Berger concluye que las medianas obtenidas en el monte San Salvatore en Suiza (30 kA) y en las chimeneas altas en Checoslovaquia (28 kA), son tan cercanas que los rayos incidiendo sobre las torres de televisión de la montaña Suiza pueden ser comparables con los rayos incidiendo en estructuras altas en campo abierto [22].

Las medianas obtenidas en las tres investigaciones son similares, alrededor de 30 kA, y aparentemente se podría concluir que la corriente pico presenta una amplitud similar en diferentes partes de la tierra. Sin embargo, se debe considerar que todas ellas se hicieron en regiones templadas de latitud norte (Checoslovaquia, Suiza e Italia) y ninguna en regiones tropicales.

Los primeros registros de magnitud de corriente de retorno pico de rayo para un área tropical fueron realizados por Lee et al. [23]. Las mediciones se realizaron en Kuala Lumpur, Malasia, por medio del método de antena aérea en campo abierto. En esta investigación se desarrolló un modelo teórico para la obtención de las corrientes de la primera descarga de retorno pico del rayo, a partir de los datos de campo magnético obtenidos; en total se registraron 194 medidas de campo magnético de la primera descarga de retorno presentes en 11 tormentas. Con base en estos datos se estableció la distribución de probabilidad acumulada del valor pico de la corriente de retorno y se obtuvo una probabilidad del 50% de que se presente un valor de corriente pico mayor a 36 kA; así mismo, la rata de ascenso de la corriente, obtenida entre el 10% y el 90% del valor pico, es típicamente entre 4 y 6 kA/ $\mu$ s para esta zona.

Tabla 1.8. Medianas del valor de la corriente de retorno pico del rayo en diferentes zonas del planeta. Adaptado de Lee et. al. [21]

País	Mediana (kA)
Estados Unidos	23
Suiza	30
Suecia	30
Polonia	31
Malasia	36
Brasil (1)	45,3
Rodesia	42
Colombia (2)	42,9

(1) Minas Gerais, Brasil [27]

(2) Valor estimado mediante mediciones de campo eléctrico a menos de 100 km. y aplicando el modelo de línea de transmisión [28]

Posteriormente, Lee et al realizaron una comparación de los resultados obtenidos, con base en la distribución de probabilidad acumulada, de Kuala Lumpur, con mediciones de otras partes del mundo; en la tabla 1.8 se muestran las medianas del valor pico de corriente para estas investigaciones. De acuerdo con esta comparación, Lee et al concluyen que, en general, existe una buena concordancia entre los resultados, aunque las medidas fueron hechas por diferentes métodos. En particular se presenta bastante concordancia entre los resultados obtenidos en Malasia y los obtenidos por Anderson en Rodesia, regiones tropicales con características climáticas y geográficas similares.

Otras investigaciones llevadas a cabo en Estados Unidos, [24], [25], indican que los niveles de corriente pico de retorno de rayo están en el rango de 10 a 40 kA. El valor medio reportado en esta investigación está en el rango de 15 a 20 kA; solo el 6% de las corrientes estaban por encima de 60 kA y menos del 2% por encima de 100 kA. Sin embargo, la magnitud de la rata y de la corriente pico de rayo varía de acuerdo con la localización geográfica como lo sostiene la norma norteamericana [26].

La figura 14 presenta los resultados de probabilidad comparativos entre los valores dados por CIGRE en 1979<sup>15</sup> y adoptados por las normas internacionales como la IEC, de registros tomados en latitudes templadas y los estimados en cuatro países tropicales: Brasil (Estación Cachimbo, Estado de Minas Gerais, 1996 [27]), Rodesia (Anderson, et. al., 1954 [29]), Malasia (Lee, et. al, 1979 [21]) y Colombia (Torres, et. al., 1995 [28]).

Los datos sobre parámetros del rayo presentados en los párrafos anteriores, con base en una rigurosa revisión bibliográfica, muestra los amplios rangos de magnitud que tienen todos y cada uno de ellos. Para propósitos de normalización los comités técnicos nacionales e internacionales deben analizar todos estos estudios, definir y recomendar aquellos que deben ir en la norma.

Sin embargo, una premisa fundamental para definir y recomendar estos parámetros debe ser, además de la rigurosidad científica de las investigaciones, el aspecto temporal de estos, pues en toda actividad de ciencia y tecnología es demostrable que no hay verdades absolutas sino certezas temporales. Un ejemplo de ello han sido, precisamente, los parámetros del rayo medidos por Berger entre la década de 1950 y 1970, que han servido como base para el desarrollo de las grandes investigaciones de

rayos en el mundo y en normalización internacional, que hoy son cuestionados con rigurosidad por mediciones directas de parámetros del rayo [30] en la misma zona templada donde fueron medidos hace 50 años y por mediciones en zona tropical [27], [15]. Para estimar la corriente pico de rayo, Torres et. al [31] realizaron 167 mediciones de campo eléctrico con antenas de placa y el sistema de localización de rayos instalado en Colombia. Los resultados concluyen que existe “evidencia preliminar sobre la magnitud media de la corriente pico de rayo, la cual es mayor en zonas tropicales como Colombia que en otras latitudes. Visacro et. al. [27] encontraron que el valor medio de la corriente pico de rayo (45,3 kA para la primera descarga de retorno y 16 kA para las descargas subsecuentes) son mayores que otros valores en otras referencias internacionales.

### El futuro de la investigación sobre rayos

En el futuro próximo la investigación sobre rayos se concentrará en la predicción de los mismos que permitirán la reducción de riesgos y protección en los diferentes sectores productivos.

Con base en el conocimiento adquirido sobre el fenómeno del rayo, hemos desarrollado recientemente en Colombia, con trabajos de maestría y doctorado, equipos que permiten predecir la actividad con 20 minutos de antelación. Estos equipos y su software implícito se conocen como molinos de campo eléctrico. Actualmente existen 4 redes de molinos de campo eléctrico que se estudian en forma experimental para ofrecer monitoreo y predicción de tormentas en Bogotá, Medellín, Manizales y La Palma – Cundinamarca. Estos sistemas pueden ofrecer predicciones de alta confiabilidad (90%), sin embargo tienen una cobertura relativamente limitada (20 km) y su funcionamiento aún es aislado del de otros sistemas de información. Parte de las soluciones pueden lograrse mediante un mayor estudio de los datos proporcionados por estos sistemas y su integración en algoritmos de seguimiento de tormentas y predicción.

Con base en la medida hecha por los molinos de campo se han desarrollado metodologías de predicción. El principal reto para la operación de estos equipos en Colombia es que los umbrales de campo eléctrico que deben usarse para la predicción varían de una región a otra y con el tipo de tormenta, por tanto, los umbrales entre 1 y 2 kV/m comúnmente recomendados por la literatura deben ser revistos mediante la experimentación.

15 Valores que aún siguen vigentes en todo el mundo, para aplicaciones en ingeniería.

## Referencias

- [1] **Whipple, F.J.W.** "On the association of the diurnal variation of electric potential in the weather with the distribution of thunderstorms over the globe", *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, vol. 55, pp 1-17, 1929.
- [2] **Brooks, C.E.P.** "The distribution of thunderstorms over the globe", *Geophys. Mem. London*, vol 24, pp 147-164, 1925.
- [3] **Gary, C.** "La foudre", Ed. Masson, Paris, pp 208, 1994.
- [4] *Electrical Transmission and distribution reference book*", Westinghouse Electric Corporation, Pennsylvania, USA, pp. 824, 1964.
- [5] **Alexander W.H.** "The Distribution of Thunderstorm in the United States." *Monthly Weather Review*, American Meteorological Society, Vol. 52, No. 7, pp. 337-343, July 1924.
- [6] **Rakov, V., Uman, M.** "Lightning: physics and effects" Cambridge University Press. ISBN 0 521 58327 6. Cambridge, UK 2003.
- [7] **MacGorman, D., Rust, W.** "The Electrical Nature of Storms" Oxford University Press. New York, New York. 1998.
- [8] **Cooray, V.** "The lightning flash" Institution of Electrical Engineers. ISBN: 0-85296-780-2. London, UK. 2003.
- [9] **Schonlad, B.** "Progressive lightning" *IV Proc. Roy. Soc. Lond., A.*, 164. 1938.
- [10] **Kasimir, H.W.** "Qualitative Übersicht über Potential -, Field -, und Ladungsverhältnisse bei einer Blizentladung in der Gewitterwolke" In *das Gewitter*, H. Israel, Akad. Verlags. Ges. Geest and Portig K. -G., Leipzig. 1950.
- [11] **Kasimir, H.W.** "A contribution to the electrostatic theory of a lightning discharge" *J. Geophys. Res.* 65, 643 1873-1878. 1960.
- [12] **Loeb, L.** "The mechanisms of Stepped Leader and Dart Leader in Cloud to Ground Lightning Strokes" *JGR* 71. pp. 4711-4721. 1966.
- [13] **Vargas, F.M.** "Nuevo modelo integral del canal de la descarga eléctrica atmosférica y su enlace con estructuras en tierra" Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2006.
- [14] **Lalande, P., Bondiou-Clergerie, A., Bacchiega, G., Gallimberti, I.** "Observations and modeling of lightning leaders" *C.R. Physique* 3 (2002) pp. 1375-1392. 2002.
- [15] **F. de la Rosa, K. Cummins, L. Deller, G. Diendorfer, A. Galván, J. Husse, V. Larsen, C.A. Nucci, F. Rachidi, V. Rakov, H. Torres and M.A. Uman.** "Characterization of lightning for applications in Electric Power Systems" *Journal Electra - Technical Brochure No. 172, CIGRE WG. 33.01.02*, December 2000.
- [16] **Torres H.** "Ground Flash Density: definition of the appropriate grid size and a proposal of relationship  $N_g$  vs.  $T_d$  for Tropical zones" *Activity Report of TF.C4.01.02-B.* Working Group C4.01 "Lightning". CIGRE Dallas, Tx., USA, September 2003.
- [17] **Christian H. J., et al.** "Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector" *JGR*, vol. 108, no. D1, 4005, 2003.
- [18] **Younes, C.** "Metodologías para la correlación de Parámetros del rayo con características Geográficas y meteorológicas. Caso colombiano" Tesis de doctorado. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, 2006.
- [19] **Younes, C.** "Lightning parameters evaluation in the Colombian highest atmospheric activity zone" *Proc. of ICLP 2004*, 2004.
- [20] **Nucci, Carlo Alberto et al.** "On Lightning Return Stroke Models for LEMP Calculations". *Proceedings 19th ICLP*. Graz: April 1988.
- [21] **Rakov, V.A.** 1992. Data acquired with the LLP lightning locating systems. *Meteor. Hidrol. No. 7*: 105-114.
- [22] **Golde, R.H.** "Lightning Vol. 1: Physics of Lightning" Academic Press. New York, New York. 1977.
- [23] **Lee, S. C. et al.** "Determination of Lightning Current Using Frame Aerials". *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. PAS-98, No. 5, Sept./ Oct. 1979. p. 1669-1675.
- [24] **Key, T. S. and Martzloff, F. D.** "A consensus on powering and grounding sensitive electronic equipment," *IEEE/IAS Annual Conference*, pp. 1-7, Sept. 1986.
- [25] **Lewis, W. W. and Foust, C. M.** "Lightning investigation on transmission lines," *AIEE Transactions*, vol. 64, pp. 107-115, 1945.
- [26] *IEEE Std C62.72 - 2007 "Guide for the Application of Surge-Protective Devices for Low-Voltage (1000 V or Less) AC Power Circuits"*.
- [27] **Visacro, S., Soares, A.** "Statistical analysis of lightning current parameters: Measurements at Morro do Cachimbo station" *JGR*, Vol. 109, D01105. 2004.
- [28] **Loeb, L.** "the kinetic theory of gases", Wiley, New York, 1963.
- [29] **Anderson, R., Eriksson, A.** "Lightning Parameters for Engineering Application" *Electra* No. 69, pp. 65-102, 1980.
- [30] **Diendorfer et. al.** "Statistical of lightning current parameters measurement at the Geisberg Tower", *ILDC*, 2004, Ref 64.2
- [31] **Torres, H., Rondon, D., Briceño, W., Barreto, L.** "Lightning peak current estimation analysis from field measurements in tropical zones", *Proceedings 23rd. ICLP*, Florence, Italy, Sep.1996.
- [32] **F. de la Rosa, K. Cummins, L. Deller, G. Diendorfer, A. Galván, J. Husse, V. Larsen, C.A. Nucci, F. Rachidi, V. Rakov, H. Torres and M.A. Uman.** "Characterization of lightning for applications in Electric Power Systems" *Journal Electra - Technical Brochure No. 172, CIGRE WG. 33.01.02*, December 2000.

Recibido: febrero 10 de 2010.

Aceptado para su publicación: abril 12 de 2010.