

El espacio y el tiempo en los parámetros del rayo

La hipótesis de Wilson, una visión global del fenómeno eléctrico atmosférico

La moderna investigación sobre la física del rayo a principios del siglo XX se basó en los trabajos del físico inglés C. T. R. Wilson, quien fue el primero en sugerir que los rayos eran generadores de tensión, que mantenían una diferencia de potencial entre la superficie de la tierra y la ionosfera.

La hipótesis de Wilson (1920), complementada posteriormente con los trabajos de los físicos Brooks, Whipple, Scrase, Simpson y otros, se muestra esquemáticamente en la figura 1. Hasta ahora, éste es el paradigma científico, aceptado por investigadores de todo el mundo, que mejor describe el comportamiento global del fenómeno del rayo.

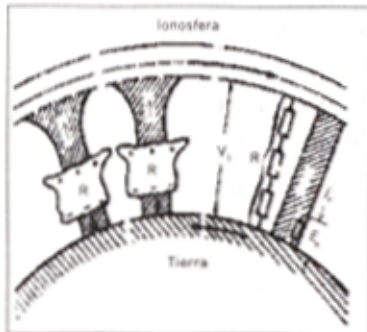


Figura 1. Circuito eléctrico global.

Wilson, con base en mediciones hechas entre 1917 y 1920, formuló su hipótesis, la cual plantea que las descargas eléctricas atmosféricas representan los generadores, en lo que denominó "circuito eléctrico global".

La atmósfera terrestre constituye un aislador eléctrico de muy buena calidad, que se encuentra entre dos muy buenos conductores: la superficie de la tierra en la parte inferior y la ionosfera en la superior. Estas capas son los componentes pasivos del circuito eléctrico global.

Entre la superficie de la tierra y la esfera conductora se forma una tensión (V_1 en la figura 1), la cual conduce una corriente I_{tot} hacia abajo en todas las regiones de buen tiempo¹ de la atmósfera. Las corrientes de tormenta y las corrientes en la restante región de la atmósfera, principalmente en las regiones de buen tiempo, tienden a estar en balance.

¹ Fair - weather, en inglés.

En resumen, y como se muestra en la figura 1, de las partes altas positivas de las nubes de tormenta fluyen corrientes eléctricas, de alrededor de un amperio por tormenta, dirigidas hacia arriba, y retornan a la tierra por las regiones de buen tiempo de la atmósfera. La hipótesis de Wilson tiene mucho de científico, como lo son sus soportes, aunque no ha sido fácil probarla cuantitativamente.

El valor que describe exactamente las condiciones reales del circuito eléctrico global es la diferencia de potencial eléctrico entre la ionosfera y la tierra, conocido comúnmente en la literatura especializada como "potencial eléctrico ionosférico", o simplemente potencial ionosférico, PI.

El físico inglés Whipple (1929) comparó las mediciones de las variaciones diurnas de campo eléctrico hechas por el físico Brooks (1925) con las variaciones diurnas de campo eléctrico realizadas sobre los océanos, y encontró que *la contribución al circuito eléctrico global está dominada por una superposición de efectos de las tres mayores zonas de convección profunda tropical del planeta: Suramérica tropical, centro de África y el continente marítimo (sureste de Asia y Australia).*

Hasta el presente, la mayor parte de la información disponible sobre las características y magnitudes de los parámetros de la descarga eléctrica atmosférica está basada en estudios e investigaciones realizados en zonas semitropicales y templadas, pero, lamentablemente, muy pocos en zonas tropicales.

Sin embargo, es interesante anotar las innumerables investigaciones científicas que se desarrollaron y aún hoy en día se desarrollan a partir de la hipótesis de C. T. R. Wilson sobre el circuito eléctrico global. Se destacan, entre otras muchas, las mediciones de los parámetros del circuito global: corrientes por encima de las nubes de tormenta, número de generadores, corrientes por debajo de las nubes de tormenta, corrientes verticales de buen tiempo, resistencia vertical y potencial ionosférico.

La investigación sobre la caracterización de las descargas eléctricas atmosféricas en zona tropical, que hemos desarrollado en Colombia desde principios de 1982, se fundamenta en los principios de Whipple (1929), Gish y Wait (1950), quienes

trabajaron la hipótesis de distribución no homogénea del circuito eléctrico global.

Se verán a continuación los valores de los parámetros del circuito eléctrico global que han sido medidos o estimados por diferentes investigadores durante el siglo XX y las relaciones encontradas con otros parámetros meteorológicos, tanto a nivel mundial como en nuestra investigación en Colombia, no sólo en el marco de la teoría circuito eléctrico global, sino en el de la teoría del cambio climático global.

Corrientes sobre nubes de tormenta

Apenas existen unas pocas mediciones de la magnitud de la corriente por encima del área total de una nube de tormenta, hechas por Vonnegut *et al.* (1966), Gish y Wait (1950), Stergis, Rein y Kangas (1957) e Imyanitov (1967). Ellos presentan corrientes entre 0.1 y 6 amperios, con un valor promedio entre 0.5 y 1 amperio por celda² de tormenta.

Infortunada, no se conocen mediciones que permitan inferir la influencia de la latitud geográfica sobre estas magnitudes de corriente. Por tanto, los cálculos que en adelante se presentan se basan en los valores indicados en el párrafo anterior. Además, no se puede saber si la corriente promedio es modificada como resultado de las diferentes alturas de la base de la nube o por la frecuencia de las descargas a tierra. Así mismo, algunas observaciones indican que existen muchas tormentas sobre Suramérica, India y África Central que presentan una polaridad inversa.

Número de generadores

Aunque el número de rayos n que se presentan simultáneamente sobre la tierra es incierto, algunos investigadores como Brooks (1925), Whipple (1929) y Krumm (1962) estimaron un valor entre 1500 y 1800.

² Se entiende por celda una región atmosférica con una superficie límite en dirección horizontal, en la cual ocurren todos los procesos básicos de una tormenta eléctrica atmosférica.

De este número estimado de descargas simultáneas y el valor promedio de la magnitud de la corriente en una celda de tormenta, resulta el valor de la corriente global promedio, en amperios:

$$I_{Tot} = n.i = 750 - 1800 \quad (1)$$

Hasta la fecha estos valores siguen siendo aceptados por la comunidad científica internacional.

Corriente vertical de buen tiempo

El valor de la corriente total I_{tot} también puede ser calculado mediante la integración de la densidad de corriente vertical j_v (figura 1), medible sobre regiones de buen tiempo. Se estiman valores de 1×10^{-12} A/m² para regiones habitadas e industrializadas y de 2 a 4×10^{-12} A/m² para regiones con vegetación y desérticas. Con estos valores promedio se obtiene una corriente total de 300 amperios para áreas continentales. Buis (1967) ha obtenido una corriente menor de 220 amperios para los continentes.

El valor para los océanos es incierto pues existen muy pocos valores medidos. Los valores generalmente aceptados han sido calculados por Kraakevik (1961) en 2.5×10^{-12} A/m² para el Pacífico y 1.6×10^{-12} A/m² para el Atlántico. El decrecimiento del valor en zonas habitadas e industrializadas puede deberse a un incremento de la polución del aire sobre los océanos y también al efecto electrodo, el cual tuvo que ser tenido en cuenta en la determinación de la densidad de corriente vertical j_v , del campo y de la conductividad. Con un valor promedio de 2×10^{-12} A/m² se obtiene una corriente total sobre la superficie del mar de 750 amperios.

Un factor despreciado en todas las estimaciones conocidas es la corriente vertical sobre altas montañas. La resistencia vertical R_c sobre esta parte de la tierra es mucho menor que sobre tierra plana. Es posible entonces que una parte considerable de la corriente vertical global fluya en las montañas. Una estimación hecha por Muehleisen (1977) lleva a un valor alrededor del 20%.

Resistencia vertical

Otro parámetro del circuito eléctrico global es la resistencia vertical, R_c (figura 2). Es posible calcular este valor a partir de los valores promedio de la conductividad atmosférica $\Gamma(h)$, dependiente de la altitud h :

$$R_c = \int_0^{\infty} \frac{1}{\Gamma(h)} dh \quad (2)$$



Figura 2. Resistencia vertical del circuito global.

y obtener de los valores de conductividad de Gish (1944), un valor de $R_c = 1.3 \times 10^{17} \Omega m^2$, variable con el tiempo y el espacio. La parte principal de la resistencia vertical está localizada en la zona más baja de la atmósfera (véase figura 2) y es fuertemente dependiente de las condiciones del tiempo atmosférico y de la polución de la atmósfera.

Con todas las resistencias verticales sobre el globo terráqueo, es posible estimar un valor para la resistencia global R en todas las regiones de buen tiempo, junto con las regiones nubosas sin precipitación, $R = 230 \Omega$. Si se tienen en cuenta las altas montañas se puede estimar un valor de 200Ω , pero de todas maneras es difícil dar un valor exacto.

Potencial ionosférico, PI

El valor del potencial ionosférico, PI , que se presenta entre la ionosfera y la superficie de la tierra (alrededor de 100 km de altitud), puede entonces ser estimado usando los valores de la resistencia global R y la corriente total I_{tot} , la cual puede variar entre 800 y 1800 A:

$$PI = R \times I_{tot} = 230 \Omega \times 800 \text{ A} = 184 \text{ kv}$$

$$PI = R \times I_{tot} = 230 \Omega \times 1800 \text{ A} = 414 \text{ kv}$$

Este valor puede ser estimado por dos diferentes métodos:

- Midiendo el campo eléctrico vertical, $E(h)$, e integrándolo en la altitud:

$$PI = \int_0^{\infty} E(h) dh \quad (3)$$

Aplicando esta ecuación con mediciones de radiosonda se obtuvieron valores promedio de 15 años de 240 kv en Wissenau (suroeste de Alemania).

• Midiendo la conductividad atmosférica como función de la altitud y midiendo la densidad de corriente aire - tierra j_v en la misma área; esto es:

$$PI = j_v \int_0^{\infty} \frac{1}{\Gamma(h)} dh = j_v R_c \quad (4)$$

Es necesario que las condiciones de las mediciones sean lo más homogéneas en el área.

En la figura 3 se presentan diferentes variaciones del potencial ionosférico y del campo eléctrico sobre el océano. La figura 4 indica la distribución de frecuencia de los valores de potencial ionosférico medidos durante un período de 11 años y la variación diaria promedio.

El potencial fue determinado por integración del campo eléctrico en la altitud, como se mencionó anteriormente. Las mediciones de PI y campo fueron hechas por Mühleisen (1970) mediante elevación de globos aerostáticos de radiosonda.

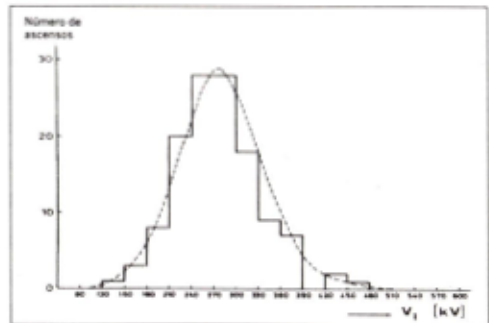


Figura 3. Potencial ionosférico y campo eléctrico.

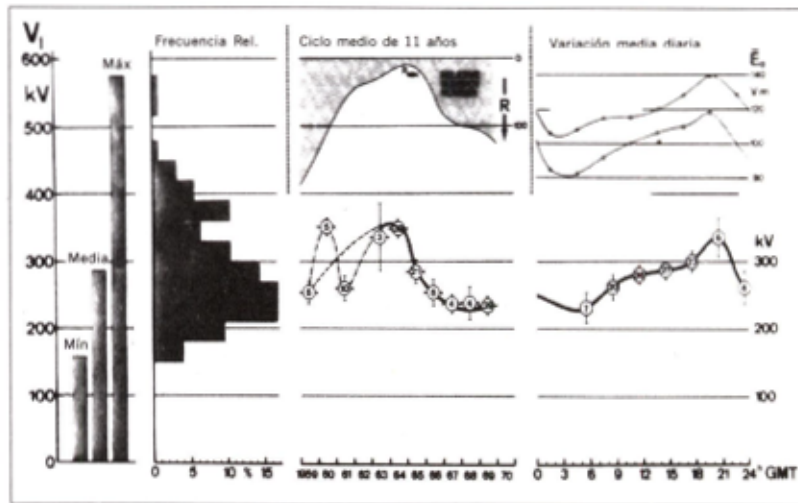


Figura 4. Potencial ionosférico medido.

Para 356 elevaciones, el valor de potencial mínimo fue de 145 kv, el promedio 278 kv y el máximo 608 kv. La variación diaria del potencial ionosférico corresponde exactamente con la variación diaria del campo eléctrico sobre los océanos. Hoy en día la variación diaria del potencial, como del campo eléctrico sobre los océanos, es un hecho confirmado.

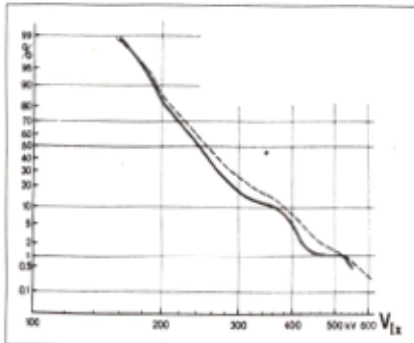


Figura 5. Frecuencia acumulada del potencial ionosférico.

En la figura 5 se presenta la distribución de frecuencia acumulada del potencial ionosférico. Sus resultados presentan una distribución cercana a una distribución log-normal con un valor medio $PI_{med} = 240$ kv.

En la figura 3 se puede observar fácilmente que existe una relación muy cercana entre el potencial ionosférico y el campo eléctrico oceánico. Por tanto se puede llegar a la conclusión de que se necesitaría medir solamente la variación del campo eléctrico

E , en vez de llevar a cabo costosos ascensos de globos aerostáticos. Sin embargo, se debe tener en cuenta que esta relación no existe para un simple par de valores. Una relación constante entre PI y E significa que la resistencia vertical sobre la estación de medición permanece constante. Esta condición es controlada por factores meteorológicos y por esfuerzos de ionización; ambos pueden variar y entonces habría una pequeña ayuda, que sería encontrar lugares que reúnan aquellas condiciones, quizás en altas montañas o en océanos o regiones árticas.

Como se afirmó anteriormente, no existen mediciones del potencial ionosférico en latitudes cercanas al ecuador terrestre que permitan inferir la influencia de la latitud sobre este parámetro. Resulta por tanto conveniente para el mejor entendimiento científico del fenómeno de la descarga, llevar a cabo mediciones del potencial ionosférico en Colombia, teniendo en cuenta que se tiene la herramienta básica para su medición, cual es la Estación Meteorológica de Radiosonda en el Aeropuerto Eldorado de Bogotá. Existen también otras estaciones similares en Colombia que opera actualmente el Ideam³ y que pueden ser utilizadas para estas mediciones. Una alternativa a la anterior propuesta sería llevar a cabo mediciones de campo eléctrico sobre altas montañas.

La medición y el análisis espacio-temporal del potencial ionosférico en diferentes épocas del año y en los diferentes sitios del país le ofrecería a la comunidad científica internacional la posibilidad de conocer la influencia de la latitud

3 Anteriormente, Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras, Himat.

sobre uno de los principales parámetros del circuito eléctrico global y así mismo la influencia sobre el cambio climático global.

Investigaciones recientes en latitudes tropicales (Williams *et al.*, 1991) han mostrado que la rata de rayos está influida por pequeños cambios en la temperatura de bulbo húmedo de la capa de aire circundante. En este estudio se concluyó tentativamente que el potencial ionosférico podría estar sensiblemente afectado por el cambio de temperatura global, estando el circuito global controlado por la actividad de rayos. El resultado de este estudio sugiere que la descarga corona⁴, más que la descarga eléctrica atmosférica, ejerce el control dominante.

Un trabajo de investigación espacio-temporal, complementario al propuesto en los párrafos anteriores, sobre la correlación entre la actividad de rayos y la temperatura de bulbo húmedo en regiones del país que se han identificado como de alta incidencia de rayos y para diferentes épocas del año, podría dar luces científicas sobre la alta actividad de rayos en sitios específicos de Colombia, como por ejemplo en las estribaciones de la cordillera Central en los alrededores de la población de Cerromatoso, El Bagre, Nechí, Magdalena Medio alrededor de las poblaciones de Norcasia y Samaná (Caldas) y Muzo (Boyacá) y zonas de la Sierra Nevada de Santa Marta y la Serranía del Perijá, entre otras.

El tiempo meteorológico global

La formación de una descarga eléctrica atmosférica implica el desarrollo de un proceso de cambios dinámicos en las condiciones atmosféricas, tanto a nivel global como local.

El funcionamiento global de la máquina atmosférica del planeta Tierra establece algunas de las condiciones generales necesarias para la presentación de las tormentas eléctricas y, por consiguiente, permite definir algunos de los mecanismos que son responsables del fenómeno a un nivel de macro escala. Sin embargo, es evidente que para una adecuada caracterización de las descargas eléctricas atmosféricas a nivel local es necesario conocer los procesos que, a un nivel de meso o micro escala, inciden en la presentación de las mismas.

Dentro de este marco de referencia espacial, global-local, se presenta a continuación un resumen de los estudios realizados por diferentes investigadores sobre el tiempo meteorológico, de tal forma que permita al lector tener una referencia general para adentrarnos luego en el análisis de la relación circuito eléctrico global - cambio climático global.

⁴ Point discharge, en inglés.

El estudio del tiempo meteorológico en las zonas tropicales requiere considerar la interacción entre las partes de la atmósfera situadas a diferentes latitudes y, por consiguiente, los movimientos que ocurren en la misma a gran escala. Dichos movimientos constituyen la circulación global.

La circulación global es el mecanismo mediante el cual se establece el flujo de aire a nivel planetario, debido a los intercambios de energía en la atmósfera y al desequilibrio existente entre la radiación recibida en latitudes bajas y latitudes altas. La tierra y la atmósfera absorben más calor en los trópicos del que radian al espacio, mientras que en latitudes altas emiten más calor al espacio del que reciben. El balance calorífico se alcanza, entonces, mediante el flujo de calor de los trópicos hacia los polos.

Este intercambio de calor implica el movimiento de grandes masas de aire en la atmósfera y, aunque en principio el flujo se produce en la dirección norte-sur, la rotación de la Tierra provoca grandes variaciones en el mismo, de tal forma que se establecen diversos mecanismos de circulación y condiciones climáticas de acuerdo con la latitud, debido a las diferentes velocidades de rotación alrededor del eje terrestre.

Para explicar la circulación global, investigadores en geofísica⁵ establecieron un modelo de tres celdas convectivas, delimitadas latitudinalmente, cuyo comportamiento e interrelación definen las zonas climáticas de la Tierra, según se muestra en la figura 6.

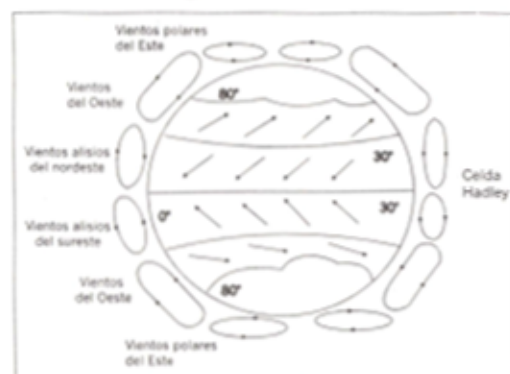


Figura 6. Modelo de circulación global.

La celda ecuatorial de Hadley está ubicada aproximadamente entre los 30° de latitud norte y 30° de latitud sur, y su funcionamiento se explica como un sistema convectivo simple, en el cual el aire caliente asciende en los trópicos y se dirige hacia latitudes altas, en las cuales desciende y entrega su calor; en tanto que el aire frío desciende en las regiones de latitudes medias y se dirige superficialmente hacia el ecuador, donde recibe calor y asciende, conformándose así el ciclo.

Las corrientes de aire que se desplazan hacia el ecuador desde los dos hemisferios, forman los conocidos vientos alisios, que van desde una región de movimien-

⁵ F. Lutgens, E. Tarbuck, *Atmosphere, an introduction to meteorology*, Prentice Hall, 1979.

to rotacional más lento a una región de movimiento más rápido, por lo que tienen una componente hacia el este. Se habla entonces de vientos alisios del noreste y vientos alisios del sudeste.

Estos vientos provenientes de los cinturones de altas presiones subtropicales se desplazan hacia una zona de bajas presiones, formando así lo que se conoce en meteorología como zona de confluencia intertropical, ZCIT. Ésta se caracteriza por una agitada actividad atmosférica, debido a que las corrientes de aire que provienen de direcciones diferentes provocan movimientos ascendentes que van acompañados de la formación de nubes, frecuentemente de desarrollo vertical y precipitaciones.

Un aspecto importante es el desplazamiento a que está sometida la ZCIT. En los primeros meses del año, la ZCIT se encuentra en su posición más meridional (aproximadamente 5° de latitud sur) y alcanza su posición más septentrional hacia el mes de julio (aproximadamente 12° de latitud norte). Este desplazamiento caracteriza en gran medida el comportamiento meteorológico estacional de las regiones que cubre, llegando a producir en muchos lugares del cinturón ecuatorial dos estaciones secas y dos estaciones de lluvia.

El mapa de la figura 7 muestra uno de los resultados de los trabajos sobre la caracterización espacial y temporal de la actividad eléctrica atmosférica en Colombia. Se representa esquemáticamente el desplazamiento de la ZCIT sobre Colombia, de acuerdo con el comportamiento mensual multianual (1974-1988) de estaciones meteorológicas ubicadas a lo largo de la geografía colombiana.

Es así como, por ejemplo, el comportamiento temporal de la actividad eléctrica atmosférica de las estaciones de Santa Marta y Cartagena, situadas al norte de Colombia, se caracteriza por ser monomodal, con máximas de actividad en los meses de julio y agosto, cuando la ZCIT se encuentra en su posición más septentrional. La es-

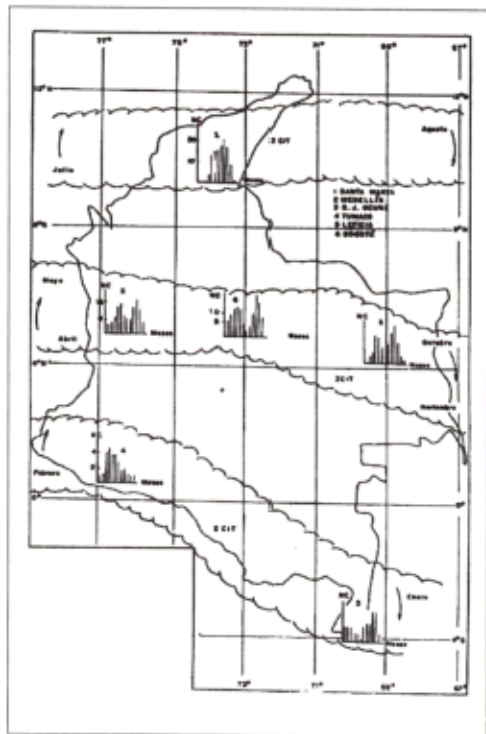


Figura 7. Desplazamiento de la ZCIT sobre el territorio colombiano.

tación meteorológica de Tumaco, por ejemplo, situada al suroccidente de Colombia, se caracteriza por un comportamiento monomodal, con tendencia creciente de actividad eléctrica atmosférica durante los meses de febrero, marzo y abril, cuando la ZCIT se encuentra en su posición más meridional.

Manizales, Bogotá y Neiva, estaciones meteorológicas ubicadas en la región centro-andina de Colombia, presentan un comportamiento bimodal, con máximas de actividad eléctrica atmosférica durante los meses abril-mayo, octubre-noviembre, cuando la ZCIT se encuentra en posiciones intermedias, produciendo a su paso el tiempo atmosférico asociado a ella. Es importante insistir en que los fenómenos meteorológicos que ocurren en un punto específico de la zona están fuertemente influidos por las condiciones locales existentes.

Relación entre el circuito eléctrico global y el cambio climático global

Observaciones y resultados de modelos sugieren que la atmósfera de la Tierra se está calentando. En el concepto de geofísicos como el profesor Earle Williams de la Universidad MIT, Estados Unidos, los cambios de temperatura son pequeños, décimas de grados Celsius en décadas. El calentamiento reportado en una escala absoluta de temperatura es sólo un porcentaje de unas pocas decenas. Por estas razones, un objetivo que vale la pena en la investigación del cambio global es la identificación de parámetros físicos mensurables, los cuales son dependientes, no linealmente, de los cambios en la temperatura atmosférica; de esta manera se podría tener alguna ganancia en la medición del calentamiento global. El potencial ionosférico es una de estas variables, y está asociado con la electrificación de las nubes, las cuales a su vez están controladas por fluctuaciones del equilibrio hidrostático, que es causado por diferencias de temperatura del orden de unos pocos grados Celsius.

De acuerdo con la hipótesis del circuito global de Wilson, la diferencia de potencial de 250 kilovoltios entre la superficie de la Tierra y la atmósfera conductiva superior (ionosfera) se mantiene por la actividad mundial de tormentas eléctricas, con una influencia predominante de la convección profunda tropical.

La convección profunda⁶, que es de gran importancia tanto en la generación de carga para el circuito eléctrico global como en la generación de calor para la celda de Hadley, se origina en el fenómeno de inestabilidad condicional del aire.

⁶ Deep Convection, en inglés; véase definición en el anexo 4.

La fuente de energía necesaria para el desarrollo de este proceso es la energía potencial convectiva disponible, CAPE⁷, una cantidad primero conceptualizada por Margules en 1905, pero definida por Moncrieff y Miller en 1976. Diferentes procedimientos se han sugerido para evaluar la CAPE, dependiendo de ciertas consideraciones termodinámicas y microfísicas. Observaciones de muchas estaciones en los trópicos permiten inferir una relación aproximadamente lineal entre la CAPE y la temperatura de bulbo húmedo, tal como se muestra en las figuras 8 a), b), c) y d).

Con base en resultados empíricos, Williams (1991) definió de manera aproximada la siguiente relación:

$$CAPE = C_1 \cdot (\theta_w - \theta_{wc}) \quad (5)$$

Donde C es la pendiente de la curvas y θ_{wc} es la temperatura a la cual la CAPE es nula (valor umbral). El desarrollo de la inestabilidad condicional requiere valores positivos de la CAPE, y en general está confinado a áreas terrestres. Por consiguiente, la temperatura de bulbo húmedo θ_{wc} puede ser utilizada como una medida aproximada de la energía potencial convectiva disponible, CAPE.

Los experimentos de campo realizados por Williams en Darwin (Australia) en 1990, han demostrado una sensitiva dependencia de la actividad de descargas eléctricas atmosféricas con la temperatura de bulbo húmedo θ_{wc} , medida sobre la superficie, y la CAPE. El análisis de las mediciones de temperatura de bulbo húmedo y actividad de rayos nube - tierra e intranubes muestran que en la estación seca en Darwin (mayo - octubre) es menor que el valor umbral θ_{wc} , y por consiguiente no se observa convección profunda ni actividad eléctrica atmosférica. En la estación húmeda, el valor umbral es excedido, y por tanto se presenta actividad convectiva y eléctrica. Estos resultados son funda-

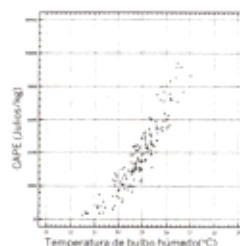


Figura 8. a) CAPE, vs. temperatura de bulbo húmedo para Darwin (Australia).

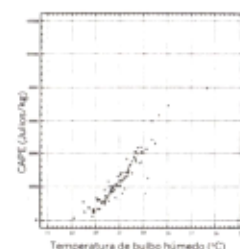


Figura 8. b) CAPE, vs. temperatura de bulbo húmedo para Belem (Brasil).

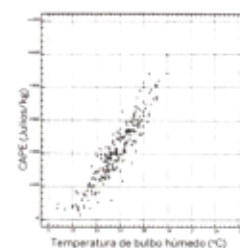


Figura 8. c) CAPE, vs. temperatura de bulbo húmedo para el Océano Atlántico.

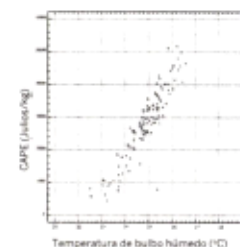


Figura 8. d) CAPE, vs. temperatura de bulbo húmedo para el Océano Pacífico.

⁷ Convective Available Potential Energy, en inglés.

mentales para sugerir el uso del potencial ionosférico como una herramienta de diagnóstico para el cambio global.

Para cuantificar la relación no lineal entre la actividad eléctrica atmosférica y la temperatura de bulbo húmedo, se asume que el umbral para la CAPE en la atmósfera tropical es también un umbral para la actividad eléctrica atmosférica y presenta la siguiente relación:

$$L = C_2 \cdot (\theta_w - \theta_{wc})^P \quad (6)$$

donde

L = el número total de descargas eléctricas atmosféricas

C_2 = una constante de proporcionalidad

El valor del exponente P es tal, que variaciones pequeñas en θ_{wc} se reflejan en incrementos significativos de L . Adicionalmente, cambios pequeños en θ_{wc} , la CAPE y la velocidad vertical de la masa de aire conllevan cambios grandes en la cantidad de hielo condensado en la nube, que es esencial para la separación activa de carga y el desarrollo de la actividad eléctrica atmosférica.

Para los experimentos en Darwin se obtuvieron incrementos de dos órdenes de magnitud en la actividad eléctrica atmosférica para una variación de 3 a 4°C. El exponente P para este caso fue de 7.5. El mapa de la climatología global de promedios máximos de temperatura de bulbo húmedo para los meses de enero y julio, que aparecen en las figuras 9 a) y b) presentan una considerable concordancia con mapas globales de actividad eléctrica atmosférica, como por ejemplo los meses enero y julio de 1996, tomados de las observaciones satelitales de la NASA y presentados en la figuras 10 a) y b).

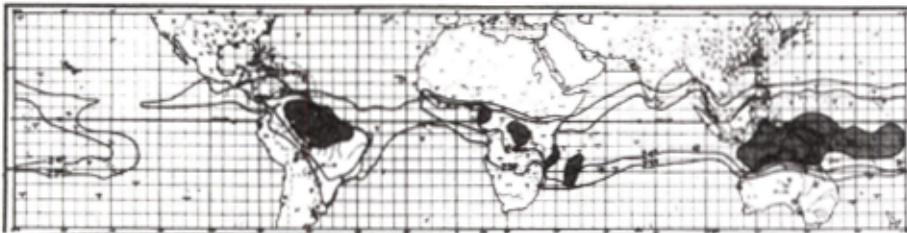


Figura 9.a) Promedio máximo global de temperatura de bulbo húmedo - enero. Adaptado de E. Williams and N. Renno (1993).

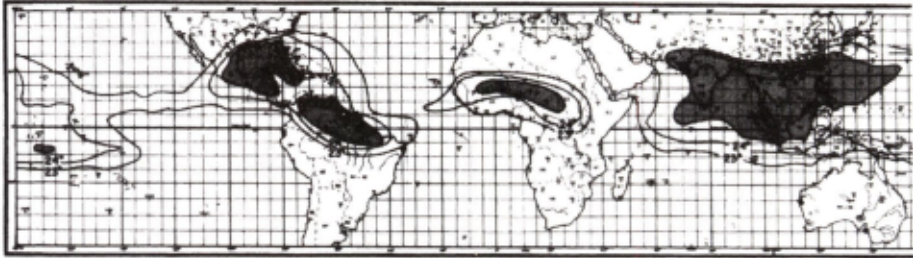


Figura 9.b) Promedio máximo global de temperatura de bulbo húmedo julio. Adaptado de E. Williams and N. Renno (1993).

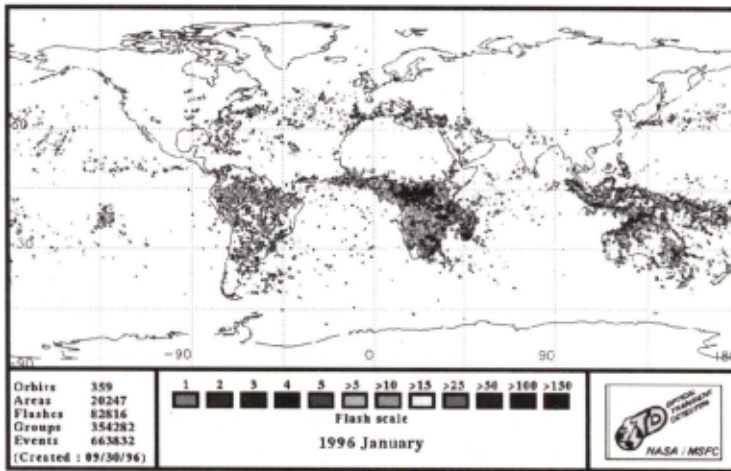


Figura 10.a) Observaciones satelitales de la NASA, enero de 1996. Tomado de www.msfc.nasa.gov

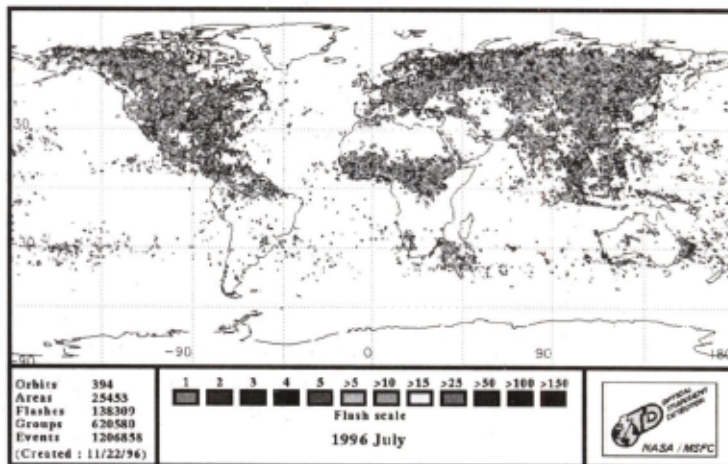


Figura 10.b) Observaciones satelitales de la NASA, julio de 1996. Tomado de www.msfc.nasa.gov

Veamos ahora cómo el potencial ionosférico es afectado por la actividad global de descargas eléctricas atmosféricas, y cómo la fluctuación atmosférica (cuantificada por la CAPE y θ_w) es influida por el calentamiento global.

La contribución de la tormenta individual al PI está generalmente dada por la corriente de conducción (corriente causada por iones) en el tope de la nube y una superposición de la corriente de rayo nube - tierra, la descarga corona y la corriente de precipitación a nivel de tierra.

Mediciones hechas en 1989 por Blakeslee *et al.* muestran que la corriente de Conducción se incrementa linealmente con la rata de aumento del total de descargas eléctricas atmosféricas. En 1989, Koshak y Krider encontraron que la transferencia de carga a tierra debida a una descarga nube-tierra era independiente de la rata de descargas. Si la rata de descargas nube-tierra se incrementa linealmente con la rata de descargas totales, entonces la carga negativa transferida a tierra por la actividad de descargas eléctricas será lineal con la rata de descargas; infortunadamente no hay más información disponible para contribuciones de otras corrientes al circuito global. Basado en lo anterior, Williams concluye que el PI se incrementará monótonicamente con la rata global de descargas eléctricas atmosféricas. Entonces asume que:

$$PI = C_3 \cdot L \quad (7)$$

Donde L es el número de descargas eléctricas totales y C_3 una constante de proporcionalidad.

La segunda relación se refiere al efecto del calentamiento global sobre el incremento de la CAPE en la atmósfera tropical. Observaciones hechas por Angell en 1986 y Karoly en 1990 sugieren que el calentamiento ocurrirá no sobre la superficie, sino a lo largo de la troposfera, con un enfriamiento en la estratosfera. Si el calentamiento es uniforme en la troposfera, es viable calcular:

$$\left. \frac{d(CAPE)}{d\theta_w} \right\}_{\substack{\text{calentamiento} \\ \text{uniforme}}} \quad (8)$$

Para comparación con:

$$\left. \frac{d(CAPE)}{d\theta_w} \right\}_{\substack{\text{calentamiento} \\ \text{superficial}}} \quad (9)$$

Lo cual es esencialmente la pendiente C_1 en la ecuación (5), si se asume que el calentamiento de la superficie con temperatura de bulbo seco es igual al calenta-

miento de la superficie con temperatura de bulbo húmedo. Asumiendo que la fluctuación (medida con la CAPE) es el elemento principal para la electrificación, se pueden combinar las ecuaciones (5) y (8) para estimar la sensibilidad del PI a un calentamiento uniforme de la troposfera tropical:

$$\frac{1}{PI} \cdot \frac{dPI}{dT} = \frac{P}{CAPE} \cdot \frac{d(CAPE)}{dT} \quad (10)$$

Evaluaciones de P usando conteo de descargas eléctricas atmosféricas y datos de temperatura de bulbo húmedo en varias estaciones tropicales, presentan valores entre 2 y 8. Además Williams hizo una evaluación numérica de la ecuación (10), encontrando variaciones entre 20% y 80% en el potencial ionosférico por 1°C de calentamiento uniforme.

Modelamiento temporal del fenómeno eléctrico atmosférico: Una visión local del fenómeno

El modelamiento del clima es un proceso complejo, debido a la naturaleza no lineal y aleatoria de relaciones entre los factores que intervienen y a la cantidad de ellos que se involucran en los modelos climatológicos. Sobre la base de consideraciones climatológicas, la información disponible en Colombia de datos confiables de variables meteorológicas y los análisis de cambio climático global, se examinaron las siguientes cuatro variables:

- Número de días mensuales de precipitación (días con lluvia superior o igual a 0.1 mm)
- Número de días tormentosos mes (días en los cuales un trueno es oído y un relámpago visto)
- Número de horas mensuales de brillo solar
- Temperatura promedio mensual de bulbo seco

La zona de estudio escogida fue la Sabana de Bogotá (latitud: 04° 43' N; longitud: 74° 09' W; altitud: 2547 m) y el período comprendido entre enero de 1972 y diciembre de 1990.

La justificación para la escogencia de las variables meteorológicas es la siguiente:

- En el mundo de la meteorología existen muchas creencias tanto a nivel popular como científico. Una de ellas se refiere al arquetipo de que a una intensa tempestad⁸ en los trópicos, corresponde una intensa tormenta⁹. Con el propósito de objetivar esta creencia, tomamos el parámetro de precipitación para correlacionarlo matemáticamente con el número de días tormentosos-mes.
- La radiación solar es la fuente primaria de los procesos atmosféricos de intercambio de calor, movimiento de masas de aire y generación de carga eléctrica para el circuito eléctrico global. Adicionalmente, el calentamiento de las capas bajas de la atmósfera y la interacción entre nubes y radiación solar incidente contribuye directamente al desarrollo de la inestabilidad condicional. Por esto, la serie de tiempo de brillo solar fue incluida en el análisis multivariado.
- Como se explicó en los párrafos anteriores, la inestabilidad condicional del aire origina el fenómeno de convección profunda tropical, que incide en la formación de la descarga eléctrica atmosférica y depende de la energía potencial convectiva disponible CAPE, la cual está influida por la temperatura del medio ambiente. Si bien la relación entre descargas eléctricas atmosféricas y temperatura es la correspondiente a temperatura de bulbo húmedo, escogimos la temperatura de bulbo seco por la disponibilidad de datos confiables y número de años que nos permitiera hacer correlación con los otros parámetros.

En las figuras 11 a 14 se presenta el promedio multianual mensual de las variables estudiadas, que revela un desarrollo estacional bimodal, propio de la estación meteorológica ubicada en la zona central andina de Colombia. Los meses de actividad eléctrica atmosférica pico (abril y octubre) coinciden en las observaciones con altos valores de precipitación y temperatura y bajos valores de brillo solar. Esta actividad concuerda con la presencia de la zona de confluencia intertropical en esta área.

El fenómeno climatológico de la actividad eléctrica atmosférica tiene un desarrollo estocástico tal, que se hace necesario utilizar modelos probabilísticos para obtener una adecuada caracterización; para ello se desarrolló la construcción de un modelo estocástico para series de tiempo discretas. Para el análisis de las series de tiempo multivariadas se utilizaron modelos de vectores autorregresivos (VAR) para representar un proceso homogéneo no estacionario, de acuerdo con la aproximación de Box - Tiao y siguiendo los criterios de construcción de modelos para series de tiempo, descritos en Box - Jenkins.

8 *Rainstorm*, en inglés.

9 Descarga eléctrica atmosférica.

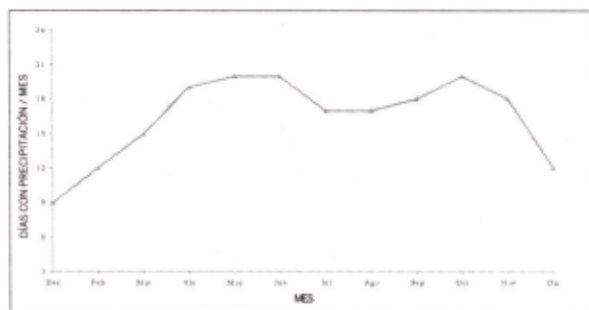


Figura 11. Promedio multianual mensual de días con precipitación.

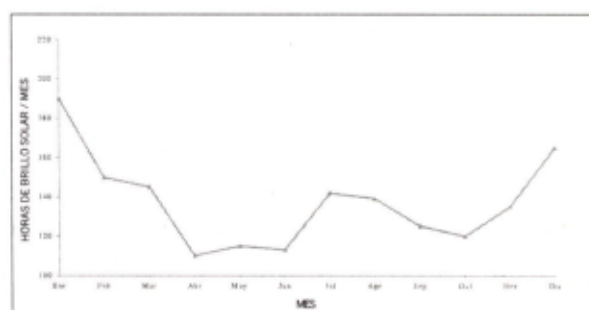


Figura 12. Promedio multianual mensual de horas de brillo solar.

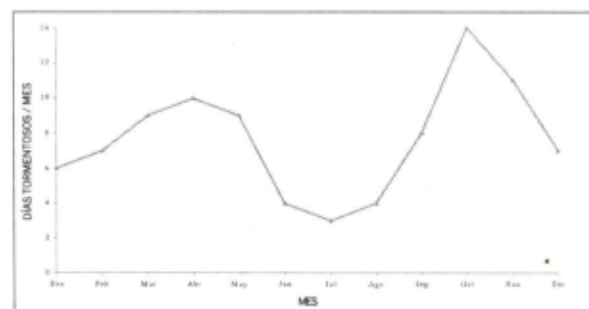


Figura 13. Promedio multianual mensual de días tormentosos-mes.

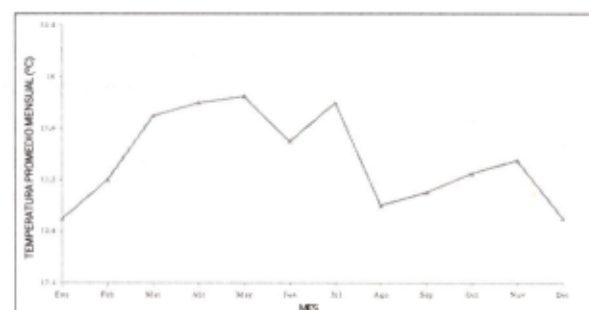


Figura 14. Promedio multianual mensual de temperatura de bulbo seco.

La especificación general del modelo usado fue de la forma:

$$\varphi_p(B).(1-B)^d Z_t = a_t \quad (11)$$

donde:

φ_p = Polinomio matricial autorregresivo en B de orden p

B = Operador de cambio hacia atrás

$(1-B)^d$ = Diferenciación de orden d que reduce la serie múltiple no estacionaria a una serie estacionaria

Z_t = Vector k , dimensional de series de tiempo múltiples

a_t = Sucesión vectorial de perturbaciones aleatorias idénticas, independientes y normalmente distribuidas con media cero y matriz de covarianza \mathcal{E} .

En la tabla 1 se presenta la matriz de correlación muestral para las series de tiempo múltiple analizadas. Ella revela una correlación significativa entre precipitación y brillo solar (69%); entre precipitación y número de días tormentosos año (44%) y entre brillo solar y número de días tormentosos (-26%). Por otra parte, la correlación de estas tres variables con la temperatura media es apenas significativa con respecto al error estándar; estimado éste como $\frac{1}{\sqrt{n}}$ donde n es el número de observaciones, que para este caso fue de 228 y por tanto el error es 0.066.

Tabla 1.
Matriz de correlación muestral para las series de tiempo múltiple analizadas.

	Precipitación	Brillo solar	Días tormentosos-mes	Temperatura
Precipitación	1.00	-0.69	0.44	0.15
Brillo solar	-0.69	1.00	-0.26	0.18
Días tormentosos-mes	0.44	-0.26	1.00	0.10
Temperatura	0.15	-0.18	0.10	1.00

El pronóstico fue empleado como una herramienta de validación del modelo. La predicción presenta una prueba de bondad de ajuste en el sentido de que ella revela si el modelo reproduce de forma adecuada las características más representativas del comportamiento de las series, como pueden ser la tendencia, la estacionalidad y la ciclicidad.

Las figuras 15 a 18 muestran la comparación del promedio mensual multianual y pronóstico para el año 1991, para cada una de las series. Puede observarse en ellas que el modelo reproduce con exactitud el comportamiento estacional característico de las mismas, resaltando que representa en forma clara tanto los máximos como

los mínimos de cada una de las variables dentro del horizonte de pronóstico. En particular el modelo caracteriza los meses de mayor actividad eléctrica atmosférica, representada aquí por la serie de número de días tormentosos-año, y con él se obtuvo una adecuada descripción del comportamiento inverso de la serie de brillo solar y el comportamiento proporcional de las series de precipitación y temperatura.

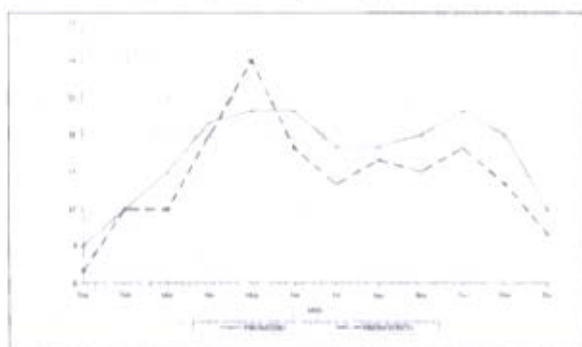


Figura 15. Promedio mensual multi-anual y pronóstico de días con precipitación.

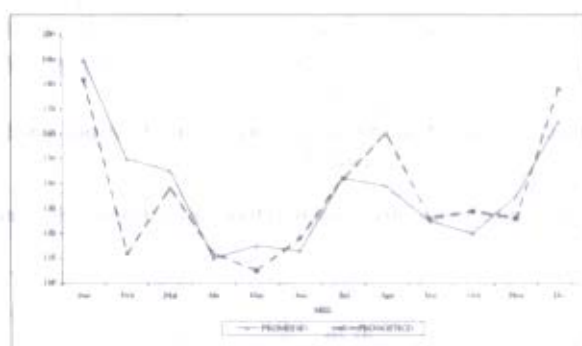


Figura 16. Promedio mensual multi-anual y pronóstico de horas de brillo solar.

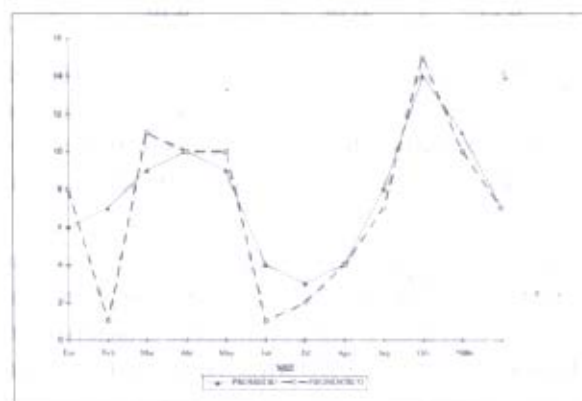


Figura 17. Promedio mensual multi-anual y pronóstico de días tormentosos-mes.

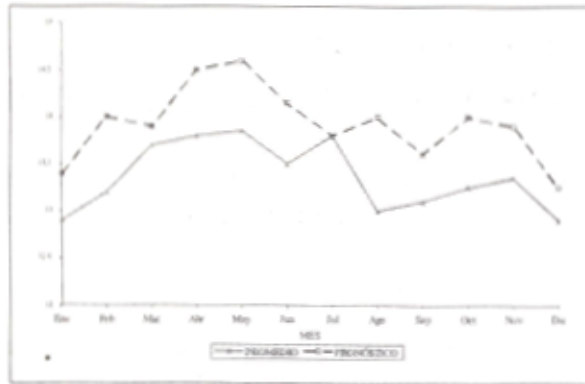


Figura 18. Promedio mensual multiannual y pronóstico de temperatura de bulbo seco.

La matriz de correlación muestral del vector de series revela la existencia de relaciones contemporáneas entre las variables estudiadas, siendo especialmente significativos los coeficientes de correlación estimados entre las series de precipitación y brillo solar y de precipitación y número de días tormentosos. Por otra parte, los coeficientes de correlación muestral entre la temperatura media mensual y las demás variables fueron apenas significativos. Esto no significa que deba ser descartada la influencia de la temperatura en el comportamiento de la actividad eléctrica atmosférica, pues debe tenerse en cuenta que los datos empleados en el estudio representan un promedio mensual de temperatura de bulbo seco. Hace falta aún trabajar la serie de temperatura de bulbo húmedo con el fin de obtener mayor significancia estadística y establecer un mejor grado de correlación con la serie de días tormentosos.

Si bien el estudio mostró la existencia de una correlación contemporánea muy significativa entre las series analizadas, esto no constituye evidencia de una relación causa- efecto entre las mismas, ya que puede existir correlación sin que haya causalidad.

Variación local diaria de la electrificación de las nubes

Matemáticamente la variación global diaria $G(\tau)$ puede ser escrita como la convolución de una función espacio-temporal:

$$G(\tau) = \int_0^{2\pi} S(\phi) \cdot T(\tau - \phi) d\phi \quad (12)$$

donde $S(\phi)$ es la probabilidad de una fuente climática como función de la longitud (función del espacio solamente) y $\tau - \phi$ es la variación local diaria de la fuente climática perturbada¹⁰. El tiempo universal es tal que $\tau - \phi$ es el tiempo local, donde 1 hora es 15° de longitud. En realidad, T dependerá tanto del espacio como de la hora local, pero en los cálculos sucesivos, usando la ecuación (12) se asumirá solamente dependiente del tiempo.

La ecuación (12) fue la usada por Whipple en 1929 en su análisis del circuito global, pero los datos que él usó para las funciones T y S fueron estadísticas de truenos día, datos muy poco conocidos en aquella época para los océanos del mundo. Gracias a las observaciones satelitales, hoy en día es posible conocer las contribuciones de las descargas eléctricas atmosféricas al circuito global.

La función $G(\tau)$ ha sido identificada históricamente en la literatura de la geofísica como la curva de Carnegie. Esta curva de 24 horas, que se muestra en la figura 19, representa la variación promedio del gradiente de potencial superficial sobre los océanos del mundo, basada en miles de mediciones individuales, las cuales son tabuladas en el Instituto Carnegie en USA. Mediciones del PI durante el curso del día, hechas por Markson en 1976 presentan una evidencia convincente de que el PI sigue muy de cerca la curva de Carnegie.

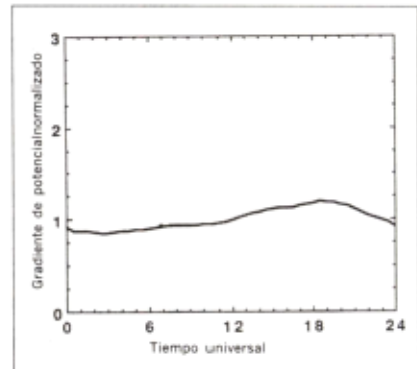


Figura 19. Curva de Carnegie

Por tanto, la curva de Carnegie como PI son representaciones cuantitativas de la variación diaria de la carga eléctrica negativa sobre la tierra.

¹⁰ Las fuentes climáticas perturbadas por considerar son las descargas nube - tierra, corriente de descarga corona (*point discharge current*) y lluvia.

Observaciones satelitales globales de actividad eléctrica atmosférica han permitido estimar la función para los doce meses del año, divididos en las cuatro estaciones.

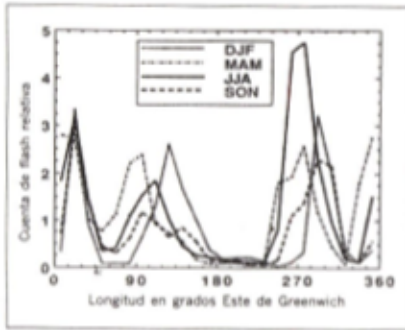


Figura 20. Variación longitudinal mensual de la actividad de rayos.

La figura 20 fue obtenida por Orville y Henderson en 1986 mediante datos de satélite integrados en latitud. Los tres mayores picos en longitud están asociados con las mayores zonas de convección profunda tropical: Suramérica tropical, África, sureste de Asia y Australia. Colombia está localizada aproximadamente entre los 280° y 295° de longitud al Este de Greenwich, lo cual nos muestra su importancia como región tropical de convección profunda y, por ende, de alta actividad eléctrica atmosférica.

Las observaciones de Orville y Henderson muestran claramente que la contribución oceánica a la actividad de rayos es entre 5 y 10 veces menor que sobre áreas continentales. La mínima actividad de rayos en los océanos presentada en la figura 20 reafirman la suposición de Whipple en el sentido de que las áreas continentales son más prolíficas en actividad eléctrica atmosférica que los océanos.

En las evaluaciones de la contribución de rayos al circuito global es mucho más apropiado considerar la variación tropical diaria de las descargas nube-tierra. Las figuras 21, 22 y 23 presentan los resultados de la variación diaria de descargas eléctricas atmosféricas para Bogotá, Medellín y Cali, respectivamente, usando como fuente climática las descargas nube-tierra para un período de 21 años (1974-1995) mediante observaciones en estaciones meteorológicas y sistemas de localización de rayos (LLP 420 y LPATS).

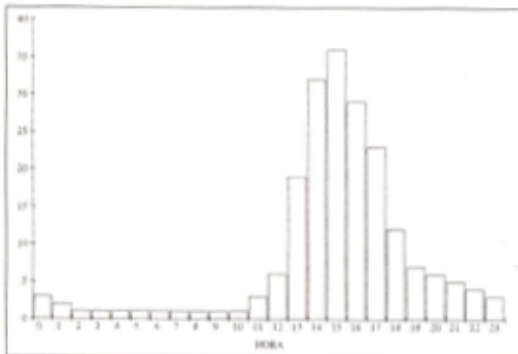


Figura 21. Hora de presentación de rayos - Bogotá, promedio multianual 1974-1995.

Estas variaciones son coincidentes con la curva de Carnegie y resultados de otras longitudes terrestres. Las curvas presentan en general un máximo en el rango entre 15:00 y 16:00 hora local y un ancho medio de 6 horas. La tabla 2 presenta un resumen de la variación local diaria para diferentes sitios de la tierra.

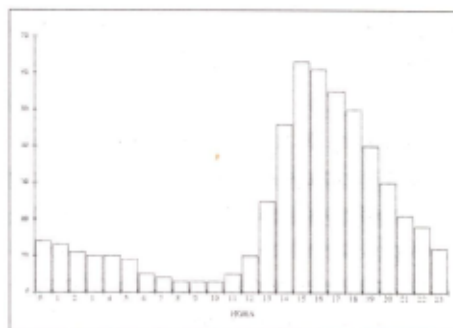


Figura 22. Hora de presentación de rayos - Cali, promedio multianual 1974-1995.

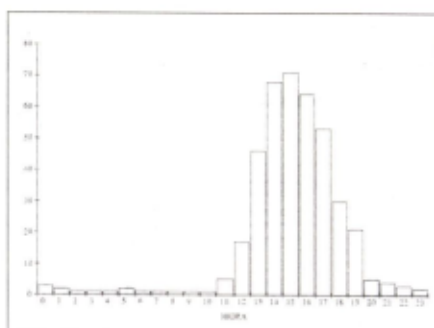


Figura 23. Hora de presentación de rayos - Medellín, promedio multianual 1974-1995.

Tabla 2.
Variación local diaria para diferentes sitios de la tierra
(adaptado de Williams, 1991).

Investigador	Parámetro	Localización	Hora de máxima actividad
Nicholl	Trueno	Sierra Leona (África)	17:30
Maier <i>et al.</i>	Descargas nube-tierra	Sur de Florida (USA)	17:30
López y Holle	Descargas nube-tierra	Centro de Florida (USA)	15:30
Williams <i>et al.</i>	Descargas nube-tierra	Alabama (USA)	16:00
Oladiran <i>et al.</i>	Descargas nube-tierra	Nigeria (África)	18:00
Richard	Descargas totales	Guayana francesa (Suramérica)	15:30
Williams	Descargas nube-tierra	Darwin (Australia)	17:00
Torres <i>et al.</i>	Descargas nube-tierra	Bogotá, Cali, Medellín (Colombia)	15:30

Sin embargo, hemos encontrado que en algunas regiones colombianas, como por ejemplo en el Magdalena Medio (aproximadamente 5° de Latitud Norte y 75° Longitud Oeste), las nubes se forman en el curso de la mañana bajo la acción de la radiación solar y dan al anochecer y al amanecer precipitaciones acompañadas de descargas eléctricas atmosféricas, como se muestra en la figura 24.

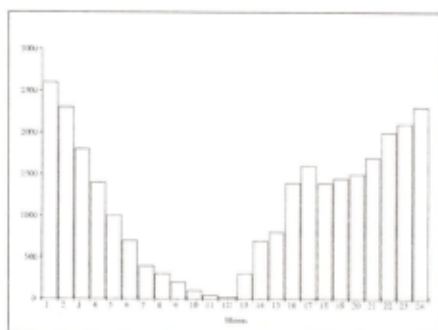


Figura 24. Hora de presentación de rayos en el Magdalena Medio. Período 1992 - 1993.

Las nubes ejercen un efecto amortiguador en el intercambio de calor entre la tierra, la atmósfera y el espacio exterior, tal que su presencia disminuye el enfriamiento por la radiación de la superficie terrestre y de la capa de aire que se encuentra debajo de la base de la nube. Este hecho, unido al fenómeno de enfriamiento que experimentan las partes altas de las nubes al emitir radiación durante la noche, incrementa el gradiente térmico vertical. De esta forma, puede presentarse un ascenso adicional de franjas de aire que contribuye al desarrollo vertical de las nubes. Este proceso puede ser el responsable de la formación de las tormentas nocturnas.

Referencias

- Angell, J. K., "Annual and seasonal global temperature changes in the troposphere and low stratosphere 1960 - 1985", *Mon. Wea. Rev.*, 114, 1922-1930, 1986.
- Barreto, L., Enciso, L., "Estudio de las descargas eléctricas atmosféricas mediante series de tiempo multivariadas", Santa Fe de Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Eléctrica, tesis de pregrado, 1992.
- Berger, K., "Summary about Duration of flashes, Stroke intervals, No-current intervals", report CIGRE, Stuttgart, 1970.
- Blakeslee, R. J., et al., "Electrical measurements over thunderstorms", *J.G.R.*, 94, 13135-13140, 1989.
- Box, G., Jenkins, G., "Time series analysis, Forecasting and Control", Holden Day, San Francisco, USA, 1976.
- Box, G., Tiao, G., "Modeling multiple time series with application" *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 76, No. 376, 1981, pp. 802-816.
- Brooks, C. E. P., *Met. Office, Geophys. Mem.* Vol. 3, 1925, p. 145.
- Buis, P. M., *Nature*, Vol. 216, 1967, p. 360.
- Dolezalek, H., "Electrical Processes in Atmospheres", Steinkopf, Darmstadt, 1974.
- Gish, O. H., *Terr. Magn.* Vol. 49, 1944, p. 159.
- Gish, O. H., Wait, G. R., *Journal of Geophysical Research*, Vol. 55, 1950, p. 473.
- Golde R. H., *Lightning*. Vol. 1, Academic Press, 1977.
- Gribbin, J., *El clima futuro*, Barcelona, Salvat Editores S.A., 1986.

- Karoly, D. J., "Greenhouse climate change fingerprint detection", Center for Dynamical Meteorology, Monash University, 1990, pp. 49-60.
- Koshak, P., Krider, E., "Analysis of lightning field changes during active Florida thunderstorm", *Journal of Geophysical Research*, 94, 1989, pp. 1165-1186.
- Lutgens, F., Tarbuck, E., *Atmosphere, an introduction to meteorology*, Prentice Hall, 1979.
- Markson, R., "Ionospheric potential variations obtained from aircraft measurements of potential gradient" *Journal of Geophysical Research*, Vol. 81, 1976, pp. 1980-1990.
- Markson, R., "Tropical convection, Ionospheric potentials, and global circuit variation", *Nature*, Vol. 320, 1986, p. 588.
- Marshall, T. C., *et al.*, "Overview of Balloon Electric Field Soundings through Convective Regions of Thunderstorms" 3rd International Workshop on Physics of Lightning IWPL, Saint Jean de Luz, France, 1997.
- Mauchly, S.J., "Studies in atmospheric electricity based on observations made on the Carnegie 1915-1921", *Researches of Terr. Magn.*, Carnegie Institution V, Washington DC, USA, 1926, pp. 385-424.
- McEachron, K. B., "Lightning to the Empire State Building", *J. Franklin Inst.*, Vol. 227, 1939, pp. 149-217.
- Medina, M., *Iniciación a la meteorología*, Barcelona, Salvat Editores S.A., 1986.
- Moncrieff, M., Miller, M., "The dynamics and simulation of Tropical cumulonimbus and squall lines", *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol. 102, 1976, p.p 373-394.
- Mühleisen, R. *et al.*, "Luftelektrische Messungen auf dem meer", *Meteor*, Vol. 45, Berlín, 1970.
- Ogawa, T. and Brook, M., "Charge distribution in thunderstorm clouds", *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, Vol. 95, 1969, p. 513.
- Orville, R., Henderson, R., "Global Distribution of midnight lightning", *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 114, 1986, pp. 2640-2653.
- Retallack, B. J., "Compendio de apuntes para la formación de personal meteorológico", OMM, 1991.
- Riehl, H., *Tropical Meteorology*, McGraw-Hill, 1954.
- Stergis, C. G., Rein, C., Kangas, T. J., *Atm. Terr. Phys.*, Vol. 11, 1957, p. 83.
- Torres, H., "Espacio y tiempo en los parámetros del rayo", trabajo de promoción a profesor titular, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1998.

- Torres, H., Barreto, L., "Estimate of Ground Flash Density and Lightning Peak Current with one Station Direction Finder", *Int. Lightn. Det. Conf.*, Tucson, Az., Feb. 1995.
- Torres, H., Barreto, L., "Multiple Time Series in Tropical Lightning Research", *Proceeding ICLP 23*, Sep. 1994, Budapest, Hungary.
- Torres, H., Castaño, O., *El Rayo*, Santa Fe de Bogotá, Editorial Icontec, 1994.
- Uman, M., "The Lightning Discharge", Academic Press, 1987, p. 13.
- Vonnegut, B., "Some facts and speculations concerning the origin and role of thunderstorm electricity", *Met. Monogr.*, 5, 1963, pp. 224-241.
- Vonnegut, B., et al., *J. Atm. Sci.* Vol. 6, 1966, p. 764.
- 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, 1929, pp. 1-17.
- Williams E. R., Comunicación personal, 1993-1996.
- Williams, E. et al., "The Local Diurnal Variation of Cloud Electrification and the Global Diurnal Variation of Negative Charge on the Earth", MIT, MA 02139, Submitted to JFR, August 1991.
- Williams, E. R., "Global circuit response to seasonal variations in global surface air temperatures", *Mon. Wea. Rev.*, 1994.
- Williams, E. R. et al., "A Radar and Electrical Study of Tropical Hot Towers", *Journal of Atm. Sc.*, 1991.
- Williams, E., et al., "An Analysis of the Conditional Instability of the Tropical Atmosphere", *Monthly Weather Review*, Vol. 121, No. 1, January 1993, pp. 21-36.
- Williams, E., et al., "Conditional Instability, Tropical Lightning, Ionospheric Potential, and Global Change", Center for Meteorology and Physical Oceanography, Cambridge, MA 02139, MIT, USA, 1991.
- Williams, E., Renno, N., "An Analysis of the Conditional Instability of the Tropical Atmosphere" *Monthly Weather Review*, Vol. 121, No. 1, January 1993.
- Wilson, C. T. R., "Investigations on lightning discharges and on the electric field of thunderstorms", *Phil. Trans. R. Soc.*, Vol. A221, 1920, p. 73.
- Wilson, C. T. R., "On some determinations of the sign and magnitude of electric discharges in lightning flashes", *Proc. Roy. Soc.*, Vol. A92, 1916, Capítulo 4, pp. 555-574.

Los parámetros del rayo

Introducción

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, 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.

Hipótesis de variación espacial y temporal de los parámetros del rayo

El objetivo principal de abarcar este tema es presentar de una manera integral a la comunidad académica nacional e internacional la hipótesis de investigación y sus aplicaciones en ingeniería, acerca de la variación espacial y temporal en la magnitud de los parámetros del rayo.

La hipótesis ha estado implícita en todos los trabajos realizados dentro del Programa de investigación PAAS¹. La hipótesis se

¹ El "Programa de investigación en adquisición y análisis de señales, PAAS", del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de Colombia, reconocido por Colciencias como Grupo Excelencia 1997-1998, desarrolla varios proyectos de investigación y tesis de pre y posgrado en el campo de las señales electromagnéticas y meteorológicas. Uno de los proyectos de investigación del Programa PAAS es el de la "Caracterización espacio-temporal de las descargas eléctricas atmosféricas en zona tropical".

fundamenta en los principios científicos planteados por C. T. R. Wilson en 1920 y Whipple en 1929, presentados en el capítulo anterior, 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: Suramérica tropical, centro de África y el continente marítimo (sureste 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 mayor parte de la información disponible sobre las características y magnitudes de los rayos está basada en estudios llevados a cabo en zonas semitropicales o templadas², 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 ceráuneo, 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 varían global y localmente.

En el idioma inglés existe una diferencia entre los conceptos *climate*³ y *weather*⁴, que dependen 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

2 Me refiero a zonas con clima caracterizado por cambios bien definidos en las estaciones. El rango representativo de latitudes asociado con este tipo de clima se extiende desde los 25° de latitud N o S hasta los 50° de latitud N o S.

3 Clima, en español.

4 Tiempo atmosférico, en español.

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 períodos de tiempo en sitios geográficos específicos. Las subdisciplinas de la climatología pueden trabajar a 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 el clima en un campo individual o alrededor de una edificación particular. Un microclima puede extenderse horizontalmente desde menos de un 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, éstos usualmente comparten una componente fisiográfica similar. Es así como, por ejemplo, estados vecinos en grandes planicies como en Estados Unidos 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, sólo 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 especializada⁵ como en las nor-

5 R. Anderson, A. Eriksson, "Lightning Parameters for Engineering Application" *Electra* No. 69, 1980, pp. 65-102.

mas internacionales⁶, 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 subtropical, pero, para propósitos de aplicaciones en ingeniería (escala local), los efectos orográficos locales⁷ y posiblemente la geología del lugar, pueden desempeñar 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 electromagnéticamente⁸ 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 British Standard BS 6651: 1992 Sección 3.2.1; IEC 1024 - 1, Part 1, Guide A.

⁷ Véase anexo A.

⁸ La compatibilidad electromagnética (EMC, por sus siglas en inglés) se define como la capacidad de un equipo o sistema eléctrico o electrónico para operar satisfactoriamente en un entorno electromagnético.

La práctica en ingeniería

Típicamente, más de 2000 tormentas están activas alrededor del globo terráqueo en un momento dado, produciendo aproximadamente 100 descargas por segundo. Debido a que nuestra sociedad es cada día más dependiente de los equipos de cómputo, de las redes de energía eléctrica, de las redes de información y, en general, de los equipos eléctricos y electrónicos, el diseño y la protección de éstos contra perturbaciones electromagnéticas se hacen esenciales.

Para lograr un eficaz, económico y confiable funcionamiento de tales equipos, es necesario incrementar el conocimiento del entorno electromagnético, en especial el conocimiento de las descargas eléctricas atmosféricas, para saber cuándo, dónde, cómo y por qué ocurren.

Los rayos son la causa más significativa de las perturbaciones en los modernos sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica en el mundo. En los Estados Unidos, por ejemplo, los rayos representan el 57% de las causas de fallas en las líneas de transmisión. En Japón, los rayos causaron entre el 60 y 70% de las salidas de las líneas de transmisión entre 1966 y 1988. Para Dinamarca, las causas de salidas de los sistemas de transmisión de energía eléctrica son comparables con las de los Estados Unidos.

En Colombia, los rayos causaron el 47% (1996) y el 69% (1997) de las salidas de las líneas de transmisión de 230 y 500 kV, de acuerdo con la correlación hecha entre el Centro Nacional de Despacho de Interconexión Eléctrica S.A. ESP - ISA y los datos del Sistema de Información Descargas, de propiedad de ISA.

Para los sistemas de transmisión de energía eléctrica, las interrupciones del servicio traen consecuencias directas como baja confiabilidad y calidad del servicio, y costos de millones de dólares por quema de equipos y no venta de energía. Así mismo, los equipos y sistemas basados en microelectrónica (televisores, teléfonos, equipos de comunicación, etc.) son fuertemente afectados por las interferencias electromagnéticas⁹, originadas por la incidencia de variaciones de campos electromagnéticos generados por rayos.

Ha sido práctica usual de la ingeniería eléctrica, a nivel de diseño de protecciones y apantallamiento contra descargas eléctricas atmosféricas, utilizar parámetros como el nivel ceráuneo, la densidad de rayos a tierra o la corriente de retorno del rayo, mediante valores determinísticos o semiprobables. Para estos diseños en Co-

⁹ La interferencia electromagnética (EMI, por sus siglas en inglés) se define como cualquier perturbación electromagnética que se manifiesta en la degradación de la operación, el mal funcionamiento o la falla del equipo eléctrico o electrónico.

lombia, nuestros resultados le permiten al ingeniero utilizar valores de curvas de probabilidad acumulada, propios de nuestro entorno tropical, que tienen en cuenta la aleatoriedad del fenómeno y su variación local.

En el diseño de protección de sistemas de distribución de energía eléctrica con descargadores de sobretensión, por ejemplo, la práctica de ingeniería considera valores de normas internacionales o normas técnicas colombianas que no reflejan la realidad del entorno electromagnético tropical colombiano en cuanto a magnitud de parámetros del rayo y su variación en el espacio y en el tiempo.

En la Norma Técnica Colombiana de Protección contra Rayos de 1998, elaborada en conjunto con el Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Icontec, se han introducido conceptos básicos y valores de parámetros propios del entorno tropical colombiano, para aplicaciones en la protección de seres vivos, equipos y sistemas eléctricos y electrónicos contra descargas eléctricas atmosféricas.

El diseño de transformadores de distribución tiene en cuenta, para la escogencia del nivel de aislamiento de los devanados, valores de parámetros del rayo que se basan en mediciones realizadas en latitudes no tropicales. El proyecto de investigación que iniciamos en marzo de 1998¹⁰ desarrolló un prototipo de transformador de distribución apropiado, óptimo y compatible para las condiciones electromagnéticas del entorno tropical, con base en la hipótesis de investigación planteada en este capítulo.

La operación y el mantenimiento de sistemas y equipo eléctrico en Colombia en muy pocas ocasiones tienen en cuenta la variación diaria, mensual o multianual de la actividad eléctrica atmosférica, presentándose altos riesgos de accidentalidad por rayos. En contratos con empresas petroleras multinacionales que laboran en Colombia, hemos introducido estos conceptos en diseños y manuales de seguridad personal durante tormentas eléctricas, lográndose de esta forma mitigar la accidentalidad por rayos en zonas de perforación.

Para aplicaciones en el planeamiento y diseño de protección contra rayos en Colombia, hemos desarrollado el concepto "nivel de riesgo por rayos", el cual permite definir zonas de compatibilidad electromagnética¹¹ y evaluar espacialmente, mediante mapas regionales o locales, el riesgo que tiene un sitio debido a la actividad eléctrica atmosférica, para personas, semovientes, estructuras o equipos.

10 "Diseño y construcción de transformadores de distribución apropiados y óptimos para zona tropical-Proyecto Illapa", proyecto cofinanciado por Colciencias - Banco Interamericano de Desarrollo, BID, Empresa de Energía de Bogotá, EEB, Siemens y la Universidad Nacional de Colombia.

11 Se define zona de compatibilidad electromagnética como aquella dentro de la cual se ubican equipos o sistemas diseñados para las mismas condiciones electromagnéticas. El mapa de riesgo por rayos para el estudio de fallas de transformadores, presentado en el capítulo 6 de este libro, es un ejemplo de aplicación.

En resumen, por razones de confiabilidad, economía y seguridad, es decir, calidad de la energía eléctrica, y basados en la hipótesis planteada, es recomendable que la magnitud de los parámetros de la descarga eléctrica atmosférica estimados en latitudes Norte¹² no sean directamente aplicados, sin beneficio de inventario, a diseños de protección contra rayos en zonas tropicales¹³.

Parámetros del rayo para aplicaciones en ingeniería

El WG 33.01 "*Lightning*" del Comité Cigre presentó en 1979 la información actualizada sobre los parámetros del rayo, con énfasis particular en aquellos parámetros requeridos para aplicaciones en ingeniería. En el año 2000¹⁴ se aprobó en el mismo comité Cigre considerar las variaciones espaciales y temporales que han sido explicadas en el capítulo anterior. Por conveniencia en el mejor entendimiento del parámetro, se coloca entre paréntesis el correspondiente nombre en inglés, y para una fácil referenciación posterior, una sigla al frente.

Estos parámetros fueron divididos en tres grupos:

a) Parámetros de incidencia, en los cuales se tiene en cuenta la probabilidad de ocurrencia de las descargas a tierra, junto con la influencia de la altura de las estructuras y la incidencia de descargas múltiples:

- Densidad de descargas a tierra DDT (*Ground Flash Density, GFD*): número de rayos por kilómetro cuadrado - año.
- Nivel ceráuneo, NC (*Keraunic Level, TD*): número de días tormentosos¹⁵ al año. Este parámetro es utilizado cuando no hay disponibilidad de mediciones directas de densidad de descargas a tierra.
- Polaridad del rayo, P (*Flash Polarity*): positiva o negativa.
- Multiplicidad, M (*Multiple stroke flashes*): número de descargas individuales (*strokes*) por cada descarga (*flash*).
- Duración de la descarga eléctrica atmosférica.
- Duración del intervalo entre descargas individuales.

12 Como Estados Unidos o Europa y presentados en normas internacionales como la IEC o IEEE.

13 Como Colombia, México, Brasil, Venezuela, Centroamérica, Camerún, Nigeria, Zaire, Filipinas o Sri Lanka.

14 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", *Technical Brochure* No. 172, Cigre WG. 33.01.02, December 2000.

15 Un día tormentoso es aquel en el que por lo menos se escucha un trueno.

b) Parámetro de amplitud de la corriente de retorno del rayo, CR (*Lightning Peak Current Amplitude*): frecuentemente referenciada como el parámetro más importante para aplicaciones en ingeniería.

c) Parámetros de la forma del impulso de la corriente de rayo (*Stroke Current Impulse Shape*): en los cuales se tienen en cuenta las características dependientes del tiempo, con énfasis en las características de la rata de ascenso de la corriente del rayo, RAI (*Lightning Current Rate of Rise*).

A continuación se analizan estos parámetros, dentro de una perspectiva espacio-temporal. De estos parámetros se tienen en Colombia, en el caso de nivel ceráuneo, más de 20 años de observaciones, y en los otros, mediciones hechas durante la última década. Con base en el análisis es posible plantear que los valores de probabilidad en zona tropical terrestre difieren respecto a las medidas en latitudes norte o sur.

Aunque el parámetro campo eléctrico vertical radiado no se considera dentro de los parámetros de aplicación en ingeniería, su medición y análisis permiten determinar la polaridad, la magnitud y la rata de ascenso de la corriente de retorno del rayo, así como la forma de onda de todas las demás componentes de una descarga a tierra.

Nivel ceráuneo, NC

Varios siglos antes de Cristo, la cultura caldea de Babilonia desarrolló un sistema de predicción de clima que incluía el conteo de truenos. Se tiene conocimiento de que en la Europa medieval hubo gente que rescató la práctica caldea y creó 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 (IMC¹⁶), reunido en Viena, adoptó una unidad que denominó "Día con trueno oído"¹⁷, 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"¹⁸.

16 International Meteorological Committee.

17 *Day with Thunder Heard*, en inglés.

18 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".

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

Esta instrucción para observadores de clima fue posteriormente refinada por el mismo IMC en 1896, en París, y definió tres tipos de observaciones de tormenta con los siguientes símbolos que se usaron, y aún hoy en día se mantienen, en las observaciones meteorológicas de superficie de las estaciones sinópticas:

- T Para indicar días en los cuales un trueno distante es oído.
- ⋖ Para indicar la observación de relámpago distante o difuso.
- T⋖ Para indicar todas las observaciones de trueno y relámpago.

Hacia finales del siglo XIX 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 "isoceráúneo"¹⁹ 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 de ocurrencia de tormentas para regiones de un país, durante épocas diferentes del año y para sitios diversos alrededor del mundo.

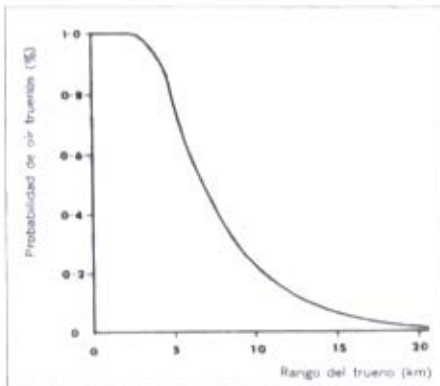


Figura 1. Probabilidad de que un observador escuche truenos.

La principal dificultad que se tiene con datos de observadores es la de determinar si el número de días tormentosos registrados refleja la incidencia real de descargas eléctricas atmosféricas. Si los observadores usan "trueno oído" como la definición dada por la Organización Meteorológica Mundial (WMO²⁰) de un día tormentoso, y si la variación de audibilidad del trueno respecto a la distancia es conocida, entonces puede ser posible calcular la respuesta del observador a una tormenta.

Si la probabilidad de un observador que escucha truenos es dibujada contra la distancia a la descarga eléctrica atmosférica, es probable que la variación sea similar a la mostrada por Stringfellow (1977) en la figura 1.

19 El término significa igual número de truenos y relámpagos.

20 World Meteorological Organization, antes International Meteorological Committee, IMC.

La probabilidad de oír truenos de una descarga eléctrica atmosférica a un rango de distancia r es $pf(r)$. Si se asume que la probabilidad es la misma para todas las descargas a ese rango, entonces la probabilidad de registrar una tormenta $ps(r)$ con n descargas (o *flashes*) en el rango r está dada por:

$$ps(r) = 1 - (1 - pf(r))^n \tag{1}$$

Si el rango efectivo R_e de un observador es definido como el rango al cual la probabilidad de registrar una tormenta de n descargas (o *flashes*) es 0.5, entonces, usando la curva mostrada en la figura 1, la variación de R_e con respecto a n es logarítmica, como se muestra en la figura 2.

Con estas ideas sencillas se puede ver que el número de días tormentosos registrado por un observador refleja con una relativa alta confiabilidad la incidencia real de descargas eléctricas atmosféricas en una localidad.

El nivel ceráuneo es un parámetro que ha servido a nivel mundial, tanto para caracterizar la severidad tormentosa de una región, como en el diseño de protección contra descargas de sistemas de transmisión de energía eléctrica. Este parámetro seguirá teniendo vigencia en aquellos países donde aún no se cuenta con tecnologías más avanzadas de medición de parámetros del rayo o, como en el caso colombiano, donde teniéndolas, aún falta por lo menos un lustro para tener series de tiempo confiables de los parámetros del rayo.

En el año 1976 se hizo el primer mapa de niveles ceráuneos para Colombia, el cual contó con información muy precaria y poco confiable del fenómeno atmosférico, ya que para aquella época no había especialistas en meteorología, y además sólo se utilizaron datos de no más de tres años.

Apenas en el año 1969, Colombia comenzó a organizar de una manera sistemática la medición y evaluación de los datos meteorológicos, con la creación del Servicio Colombiano de Meteorología e Hidrología, SCMh, y en 1976, del Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras, Himat. Debido a lo nuevo del proceso y a la confiabilidad de la información meteorológica, las técnicas de evaluación demoraron un poco en ser adoptadas por todos los observadores, pues se iniciaba una etapa de montaje de estaciones y de enseñanza de las observaciones.

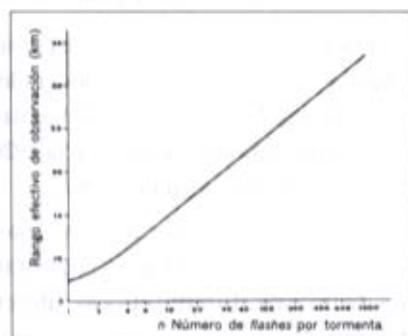


Figura 2. Variación del rango R_e respecto al número de flashes n .

Para finales de la década de 1980, la Universidad Nacional de Colombia firmó un convenio de cooperación científica con el Himat, gracias al cual se contó con asesoría especializada y con datos de más de quince años de observaciones, que permitieron proponer el estudio y la posterior elaboración de un mapa colombiano de niveles ceráuneos.

Como actividad previa se realizaron tres trabajos que tenían como objetivo recopilar los datos, evaluar la información y analizar el comportamiento de la actividad eléctrica atmosférica en las tres principales ciudades del país (Bogotá, Cali y Medellín). Posteriormente se comenzó la elaboración del mapa, a partir de los registros de las observaciones meteorológicas de superficie de las estaciones sinópticas-aeronáuticas, en aquella época de propiedad del Himat. Al analizar la información existente de aproximadamente 300,000 formatos de registros diarios, se llegó a reconocer solamente 34 estaciones como las más confiables, con datos a partir de 1974. Adicionalmente, para garantizar una mayor confiabilidad de la información, se tomó una correlación observacional entre un dato medido (precipitación) y otro observado (trueno).

El trazado de las curvas isoceráuneas fue realizado con criterios técnicos, ubicando inicialmente en el mapa de Colombia los promedios multianuales obtenidos y colocando el radio de acción que puede tener el dato respecto al relieve que rodea la estación. Las isolíneas se determinaron por la distribución del relieve, evitando así cruzar bruscamente una isolínea por entre las montañas. Internamente dentro de cada nucleamiento se pueden presentar microsistemas o subnúcleos de mayor o menor nivel al establecido, que no fue posible definirlo, de acuerdo con la escala en que se trabajó el mapa (1:1,500,000).

Las líneas isoceráuneas siguen, en un análisis de variación espacial, el relieve y, por consiguiente, el sistema orográfico que son los que determinan la formación de nubosidad, factor básico para el desarrollo del fenómeno eléctrico atmosférico. La figura 3 presenta el mapa colombiano de niveles ceráuneos elaborado en 1990. Este mapa tiene en cuenta la distribución espacial del fenómeno de la descarga eléctrica atmosférica como promedio aritmético multianual entre 1974 y 1988.

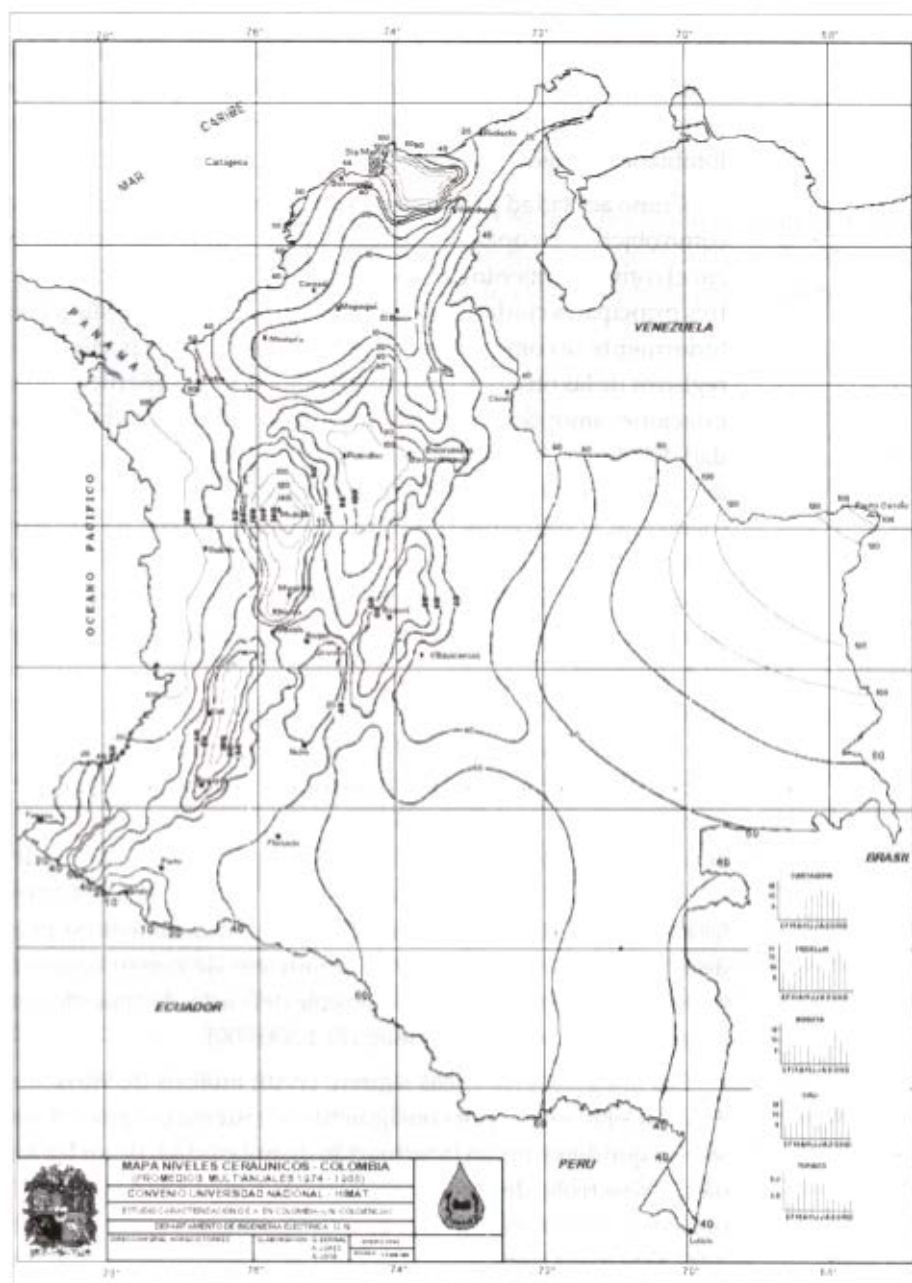


Figura 3. Mapa colombiano de niveles ceráúneos.

Variación espacial del NC en Colombia

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 períodos 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.

Para analizar el efecto de las montañas en la formación de nubes es necesario considerar dos aspectos: las propiedades de la atmósfera que fluye hacia las montañas y las características de las perturbaciones de flujo creadas por las montañas; las propiedades de la atmósfera pueden ser representadas por perfiles de temperatura, humedad y vientos. El segundo aspecto involucra el nivel al cual el aire es elevado al llegar a las montañas, debido a una perturbación producida por las mismas.

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 ceráuneo y, por tanto, de la mayor actividad eléctrica atmosférica, como puede apreciarse en los gradientes más altos de nivel ceráuneo en los pie de montes de las cordilleras (veáanse figuras 4 y 5).

Un análisis espacial del mapa de niveles ceráuneos de Colombia permite resaltar núcleos de alto nivel, así como núcleos de bajo nivel promedio multianual.

Alrededor de la Sierra Nevada de Santa Marta se presenta un fuerte gradiente con niveles iguales o superiores a 120 días tormentosos/año, lo cual puede ser debido a la interacción viento (alisios del noreste) - montaña. El gradiente de nivel ceráuneo disminuye a 40 y 20 días tormentosos/año hacia el interior, en la Sabana de Córdoba.

La parte media del valle del río Magdalena (mejor conocido como Magdalena Medio) se caracteriza por la presencia de un sistema de alto nivel ceráuneo y alta densidad de descargas a tierra. Longitudinalmente, a lo largo del río, se presentan niveles superiores a 100 días tormentosos/año, desde La Dorada, Norcasia y Samaná en Caldas, la zona de Rionegro al noroeste de Cundinamarca y la zona de Muzo, en el suroeste de Boyacá, hasta los alrededores de Cerromatoso y San Francisco del

Rayo, en el sur del departamento de Córdoba, Remedios, Segovia y El Bagre en la zona noreste de Antioquia y las estribaciones sur de la Serranía de San Lucas en el departamento de Bolívar.

En el altiplano cundiboyacense, la actividad eléctrica atmosférica alcanza un valor relativamente alto con valores de 80 días tormentosos/año.

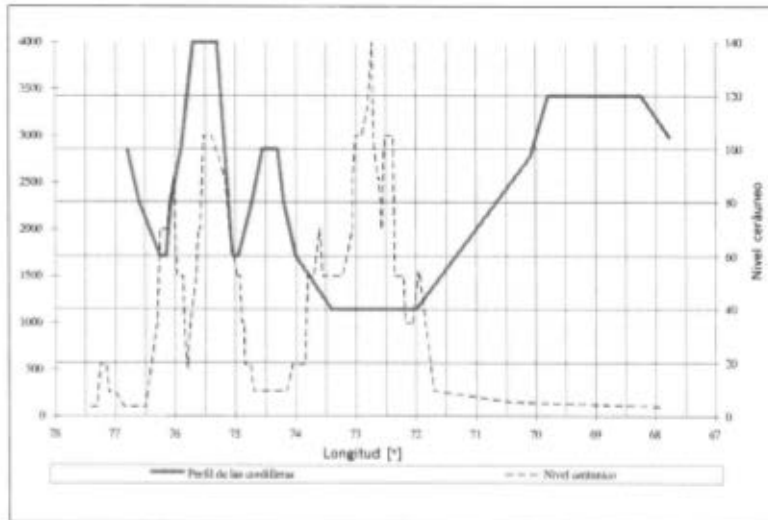


Figura 4. Perfil transversal de nivel cerúneo - Latitud 6° 08'.

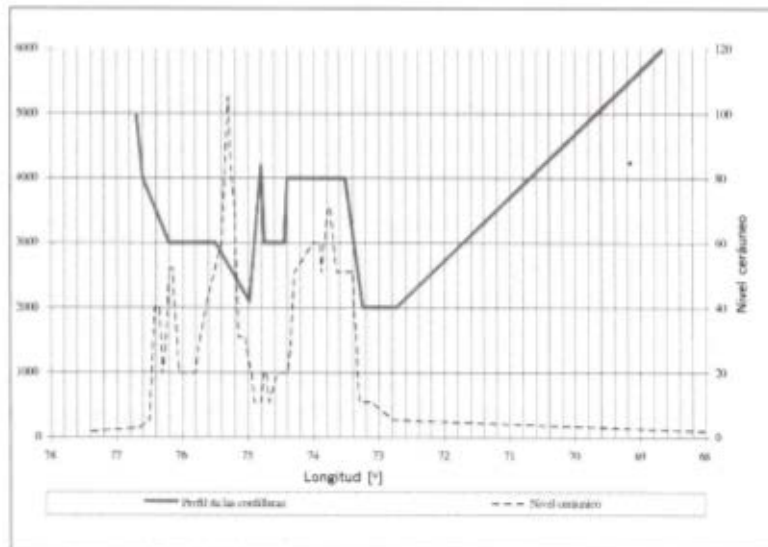


Figura 5. Perfil transversal de nivel cerúneo - Latitud 4° 43'.

En las llanuras orientales, el nivel aumenta desde 40 días tormentosos/año en el pie de monte de la Cordillera Oriental, hasta 120 días tormentosos/año en el extremo más oriental del país, en límites con Venezuela.

En inmediaciones del departamento del Valle del Cauca se presenta una serie de nucleamientos con valores de 60 hasta 100 días tormentosos/año que siguen longitudinalmente el pie de monte de la Cordillera Central.

Una zona característica por su bajo nivel ceráuneo (máximo 10 días tormentosos/año) se presenta al sureste del departamento de Nariño, donde penetra la Cordillera de los Andes a territorio colombiano.

Estos resultados se han corroborado mediante mediciones realizadas con dos diferentes sistemas localizadores de rayos. Uno con el Sistema de información de descargas²¹, y otro con los datos suministrados por la NASA, de su sistema satelital detector de rayos OTD (*Optical Transients Detector*).

Las figuras 6 y 7 presentan la variación espacial de la actividad eléctrica atmosférica en parte del territorio colombiano para el año 1996, con los datos del sistema de ISA y el sistema satelital de la NASA, respectivamente. Se aprecian tres zonas de alta actividad eléctrica atmosférica: las estribaciones de la Cordillera Central, a la altura de la población de Cerromatoso (límite de los departamentos de Antioquia y Bolívar), el Magdalena Medio, a la altura de las poblaciones de Norcasia, La Dorada y Samaná (Caldas), zona de Rionegro (Cundinamarca), zona de Muzo (Boyacá), zona de Remedios (Antioquia), Serranía de San Lucas (Bolívar) y la Serranía del Perijá (límites con Venezuela). Estas zonas son coincidentes, no sólo con los datos suministrados por el Sistema de información de descargas de ISA y la NASA, sino con lo encontrado regionalmente con el mapa colombiano de niveles ceráuneos.

Variación espacial del NC en otras latitudes

Estudios locales similares a los de Colombia han sido realizados en diferentes países, de los cuales, como ejemplos ilustrativos, se presentan dos de latitud norte (Estados Unidos y Francia) y uno de latitud tropical (Brasil - Minas Gerais).

En Francia, por ejemplo, el nivel ceráuneo promedio multianual es alrededor de 20. Es mayor a 30 en las áreas montañosas de los Alpes, el *Massif Central* y los Pirineos, y menor de 15 en las áreas costeras que bordean el Canal Inglés y el Océano Atlántico. La figura 8 presenta el mapa de niveles ceráuneos de Francia, por sectores centrados en las estaciones de observación pertenecientes a la Compa-

²¹ Sistema de propiedad de Interconexión Eléctrica S.A.ESP-ISA, el cual hace parte de la Red Colombiana de Medición y Localización de Descargas Eléctricas Atmosféricas, Recma.

ña Eléctrica de Francia, Electricité de France. 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 isoceráuneas.

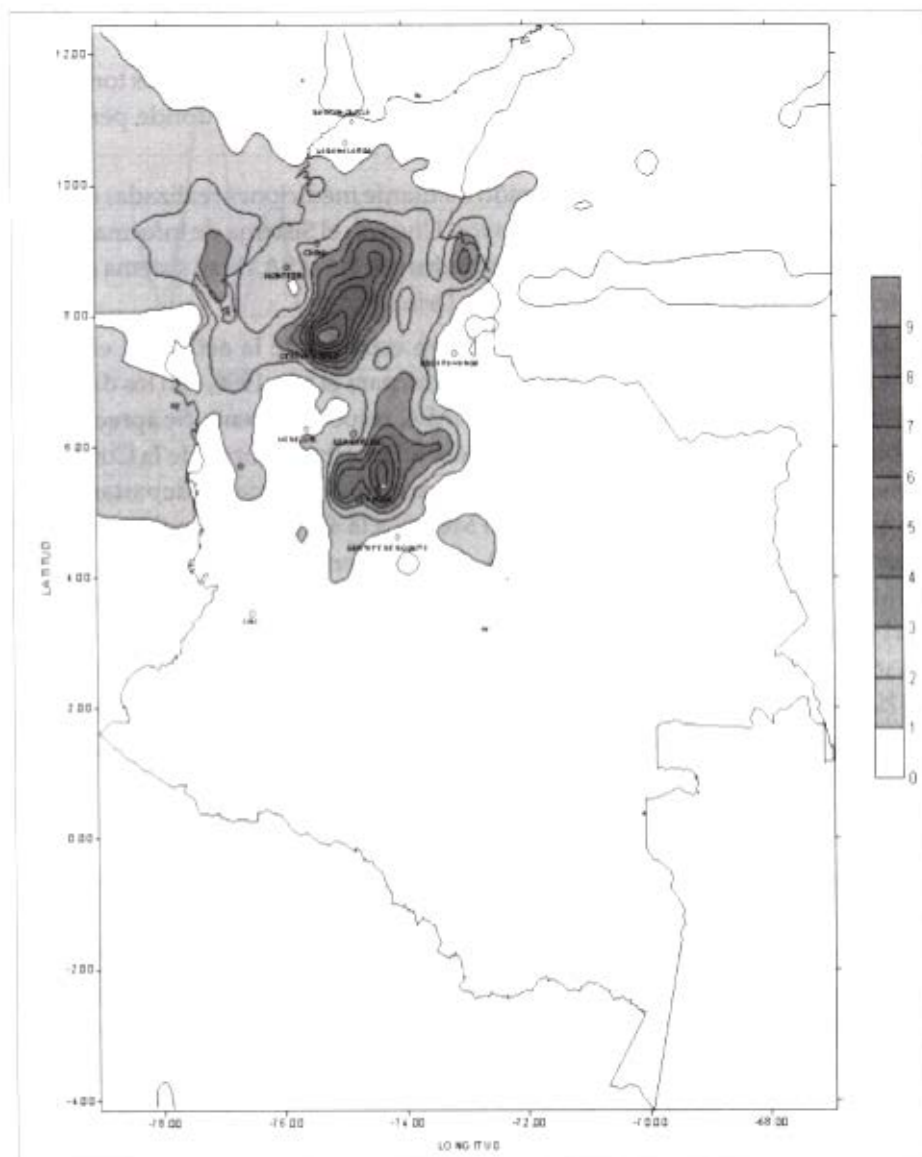


Figura 6. Variación espacial de la actividad eléctrica atmosférica (descargas a tierra por $\text{km}^2 \cdot \text{año}$) en Colombia para el año 1996. Mapa elaborado según los datos del Sistema de información de descargas, de propiedad de ISA.

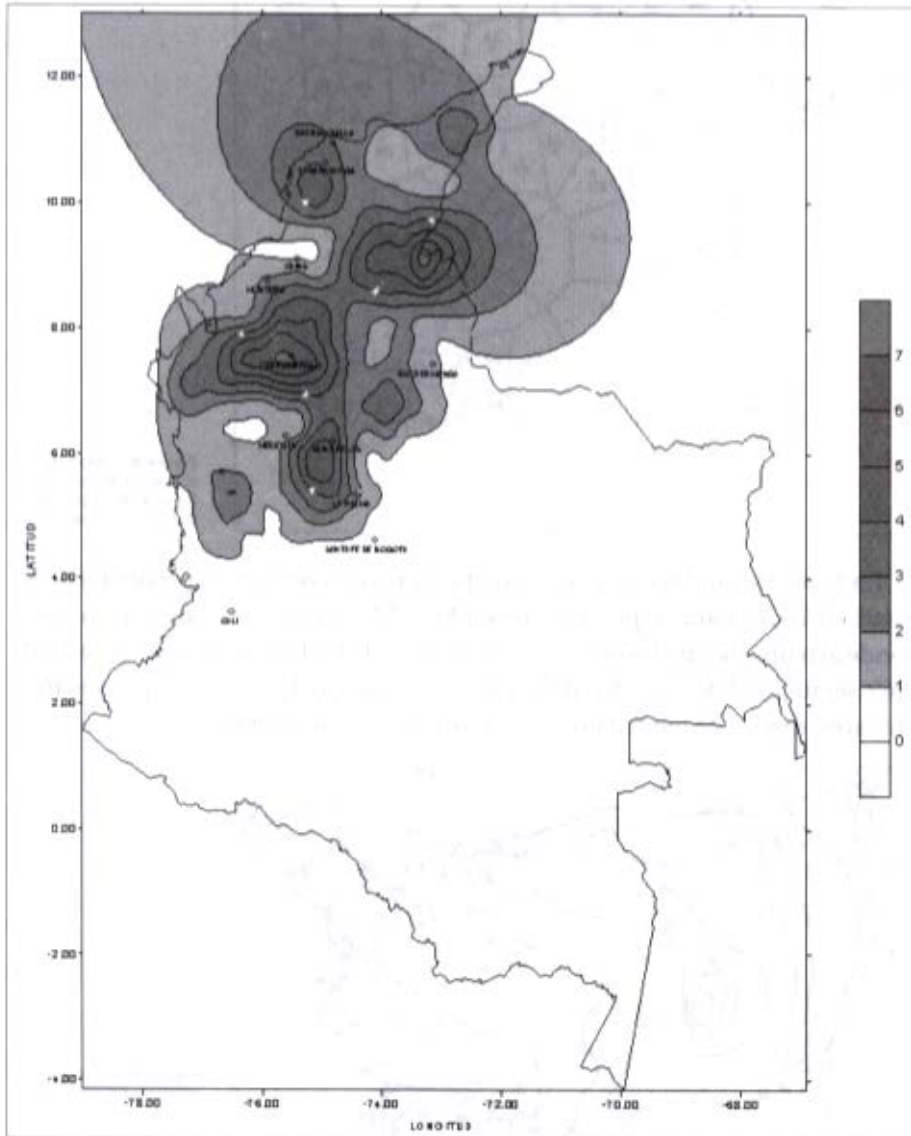


Figura 7. Variación espacial de la actividad eléctrica atmosférica (descargas a tierra por $\text{km}^2 \cdot \text{año}$) en Colombia para el año 1996. Mapa elaborado con los datos satelitales suministrados por la NASA, Sistema OTD (*Optical Transients Detector*).



Figura 8. Mapa de niveles ceráneos de Francia. Adaptado de Gary, "La foudre", 1994.

En 1924, Alexander presentó un mapa de niveles ceráneos promedio de los Estados Unidos para un período entre 1904 y 1923 (figura 9). La figura 10 corresponde al mapa de niveles ceráneos promedio de los Estados Unidos a partir de 1969, según los datos del Departamento de Comercio. Estos dos mapas son muy similares, a pesar de tener datos con más de 40 años de diferencia.

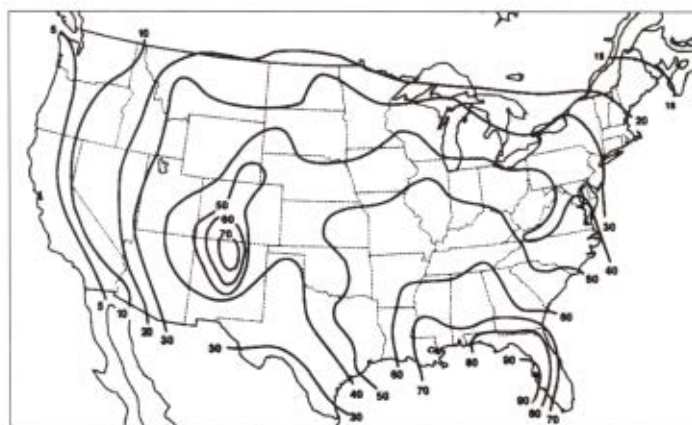


Figura 9. Mapa de niveles ceráneos de Estados Unidos, de 1904 a 1923. Adaptado de Alexander, 1924.

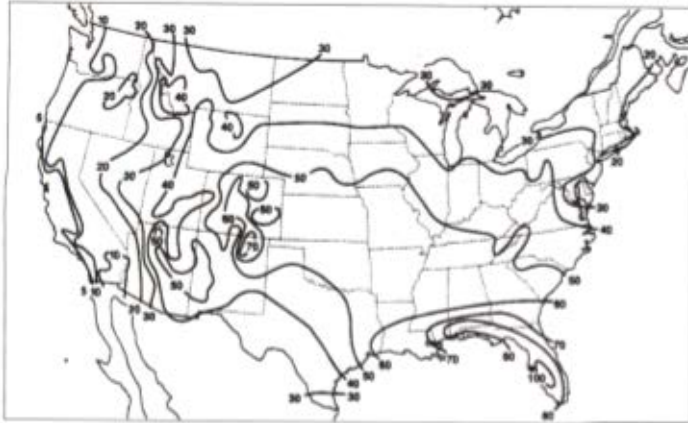


Figura 10. Mapa de niveles ceráneos de Estados Unidos (1969). Adaptado de U.S. Dept. of Commerce data.

El mapa de la figura 10, por ser más reciente, presenta curvas con más detalles al oeste de los Estados Unidos. De estos dos conjuntos de datos es importante resaltar que se mantiene la tendencia en el tiempo de algunas regiones, como es el caso del estado de Florida, con valores altos, el cual presentaba para 1924 niveles ceráneos entre 70 y 90 días tormentosos/año y para 1969 una variación muy similar entre 70 y 100 días tormentosos/año; igualmente (pero con valores bajos), la región de la costa oeste de los Estados Unidos mantiene en el tiempo su bajo nivel ceráneo entre 5 y 10 días tormentosos/año.

El nivel ceráneo de Minas Gerais en Brasil, presentado en la figura 11, ha sido registrado desde 1971 en aproximadamente 580 sitios de observación, cubriendo todo el estado y algunos estados vecinos. Los valores observados para todo el estado de Minas Gerais varían entre 30 y 140 días tormentosos/año, con un valor promedio de 70.

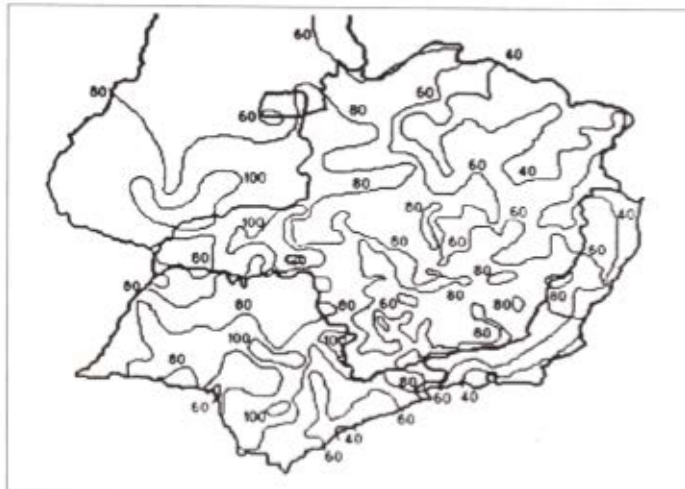


Figura 11. Mapa de niveles ceráneos de Minas Gerais, Brasil. Adaptado de Diniz, 1996.

El valor promedio de nivel ceráuneo para Alemania es de 20, con un máximo de 30 en áreas cercanas a las montañas de los Alpes. En la Gran Bretaña, el valor medio de nivel ceráuneo varía entre 2 y 14 días tormentosos/año. Canadá, por su parte, presenta promedios entre 15 y 35 días tormentosos/año, con valores máximos promedio de 35 en la región de los grandes lagos.

Una primera conclusión de estas observaciones es la amplia variación espacial de la actividad eléctrica atmosférica en el mundo, desde valores promedio multianuales de 10 hasta 140 días tormentosos/año.

Una segunda conclusión es la alta actividad eléctrica atmosférica promedio multianual que, en términos generales, presenta Colombia y Brasil (Minas Gerais) respecto a regiones de latitudes no tropicales como Estados Unidos, Canadá, Gran Bretaña, Alemania o Francia. Es decir, podría afirmarse que Colombia, por su ubicación geográfica en zona tropical terrestre, es un país con alta actividad eléctrica atmosférica. Esta afirmación corrobora la hipótesis planteada por Whipple (1929) Gish y Wait (1950), sobre distribución no homogénea del circuito eléctrico global y la contribución dominante de las tres mayores zonas de convección profunda tropical del planeta; esto puede ser observado en la figura 12 del mapa de niveles ceráuneos presentado por la Organización Meteorológica Mundial en 1956.

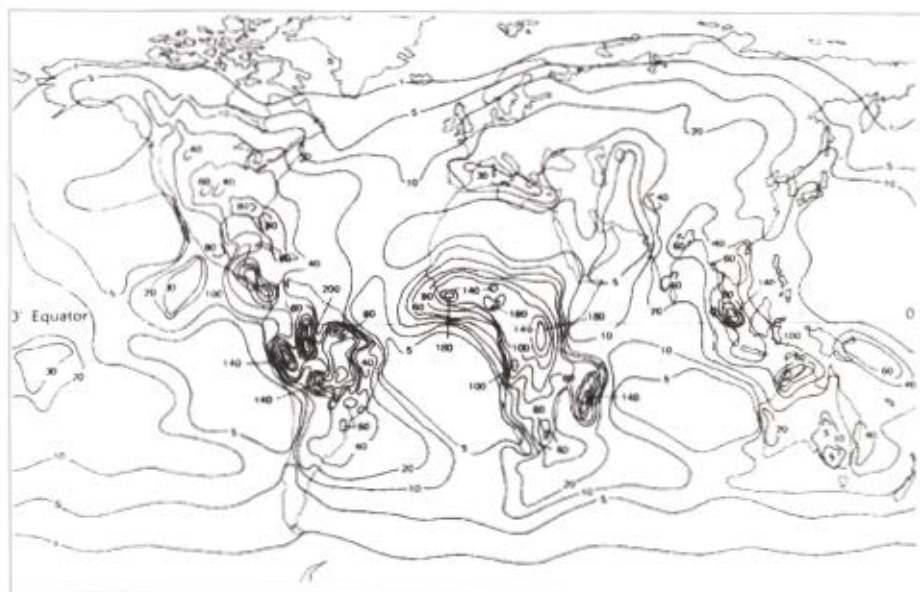


Figura 12. Mapa mundial de niveles ceráuneos. Adaptado de Gary, "La Foudre", 1994.

Sin embargo, desde una perspectiva espacial-local, existen áreas en un país tropical como Colombia donde la actividad eléctrica atmosférica es muy baja.

Esto nos conduce a una tercera conclusión, cual es la de 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 ceráuneo 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.

Así mismo, en investigaciones a nivel mundial sobre los parámetros de la descarga eléctrica atmosférica, se trata en muchas ocasiones de inferir resultados globales a partir de mediciones u observaciones locales, lo cual puede conducir a conclusiones erróneas.

Variación temporal del NC para Colombia y el mundo

El nivel ceráuneo, como cualquier parámetro meteorológico, presenta variaciones temporales. A manera de ejemplo, en las figuras 13, 14 y 15 de Bogotá (Colombia), Francia y Minas Gerais (Brasil) se muestra la variación cíclica multianual del nivel ceráuneo. Para cada conjunto de datos se realizó una regresión polinómica, cuya ecuación y el factor de ajuste (R) se presentan en la parte inferior de las figuras. En estos tres casos ilustrativos es detectable un ciclo; sin embargo, la confirmación de un patrón determinado debe ser hecha sobre la base de más años de observaciones. La diferencia cíclica entre los tres ejemplos tiene que ver posiblemente con las características orográficas, meteorológicas y geológicas locales de cada sitio.

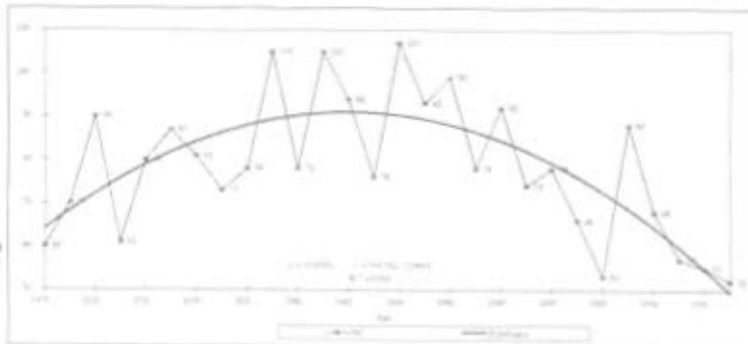


Figura 13. Variación temporal multianual del nivel ceráuneo para Bogotá (Colombia), 1970-1997.

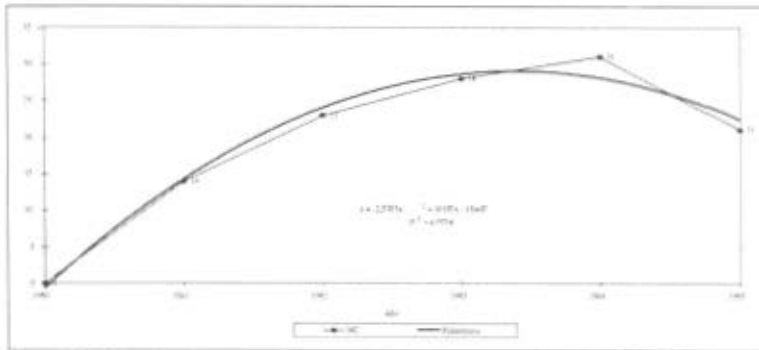


Figura 14. Variación temporal multianual del nivel ceráuneo para Francia, 1980-1985. Adaptado de Gary, "La Foudre", 1994.

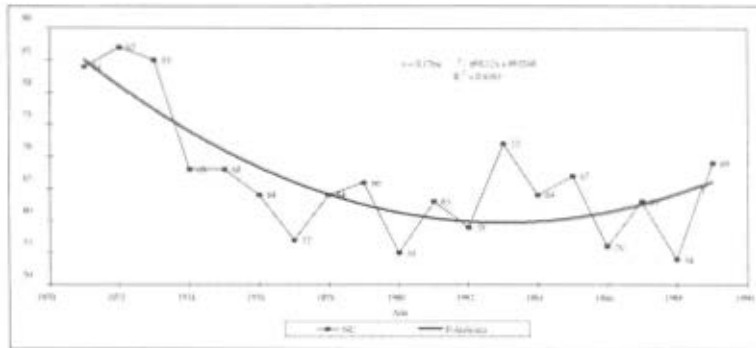


Figura 15. Variación temporal multianual del nivel ceráuneo para Minas Gerais (Brasil), 1970-1990. Adaptado de Diniz, 1996.

El conocimiento de la variación temporal multianual de los parámetros del rayo tiene importantes implicaciones en el diseño, mantenimiento u operación de sistemas eléctricos o 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 sobredimensionado. 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 eléctrica²².

22 Power Quality, en inglés.

Distribución de probabilidad del nivel ceráuneo

Partiendo de la hipótesis de investigación planteada, se trabajaron los datos de nivel ceráuneo multianuales (1974-1990) mediante curvas de distribución de probabilidad acumulada, que sirven para hacer inferencias más objetivas en el caso de comparaciones cualitativas o cuantitativas a nivel global o local. Las curvas de las 34 estaciones meteorológicas colombianas se presentan en el anexo A de este libro. Estas curvas tienen aplicación en el diseño probabilístico de sistemas de protección contra rayos, por ejemplo, en el diseño del apantallamiento de líneas de transmisión de energía eléctrica.

Densidad de descargas a tierra, DDT

El concepto de nivel ceráuneo 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: uno, a través de mediciones directas con equipos contadores de rayos o localizadores, y otro mediante ecuaciones empíricas que relacionan la densidad de descargas a tierra con el nivel ceráuneo.

Las mediciones directas de la densidad de descargas a tierra se iniciaron con la propuesta de Pierce en 1956 de un contador de descargas, el cual fue modificado diez años más tarde por Golde. El contador de descargas se basa en el conteo de cambios de campo eléctrico que excedan los 5 voltios/metro. Este contador fue transistorizado por Prentice y Mackerras en 1969 y finalmente se adoptaron dos modelos como estándar a nivel mundial por el Comité Cigre en 1972: el 500 Hz de antena vertical y el 10 kHz. Este último, conocido como el RSA-10, es más sensible a descargas a tierra, y se recomendó para uso en áreas de alta actividad eléctrica atmosférica.

Con base en estos contadores, la densidad de descargas a tierra, DDT, se calcula mediante la ecuación:

$$DDT = \frac{Y_g \cdot K}{\Pi \cdot R_g^2} \quad (2)$$

donde

Y_g es un factor de corrección de los registros de descargas entre o intranubes hechos por el contador

K es el número total de descargas registradas por el contador

R_g es el rango efectivo del contador

Las siguientes son las características más relevantes de estos dos contadores, las cuales fueron obtenidas mediante mediciones realizadas por Anderson y Mackerras durante un considerable período de tiempo en Transvaal (Latitud 26° S) en Sudáfrica y en Brisbane, Australia:

Parámetro	Contador 500 Hz	Contador 10 kHz
$R_g(\text{km})$	37	20
Y_g	0.83	0.95

Posteriormente, en 1985, Mackerras desarrolló el contador CGR3, que registra descargas a tierra positivas separadamente de descargas a tierra negativas y descargas entre nubes. Este instrumento tiene un rango efectivo entre 12 y 16 km, dependiendo de la latitud y del tipo de descarga.

Con base en el sensor de tormentas LLP TSS420 (tecnología *Direction Finding*)²³ y el contador Cigre RSA - 10 kHz se obtuvieron las primeras mediciones en Colombia del parámetro DDT.

Estas primeras mediciones (1992-1994) dieron densidades de descargas a tierra, en la zona central colombiana, inesperadamente bajas²⁴, teniendo en cuenta que las ecuaciones empíricas dadas por diferentes investigadores presentaban una relación directa entre NC y DDT. Esto llevó a cuestionar la eficiencia de los contadores y del sensor. Para disminuir la probabilidad de errores y confirmar o descartar los resultados preliminares, se realizaron tres tareas básicas: una, calibrar los contadores en laboratorio, mediante mediciones de campo eléctrico conocido; dos, contrastar los dos equipos que teníamos a disposición (contador y sensor) durante períodos cortos de tiempo, con observaciones visuales, y tres, instalar una red de cinco contadores RSA - 10, calibrados, alrededor de la Sabana de Bogotá.

Los resultados del siguiente año fueron similares a los anteriores. Los dos siguientes pasos por seguir fueron la revisión de las ecuaciones empíricas que pu-

23 Para un mejor entendimiento de esta metodología, remítase al capítulo 7 de este libro.

24 Entre 1 y 3 descargas por $\text{km}^2 \cdot \text{año}$.

blicaban diferentes investigadores a nivel mundial y la presentación de los resultados preliminares en un evento internacional, con el ánimo de encontrar alguna crítica constructiva sobre tales resultados.

Tabla 1.

Ecuaciones de densidad de descargas a tierra (DDT) en función del nivel ceráúneo (NC), utilizadas en diversas partes del mundo, aplicadas a tres años de mediciones (1995, 1994, 1993) y comparadas con mediciones hechas con el contador RSA - 10, en la ciudad de Bogotá.

Ecuación propuesta	Autor	DDT, NC=57 (Descargas/km ² - año - 1995)	DDT, NC=68 (Descargas/km ² - año - 1994)	DDT, NC=88 (Descargas/km ² - año - 1993)
DDT medido en Bogotá	-	0.6	1.2	2.4
$0.053*(NC)^{1.17}$	Eriksson/Potgieter, Southafrica	6	7.4	10
$0.04*(NC)^{1.25}$	Anderson/Eriksson, Cigre	6.3	7.8	10.8
$0.0026*(NC)^{1.9}$	Stringfellow,U.K.	5.6	7.9	12.9
$0.004*(NC)^2$	Muller/Hillebrand, Sweden	13	18.531	
$0.15*(NC)$	Brown/Whitehead/ Golde, USA	8.6	10.213.2	
$0.023*(NC)^{1.3}$	Cigre	4.4	5.5	7.7
$0.036*(NC)^{1.3}$	Kolokolov/Paulova/ Russia	6.9	8.7	12.1
$0.1*(NC)$	Aiya, India	5.7	6.8	8.8
$0.14*(NC)$	Anderson/Jenner	8	9.5	12.3
$0.11*(NC)$	Horn/Ramsey, USA	6.3	7.5	9.7
$0.17*(NC)$	Horn/Ramsey, USA	9.7	11.615	
$0.19*(NC)$	Brooks/Temperate	10.8	12.916.7	
$0.13*(NC)$	Brooks/Tropical	7.4	8.8	11.4
$0.01*(NC)$	New Guinea	0.6	0.7	0.9
$0.024*(NC)^{1.12}$	De la Rosa, Montaña México	2.2	2.7	3.6
$0.03*(NC)^{1.12}$	Dinitz/M.G (Brasil)	2.8	3.4	4.5
$5.4*10^{-7}*LAT^{1.6}*NC^{2.5}$	H. Torres, PAAS Colombia	0.15	0.23	0.43

La revisión de las ecuaciones arrojó los resultados que se resumen en la tabla 1. Las ecuaciones empíricas muestran variaciones de más del 100% entre ellas, lo cual nos lleva a concluir que son ecuaciones válidas para los sitios donde fueron desarrolladas. Sólo dos ecuaciones dieron resultados acordes con las mediciones: una, la desarrollada en Minas Gerais, Brasil, y la otra la desarrollada dentro del Programa PAAS de la Universidad Nacional de Colombia y presentada en más detalle en el anexo B de este libro.

Una recopilación de datos de densidad de descargas a tierra para diferentes lugares del mundo, sin tener en cuenta los dos sitios de mayor densidad de rayos del mundo: Bagre (Antioquia) y Samaná (Caldas), se presentan resumidos en la tabla 2.

Tabla 2.
Densidad de descargas a tierra (DDT) medidas
en diferentes latitudes del mundo.

Sitio	Latitud	DDT (Descargas/km ² -año)
Gabarone	24° S	38.2
Darwin	12° S	5.5
Rabaul	4° S	2.7
Bogotá	5° N	1.5
Orlando	28° N	26.2

De acuerdo con estos datos y un análisis conjunto hecho entre H. Torres y E. Williams, presentado en la reunión anual del American Geophysical Union (AGU) de diciembre de 1996, se plantea una hipótesis de investigación: "*Las descargas nube-tierra son menos predominantes en los trópicos que en los subtrópicos*".

En el año de 1977, Prentice y Mackerras presentaron observaciones que cubrían un rango de Latitud (λ) de 69°N a 37°S de la relación de descargas nube-nube (N_c) con respecto a descargas nube-tierra (N_g). Esta relación empírica llamada $z(\lambda) = \frac{N_c}{N_g}$ es función de la latitud (λ) y el nivel ceráuneo (NC), de la forma:

$$z(\lambda, NC) = (4.16 + 2.16 \cos 3\lambda) \left[\frac{0.6 + 0.4NC}{72 - 0.98\lambda} \right] \quad (3)$$

En 1994, Mackerras y Darveniza presentaron una evaluación de z para 14 sitios de 11 países, incluido Colombia (La Palma), entre latitudes de 60°N a 27°S. En el estudio, el valor estimado para Z varió entre 0.5 para La Palma (5°N) y 3.8 para Katmandú (27°N). Sin embargo, Pierce, en 1970, había estimado un valor de 9, y

Prentice y Mackerras, en 1977, un valor de 6 para las zonas tropicales. Mackerras consideró que, según sus resultados, solamente en latitudes altas hay buena correspondencia entre los valores mencionados anteriormente (1970 y 1977) y los actuales (1994). Atribuye las discrepancias para zona tropical a la confiabilidad en los datos de regiones de alta actividad eléctrica atmosférica. Esta última conclusión podría ser un poco apresurada, pues lo que se puede deducir de los resultados es que el análisis partió de mediciones locales, para inferir a partir de allí conclusiones globales; es decir, que si hubiesen tomado el valor de densidad de descargas a tierra para todo Colombia, que es aproximadamente entre 1.5 y 2 descargas/km² - año, las conclusiones hubiesen sido muy diferentes. En otras palabras, para análisis globales los valores estimados deben ser globales (áreas mínimas del orden de 300 x 300 km²) y para aplicaciones en ingeniería los valores estimados deben ser locales (áreas del orden de 3 x 3 km²).

Si el área no es bien seleccionada de acuerdo con los propósitos de análisis (mediciones en áreas globales para variaciones latitudinales, o mediciones locales para aplicaciones en ingeniería), los resultados pueden ser erróneos. Un ejercicio para demostrar cómo la estimación de la densidad de descargas a tierra es afectada por el aspecto espacial, fue realizado con los datos del año 1997 del Sistema de información de descargas de ISA, para la zona de la Serranía de San Lucas, ubicada entre -74, 48 y -74, 39 grados de Longitud Oeste y entre 8.05 y 7.96 grados de Longitud Norte).

Desde una perspectiva global, y considerando el área de cubrimiento del Sistema de ISA (superior a 100 x 100 km²), la DDT en Colombia es de aproximadamente 1 km⁻²·año⁻¹ (1997-2001). En una vista más detallada, se tomó un área de 24 x 24 km², y se estimó una DDT de 35 descargas/km²·año. Se realizó entonces, una división sucesiva de ésta área y se estimó la DDT para cada paso. A medida que el área decrecía, la densidad de descargas a tierra, para algunas zonas, se incrementaba considerablemente. Las figuras 16 a 18 muestran la división realizada y los valores de DDT obtenidos. Dentro de un área a escala global de 96 X 96 km², con una DDT de 15, es posible encontrar un área local de muy alta densidad (65 descargas/km²·año, para áreas de 3x3 km² como se muestra en la figura 18). Normalmente estas áreas presentan para las empresas de energía la más alta falla de transformadores de distribución, debido a descargas eléctricas atmosféricas, como se muestra en el capítulo 3 de este libro.

25 En un estudio para la Empresa de Energía de Bogotá S.A. ESP - EEB - Codensa.

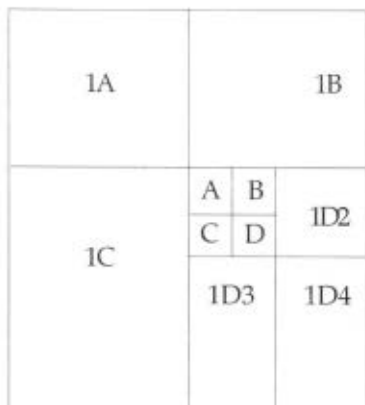


Figura 16. División de un área para calcular DDT.



Figura 17. Zona 1 (48 km de lado).

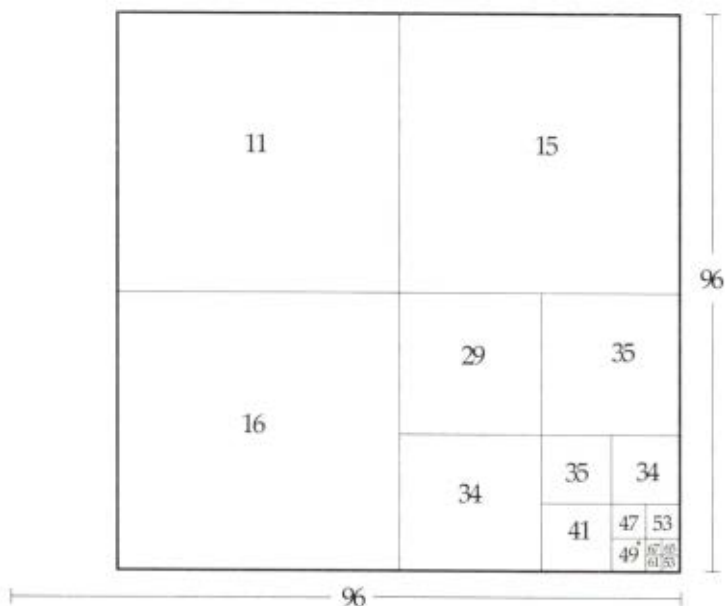


Figura 18. Análisis de DDT en áreas desde 48 km x 48 km hasta áreas de 3 km x 3 km.

Para analizar la variación de la Densidad de Descargas a Tierra - DDT y el Nivel Ceráúneo - NC con la Latitud, tomamos mediciones de 12 sitios referenciados en la literatura especializada, o por comunicación personal directa. Estos sitios cubren Latitudes entre 27°S y 60°N; la Tabla 3 presenta un resumen de todos los datos recopilados. Es importante acotar que para el caso colombiano se tomó un valor de DDT: 1.5 (Bogotá), el cual puede ser considerado un valor típico para Colombia para análisis global. No se toman en cuenta valores extremos como los dos sitios de mayor densidad de rayos del mundo (Bagre y Samaná), como tampoco los de menor valor como el caso de Ipiales, cercano a cero.

Tabla 3.
Valores de DDT y NC, estimados para diferentes latitudes del mundo.

Sitio	Latitud	NC ⁽¹⁾	DDT ⁽²⁾
Brisbane, Australia	27° S	20	4.5 ^(c)
Gabarone, Botswana	24° S	60	38.2 ^(b)
Minas Gerais, Brasil	15° S	70	10 ^(e)
Darwin, Australia	12° S	80	5.5 ^(b)
Rabaul, Indonesia	4° S	90	2.7 ^(b)
Bogotá, Colombia	5° N	90	1.5 ^(a)
Orlando, USA	28° N	80	26.2 ^(b)
Tel Aviv, Israel	32° N	20	3.2 ^(c)
Toronto, Canadá	43° N	20	3.3 ^(c)
Berlín, Alemania	52° N	20	0.73 ^(c)
Tomsk, Rusia	54° N	20	1.5 ^(d)
Uppsala, Suecia	60° N	10	0.66 ^(c)
Bagre, Colombia	8° N	222	67 ^(a)

- (a) Universidad Nacional de Colombia, mediciones del PAAS.
 (b) E. Williams (comunicación personal).
 (c) Mackerras and Darveniza, "Latitudinal variation of Lightning occurrence characteristics...", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 99, 1994.
 (d) V. A. Rakov, "Annual Ground Flash Density from Lightning flash counter records". ICLP 90.
 (e) Companhia Energetica de Minas Gerais, Cemig (reporte técnico).
 (1) Días tormentosos- año, estimados del *World Map of Isochaunic Level*, WMO.
 (2) DDT, descargas a tierra / km²- año.

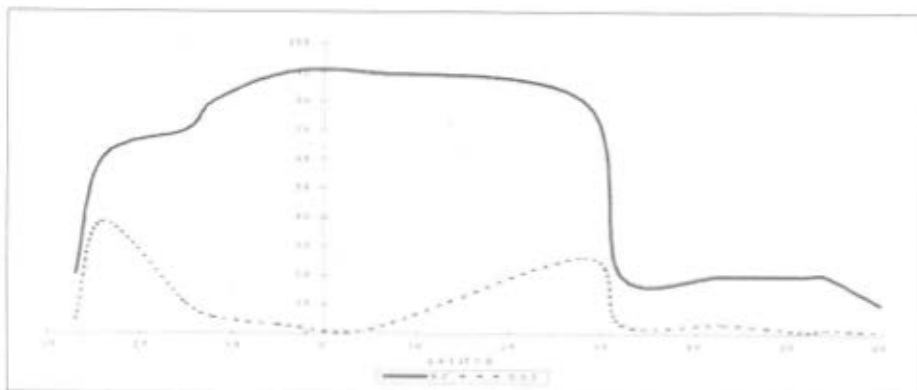


Figura 19. Variación de DDT y NC respecto a la latitud. Las unidades de NC y DDT son diferentes, pero para efectos prácticos de comparación de las curvas se han graficado en un mismo eje de coordenadas.

Con base en los anteriores datos y tomando en cuenta el concepto expresado sobre análisis global, graficamos los datos recopilados de DDT y NC contra latitud, obteniendo las curvas presentadas en la figura 19. Esta figura concuerda con las observaciones de descargas nube-tierra vs. latitud hechas mediante satélite por Kotaki y Katoh, presentadas en la figura 20 y la ecuación (3) de Prentice y Mackerras de $z(\lambda)$ vs. Latitud presentada en la figura 21.

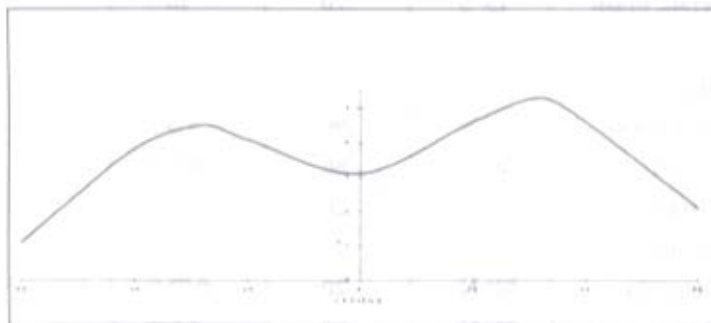


Figura 20. mediciones de descargas nube-tierra vs. latitud, hechas mediante satélite por Kotaki y Katoh.

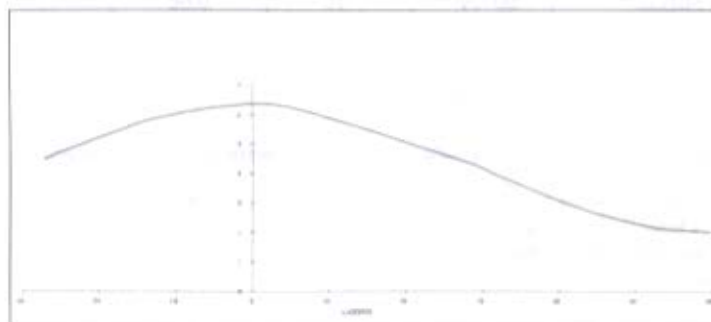


Figura 21. Ecuación (3) de Prentice y Mackerras de $z(\lambda)$ vs. latitud.

La explicación tentativa de *descargas nube-tierra menos predominantes en los trópicos que en los subtropicos* —es decir, que podrían esperarse en el trópico valores de DDT más bajos que en el subtropico—, es aceptable para análisis globales (con áreas de $100 \times 100 \text{ km}^2$ o más). Sin embargo, para propósitos de aplicaciones en ingeniería (escala local), los fenómenos orográficos, y posiblemente los geológicos locales, desempeñan un papel fundamental. Por ello es recomendable estimar valores de parámetros del rayo, considerando áreas del orden de $3 \times 3 \text{ km}^2$, de acuerdo con la exactitud en la localización de los sistemas comerciales detectores de descargas eléctricas atmosféricas utilizados. Si el área no es apropiadamente seleccionada para los propósitos requeridos, los valores pueden resultar falseados.

Distribución de probabilidad de la densidad de descargas a tierra

En el anexo B de este libro se presentan las curvas de probabilidad acumulada de densidad de descargas a tierra de 34 estaciones meteorológicas colombianas utilizando una ecuación del tipo

$$DDT = K \cdot NC^{\alpha} \cdot LAT^{\beta}$$

donde K , α y β son constantes empíricas obtenidas a partir de los datos de nivel ceráuneo, NC , y densidad de descargas a tierra, DDT , del Sistema colombiano de localización y medición de descargas eléctricas atmosféricas, Recma, para los años 1996-1999. Estas curvas tienen una importante aplicación en el diseño probabilístico de sistemas de protección contra rayos, y podrán ser utilizadas hasta cuando tengamos valores de probabilidad multianuales confiables, medidos directamente.

Amplitud de la corriente de retorno del rayo, CR

La amplitud de la corriente de retorno de la descarga eléctrica atmosférica 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 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 modelos matemáticos en función del campo eléctrico o magnético medido y la distancia, o a través de mediciones directas.

Las mediciones de campo eléctrico y magnético, así como de velocidad, luminosidad y espectro óptico, han permitido establecer relaciones con la corriente de retorno y obtener información acerca de ésta. Para efectos de este análisis, se es-

tudiarán únicamente los modelos que parten de mediciones de campo eléctrico y magnético.

Modelos matemáticos y ecuaciones experimentales

Se presenta a continuación una breve descripción teórica de los modelos matemáticos de corriente de retorno del rayo, desarrollados por diferentes investigadores a nivel mundial.

•Modelo simplificado de línea de transmisión

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi D} \left[\frac{H}{(H^2 + D^2)^{3/2}} \right] \text{Wb / m}^2 \tag{4}$$

La ecuación (4), desarrollada por Uman, relaciona la densidad de flujo magnético B con la corriente que fluye por el canal de descarga, siendo importante analizar las simplificaciones a que se llega cuando el cálculo se hace a una distancia D muy lejana con respecto a la altura del canal $\left(\frac{H}{D}\right) \ll 1$, o por el contrario cuando se calcula muy cerca, $\left(\frac{H}{D}\right) \gg 1$.

•Modelo modificado de línea de transmisión (MTL)²⁶

$$i(t) = \frac{2\pi cr}{\mu_0 v} B_\phi \left(\tau + \frac{r}{c}\right) t < t_0 \tag{5}$$

Como la corriente y el campo eléctrico tienen la misma forma de onda durante los primeros microsegundos de la descarga, la ecuación (5) puede emplearse para calcular la corriente a partir de mediciones remotas de campo magnético radiado, o a partir de campo eléctrico a través de la relación $\frac{E_\perp}{B_\phi} = c$

•Modelo de Bruce - Golde (BG)²⁷

$$i(t) = \frac{2\pi r^2}{\mu_0 H} B_\phi \left(\tau + \frac{r}{c}\right) \tag{6}$$

26 Carlo Alberto Nucci, et al. On Lightning Return Stroke Models for LEMP Calculations. Proceedings 19th International Conference on Lightning Protection. Graz: April 1988.

27 C. E. R. Bruce, and R. H. Golde, The Lightning Discharge. *Journal of the Institution of the Electrical Engineers*, Vol. 88, London, December 1941, pp. 487-520.

La ecuación (6) muestra la relación entre corriente y campo inducido para observaciones distantes $(H/D)^2 \ll 1$, considerando el efecto de retardo en el tiempo.

•Modelo para la primera descarga de retorno de V. Cooray, VC²⁸

El modelo predice relaciones entre la corriente pico, I_p , y el pico de campo eléctrico radiado, E_p , para una distancia D , y puede ser aproximado por la siguiente ecuación:

$$I = 0.053 \cdot (D \cdot E)^{0.928} \quad (7)$$

•Ecuaciones experimentales de Rakov

Rakov y Dulson²⁹ desarrollaron una técnica para mediciones remotas de amplitudes de corriente de rayo, basados en la medición del máximo valor de campo eléctrico E_M y la distancia D al rayo, hallando la siguiente expresión:

$$I = (27.0 - 26.5e^{-0.07 \cdot D}) \cdot D \cdot E \quad (8)$$

A partir de trabajos experimentales realizados por Willet (1993), Rakov obtuvo una relación lineal E vs. I , la cual se puede usar para obtener corrientes de retorno con base en valores de campo eléctrico.

Dicha relación es:

$$I = 1.5 - 0.037 D \cdot E \quad (9)$$

Para las ecuaciones (4) a (9):

I : Corriente pico [kA]

D : Distancia [km]

E : Campo eléctrico pico [V/m]

ϵ_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 : Distancia de impacto de la descarga [m]

t, τ : Tiempo [s]

28 Gerald V. Cooray, A Model for First Return Strokes. Proceedings 22nd International Conference on Lightning Protection. Budapest: September 1994.

29 International Conference on Atmospheric Electricity. Lightning Research in Western Siberia, 1988, pp. 766-769.

La velocidad asumida para el MTL fue 1.2×10^8 m/s, considerada típica para descargas naturales.

Magnitudes de corriente de retorno del rayo en diferentes latitudes

En la tabla 4 se presenta un resumen de los resultados de la medición de la amplitud de corriente pico, obtenidos por diferentes investigadores en latitudes no tropicales.

A partir de estos resultados, 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.

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 Latitud Norte (Checoslovaquia, Suiza e Italia), por tanto es más conveniente realizar un análisis con base en la distribución de probabilidad acumulada para diferentes latitudes.

Tabla 4.

Valores de la distribución de probabilidad acumulada de las mediciones de la amplitud pico de la corriente. (Adaptado de Golde, 1977).

	Cantidad de mediciones	Clase	95% [kA]	50% [kA]	5% [kA]
Popolansky	624	Diferente clase	-	25	-
Berger	101	Primera descarga de retorno negativa	14	30	80
	135	Descargas subsecuentes negativas	4-6	12	30
	26	Primera descarga de retorno positiva	4-6	35	250
Garbagnati	27	Primera descarga de retorno negativa	-	28.4	-

Popolansky, en la investigación realizada en Checoslovaquia entre 1963 y 1985, usó 624 valores obtenidos de los valores pico de la corriente de retorno del rayo, de investigaciones en Suiza, Checoslovaquia, Polonia, Suecia, Noruega, Gran Bretaña, Australia y Estados Unidos. Popolansky aproximó la curva de probabilidad a una distribución log - normal, obteniendo una corriente de retorno de rayo promedio³⁰ de:

$$\bar{I} = 25kA, \sigma_{\log I} = 0.39$$

Es importante resaltar que en la investigación realizada por Berger, la mediana de la corriente pico en las primeras descargas de retorno negativas es bastante mayor respecto a la mediana correspondiente a las descargas subsecuentes negativas y ligeramente menor que la mediana asociada a las primeras descargas de retorno positivas.

Registros de magnitud de corriente de retorno del rayo para un área tropical son presentados por Lee *et al.* (1979). 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 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 de los rayos presentes en 11 tormentas. Con base en estos datos se estableció la distribución de probabilidad acumulada del valor pico de la corriente de retorno del rayo, y se obtuvo que existe 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/ μ s para esta zona.

Posteriormente, Lee *et al.* con base en la distribución de probabilidad acumulada, realizaron una comparación de los resultados obtenidos en Kuala Lumpur, con mediciones de otras partes del mundo; en la tabla 5 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.

30 Este valor, publicado en la revista *Electra* No. 69 de 1979 de Cigre, tiene vigencia hoy en día.

Tabla 5.
Medianas del valor pico de la corriente de retorno del rayo en diferentes zonas del planeta. (Adaptado de Lee *et al.*, 1979).

País	Mediana (kA)
Estados Unidos	23
Suiza	30
Suecia	30
Polonia	31
Malasia	36
Brasil ⁽¹⁾	43
Rodesia	42
Colombia ⁽²⁾	43

⁽¹⁾ Minas Gerais, Brasil, 1996.

⁽²⁾ Valor estimado mediante mediciones de campo eléctrico a menos de 100 km y aplicando el modelo MTL.

La figura 22 muestra resultados de probabilidad comparativos entre los valores dados por Cigre en 1979³¹ de registros tomados en latitudes no tropicales, y los estimados en cuatro países tropicales: Brasil (Estación Cachimbo, Estado de Minas Gerais, 1996), Rodesia (Anderson *et al.*, 1954), Malasia (Lee *et al.*, 1979) y Colombia (Torres *et al.*, 1995). Esta gráfica y la tabla 6 permiten ver la mayor probabilidad de magnitud de corriente de retorno de la descarga en zonas tropicales (Brasil, Malasia, Colombia y Rodesia), respecto a zonas no tropicales (Cigre).

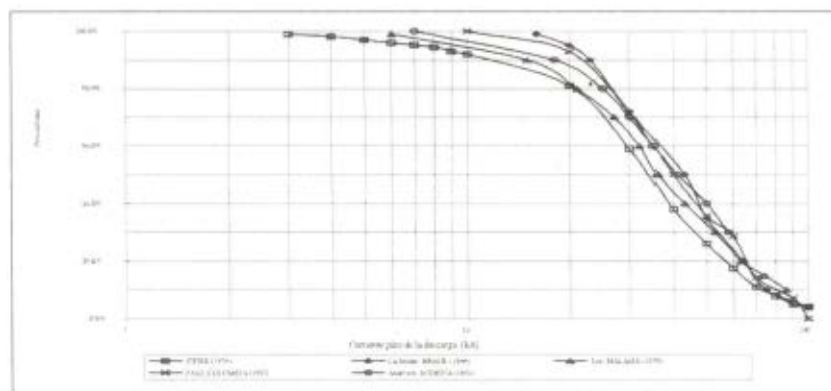


Figura 22. Curvas de probabilidad acumulada, comparativas entre países no tropicales (Cigre) y tropicales.

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

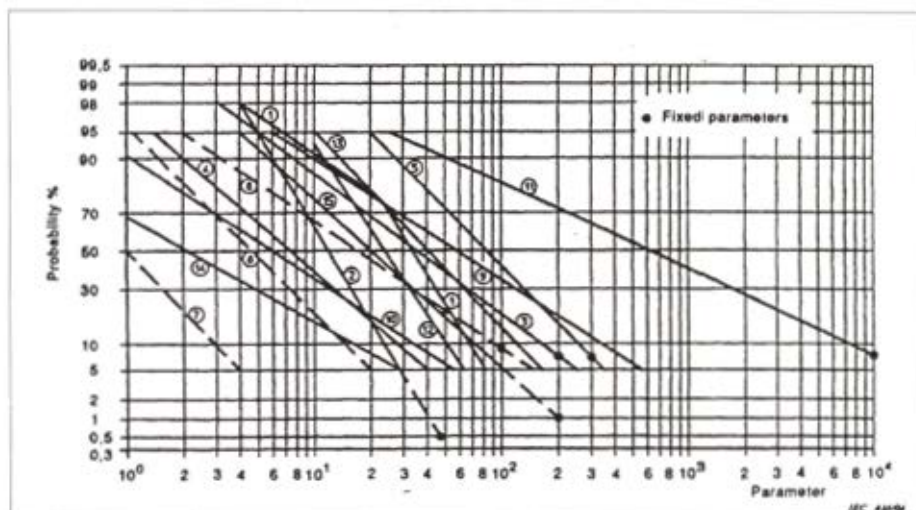
Tabla 6.
Parámetros de distribución ln - normal para cada una de las curvas de corriente de retorno del rayo.

	Cigre	Brasil	Malasia	Colombia	Rodesia
Media [kA]	34.8	46.7	41.4	52.2	33
Mediana [kA]	20	43	36	50	32.5
$\sigma \ln I$	1.22	0.63	0.78	0.75	0.67

Es posible esperar valores de probabilidad de corriente de retorno del rayo más altos en zonas tropicales, y los resultados de Kuala Lumpur, Rodesia, Brasil, Malasia y Colombia parecen apoyar este argumento. No obstante, es prematuro sacar conclusiones definitivas y es necesario continuar con las mediciones espacio-temporales de este parámetro, hasta tener una serie de tiempo confiable de por lo menos quince años.

Sin embargo, los anteriores resultados son importantes evidencias preliminares que concuerdan con la hipótesis de investigación planteada, es decir, que las magnitudes probables de la corriente de retorno del rayo en zona tropical como Colombia pueden ser mayores que en otras latitudes. Esta condición se ha tenido en cuenta para la actualización de los parámetros del rayo en el Comité Cigre y para aplicaciones en el diseño de protección contra rayos de equipos eléctricos y electrónicos en zonas tropicales.

Como complemento a los parámetros del rayo analizados en los ítems anteriores, se presentan a continuación los parámetros que la comunidad internacional ha adoptado a través de la Norma IEC 61024-1 para protección contra rayos, y que corresponden a las mediciones realizadas en latitudes templadas, diferentes a las realizadas en la latitud tropical. La figura 23 presenta las curvas de probabilidad de los parámetros del rayo y la tabla 7, la distribución logarítmica normal de la media μ y dispersión σ_{\log} calculados de los valores 95% y 5%, según la publicación Cigre, *Electra* Nos. 41 y 69.



Parameter	Scale of abscissa	Positive flash	First positive stroke	Negative flash	First negative stroke	Negative subsequent strokes
I	kA		③ •		①	② •
Q_1	C	⑤ •		④		
Q_2	C		⑧ •		⑥	⑦
W/R	kA Ω		⑪ •		⑨	⑩
$(\Delta I \Delta t)_{max}$	kA μ s		⑭		⑫	⑬
$(\Delta I \Delta t)_{20\%/90\%}$	kA μ s					⑮ •

Figura 23. Probabilidades de parámetros del rayo según IEC 61024-1.

Tabla 7.

Distribución logarítmica normal de los parámetros del rayo media μ y dispersión σ_{lg} calculados de los valores 95% y 5% según publicación Cigre, *Electra* No. 41 y No. 69.

Parámetro	Unidades	Media μ	Dispersión σ_{lg}	Tipo de "stroke"	Línea en la figura 23
I	kA	61.1	0.576	Primero negativo corto (80%)	1A
		33.3	0.263	Primero negativo corto (80%)	1B
		11.8	0.233	Subsecuente negativo corto	2
		33.9	0.527	Primero positivo corto (sencillo)	3
Q_{flash}	C	7.21	0.452	Descarga negativa	4
		83.7	0.378	Descarga positiva	5
Q_{short}	C	4.69	0.383	Primero negativo corto	6
		0.938	0.383	Subsecuente negativo corto	7
		17.3	0.570	Primero positivo corto (sencillo)	8
W/R	kJ/ Ω	57.4	0.596	Primero negativo corto	9
		5.35	0.600	Subsecuente negativo corto	10
		612	0.844	Primero positivo corto	11
di/dt_{max}	kA/ μs	24.3	0.260	Primero negativo corto	12
		40	0.369	Subsecuente negativo corto	13
		2.53	0.670	Primero positivo corto	14
di/dt_{waves}	kA/ μs	20.1	0.420	Subsecuente negativo corto	15
Q_{long}	C			Largo	
T_{long}	S			Largo	
Duración del frente	μs	5.69	0.304	Primero negativo corto	
		0.995	0.398	Subsecuente negativo corto	
		26.5	0.534	Primero positivo corto (sencillo)	
Duración del stroke	μs	77.5	0.250	Primero negativo corto	
		30.2	0.405	Subsecuente negativo corto	
		224	0.578	Primero positivo corto (sencillo)	
Intervalo de tiempo	ms	32.4	0.405	Múltiples negativos	
Duración total de la descarga	ms	12.8	1.175	Descargas negativas (todas)	
		167	0.445	Descargas negativas (no sencilla)	
		83.7	0.472	Descarga positiva	

Campo eléctrico asociado al rayo. Variación con respecto a la latitud

El estudio de la variación del campo eléctrico producido por una descarga eléctrica atmosférica con respecto a la latitud forma parte del análisis espacial sobre descargas eléctricas atmosféricas, y es importante porque su medición permite determinar la polaridad, magnitud y rata de aumento de la corriente de retorno del rayo, así como la forma de onda de todos los demás componentes de un rayo a tierra.

Medición mundial del campo eléctrico asociado al rayo

En forma equivalente a la corriente, se ha establecido que la amplitud del campo eléctrico pico de la primera descarga de retorno en un rayo múltiple es casi siempre mayor que los valores correspondientes a las descargas subsecuentes de ese mismo rayo; por esta razón, el estudio de la magnitud y la forma de onda de este parámetro generalmente se refiere al campo eléctrico asociado con la primera descarga de retorno del rayo.

Para poder realizar una comparación sobre la variación latitudinal del campo eléctrico radiado por una descarga eléctrica atmosférica, se utilizaron datos de la firma PTT de Suiza³² y los datos de mediciones en Florida (Estados Unidos) y Rodesia, referenciados en artículos de circulación internacional y las mediciones hechas en Colombia.

El campo eléctrico vertical medido en Suiza emplea el sistema LPATS en seis sitios simultáneamente. Este sistema ha registrado datos de localización de rayos y amplitudes de campo desde 1989, y formas de onda de campo eléctrico desde 1990.



Figura 24. Mapa ilustrativo de la ubicación geográfica de Suiza y las antenas de recepción.

32 Los datos de campo eléctrico vertical radiado por una descarga de retorno, medidos en Suiza, se lograron obtener gracias a la colaboración del doctor Marcos Rubinstein (PTT Suiza) y al ingeniero Luis J. Bermúdez, estudiante colombiano de la Escuela Politécnica Federal de Lausana.

Los lugares de medición corresponden a las ciudades de Bern, Basell, St. Gallen, St. Moritz, Brig y Rolle, cuya ubicación y sensor asignado se presentan en la figura 24 y en la tabla 8. Las mediciones se realizaron por medio de los cinco primeros sensores, el 5 de mayo de 1994.

Tabla 8.
Datos correspondientes al sistema de medición suizo LPATS.

Antena No.	Ciudad	Latitud	Longitud
1	Bern	46.9547	7.4764
2	Basel	47.5504	7.5889
3	St. Gallen	47.4184	9.3556
4	St. Moritz	46.4974	9.8410
5	Brig	46.3169	7.9848
6	Rolle	46.4598	6.3384

Se calculó la distribución de probabilidad acumulada, la cual se muestra en la figura 25 y se calcularon los valores de mediana, valor promedio y desviación estándar de los datos; véase tabla 9.

Tabla 9.
Datos estadísticos para el campo eléctrico vertical de los registros obtenidos en Suiza, 1994.

Lugar y fecha	Número de datos	Promedio (V/m)	Desviación estándar (V/m)	Mediana (V/m)
Suiza - mayo de 1994	67	3.38	2.47	2.4

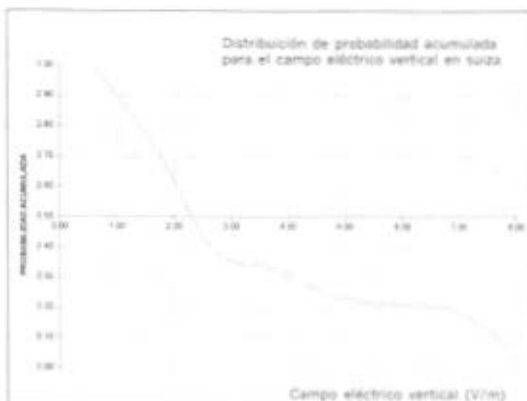


Figura 25. Curva de probabilidad acumulada de los valores de campo eléctrico vertical en Suiza.

Lin *et al.* presentaron en 1979³³ la caracterización de los campos eléctricos y magnéticos asociados a la corriente de retorno del rayo en Florida (Estados Unidos) usando datos provenientes de dos estaciones separadas: Kennedy Space Center (KSC), y Ocala; véase figura 26.



Figura 26. Mapa ilustrativo de la ubicación geográfica de Florida y las antenas de medición.

El sistema de medida fue similar al descrito por Fisher y Uman (1972) y Krider *et al.* (1977) para campo eléctrico vertical, con anchos de banda de 1 Hz a 1 MHz en 1974 y 0.2 Hz a 1 MHz en 1975-1976.

Los valores medios obtenidos en las dos series de mediciones KSC - Gainesville y Ocala - Gainesville se presentan en la tabla 10 con la desviación estándar correspondiente a estos datos.

Tabla 10.
Valores de campo eléctrico vertical radiado por una descarga de retorno en Florida.

Fecha	Estación	Valor medio (V/m)	Desv. Est. (V/m)
Junio - julio de 1974, 1975 y 1976	KSC	6.7	3.8
	Gainesville	5.0	3.1
Agosto - septiembre de 1974	Ocala	5.8	2.5
	Gainesville	5.4	2.3

En la tabla 11 se encuentra el valor promedio y la desviación estándar de los datos. Las distribuciones de probabilidad acumulada (véase figuras 27 y 28) proporcionan una información más completa acerca de los datos registrados, y las medianas correspondientes se presentan en la tabla.

33 Y. T. Lin *et al.* "Characterization of Lightning Return Stroke Electric and Magnetic Fields from Simultaneous Two-Station Measurements", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 84, No. C10, October 20, 1979, pp. 6307-6314.

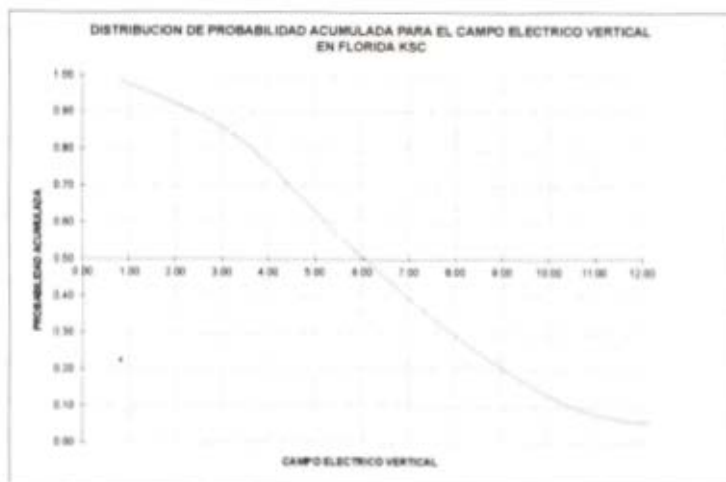


Figura 27. Distribución de probabilidad acumulada de datos de campo eléctrico vertical radiados por una descarga de retorno, KSC, Florida.

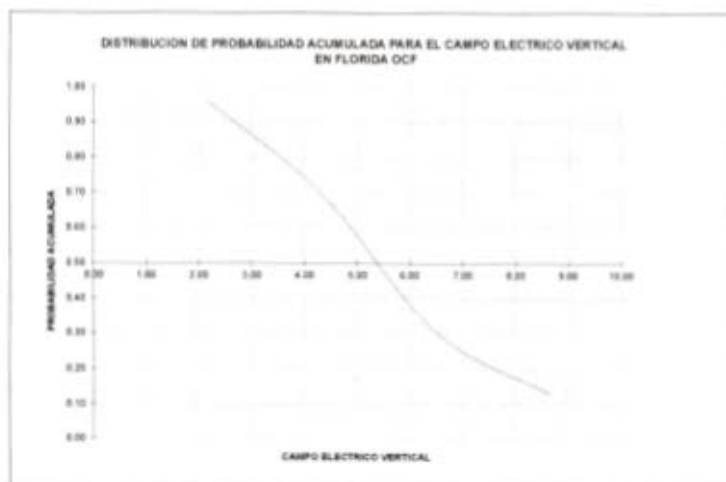


Figura 28. Distribución de probabilidad acumulada de datos de campo eléctrico vertical radiados por una descarga de retorno, Ocala, Florida.

Tabla 11.

Datos de campo eléctrico vertical de una descarga de retorno, registrados por las estaciones de KSC y Ocala.

Estaciones	Media (V/m)	Desv. Est. (V/m)	Mediana (V/m)
KSC	6.54	3.71	6.11
Ocala	5.39	2.43	5.22

En 1988³⁴, Thomson *et al.* analizaron mediciones de campo eléctrico vertical y campo eléctrico horizontal de 42 descargas de retorno en 27 rayos, a una distancia de 7 km a 43 km. Estos datos fueron obtenidos en Kennedy Space Center (KSC) de la NASA, usando una "antena esférica elevada", con un ancho de banda de 3 Hz a 4 MHz. Los strokes estudiados en este lugar ocurrieron en un intervalo de 6 minutos el día 11 de agosto de 1984. El campo eléctrico horizontal medido se comparó con el obtenido mediante una fórmula que modela el campo como una radiación de onda plana sobre una tierra homogénea de conductividad y permitividad uniforme.

Las formas de onda características de campo eléctrico vertical encontradas fueron registradas por el sistema local KSC con un error de 2 km o menos, corroboradas con el sistema de tiempo de arribo. Para efectos de análisis se extractaron del artículo tres registros de la forma de onda de campo eléctrico vertical (véase figura 29) y en la tabla 12 se resumen los datos encontrados y normalizados a 100 km.

Tabla 12.
Datos de campo eléctrico vertical, registrados por la estación KSC, Florida.(Adaptado de Thomson *et al.*, 1988).

Valor de campo pico [V/m]	52	39	66.2
Distancia [Km]	7	33	16
Campo normalizado a 100 Km [V/m]	3.64	12.87	10.6
Promedio de campo eléctrico [V/m]	9.04		
Desviación estándar [V/m]	4.81		

El valor promedio de 9.04 V/m es alto comparado con el promedio de los datos analizados antes, en la misma localidad.

En la figura 29 es posible visualizar la influencia de la distancia entre el sensor y el lugar de impacto del rayo sobre la forma de onda del campo eléctrico.

Para estudiar el campo eléctrico asociado con una descarga eléctrica atmosférica en un área tropical, Wang (1963) desarrolló una investigación en la Universidad de Malaya, Singapur. En primer lugar, usó el método de la esfera de Wilson como antena y el electrómetro capilar como medidor, para estudiar los cambios de campo en la malla electrostática producidos por la descarga completa.

34 Thomson, E. M. *et al.*, "Horizontal Electric Fields from Lightning Return Strokes", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 93, No. D3, March 20, 1988, pp. 2429-2441.

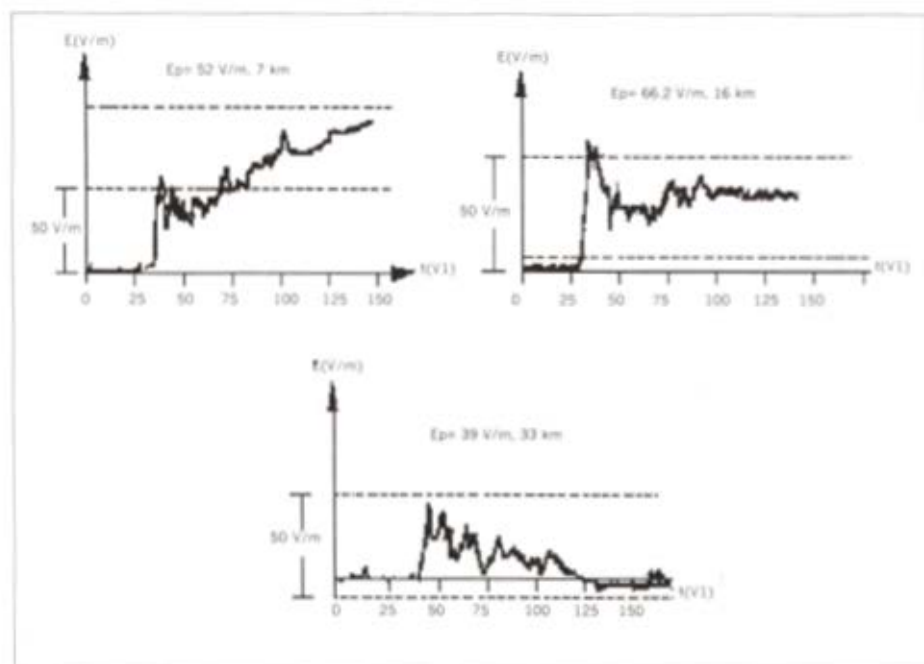


Figura 29. Formas de onda de campo eléctrico vertical, registradas por la Estación KSC, Florida, 1984. (Adaptado de Thomson et al., 1988).

Posteriormente, el electrómetro capilar fue remplazado por un oscilógrafo, con el cual se registraron los cambios de campo producidos por las descargas subsecuentes del rayo. Con el electrómetro se registraron más de 3000 descargas eléctricas atmosféricas en 37 tormentas, en la estación lluviosa con mayor actividad eléctrica atmosférica en el área, durante el período comprendido entre 1950 y 1951. Estas descargas eléctricas atmosféricas se clasificaron para su estudio en:

- Rayos nube-tierra
 - Simples
 - Complejos
- Rayos nube-nube

Para efectos de análisis de los rayos a tierra, Wang aplicó el modelo donde se aproxima la nube a un dipolo eléctrico simple y se relaciona la variación de campo debida a la descarga completa, observada en un punto P a una distancia L del rayo, de la siguiente forma:

$$L^2 + H^2 = M^{2/3} * F^{-2/3} \quad (10)$$

Siendo $M = 2QH$

Donde:

F : Variación de campo eléctrico a una distancia L

M : Momento eléctrico de la descarga completa

H : Altura de la carga negativa de la nube

Q : Carga transferida

La ecuación es lineal en L^2 y $F^{-2/3}$, y de esta manera es posible realizar un análisis estadístico de descargas a tierra con los valores de variación de campo eléctrico y distancia medidos. El momento eléctrico promedio y la altura promedio de la descarga pueden ser deducidos a partir de la pendiente y la intersección de la línea del mejor ajuste de los valores observados en la gráfica $L^2 - F^{-2/3}$.

Para el estudio de las descargas subsecuentes se usaron los datos obtenidos por medio del oscilógrafo de rayos catódicos en 118 descargas completas presentes en 33 tormentas entre 1952 y 1953. Debido a que el principal interés era el efecto neto producido por las descargas subsecuentes, se midió el cambio de campo neto de la descarga subsecuente, el cual es la suma algebraica del cambio del campo del líder, el cambio de campo de la descarga de retorno y la porción lenta de cambio de campo siguiente a la descarga de retorno. Para las descargas subsecuentes de un rayo a tierra, el cambio de campo F está relacionado por la misma expresión de la primera parte.

Los resultados obtenidos indican que en un rayo a tierra existe la tendencia general de las descargas a proporcionar menores cambios de campo a medida que el rayo progresa. En la tabla 13 se presentan los resultados obtenidos a partir de las mediciones; es decir, el momento eléctrico y la carga asociados con los cambios de campo eléctrico.

Tabla 13.

Resultados obtenidos en las mediciones realizadas en zona tropical.

	Momento eléctrico (Culombio/Km)	Carga transferida (Culombios)
Descarga total a tierra	256	25
Primera descarga a tierra	51	5.7

Esta investigación proporciona datos de cambios de campo eléctrico asociados con descargas eléctricas atmosféricas en una zona tropical; sin embargo, en la primera parte de la investigación, los datos medidos corresponden a la descarga completa, y en la segunda parte corresponden a la descarga subsecuente, es decir,

a la suma algebraica del campo eléctrico asociado al líder escalonado, a la descarga de retorno y a la porción lenta posterior a la descarga de retorno. Por tanto, no es conveniente usar estos datos para el análisis estadístico de los registros de campo eléctrico, ya que este análisis se desarrolla principalmente para el campo eléctrico pico de la forma de onda correspondiente a la corriente de retorno del rayo.

No obstante, a partir de los resultados obtenidos en la investigación, se deduce un valor promedio de la carga transferida por un rayo a tierra de $Q=25$ culombios. Este valor es 25% mayor al valor encontrado por Wilson (1920) en Inglaterra para la carga promedio disipada en un rayo a tierra ($Q=20$ culombios), usando el mismo sistema de medición. Wang sugiere que la diferencia de los valores encontrados puede ser debido a la naturaleza de las tormentas tropicales. Este hecho indicaría la presencia de un mayor valor de carga transferida en zona tropical (Singapur), respecto a la zona no tropical (Inglaterra).

Aunque la mayor parte de la actividad eléctrica atmosférica a nivel global se presenta entre los trópicos, pocos estudios se han desarrollado en esta zona para medir los diferentes parámetros del rayo. Cooray y Lundquist (1985) realizaron una investigación en Sri Lanka, ubicada en zona tropical y presentaron algunas de las características de los campos de radiación generados por el líder escalonado, descargas de retorno y procesos en el interior de la nube. Los datos reportados fueron obtenidos en aproximadamente 10 tormentas nocturnas de tipo convectivo en Sri Lanka.

En el estudio se observó un amplio número de pulsos de baja amplitud precediendo los campos de radiación de la primera descarga de retorno, con separaciones aproximadamente regulares. Se asume que éstas eran producidas por el líder escalonado. La razón de la amplitud del último pulso del líder, por lo general el más largo de todos los pulsos, al pico de la descarga de retorno presentó un valor medio de 0.1. Así mismo, se encontró una alta correlación entre estos dos parámetros por medio de la expresión $E_r = k E_l^v$, donde E_r es el campo pico asociado a la descarga de retorno, E_l es el campo asociado al líder escalonado y con k variando de 8 a 12 y v de 0.6 a 0.7. A partir de estos valores y considerando $\log(E_r/E_l)$ normalmente distribuido, se estima el valor medio de $\log E_r$ entre 0.62 y 1.06 y la desviación estándar entre 0.24-0.37.

Una estimación del campo eléctrico pico de la descarga de retorno normalizada a 100 km, a partir de 67 observaciones en las tres tormentas mencionadas anteriormente, proporciona los siguientes valores:

- Valor medio de $\log E_r$: 0.95. Equivalente a valor medio de E_r : 8.9 V/m
- Desviación estándar de $\log E_r$: 0.19. Equivalente a desviación estándar de E_r : 1.55 V/m.

De acuerdo con una investigación realizada en Florida, los campos de radiación de la primera descarga de retorno comienzan con una porción inicial o frente que aumenta lentamente por aproximadamente unos pocos microsegundos, a aproximadamente la mitad de la amplitud pico del campo. Siguiendo el frente, los campos aumentan abruptamente al pico en aproximadamente cientos de nanosegundos. En los datos registrados en Sri Lanka se observó una estructura similar en las formas de onda de la primera descarga de retorno (véase figura 30).

Los resultados obtenidos de estas características de la estructura de la forma de onda coinciden con los datos obtenidos en investigaciones realizadas en Florida y Suecia. El pico inicial de algunas de las primeras descargas de retorno observadas en Sri Lanka son seguidas por picos subsiguientes claramente definidos. Por otra parte, sugieren que el tiempo del cruce por cero, presente en la forma de onda bipolar del campo eléctrico radiado distante, puede diferir bajo diferentes condiciones meteorológicas.

En 1993, Parra y Maestre realizaron mediciones de campo eléctrico vertical con antena de placas paralelas, en la región de La Palma, Colombia. Las mediciones se registraron para distancias menores a 10 km, y por consiguiente se presenta un efecto de atenuación mínimo; por otra parte, los errores presentes en la calibración y en el proceso de medición no se consideran en el análisis que se realiza con estos datos en este trabajo. Por ser datos provenientes de tormentas cercanas al sitio de medición, la aplicación de la constante determinada en la calibración de la antena de placas paralelas no afecta los resultados.

Al calcular la distribución de probabilidad acumulada descendente para los datos de campo eléctrico vertical se obtiene la figura 31.

En la tabla 14 se listan los valores para la mediana, valor promedio y desviación estándar de la amplitud de campo eléctrico máximo normalizado a 100 km para 35 descargas de retorno negativas.

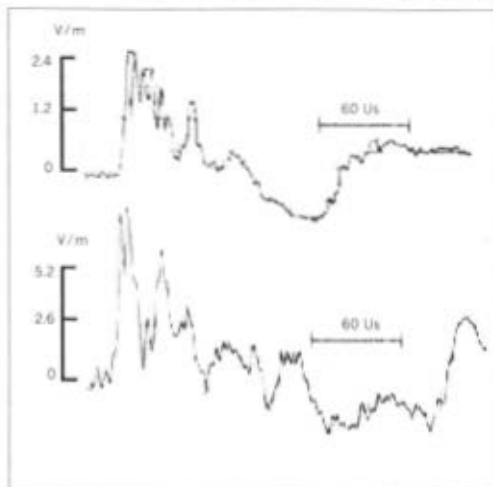


Figura 30. Formas de onda de campo eléctrico obtenidas en Sri Lanka, zona tropical. Adaptado de Cooray y Lundquist (1985).

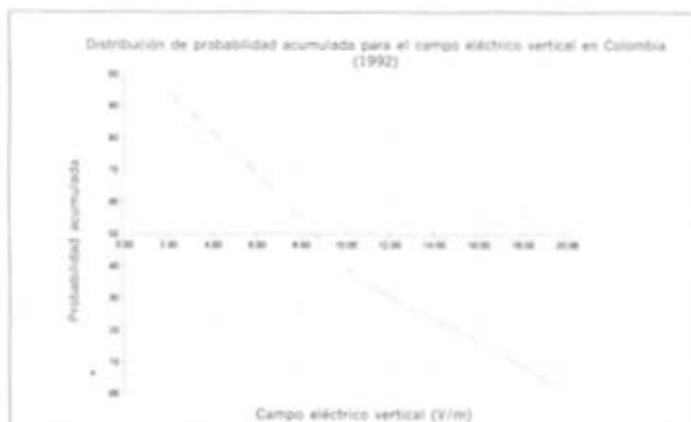


Figura 31. Distribución de probabilidad acumulada para los datos de campo eléctrico vertical en Colombia, 1993. Adaptado de Parra y Maestre, 1993.

Tabla 14.
Datos estadísticos para el campo eléctrico vertical obtenidos para los registros de Colombia, 1993.

Lugar	Número de datos	Promedio (V/m)	Desviación estándar (V/m)	Mediana (V/m)
Colombia 1993	35	9,49	5,3	8,6

Briceño y Rondón realizaron las más recientes mediciones de campo eléctrico vertical asociado a una descarga eléctrica atmosférica en Colombia, por medio de la antena de placas paralelas, calibrada en el laboratorio de alta tensión de la Universidad Nacional de Colombia. Estas mediciones se llevaron a cabo durante los meses de noviembre y diciembre de 1995 en las instalaciones de la Universidad, sede Bogotá, empleando la antena de placas paralelas, un osciloscopio digital de alta resolución, marca Tektronix, y equipo de medición asociado. La antena se instaló a nivel del suelo a una altura de $h = 84$ cm, de acuerdo con las especificaciones de la calibración realizada en laboratorio.

Los datos registrados de la forma de onda del campo eléctrico asociado a la descarga de retorno, mostrados en la figura 32, se procesaron y compararon con los datos suministrados por el sensor TSS-420 instalado en la Universidad. La distancia de impacto de la descarga se obtuvo mediante los registros obtenidos por el Sis-

tema de información de descargas de ISA y las antenas LLP pertenecientes a EPM (Empresas Públicas de Medellín). La ubicación del sensor TSS420 y los sistemas de localización de descargas de ISA y EPM son mostrados en el mapa de la figura 33.

En este procesamiento se determinaron las distancias entre el punto de impacto del rayo y el sitio de medición, y la relación entre el campo eléctrico vertical radiado y el voltaje medido por la antena de placas paralelas, considerando que:

- Las antenas de los Sistemas de información de descargas de ISA y EPM proporcionan la ubicación en latitud y longitud del punto de impacto de la descarga.
- La máxima diferencia de tiempo entre los registros de la antena de placas paralelas y los registros de las demás antenas fue menor a diez segundos.
- El sensor LLP TSS-420, ubicado en predios de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, proporciona el valor del campo eléctrico pico de la descarga de retorno con un error del 10%.
- La relación entre el campo eléctrico vertical generado por una descarga, respecto al voltaje medido por la antena de placas paralelas para la componente de campo eléctrico radiado (tormentas lejanas), se calculó a partir de la relación entre el valor de campo eléctrico pico dado por el sensor TSS-420 y el valor de voltaje de la antena de placas paralelas en diversas mediciones de prueba realizadas, expresada por:

$$E_v = 197.58 V_{ant} + 13.3 \quad (11)$$

donde,

E_v : Campo eléctrico vertical pico

V_{ant} : Tensión medida por la antena de placas paralelas

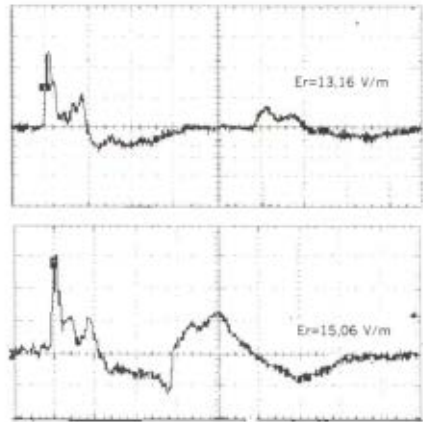


Figura 32. Forma de onda de campo eléctrico, Colombia (1995).

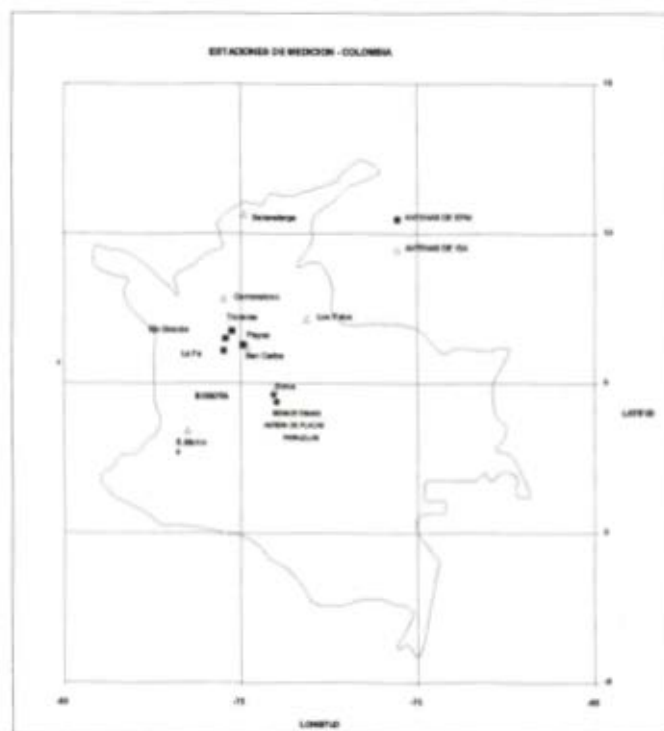


Figura 33. Ubicación geográfica de las antenas de medición y localización en Colombia, situación de 1996.

Análisis de las mediciones del campo eléctrico asociado a una descarga eléctrica atmosférica en el mundo

El análisis de las mediciones de campo eléctrico asociado a una descarga eléctrica atmosférica se consideró más exacto realizarlo con base en las distribuciones de probabilidad acumulada de este parámetro, obtenidas a partir de los datos registrados en las diferentes mediciones a nivel mundial. La mediana y el valor promedio de estos datos son parámetros estadísticos representativos de los datos, pero menos exactos para realizar el análisis de las mediciones de campo eléctrico. Así mismo, es conveniente elaborar las distribuciones de probabilidad acumulada a partir del campo eléctrico normalizado a una distancia determinada, en este caso a 100 km, ya que el campo eléctrico pico obtenido en la forma de onda registrada es inversamente proporcional a la distancia entre el sitio de medición y el punto de impacto del rayo y, por consiguiente, para diferentes distancias presentes en las mediciones se van a obtener diferentes valores de campo eléctrico pico por efectos de atenuación en el campo eléctrico radiado. Este procedi-

miento se realiza de la siguiente forma, de acuerdo con lo propuesto por Uman en su libro *Lightning Discharge*:

$$\bar{E} = \frac{E * D}{10^5} \tag{12}$$

\bar{E} : Magnitud de campo eléctrico normalizado a 100 km [V/m]

E: Magnitud de campo eléctrico registrado [V/m]

D: Distancia entre el punto de impacto del rayo y el lugar de medición [m]

En la tabla 15 se presenta un resumen de las investigaciones realizadas sobre el campo eléctrico asociado al rayo; de esta forma se detallan el sitio y el año de investigación, así como el método de medición, los parámetros registrados y los resultados obtenidos a partir de estas mediciones.

Tabla 15.
Relación detallada de investigaciones realizadas en el mundo sobre el campo eléctrico generado por una adescarga eléctrica atmosférica.

Investigador	Sitio de medición	Año de medición	Método de medición	Parámetro registrado	Mediana (V/m)
1. Rubinstein	Suiza Latitud: 47°N	1994	Sistema LPATS	Forma de onda de campo eléctrico 67 descargas de retorno negativas	24
2. Lin <i>et al.</i>	Estados Unidos Latitud: 28°30' N	1974-1976	-	Campo eléctrico pico 89 descargas de retorno	KSC 6.11 OCALA 5.22
3. Thomson <i>et al.</i>	Estados Unidos Latitud: 28° N	1984	Antena esférica elevada	Formas de onda de campo eléctrico, descargas de retorno	9.04
4. Wang	Singapur Latitud: 2° N	1963	Esfera de Wilson con: Electrómetro Capilar y oscilógrafo de rayos catódicos	- Campo eléctrico asociado a la descarga completa - Campo eléctrico asociado a las descargas subsecuentes del rayo	-
5. Cooray y Lundquist	Sri Lanka Latitud: 9° N	1985	-	Campo eléctrico pico 67 descargas de retorno	Valor promedio (V/m) 8.9

Tabla 15.
Relación detallada de investigaciones realizadas a nivel mundial sobre el campo eléctrico generado por una adescarga eléctrica atmosférica (Continuación).

Investigador	Sitio de medición	Año de medición	Método de medición	Parámetro registrado	Mediana (V/m)
6. Parra y Maestre	Colombia Latitud: 4° N	1993	Antena de placas paralelas	Forma de onda de campo eléctrico 35 descargas de retorno negativas	8.6
7. Programa PAAS Briceño y Rondón	Colombia Latitud: 4°N	1995	Antena de placas paralelas	Forma de onda de campo eléctrico 167 descargas de retorno negativas	d < 100 km 9.7
8. Uman	Diferentes latitudes	-	-	Campo eléctrico pico normalizado a 100 km	6 - 8

Es conveniente, entonces, seleccionar los datos obtenidos de acuerdo con las distancias de medición como se presenta en la tabla 16. En el caso de los datos procesados para Colombia (1995) se observa la fuerte influencia ejercida por el rango de distancias sobre los datos estadísticos de mediana, valor promedio y desviación estándar.

Tabla 16.
Datos estadísticos de campo eléctrico vertical, expresado en V/m, para diferentes intervalos de distancia.

Lugar	No. datos	Distancia	Mediana	Promedio	Desv. Est.
Colombia 1993	35	Menor 10 km	8.6	9.49	5.3
Florida (KSC)	89	Menor 10 km	6.11	6.54	3.71
Florida (Ocala)	22	Menor 10 km	5.22	5.39	2.43
Suiza	67	Mayor 100 km	2.4	3.38	2.47
Colombia (1995)	167	Todas	20.1	21.47	12.20
	16	Menor 100 km	9.7	9.88	4.57
	35	Menor 150 km	10.33	11.2	4.94
	64	Menor 200 km	12.64	14.3	9.52
	146	Mayor 100 km	20.22	21.79	10.56

Para efectuar una mejor comparación de las distribuciones de probabilidad acumulada, se clasificaron los datos de campo eléctrico, de acuerdo con los siguientes criterios: distancias mayores a 100 km y distancias menores a 100 km.

En la figura 34 se pueden observar las diferencias entre las curvas de probabilidad acumulada de los datos de Colombia (1995), discriminados para ambos casos.

Para el primer caso, solamente se disponen de los datos obtenidos en Suiza y los correspondientes a Colombia (1995). En la tabla 17 se observan mayores valores de mediana para las mediciones realizadas en Colombia (1995), por un amplio margen, respecto a los datos de Suiza. Sin embargo, los bajos valores obtenidos en Suiza pueden ser debidos a la ubicación de los receptores en la zona montañosa suiza, y este hecho puede producir un efecto de atenuación sobre los campos eléctricos pico radiados.

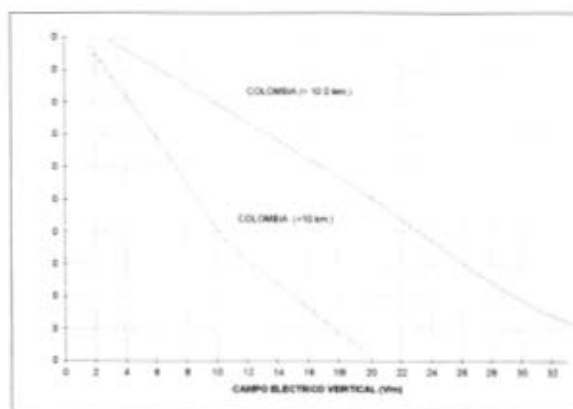


Figura 34. Distribuciones de probabilidad acumulada para Colombia a diferentes intervalos de distancias. (<100 km) (>100 km).

Tabla 17.

Porcentajes correspondientes a las distribuciones de probabilidad acumulada de campo eléctrico vertical para distancias mayores a 100 km.

Lugar	95%	50%	5%
Colombia (1993)	4.8	20,22	42
Suiza	0.98	2.4	8

En el segundo caso se excluyen los datos obtenidos en Suiza y se consideran los valores asociados a distancias menores a 100 km de Colombia (1993), Colombia (1995), Florida (Ocala), Florida (KSC). En la figura 35 se grafican las distribuciones de probabilidad acumulada asociada a cada conjunto de datos; en la figura 36 se presenta la ubicación geográfica de los diferentes sitios de medición analizados.

En la tabla 18 se presenta el análisis estadístico correspondiente a las curvas de probabilidad acumulada, sin destacar los valores que son más significativos.

Tabla 18.
Porcentajes correspondientes a las distribuciones de probabilidad acumulada de campo eléctrico vertical para distancias menores a 100 km.

Lugar	95%	50%	5%
Colombia (1993)	2	8.6	19
Colombia (1995)	2.8	9.7	15.9
Florida (KSC)	1.5	6.11	12
Florida (Ocala)	2.2	5.22	9.8

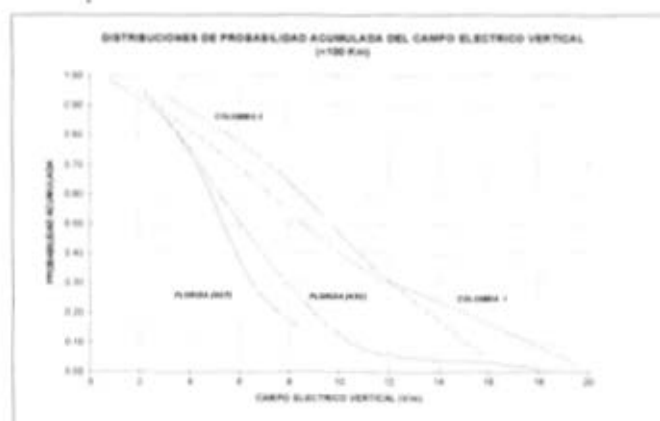
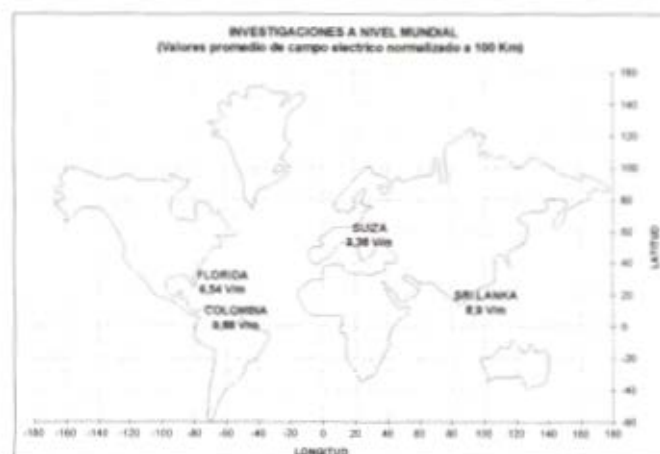


Figura 35.
 Distribuciones de probabilidad acumulada para las diferentes mediciones³⁵. Distancias menores a 100 km. Colombia 1=1993, Colombia 2=1995, OCF = Ocala

Figura 36.
 Ubicación geográfica de los sitios analizados.



³⁵ Los valores promedio para Florida (KSC), Colombia (1995) y para Sri Lanka corresponden a los valores encontrados con mediciones de campo eléctrico vertical para distancias menores a 100 km. El valor de Suiza corresponde al valor promedio de campo eléctrico vertical encontrado en mediciones con distancias mayores a 100 km.

En general, se observan valores superiores de mediana para el conjunto de datos obtenidos en Colombia respecto a las mediciones realizadas en Florida. Este hecho es respaldado por las distribuciones de probabilidad acumulada graficadas en la figura 36. Es importante mencionar la similitud entre las dos distribuciones asociadas a Colombia y, por otra parte, la cercanía entre las distribuciones correspondientes a Florida, Estados Unidos.

Al realizar la comparación entre el valor promedio de cada serie de datos, nuevamente se obtienen mayores valores para los datos de Colombia, respecto a las demás regiones ubicadas en latitudes no tropicales (véase tabla 19). En esta parte, se debe considerar el valor obtenido en Sri Lanka, ubicada en zona tropical, el cual fue de 8.9 V/m para el valor promedio de campo pico normalizado a 100 km. Este valor es aproximadamente similar a los valores obtenidos para Colombia y superior a los correspondientes a Florida.

Tabla 19.
Valor promedio y desviación estándar correspondientes a las distribuciones de probabilidad acumulada de campo eléctrico vertical para distancias menores a 100 km.

Lugar	Valor promedio[V/m]	Desviación estándar[V/m]
Colombia (1993)	9.88	4.57
Colombia (1995)	9.49	5.3
Florida (KSC)	6.54	3.71
Florida (Ocala)	5.39	2.43
Sri Lanka	8.9	1.55

Sin embargo, en el análisis de la información obtenida sobre campo eléctrico vertical asociado a una descarga eléctrica atmosférica, se observa la importancia de considerar los siguientes aspectos:

- Número de datos disponibles
- Clasificación de los datos de acuerdo con la distancia de medición
- Época del año en la cual se desarrollaron las mediciones
- Ubicación del sistema de medición y orografía del terreno

En el primer aspecto se debe proceder con cuidado, ya que no es apropiado comparar una muestra de datos relativamente pequeña con una muestra superior de datos; de esta forma una mayor muestra de datos puede proporcionar una información más confiable y representativa del parámetro medido. Para las medi-

ciones hechas en Colombia en 1995 (< 100 km) se obtuvo una mediana de 9.7 V/m con 16 datos, mientras que las hechas en 1993 dieron una mediana de 8.6 V/m con 35 datos. Para Florida (KSC) dio un valor de 6.11 V/m con 89 datos y para Florida (Ocala) un valor de 5.22 V/m con 22 datos. De acuerdo con el criterio de número de datos obtenidos, es posible comparar las medianas de Colombia 1995 y Florida (Ocala) y se obtiene un mayor valor de campo eléctrico en Colombia.

En el segundo factor, relacionado con la distancia, se consideran los datos de Florida y Colombia (1993), ya que la gama de datos se registró para distancias menores a 10 km en ambos casos, y el número de datos se puede considerar aceptable para ambos, en esta comparación se obtiene de nuevo un valor superior para la mediana de campo eléctrico obtenida en Colombia.

En Suiza se obtuvo un valor de 2.4 V/m para la mediana de 67 datos registrados a distancias mayores de 100 km, y en Colombia 1995 (> 100 km) se encontró un mayor valor de mediana de 20.22 V/m para 146 datos registrados en el mismo intervalo de distancia; sin embargo, es importante destacar que la orografía de la zona puede influir en la medición de campo eléctrico.

El factor temporal puede ser decisivo en los resultados de las mediciones, dado que es posible obtener diferentes valores en la temporada más tormentosa del año, respecto a los encontrados en una temporada menos tormentosa.

Así mismo, los factores espaciales influyen en la condición meteorológica de una región. Uno de estos factores son las montañas que actúan de barreras contra el viento, tal como se explicó en la primera parte del presente capítulo. Otros factores espaciales que pueden modificar la situación meteorológica son la contaminación de las ciudades y la presencia de edificios de diferente altura.

Todo lo anterior debe ser considerado en los análisis de las mediciones de parámetros del rayo, ya que el ambiente climático influye notablemente en la permitividad del aire, la cual afecta el campo eléctrico radiado por una descarga eléctrica atmosférica.

De acuerdo con los resultados presentados en este ensayo, se puede inferir que los valores probables de magnitud de campo eléctrico vertical radiado por una descarga eléctrica atmosférica pueden ser mayores en regiones ubicadas en la zona tropical del planeta respecto a regiones no tropicales.

Este argumento es apoyado por la similitud entre el valor promedio de campo eléctrico obtenido en Sri Lanka, ubicado en la misma latitud de Colombia, y los valores obtenidos en las mediciones realizadas en Colombia. Así mismo, estos valores promedio están por encima del intervalo encontrado por Uman, entre 6 y 8 V/m para el promedio del campo pico inicial de la descarga de retorno bajando

carga negativa a tierra, normalizado a 100 km, para diferentes investigaciones a nivel mundial.

La investigación realizada por Wang en Singapur, otra zona tropical, proporcionó un mayor valor medio de carga transferida por los rayos a tierra respecto a la investigación conducida por Wilson en Inglaterra con el mismo sistema de medición usado por Wang.

Una conclusión que podemos inferir de los anteriores análisis es que, en general, se encontraron magnitudes mayores de campo eléctrico generado por una descarga eléctrica atmosférica en Colombia, ubicada en la latitud tropical de la tierra, respecto a Florida y Suiza, ubicadas en zonas no tropicales. Esta conclusión permite insistir en la hipótesis de variación espacial y temporal en la magnitud de los parámetros del rayo.

La polaridad del rayo. Variación espacial y temporal

La polaridad del rayo para un área considerada (aspecto espacial) puede también afectar la estrategia de una óptima protección contra rayos. Desde las mediciones realizadas por Berger en las décadas del 1950 a 1970, en Monte San Salvatore (Italia, Suiza), se ha establecido que la distribución promedia de la polaridad de una descarga eléctrica atmosférica varía entre 90 y 95% para polaridad negativa y entre 5 y 10% para polaridad positiva.

Sin embargo, resultados de mediciones en diferentes redes de localización de rayos, como por ejemplo la LDN³⁶ de los Estados Unidos, muestran que una considerable proporción de descargas en época de invierno son de polaridad positiva. De los análisis de resultados con antenas de detección de rayos, tipo DF, en la costa este de los Estados Unidos, Orville (1987) reportó un cambio de polaridad en las descargas, como función de la temporada, con dominio de la polaridad positiva en la temporada de invierno. Orville también reportó un incremento en la mediana de la corriente pico de retorno del rayo para esta temporada.

En 1994, Sugimoto *et al.* presentan mediciones de corriente de retorno del rayo durante el invierno en Japón, siendo éste el período cuando la actividad de rayos es más severa, encontrando una relación cercana de uno a uno entre las descargas negativas y las positivas, pero ninguna diferencia estadística notable en las magnitudes de corriente.

36 Lightning Detection Network.

Uman en su libro *Lightning Discharge* (p. 54) sostiene que las condiciones que favorecen la aparición de rayos de polaridad positiva son aparentemente grandes elevaciones, climas fríos, latitudes altas y tormentas severas. Sin embargo, en los más de diez años de observaciones que hemos realizado con la antena TSS 420 y tres años con el Sistema de información de descargas de ISA, se ha encontrado que los rayos de polaridad positiva dependen no solamente de condiciones espaciales como elevación, clima y latitud, sino de condiciones temporales como hora diaria de presentación de la tormenta y período del año.

Con base en el Sistema de información de descargas de ISA, que cubre la región central colombiana, podemos reportar que algunas zonas experimentan cambios de polaridad como función del tiempo, medido en meses, mientras que en otras la proporción de descargas negativas-positivas permanece inalterable durante el año. Es así como se encontró, por ejemplo, que en la región ubicada en la Latitud 7° N, Longitud 74° W (cerca a la población de Segovia, Antioquia) la fracción de descargas positivas varía de 45% en noviembre a 100% en enero (1995-1996), respecto al total de descargas.

En el informe de operación del Sistema de información de descargas de ISA para 1997, se reporta que durante el período enero-abril, las descargas eléctricas atmosféricas en el territorio colombiano que cubre la red presentaron una distribución de 31% (215,513 descargas) positivas contra 69% (482,552 descargas) negativas. Sin embargo, para el período mayo-agosto, las descargas positivas aumentaron, con registros, por ejemplo para el mes de julio, de 46% (226,151 descargas) positivas y 54% (269,625 descargas) negativas.

Mediante los datos multianuales del sensor TSS 420 hemos realizado trabajos de evaluación de la polaridad para diferentes zonas y durante varios años. Si bien en general el comportamiento de la zona central colombiana se caracteriza por una distribución típica de polaridad 95% negativa, 5% positiva, se ha encontrado que en la zona sur del departamento de Cundinamarca, límites con los departamentos de Tolima y Huila, la proporción de polaridad varía en el tiempo.

Esta zona es la que presenta mayor proporción de descargas positivas; incluso dobla en porcentaje a las zonas del norte que son las que tienen una mayor actividad atmosférica.

Como puede verse en la tabla 20 y en la figura 37, los meses de febrero (31%), mayo (21%), marzo (19%) y enero (18%) son los que presentan una mayor cantidad de descargas positivas, y en los demás el predominio es de descargas con polaridad negativa. El caso extremo se da en el mes de julio, en el cual la totalidad de las descargas son de polaridad negativa.

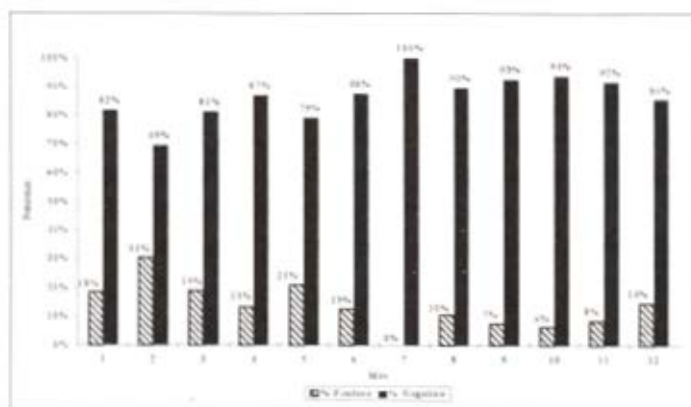


Figura 37. Comportamiento mensual de la polaridad en la zona sur del departamento de Cundinamarca (1997).

Tabla 20. Número y porcentaje mensual de descargas de polaridad positiva y negativa en la zona sur del departamento de Cundinamarca (1977).

	No. descargas positivas	No. descargas negativas	% Positivas	% Negativas
Ene.	18	80	18	82
Feb.	11	25	31	69
Mar.	20	86	19	81
Abr.	53	347	13	87
May.	21	79	21	79
Jun.	58	406	13	88
Jul.	0	22	0	100
Ago.	12	103	10	90
Sep.	27	335	7	93
Oct.	41	618	6	94
Nov.	37	408	8	92
Dic.	11	65	14	86
Total	309	2574	11	89

Debido a que las zonas tropicales no cuentan con estaciones como en las zonas templadas de la tierra, es posible que los mecanismos de cambio de polaridad no sean los mismos para las dos zonas. Las variaciones latitudinales y los cambios regionales de polaridad son temas de investigación importantes, bajo la hipótesis de variación espacial y temporal de los parámetros del rayo.

Referencias

- Acosta, J. D., Arias, L. D., "Análisis de la variación del campo eléctrico generado por una descarga eléctrica atmosférica con respecto a la latitud", tesis de pregrado, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Bogotá, 1996, 159 páginas.
- Aka, A., Ianoz, M., "A Single-Station for nearby ground flashes position in West Africa: Analysis of some experimental data", *21 ICLP*, Berlin, 1992, pp. 301-306.
- Alexander W.H., "The Distribution of Thunderstorm in the United States", *Monthly Weather Review*, American Meteorological Society, Vol. 52, No. 7, July 1924, pp. 337-343.
- Anderson, R., Eriksson, A., "Lightning Parameters for Engineering Application", *Electra* No. 69, 1980, pp. 65-102.
- Araújo, R. L., "Applied Lightning Research in an Inter-tropical Mountainous Area", *Cigre* SC 33, WG11,TF01, 7, 1991.
- Banta, R. *et al.*, "Thunderstorm Genesis Zones in the Colorado Rocky Mountains as Determined by Traceback of Geosynchronous Satellite Images", *Monthly Weather Review*, Vol. 115, No. 2, February 1987.
- Berger, K., "Summary about (a) Duration of flashes (b) Stroke intervals (c) No-current intervals" report *Cigre*, Stuttgart, 1970.
- Bernal, H., Castro, J. M., "Medición de la radiación electromagnética proveniente de descargas eléctricas atmosféricas mediante una antena de placas paralelas", tesis de pregrado, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Bogotá, 1991, 176 páginas.
- Briceño, W., Rondón, D., "Modelos de la corriente del rayo a partir del campo eléctrico", tesis de pregrado. Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Bogotá, 1996, 256 páginas.
- Brooks, C. E. P., "The distribution of thunderstorms over the globe", *Geophys. Mem. London*, vol. 24, 1925, pp. 147-164.
- Castaño, O., Riascos, J., "Estudio de los niveles ceráúneos para la Sabana de Bogotá", tesis de pregrado, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Bogotá, 1987.
- Círculo de Lectores, "La Tierra", London: Bull Publishing Consultants Limited, 1985, pp. 22-37.
- Cooray, V., Jayaratne, K., "Characteristics of lightning flashes observed in Sri Lanka in the tropics", *JGR*, Vol. 99, No. D10, Oct. 1994, pp. 21051-21056.

- Cooray, V., Lundquist, S., "Characteristics of the Radiation Fields From Lightning in Sri Lanka in the Tropics", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 90, No. D4, June 30, 1985, pp. 6099-6109.
- De la Rosa F., Galván A., Velázquez R., "Lightning Characteristics relevant for Electrical Engineering: Assessment of Sensing, Recording and Mapping requirements in the light of present technological advancements", *Cigre WG 33.01*, August, 1994.
- EPRI Journal "Getting a Fix on Lightning strikes", 24, Nov. 1986.
- 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", *Technical Brochure No. 172*, Cigre WG. 33.01.02, December 2000.
- Gary, C., "Lightning and storm phenomena", Document Gimelec, Paris, September 1991.
- Golde, R. H., *Lightning*, London, 1978, pp. 310-350.
- Hagenguth, J., "Photographic study of lightning", *Trans. Amer. Inst. Elec. Eng.*, 66, 1947, pp. 577-585.
- Hardy, *The Weather Book*, London, Michael Joseph Limited, 1982, pp. 185-186.
- Harris, D., Salman, Y., "The measurement of lightning characteristics in northern Nigeria", *J. Atmosf. Terr. Phys.*, 34, 1972, pp. 775-786.
- Hays, W.L., *Statistics*, Holt, Reinhart and Winston, Inc. Edition, 1988.
- ISA, Interconexión Eléctrica S.A. ESP, "Análisis estadístico de la actividad eléctrica atmosférica en Colombia", Informe Final enero-diciembre 1997, Medellín, enero de 1998.
- Joya, C. A., López, R., "Mapa colombiano de niveles ceráúneos", tesis de pregrado, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Bogotá, 1990.
- 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, pp. 1669-1675.
- Lees, M. I., "Measurement of Lightning Ground strikes in the UK", *Lightning Protection '92, Building, Structures ad Electronic Equipment*, London, 1992.
- Lightning Protection Code NFPA 780, 1995.

Lin, Y. T. *et al.*, "Characterization of Lightning Return Stroke Electric and Magnetic Fields from Simultaneous Two-Station Measurements", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 84, No. C10, October 20, 1979, pp. 6307-6314.

López R., Holle R., "The Distribution of Summertime Lightning as a function of low-level wind flow in Central Florida", NOAA Technical Memorandum ERL ESG-28, July, 1987.

Mackerras, D., Darveniza, D., "Latitudinal variation of Lightning occurrence characteristics", *JGR*, Vol. 99, No. D5, May 1994, pp. 10813-10821.

Markson, R., "Tropical convection, Ionospheric potentials, and global circuit variation", *Nature*, Vol. 320, 1986, pp. 588-594.

Mauchly, S. J., "Studies in atmospheric electricity based on observations made on the Carnegie 1915-1921", *Researches of Terr. Magn.*, Carnegie Institution V, Washington DC, USA, 1926, pp. 385-424.

Mejía, L. F., Villamil, E. E., "Diseño de un sistema para la discriminación de las descargas eléctricas atmosféricas", tesis de pregrado, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Bogotá, 1993, 111 páginas.

Ogawa, T. and Brook, M., "Charge distribution in thunderstorm clouds", *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, Vol. 95, 1969, pp. 513-525.

Orville, R., "Peak-current variations of lightning return strokes as a function of Latitude", *Nature*, Vol. 343, Jan. 1990.

Orville, R., Songster H., "The East Coast Lightning Detection Network", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. PWRD 2, No. 3, July 1987.

Parra, C. A., Maestre, A. R., "Estudio comparativo de las señales de campo eléctrico y magnético del rayo", tesis de pregrado, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Bogotá, 1993, 245 páginas.

Pierce, E. T., "Latitudinal variation of lightning parameters", *J. Appl. Meteor.*, Vol. 9, 1970, pp. 194-195.

Popolansky, F., "Lightning Current Measurements on High Objects in Checoslovaquia", 20th ICLP, Swiss, 1990.

Prentice, S., Mackerras, D., "The ratio of Cloud to Cloud - Ground Lightning Flashes in Thunderstorms", *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 16, May 1977, pp. 545-550.

Purdom, J., Markus, K., "Thunderstorm trigger mechanisms over the southwest United States", 12th Conference on Severe Local Storms, Amer. Met. Soc., 1982.

Rakov, V. A., Dulzon, A., "Lightning Research in Western Siberia". Proceedings of Int. Conference on Atmospheric Electricity, 1988, pp. 766-769.

Recma: Colombian Lightning Detection Network, *Annual Lightning Location Report* (in Spanish), 1995.

Riaño, W., Pérez, G., "Análisis estadístico de las descargas atmosféricas para la ciudad de Cali", proyecto de grado, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Bogotá, 1987.

Rubinstein, M. *et al.*, "Some Observations on the Effect of Mountainous Terrain on the Wave Shapes and Amplitudes of Vertical Electric Field from Lightning", Escuela Politécnica Federal de Lausana, 1994, 5 páginas.

Rubinstein, M., Bermúdez, J. L., Comunicación personal, diciembre de 1995.

Serrano, R., Villaizan, J., "Análisis estadístico de las descargas atmosféricas para la ciudad de Medellín", tesis de pregrado, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Bogotá, 1987.

Stringfellow, M. F., "Lightning Incidence in Britain and the Solar Cycle", *Electrical Processes in Atmospheres*, Steinkopf - Darmstadt, 1977, pp. 719-723.

Sugimoto H., Saiki M., Kanao S., Inoue A., "Observation of the Winter Lightning at transmission lines located at mountainous areas", 22nd International Conference on Lightning Protection, Budapest, Sept., 1994.

Takeuti, T., Nakano, M., Nagatani, M., "Lightning discharges in Guam and Philippine Islands", *J. Meteor. Soc. Jap.*, 53 (5), 360-361, 1975.

Thomson, E. M., "The Dependence of Lightning Return Stroke Characteristic on Latitude", *J. Geo. Res.*, vol. 85, 1980, pp. 1050-1056.

Thomson, E. M. *et al.*, "Horizontal Electric Fields from Lightning Return Strokes". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 93, No. D3, March 20, 1988, pp. 2429-2441.

Torres H., "Fenomenología del rayo", *Rev. Innovación y Ciencia*, Vol. III, No. 3, 1994, pp. 24-33.

Torres H., Barreto, L., "Methodology for lightning protection at petroleum exploration sites", *Proceedings IAS, IEEE, USA*, 1995, pp. 189-195.

- Torres, H., "Are there variations of Lightning Parameter Magnitudes within Space and Time?", Cigre WG33.01, 7 IWD, Niagara Fall, Canada, 1997.
- Torres, H., "Cálculo de disturbios atmosféricos a partir del nivel isoceráuneo", *Re. Ingeniería e Investigación*, Vol. 1, No. 4, Bogotá, 1982.
- Torres, H., "Variations of Lightning Parameter Magnitudes within Space and Time" Int. Conf Lightning Prot 24th ICLP, Birmingham, UK, Sep. 1998.
- Torres, H., Barreto, L., "Estimate of Ground Flash Density and Lightning Peak Current with one station Direction Finder", Int. Lightning. Detection. Conf., Tucson, AZ., USA, Feb. 1995.
- Torres, H., Herrera, F., "Lightning Research in Colombia", 22 Int. Conf. Lightning. Pr., Budapest, 1994.
- Torres, H., Barreto, L., "The Lightning Parameters and its Spatial and Temporal dependence", Cigre WG33.01, 9 IWD, Lisbon, Portugal, July 1996.
- Torres, H., Barreto, L., Rondón, D., Briceño, W., "Spatial and Temporal Analysis of Ground Flash Density in Tropical Zone", *Int. Symposium on High Voltage Eng. 10th ISH*, Montreal, Canada, Sep. 1997.
- Torres, H., Barreto, L., Rondón, D., Briceño, W., Rubinstein, M. "Methodology and Improvement to Calibrate the Colombian LPATS Network to Estimate Reliable Lightning Peak Current", *Int. Symposium on High Voltage Eng. 10th ISH*, Montreal, Canada, Sep. 1997.
- Torres, H., Castaño, O., *El rayo*, Bogotá, Editorial Icontec, 1994, 147 páginas.
- Torres, H., Forero, J., Gómez, M., "The Leader Progression Model: Implementation to Free - Standing Structures", *Proc. GROUND '98*, Belo Horizonte, Brazil, Apr. 1998.
- Torres, H., Quintana, C., Rondón, D., González, D., Salgado, M., Ávila, D., "Lightning Risk Map: Determination and Application to a Power Transmission Line", Int. Conf on Lightning Prot 24th ICLP, Birmingham, UK, Sep. 1998.
- Torres, H., Rondón, D., Briceño, W., Barreto, L., "Lightning peak current estimation analysis from field measurements in tropical zones", 23rd ICLP, Florence, Italy, 1996.
- Torres, H., Ruales, L. K., Barreto, L., Herrera, F., "Experience and first results of Colombian Lightning Location Network", *Proceedings, 23rd, ICLP*, pp. 186-190, Florence Italy, Sept. 1996.

- Tzur, Y. *et al.*, "Atmospheric Electric Field and Current Configurations in the Vicinity of Mountains", *J. Geo. Res.*, Vol. 90, 1985, pp. 5979-5988.
- Uman, M. A., "Lightning Discharge", Academic Press, 1987, 370 páginas.
- Uman, M. A., "Lightning Return Stroke Electric and Magnetic Fields", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 90, 1985, pp. 6121-6130.
- Vega, L., "Niveles isoceráuneos en Colombia y su influencia en líneas de transmisión", tesis de pregrado, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Bogotá, 1976.
- Wang, C. P., "Lightning Discharges in the Tropics. 1. Cloud Dart Streamer Discharges", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 68, No. 7, April 1, 1963, pp. 1951-1957.
- Wang, C. P., "Lightning Discharges in the Tropics. 1. Whole Discharges", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 68, No. 7, April 1, 1963, pp. 1944-1948.
- Williams, E. R., "Global circuit response to seasonal variations in global surface air temperatures", *Mon. Wea. Rev.*, 1994.
- Williams, E. R., Personal communication. Poster presented at the AGU meeting in San Francisco, Dec. 1996.
- Williams, E., Boccippio, D., Petersen, W., Rutledge, S., Ishii, M., Hidayat, S., Torres, H., Jayaratne, R., Yair, Y., Levin, Z., Mackerras, D., "Latitude Dependence of Ground Flash Density in the Tropics and Subtropics", *American Geophysical Union. Meeting*, San Francisco, 1996.
- Winn, W. P., *et al.*, "Video Tape recording of lightning flashes", *J. Geo. Res.*, Vol. 78, 1973, pp. 4515-4519.

Modelos, métodos y dispositivos usados en ingeniería para protección contra rayos

Introducción

El diseño de la protección de estructuras y líneas de transmisión contra rayos hasta ahora ha sido abordado por la ingeniería internacional con el conocido método electrogeométrico, el cual se basa en el concepto de "distancia de impacto". El modelo de progresión del líder, MPL, es un aporte al conocimiento del comportamiento del apantallamiento de líneas de transmisión sometidas a la influencia del fenómeno del rayo y al estudio de la protección contra rayos de estructuras en general. El MPL tiene sus bases en los últimos conocimientos de la física del fenómeno del rayo, y se fundamenta en la importante similitud que existe entre las descargas eléctricas producidas en laboratorio con grandes espacios de aire y los rayos.

El método electrogeométrico

El método electrogeométrico, desarrollado principalmente por el ingeniero norteamericano Whitehead, tiene su aplicación en el estudio del apantallamiento que proveen varillas verticales y conductores horizontales a edificios y líneas de transmisión, respectivamente. La principal hipótesis en que se basa el método es que la carga espacial contenida en el líder escalonado, previo a la descarga de retorno, está relacionada con la magnitud de la corriente de la descarga. Con base en estudios teóricos y experimentales del voltaje de ruptura dieléctrica de grandes espacios interelectródicos, se ha establecido una expresión matemática que relaciona la carga espacial, la magnitud de la corriente (I) y la distancia de impacto r_s , la cual sintetiza la teoría del método electrogeométrico.

Durante varias décadas los miembros del Comité Cigre WG 33.01 han trabajado en pruebas de laboratorio y campo para desarrollar la ecuación que mejor se ajuste al método electrogeométrico. Actualmente esta ecuación es¹:

$$r_{sc} = 2 \cdot i_{max} + 30 \left(1 - e^{-\frac{i_{max}}{6,8}} \right) \text{ [metros]}$$

Donde i_{max} es la magnitud máxima de la corriente de retorno del rayo expresada en kA.

Una expresión más sencilla de esta ecuación es:

$$r_{sc} = 10 \cdot (i_{max})^{0,65} \text{ [metros]}$$

En la práctica, para determinar gráficamente la altura mínima de los dispositivos de protección o interceptación, se trazan arcos de circunferencia con radio igual a la distancia de impacto r_{sc} , entre los objetos que hay que proteger y los dispositivos de interceptación (por ejemplo varillas tipo Franklin), de tal forma que los arcos sean tangentes a la tierra y a los objetos o tangentes entre objetos; cualquier estructura por debajo de los arcos estará protegida por el o los objetos que conformen el arco, y cualquier objeto que sea tocado por el arco estará expuesto a descargas directas.

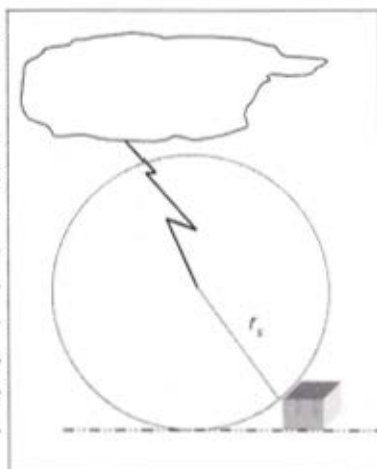


Figura 1. Concepto de distancia de impacto r_{sc} en el método electrogeométrico.

Un corolario del método electrogeométrico corresponde al método de la esfera rodante (*Rolling ball*, en inglés) que consiste en imaginar una esfera de radio igual a la distancia de impacto rodando sobre los volúmenes de las estructuras por proteger contra rayos.

Todas las estructuras que logre tocar la esfera estarán expuestas a descargas directas. El propósito es que las únicas estructuras que toquen la esfera sean los dispositivos de protección o apantallamiento.

¹ Wiessinger Hasse, "Handbuch fuer Blitzschutz und erdung", Auflage, Pflaum Verlag, VDE Verlag, 1993, pp. 130, 4.

Para el ejemplo mostrado en la figura 2, la estructura B estará protegida debido a que se encuentra por debajo del arco $a'-b''$, tangente al mástil y a la tierra. La estructura A no está protegida porque no está por debajo del arco $a'-a''$; sin embargo, la estructura C estará protegida por la estructura A y el mástil, pues está por debajo del arco $a'-a'''$;

En esta figura se ilustra además el concepto de altura inútil, que es la sobreelevación del dispositivo de protección o interceptación que no incrementa el arco de protección. La altura inútil se da por encima de una altura del dispositivo de protección igual a la distancia de impacto.

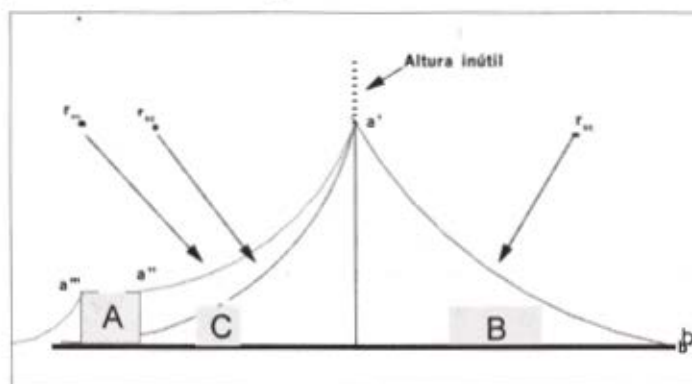


Figura 2. Concepto de zona de protección utilizando el método electrogeométrico o el de la esfera rodante.

El método electrogeométrico aplicado a líneas de transmisión

Los flameos sobre los aisladores de una línea de transmisión son causados por impactos de rayos en la cima de la torre o en los cables de apantallamiento cerca de la torre. Otro mecanismo por el cual se presentan flameos se debe a las fallas de apantallamiento, que ocurren cuando un rayo hace impacto directamente sobre un conductor energizado. En el punto de impacto se desarrollan altos voltajes que viajan en ambas direcciones, alcanzando eventualmente uno o más aisladores y originando flameos. La probabilidad de ocurrencia de fallas de apantallamiento debe ser calculada considerando que una proporción significativa de ellas origina apertura de los interruptores de la línea, especialmente en aquellas con un solo cable de guarda.

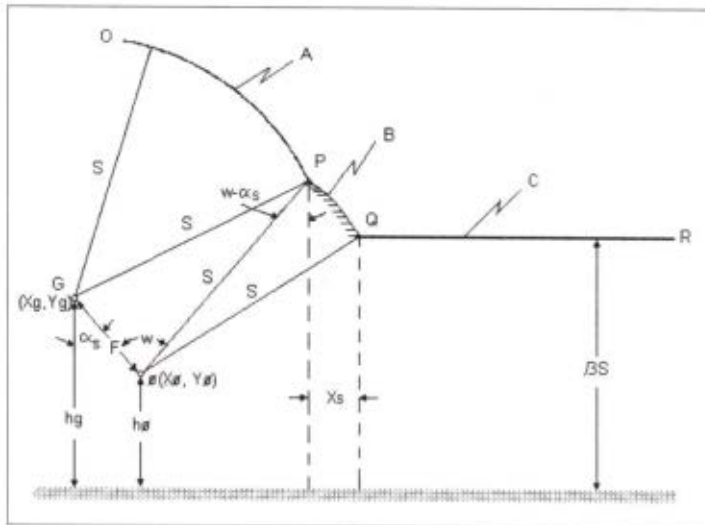


Figura 3. Mecanismo de falla del apantallamiento.

El método electrogeométrico proporciona una manera para determinar el número de fallas de apantallamiento. La figura 3 ilustra los conceptos fundamentales del método.

En la figura 3 se indica el mecanismo de falla del apantallamiento para un cable de guardia G y un conductor de fase ϕ . Si un rayo alcanza cualquier punto del arco OP (rayo A), éste saltará a través de la distancia S hasta hacer impacto sobre el cable de apantallamiento G. Del mismo modo, un rayo B que alcance cualquier punto del arco PQ hará impacto sobre el conductor de fase, debido a que es el objeto más próximo a cualquier punto del arco PQ, sin incluir los puntos extremos P y Q.

Dicho de otro modo, cualquier rayo que alcance el arco PQ causará falla de apantallamiento. Similarmente, cualquier rayo que alcance la recta QR (rayo C) hará impacto en tierra. La distancia S o r_{sc} es la llamada distancia de impacto.

$$r_{sc} = 10 \cdot I^{0.65} \text{ ó } I = 0.029 \cdot r_{sc}^{1.54} \quad (1)$$

El coeficiente toma en consideración la gran probabilidad de que la distancia de impacto final al plano aterrizado, con su extendido efecto atractivo, será significativamente diferente de la distancia de impacto a un cable suspendido arriba del plano. Para rayos verticales, el ancho X_s establece el área descubierta en la tierra en la cual los rayos que normalmente la alcanzarían hacen impacto sobre el conductor de fase. Algunos autores han demostrado que el ancho X_s cambia según sea la distribución de probabilidad que se asuma para el ángulo de aproxi-

mación del rayo. El ancho X_s debería ser ajustado por ondulación del terreno, árboles cercanos y localidades a lo largo del vano (a causa de la flecha).

Debido a la falta de certeza sobre la influencia de los anteriores parámetros se asumen únicamente rayos verticales. En todos los cálculos de fallas de apantallamiento se usan alturas promedio del conductor (por ejemplo, la altura del conductor en la torre menos dos veces la longitud de la flecha).

Desplazando el cable de apantallamiento horizontalmente hacia distancias más cortas al conductor, se reduce el arco PQ del área no cubierta hasta lograr que desaparezca, logrando así un apantallamiento óptimo. El ángulo de apantallamiento efectivo α_E se indica en la figura 4 y está dado por:

$$\alpha_E = \tan^{-1} \left(\frac{X_G}{Y_\phi - Y_G} \right) \quad (2)$$

En donde X_G es la coordenada del cable de guarda, eligiendo el conductor de fase como referencia ($X = 0$).

$$X_G = \sqrt{S^2 - (\beta \cdot S - Y_\phi)^2} - \sqrt{S^2 - (\beta \cdot S - Y_G)^2} \quad (3)$$

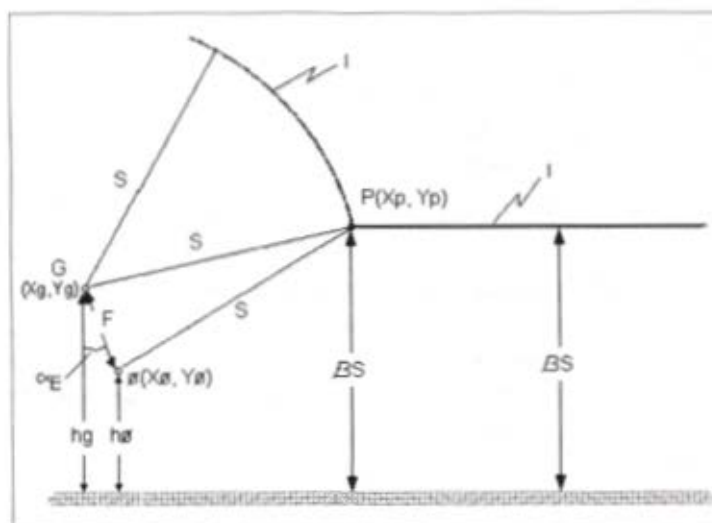


Figura 4. Ángulo de apantallamiento efectivo.

Conociendo la distancia de impacto S y si $\beta \cdot S > Y_\phi$, el ancho X_s se puede calcular así:

$$X_s = S \cdot (\cos \theta + \sin (\alpha_s - \omega)) \quad (4)$$

Donde:

$$\theta = \text{sen}^{-1} \frac{\beta_s - Y_\phi}{S}$$

$$\omega = \text{cos}^{-1} \frac{I'}{2 \cdot S}$$

$$\alpha_s = \text{tan}^{-1} \frac{X_\phi - X_G}{Y_\phi - Y_G}$$

Cálculo de la rata de fallas de apantallamiento

Para calcular la rata de fallas de apantallamiento es necesario calcular la mínima corriente de descarga de retorno sobre una fase (la más expuesta), necesaria para causar un flameo.

$$I_{MIN} = \frac{2 \cdot V_c}{Z_\phi} \tag{5}$$

Donde:

V_c = Voltaje crítico para flameo inverso en el aislador

Z_ϕ = Impedancia característica del conductor de fase, teniendo en cuenta el efecto corona

Introduciendo I_{min} en la ecuación (1), se calcula S_{min} de la fase, y con este valor se calcula X_s utilizando la ecuación (4).

Aunque a primera vista no se ve claramente, el arco PQ en la figura 3 disminuye con el incremento en la distancia S; por tanto, existe un valor $S_{máx}$ que corresponde a un valor máximo de corriente de descarga de retorno ($I_{máx}$), por encima del cual no se producen fallas en el apantallamiento. Únicamente rayos con corrientes entre $I_{mín}$ e $I_{máx}$ pueden causar falla del apantallamiento según la teoría electrogeométrica.

Observando la figura 5 se puede asumir que $S_{máx}$ es aproximadamente igual a la longitud de la línea OP, por lo cual la solución cuadrática para $S_{máx}$ es mucho más simplificada, y es fácil demostrar que:

$$S_{max} = Y_0 \cdot \left(\frac{-B_s - \sqrt{B_s^2 + A_s \cdot C_s}}{A_s} \right) = Y_0 \cdot \bar{S} \tag{6}$$

Donde:

$$Y_0 = \frac{Y\phi - Y_G}{2}$$

$$A_s = m^2 - m^2 \cdot \beta - \beta^2$$

$$B_s = \beta \cdot (m^2 + 1)$$

$$C_s = (m^2 + 1)$$

$$m = \frac{X\phi - X_G}{Y_G - Y\phi} \quad (\text{pendiente de la línea } OP)$$

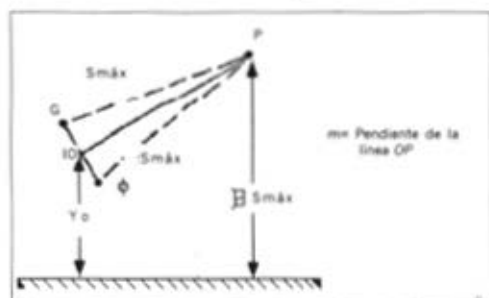


Figura 5. Pendiente de la línea OP

Donde:

P_{min} = Probabilidad de que I_{min} sea excedido

$P_{máx}$ = Probabilidad de que $I_{máx}$ sea excedido

T = Nivel ceráuneo

$\frac{X_s}{2}$ = Ancho promedio desprotegido

$$N_{SP} = 0.012 \cdot T \cdot \frac{X_s}{2} (P_{min} - P_{max}) \quad (7)$$

Si existe un conductor que está desprotegido a ambos lados o hay más conductores expuestos, las ratas individuales de fallas de apantallamiento de cada uno de ellos deben ser sumadas para obtener el número total de fallas de apantallamiento. Sustrayendo el número de fallas de apantallamiento del número total de descargas eléctricas sobre una línea se obtiene el número de descargas que pueden causar flameos inversos.

El método electrogeométrico aplicado a estructuras delgadas

El método electrogeométrico aplicado a estructuras delgadas, tales como un pararrayos tipo Franklin, permite determinar la región de protección y la superficie de captación de descargas. El límite de la zona atractiva está definido por los puntos que se encuentran a una misma distancia entre la punta de la varilla y la superficie de la tierra, los cuales forman una parábola cuya ecuación es:

$$H^2 - 2 \cdot H \cdot y + x^2 = 0 \quad (8)$$

En la figura 6 se ilustra el concepto de zona atractiva. Cualquier líder que se aproxime hacia la zona I no será atraído por la punta del electrodo aterrizado, y la alcanzará en la superficie de la tierra; sin embargo, si el líder se aproxima a la zona II, éste será desviado hacia la punta del electrodo aterrizado.

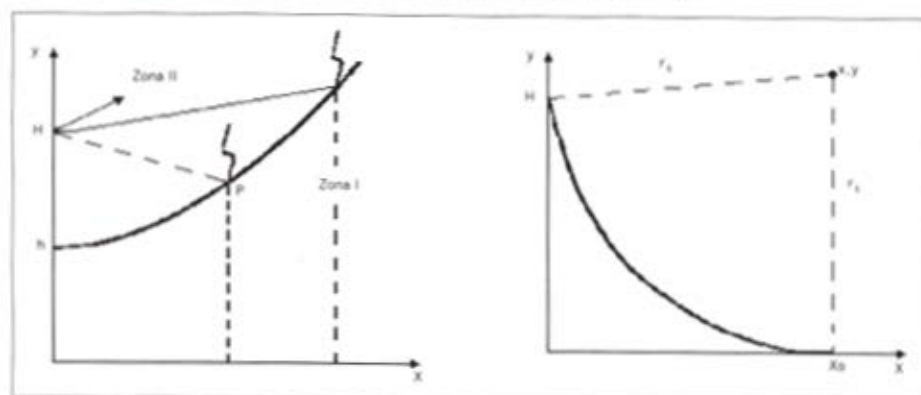


Figura 6. Zona atractiva y región de apantallamiento de una varilla vertical.

La zona de protección que provee una varilla localizada en terreno plano se define por la ecuación de una esfera que limita la superficie de protección:

$$(rs - z)^2 + \left[\sqrt{2 \cdot H \cdot rs - H^2} \cdot -a \right]^2 = rs^2 \quad (9)$$

Una varilla vertical provee protección sobre un área circular en la superficie de la tierra, y dentro de los límites de la región definida por la superficie de la esfera con radio r_s , tal y como se ilustra en la figura 7.

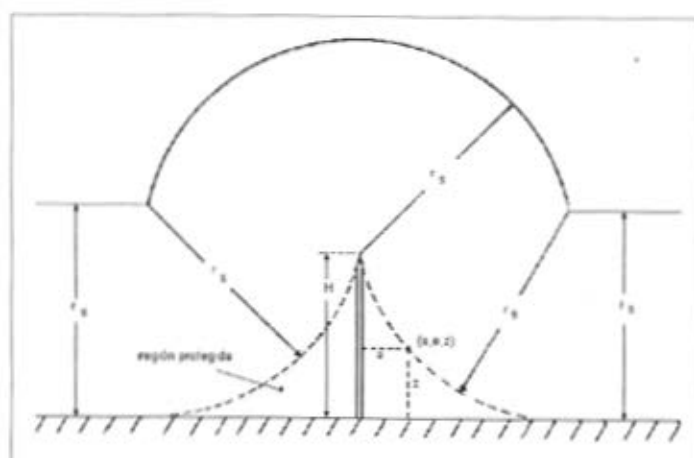


Figura 7. Región de protección que provee una varilla vertical.

En coordenadas cilíndricas, la frontera de la región de protección es:

$$(rs - z)^2 + \left[\sqrt{2 \cdot H \cdot rs - H^2} \cdot a \right]^2 = rs^2 \quad (10)$$

De la ecuación anterior, se deriva la altura necesaria de la varilla para proteger un elemento de altura h :

$$H = rs \cdot \left\{ 1 - \sqrt{1 - \left[\frac{a}{rs} + \sqrt{\frac{h}{rs} \cdot \left(2 - \frac{h}{rs} \right)} \right]^2} \right\} \quad (11)$$

El límite de la zona de protección sobre la superficie de la tierra (X_a) se encuentra de la ecuación (10), haciendo $z = 0$.

$$X_a = \sqrt{2 \cdot H \cdot rs - H^2} \quad (12)$$

Modelo de progresión del líder, MPL

El modelo de progresión del líder (*Leader Progression Model*, en inglés) fue propuesto a principios de la década de 1980 por los ingenieros italianos Emilio Garbagnati y Luigi Dellera², quienes junto con otros investigadores sentaron las bases teóricas que lo sustentan.

Este modelo simula las diferentes etapas del fenómeno del rayo que son: propagación del líder descendente, inicio y propagación del líder ascendente e interacción entre los dos líderes.

La descripción matemática del modelo requiere la evaluación del campo eléctrico a medida que se desarrollan los líderes, con el propósito de simular el desplazamiento de carga eléctrica dentro de los canales de la descarga. El cálculo del campo eléctrico se puede realizar por el método de simulación de carga, usando anillos unipolares de carga para representar la nube, segmentos rectos de carga para representar los líderes ascendente y descendente y puntos o segmentos rectos de carga para representar los electrodos aterrizados.

² L. Dellera, E. Garbagnati, and A. Pignini, "A lightning model based on the similarity between lightning phenomena and long laboratory sparks", 16th International Conference on Lightning Protection, June 1981, Szeged, Hungary.

Las tres tipos de rayos que se pueden presentar en la naturaleza y que son simulados con el MPL son:

- *Rayo ascendente*. Ocurre cuando el gradiente de inicio de corona se presenta sobre la estructura, debido a la carga de la nube únicamente. Este fenómeno es típico de estructuras altas.
- *Rayo descendente a tierra*. Este suceso ocurre cuando los "penachos" en la punta del líder descendente alcanzan la tierra.
- *Rayo descendente a una estructura*. Sucede cuando los "penachos" del líder descendente alcanzan directamente la estructura o cuando ellos se encuentran con los "penachos" del líder ascendente.

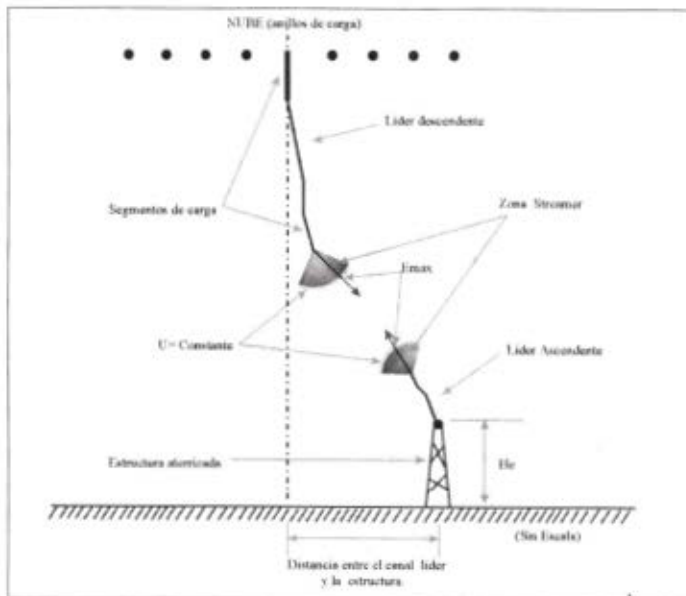


Figura 8. Modelo de progresión del líder, MPL.

Simulación del líder descendente

El desarrollo del líder descendente en el fenómeno del rayo es similar al que se presenta en la configuración de electrodos varilla-plano, cuando es sometida a impulsos de voltaje con frentes de duración de cientos de microsegundos y con espacios interelectródicos entre 10 y 30 m.

Las siguientes suposiciones y consideraciones se aplican a las varias características del líder:

Carga del líder

Para asegurar la propagación del líder en grandes espacios interelectródicos (10 a 30 m) las cargas por unidad de longitud necesarias, que fueron observadas en laboratorio³, son aproximadamente:

- 50 $\mu\text{C}/\text{m}$ para líderes positivos
- 100 $\mu\text{C}/\text{m}$ para líderes negativos

Estos valores son consistentes con los valores de carga más pequeños que se derivan de las corrientes más bajas de rayos descendentes. A modo de ilustración, considerando una corriente de descarga⁴ negativa caracterizada por:

a) $I = 5 \text{ kA}$, con una probabilidad de ser excedida del 98%.

b) Velocidad de la descarga de retorno (la cual es una función de la corriente de la descarga) entre 0.15 y 0.2 veces la velocidad de la luz.

Se deriva una carga por unidad de longitud así:

$$q = \frac{I}{v} = 100 \mu\text{C}/\text{m} \quad (13)$$

A partir de los datos de mediciones de campo, mediante la integración de la forma de onda de la corriente hasta su primer pico (*first peak*), fue derivada la siguiente relación promedio entre la corriente y la carga:

$$Q_{fp} = 76 \cdot 10^{-3} \cdot I^{0.68} \quad (14)$$

Los datos de campo que fueron recolectados mostraron que el valor pico de la corriente de rayo se incrementa con el aumento del número de ramas del canal descendente. El efecto de ramificación se simula mediante un canal equivalente que tiene en su parte superior una carga por unidad de longitud que tiene en cuenta la carga total, y en la parte inferior (últimas decenas de metros) una carga de 100 $\mu\text{C}/\text{m}$ para simular el canal elemental más avanzado.

La altitud promedio de las nubes de tormenta, que fue asumida en la región donde se efectuaron las mediciones, es de 2000 m. Con este valor la ecuación (14) se transforma en:

$$q = 38 \cdot I^{0.68} \quad (\mu\text{C}/\text{m}, \text{kA}) \quad (15)$$

3 L. Dellera, and E. Garbagnati, "Lightning stroke simulation by means of the leader progression model - Part I: Description of the model and evaluation of exposure of free-standing structures", IEEE. Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 4 (oct. 1990), p. 2.

4 Valor pico de la corriente de rayo, que se presenta en la primera descarga de éste.

En lo concerniente a rayos de polaridad positiva, debido al limitado número de datos de que se disponían, únicamente cálculos preliminares fueron realizados asumiendo una carga uniforme de $50 \mu\text{C}/\text{m}$.

Velocidad del líder

La velocidad media de los líderes negativos descendentes que fue encontrada en las descargas de laboratorio es del orden de varios $\text{cm}/\mu\text{s}$ (entre 5 y $10 \text{ cm}/\mu\text{s}$ para líderes de hasta 14 m de longitud), la cual se incrementa con el aumento de la distancia interelectródica.

Del análisis de los resultados de las pruebas de campo se concluyó que la velocidad del líder descendente disminuye a medida que éste se acerca al plano terrestre, alcanzando valores cercanos a los encontrados en descargas de laboratorio. Las velocidades de los líderes positivos que fueron encontradas en descargas de laboratorio son mucho menores que las de los líderes negativos ($1.5 \text{ cm}/\mu\text{s}$).

El modelo únicamente tiene en cuenta la relación de velocidades de los líderes descendente a ascendente. Para rayos negativos, al inicio del líder ascendente, una proporción de 4/1 se asume como relación de velocidades de los líderes, siendo mayor la del líder descendente. Sin embargo, considerando los resultados de las mediciones que fueron hechas en pruebas de campo, se asume que la proporción de velocidades cambia con el progreso del líder ascendente alcanzando una relación final de 1/1 en el instante en que los líderes se encuentran. Para rayos positivos, a causa del limitado número de datos recolectados, solamente cálculos preliminares fueron realizados con una proporción de 1/1.

Longitud del "penacho"

La determinación de la longitud del "penacho" negativo se basa esencialmente en la extrapolación de datos de laboratorio. Sin embargo, si el fenómeno es más complejo, la evaluación de su longitud puede hacerse considerando que el "penacho" puede alcanzar zonas con campos eléctricos de $300 \text{ kV}/\text{m}$.

Propagación del líder

El modelo no toma en cuenta la "tortuosidad" del canal, por lo que la dirección de propagación del líder está directamente relacionada con el campo eléctrico. Ésta se evalúa como la dirección del máximo gradiente evaluado sobre una línea equipotencial, cuyo valor corresponde al potencial encontrado a una distancia igual a la longitud del "penacho".

Simulación del líder ascendente

Se ha demostrado que las características de estos líderes son similares a las de aquellos generados en descargas eléctricas de laboratorio, con configuraciones sometidas a impulsos de maniobra con frentes de onda de duración prolongada. La similitud se debe a que la variación del campo eléctrico en el tiempo, en la vecindad de la estructura aterrizada, a medida que se desarrolla el líder descendente, es similar a la encontrada en descargas de laboratorio.

Las siguientes suposiciones fueron hechas de acuerdo con lo anterior.

Inicio del líder

Se ha comprobado que el voltaje de ruptura dieléctrica de una configuración electrodo-plano, sometido a impulsos tipo maniobra con frentes de onda de duración prolongada, es prácticamente independiente del tamaño del electrodo, comenzando desde tamaños muy pequeños hasta el llamado tamaño crítico, el cual es el requerido para originar una transición directa de efecto corona a inicio del líder. Los voltajes de inicio del líder son similares para todos los electrodos con tamaños menores o iguales al crítico, por lo que el voltaje de inicio del líder se determina como el voltaje de inicio del efecto corona en el electrodo de radio crítico.

A partir de pruebas de laboratorio fue confirmado que el criterio del radio crítico para determinar el voltaje de inicio del líder es aplicable, independientemente de la manera en que se cargue el electrodo (energización directa o indirecta por la proximidad de otros electrodos cargados).

Las investigaciones realizadas han demostrado que el radio crítico de los electrodos aterrizados se incrementa con el aumento de la distancia interelectrónica, con una tendencia a la saturación alrededor de 35 cm y 10 cm para electrodos con simetría esférica y cilíndrica, respectivamente. Nuevas configuraciones de los circuitos de prueba han arrojado valores ligeramente diferentes a los mencionados.

A causa de los grandes espacios interpolares involucrados en el fenómeno del rayo y a la presencia en estructuras reales de puntos con campos eléctricos de elevada divergencia, en el MPL se representan los electrodos aterrizados mediante elementos de radio crítico como los encontrados en el laboratorio.

Sobre la base de algunas pruebas realizadas y debido a la escasa información disponible sobre electrodos cargados negativamente, se asumen radios críticos iguales al doble de los utilizados para electrodos cargados positivamente.

Carga del líder

Atendiendo a los resultados de las pruebas de laboratorio que fueron realizadas, se asignan cargas por unidad de longitud de 50 y 100 $\mu\text{C}/\text{m}$, para los líderes positivos y negativos, respectivamente. La carga del canal ascendente lejos del electrodo aterrizado es irrelevante para el modelo debido a que únicamente líderes ascendentes extensos se presentan en el caso de rayos ascendentes. En el MPL, los rayos ascendentes ocurren cuando es superado el gradiente de inicio de corona sobre la estructura aterrizada, a causa de lo cual la simulación puede detenerse en el momento en que se produce un rayo ascendente, debido a que el modelo no simula rayos ascendentes.

Velocidad del líder

Como ya fue mencionado, en el modelo únicamente se tiene en cuenta la relación de velocidades de los líderes, puesto que los valores absolutos de sus velocidades no son importantes para la simulación del rayo, debido a que ésta no se hace en tiempo real.

Longitud del penacho

La longitud del "penacho" se evalúa como la longitud entre la punta del líder y el punto definido por un gradiente promedio de 500 kV/m calculado así:

$$\bar{E} = \frac{1}{LS} \cdot (V1 - V2) \quad (16)$$

donde

\bar{E} = Gradiente promedio

$V1$ = Potencial en la punta del líder

$V2$ = Potencial en el punto que determina la longitud del "penacho"

LS = Longitud del "penacho"

El punto con gradiente promedio de 500 kV/m se busca a lo largo de la dirección de la línea de gradiente máximo encontrada en el paso anterior.

Modelamiento de la nube

Una representación apropiada para la nube es importante para la simulación de los rayos ascendentes, ya que según el MPL, éstos se inician cuando se vence el gradiente crítico en el punto de contorno del elemento esférico que representa la estructura, debido exclusivamente a la carga de la nube. Mediante cálculos de campo eléctrico se han determinado los valores de carga requeridos para iniciar el efecto corona en el electrodo aterrizado de radio crítico en las siguientes dos condiciones:

- Una carga bipolar uniformemente distribuida con una extensión de 10 km, con alturas de 3 y 4 km para las cargas negativas y positivas, respectivamente.
- Una carga unipolar negativa uniformemente distribuida, con una extensión de 10 km y una altura de 2 km.

En aras de adoptar un modelo simplificado (que por ende facilita una simulación del rayo), se puede usar una carga unipolar para representar la nube.

Con base en los valores calculados de la carga en la nube necesarios para originar un líder positivo ascendente desde la estructura aterrizada, como función de su altura (véase figura 9) y, con base en la probabilidad de ocurrencia de rayos ascendentes en función de la altura de la estructura (véase figura 10), la distribución estadística de la carga unipolar equivalente fue evaluada y se reporta en la figura 11.

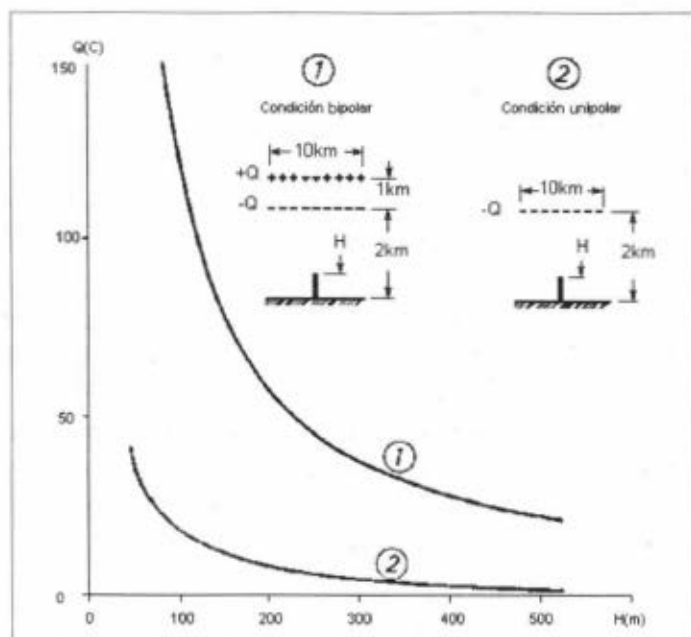


Figura 9. Carga en la nube, necesaria para dar inicio a un líder ascendente positivo desde una estructura aterrizada.

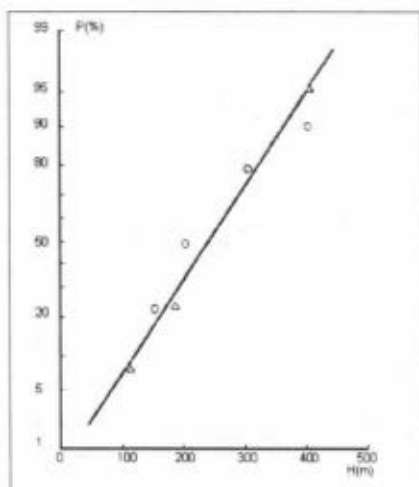


Figura 10. Probabilidad de ocurrencia de rayos ascendentes como función de la altura de la estructura.

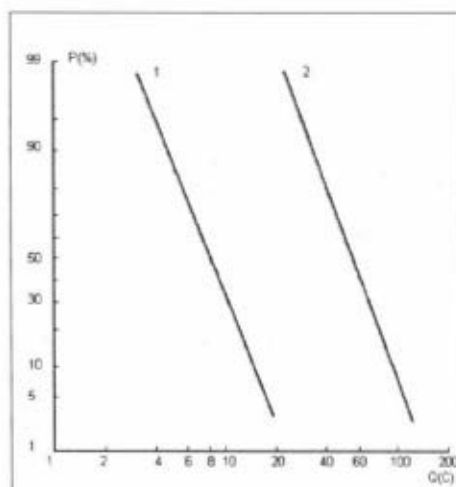


Figura 11. Distribución estadística acumulada de la carga en la nube.

Dispositivos de protección contra rayos

Para protección externa de estructuras contra impactos de rayos se ha utilizado desde hace más de dos siglos los comúnmente conocidos pararrayos tipo Franklin; sin embargo, hace algunos años entraron al mercado mundial y al colombiano modernos "dispositivos no convencionales de protección contra rayos". Según sus fabricantes y representantes, éstos son más eficaces en su funcionamiento que los terminales aéreos inventados en 1752 por Benjamín Franklin. Los dispositivos no convencionales se conocen por diferentes tecnologías y nombres en el idioma español como "pararrayos ionizantes", "dispositivos piezoeléctricos", "terminales de emisión temprana".

Estos modernos dispositivos han creado una gran controversia dentro de la comunidad académica internacional a tal punto que hasta el día de hoy solamente han sido aceptados por dos normas nacionales: la francesa y la española.

A continuación se presenta un análisis técnico que facilita la comprensión sobre la controversia, con el ánimo de que la ingeniería colombiana e internacional conozca las razones y el porqué estos modernos dispositivos no han sido aceptados por las normas IEC⁵ ni por las normas NFPA⁶.

5 International Electrotechnical Commission.

6 Nacional Fire Protection Association.

La discusión

La protección de estructuras contra el rayo se realiza mediante la acción integral de los sistemas de protección externa y los sistemas de protección interna, previa la valoración del riesgo a que pueden estar sometidas.

Si bien en los métodos empleados para la protección interna –como por ejemplo equipotencialización, distancias de seguridad, apantallamientos, empleo de descargadores– no existen discrepancias apreciables en la comunidad académica, no ocurre lo mismo con el sistema de protección externa en cuanto se refiere a la acción de las cabezas captadoras, donde las posiciones son encontradas y se maneja la existencia de normas como escudos para la defensa de uno u otro producto.

Como ejemplo se tiene la posición mantenida por las normas IEC 61024, donde el sistema de protección externa está basado en las puntas Franklin, mientras que las normas francesa NF C17-102, y la española UNE 21186 se basan en los dispositivos de cebado instalados en las puntas captadoras y establecen el aumento de la distancia de protección, respecto a un pararrayos tipo Franklin, en función de su capacidad de producir la ionización temprana o preionización del aire.

Para las normas técnicas francesa y española las diferencias no se quedan solamente en el campo de los conceptos físicos como ionización, efecto corona, avance de cebado, sino que se manifiestan también en las valoraciones del riesgo y la selección de los niveles de protección. Es así como la norma española⁷, en lo referente al cálculo de la frecuencia aceptable de rayos sobre una estructura (N_c), trabaja con coeficientes que dan lugar, en general, a niveles de protección más bajos.

El hecho de que la estimación del avance de cebado, en las normas francesa y española, se lleve a cabo mediante ensayos en laboratorios, es motivo también de controversia, por la no representatividad de los valores que se obtienen de la realidad del proceso de formación de la descarga ascendente positiva, proceso que ha sido motivo de trabajos de numerosos investigadores como Gallimberti (1979), Delleria y Garbagnati (1990), Risk en sus modelos propagativos, y de Lalande (1998) con el establecimiento del concepto de campo de estabilización⁸.

Dispositivos no convencionales, ESE

Es comúnmente aceptado que la efectividad de un pararrayos tipo Franklin para interceptación de rayos se le atribuye más a su posición respecto a los objetos por proteger, que a los detalles de su forma o estructura.

⁷ Que toma como referencia la norma francesa.

⁸ Campo con ambiente mínimo que permite la propagación estable del líder ascendente positivo.

Por el contrario, los dispositivos no convencionales se basan, generalmente, en que el mejoramiento de las propiedades de protección se debe a un diseño especial de la terminación.

La "característica especial" más común que sostienen los fabricantes de los modernos dispositivos es la del fenómeno de preionización, que puede ser creada de varias formas:

- Materiales radiactivos colocados en la punta del terminal.
- Materiales piezoeléctricos colocados en la punta del terminal.
- Electrodo con filo agudo o arreglos en punta, usados para facilitar la formación del efecto corona.
- Bobinas de inducción diseñadas para producir descargas en el campo electromagnético transitorio.
- Electrodo de potencial flotante, que pueden iniciar descargas bajo campos de tormentas.
- Dispositivos que se diseñan para crear descargas, conocidos en el idioma inglés como terminales tipo ESE⁹.

La función sobre la cual se basa un terminal tipo ESE es el disparo de un líder ascendente temprano en un tiempo ∇t , mucho antes que el tiempo de disparo de un pararrayos tipo Franklin. La diferencia de tiempo, ∇t , es definida como el "tiempo de ventaja"¹⁰.

Los fabricantes proponen que este tiempo de ventaja sea multiplicado por la velocidad constante de la descarga descendente. Esta multiplicación determina la longitud ∇L del disparo de la descarga.

La filosofía de los promotores de los terminales tipo ESE es que su longitud L da la misma protección que un pararrayos tipo Franklin de longitud L , más el ∇L arriba mencionado, es decir $L + \nabla L$.

Contrario a lo que muchos piensan, Cassie (1969) y Roberts 1966 han demostrado que los dispositivos ESE no incrementan significativamente la conductividad del aire a una distancia superior a los 10 centímetros de la punta de la varilla.

El principal efecto atractivo de los dispositivos ESE es indudablemente debido al conductor metálico mismo que presenta un mejoramiento significativo del campo eléctrico, el cual, a su vez, incrementa la tasa de ionización del aire alrededor de la varilla por encima de las otras localizaciones vecinas (Van Brunt *et al.*, 2000).

9 *Early Streamer Emission.*

10 *Time advantage*, en inglés.

Existen actualmente tres tipos de dispositivos no convencionales ESE (Gumley *et al.*, 1978; Alconchel *et al.*, 1993; Uchida *et al.*, 1993):

- Terminales ionizantes o radiactivos
- Terminales equipados con disparo eléctrico (*electrical triggering device*)
- Terminales que usan emisión láser

El terminal tipo láser está aún bajo desarrollo y su efectividad, aunque promisorio, no ha sido demostrada fuera de laboratorio. El más ampliamente usado, y quizás el más polémico, es el dispositivo ESE equipado con fuente radiactiva colocada cerca de la punta del terminal. Los materiales radiactivos empleados son partículas débiles alfa de relativa larga vida, como por ejemplo ^{241}Am , ^{210}Po , ^{226}Ra , ^{85}Kr y ^{60}Co .

Recientemente han sido presentados al mercado internacional los terminales ESE equipados con disparo eléctrico. En principio, su propósito es el mismo que los terminales radiactivos; sin embargo, la información técnica disponible es de naturaleza preliminar y sin detalles técnicos sobre su sistema de disparo. De la información disponible parece que los ESE con disparo eléctrico emplean un detector que censa la aproximación de un líder produciendo una señal eléctrica proporcional a la magnitud o a la tasa de cambio del campo eléctrico producida por la aproximación del líder. Cuando la señal de salida del detector alcanza un cierto nivel, éste dispara un circuito que aplica un pulso rápido de alta tensión directamente a la varilla o a un arreglo de electrodos colocado en la punta de la varilla. La aplicación de los pulsos eléctricos mejora el campo eléctrico lo suficiente para crear una descarga local o ionización en el momento más oportuno para iniciar la propagación de un líder (*streamer*) ascendente. Información de los fabricantes sobre la duración y extensión de esta ionización no se encuentra en la bibliografía.

Hay otros tipos de dispositivos ESE de reciente desarrollo que utilizan efectos piezoeléctricos para el disparo eléctrico. Se presume que la función de un disparador piezoeléctrico es la misma que la de los otros dispositivos ESE, es decir, mejorar la ionización e incrementar la probabilidad (reduciendo el tiempo) para iniciar la propagación de un líder (*streamer*) ascendente.

En resumen, parece que el mejoramiento de la iniciación de un líder ascendente en un dispositivo no convencional tipo ESE (comparado con un terminal convencional) tiene unas bases físicas plausibles; sin embargo, su efectividad aún no ha sido demostrada en pruebas de campo. Existen informes de incidentes donde los dispositivos ESE fallaron en dar la protección específica que decían sus fabricantes (Mackerras *et al.*, 1987; Rison, 1991; Leite, 1985; Liew, 1992; Eybert-

Bérard, *et al.*, 2001; Torres, 1998; Torres, 2000). Así mismo, existen también informes estadísticos sobre fallas de los terminales convencionales (Gumley *et al.*, 1978).

Posición de la comunidad científica internacional frente a los dispositivos no convencionales ESE

La probabilidad de un buen funcionamiento de los nuevos dispositivos ha sido críticamente comentada por los expertos reunidos en el grupo de trabajo WG 33.01 de Cigre (Mackerras y Daverniza, 1995).

El argumento sobre la probabilidad de buen funcionamiento de los nuevos dispositivos puede ser enfocado hacia una pregunta: *¿La preionización creada por algún medio sobre el terminal puede afectar significativamente el inicio, el desarrollo y la orientación final del líder descendente de un rayo?*

En otras palabras, si la física de la descarga y las evidencias experimentales pueden soportar una preposición científica tal como:

- Si la preionización facilita la emisión temprana de *streamers* ascendentes, entonces mejorará el área de protección de los terminales aéreos (terminales tipo ESE, varillas radiactivas).

A finales de 1999, la NFPA de los Estados Unidos puso a discusión de la comunidad internacional un borrador de reforma de la norma sobre protección contra rayos, NFPA 781, la cual consideraba la inclusión de terminales aéreos no convencionales tipo ESE. Esto produjo reacciones en la comunidad científica internacional, como por ejemplo la del comité ICLP¹¹ (Scientists Oppose ESE Devices).

Pruebas de laboratorio versus rayos naturales

Como indica Lalande en la introducción de su tesis doctoral (1998), para abordar el problema de la protección de una estructura en el suelo hay que controlar el modelo de los dos líderes, descendente-ascendente, y en particular el del líder ascendente positivo, que es el que determina el punto de impacto.

En el análisis del factor de escala, en referencia a los ensayos que se pueden abordar en los laboratorios de alta tensión, concluye:

- A causa del factor de escala, los líderes no se pueden formar para el mismo campo ambiente E_0 , debiéndose aplicar campos ambiente E_0 más elevados para formar el líder conforme la escala de la estructura es más reducida.

11 International Conference on Lightning Protection, ICLP.

- Las descargas atmosféricas en una estructura a escala 1:1 y las del laboratorio que corresponden a una escala 1:4 no pueden formarse y propagarse para el mismo campo ambiente, lo que puede conducir a modelos de propagación diferentes.
- Las descargas de laboratorio permiten estudiar de manera cualitativa los principios de desarrollo de una descarga atmosférica, pero no pueden utilizarse para determinar por una simple corrección de factor de escala, los campos ambiente necesarios para la formación del líder ascendente en estructuras reales.

En la descripción de los diferentes ensayos llevados a cabo tanto en laboratorio, por el I'Onera y EDF (1989), para determinar la influencia geométrica del electrodo (perfil elipsoidal, P_a = relación entre eje mayor-eje menor altura), en la iniciación y propagación del líder ascendente positivo, como en los llevados a cabo, mediante disparos de cohetes, en 1995 en Camp Blanding (Florida) por CENG, EDF y I'Onera, presenta las siguientes conclusiones:

- Para electrodos con iguales alturas, el que tiene el radio de curvatura menor ($P_a = 25$), es el que tiene la mayor probabilidad de alcanzar el plano simulador de la nube.
- Cuando los electrodos tienen alturas diferentes, el electrodo de mayores dimensiones es el que provoca el mayor número de descargas en el aire, constatándose que diferencias de 25 cm en las alturas dan lugar a que el 100% de los cebados se produzcan en el electrodo de mayores dimensiones, no pudiéndose compensar una pequeña diferencia entre las alturas con una disminución del radio de curvatura.
- El parámetro más importante en la geometría de un electrodo es su altura.
- Cuando la descarga positiva se propaga en el medio natural, genera impulsos de una centena de amperios a intervalos de aproximadamente 20 μ s, fenómeno que no se había observado en los ensayos de laboratorio.
- La velocidad de la descarga ascendente, medida con la ayuda de cámaras y confirmada por medidas electrostáticas (Laroche y otros, 1982) es del orden de 10⁵ m/s (Golde, 1975), valor superior al que se mide en los laboratorios.
- Los parámetros característicos del fenómeno natural (corriente, velocidad,...) son muy superiores a los que se miden en el laboratorio. Los valores del campo eléctrico en el que evolucionan las descargas del laboratorio (del orden de 200 kV/m), y del medio natural (del orden de 40kV/m), conducen a modos de propagación diferentes.

Las consideraciones anteriores y el estudio de los modelos numéricos de la descarga ascendente positiva llevados a cabo por I'Onera en colaboración con la Universidad de Padua, han permitido establecer un nuevo criterio para el cebado

de la descarga ascendente positiva, con base en el concepto que él llama campo de estabilización, y que lo considera como el valor mínimo del campo eléctrico ambiente (E_{est}) que hay que alcanzar para que la descarga líder ascendente se propague de manera estable desde una estructura con la forma de un semielipsoide de altura H y radio de curvatura R_e , situada en un campo uniforme E_o vertical, de manera que si:

- $E_o < E_{est}$, la descarga avanza de manera inestable (avanza algunos pasos; no progresa).
- $E_o > E_{est}$, la descarga avanza de manera estable [la velocidad de propagación de la descarga compensa el efecto de la carga espacial depositada en la región corona de la cabeza, estando este equilibrio dinámico poco influido por el valor del campo superficial ionizante existente en el extremo del electrodo (E_{PC}), valor que se obtiene a partir de la ley de Peek y del coeficiente amplificador del campo (k_{amp}), en el extremo de la estructura].
- Para estructuras semielípticas con radios de curvatura pequeños (hasta valores del orden de 30 cm), el campo de estabilización permanece prácticamente constante y superior al campo crítico ambiente E_{PC} , por lo que se produce la primera descarga corona, pero la descarga no se desarrolla.
- Para estructuras semielípticas con radios de curvatura mayores, el campo ambiente necesario para la formación del primer corona es superior al de estabilización, por lo que la formación de la descarga de corona va asociada a una descarga estable.

Investigación *in situ*

Bajo este título se ha presentado un conjunto de pruebas llevadas a cabo en la estación de Cachoeira Paulista, situada a media distancia entre São Paulo y Río de Janeiro, construida en el centro del Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais INPE, a 625 m de altitud, con coordenadas geográficas: S 22° 41.2: W 44° 59.0 y con un nivel ceráunico entre 100 y 110.

Los ensayos se han llevado a cabo sobre cuatro tipos de pararrayos diferentes:

- Un pararrayos de punta aguda tipo Franklin ($r < 1$ mm)
- Un pararrayos de punta redondeada tipo Franklin ($r = 15$ mm)
- Un pararrayos tipo ESE
- Un pararrayos tipo ESE de alto rendimiento

Dispuestos sobre mástiles metálicos situados en los vértices de un cuadrado de 15 m de lado, estando todas las puntas al mismo nivel del piso (12 m), cada bajante

dotada de medidores de la corriente de la descarga ascendente, con una instalación de puesta a tierra común y habiendo sido sometidos a descargas naturales y artificiales, llegando a las siguientes conclusiones:

- Las condiciones han sido, de lejos, muy diferentes a las encontradas en Francia y Estados Unidos.
- Las descargas artificiales con LRS-A han dado lugar a impactos en el suelo, a alguna distancia de los dispositivos de captura, no avanzando ninguna hipótesis para explicar esta situación pues el número de sucesos (4) ha sido pequeño.
- En las descargas artificiales se han constatado corrientes ascendentes sobre las instalaciones del dispositivo de cebado y la punta Franklin.
- Los videos muestran trazadores naturales ascendentes sobre el de dispositivo ESE.
- Hay que prever cuatro años de experimentación para establecer conclusiones definitivas.

Recomendaciones y conclusiones

Una exhaustiva revisión bibliográfica sobre los terminales ESE fue llevada a cabo por el National Institute of Standards and Technology de los Estados Unidos para la NFPA en 1999 y publicado por la IEEE en febrero de 2000 (Van Burnt *et al.*, 2000). Considerando la dificultad del estudio, los autores presentaron las siguientes recomendaciones, que pueden ser muy relevantes para los trabajos de investigación que se realizan en Colombia:

- Dar prioridad al desarrollo de nuevos métodos para el cálculo o determinación de la distancia de impacto y las zonas de protección contra rayos relacionadas que son más significativas desde un punto de vista estadístico.
- Continuar y extender las pruebas de laboratorio para investigar los efectos de los parámetros relevantes como polaridad, carga espacial, viento y humedad sobre la iniciación probabilística y propagación entre los terminales ESE y los pararrayos tipo Franklin.
- Continuar las observaciones de rayos naturales en y alrededor de sitios de prueba con diferentes terminales donde la frecuencia de las descargas eléctricas atmosféricas sea muy alta.
- Compilar, analizar y centralizar los datos estadísticos existentes y nuevos sobre el desarrollo de la descarga eléctrica atmosférica en diferentes sitios y de diversas fuentes.

Los terminales tipo ESE también han sido analizados recientemente por el comité científico de ICLP y sus miembros. Además, varios artículos y discusiones se han llevado a cabo en las últimas conferencias de ICLP.

Con base en lo anterior y los últimos resultados en pruebas de campo, ICLP emitió un concepto sobre la inclusión de los terminales tipo ESE en la revisión de la norma NFPA 781.

1. La función sobre la cual se basa un terminal tipo ESE nunca ha sido probada bajo condiciones de rayos naturales. Investigadores independientes no han sido capaces de demostrar las ventajas esperadas determinadas por medio de pruebas de laboratorio. Por el contrario, el terminal tipo ESE y la varilla tipo Franklin no muestran mayores diferencias en la distancia de protección, ni diferencia en el número de impactos de rayo a la varilla Franklin y al terminal tipo ESE en pruebas comparativas.

2. El borrador de norma NFPA 781 no distingue claramente entre los diferentes tipos de descargas: *streamer*, líder frío y líder cálido, y si las descargas son estables (autosostenidas) o no (se extinguen). Esto es muy importante, pues cada uno de los tipos de descarga tiene sus propiedades en cuanto a corriente, campo eléctrico, velocidad, etc. Además, para la determinación del "tiempo de inicio del líder ascendente" en el laboratorio, respecto a pruebas de diferentes tipos de varillas, las dimensiones mínimas especificadas son tan pequeñas que es difícil conocer el desarrollo del inicio del *streamer* en un líder frío. Finalmente, el borrador de norma no considera qué relación existe entre el *streamer* o interrupción del inicio del líder frío y el inicio de un líder cálido cuando ellos se desarrollan en condiciones de descargas eléctricas atmosféricas naturales.

3. Las pruebas de laboratorio realizadas no consideran la gran diferencia entre la escala y las dimensiones reales de la naturaleza. Debido a estas diferencias, las diversas condiciones de campo en un laboratorio de alta tensión contra las condiciones de un rayo natural, y debido a la naturaleza no lineal de los diferentes fenómenos de la descarga, es imposible determinar en el laboratorio el desarrollo de un líder cálido estable, tal y como se desarrolla bajo condiciones naturales.

4. Considerando la información arriba mencionada y que la protección contra rayos es asunto de vital importancia para la seguridad, es evidente que el concepto de los terminales no convencionales tipo ESE es inadecuado para dar seguridad tal como pretendía definirlo la norma NFPA 781.

Como consecuencia de lo anterior, ICLP recomendó al comité técnico de protección contra rayos de la NFPA, a finales de 1999, reconsiderar los dispositivos no convencionales tipo ESE en el borrador de norma, como ya había sido hecho una vez hace unos años por las mismas razones.

En conclusión, y de acuerdo con la teoría y los resultados de campo y laboratorio respecto a la comparación entre el pararrayos tipo Franklin y los modernos "dispositivos no convencionales de protección contra rayos", podemos asegurar que, por ahora el invento de Benjamín Franklin sigue vigente después de 250 años.

Dispositivos de protección interna

Una mirada a las normas

Para la protección interna contra rayos, muchas investigaciones se han realizado alrededor del mundo, cuyos resultados se encuentran resumidos en varias normas internacionales de protección de equipo sensible como el electrónico, y prevén niveles de magnitud de corriente de rayo bastante altos. Aquellas que son frecuentemente referenciadas y ofrecen algún detalle son las normas ANSI/IEEE C62.41-1991¹², IEC 61312¹³ e IEC 61024¹⁴. Quienes concibieron la norma ANSI/IEEE C62.41 fueron muy cuidadosos en anotar que la intención no es una norma de cumplimiento, sino que su función es una guía práctica recomendada. Ella da unas referencias básicas de materiales y define un grupo de características de forma de onda que representan la amplitud, rata de aumento, tiempo de cola y frecuencia de un evento transitorio "típico". La norma IEC 61312 es un poco más específica respecto al efecto sobre una instalación eléctrica de un impacto de rayo directo nube-tierra. Las normas IEC también son reconocidas y aceptadas en Estados Unidos, y usadas en la gran mayoría de países del mundo.

Corriente pico de rayo

Cuando se discute el comportamiento de un sistema de protección interna sujeto a impactos de rayo directos o indirectos, la especificación frecuentemente citada es la magnitud de corriente pico. Entonces, la primera pregunta será: ¿Qué magnitud de corriente pico de rayo esperaría un ingeniero de diseño ante la presencia de un evento directo o muy cercano a la instalación o dispositivo que hay que proteger?

Es importante recordar que el rayo es apenas una de las fuentes de interferencia electromagnética en un sistema AC. Las fuentes de interferencia por maniobra de

12 *Recommended Practice on Surge Voltages in Low-Voltage AC Power Circuits.*

13 *Protection against lightning electromagnetic impulse.*

14 *Protection of Structures against Lightning.*

condensadores y maniobra de cargas internas pueden ser más predominantes que los rayos en muchas situaciones.

La norma ANSI/IEEE C62.41 no diferencia entre eventos de maniobra y eventos debidos a rayos cuando define las formas de onda características para pruebas. Para propósitos prácticos, la norma C62.41 divide una instalación típica por proteger en tres categorías. Las características de cada categoría están definidas de acuerdo con la frecuencia de ocurrencia, forma de onda esperada, impedancias características y amplitudes de los eventos. La sección 7.7 de la C62.41 plantea los requerimientos para cada una de las categorías. Para los ambientes en categoría C3 (aquellos con conexión directa a la red AC externa) la forma de onda de corriente es un impulso $8 \times 20 \mu\text{s}$ de magnitud 10 kA. Esto significa que la magnitud de corriente aumentará al 90% de su valor pico (9.0 kA) en $8 \mu\text{s}$ y luego caerá a un valor medio (5 kA) en $20 \mu\text{s}$ (figura 12).

Aunque este valor de pico de corriente es únicamente 10 kA, la norma C62.41 dice que para áreas en categoría C "pueden esperarse tensiones de circuito abierto superiores a 20 kV y corrientes de descarga de 10 kA o más"¹⁵. La norma C62.41 también aclara que "impactos directos de rayo en el punto de interés podrían producir altas tensiones y corrientes"¹⁶. La pregunta es: ¿Cuáles son esos valores?

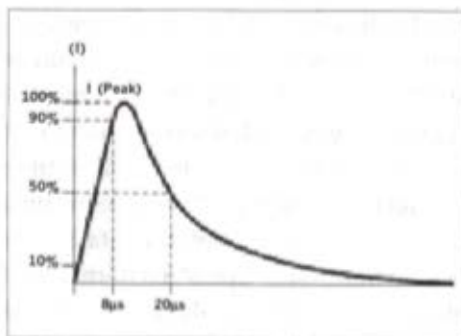


Figura 12. Forma de onda de corriente de impulso $8/20 \mu\text{s}$.

Corriente pico tipo rayo en Estados Unidos y zona tropical

Estudios recopilados y referenciados en la norma C62.41 reportan datos que indican la gran variedad de niveles de corriente de rayo de impactos nube-tierra en el rango de 10 kA a 40 kA. Solamente el 6% de las corrientes sobrepasaron los 60 kA, y menos del 2% de las corrientes estuvieron por encima de los 100 kA. Estas estadísticas involucran estudios hechos en todo Estados Unidos.

Estudios similares realizados por la Universidad Nacional de Colombia (Grupo PAAS)¹⁷ en los últimos 20 años con mediciones de Colombia, Brasil, Malasia y

15 "Open-circuit voltages in excess of 20kV and discharge currents of 10kA or more can be expected".

16 "Direct lightning strikes at the point of interest would produce larger voltages and currents".

17 H. Torres, "Variations of Lightning Parameter Magnitudes within Space and Time", Proceedings, 24th, ICLP, Birmingham, UK, Sep. 1998.

Rodesia, mostrados en los capítulos anteriores, presentan una probabilidad de 50% de que las corrientes de rayo superen los 40 kA en zona tropical. En estos estudios, el 25% de las corrientes sobrepasó los 60 kA y menos del 5% estuvo por encima de los 100 kA.

Otro parámetro de interés en el diseño de protección contra rayos es el número de veces esperado que una descarga impacta en tierra en una región específica, el cual es llamado densidad de rayos a tierra. Una evaluación de densidad de rayos a tierra realizada entre los años 1977 y 2000 con los datos de la Recma¹⁸ en áreas de 3 x 3 km, muestra sitios donde el número de rayos nube-tierra es el más alto del mundo hasta ahora referenciado en la literatura especializada¹⁹, con valores superiores a 65 rayos/km² - año en las regiones alrededor de los municipios de Nechí (Antioquia) y Samaná (Caldas). Por tanto, dependiendo del nivel de actividad de rayos en un área geográfica, la probabilidad de un impacto directo que cause estas corrientes altas se puede incrementar.

La norma ANSI/IEEE C62.41 también trata la distribución de corrientes de rayo inducidas por impactos directos (sección B1). Si se asume un impacto de corriente de rayo de 100 kA en un conductor de la red primaria (que entran a la instalación), la corriente se dividirá en varios caminos a tierra, de acuerdo con el inverso de la impedancia de cada camino a la combinación en paralelo. En términos de la norma ANSI/IEEE C62.41-1991, la interpretación es que el peor caso de un impacto directo de rayo podría inducir 100 kA, $8 \times 20 \mu\text{s}$ de energía en una fase del sistema AC. Después de dividir los 100 kA por el número de conductores en paralelo, se puede asumir que la corriente por conductor sería de 33 kA, $8 \times 20 \mu\text{s}$ (100 kA / 3...L, N, GND).

Corriente pico tipo rayo, IEC 61312

Ahora comparemos la norma ANSI/IEEE C62.41 con la IEC 61312, que aplica a la discusión. De hecho, el título de esta norma indica la protección de sistemas eléctricos por impactos de rayo nube-tierra (en contraste con la ANSI/IEEE C62.41). Debido a que cada instalación tendrá diferentes variables, el método de planeación más lógico es determinar el escenario del caso más desfavorable y diseñar la protección para ese escenario.

Por consiguiente, la norma IEC 61312 analiza la distribución de corrientes de impacto directo y asume que el 50% de la corriente total del rayo entra a la tierra del

18 Red colombiana de localización de rayos - Interconexión Eléctrica S.A. ESP, ISA.

19 H. Torres, "Perspectives of analysis on Cloud to Ground strokes", Proceedings, 2nd International Symposium on Winter Lightning ISWL, Toyama, Japan, September 2001.

sistema y el otro 50% se divide entre el número de conductores afectados. La norma IEC 61312 define el pulso máximo de corriente de rayo para el caso más desfavorable en 200 kA. Después de que el 50% de la corriente penetra el sistema de tierra, la corriente restante se divide al menos en dos partes (fase y neutro) dando 50 kA por conductor que entra a la instalación (figura 13). Un punto clave es la presentación de una nueva forma de onda con diferentes características de tiempo de cola que la forma de onda previamente discutida de $8 \times 20 \mu\text{s}$. Ésta es la forma de onda de impulso de rayo de $10 \times 350 \mu\text{s}$, la cual no se menciona en la norma ANSI/IEEE C62.41-1991.

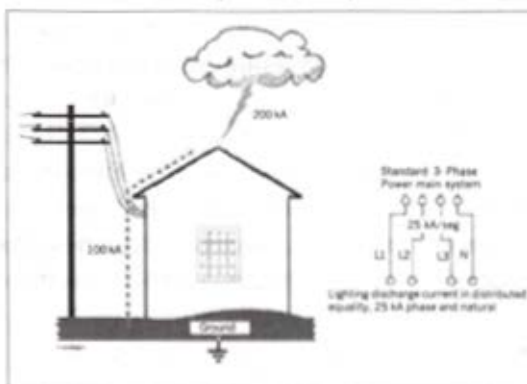


Figura 13. Después de una descarga de rayo de 200 kA, 100 kA se derivan inmediatamente a tierra.

Forma de onda de rayo, IEC $10 \times 350 \mu\text{s}$ corriente de impulso

Como se mencionó anteriormente, los eventos transitorios dinámicos, que además poseen componentes de tensión y corriente, tendrán también un componente de tiempo. La norma ANSI/IEEE C62.41 deja la discusión abierta para diferentes formas de onda por ser usadas para describir –además de otras cosas– sobretensiones que entran a la instalación debido a impactos directos de rayo. Aunque algunos de los efectos de una descarga de retorno de corriente de rayo en líneas de transmisión o distribución de energía eléctrica pueden ser simulados mediante corrientes con formas de onda $8 \times 20 \mu\text{s}$, se ha observado que ésta no simula los efectos de corriente continua en los eventos de rayo nube-tierra. Por tanto, otra forma de onda debe ser seleccionada.

La sección B14 de la norma ANSI/IEEE C62.41 analiza múltiples descargas y la energía total, pero no define una forma de onda representativa de tales eventos. Sin embargo, la sección B14 de la C62.41 describe los eventos de rayo con múltiples descargas con una energía total sustancialmente mayor a la de una descarga sencilla. Los niveles de corriente de las descargas sucesivas de un evento de rayo múltiple son generalmente menores que el primero. Por consiguiente, para diseñar un dispositivo de protección se debe considerar la energía acumulada debida a múltiples descargas. La norma ANSI/IEEE parece dejar la puerta abierta para una forma de onda de impulsos de gran duración para describir eventos nube - tierra.

La norma IEC 61024 se refiere a la protección de estructura contra impactos directos de rayos nube-tierra, y ofrece una clara directiva para definir una forma de onda que describa la energía verdadera que puede penetrar a una instalación, debido a estos efectos. A diferencia de la forma de onda $8 \times 20 \mu\text{s}$, la forma de onda $10 \times 350 \mu\text{s}$ incorpora un tiempo de ascenso rápido con un relativo largo tiempo de cola. La corriente de impulso de 50 kA aumentará a 90% de su valor pico (45 kA) en $10 \mu\text{s}$ y cae a la mitad de su valor (25 kA) en $350 \mu\text{s}$ (figura 14). La estructura que se define en esta norma puede ser cualquiera, desde un edificio alto hasta un contenedor con equipo de telecomunicaciones o un equipo de control.

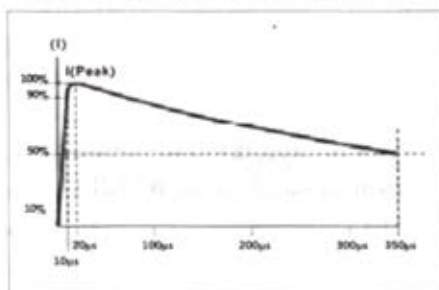


Figura 14. Forma de onda de la corriente de impulso $10/350 \mu\text{s}$.

La norma IEC 61024 también presenta el concepto de zonas de protección contra rayos (*Lightning Protection Zone, LPZ*). Similar a las categorías de la norma ANSI/-IEEE, las LPZ definen diferentes áreas dentro de una instalación de distribución de energía que verá variaciones de niveles de energía de rayo. La figura 15 ilustra los conceptos básicos de zonas de protección contra rayos.

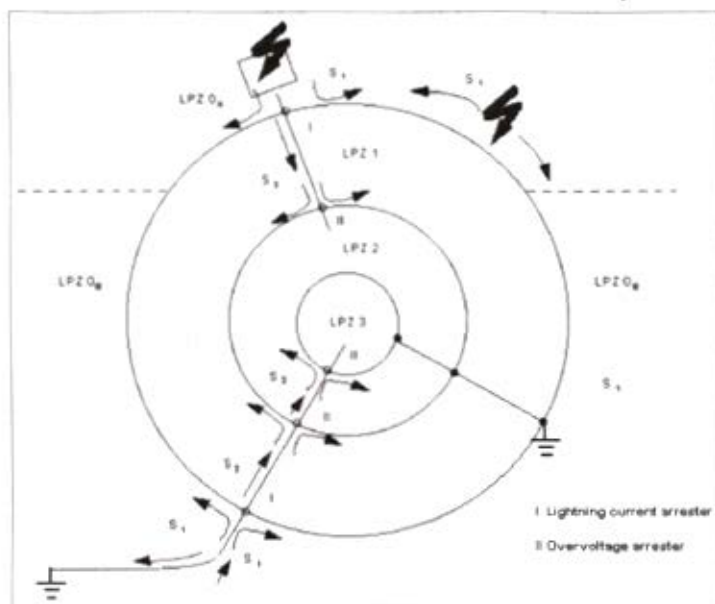


Figura 15. Zonas de protección contra rayos.

El propósito de las LPZ es desviar la energía del rayo y otras perturbaciones lejos de los equipos vulnerables. El número de zonas requeridas está determi-

nado por las propiedades físicas de la estructura y la susceptibilidad del equipo vulnerable.

Equipo sensible instalado, por ejemplo, en contenedores exteriores, particularmente con sistemas de puesta a tierra pobres, requiere un mayor número de zonas. Las zonas básicas de protección contra rayos y formas de onda de corriente se explican a continuación:

La zona LPZ 0A está sujeta a impactos de rayo directos y debe soportar la corriente total del rayo. Los campos electromagnéticos son muy intensos y no atenuados. Aquí es donde se experimentan los eventos de alta energía: 50 kA 10 x 350 μ s/conductor.

En la zona LPZ 0B no hay impactos directos de rayo. Los campos electromagnéticos son intensos, no atenuados: 10 kV, 1.2/50 μ s 5 kA, 8/20 μ s.

La zona LPZ 1 no está sujeta a impactos directos de rayo, la instalación eléctrica está protegida y los campos electromagnéticos son atenuados (típico 30 dB).

Cuando se requiere una reducción adicional de corrientes o campos magnéticos conducidos se pueden introducir zonas adicionales llamadas LPZ 2. En estas zonas existen aparatos terminales con protección centralizada y campos electromagnéticos muy atenuados.

De acuerdo con la norma IEC, la zona LPZ 3 contendrá los equipos protegidos. El principal requisito para la zona 3 es que las fuentes de tensión remanentes no excedan los niveles de prueba especificados en la norma IEC 61000-4-5:

Combinación de ondas: 1.2/50 μ s, 8/20 μ s 2000 A

Tensión de modo normal: 2000 V

Tensión de modo común: 4000 V

Para asegurar la protección de las distintas zonas, hay que utilizar diferentes tipos de aparatos de protección en cada una de ellas:

Zona de transición LPZ 0A hacia LPZ 1: Descargador de corriente de rayo

Zona de transición LPZ 0B hacia LPZ 1 y de 1 a 2B: Descargador de sobretensiones

Zona de transición LPZ 1 a 2 y superior: Descargador de sobretensiones

Protegidos con este concepto, los equipos e instalaciones eléctricas y electrónicas pueden evitar fallas y averías, incluso en el supuesto de descargas directas de rayo o descargas de rayo cercanas.

Forma de onda

Existen diferencias entre las normas IEC internacionalmente aceptadas y las guías ANSI/IEEE adoptadas en Estados Unidos. Un ejemplo que muestra las diferencias en cuanto a la robustez requerida para un DPI que maneje impulsos de corriente de 100 kA, $8 \times 20 \mu\text{s}$ versus otro de 50 kA, $10 \times 350 \mu\text{s}$ se presenta a continuación:

Cuando se compara visualmente una forma de onda de 100 kA, $8 \times 20 \mu\text{s}$ con una de 50 kA, $10 \times 350 \mu\text{s}$ (figura 16), se puede ver rápidamente que el desempeño de una forma de onda de más larga duración a su valor medio del pico de corriente parece ser un índice más exacto de la robustez de un DPI. Como lo describe la IEC, ésta es la representación más exacta de un evento de rayo.

Para ilustrar un poco más este aspecto, McCurdy (2000) calcula diferentes escenarios para ver los diferentes comportamientos de un DPI. Este cálculo se describe en términos de amperio-segundo (o culombios). Es un cálculo relativamente sencillo que requiere un estimativo del área bajo la curva tanto para la onda 100 kA, $8 \times 20 \mu\text{s}$, como para la 50 kA, $10 \times 350 \mu\text{s}$.

Para ahorrarnos la integración y hacer un cálculo simple, se determinará el equivalente aproximado para cada forma de onda en términos de una onda cua-

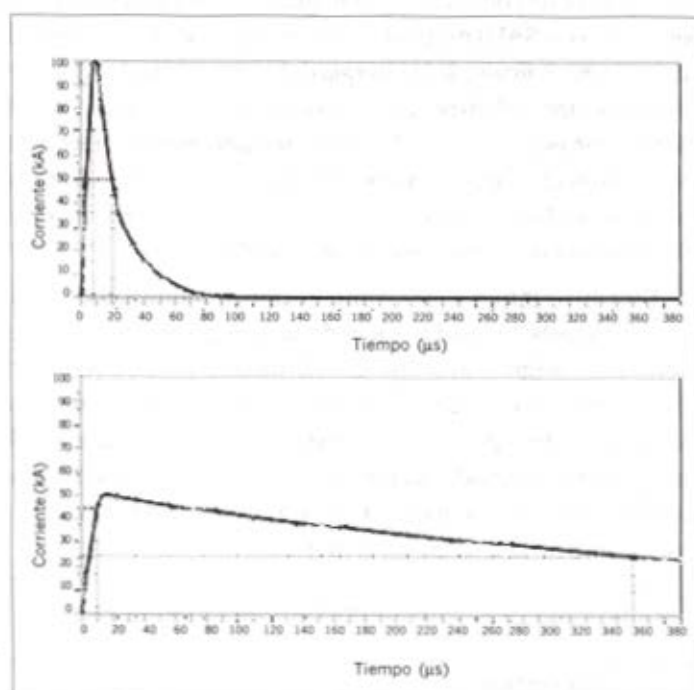


Figura 16. Forma de onda 100 kA, $8 \times 20 \mu\text{s}$ versus 50 kA, $10 \times 350 \mu\text{s}$.

drada. Para la forma de onda $10 \times 350 \mu\text{s}$ se puede aproximar a una onda cuadrada con 50 kA de magnitud y duración de $500 \mu\text{s}$. Para la forma de onda $8 \times 20 \mu\text{s}$ se puede aproximar a una onda cuadrada de 100 kA de magnitud y duración entre 20 y $30 \mu\text{s}$. Para este ejercicio se aproximó a $30 \mu\text{s}$.

Comparación del manejo de carga

El DPI 1 con capacidad de manejo igual a la forma de onda 50 kA, $10 \times 350 \mu\text{s}$:

- Valor de corriente pico (I) para forma de onda $10 \times 350 \mu\text{s} = 50 \text{ kA}$
- Tiempo de duración de la prueba de corriente de rayo = $500 \mu\text{s}$
- La carga será entonces: $50 \text{ kA} (500 \mu\text{s}) = 25 \text{ amperios} \cdot \text{segundo}$ o culombios

El DPI 2 con capacidad de manejo igual a la forma de onda de 100 kA para $8 \times 20 \mu\text{s}$:

- Valor de corriente pico (I) para forma de onda $8 \times 20 \mu\text{s} = 100 \text{ kA}$
- Tiempo de duración de la prueba de corriente de rayo = $30 \mu\text{s}$
- La carga será entonces: $3 \text{ amperios} \cdot \text{segundo}$ o culombios

Esta comparación muestra que el DPI 1 descarga ocho veces la carga del DPI 2. Basados en esta conclusión se puede preguntar: ¿Cómo un dispositivo puede manejar el calor de una carga tan grande? De hecho, los DPI tradicionales (tecnologías MOV y SAD) probablemente no puedan, porque utilizan componentes que disipan una porción de la energía del rayo como calor que, eventualmente, lleva a la destrucción del dispositivo. Sin embargo, existen tecnologías relativamente recientes que están disponibles en el mercado mundial para protección contra rayos de sistemas eléctricos y equipos. Una de ellas es conocida como de alto rendimiento²⁰, la cual disipa esta energía en forma de un arco de plasma. El DPI 1 que se describe arriba usa este tipo de tecnología.

Para ilustrar mejor esta comparación, tomemos el ejemplo de arriba y amplieemos el análisis hacia el manejo de la energía en términos de joules (carga x tensión). Para asignar una energía nominal a un DPI se determina la "energía de absorción" con base en la corriente de impulso que puede manejar, la tensión de *clamping* y el tiempo de duración del evento. Para este ejemplo, se usará la aproximación de onda cuadrada para calcular los eventos de $100 \text{ kA} \ 8 \times 20 \mu\text{s}$ versus uno de $50 \text{ kA} \ 10 \times 350 \mu\text{s}$. Este cálculo da la energía depositada en el dispositivo de protección, no la energía en la fuente.

²⁰ Arc chopping spark gap.

Comparación de la energía nominal

DPI 1 con capacidad de manejo igual a 50 kA para una forma de onda $10 \times 350 \mu\text{s}$:

- Valor de corriente pico (I) para forma de onda $10 \times 350 \mu\text{s} = 50 \text{ kA}$
- Constante de tiempo estimada "t" de la prueba de corriente de rayo = $500 \mu\text{s}$
- Nivel de protección (tensión en el DPI cuando está presente I) = 600 V^*
- Energía en el DPI = $50 \text{ kA} \cdot (500 \mu\text{s}) \cdot (600 \text{ V}) = 15 \text{ kJ}$

DPI 2 con capacidad de manejo igual a 100 kA para una forma de onda $8 \times 20 \mu\text{s}$:

- Valor de corriente pico (I) para forma de onda $8 \times 20 \mu\text{s} = 100 \text{ kA}$
- Constante de tiempo estimada "t" de la prueba de corriente de rayo = $30 \mu\text{s}$
- Nivel de protección (tensión en el DPI cuando está presente I) = 7.5 kV^{**}
- Energía en el DPI = $100 \text{ kA} \cdot (30 \mu\text{s}) \cdot (7.5 \text{ kV}) = 22.5 \text{ kJ}$

La impedancia de un DPI tipo *clamping* es fuertemente dependiente de la corriente de impulso. Por tanto, muchos fabricantes citan grandes corrientes pico de impulso $8 \times 20 \mu\text{s}$ listando sus tensiones *clamping* como probadas según ANSI/IEEE C62.41 6 kV, 3 kA combinación de onda o como una combinación de onda 20 kV, 10 kA. Esto dará un menor nivel de protección (tensión *clamping*) que el dispositivo que realmente cumple con alta corriente pico de impulso.

A simple vista parece que el DPI 2 tiene mejor capacidad de manejo de energía, y por tanto ofrece mejor rendimiento. Pero lo que realmente nos dice este cálculo es que el DPI 2 tiene para convertir más energía para un pulso de corriente 100 kA, $8 \times 20 \mu\text{s}$. Con las tecnologías de alto rendimiento, como la usada para el DPI 1, la conversión de energía es menor, debido a que ofrece un mejor corto circuito que una tecnología MOV o SAD, y un mejor corto circuito ofrece mejor protección. La menor caída de tensión ($V = I \times R$), mientras descarga la corriente, es mayor para el tiempo de vida del componente. La razón de esto se debe a la menor energía convertida en calor. El calor es el elemento que fuerza a daños a los DPI tradicionales y hace que sean menos robustos y, eventualmente, fallen.

* Este valor de nivel de protección se tomó de la tecnología *arc chopping spark gap*. Esta es la tensión de encendido del arco que existe justo antes de que el flujo de corriente sea interrumpido. El nivel de protección que se ve en el equipo "aguas abajo" es de 900 V.

** Este valor de nivel de protección se tomó de un fabricante que usa la tecnología MOV. Ésta se muestra en un oscilograma como la tensión *clamping* cuando el dispositivo es probado a 100 kA, $8 \times 20 \mu\text{s}$.

Conclusiones

¿Por qué si se acepta por parte de las normas ANSI/IEEE e IEC y mediciones hechas en zona tropical que las corrientes pico mayores de 50 kA tienen una baja probabilidad de ser esperadas en un evento de rayo nube-tierra, muchos fabricantes insisten en ofrecer altas corrientes en sus DPI? En general, muchos fabricantes de DPI tradicionales (MOV y SAD) indican altas corrientes pico de impulso como una medida de confiabilidad o esperanza de vida de un DPI. Debido a la degradación y esfuerzos de calor sobre estos dispositivos, como se explicó arriba, ellos tienen que ser diseñados con muchas mayores corrientes pico de impulso que podrían experimentar en un evento de rayo. Sin embargo, como se muestra, la corriente pico de impulso es sólo un elemento que fija la robustez de un DPI. El tiempo de duración de la prueba de corriente de impulso y el nivel de tensión de protección de un DPI son indicadores adicionales de qué tan bien un DPI manejará la energía de un evento de rayo nube-tierra.

La forma de onda $10 \times 350 \mu\text{s}$ es la representación más exacta de un evento tipo rayo que puede llegar a interferir un equipo eléctrico o electrónico en una instalación; por tanto, esta forma de onda es mucho más conveniente para el diseño de protecciones internas contra rayos en un país con la mayor actividad de rayos del mundo como Colombia. Adicionalmente, el desempeño de una forma de onda de más larga duración a su valor medio del pico de corriente es un índice más exacto de la robustez de un dispositivo de protección interna, DPI.

Referencias

- Alconchel, O. *et al.*, "Study of a type of early streamer emission lightning conductor", Workshop on Physics of Lightning, France, 1993.
- Anderson, J., "Lightning performance of transmission lines", *Transmission line reference book 345 kV and above*, Palo Alto: EPRI, 1975, pp. 545-585.
- Anderson, R. and Eriksson, A. J., "Lightning Parameters for Engineering Applications", *Electra*, No. 69, 1980, pp. 65-101.
- Cassie, A. M., "The effect of a radioactive source on the path of a lightning stroke", Tech. Report, Electrical Research Association, Surrey, UK, 1969.
- Cigre 33.01(TF 03), *Lightning Exposure of structures and interception efficiency of air terminals*, April 1997.
- Cortina, R., Garbagnati, E., Serravalli, W., Delleria, L., Pignini, A., and Thione, L., "Some aspects of the evaluation of the lightning performance of electrical systems", International conference on large high voltage electric systems, Reporte No. 33-13, París, Cigre, 1980, 21 páginas.
- Delleria, L. and Garbagnati, E., "Lightning stroke simulation by means of the leader progression model - Part I : Description of the model and evaluation of exposure of free-standing structures", *IEEE, Transactions on power delivery*, Vol. 5, No. 4, oct. 1990, pp. 2009-2022.
- , "Shielding failure evaluation: application of the leader progression model", The international conference on lightning and power systems, Jun. 1984, London, UK, IEE, 6 páginas.
- , "Lightning stroke simulation by means of the leader progression model. - Part II: Exposure and shielding failure evaluation of overhead lines with assessment of application graphs", *IEEE, Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, No. 4, oct. 1990, pp. 2023 - 2029.
- Delleria, L., Garbagnati, E., and Pignini A., "Lightning simulation by means of a leader progression model", The International Aerospace Conference on Lightning and Static Electricity, Mar. 1982, Oxford, 9 páginas.
- , "Shielding Failure Evaluation", *Colloquium on Insulation Coordination of Cigre Study Committee*, 33th, Edinbourgh, 1983, 27 páginas.
- Delleria, L., Garbagnati, E., and Sartorio, G., "Test on Configurations Simulating Earthed Structures to Investigate Inception and Propagation of Positive Upward Leaders", SC 33 WG 33.01 (TF 03) IWD, Italia, Cigre, 1995, 13 páginas.

Dellera, L., Garbagnati, E., and Pignini A., "A lightning model based on the similarity between lightning phenomena and long laboratory sparks", The 16th International Conference on Lightning Protection, Szeged, Hungary, CESI, Jun. 1981, 17 páginas.

Derek, L., *Applied Mathematical Sciences: Elliptic Functions and Applications*, New York: Springer-Verlag, 1989, pp. 73-76.

Eybert-Bérard A., Thirion B., Potvin C., Lanoie R., Lessard A., *Recherche in situ*, Foudre 2001, 15-16 de mayo 2001, Montpellier (Francia), pp.157-165.

Eybert-Bérard A., Thirion B., Potvin C., Lanoie R., Mercure, H., *Lightning Experimentation in Brazil*, comunicación personal.

Flannery, B. P., Teukolsky, S. A. and Vetterling, W. T., *Numerical Recipes in C: The art of Scientific Computing*, Cambridge University Press, 1988, p. 201.

Gumley, J. R. *et al.*, "Nuclear lightning protection and the new coaxial lightning protection system", Tech. Report, Nuclear Regulatory Commission, 1978.

Hermoso, B., Torres, H., "Pararrayos ESE y puntas Franklin con espíritu de aclaración", Memorias ALTAE 2001, La Habana, Cuba, julio de 2001.

Kernighan, B. W., y Ritchie, D. M., *El lenguaje de programación C*, 2a. ed., México, Prentice-Hall Hispanoamericana, 1993, 285 páginas.

Lalande, Ph., *Étude des conditions de foudroiement d'une structure au sol*, Thèse 9/98.

Leite, D. M., "Experience of radioactive lightning aerials in field and in laboratories", Proc. 18th ICLP, Germany, 1985.

Les Renardières Group, "Positive discharges in long air gaps at Les Renardières - 1975 Results and Conclusion", *Electra*, No. 53, Jul. 1977, pp. 31-153.

Liew, A. C., "Lightning damage and problems experienced in some structures/Systems in Singapore", *Lightning Protection 92 ERA*, UK, 1992.

Mackerras, D. *et al.*, "Standard and nonstandard lightning protection methods", *JEEE*, Australia, Vol. 7, June 1987.

Mackerras, D., Darveniza, M., "Critical review of claimed enhanced lightning protection properties of early streamer emission air terminals for lightning protection of building", *Cigre* 1995, SC33, WG 33.01, 15 IWD.

McCann, E. D., "The measurements of lightning currents in direct strokes", *AIEE Transactions*, Vol. 63, 1944.

McCurdy, P., "Evaluating Surge Protection Devices for Lightning Protection", *Power Quality Assurance Magazine*, April 2000.

Mosch, W., Lemke, E., Engelmann, E. and Dietrich, M., "Dimensioning of screening electrodes for UHV test equipments based on a critical streamer intensity", Third international symposium on high voltage engineering, Milan: ISH, 1979, 4 páginas.

Nielsen, J., Elliptic Integral of the First Kind $K(k)$, s.l., s.n., 1994, 7 páginas.

Nielsen, J., and Pedersen, A., "Simulation of Field Beneath Thunderclouds by Means of Ring Charges for Implementation in the Leader Progression Model (LPM)", 22nd International Conference on Lightning Protection, ICLP, Budapest, Hungary, Sep. 1994, pp. R 1a-00 a R 6b-09.

Ortiz G., J.D., Estudio experimental del fenómeno de predescarga en aire de una configuración de campo divergente. Santafé de Bogotá, 1992, 226 p. Trabajo de grado (Magister Scientiae en Ingeniería Eléctrica con especialidad en alta tensión), Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Eléctrica.

Pierce, E. T., "Triggered lightning and some unsuspected lightning hazards", Standard Research Institute, *Scientific note No. 15*, Jan. 1972.

Report of the Committee on Lightning Protection, M., Guthrie, Chair, NFPA780, comunicación vía Internet, May 2000 ROP.

"Protection contre la Foudre", Catálogo Franklin France.

Rison, W., "A study of lightning strikes in the vicinity of a radioactive preventor", Tech. Report, Langmuir Laboratory, New Mexico, USA, 1991.

Roberts, J. E., "Ionizing radiation and lightning hazards", *Nat.*, Vol. 210, Apr. 30, 1966, pp. 514-515.

Scientists Oppose ESE Devices, comunicación vía Internet.

Singer, H. and München, T., "Computation of electric fields with leader channels and space charge", *Electra*, No. 23, 1972, pp. 120-124.

Singer, H., Steinbigler, H., and Weiss, P., "A Charge Simulation Method for the Calculation of High Voltage Fields", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1974, pp. 1660-1668.

Thione, L., "The dielectric Strength of Large Air Insulation", 1979 BBC Symposium: Surges in high-voltage networks, Switzerland, Milan, CESI, 1979, 51 páginas.

Torres H., "¿Qué tan eficaces son los modernos dispositivos no convencionales de protección contra rayos? El invento de la varilla para rayos de Franklin sigue vigente después de 250 años", *Revista AEIUN*, Bogotá, julio de 2000.

Torres, H., "Diagnóstico incendio tanque Tk-4102 (28 de marzo de 2000) - Cusiana", Concepto técnico para BP Colombia, Bogotá, junio de 2000.

Torres, H., "Espacio y tiempo en los parámetros del rayo", trabajo de promoción a profesor titular, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1998.

Torres, H., "Incendio en Tanque TK - 508, Oxy - Terminal Coveñas - Concepto técnico", Documento Oxy, Bogotá, Colombia, octubre de 1998.

Torres, H. *et al.*, "Diagnosis of a tank fire due to a lightning strike in a petroleum facility", *Proceedings VI International Symposium on Lightning Protection SPDA*, Santos, Brazil, November 2001.

Torres, H., y Castaño, O., *El rayo*. Bogotá, Icontec, 1994, 154 páginas.

Uchida, H., *et al.*, "Laser triggered lightning experiments in the laboratory", 8th ISH IEE, Japan, 1993.

Uman, M., *The lightning discharge*, Orlando, Academic Press, 1987, International Geophysics series, Vol. 39, 368 páginas.

Van Brunt, R. J., *et al.*, "Early Streamer Emission Lightning Protection Systems: An Overview", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 16, No. 1, Jan./Feb. 2000, pp. 5-24.

Velázquez, R., Gerez, V., Mukhedkar, D., and Gervais, Y., "Probabilistic Calculations of Lightning Protection for Tall Buildings", *IEEE, Transactions on Industry Applications*, Vol. IA-18, No. 3, May. - Jun., 1982, pp. 252-259.

Williams, E. R., "Electrificación en las tormentas", *Investigación y Ciencia*, Edición Española de Scientific American No. 148, Ene. 1989, pp. 42-52.

Wu Pu-san *et al.*, "Testing research on effectiveness of radioactive lightning conductors", Proc. ISH, New Orleans, L.A., 1989.

Zheng, J. C. *et al.*, "On the effectiveness of air terminations for the lightning interception", *Cigre* 1998, SC33, WG33.01, 16 IWD.