

MODELO ELECTROATMOSFERICO DEL RELAMPAGO SOBRE EL RIO CATATUMBO.

Falcón, Nelson.^{(1)*}; Pitter, Williams.⁽²⁾; Muñoz, Angel.⁽²⁾;
Barros, Tito.⁽³⁾; Viloría, Angel.⁽³⁾; Nader, Dia.⁽⁴⁾.

¹*Universidad de Carabobo. FACYT. Dpto. Física. Apdo. Postal 129 Valencia 2001.
Edo. Carabobo, Venezuela. Email nfalcon@thor.uc.edu.ve.

²La Universidad del Zulia. Facultad de Ciencias. Dpto. de Física.

³La Universidad del Zulia. Facultad de Ciencias. Dpto. de Biología.

⁴La Universidad del Zulia, Facultad de Ingeniería. Dpto. de Física.

Abstract.

At southern order of the Maracaibo Lake (Venezuela) usually it's seen a permanent lightning, denominated Maracaibo Lighthouse or Catatumbo Lightning. The local, old and recurrent character of the phenomenon hasn't a similar in the world. Diverse hypothesis has been surmised to explain its occurrence being reason of controversy its complete understanding. The result of the expeditions is carried out leading to the characterizing the phenomenon and intends a microphysics model for this atmospheric electric activity.

Key words: Catatumbo Lightning, atmospheric electricity.

Resumen.

Al sur del lago de Maracaibo (Venezuela) se presenta un relámpago permanente denominado "Faro de Maracaibo" o "Relámpago del Catatumbo". El carácter local, antiguo y recurrente del fenómeno tiene características únicas en el mundo. Diversas hipótesis se han conjeturado para explicar su ocurrencia siendo motivo de controversia su completa comprensión. Se presenta el resultado de las expediciones realizadas con el fin de caracterizar el fenómeno y se propone un modelo microfísico para la actividad eléctrica atmosférica observada en la región.

Palabras Claves: Relámpago del Catatumbo, electricidad atmosférica.

1 .Introducción.

Las manifestaciones de la actividad eléctrica atmosférica son comunes en toda la región de los deltas de los ríos Catatumbo y Bravo, al sur del lago de Maracaibo (Venezuela). Destacándose entre tales meteoros la ocurrencia persistente de un relámpago sordo, conocido como el “Relámpago del Catatumbo” o “Faro de Maracaibo”, cuyo fulgor y luminosidad es tal que puede ser apreciado desde centenares de kilómetros de distancia, en los Andes venezolanos, el río Magdalena en Colombia y desde el Mar Caribe, durante casi todo el año ⁽¹⁾⁽²⁾.

La zona de ocurrencia del “Relámpago del Catatumbo” no varía desde su primera mención escrita en 1597 ⁽³⁾. El naturalista Alexander von Humboldt describe el fenómeno como “ ...explosiones eléctricas que son como fulgores fosforescentes...” ⁽⁴⁾ y el geógrafo Agustín Codazzi lo reseña “como un relámpago continuado” para casi todas las noches del año, incluso en el período de sequía ⁽⁵⁾.

No existe consenso en torno al mecanismo causal que explique la naturaleza de la actividad eléctrica permanente y localizada, ni sobre la ubicación del o de los epicentros, sobre todo porque la región de ocurrencia es una zona inhóspita de 226.000 hectáreas de pantanos, casi permanentemente inundados, con abundante nubosidad y pluviosidad durante todo el año, que conforman el “Parque Nacional Ciénagas de Juan Manuel”. (véase Zavrostky⁽⁶⁾ y referencias en él)

El primer intento moderno de caracterizar la fenomenología del “Relámpago del Catatumbo” atribuye el origen a las tormentas eléctricas permanentes ocasionadas por la circulación cerrada de vientos en la región, sin descartar la posibilidad de la existencia de

algún agente causal en el subsuelo, tales como fuentes geotermales, geomagnéticas o radiactivas ⁽¹⁾.

En 1966 Andrés Zavrostky y colaboradores efectúan tres expediciones, sin penetrar en las ciénagas, concluyendo que la causa del fenómeno presumiblemente “sea una especie de tormenta permanente en cierta región de Venezuela de índole esencialmente eléctrica entre las nubes cargadas de electricidad y cierta carga permanente en el suelo...en la Gran Ciénaga al oeste del Lago de Maracaibo” ⁽⁶⁾.

La actividad tormentosa y la existencia de cierta carga eléctrica superficial no explican el carácter antiguo y localizado del fenómeno ni el mecanismo físico responsable de la fosforescencia (relámpago) que acompaña la ocurrencia de los rayos, como tampoco da cuenta de la intermitencia permanente que le caracteriza incluso en épocas de sequía.

Por otro lado, postular la existencia de tormentas eléctricas permanentes como causa del fenómeno requiere de un estudio microfísico de los procesos atmosféricos que den cuenta de los mecanismos de separación de cargas en nubes de tormentas, y permitan especificar las condiciones para la existencia de un intenso campo eléctrico local como agente causal de las descargas nube-tierra.

El propósito de este trabajo es anticipar un posible mecanismo que explique las características del “Relámpago del Catatumbo”, así como la identificación de los agentes causales y cocausales del fenómeno. Para ello se destacan las condiciones de su ocurrencia y la fenomenología observada durante las expediciones llevadas a cabo al interior de las ciénagas por los autores durante el bienio 1998-1999 (sección 2), se postula un modelo de los agentes causales con la estimación teórica de las magnitudes físicas relevantes (sección 3) y, finalmente, se discuten las consecuencias explicativas del modelo (sección 4).

2. Observaciones y Fenomenología.

Generalidades.

La extensa región de cerca de 226.000 hectáreas al sur-oeste del lago de Maracaibo, está delimitada al norte por la cuenca del río Santa Ana y al sur por el río Catatumbo, por el oeste la carretera regional #6 que une las poblaciones de Machiques con Casigua El Cubo y por el este los deltas de los ríos citados que vierten sus aguas en el Lago de Maracaibo. Comprendiendo en su interior toda la cuenca del río Bravo, el río la Concepción, las Ciénagas de Juan Manuel de Aguas Claras y de Aguas Negras, las lagunas La Belleza, la Negra, Juan Manuel, La Estrella y otras menores como se muestra en la Figura 1. Corresponde a una ecosistema cenagoso, de bosques de pantano y manglares además de un sistema delta lacustrino estuario en la zona de la desembocadura de los ríos.. Esta gran explanada comparte la misma historia geológica del sur del Lago de Maracaibo, formando una depresión entre las cordilleras del Perijá y Los Andes venezolanos. Las lagunas y pantanos inundados exhalan continuamente metano por descomposición de los detritus y humus, siendo la profundidad de las aguas variable entre los 2 y 4 metros, con temperaturas cálidas entre los 29 y 30°.

Condiciones Meteorológicas.

La temperatura media anual es de 28° C , siendo la máxima de 30° -36° C en la población de Los Encontrados a las 15 HLV, y la mínima entre los 23° y 25 °C en el mismo lugar hacía las 5 HLV. Los vientos de la Región presentan dos circulaciones

cualitativamente diferentes. Por debajo de la cota de 1500 m s.n.m. presenta un proceso de deslizamiento forzoso debido a las montañas de las cordilleras del Perijá y de Los Andes y conlleva a la formación de nubes convectivas y de gran desarrollo vertical entre los 500 y 1500 m de altura, durante todo el año, principalmente al pie de monte. A mayor altura, sobre los 3000 m s.n.m. la dirección de los vientos y su velocidad media es la característica para el resto de Venezuela ⁽⁷⁾.

La zona de convergencia local de vientos, atribuida por algunos autores ⁽²⁾ como agente causal del fenómeno, se presenta muy al sur del río Catatumbo y de la zona considerada. Los mapas isoyéticos no evidencian máximos locales de pluviosidad y evidencian que las características climáticas globales de las ciénagas son comunes a todo el Lago de Maracaibo ⁽⁷⁾.

Epicentros.

Se efectuaron dos expediciones al interior del Parque “Ciénagas de Juan Manuel”, durante la primera expedición (10 al 13-12-1998) se instalaron puntos de observación en la localidad de “Los Encontrados” , a orillas del río Catatumbo (09° 03,89’ N 72° 14,14’ W 440 m snm) y en el delta de dicho río al sur del Lago de Maracaibo, en el palafito de “Punta Chamita” (09° 05,77’ N 71° 42,88’ W 196 m snm) también se exploró la zona comprendida entre ambos puntos a lo largo del curso del río. Los resultados evidenciaron que el fenómeno se presenta en dos regiones bien localizadas al oeste del Catatumbo, al interior de las ciénagas, mas particularmente entre las Lagunas la Estrella y la Belleza, colindantes con el río Bravo. Desde los puntos de observación se visualizó el “Relámpago del Catatumbo” como destellos nube-nube y el resplandor fosforescente (relámpago) en

regiones del cielo bien localizadas y persistentemente durante toda la noche, si bien, por momentos de hasta una hora se dejaba de observar debido a nubes interpuestas entre el sitio de observación y los epicentros distantes varias decenas de kilómetros al interior de las ciénagas. También se observaron esporádicos rayos nube-tierra en otras direcciones del cielo que no presentaban la magnitud, persistencia y cuasiperiodicidad de las otras descargas.

La segunda expedición permitió ubicar la región de ocurrencia del fenómeno, se efectuó entre los días 20 al 23 de Julio de 1999 al interior de los pantanos. Se instalaron sitios de observación en: la localidad de “Encontrados” (09° 3' 51" N 72° 14' 09" W 14 m snm), la laguna La Negra (09° 14' 13" N 72° 06' 33 W 36 m snm) y las orillas del río Bravo (09° 14' 15" N 72° 06' 31" W 41 m snm) así como la exploración de los recorridos ribereños y lacustres intermedios. Los resultados corroboraron la existencia de zonas de epicentros en las cercanías de las lagunas, al interior de las ciénagas, colindantes con el río Bravo. Así como la persistencia de al menos dos regiones del cielo, bien diferenciadas con separación angular de 66° de azimut, donde se producen las descargas. El mapa de la figura # 1 muestra los posibles epicentros y su extensión en base a las observaciones realizadas.

Características de las descargas eléctricas.

Las fotografías (véase) evidencian la característica descarga nube-nube, y su relativo confinamiento en una cierta región del cielo, sin la presencia de extensas formaciones nubosas como cabría de esperar en una típica tormenta. Los rayos no son nube-tierra ni tierra-nube, lo que permite descartar fuentes geotermales, geomagnéticas o radiactivas en el substrato. Las descargas eléctricas parecen provenir solamente del interior

profundo de la nube. La fotografía C muestra los rayos descendentes entre las dos células nubosas.

La presión atmosférica (P) a la que está sujeta una célula de la nube puede ser estimada si se conoce la distancia al epicentro (d) y se mide la separación angular entre la nube y el horizonte (θ). Suponiendo que la presión superficial es P_o , el modelo lineal de la tropósfera demanda que:

$$P = P_o \exp(-\alpha d \operatorname{tg} \theta).$$

donde se ha empleado $\alpha=0,116 \text{ km}^{-1}$ ⁽⁸⁾. La figura # 2 ilustra los valores de presión y temperatura al interior de dichas nubes

Por otro lado la característica actividad eléctrica nube-nube implica que los epicentros se desplazan ligeramente, conforme las nubes son transportadas por los vientos locales. El gran desarrollo vertical de estas agrupaciones nubosas, no permite rápidos o grandes desplazamientos respecto a los epicentros.

Medidas con el electrómetro, a nivel superficial en el punto de observación en las orillas del río Bravo, dan cuenta de la existencia de cargas eléctricas atmosféricas. Depositando sobre el electrómetro $Q=0,015 \mu\text{C}$ en el lapso de 15 minutos, y al incremento de la diferencia de potencial eléctrico a razón de 0,33 V/s (figura #3).

Sobre la frecuencia y otras características de los destellos (rayos y relámpagos) debe señalarse que no se encontró una moda o frecuencia característica. Se evidencia que las descargas ocurren entre 16 y 40 por minuto, y luego de la observación de los rayos al interior de las nubes, se genera un resplandor (relámpago) fosforescente en el entorno,. Todos las descargas son sordas, y son mas frecuentes entre la zona interna superior y la

zona interna inferior de la propia nube. El color de los destellos (relámpago) es similar al apreciado en las fotografías, las descargas (rayos) evidencian el característico color azul eléctrico correspondiente a la ruptura dieléctrica del aire.

Los espectros en la región del visible muestran la típica emisión de la línea $H\alpha$ del Hidrógeno, muy débiles para ser fotografiados con los equipos portátiles transportados sobre las lanchas de pescadores; únicos vehículos para desplazarse en los pantanos.

Visibilidad del fenómeno.

Las horas de visibilidad del fenómeno son variables, entre las 19 y las 04 HLV, y parecen depender del punto de observación. A distancias relativamente cercana a los epicentros, comienza a observarse con la desaparición de la luz cenital. Desde regiones más distantes como la localidad de “Los Encontrados” es observable a simple vista cuando el cielo está despejado en dirección a la visual desde dicho punto y las regiones de las lagunas, principalmente en horas previas al alba (desde las 01 horas HLV). A medida que el observador se aleja de los epicentros, la altura respecto al horizonte disminuye, dificultando su observación. Por ser descargas a lo interno de nubes, un observador colocado justo debajo de ellas no aprecia el fenómeno.

La data recabada y la fenomenología descrita permiten proponer un modelo explicativo del origen del fenómeno y su mecanismo físico de ocurrencia, que describiremos a continuación.

3. Modelo Electroatmosférico.

La extensión de los pantanos, permanentemente inundados, hacen pensar que el gas metano debe jugar un rol importante en los procesos microfísicos que tienen lugar en las nubes de la región.

Como la molécula de metano (CH_4) es insoluble en agua, al generarse en las ciénagas y lagunas se eleva rápidamente por ser más liviana que el aire, incluso por encima de las nubes de vapor de agua. Este fenómeno se incrementa en horas siguientes al ocaso, cuando la ausencia de irradiación solar evita su fotodisociación; lo que podría explicar por que el relámpago solo es visible en forma nocturna y nunca en horas diurnas.

La generación de Metano por descomposición de detritus y humus de los pantanos se incrementa durante el verano porque las aguas son menos profundas y la temperatura media aumenta, facilitando la descomposición del material orgánico. Ello parece explicar porque el “relámpago del Catatumbo” es más visible en épocas de sequía que en invierno.

La sección transversal de absorción (σ), en la línea H Lyman α (121,57 nanómetros), es de 18 Mbn para el metano, de 14 Mbn para el vapor de agua, $6 \cdot 10^{-5}$ Mbn para el nitrógeno gaseoso y $9 \cdot 10^{-3}$ Mbn para el oxígeno gaseoso ⁽⁹⁾. Lo que permite suponer que los destellos (relámpagos) son producidos por la presencia de metano en el interior de las nubes altas de la región.

La fluorescencia observada como relámpago, luego de la generación de rayos a lo interno de las nubes altas, puede deberse a la existencia de estados metaestables de la molécula de metano y del metilo.

Un cálculo preciso de estos estados metaestables envuelve gran complejidad y está fuera del alcance de este trabajo. La función propia de enlace del metano no ha sido calculada aún para la estructura resonante mas simple ⁽¹⁰⁾.

El tiempo de vida de los estados metaestables es comparable a la duración de la descarga difusa (relámpago). El tiempo de vida “ τ ” de los portadores de carga “e” y masa “m” que se desplazan en un campo eléctrico uniforme “E” a velocidad “Vz” pueden ser estimados a partir de un modelo simplificado ⁽¹¹⁾:

$$\tau \cong \frac{m v_z}{e E}$$

Por otra parte, la Ecuación de Saha ⁽¹²⁾ permite estimar el grado de ionización del metano (x) toda vez que se conoce la temperatura y presión del gas:

$$\text{Log}_{10} \frac{x^2}{1-x^2} = -5040 \frac{g}{T} + \frac{5}{2} \text{Log}_{10} T - 6.5$$

Si se supone una atmósfera típica los valores de presión y temperatura del gas estarán dados según la Figura #2 para la altura máxima de la nube. De las observaciones realizadas “in situ” se estima la altura máxima en 6,4 km \pm 0,2 km y el grado de ionización del metano, 58% (Apéndice #1). Como la entalpía para la primera ionización del metano es de 104 kcal/mol ⁽¹⁰⁾ la energía de los electrones del gas sería equivalente a la temperatura electrónica.

Al condensarse el metano se formarían cristales, pertenecientes al grupo de simetrías Td; en notación de Schoenflie ⁽¹⁰⁾; que se polarizan espontáneamente debido a la simetría tetraédrica, ocasionando un gradiente de potencial eléctrico en las células de las capas altas de la nube. Cuando el potencial eléctrico de la célula de la nube supera el

potencial de ruptura dieléctrica del aire, se genera la descarga, visible en forma de rayos a lo interno de la misma

Los cristales con tal tipo de simetría T_d son piroeléctricos, el vector de desplazamiento eléctrico adquiere valores no nulos aún en ausencia de campos eléctricos externos, se polarizan espontáneamente. El desplazamiento eléctrico D y el campo eléctrico externo E están relacionados por:

$$D_i = D_{oi} + \varepsilon_{ik} E_k$$

donde D_{oi} es la autopolarización eléctrica y ε_{ik} es el tensor permeabilidad dieléctrica ⁽¹³⁾.

Para el metano, el vector de desplazamiento eléctrico adquiere valores no nulos aún si $E=0$, y se polariza espontáneamente, ocasionando un gradiente de potencial eléctrico en las células de las capas altas de la nube. Cuando el potencial eléctrico supera el potencial de ruptura dieléctrica del aire, se genera la descarga, visible en forma de rayos a lo interno de la misma.

Por otro lado, dentro de la nube, el gas metano se encuentra en equilibrio hidrodinámico pero no en equilibrio térmico, por lo cual la temperatura del gas será mayor que la temperatura de la atmósfera circundante.

Se puede estimar la temperatura del metano a partir de la presión de vapor, y de allí la velocidad cuadrática media de los portadores de cargas (Apéndice #1). La concentración de portadores de carga (n) y la temperatura electrónica (T_e) adquieren valores tales que $\log n = 20,5$ y $\log T_e = 4,5$, los cuales corresponden a los de una descarga de tipo Townsend o automantenida ⁽⁹⁾. Para estos valores la descarga (rayo) puede modelarse como un gas de Lorentz de electrones-moléculas en el cual la interacción electrón-ión y electrón- molécula puede ser despreciada.

En una descarga tipo Townsend, con la cual se modela el interior del canal de descarga (haz luminoso del rayo), el tiempo de relajación del plasma que le constituye es del orden de $0,9 \mu\text{s}$ ⁽¹⁴⁾, lapso al cabo del cual el plasma se enfría y la descarga se detiene. Resulta sugestivo que el tiempo estimado de transito del haz (rayo) dentro de la nube sea del mismo orden de magnitud, así la intermitencia de los rayos sería inherente a la relajación térmica del plasma.

De las consideraciones precedentes pueden derivarse algunas magnitudes físicas relevantes sobre las condiciones de ocurrencia de la actividad eléctrica atmosférica del Relámpago del Catatumbo (explicadas en el apéndice # 1) que se resumen en la tabla #1.

Tabla #1: Características Físicas de las Descargas

Máxima separación entre nubes (diferencia de alturas) $\Delta h = 3,8 \text{ km} \pm 0,1$	Temperatura del Plasma Electrónico $T_e \approx 35\,000 \text{ K}$
Camino libre medio de las partículas $l \approx 410^{-7} \text{ m}$	Tiempo de vida de los portadores de carga $\tau \approx 51 \text{ ns}$
Número de portadores $n \approx 3 \cdot 10^{20}$ partículas	Duración de la descarga (rayo) $\tau \approx 0,4 \mu\text{s}$
Velocidad media de los portadores $\langle V_e \rangle \approx 891 \text{ km/s}$	Densidad de Corriente $J = 10^{11} \text{ A/cm}^2$
Intensidad de corriente $I_{\text{max}} \approx 130 \text{ MA}$	Máxima diferencia de potencial entre nubes $V = 220 \text{ kV}$
Resistividad eléctrica del canal de descarga $\rho \approx 3,3 \cdot 10^{-11} \Omega/\text{m}$,	Carga eléctrica transportada por rayo $Q = 52 \text{ C}$
Máxima energía por descarga $U \leq 1 \text{ MJ}$	Potencia de la descarga $P = 3 \cdot 10^{13} \text{ W}$

4. Conclusiones y Discusión.

El Estudio realizado permitió determinar la localización, extensión y condiciones de ocurrencia del fenómeno de actividad eléctrica atmosférica, que se presenta persistentemente al sur del Lago de Maracaibo; conocido como el “Relámpago del Catatumbo”.

De acuerdo al modelo propuesto el metano sería el agente causal para comprender el fenómeno conocido como el “Relámpago del Catatumbo”. La concentración de este gas en el seno de las nubes convectivas sobre la región causaría la separación de cargas eléctricas en el interior de las células de las nubes, posibilitando las descargas (rayos) y la fosforescencia observada (relámpago).

El hecho de que las descargas ocurran al interior de las nubes (rayos nube-nube) parece descartar la existencia de agentes ionizantes y geomagnéticos en el substrato, y podría explicar la indetección del fenómeno desde satélites meteorológicos.

Durante el día el fenómeno no tendría lugar porque la irradiancia solar fotodisocia el metano continuamente. Después del ocaso solar o durante un eclipse total de Sol se manifiesta la actividad eléctrica incluso antes de que la temperatura cambie apreciablemente.

Después de precipitaciones de gran magnitud, la visibilidad del fenómeno disminuye e incluso desaparece por completo. Ello se explicaría porque las precipitaciones intensas y/o prolongadas arrastran el metano hacia la superficie y disminuye la concentración relativa del gas. Análogamente, durante la estación seca (verano) la evaporación y la temperatura media se incrementan, facilitando el ascenso del metano hacia las capas altas de las nubes.

La acumulación relativa del metano atrapado al interior de las nubes no es modificada por los vientos. Este proceso puede ser favorecido por la existencia de un centro local de baja presión situado entre los ríos Bravo y Catatumbo que acarrea la circulación cerrada de los vientos para cotas inferiores a los tres mil metros⁽⁹⁾.

Cuando las nubes convectivas alcanzan gran desarrollo vertical, son empujadas hacia el lago de Maracaibo y la capa superior rica en metano se disipa, por acción de los vientos alisios existentes a cotas mayores a los tres mil metros y, principalmente, por la licuación y coalescencia del metano al interior de la nube. La capa inferior de la nube queda enriquecida con cargas superficiales por la inducción eléctrica y por la licuación del metano y ocasiona esporádicos rayos nube-tierra justo cuando las nubes son forzadas a desplazarse sobre las riberas del lago, sin el característico resplandor fosforescente del “relámpago del Catatumbo”.

Las ciénagas incrementan la visibilidad del relámpago por reflexión sobre las lagunas de aguas tranquilas y en dirección visual hacia ellas. El nivel queráunico nulo (carácter inaudible de las descargas) se explica porque los rayos ocurren a gran altura, y el sonido de la onda de choque generada por la ruptura del canal de descarga se amortigua en el interior de la nube.

Queda por explicar la anómala concentración del metano en la parte baja de la atmósfera local. Una razón plausible es la amplia zona de pantanos ubicados en un clima tropical con circulación cerrada de vientos y en una zona de baja presión.

Otra posibilidad es la presunción de existencia de kerógeno III en el substrato, típico de depósitos de hidrocarburos y de concentraciones altas de metano. El substrato del lago de Maracaibo es rico en depósitos petrolíferos y comparte con las ciénagas ribereñas la

misma historia geológica. Así la acumulación de metano en la atmósfera podría verse favorecida por el escape de este gas a través de fisuras en el manto rocoso al interior de las ciénagas (lagunas). Ello podría explicar la observación reportada por Centeno ⁽¹⁾ sobre la “misteriosa desaparición del relámpago” en algunos casos, o el súbito incremento de la actividad del relámpago en otros, inmediatamente después de la ocurrencia de sismos intensos de la región. Sin embargo, la confirmación de ésta última hipótesis y del mecanismo electroatmosférico aquí propuesto, invitan a estudios mas detallados de la meteorología física y del substrato del Parque Nacional “Ciénagas de Juan Manuel”.

Agradecimiento:

Este trabajo ha sido financiado por el Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico (CONDES) de La Universidad del Zulia bajo el número 1940-98. Se reconoce la colaboración de la Autoridad Regional del Ambiente de la Gobernación del Estado Zulia, del Instituto Nacional de Parques y su personal de Guardaparques para la realización de las expediciones.

Referencias.

- (1) Centeno, M. Bol. Ac. de Cs. F., Mat. y N. 28, 79, 353-365. 1968.
- (2) Zavrostky, A. Revista Forestal Venezolana N° 25, Ediciones ULA. Mérida (Venezuela) 1975.
- (3) Lope de Vega, F. *Obras Escogidas: la Dragontea*. tomo II . Madrid. pp 324. 1953.
- (4) Humboldt, A. *Viaje a las regiones equinociales del Nuevo Continente*. Tomo III, pp 226. Caracas. Traducción por Lisandro Alvarado. 1956.
- (5) Codazzi, A. *Resumen de la Geografía de Venezuela*. Biblioteca Vzlna. de Cultura. Caracas. pp 23. 1960.
- (6) Zavrostky, A. Carta Ecológica . Ediciones ULA N° 56. Mérida (Venezuela) 1991.
- (7) Gol, A.W. “Las causas meteorológicas de las lluvias de extraordinaria magnitud en Venezuela”. P. Esp. N° 2 . Servicio de Meteorología y Comunicaciones. FAV. Min. Defensa. (Venezuela.). 1963.
- (8) Rogers. R. *Física de las nubes*. Reverté. Barcelona. (España). 1977.
- (9) Marr, G. *Photoionization Processes in Gases*. Acad. Press. N.Y .(USA), pp170. 1967.
- (10) Levine, L, *Fisicoquímica*. Mc. Graw-Hill .Madrid (España) . pp 817. 1990.
- (11) Reif, *Física Estadística*. Reverté, Barcelona (España), pp 489. 19
- (12) Howatson, A.M. *Descargas Eléctricas en Gases*. Urmo. Bilbao (España). 1970.
- (13) Landau, L. y Lifshitz, E. *Electrodinámica de los medios continuos*. Reverté. Barcelona (España). Pp. 70 y ss. 1981.
- (14) Delcroix, J. *Introducción a la teoría de los gases ionizados*. Alhambra, Madrid (España). 1969.
- (15) Bering, E. A.; Few, A.; Benbrook, J.R. Physics Today, October 10, 24-30, 1998.
- (16) Feynman, R. Leighton, R. y Sands, M. *Lecturas de Física*. Fondo Educativo Interamericano. N.Y. (USA). 1987.
- (17) Golde, R.H. *Physics of Lightning*. Mc Graw Hill Dover Publications. (USA). 1984.

Apéndice #1: Estimaciones Cuantitativas.

(a) Ubicación del Epicentro y altura de las nubes.

La separación angular entre el centro de la zona de descarga (fotografía A) y el horizonte permitieron estimar el ángulo de elevación en $6^\circ \pm 0,01^\circ$. Las medidas fueron efectuadas a las 20 horas y 31 minutos en fecha 1999-07-22, por medio de un telescopio Smith-Cassegrain de 4' de diámetro con montura alta-acimutal, La distancia al epicentro, desde la nube Estratocúmulo de altura $h_1=2,5 \pm 0,1$ km, se obtiene mediante la relación:

$$d = h / \operatorname{tg} \alpha \approx 24.km \quad (1)$$

Como las descargas ocurren entre dos capas de nubes cuya separación angular es de $9^\circ \pm 0,01$ entonces la distancia de separación entre ambas es:

$$\Delta h = d \operatorname{tg}(9^\circ) \cong 3,8km \quad (2)$$

(b) Presión y Temperatura atmosférica

Se puede estimar las condiciones de presión y temperatura a las alturas de las nubes calculadas previamente, suponiendo un modelo lineal⁽⁸⁾, para el gradiente barotrópico atmosférico en el cual:

$$P = P_0 \operatorname{Exp}(-0116h) \quad (3)$$

donde $P_0=101$ kPa es la presión atmosférica medida in situ (41 m snm) y h es la altura de la nube en kilómetros. Empleando la ecuación (3) y los datos $h_1=2,5$ km y $h_2=h_1+\Delta h \approx 6,3$ km, se tiene:

$$P_1= 75,6 \text{ kPa} \quad P_2= 48,1 \text{ kPa} \quad (4)$$

También cuando la temperatura atmosférica, medida a 41 m snm, es de 31°C y decrece linealmente a razón de $\Gamma \approx -1^\circ\text{C}/100\text{m}$ ⁽⁸⁾ tenemos:

$$T_1 = 6^\circ\text{C} \quad T_2 = -33^\circ\text{C} \quad (5)$$

Las expresiones (4) y (5) nos dan valores aproximados de la temperatura y presión atmosférica en las capas inferior y superior de las nubes respectivamente.

(c) Velocidad cuadrática media de las partículas gaseosas

De la equipartición de la energía tenemos que la velocidad media de las moléculas del gas estará dada por:

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3k}{2m}T} \quad (6)$$

Bajo condiciones de equilibrio térmico ésta velocidad depende fundamentalmente de la masa de las partículas. En el caso que nos ocupa las partículas de interés, en orden decreciente de masa son las moléculas de aire, vapor de agua y metano; así los cocientes de las velocidades medias son:

$$\left| \frac{\bar{v}_{CH_4}}{\bar{v}_{H_2O}} \right| \approx \sqrt{\frac{m_{H_2O}}{m_{CH_4}}} \approx 1,1 \quad \left| \frac{\bar{v}_{CH_4}}{\bar{v}_{aire}} \right| \approx \sqrt{\frac{m_{aire}}{m_{CH_4}}} \approx 1,4 \quad (7)$$

El resultado anterior evidencia que la movilidad de las moléculas de metano es mayor, en promedio, que las otras moléculas de la nube. Empleando la ecuación de gases ideales, supuesta concentraciones muy diluidas de metano en la nube, puede estimarse la temperatura del gas a la presión límite de la nube en su altura superior (P_2) con lo cual resulta $T_{2(\text{metano})} \approx 448^\circ\text{C}$, donde se ha usado la densidad de vapor del metano $\rho \approx 0,554 \text{ gr/lts}$ ⁽¹⁰⁾.

Bajo tales condiciones se observa que la temperatura del metano es mayor que la temperatura atmosférica.

(d) Factor de ionización del metano.

La Ecuación de Saha ⁽¹²⁾ permite estimar el grado de ionización (x) toda vez que se conoce la temperatura y presión del gas.:

$$\text{Log}_{10} \left| \frac{x^2}{1-x^2} P \right| \cong -5040 \frac{V}{T} + \frac{5}{2} \text{Log}_{10} T - 6.5 \quad (8)$$

Empleando los valores límites para el estrato superior de la nube dados en las expresiones (4) y (5) se tiene que la ionización del metano es del orden del 58%.

(e) Temperatura del plasma electrónico

El metano está confinado en la nube por el equilibrio hidrodinámico pero no alcanza su equilibrio térmico. Al producirse una descarga entre los estratos superior e inferior de la nube, se ocasiona la ionización del material en el canal de descarga, y la energía liberada incrementará la temperatura en el interior de dicho canal. Luego de la primera ionización del metano la entalpía, $\Delta H=104 \text{ kcal/mol}$ ⁽¹⁰⁾, permite estimar la temperatura del gas electrónico en una magnitud:

$$T_e = \frac{2}{3k} \Delta H \approx 35.000K \quad (9)$$

donde k es la constante de Boltzman.

(f) Velocidad y tiempo de vida de los portadores

Los electrones libres, generados por ionización del metano y por otros procesos físicos como colisiones intermoleculares o inducción eléctrica tendrían una velocidad promedio superior a las de las moléculas de la nube, en virtud de las Ecuaciones (6) y (9) se tiene que:

$$\bar{v}_e \cong 890 \text{ km/s} = 0,003c \quad (10)$$

donde c es la velocidad de la luz. Es claro que esta velocidad es supersónica y no relativista, como cabría de esperar para las descargas eléctricas atmosféricas (rayos) las cuales son descargas tipo Townsend ^(12, 14, 15).

(g) Densidad de corriente.

La densidad de corriente (J) durante la descarga nube-nube observada es proporcional al número total de portadores (electrones) por unidad de volumen y a la velocidad media estimada en la expresión (10); es decir:

$$J = x\rho \frac{eN_A \bar{v}}{P_M} \quad (11)$$

donde “ e ” es la carga del electrón, ρ y P_M son la densidad de vapor y el peso molecular del metano respectivamente, N_A es el número de Avogadro y x es el factor de ionización. Reemplazando valores y supuesta la concentración del orden de un 30% de metano en el interior de la nube, se obtiene que:

$$J \approx 5,1 \cdot 10^{11} \text{ A/cm}^2 \quad (12)$$

(h) Diferencia de potencial entre nubes y Campo Eléctrico local.

La intensidad del campo eléctrico de la nube es al menos del orden del campo eléctrico atmosférico: 100 V/m ⁽¹⁶⁾, luego la diferencia de potencial entre las alturas superior (h_2) e inferior (h_1) de la nube es del orden de:

$$\Delta V = E \Delta h \approx 220 \text{ kV} \quad (13)$$

Para una descarga entre las alturas máxima y mínima (rayo nube-nube) se tiene que la intensidad de corriente es del orden de 130 MA para un rayo típico con diámetro de 1 cm en el canal de descarga.

Con los valores de la Intensidad del Campo eléctrico atmosférico y la densidad de carga (ecuación (12)) se obtiene que la resistividad eléctrica del canal (rayo) durante la descarga alcanza valores de $3,3 \cdot 10^{-11} \Omega/m$, vale decir 1000 menor que la resistividad del cobre.

(i) Carga total y Número de portadores por rayo.

La velocidad de la propagación de una descarga eléctrica atmosférica (rayo) es superior a la velocidad con la cual se mueven los portadores en el canal de descarga, típicamente de orden de un tercio de la velocidad de la luz ^(15,17) por lo cual el lapso de duración de la descarga nube-nube es del orden de:

$$t \cong \frac{\Delta h}{c/3} \approx 0,4 \mu s \quad (14)$$

Este resultado tiene el mismo orden de magnitud del tiempo de relajación del plasma electrónico en gases ionizados. En un plasma electrónico el tiempo de relajación es del orden de 0,9 microsegundos ⁽¹⁴⁾ lapso al cabo del cual el plasma se enfría y la descarga se detiene. Resulta sugestivo que el tiempo estimado de tránsito dentro de la nube, para los portadores de carga, sea del mismo orden de magnitud. Ello implicaría que la intermitencia de los rayos es inherente al tiempo de relajación de la temperatura del plasma.

Por otra parte la carga total transportada será del orden del producto de este lapso por la intensidad de corriente calculada previamente, así $Q \approx 52$ coulombios .

También puede estimarse el número de portadores de carga como:

$$n = \frac{Q}{e} = \frac{It}{e} \approx 3 \cdot 10^{20} \quad (15)$$

De los resultados anteriores se sigue que cada descarga (rayo) equivale entonces a una potencia del orden de $3 \cdot 10^{13}$ wattios. Si la descarga ocurre entre las alturas máxima y mínima de la nube su tiempo de transito es del orden de medio microsegundo y la energía liberada alcanza la cota de un megajoule.

La concentración de portadores (expresión (15)) y de la temperatura electrónica (expresión (9)) ya calculadas conllevan a valores de $\log n = 20,5$ y $\log T_e = 4,5$, que corresponden a los valores típicos de una descarga gaseosa fuerte⁽¹⁴⁾. Para estos valores la descarga puede modelarse como un gas de Lorentz de electrones-moléculas en el cual la interacción electrón-ión y electrón- molécula puede ser despreciada. En consecuencia la descarga pasa a ser de tipo Townsend o automantenida.