



Ingeniería UC
Universidad de Carabobo
farteaga20@gmail.com
ISSN (Versión impresa): 1316-6832
VENEZUELA

2000
Nelson Falcón / Peter Williams / Angel Muñoz / Dia Nader
MICROFÍSICA DEL RELÁMPAGO DEL CATATUMBO
Ingeniería UC, junio, año/vol. 7, número 001
Universidad de Carabobo
Valencia, Venezuela

Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal

Universidad Autónoma del Estado de México

<http://redalyc.uaemex.mx>





MICROFÍSICA DEL RELAMPAGO DEL CATATUMBO.

Nelson Falcón⁽¹⁾; Peter Williams.⁽²⁾; Angel Muñoz⁽²⁾; Dia Nader⁽³⁾.

1 Universidad de Carabobo. FACYT. Dpto. Física. Apdo. Postal 129 Valencia 2001.

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

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

Resumen.

El "Relámpago del Catatumbo" observado al sur del lago de Maracaibo (Venezuela) tiene características únicas en el mundo. Se discute su fenomenología a través del resultado de las expediciones realizadas en el Parque Nacional Ciénagas de "Juan Manuel". Adicionalmente se estiman magnitudes microfísicas que permiten modelar el fenómeno y se discute la importancia de los pantanos como agente causal de la actividad eléctrica atmosférica observada en la región.

Palabras Claves: Relámpago del Catatumbo, electricidad atmosférica.

Abstract.

The Catatumbo Lightning observed to the south of the Maracaibo lake (Venezuela) has characteristic only in the world. You discusses their phenomenology through the result of the expeditions carried out in "Juan Manuel's Park National Marshes". Additionally they are considered magnitudes microphysics that allow to model the phenomenon and you discusses the importance of the swamps like causal agent of the activity electric atmospheric observed in the region.

Key words: Lightning of the Catatumbo, atmospheric electricity.

1. Introducción

Los relámpagos y los rayos son las manifestaciones más conspicuas de la actividad eléctrica atmosférica y ocurren muy frecuentemente en la región de los deltas de los ríos Catatumbo, Zulia y Bravo, al sur del lago de Maracaibo. Entre tales fenómenos destaca un relámpago inaudible conocido como el "Relámpago del Catatumbo" o "Faro de Maracaibo" por su ocurrencia persistente, su fulgor y luminosidad. Este fenómeno puede ser apreciado a centenares de kilómetros de distancia, en los Andes, en la Ciudad de Maracaibo y desde el Mar Caribe, durante casi todo el año (Centeno, 1968).

La ocurrencia del "Relámpago del Catatumbo" es muy antigua, la primera mención escrita data de 1597, cuando Lope de Vega le menciona en el poema épico "La Drangontea". El naturalista Alexander von Humboldt describe el fenómeno como "explosiones eléctricas que son como fulgores fosforescentes..." (Alvarado, 1956) y el geógrafo Agustín Codazzi (Codazzi, 1960) lo reseña "como un relámpago continuado que parece surgir en la región pantanosa del río Zulia y sus alrededores", al sur del Lago de Maracaibo. Destacándose por su persistencia continua en posición y tiempo, incluso en el período de sequía, derivando de allí el nombre de "Faro de Maracaibo".

Diversos autores han reportado la ocurrencia del "Relámpago del Catatumbo" desde el siglo pasado hasta ahora (véase Zavrotsky 1975 y referencias en él); sin alcanzar un modelo físico que explique la naturaleza de la actividad eléctrica permanente y localizada que constituye la esencia del fenómeno atmosférico considerado.

No existe consenso en torno al mecanismo causal 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".

El primer intento moderno de caracterizar la fenomenología del "Relámpago del Catatumbo" lo realizó Melchor Centeno a través de un enfoque geográfico y climático, atribuye así 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 (Centeno, 1968).

Por su parte Andrés Zavrostky y colaboradores de la Universidad de Los Andes (Zavrostky, 1991) concluye que la causa 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".

La actividad tormentosa y la presunta existencia de cierta carga eléctrica superficial no explican 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 además, la subsecuente descarga de rayos supone especificar las condiciones para la existencia de un intenso campo eléctrico superficial y local como agente causal de las descargas nube-tierra durante las tormentas eléctricas.

El estudio del "Relámpago del Catatumbo" podría contribuir a la comprensión del microclima en la región y tener además, aplicaciones prácticas para la agroindustria. 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. 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), luego se postula un modelo microfísico (sección 3) y, finalmente, se discuten sus consecuencias explicativas (sección 4).

2. Observaciones y Fenomenología.

La ocurrencia del fenómeno abarca una extensa región de cerca de 300.000 hectáreas al sur-oeste del lago de Maracaibo, comprendiendo en su interior al río Bravo, desde su nacimiento hasta su desembocadura, el río la Concepción, parte del río Catatumbo, las Ciénagas de Juan Manuel de Aguas Claras y Juan Manuel de Aguas Negras, las lagunas La Belleza, la Negra, La Estrella y otras menores. Substancialmente 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 en el Lago de Maracaibo. Esta gran explanada comparte la misma historia geológica que caracteriza al 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 9 metros.

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 hacia 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. 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 (Gol, 1963).

Se efectuaron tres expediciones al interior del Parque "Ciénagas de Juan Manuel" con la finalidad de caracterizar el "Relámpago del Catatumbo". Durante la primera expedición (Diciembre de 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.



Fotografías #1 Río Catatumbo



Fotografía #2 El relámpago luego del Ocaso

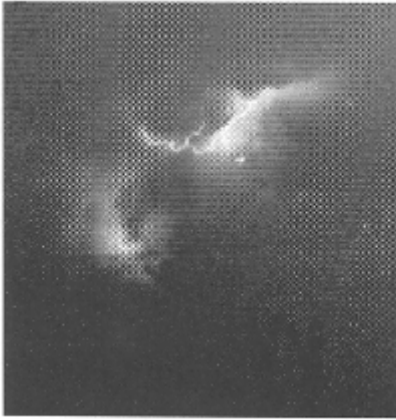
Desde los puntos de observación se visualizó el "Relámpago del Catatumbo" como destellos nube-nube y el resplandor fosforescente (relámpago) en regiones del cielo bien localizadas y persistentemente durante toda la noche (Fotografía #2).

La segunda y tercera expedición realizadas en Julio y Diciembre de 1999 permitió ubicar la región de ocurrencia del fenómeno. Se instalaron sitios de observación en: la localidad de "Los 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.

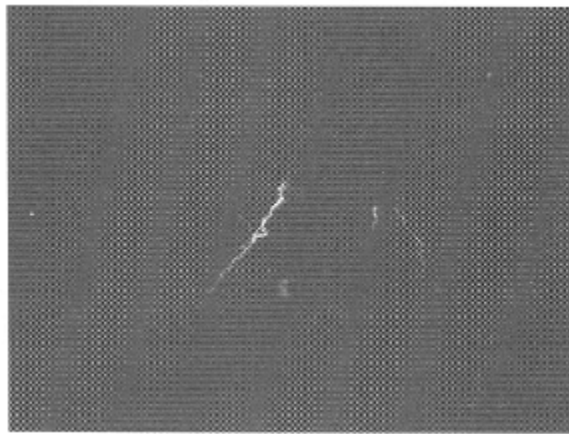
Los resultados corroboraron la existencia de zonas de epicentros en las cercanías de las lagunas, al interior de las ciénagas colindantes con el río Bravo, en lugar de puntos localizados de ocurrencia del fenómeno. Destacándose la persistencia de al menos dos regiones del cielo, bien diferenciadas por su separación angular de hasta 66° de azimut, donde se producen las descargas. El mapa de la figura # 1 muestra los posibles epicentros y su extensión.

Características de las descargas eléctricas.

Las imágenes fotográficas (véase) evidencian la característica descarga nube-nube del fenómeno, y su relativo confinamiento en una cierta región del cielo. Particularmente sin la presencia de extensas formaciones nubosas para la totalidad del horizonte visible, como cabría de esperar en una típica tormenta.



Fotografía #3 Descargas nube-nube



Fotografía #4 Detalle de los Rayos

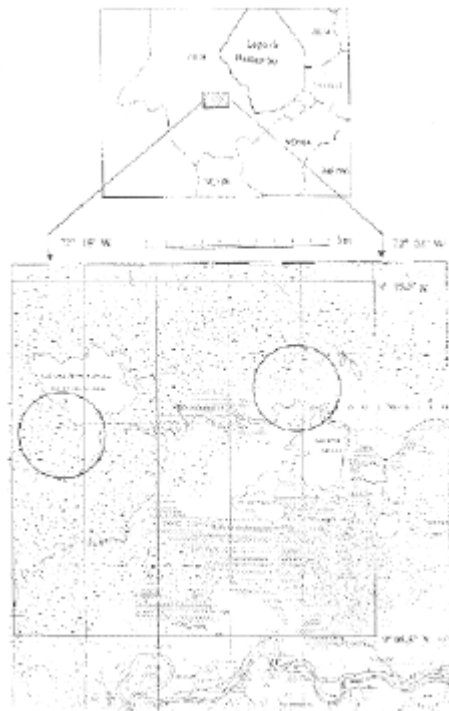


Fig. #1 Ubicación de los Epicentros

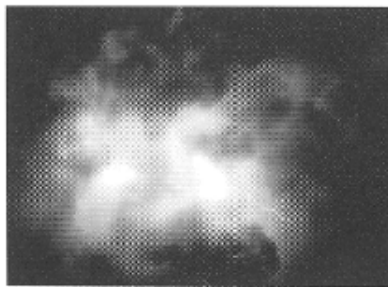
Nótese que los rayos del fenómeno atmosférico no son nube-tierra ni tierra-nube, evidencia que parece descartar la presencia de fuentes geotermales, geomagnéticas o 'radiactivas en el substrato superficial de la región. Las descargas eléctricas de la formación nubosa parecen provenir solamente del interior profundo de la nube y no sobre su periferia o zonas límite de la nube. La fotografía #3 muestra los rayos descendentes entre las dos capas nubosas. Durante las dos últimas expediciones al interior de la ciénaga se pudo constatarla ausencia de anomalías en los valores del campo magnético terrestre de la zona de estudio, tampoco se observaron evidencias de fuentes geotermales tales como fumarolas, géiser o temperaturas anormalmente altas en las aguas de las lagunas.

Medidas con el electrómetro, a nivel superficial en el punto de observación, a las orillas del río Bravo, dan cuenta de la existencia de cargas eléctricas atmosféricas, depositando sobre el electrómetro 0,015 microcoulombios en el lapso de 15 minutos, que equivale al incremento de la diferencia de potencial eléctrico en el electrómetro a razón de 0,33 voltios por segundo.

No se encontró una moda o frecuencia característica en la frecuencia de los destellos (rayos y relámpagos). 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, incrementado en magnitud por el reflejo sobre los espejos lacustres. Todos las descargas son sordas, y son mas frecuentes entre la zona interna superior y la zona interna inferior de la propia nube.

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, en el interior de las ciénagas, el fenómeno comienza a observarse con la desaparición de la luz zodiacal, poco después del ocaso. A medida que el observador se aleja de los epicentros, la altura relativa del "Relámpago del Catatumbo" respecto al horizonte disminuye, dificultando su observación. Análogamente, desde regiones de observación altas y distantes, la visibilidad se incrementa. Por ser descargas a lo interno de nubes cumulonimbus y estratocúmulos, un observador colocado justo en los epicentros, debajo de las capas de nubes donde tienen lugar las descargas, no aprecia el fenómeno.



Fotografía #5 Aspecto General del relámpago



Fotografía #6 Detalle de la Fluorescencia

3. Modelo Microfísico.

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. Estudios recientes han señalado el rol de esta molécula en ciertos procesos climatológicos y oceanográficos (Suess et al, 1999).

Generalidades.

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 qué 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 elevada sección transversal de absorción para el metano, en la línea H Lyman α (121,57 nanómetros), permite suponer que los destellos (relámpagos) son producidos por la presencia de este gas en las nubes altas de la atmósfera de la región. En efecto para el metano la sección transversal de absorción (σ) de la línea H Lyman α es 18 megabarns, mientras que para el vapor de agua $\sigma = 14 \text{ Mbn}$, para el nitrógeno gaseoso $\sigma = 6 \cdot 10^{-5} \text{ Mbn}$ y para el oxígeno gaseoso $\sigma = 9 \cdot 10^{-3} \text{ Mbn}$ (Marr, 1967). El color de las descargas observadas en las fotografías y el análisis espectroscópico de ellas dan cuenta de la presencia de dicha línea H Lyman α en la radiación electromagnética generada durante el fenómeno.

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 radical metilo, cuyos enlaces s-p admiten este tipo de excitación. Un cálculo preciso de estos estados metaestables envuelve una gran complejidad y está fuera del alcance de este trabajo. Es importante señalar que la función propia de enlace del metano no ha sido calculada aún ni para la estructura resonante más simple (Levine, 1990). Debe notarse que los tiempos de vida de los estados metaestables son comparables a la duración de la descarga difusa (relámpago); en el rango de los nanosegundos a los milisegundos.

Por otro lado, el gradiente barotrópico atmosférico permite la condensación del metano en cristales con simetría tetraédrica, específicamente el grupo de simetrías T_d en notación de Schoenflies (Levine, 1990). Los cristales con tal tipo de simetría son piroeléctricos, el vector de desplazamiento eléctrico adquiere valores no nulos aún en ausencia de campos eléctricos externos, por lo cual se polarizan espontáneamente (Landau et al 1981).

Al condensarse el metano se formarían cristales, 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.

Así, la presencia de metano en las nubes bajas de la región, favorecida por la circulación cerrada de vientos y por enormes extensiones de pantanos (cerca de 300.000 hectáreas) permite explicar la microfísica de las descargas gaseosas (relámpago o fluorescencia y rayos o descargas de arco nube-nube) y el mecanismo de auto polarización eléctrica de la nube.

También de las consideraciones precedentes pueden derivarse algunas magnitudes físicas relevantes sobre la microfísica del "Relámpago del Catatumbo".

Estimaciones Cuantitativas.

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

La separación angular entre el centro de la zona de descarga 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:

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

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:

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

(b) Presión y Temperatura atmosférica

Se pueden estimar las condiciones de presión y temperatura a las alturas de las nubes calculadas previamente, suponiendo un modelo lineal ((Rogers, 1977), para el gradiente barotrópico atmosférico en el cual:

$$P = P_0 \operatorname{Exp}(-0,116h) \quad (3)$$

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 $\Gamma \approx 1^\circ\text{C} / 100\text{m}$ (Rogers, 1977) 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:

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

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 $T_{2(\text{metano})} \approx 448 \text{ }^\circ\text{C}$, donde se ha usado la densidad de vapor del metano $\rho \approx 0,554 \text{ gr/lts}$ (Morrison & Boyd, 1974).

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 (Howtson, 1970) 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, $\Delta H = 104 \text{ kcal/mol}$ (Levine, 1990), permite estimar la temperatura del gas electrónico en una magnitud:

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

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:

$$\overline{v_e} \cong 890 \text{ km/s} = 0,003c \quad (10)$$

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 (Howtson, 1970).

(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:

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

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 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 (Feymann et al; 1985), 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 $3,3 \cdot 10^{-11} \Omega/\text{m}$, 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 (tolde, 1984) 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 ((Delcroix, 1969) lapso al cabo del cual el plasma se enfría y la descarga se detiene. Resulta sugestivo que el tiempo estimado de transito 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 (1 S)) 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 (Delcroix, 1969). 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 auto mantenida.

4. Discusión.

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) así como la fosforescencia (relámpago) observada. Ello está en acuerdo con el nivel de conocimientos actuales sobre descargas eléctricas en gases ionizados y con las propiedades fisicoquímicas del metano, como se mostró en la sección precedente. La concentración de metano en la troposfera varía localmente hasta incluso concentraciones del 0,1 % (Carman & Vincent, 1999).

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, además podría explicar la no detección del fenómeno desde satélites meteorológicos como el "Optical transient Detector", diseñado para medir la actividad eléctrica atmosférica y las tormentas.

Durante el día el fenómeno no tendría lugar porque la irradiancia solar fotodisocia el metano continuamente, impidiendo la auto polarización eléctrica y la excitación a niveles energéticos metaestables, en acuerdo con la fenomenología observada del Relámpago del Catatumbo. Después del ocaso solar o durante un eclipse total como ocurriera en dicha región el 26-02-98, se manifiesta la actividad eléctrica del "relámpago del Catatumbo" incluso antes de que la temperatura cambie apreciablemente.

Durante el invierno o después de precipitaciones de gran magnitud sobre la región, 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,

permitiendo la volatilidad del gas y su rápido ascenso a las capas altas de las nubes donde se formarían cristales auto polarizados eléctricamente.

Los vientos no disipan la acumulación relativa del metano porque éste queda atrapado al interior de las nubes. Este proceso de acumulación 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 (Gol, 1963).

El desplazamiento relativo de los epicentros, reportado por Zavrostky (1991) se explicaría por la movilidad de las nubes. Cuando las nubes convectivas incrementan su desarrollo vertical son empujadas hacia el lago de Maracaibo y la capa superior rica en metano se disipa. La disipación tiene lugar por acción de los vientos alisios existentes a cotas mayores a los tres mil metros y, principalmente, por la licuación y coalescencia de las gotas de metano al interior de la nube. La capa inferior de la nube enriquecida con cargas superficiales por la inducción eléctrica y por la licuación del metano ocasionan los esporádicos rayos nube-tierra visible en las riberas del Lago de Maracaibo, justo cuando las nubes son forzadas a desplazarse sobre las orillas, tal y como se les observa ,eventualmente en las costas del Lago, sin el característico resplandor fosforescente del "relámpago del Catatumbo".

Las ciénagas incrementan la majestuosidad del relámpago por la reflexión especular sobre las lagunas de yaguas tranquilas y en dirección visual hacia ellas. El carácter inaudible de las descargas se explica porque los rayos ocurren a gran altura, entre los dos mil y tres mil metros, y el sonido de la onda de choque generada por la ruptura del canal de descarga se amortigua en el interior de la nube.

La anómala concentración del metano en la parte baja de la atmósfera local podría ser explicada por la existencia de una amplia zona de pantanos (cerca de 300 000 hectáreas) ubicados en un clima tropical con circulación cerrada de vientos bajo un área de baja presión. También la concentración de metano podría ser debida a la 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. De ese modo 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).

Sin embargo, la confirmación de ésta última hipótesis y del mecanismo microfísico electroatmósferico aquí propuesto, invitan a estudios mas detallados de la meteorología física, de la geología 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 a la Autoridad Regional del Ambiente de la Gobernación del Estado Zulia, al Museo de Biología de la Facultad de Ciencias (LUZ) y al personal de Guardaparques del Parque Nacional Ciénagas de Juan Manuel (INPARQUES) por la colaboración prestada para la realización de las expediciones en el interior de las Ciénagas.

Referencias.

1. Carman, R. & Vincent, R. (1999) "Measurements of Soil and Gas and Atmospheric Methane Content". <http://www.claytonenv.com/woodcounty-art.htm>
2. Centeno, M. (1968) Bol. Ac. de Cs. F.,Mat. y N. 28, 79,353365
3. Codazzi, A. (1960)Resumen de la Geografía de Venezuela. Biblioteca Venezolana de Cultura. Caracas. pp. 23.
4. Delcroix, J. (1969) Introducción a la teoría de los gases ionizados. Alhambra, Madrid.
5. Feynman, R. Leighton, R. y Sands, M. (1987) Lecturas de Física. Fondo educativo Interamericano. N.Y.

6. Gol, A.W.(1963) "Las causas meteorológicas de las lluvias de extraordinaria magnitud en Venezuela". Publicación Especial N° 2 Servicio de Meteorología y Comunicaciones. FAV. Min. Defensa. (Venezuela.).
7. Golde, R.H. (1984.) Physics of Lightning. Mc Graw Hill Dover.
8. Howtson, A.M. (1970). Descargas Eléctricas en Gases. Urmo. Bilbao.
9. Humboldt, A. (1956) Viaje a las regiones equinocciales del Nuevo Continente. Tomo III, pp. 226. Caracas. Traducción por Lisandro Alvarado.
10. Landau, L.D. y Lifshitz, E. M. (1981) Electrodinámica de los medios continuos Reverté. Barcelona (España) .pp72 y SS.
11. Levine, L. (1990) Fisicoquímica. Mc. Graw-Hill .Madrid (España) . pp. 817.
12. Marr, G. (1967) Photoionization Processes in Gases. Acad. Press. N.Y.(USA), pp. 70.
13. Morrison, R. & Boyd, M. (1974) Química Orgánica. Addison Wesley.
14. Rogers. R. (1977) Física de las nubes. Reverté. Barcelona. Suess, E.; Bohrmann, G.; Greinert, J. & Lausch, E. (1999). Sc. Am. 281,5,52
15. Zavrostky, A. (1975)Revista Forestal Venezolana N° 25, Ediciones ULA. Zavrostky, A. (1991) Carta Ecológica . Ediciones ULA N° 56.