

Electrometeoros y aerosoles piroelectricos en tormentas tropicales

Nelson Falcón*, Amilkar Quintero

Universidad de Carabobo. FACYT, Dpto de Física. Apdo Postal 129 Avda. Bolívar Norte Valencia. Edo. Carabobo Venezuela.

Resumen.-

Los electrometeoros, como los rayos y los relámpagos, son manifestaciones del campo eléctrico atmosférico y de la pluviosidad. La microfísica asociada de los electrometeoros parece estar asociada también a las propiedades físicas y químicas de la atmósfera local de ocurrencia. El metano es un aerosol asociado a la microfísica atmosférica. La concentración de metano en la troposfera superior podría favorecer la formación de núcleos polares donde el campo eléctrico se incrementa localmente en las nubes de tormentas. Se presenta un estudio microfísico de la influencia del metano como agente cocausal de los electrometeoros en la atmósfera baja. El modelo teórico elaborado muestra de que manera está vinculado el campo eléctrico local y los aerosoles piroelectricos, como el metano, con los procesos microfísicos de la convección y el transporte de cargas en nubes de tormentas. Se concluye que los cristales piroelectricos facilitan la génesis de electrometeoros en tormentas.

Palabras clave: Electrometeoros, piroelectricidad, aerosoles: metano

Electrometeors And Pyroelectric Aerosols in Tropical Storms

Abstract.-

The electrometeors, as the rays and the lightnings, are manifestations of the atmospheric electric field and of the pluviocity. The microphysic associated of the electrometeors seems to be also associated to the physical and chemical properties of the local atmosphere of occurrence. The methane is an aerosol associated to the atmospheric microphysic. The methane concentration in the superior troposphere could favor the formation of polar nuclei where the electric field is increased locally in the clouds of storms. It is presented a microphysic study of the influence of the methane like agent cocausal of the electrometeors in the low atmosphere. The theoretical pattern elaborated sample that way this linked the local electric field and the aerosols pyroelectric, as the methane, with the microphysics processes of the convection and the transport of loads in clouds of storms. It is concluded that the pyroelectric glasses facilitate the electrometeors genesis in storms.

Keywords: Electrometeors, pyroelectricity, aerosols: methane

1. Introducción

En la atmósfera terrestre existe un campo eléctrico cuasi estático que varía con respecto a la altura. A diferencia del gradiente de presión y temperatura, la variación del campo eléctrico no ha sido bien descrita, y no se conoce con certeza su origen; sin embargo se conoce que esta variación del Campo Eléctrico local es el responsable de la actividad eléctrica atmosférica [1], cuando se forman nubes con ciertas características de forma y tamaño. Los electrometeoros (Rayos, relámpagos y «Fuegos de Santelmo») están comúnmente presentes en las nubes de tormentas. Las nubes de tormentas o cumulonimbus alcanzan altitudes que varían desde menos de 1,6 Km

hasta más de 13 Km sobre la tierra, y poseen una forma de cúpula o de madejas de lana, y de yunque en la cumbre.

Diversas hipótesis se han propuesto para modelar el incremento del campo eléctrico local en el interior de las nubes de tormentas, y la formación subsiguiente de las corrientes de avalancha que originan los electrometeoros (rayos y relámpagos) sin que haya alcanzado todavía un consenso o explicación satisfactoria en los mecanismos de cargas de las celdas nubosas [1, 2].

Los mecanismos microfísicos propuestos para la generación y distribución espacial de la carga en las nubes de tormentas parecen actuar en diversas etapas del desarrollo de las nubes convectivas y de las tormentas. En la etapa inicial los procesos de generación de cargas son por difusión y por arrastre (deriva) en el seno del campo eléctrico de buen tiempo,

*Autor para correspondencia

Correos-e: nfa1.con@uc.edu.ve (Nelson Falcón),
aaqs1@yahoo.com (Amilkar Quintero)

cuando su desarrollo vertical es del orden de los pocos kilómetros los principales procesos de separación y generación de cargas pudieran deberse a la selección y la captura iónica por las gotas polarizadas o a la ruptura de las gotas por colisiones. En la etapa ulterior de desarrollo de las nubes de tormenta se han propuestos varios factores concomitantes, tales como la transferencia de cargas entre gotas polarizadas, la inducción y polarización eléctrica de las gotas causadas por convección, la transferencia de cargas entre partículas a diferentes temperaturas y la incorporación selectiva de iones por aerosoles disueltos en el hielo [1, 3].

Ninguno de estos mecanismos ni modelos toma en cuenta el incremento del desplazamiento eléctrico en el interior de las nubes convectivas por la presencia de aerosoles. Esta pudiera ser una seria omisión toda vez que los electrometeoros no siempre están asociados a la pluviosidad, vale decir no siempre las nubes de tormentas manifiestan una conspicua actividad eléctrica a pesar de que en ellas se dan los procesos de coalescencia, convección y colisión iónica de partículas de hielo y gotas de agua, tradicionalmente invocados para explicar los electrometeoros [4, 5].

Por otro lado más de las veces se invoca procesos de carácter fenomenológico de convección y de transporte iónico, para explicar las descargas eléctricas en nubes de tormentas sin una formulación cuantitativa que permita caracterizar las corrientes de avalancha y las características observables en dichas descargas eléctricas.

El objetivo del presente trabajo es adelantar un modelo teórico, microfísico, que incorpore la contribución de los aerosoles en la variación de la intensidad del campo eléctrico terrestre al interior de las celdas nubosas. Para lograr esto modelaremos las nubes convectivas por medio de celdas unitarias (sección 2), siguiendo las aproximaciones de la Física de Nubes [6]. Luego estimaremos la contribución de los dipolos de agua al vector de desplazamiento eléctrico de las nubes (sección 3) y de los cristales piroeléctricos, por ser estos materiales los que presentan autoinducción eléctrica aun en ausencia de campos externos.

El metano (CH_4) es el sexto componente atmosférico, equivalente al 0,02 de la fracción total de la atmósfera [7] y se ha vinculado su piroelectricidad como agente cocausal del más conspicuo de los electrometeoros en Venezuela, el Relámpago sobre el Río Catatumbo [5, 8] y sus derivados acuosos, los hidruros de Metano parecen jugar un papel importante en la climatología oceánica [9]. Finalmente una breve

discusión de los resultados y las conclusiones se muestra en la última.

2. Características de la troposfera baja

Considerando una nube única, aislada y de tipo cumuliforme, constituida por una o más celdas nubosas, cada una con un volumen del orden de $5 \cdot 10^{10} \text{ m}^3$, cuya aproximación está de acuerdo con los modelos numéricos de formación de nubes [10]. Sin pérdida de generalidad, se puede tomar cada celda nubosa en equilibrio hidrodinámico con su entorno. A los efectos de modelar un comportamiento electrostático, puede también considerarse su geometría como un paralelepípedo cúbico de $3,6 \text{ Km}$ de lado. La celda se ubica a una altura z y $z + d$ respecto a la superficie (Fig. 1). Es evidente que una nube macroscópica (real) esta constituida de varias celdas débilmente interactivas, cada una de las cuales puede ser descrita microscópicamente por los mecanismos y ecuaciones aquí esbozados.

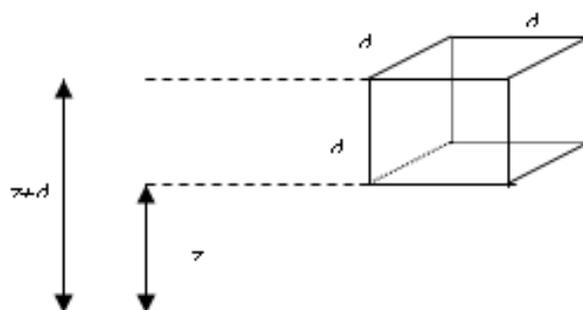


Figura 1: Geometría de la celda

2.1. Temperatura y presión

Debido a que la celda está en una región de la atmósfera suficientemente baja donde se puede aproximar el gradiente de temperatura y presión bajo un modelo lineal de la troposfera. Para alturas inferiores a los 15 Km , las variaciones de la temperatura atmosférica en promedio, pueden aproximarse linealmente por la expresión (Ec. 1) [6, 10]:

$$T(z) = T_0 + \alpha_T z, \quad (1)$$

donde z es la altura respecto a la superficie, expresada en kilómetros, $T_0 \approx 15^\circ \text{ C}$ y $\alpha_T \approx -71/11^\circ \text{ C/Km}$. Análogamente, la presión atmosférica media ejercida

por la columna de aire seco decrece con la altura (Ec. 2):

$$P(z) = P_0 e^{(-\alpha_p z)}, \quad (2)$$

con $\alpha_p \approx 0,116 \text{ Km}^{-1}$ y $P_0 \approx 103,11 \text{ KPa}$.

2.2. Campo y potencial eléctrico

En la atmósfera limpia de nubes por debajo de los 60 Km de altitud, está presente un campo eléctrico vertical cuya intensidad (E) para latitudes medias, está dada por [11] (Ec. 3):

$$\vec{E} = -[93,8 \cdot e^{-4,527z} + 44,4 \cdot e^{-0,375z} + \dots + 11,8 \cdot e^{-0,121z}] \hat{z} \text{ [KV/Km]}. \quad (3)$$

En la Figura 2 se resumen las características principales de la atmósfera para los primeros 15 Km de altitud respecto a la superficie.

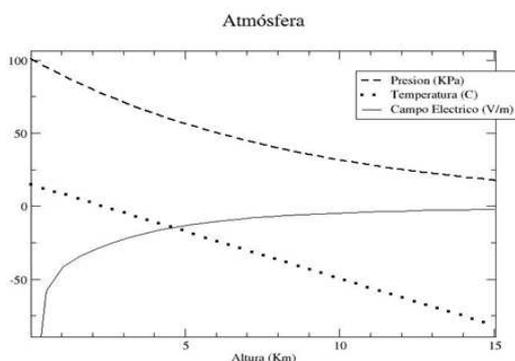


Figura 2: Características de la Troposfera Baja

Consideremos una celda cúbica de 3,6 Km de lado, en ausencia de aerosoles y de condensación, su diferencia de potencial entre su cima y su base, dependerá de la altura z (en Km) respecto a la superficie, como quiera que el campo eléctrico disminuye en valor absoluto, monótonamente con respecto a z , su diferencia de potencial disminuirá en valor absoluto con la altura, como muestra la Figura 3.

Adviértase que la celda se descargará cuando la diferencia de potencial sea del orden del potencial de ruptura dieléctrica del aire: 1000 KV para el aire húmedo y 3000 KV para el aire seco a nivel de la superficie [12], en ausencia de vapor de condensación y de aerosoles, la celda no alcanza el potencial de ruptura dieléctrica del aire; como cabe esperar de acuerdo a la fenomenología observada en los electrometeoros.

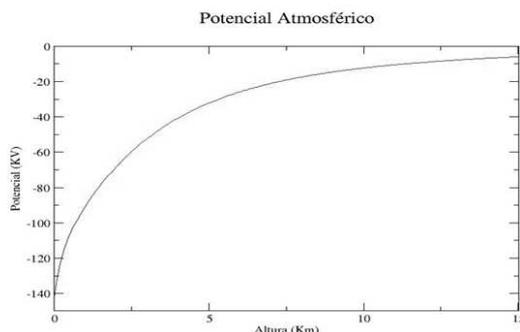


Figura 3: Potencial Electroatmosférico de la Troposfera Baja

2.3. Desplazamiento eléctrico y dipolos en aerosoles

A los fines de estudiar el comportamiento eléctrico de la nube, se considera cada celda como una colección de dipolos de agua en equilibrio hidrostático a la temperatura $T = T(z)$, en presencia de un campo eléctrico E .

2.3.1. Dipolos de agua en una celda nubosa

Para la molécula de agua, el momento dipolar eléctrico es (Ec. 4):

$$\vec{p} = 6,3 \cdot 10^{-30} \text{ [cm]}. \quad (4)$$

Es fácil ver (Fig. 4) que la intensidad del campo dipolar, a una distancia x de la molécula de agua está dada por la expresión (Ec. 7):

$$\vec{E}_{\text{dipolo}} = -\frac{2}{4\pi\epsilon_0} \frac{qa}{(x^2 + a^2)^{3/2}} \quad (5)$$

y el vector de Desplazamiento eléctrico resulta (Ec. 8):

$$\vec{D} = \epsilon_{H_2O} \vec{E}. \quad (6)$$

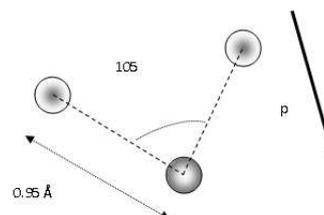


Figura 4: Geometría de la molécula de agua. Adviértase que el momento dipolar, en general, está inclinado α grados respecto al campo eléctrico atmosférico (dirección z).

En el caso de la celda nubosa, la distribución de los dipolos eléctricos de las moléculas de agua siguen, en el

equilibrio térmico, una estadística Maxwelliana, por lo cual el desplazamiento eléctrico promedio contempla todas las posibles orientaciones del momento dipolar respecto al campo eléctrico atmosférico exterior, en consecuencia el valor esperado se extiende sobre el número total de moléculas n (Ec. 8):

$$\langle \vec{D} \rangle = \frac{\int \epsilon \vec{E}_{\oplus} \exp\left(\frac{\vec{p} \cdot \vec{E}_{\oplus}}{k_B T}\right) dn}{\int \vec{E}_{\oplus} \exp\left(\frac{\vec{p} \cdot \vec{E}_{\oplus}}{k_B T}\right) dn}, \quad (7)$$

donde k_B es la constante de Boltzmann y T es la temperatura de la nube. En la Figura 4 el vector de momento dipolar barre un área diferencial tal que:

$$dA = 2\pi r^2 \sin\alpha d\alpha. \quad (8)$$

Mientras que el número de moléculas por sección diferencial de área es:

$$dn = \frac{dA}{4\pi r^2} = \frac{1}{2} d\cos\alpha. \quad (9)$$

Así:

$$\begin{aligned} \langle \vec{D} \rangle &= \frac{\int_{-1}^1 \epsilon \vec{E}_{\oplus} \cos\alpha \exp\left(\frac{\vec{p} \cdot \vec{E}_{\oplus}}{k_B T}\right) d(\cos\alpha)}{\int_{-1}^1 \vec{E}_{\oplus} \exp\left(\frac{\vec{p} \cdot \vec{E}_{\oplus}}{k_B T}\right) d(\cos\alpha)} \\ &= \epsilon K_{\text{H}_2\text{O}} \vec{E}_{\oplus}. \end{aligned} \quad (10)$$

Este resultado es válido para las moléculas situadas en la celda nubosa a una altura z constante y con temperatura T del medio, como quiera que la celda está inmersa en un gradiente vertical de presión, debemos estimar el valor medio para toda la celda nubosa desde la altura h hasta la cota $h + d$; siendo d el espesor típico de la celda:

$$\vec{D} = \frac{\epsilon_0}{d} \int_h^{h+d} k_{\text{H}_2\text{O}}(z) \vec{E}_{\oplus}(z) dz. \quad (11)$$

Adviértase que en el comportamiento de la celda acuosa, hay que considerar que luego de cierta cota de altura, la conductividad de la celda ya no corresponde al agua, sino al hielo-nieve, en virtud del gradiente termobarotrópico atmosférico. Por ello el desplazamiento eléctrico de la celda nubosa a la altura de 8 – 10 Km es inferior a $2MV/\epsilon_0$.

2.4. Contribuciones de aerosoles: celda de metano

Estudiaremos los aerosoles mesoscópicos, vale decir los que actúan a escalas intermedias en las nubes

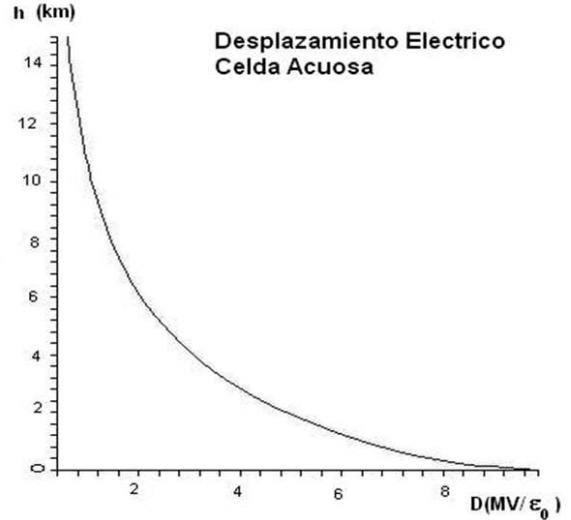


Figura 5: Variación vertical del desplazamiento eléctrico para una celda nubosa típica ($d \approx 3.6$ Km), empleando la conductividad eléctrica del agua en función de la temperatura [13] (en función de la altura).

convectivas tropicales; limitándonos a aquellos que por su composición esteoquímica presente momento dipolar eléctrico autoinducido y cuya abundancia relativa sea una fracción significativa del aire. Ellos nos deja primordialmente con el sexto componente atmosférico: el metano (CH_4) con una abundancia del 0,02 de la fracción total de la atmósfera [7, 11] tienen una constante de red de $2a \equiv 1,095\text{\AA}$ y sostienen un ángulo de $\alpha = 109,5^\circ$ que corresponden a los orbitales $s-p$ ($H-C-H$) en simetría tetraédrica [12], del Grupo de simetría T_d en la notación de Schofield. De esta simetría es fácil verificar que su momento dipolar es:

$$\begin{aligned} p &= 4(2a)e \cos(54,57) \dots \\ &\approx -4,07 \cdot 10^{-24} \hat{z} \text{ (m.c)}. \end{aligned} \quad (12)$$

Análogamente a la celda nubosa de agua, el campo eléctrico dipolar esta dado por:

$$\vec{E}_{\text{dipolo}} = -\frac{4}{4\pi\epsilon_0} \frac{q2a \cos\alpha}{(x^2 + a^2)^{3/2}} \hat{z} \quad (13)$$

Donde la configuración tetraédrica multiplica el momento bipolar en un factor 4 respecto al agua. De ello se infiere que el campo microscópico inducido en las celdas de metano incrementa el campo local respecto al campo microscópico inducido en una celda acuosa. Debe considerarse la configuración cristalina del metano pertenece al grupo de simetrías C_4 . Estas moléculas y sus microcristales son piroeléctricos.

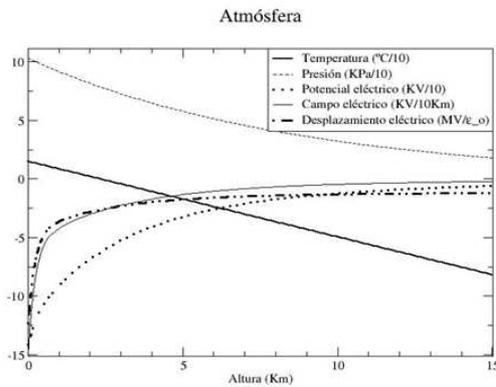


Figura 6: Variación altitudinal de parámetros físicos de la celda acuosa, según las expresiones (1), (2), (3) y (11). Adviértase que en una celda nubosa de agua-hielo el potencial no alcanza el potencial de ruptura dieléctrica del orden de 106 V/m [14]

Los cristales piroeléctricos se polarizan espontáneamente al formarse cristales carentes de centros de simetría (eso excluye por supuesto al NaCl que es un sistema cúbico). En efecto la formación de cristales de tipo piroeléctricos en la nube podría crear campos dipolares espontáneos, con tal de que los aerosoles cristalicen bajo algunos de los tipos de simetría C_1 triclinico, C_S o C_2 monoclinico, C_{2v} rómbico, C_4 o C_{4v} tetragonal, C_3 y C_{3v} romboédrico o bien C_6 y C_{6v} hexagonal, en cuyo caso el vector de desplazamiento eléctrico D es [15]:

$$\vec{D}_i = \vec{D}_{oi} + \epsilon_{ik} \vec{E}_k \quad (14)$$

Nótese que aún en ausencia de un campo eléctrico exterior E ; existirá un vector de desplazamiento eléctrico no nulo que favorecería la separación de cargas en las nubes; e incluso pudiera originar la avalancha requerida en los modelos de generación de rayos [16]. A los fines de estimar el vector de desplazamiento eléctrico intrínseco D_0 en la celda nubosa de metano, supondremos una celda nubosa de gas diluido (ideal), modelada en una aproximación macroscópica por un circuito equivalente simple de un capacitor de placas plano-paralelas, en ausencia de campos externos ($E = 0$).

De la ley de Gauss sobre la celda tenemos que la intensidad de campo eléctrico resulta constante en toda la celda:

$$\oint \vec{D}_i d\vec{s} = q_0 \Rightarrow \dots \dots D_0 + \epsilon E = \sigma \Rightarrow D_0 = \sigma, \quad (15)$$

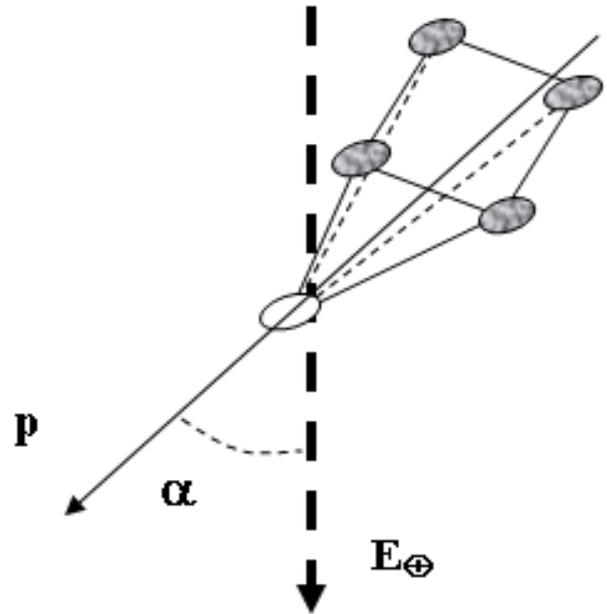


Figura 7: Simetría de la molécula de metano. El momento dipolar en general, se orienta α grados respecto al campo eléctrico atmosférico.

donde σ es la densidad de carga superficial de la celda nubosa.

La expresión anterior puede interpretarse como si en cada punto de la celda el campo fuera producido por la molécula de metano más próxima; despreciando las contribuciones de las demás moléculas en concordancia con la aproximación de gas ideal, vale suponer que $x \sim a$. Por otro lado, podemos emplear la misma aproximación $x \sim a$ en la expresión del vector de intensidad de campo E para el metano, de lo que resulta:

$$\begin{aligned} \vec{E}_{\text{dipolo}} &= -\frac{4}{4\pi\epsilon_0} \frac{q2a \cos \alpha}{(x^2 + a^2)^{3/2}} \hat{z} \\ &\approx \frac{e \cos \alpha}{\sqrt{2}\epsilon_0\pi a^2} \hat{z}, \end{aligned} \quad (16)$$

donde e representa la carga del electrón.

Como quiera que la aproximación gaussiana para la celda es independiente, en la descripción clásica, del volumen de la celda, tenemos que en el caso limite de una celda unimolecular ambas expresiones de los campos deben coincidir $E_{\text{dipolo}} \sim \frac{\sigma}{\epsilon_0}$ se sigue que:

$$D_0 = \sigma \approx \frac{e \cos \alpha}{\sqrt{2}\epsilon_0\pi a^2}. \quad (17)$$

Si la celda es uniforme, su densidad de carga permanece constante, tratase de una celda unimolecular o tratase de una celda macroscópica, en virtud de las

aproximaciones realizadas. Finalmente obtenemos para la molécula de metano:

$$D_0 \cong 16,68 \langle N \frac{kV}{km} \rangle = 16,68 \langle N \frac{c}{m^2} \rangle. \quad (18)$$

Considérese ahora una celda nubosa en cuya composición hay una fracción ($f \leq 1$) de metano, en ese caso la intensidad del campo piroeléctrico autoinducido ($E_{\text{externo}} = 0$) será:

$$E_0 = f \frac{D_0}{\epsilon_0}. \quad (19)$$

Obsérvese que aun para una celda nubosa cuya composición de metano sea mil veces menor que la composición atmosférica promedio (del orden de $2 \cdot 10^{-6}$), se tendrá un campo piroeléctrico en el orden de 4 megavoltios por kilómetro, superior a la rigidez dieléctrica del aire seco y equivalente a una diferencia de potencial del orden de 14,4 megavoltios entre la base y la cima de la celda.

2.5. Desplazamiento eléctrico en nubes

Para una celda nubosa de agua y metano (con factor de concentración $f \leq 1$) el desplazamiento eléctrico debido al metano es igual al desplazamiento piroeléctrico intrínseco (D_0) mas el inducido por el campo eléctrico atmosférico. Este segundo término puede evaluarse en forma análoga a la celda acuosa; y en consecuencia se obtiene:

$$D_{CH_4} \approx 16,68f[c/m^2] + 1,67\epsilon E_{\oplus}, \quad (20)$$

donde se asume que la constante dieléctrica del metano como 1,67 aproximación valida en el rango de temperatura y presión de la troposfera baja (inferior a 15 Km de altitud). Para una celda nubosa el valor medio será:

$$\langle D_{CH_4} \rangle \approx 16,68f[c/m^2] + 1,67 \frac{\epsilon_0}{d} \int_h^{h+d} E_{\oplus} dz. \quad (21)$$

La Figura 8 muestra los resultados obtenidos del desplazamiento eléctrico tanto del agua como del metano, utilizando una concentración de metano mil veces menor a la composición atmosférica promedio; donde el vector de desplazamiento eléctrico de la nube se ve afectado por los valores que posea el agua y el metano a la altura donde se encuentre dicha nube.

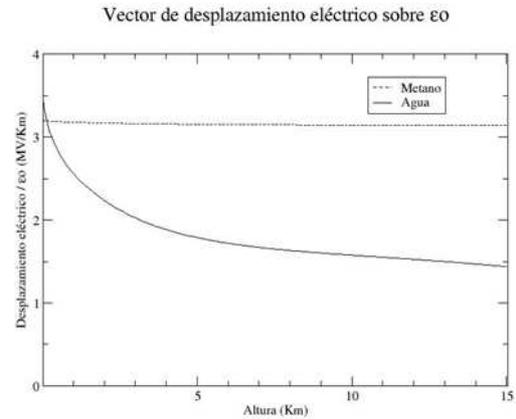


Figura 8: Comparación de las contribuciones del agua y del metano en el desplazamiento eléctrico de la celda nubosa a diferentes altitudes.

3. Conclusiones

La actividad eléctrica atmosférica, posee una dependencia térmica, dada por el gradiente de temperatura existente, ya que las propiedades físicas y químicas de las moléculas existentes en la atmósfera local, se ven afectadas por este cambio de temperatura.

Utilizando el modelo de un capacitor de placas plano paralelas (Capacitor telúrico) [10], que concuerda con la geometría de las nubes de tormentas, el factor dieléctrico aumenta con la altura debido a la disminución monótona de la temperatura. Este factor propio de las moléculas de agua, es proporcional a la capacitancia, indicando con ello que la celda nubosa se carga a medida que aumenta la altura durante el proceso natural del ciclo del agua. De acuerdo a los modelos numéricos, el potencial de ruptura de una celda nubosa, netamente de agua, no es suficiente para una descarga [16]. A través del estudio de aerosoles presentes en la atmósfera, se puede identificar los elementos que contribuyen a aumentar los valores del vector de desplazamiento eléctricos de una celda nubosa. El metano debido a su configuración de simetría cristalina tetraédrica, posee propiedades piroeléctricas, el cual se auto polariza incluso sin la presencia de un campo eléctrico externo. Al aumentar la concentración relativa de metano o quizás de otros aerosoles piroeléctricos en la celda nubosa de ocurrencia, la actividad eléctrica se ve incrementada debido a estas propiedades eléctricas intrínsecas, como en el caso hipotético de una celda nubosa de agua y de metano (o incluso de hidruros de metano).

La fenomenología de los electrometeoros y en

particular de las descargas eléctricas nube–nube y nube–tierra muestran que estas manifestaciones son conspicuas en latitudes bajas (inferiores a 60° de latitud), son mas frecuentes en horas nocturnas y en nubes tipo cumulonimbus, siendo casi inexistentes en nubes cúmulos, cirrus y estratos [16]. La explicación usual de esta fenomenología suele atribuirse a la presencia de corrientes convectivas, típicas de las regiones intertropicales, favorecidas por el calentamiento diurno y por los gradientes térmicos entre nube y tierra en las zonas tormentosas con abundante movimientos convectivos. Debe notarse que el modelo convectivo no explica por sí solo la actividad eléctrica sino mas bien la pluviosidad. Para explicar los electrometeoros se requiere adicionar una serie de modelos muy discutibles que pudieran causar la separación de cargas en nubes de tormentas.

Adviértase también que la acumulación metano es mayor en latitudes bajas, sigue siendo mayor en horas nocturnas cuando el metano no es fotodisociado y es mayor en las nubes cumulonimbus donde la opacidad filtra la radiación solar que evita su fotodisociación y permite su acumulación relativa al interior de las mismas. Nótese que no requiere de grandes concentraciones relativas al interior de las celdas nubosas, basta con apenas una concentración relativa mil veces menor a la del aire, sin fotodisociación, para generar los electrometeoros. La fenomenología observada parece estar de acuerdo con el modelo, existiendo además evidencia extraterrestre, en la atmósfera del satélite de Saturno: Titán, donde la concentración de metano es muy superior a la de la Tierra [17], y la actividad eléctrica en dicho cuerpo celeste es superior a la nuestro planeta [18]. Además la presencia de aerosoles y/o partículas piroeléctricas son coadyudantes para la actividad eléctrica como se observan en las erupciones volcánicas y las tormentas de arena, en donde los electrometeoros se manifiestan sin la presencia de pluviosidad.

Referencias

- [1] MacGorman D.R. and Rust W.D. (1998): «The Electrical Nature of Storms». Oxford Univ. Press, N.Y.
- [2] Feymann R., Leighton R. and Sand M. (1972): «Lecturas de Física». Fondo Educativo Latinoamericano. Mexico 142–157.
- [3] Chalmers J.A. (1967): «Atmospheric Electricity». Pergamon Press 2da. Ed. N.Y., 515–517.
- [4] Uman M.A. (1984): «Lightning». McGraw Hill NY.
- [5] Falcón N., Pitter W., Muñoz A., and Nader D. (2000): «Microfísica del Relámpago del Catatumbo». Ingeniería UC, 7, 1, 47–53
- [6] Rogers R. (1977): «Física de las nubes». Reverté. Barcelona.
- [7] Lider D.R. (1997): «ed. Handbook of Chemistry and Physics». CRC England.
- [8] Falcón N., Pitter W., Muñoz A., Barros T., Vilorio A. and Nader D. (2000): «modelo Electroatmosférico del Relámpago sobre el Río Catatumbo». Sci. J. From Exp. Faculty of Sc.(Ciencia) 8, 2, 155–167.
- [9] Suess E., Bohrmann G., Greinert J. and Lausch, E. (1999). Sc. Am. 281, 5, 52.
- [10] Iribarne S.V. and Cho H.R. (1980): «Atmospheric Physics». D. Reidel Publishing Company, 129–146.
- [11] Gringel W., Rosen J.K., and Hoffman D.J. (1986): «Electrical structure from 0 to 30 km; in the Earth's Electrical Environment». Krider, E. P. & Roble, R.I. Ed. Washinton DC Nacional Academia Press, pp 166–182.
- [12] Morrison M. and Boid L. (1996): «Química Orgánica». McGraw Hill, pp 347.
- [13] s.a.,http://www.clippercontrols.com/info/dielectric_constants.html. Consulta 20/05/2005.
- [14] Uman M.A. (1984): «Lightning». McGraw Hill NY, pp 213.
- [15] Landau L., Lifshitz, E. (1981) «Electrodinámica de los medios Continuos». Reverté Barcelona, pp. 70–73.
- [16] Rarkov V. and Uman M. (2003): «Lightning: Physics and Effects». Cambridge U. Press, pp. 10–12.
- [17] Lemmon M.T., Smith P., and Lorenz R. (2002): «Methane Abundance on Titan, Measured by the Space Telescope Imaging Spectrograph». Icarus 160, 375–385.
- [18] Desch M.D. and Kaiser M. L. (1990): «Upper limit set for level of lightning on Titan». Nature 343, 442–443.