
ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES QUE FAVORECEN EL DESARROLLO DE LA ACTIVIDAD CONVECTIVA DE LAS TORMENTAS ELÉCTRICAS EN LA SABANA DE BOGOTÁ (*)

GERARDO DE J. MONTOYA GAVIRIA

Profesor Asociado, Departamento de Geociencias-Universidad Nacional de Colombia

JESUS ANTONIO ESLAVA RAMIREZ

Profesor Titular, Departamento de Geociencias-Universidad Nacional de Colombia

Montoya G & J. Eslava. (2000): Análisis de las condiciones que favorecen el desarrollo de la actividad convectiva y de las tormentas eléctricas en la sabana de Bogotá. Geofis. Colomb. 4:23-30. ISSN 0121-2974. Santa Fe de Bogotá, D.C. - Colombia.

RESUMEN

La predicción de la actividad convectiva en los trópicos es un problema aún sin resolver. Las dificultades para resolverlo están asociadas con el hecho de que este fenómeno se presenta a menudo como resultado de una compleja interacción entre características locales y condiciones en el flujo de gran escala. En este trabajo, se analizan registros sobre días con ocurrencia de tormentas eléctricas conjuntamente con datos de superficie y de altura de aproximadamente 10 años, con el objeto de determinar las condiciones tanto de grande escala como de escala local que favorecen el desarrollo de la actividad convectiva en la Sabana de Bogotá. Como resultado principal del trabajo se concluye que, de acuerdo a los registros correspondientes a la superficie isobárica de 700 hPa, las tormentas eléctricas en esta región se presentan con vientos débiles y alto contenido de humedad, situación que es propia de la zona de convergencia de los alisios y del brazo ascendente ecuatorial de la celda de Hadley. El análisis muestra además que, la convección local o térmica reforzada por el efecto orográfico, sirve de mecanismo disparador de las tormentas eléctricas en la Sabana de Bogotá. Estas conclusiones explican el origen y desarrollo de este fenómeno y permiten dar algunas recomendaciones para su diagnóstico y pronóstico. Finalmente, se sugiere un modelo de circulación del aire durante el desarrollo de la actividad convectiva en la Sabana de Bogotá.

ABSTRACT

Convective activity prediction in the tropics are still an unsolved problem. Difficulties are mainly related to the fact the phenomenum, very often results as a complex interaction between local and large scale stream conditions. Days with thunderstorm activity compared with surface and height data for 10 years are presented in this paper in order to determine both, large and local scale conditions that propitiate the developing of convective activity in the Bogota sabana. As a main result it is shown that at the 700 hPa isobaric surface, electrical storms appears whit weale winds and high contents of humidity, which characterize the alisios convergence zone and also the ecuatorial ascendent branch of the Hadley cell. Besides, the analysis shows that local thermal convection strengthened by orograhapic effect are the trigger mechanism for electrical storm in the "Sabana de Bogota". These conclusions explain the origin and develop of the phenomenum and allow to give some recomendations for its diagnostic and forecasting. Finally an circulation model during the developing of convective activity in the "Sabana de Bogota".

(*) Trabajo realizado dentro del marco del Grupo de investigaciones en Meteorología-U.N., que cuenta con el apoyo financiero de COLCIENCIAS y el BID, contrato COLCIENCIAS-U.N. No.562/98.

1. INTRODUCCION

La actividad convectiva es el elemento más importante para predecir en los trópicos. Esto se debe a que primero; la mayor parte de la precipitación registrada durante el año es originada por nubes convectivas. Segundo, muchos fenómenos adversos, tales como tornados huracanes, tormentas eléctricas, etc., están asociados con este fenómeno. Por último, la convección tropical juega un papel preponderante en la circulación general de la atmósfera tropical y la formación de las condiciones del tiempo para pronóstico a largo plazo y predicción del clima. En particular, en la Sabana de Bogotá, el 21 % de los días del año ocurren tormentas eléctricas causando trastornos, en el transporte, en la red de distribución de energía eléctrica, etc. Por eso, es de gran importancia el mejoramiento de los métodos para pronosticarlas.

Para mejorar el pronóstico de lluvias convectivas y de tormentas eléctricas es importante analizar las condiciones atmosféricas en las diferentes escalas que determinan el origen y desarrollo de estos fenómenos. En la gran escala es conocido por ejemplo, que la circulación de la atmósfera en la región tropical y en latitudes medias es bien diferente. Mientras que las últimas son caracterizadas por un flujo medio cuasi-horizontales dirigido de oeste para este, en la región tropical predominan los vientos Alisios de ambos hemisferios. Estos vientos se encuentran en una franja estrecha llamada Zona de Convergencia Intertropical-ZCIT, propiciando allí el desarrollo de la actividad convectiva.

El estudio de la ZCIT ha sido objeto de innumerables contribuciones. No obstante, muchas preguntas aún están sin resolver. Por ejemplo, una primera hojeada de los mapas medios circunglobales muestra que la zona de convergencia de los Alisios en general coincide con otras bandas de valores extremos tales como; mínimo de presión, máximo de temperatura de la superficie del mar, y máximos de convergencia, nubosidad y precipitación. (ver por ejemplo, **Hastenrath**, 1995). Lo que no está muy claro desde el punto de vista físico, ya que no es fácil concebir como el máximo de la temperatura en la superficie del mar obtenida por calentamiento debido a la radiación solar, puede coexistir simultáneamente con máximo en nubosidad; por ejemplo. estudios de más alta resolución, realizados por **Hastenrath & Lamb** (1978), indican que la zona de máxima convergencia, nubosidad y precipitación se encuentra distante del eje de discontinuidad del viento, (definido como mínimo en velocidad y persistencia), hasta 350 km en el mar y hasta 1000 km en el continente africano. Sin embargo, aún no es claro el mecanismo físico responsable por esta separación. Aunque la ZCIT es el sistema pluvio-genético más importante en Colombia y en especial en su zona Andina, **Snow** (1976), no es el único. En la costa pacífica colombiana por ejemplo, gran parte de las lluvias

acaecidas durante el año son ocasionadas por complejos convectivos de mesoescala, **Mesa et al.** (1997). Otros sistemas productores de lluvia en Colombia son: las ondas del este, la brisa marina, las vaguadas asociadas con frentes fríos de los hemisferios norte o sur y esporádicamente los huracanes tropicales. Las lluvias en Colombia, especialmente las de origen convectivo, a menudo se presenta acompañadas de tormentas eléctricas.

En la mediana y pequeña escalas la interacción entre los vientos Alisios y la cordillera de los Andes ha sido poco estudiada. Se sabe por ejemplo, que la interacción entre los vientos provenientes del pacífico, el calentamiento de la superficie y el factor orográfico de la cordillera occidental genera un alto grado de inestabilidad atmosférica provocando fuerte convección a lo largo de la cordillera occidental colombiana, **Emmanuel** (1994). Estos sistemas lluviosos penetran al interior del país, por la costa pacífica llegando muchas veces más allá de Medellín, **Velasco & Fritsch** (1987), **Nieuwolt** (1977).

La Sabana de Bogotá, objeto de este estudio, ha sido aún menos estudiada. Se sabe por ejemplo, que ella es influenciada en mayor forma por los Alisios del Atlántico que del Pacífico. Sin embargo, poco se conoce sobre la interacción de estos vientos con factores locales tales como el calentamiento superficial y la orografía en el desarrollo de la actividad convectiva en esta región.

El objetivo de este estudio es analizar la influencia del flujo de los Alisios, de la ZCIT y de factores locales tales como la orografía y el calentamiento superficial sobre el origen y desarrollo de las tormentas eléctricas en la Sabana de Bogotá. Se espera que los resultados de este trabajo sirvan para esclarecer algunas de las características de la circulación tropical no conocidas hasta ahora y dar recomendaciones para la predicción de lluvias convectivas y tormentas eléctricas en la Sabana de Bogotá. Los resultados de este trabajo también serán de utilidad para pronosticadores en el trópico y estudiosos de la circulación tropical.

2. LOCALIZACION DEL AREA ESTUDIADA Y METODOLOGIA UTILIZADA EN EL ESTUDIO

La Sabana de Bogotá está localizada en el altiplano andino a 2547m sobre el nivel del mar y ocupa una extensión de 4305 km², aproximadamente. Está limitada a la derecha por el costado occidental del ramo oriental del sistema de cordilleras de los Andes y a la izquierda por el caluroso y húmedo valle del Magdalena. Los datos utilizados corresponden a la estación Aeropuerto El Dorado, ubicada sobre la Sabana en 4° 43' de latitud norte y 74° 09' de longitud oeste. Los datos utilizados en este trabajo fueron: datos sobre dirección predominante del viento en superficie y correspondientes a un registro de 10 años y publicados por **Barrero** (1976), datos sobre altura del geopotencial, déficit de rocío y velocidad del

viento correspondiente al nivel de 700 hPa y de los registros correspondientes a días con ocurrencia de tormentas eléctricas. Estos últimos datos fueron suministrados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM y, se sometieron a un control de calidad el cual consistió en plotear el parámetro en secuencia temporal. Los datos dudosos fueron desechados.

3. LA INFLUENCIA DE LOS VIENTOS ALISIOS

La influencia de los vientos alisios sobre la Sabana de Bogotá se puede observar en la Tabla 1, la cual contiene la dirección predominante horaria del viento en superficie en la estación Aeropuerto El Dorado. Estos datos fueron publicados por Barrero (1976) y corresponden a un registro de 10 años de duración. Como se puede observar en esta tabla, la dirección del viento en la Sabana de Bogotá prevalece del NE especialmente durante la noche y varía hacia el E y un poco hacia el SE en las horas de la mañana y en los meses de la estación seca. Esta particularidad permite afirmar que la Sabana de Bogotá se encuentra bajo el área de influencia de los vientos alisios. Los vientos del oeste observados en la Tabla 1, especialmente en las horas de la tarde, están estrechamente relacionados con un fenómeno local el cual se analizará más adelante.

4. LA INFLUENCIA DE LA ZCIT

Para determinar la influencia de la ZCIT en la formación de tormentas eléctricas sobre la Sabana de Bogotá se realizó un análisis de los días de ocurrencia de tormentas eléctricas, según registros del Aeropuerto El Dorado y también correspondientes a un periodo de 10 años. Este análisis muestra que en la Sabana de Bogotá se presentan, en promedio, 76 días al año con episodios de tormentas eléctricas, o sea el 21% de los días del año. En la Fig.1a, se muestra el número medio mensual de días con tormentas eléctricas.

En la Fig.1, se observan 2 máximos durante el año, uno en marzo-abril y otro en octubre-noviembre. O sea que la ocurrencia de tormentas eléctricas en la Sabana de Bogotá acompaña el paso de la ZCIT sobre esta región de la misma manera como lo hace el ciclo anual de la precipitación (ver por ejemplo, Montealegre, 1986.). En la Fig.1b se muestra la distribución horaria de las tormentas eléctricas en la Sabana de Bogotá. Podemos observar en esta figura que la hora de mayor frecuencia de tormentas eléctricas corresponde a las 13-14 horas o sea, coincidiendo con el momento cuando se registra la temperatura máxima. Se puede entonces concluir que las tormentas observadas son en su mayoría originadas por la convección local ó térmica. Por otro lado, es importante resaltar que las horas con mayor frecuencia

de tormentas eléctricas en la Fig.1b coincide con la aparición de componentes oeste y resaltadas con negrita en la Tabla 1. Esta observación puede ser explicada de la siguiente manera: durante las horas y en los meses de mayor actividad convectiva el flujo del este en la Sabana de Bogotá es interrumpido para dar paso a las masas de aire cálidas y húmedas provenientes del valle del Magdalena. Este cambio de dirección del flujo durante las horas de desarrollo convectivo ha sido constatado durante muchos años por observadores y analistas en el Aeropuerto El Dorado y también puede interpretarse como la influencia de la orografía en el desarrollo de las tormentas eléctricas en la Sabana de Bogotá.

5. COMPORTAMIENTO DE LA PRESION, LA VELOCIDAD DEL VIENTO Y LA DEPRESION DEL PUNTO DE ROCIO DURANTE LOS PERIODOS CONVECTIVOS Y NO CONVECTIVOS.

Además de estas características locales, para que la convección húmeda profunda prospere, como se mencionó anteriormente, se necesita la existencia de ciertas condiciones, en el flujo básico, favorables para su desarrollo. Para investigar estas condiciones fueron analizados los campos de geopotencial, velocidad del viento y depresión del punto de rocío correspondientes a la superficie isobárica de 700 hPa, (aproximadamente 500-600m sobre la Sabana de Bogotá).

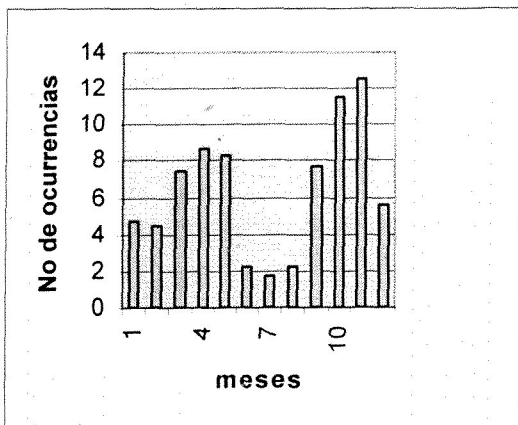
En la Fig.2 se muestra la altura del geopotencial de la superficie de 700 hPa, correspondiente al sondeo diario ejecutado a las 12 UTC y para el periodo comprendido entre 01-Ene-1984 y el 31-Dic-1985. En esta, y en las figuras siguientes, los óvalos rellenos con negrita señalan los días con ocurrencia de tormentas eléctricas. También se puede observar que los días con tormenta eléctrica se sitúan indistintamente a lado y lado del valor medio. En otras palabras, las tormentas eléctricas, sin preferencia alguna, suceden tanto para bajas como para altas presiones. Esta observación también fue característica en otros periodos analizados. A pesar de que teóricamente se deben esperar bajas presiones asociadas con la actividad convectiva y que los vientos alisios fluyen desde las altas hacia las bajas presiones, (ver por ejemplo, Philander, 1990), estas observaciones no lo confirman, y por el contrario, corroboran una vez más lo afirmado por Riehl (1979) en el sentido de que la presión atmosférica aporta poca información útil para predicción del tiempo en los trópicos.

En las Fig.3 y 4 se muestra el comportamiento de la velocidad del viento, (en nudos), y de la depresión del punto de rocío, respectivamente, día por día, y para un periodo de cuatro años consecutivos.

TABLA 1. DIRECCION PREDOMINANTE HORARIA EN SUPERFICIE, EN LA ESTACION AEROPUERTO EL-DORADO SEGUN BARRERO (1976). LOS CASOS CON COMPONENTE OESTE, (RESALTADOS CON NEGRITA), CORRESPONDEN A LAS HORAS Y LOS MESES CON MAYOR ACTIVIDAD CONVECTIVA.

Mes/ Hora	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
00	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	N
01	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE
02	NE	E	NE	NE	NE	NE	NE	E	NE	NE	NE	NE
03	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	E	NE	NE	NE	NE
04	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE
05	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE
06	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE
07	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE
08	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE
09	E	NE	NE	NE	NE	E	E	E	NE	E	E	NE
10	E	E	E	E	NE	E	E	E	E	E	E	NE
11	E	NE	E	E	E	E	E	SE	E	E	E	E
12	E	E	E	E	E	E	E	SE	E	E	E	E
13	E	W	W	E	E	E	SE	SE	S	W	W	W
14	SE	W	W	W	E	E	SE	E	W	W	W	W
15	W	W	W	W	W	E	SE	SE	W	W	W	W
16	W	W	W	W	SW	E	SE	E	W	W	W	W
17	E	W	W	W	W	E	E	SE	W	W	W	W
18	E	W	W	W	W	E	E	E	W	W	W	W
19	W	W	W	W	W	E	E	E	E	W	W	W
20	NE	W	NE	E	E	NE	E	E	N	NE	W	NE
21	NE	N	NE	E	NE	NE	E	E	N	E	NE	N
22	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	N
23	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	N	NE	NE	N

a)



b)

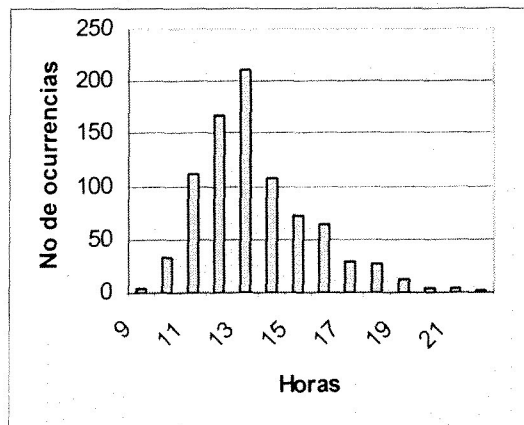


FIGURA 1: a) VALOR MEDIO MENSUAL DE DIAS CON OCURRENCIA DE TORMENTAS ELECTRICAS Y, b) FRECUENCIA HORARIA DE LA OCURRENCIA DE TORMENTAS ELECTRICAS.

En esas Figuras se observa que las tormentas eléctricas ocurren preferiblemente para velocidades inferiores a 5 nudos, (≈ 10 m/s) y depresiones del punto de rocío por debajo de 2°C , a la altura de 500-600 m sobre la Sabana de Bogotá. Estas observaciones también fueron características en otros periodos analizados.

Esto nos permite concluir en general, y al menos cualitativamente, que las tormentas eléctricas en la Sabana de Bogotá se presentan con vientos débiles y alto contenido de humedad en relación con los periodos cuando ellas no tienen lugar, y tal como se afirmó anteriormente. Con el objeto de tener un estimativo de esta afirmación, se calculó la frecuencia relativa fr , de ocurrencia de tormenta eléctrica por rangos de variación de la depresión del punto de rocío DR, y de la velocidad del viento VV. Los resultados se muestran en la Tabla 2 y en la Fig.5.

Tanto en la Tabla 2 como en la Fig.5, la mayor frecuencia de ocurrencia de tormentas eléctricas en la Sabana de Bogotá, tiende a ubicarse en los primeros rangos.

CONCLUSIONES

El análisis de cerca de diez años y medio de observaciones nos permite concluir que, las tormentas eléctricas no son un fenómeno apenas local como podría pensarse sino que, en general, se forman debido a una interacción compleja entre características locales y condiciones en el flujo de gran escala.

Por un lado, ellas son determinadas por alto contenido de humedad y vientos débiles, características propias de la zona de convergencia de los alisios y de la celda de circulación de Hadley. Por otro lado, el número de tormentas eléctricas aumenta, en la Sabana de Bogotá, por la convección local o térmica, situación reforzada por el efecto orográfico. El efecto orográfico en este caso, consiste en el ascenso de las masas de aire cálidas y húmedas del valle del Magdalena sobre la Sabana de Bogotá. Podemos entonces sugerir el siguiente esquema de circulación del aire durante el desarrollo de tormentas eléctricas en la Sabana de Bogotá (ver Fig.6).

De acuerdo a esta representación esquemática, durante el período de desarrollo de las tormentas eléctricas, el flujo de los alisios es interrumpido en la Sabana de Bogotá para dar paso al ascenso de masas cálidas y húmedas provenientes del valle del Magdalena.

Otras conclusiones que se derivan de este trabajo son:

- Para efectos de diagnóstico y pronóstico del tiempo el análisis de la presión no es importante pero si lo son los campos de la humedad y el viento. Utilizando la inercia de estos campos, es posible hacer uso del

análisis para fines de pronóstico a cortos plazos, es decir; a 6, 12 y 24 horas.

- Para efectos de diagnóstico y pronóstico del tiempo es conveniente monitorear los centros de actividad convectiva en los trópicos a través por ejemplo de la temperatura de la superficie del mar, la precipitación, la nubosidad, etc.

- Debido a que, como fue mostrado, la actividad convectiva depende de los vientos y humedades superficiales, los modelos hidrodinámicos para predicción numérica más efectivos serían aquellos que tuvieran en cuenta los procesos de la capa límite y la formulación explícita de la convección atmosférica.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por CINDEC-UN (Proyecto No 803172). Los autores agradecen al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM por el suministro de los datos usados.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Barrero, A.** (1976): Régimen de vientos en superficie de la Sabana de Bogotá. Himat, (documento interno).
- Emmanuel, K.A.**, (1994): Atmospheric Convection. Oxford Univ. Press, New York, 580 pp.
- Hastenrath, S. & P.J. Lamb** (1978): On The dynamics and Climatology of Surface Flow over the Equatorial Oceans. Tellus **30**:436-448.
- Hastenrath, S.** (1995): Climate Dynamics of the Tropics. Kluwer Acad. Publishers, Dordrech, The Netherlands, 488pp.
- Mesa, S. O., J.G. Poveda, & L.F. Carvajal.** (1997): Introducción al Clima de Colombia. Univer. Nal de Colombia, Fac. de Minas, Medellín, 390 pp.
- Montealegre, J. E.**, (1986): Distribución espacial de la precipitación en Colombia. *Atmósfera* **9**:37-52.
- Nieuwolt, S.** (1977): Tropical Climatology. John Wiley, 207 pp.
- Philander, S.** (1990): El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation. Acad. Press, 292 pp.
- Riehl** (1979): Climate and Weather in the Tropics. Acad press, 611 pp.
- Snow, J. W.**, (1976): The Climate of Northern South America. En: Climates of Central and South America (W. Schwerdtfeger, ed.). Elsevier, Amsterdam, pp.295-403.
- Velasco, I. & M. Frisch** (1987): "Mesoscale convective complexes in the Americas. *J. Geoph. Res.* **92**(d8): 9591-9613.

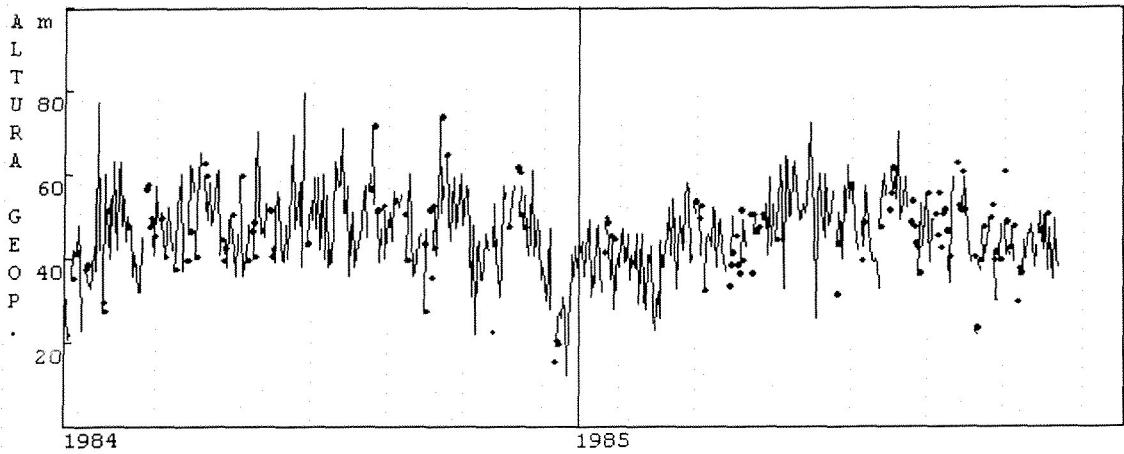


FIGURA 2. ALTURA DEL GEOPOTENCIAL EN m (PARA OBTENER LA ALTURA REAL, SUMAR 3100m A LA ORDENADA), CORRESPONDIENTE A LA SUPERFICIE ISOBARICA DE 770 hPa. LOS VALORES ESTAN PLOTEADOS DIA POR DIA, DURANTE UN PERIODO DE DOS AÑOS CONSECUTIVOS. LOS OVALOS RELLENOS CON NEGRITA INDICAN LOS DIAS CON REGISTRO DE TORMENTAS ELECTRICAS.

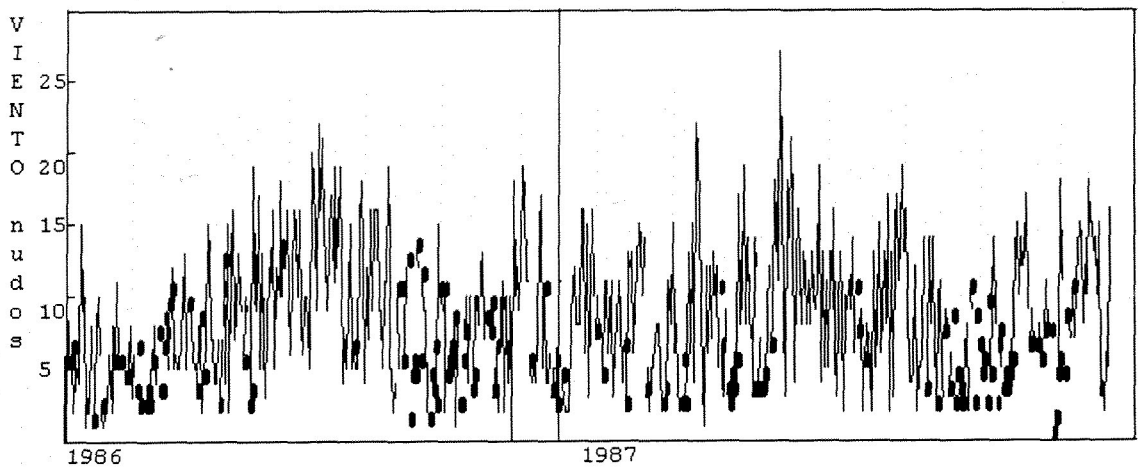
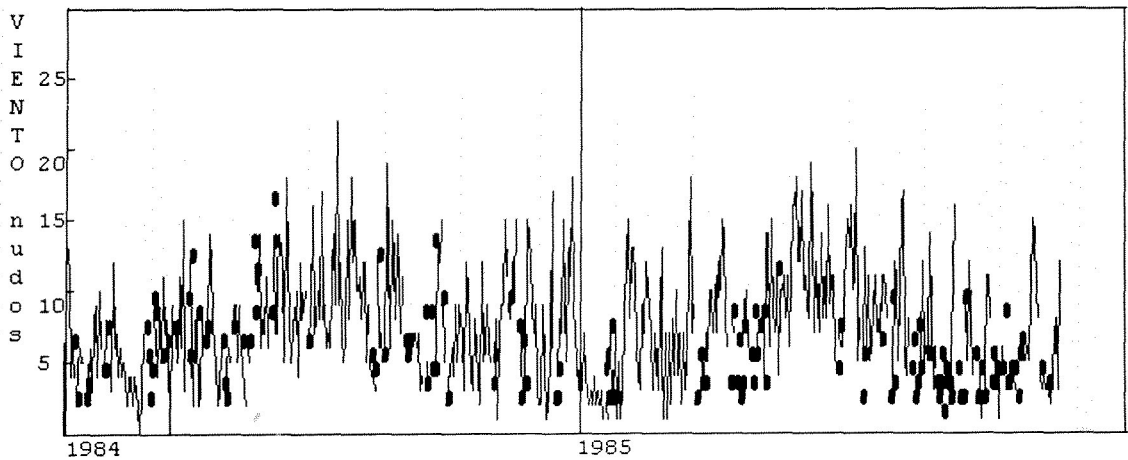


FIGURA 3. COMO EN LA FIG.2, PARA LA VELOCIDAD DEL VIENTO EN NUDOS.

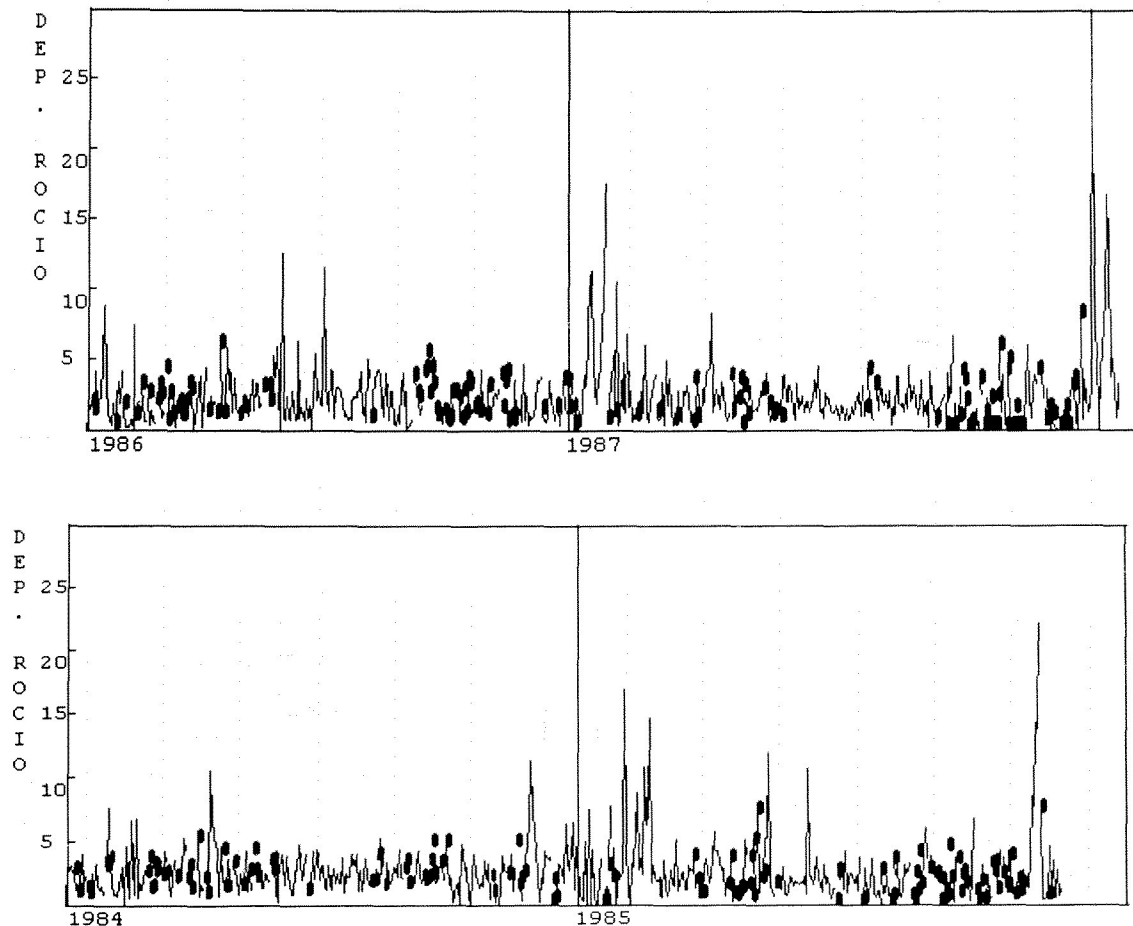


FIGURA 4. COMO EN LA FIG. 2 PARA LA DEPRESION DEL PUNTO DE ROCIO.

TABLA 2. FRECUENCIA RELATIVA F_r , DE DIAS CON OCURENCIA DE TORMENTA ELECTRICA EN LA SABANA DE BOGOTA, POR RANGOS DE VARIACION DE LA DEPRESION DEL PUNTO DE ROCIO (DR) EN °C Y DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO (VV) EN NUDOS RESPECTIVAMENTE Y PARA UN TOTAL DE 699 DIAS REGISTRADOS CON TORMENTA ELECTRICA.

Rango	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DR	0.0-1.0	1.0-2.0	2.0-3.0	3.0-4.0	4.0-5.0	5.0-6.0	6.0-8.0	8.0-10.0	10.0-15.0	15.0-20.0
No	211	156	110	116	59	20	17	6	3	1
Fr	0.302	0.223	0.157	0.166	0.084	0.029	0.024	0.008	0.004	0.001
VV	0-2.5	2.5-5.0	5.0-7.5	7.5-10.0	10.0-12.5	12.5-15.0	15.0-17.5	17.5-20.0	20.0-22.5	22.5-25.0
No	111	297	133	110	29	13	3	2	1	0
Fr	0.159	0.425	0.190	0.157	0.041	0.019	0.004	0.003	0.001	0.000

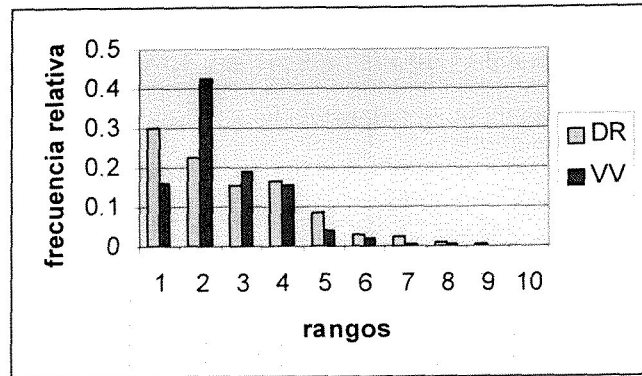


FIGURA 5. No. DE OCURRENCIAS DE TORMENTAS ELECTRICAS POR LOS RANGOS EN DEPRESION DE ROCIO Y VELOCIDAD DEL VIENTO, RESPECTIVAMENTE, DEFINIDOS EN LA TABLA 2.

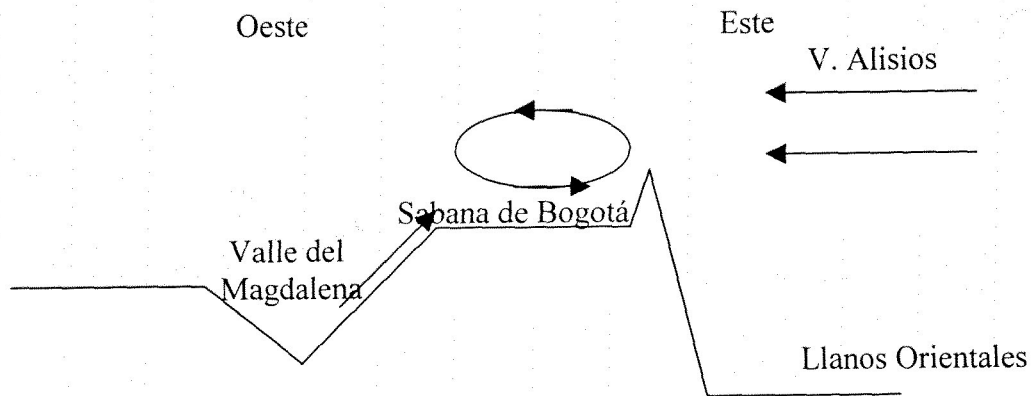


FIGURA 6. REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LA CIRCULACION DEL AIRE EN LA SABANA DE BOGOTA, DURANTE EL DESARROLLO DE TORMENTAS ELECTRICAS.