REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD DEL ZULIA
FACULTAD EXPERIMENTAL DE CIENCIAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS BÁSICOS SECTORIALES
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

Energética del Relámpago del Catatumbo

Trabajo Especial de Grado para optar al título de Licenciado en Física

Presentado por Br. Joaquín E. Díaz L.

Tutor: Prof. Ángel G. Muñoz S.

Maracaibo, Febrero de 2011

Energética del Relámpago del Catatumbo

Br. Joaquín E. Díaz L.

C. I. 16.089.715

Email: jlobaton@cmc.org.ve

Telf.: 0265-6411817

Prof. Ángel G. Muñoz S.

C. I. 14.389.513

Email: agmunoz@cmc.org.ve

Tutor

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi carácter de tutor del Trabajo Especial de Grado presentado por el Br. Joaquín Enrique Díaz Lobatón C. I. 16.089.715 para optar al título de Licenciado en Física, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometidos a presentación pública y evaluación final por parte del jurado examinador que se asigne para tal fin.

En la ciudad de Maracaibo al 29no día del mes de febrero de 2011.

Firma: _____

Prof. Ángel G. Muñoz S.

C. I. 14.389.513

DEDICATORIA

A mi familia, tanto la que lleva mi sangre como la que no. Desde los que me procrearon y me criaron hasta los que me adoptaron como hermano e hijo. Es un humilde regalo que les entrego.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco mis padres, no debería porque ellos no esperan mis agradecimientos, ellos esperan que cumpla mis metas, que logre mis sueños. Ese es el agradecimiento máximo para ellos. Aún así, sin ellos, este trabajo habría tenido mil dificultades y mil distracciones.

Agradezco a una persona que me ha tenido paciencia (y la ha perdido) durante este trabajo, que me reclutó alguna vez en algún laboratorio de esta facultad y que me adoptó en su seno familiar. Una mezcla de padre y hermano mayor: Aingeru, Eskerrik asko!

Agradezco a mi pequeña hermana, su presencia me alentó a no cesar.

Muchos nombres vienen a mi cabeza, no puedo escribirlos todos pero sí mencionaré algunos: Raúl, Alfonso, Ricardo, Ramón, Francisco. Gracias por estar allí y por apoyarme siempre.

Índice de figuras

3.1. Sondeo meteorológico en el que se puede apreciar el EPDC (CAPE por sus siglas en inglés) e IC (CINH). Cortesía Unisys Corporation. 30
3.2. Diagrama de flujo del modelo WRF. 35

4.1. Dominio espacial de interés. [1] 39

5.1. Climatología mensual multianual de la EPDC, IC y vientos para el período 1998-2008. 43
5.2. Climatología mensual multianual de la EPDC, IC y vientos para el período 1998-2008. 44
5.3. Climatología mensual multianual de la EPDC, IC y vientos para el período 1998-2008. 45
5.4. Climatología mensual multianual de la EPDC, IC y vientos para el período 1998-2008. 46
5.5. Climatología mensual multianual de la EPDC y vientos para el período 1998-2008. 47
5.6. Climatología mensual multianual de la EPDC y vientos para el período 1998-2008. 48
5.7. Climatología mensual multianual de la IC para el período 1998-2008. Meses de enero y septiembre. 49
5.8. Climatología mensual multianual de la EPDCN para el período 1998-2008. Meses de enero y septiembre. 50

5.9. Serie de tiempo de Flashes y Energía Potencial Disponible Convectiva para el dominio completo. 52
5.10. Serie de tiempo de Flashes y Energía Potencial Disponible Convectiva Normalizada para el dominio completo. 53
5.11. Serie de tiempo de Flashes e Inhibición Convectiva para el dominio completo. 53
5.12. Serie de tiempo de Flashes e Inhibición Convectiva Normalizada para el dominio completo. 54
5.13. Serie de tiempo de Flashes y Temperatura Superficial (T) para el dominio completo. 55
5.14. Serie de tiempo de Flashes y Relación de Mezcla de Humedad (Q) para el dominio completo. 55
5.15. Serie de tiempo de Flashes y Vientos Meridionales para el dominio completo. 56
5.16. Serie de tiempo de Flashes y Vientos Zonales para el dominio completo. . . . 56
5.17. Serie de tiempo de Flashes y Radiación Incidente para el dominio completo. 57
5.18. Serie de tiempo de Flashes y Presión de Superficie para el dominio completo. 58
5.19. Serie de tiempo de Flashes y Energía Potencial Disponible Convectiva para el cuadrante I. 59
5.20. Serie de tiempo de Flashes y Energía Potencial Disponible Convectiva para el cuadrante II. 59
5.21. Serie de tiempo de Flashes y Energía Potencial Disponible Convectiva para el cuadrante III. 60
5.22. Serie de tiempo de Flashes y Energía Potencial Disponible Convectiva para el cuadrante IV. 60
5.23. Serie de tiempo de la Energía Potencial Disponible Convectiva y Vientos de Superficie para el dominio completo. 61
5.24. Serie de tiempo de la Energía Potencial Disponible Convectiva y Temperatura para el dominio completo. 61
5.25. Serie de tiempo de la Energía Potencial Disponible Convectiva y Humedad para el dominio completo. 62

5.26. Ilustración cualitativa de los casos 1 (izquierda), 2 (centro) y 3 (derecha) de flujo de energía potencial para el volumen de control. 70

Índice de cuadros

3.1. Márgenes de los valores típicos de la EPDC en J/kg. 31
3.2. Márgenes de los valores típicos de la IC. 31

5.1. Límites del dominio y de los cuadrantes. 51
5.2. Tabla de correlaciones para el dominio entero. En negrita los valores estadísticamente significativos a un límite de confianza de p=0,01. 63
5.3. Tabla de correlaciones para el primer cuadrante. En negrita los valores estadísticamente significativos a un límite de confianza de p=0,01. 65
5.4. Tabla de correlaciones para el segundo cuadrante. En negrita los valores estadísticamente significativos a un límite de confianza de p=0,01. 65
5.5. Tabla de correlaciones para el tercer cuadrante. En negrita los valores estadísticamente significativos a un límite de confianza de p=0,01. 66
5.6. Tabla de correlaciones para el cuarto cuadrante. En negrita los valores estadísticamente significativos a un límite de confianza de p=0,01. 66
5.7. Tabla de umbrales para la actividad eléctrica media en la cuenca. Densidad de descargas ($FLASHES$) en $Flash/km^2/dia$, temperaturas (T) en °C, mezcla de humedad Q en $kg\,kg^{-1}$ y vientos meridionales en (m/s) 72

RESUMEN

Díaz Lobatón, Joaquín Enrique. **"Energética del Relámpago del Catatumbo"**. Trabajo Especial de Grado. La Universidad del Zulia. Facultad Experimental de Ciencias. Licenciatura en Física. Maracaibo, febrero de 2011.

La Energía Potencial Disponible Convectiva (EPDC) es uno de los principales indicadores para la formación y desarrollo de celdas tormentosas en un región determinada. Este trabajo se propuso calcular y analizar, a partir de información provista por el modelo atmosférico Weather Research and Forecasting (WRF), el comportamiento de este índice energético y su correlación con la densidad de descargas eléctricas medidas por el detector LIS del satélite de la misión TRMM para el dominio definido por la cuenca del Lago de Maracaibo que es donde se presentan los Relámpagos del Catatumbo. Además, se calcularon los coeficientes de correlación de las descargas con variables de superficie. La evolución media mensual de la EPDC sigue un patrón anual unimodal similar a la de la densidad de descargas con una alta correlación. Lo mismo se concluye de la temperatura y humedad en la superficie. A partir de los datos se obtienen unos valores umbrales para describir la actividad eléctrica media en la cuenca.

Palabras clave: Relámpago del Catatumbo, Modelado atmosférico, Weather Research and Forecasting (WRF), Lightning Imaging Sensor (LIS).

ABSTRACT

Díaz Lobatón, Joaquín Enrique. **"Energetics of Relámpago del Catatumbo"**. Trabajo Especial de Grado. La Universidad del Zulia. Facultad Experimental de Ciencias. Licenciatura en Física. Maracaibo, febrero de 2011.

The Convective Available Potential Energy (CAPE) is one of the most important indicators that describe the formation and development of storm cells in a region. This work was aimed at calculating and analyzing the behavior of this energetic index using output data from the Weather Research and Forecasting Model (WRF) and correlating it with the mean monthly evolution of flash density measured by the Tropical Rainfall Measuring Mission LIS detector over the Maracaibo Lake Basin which is theregion . Additionally, correlations with several surface variables were calculated. The mean monthly evolution of CAPE follows a yearly unimodal pattern which is very similar to the flash density curves and yielding a high correlation between them. The same is concluded for surface temperatures and water vapor mixing ratio. From these data CAPE thresholds are proposed to describe mean electric activity in the region.

Keywords: Relámpago del Catatumbo, Atmospheric modeling, Weather Research and Forecasting (WRF), Lightning Imaging Sensor (LIS).

Índice general

1. Introducción **13**

2. El Problema de la Investigación **16**

2.1. Planteamiento del Problema. 16

2.2. Formulación del Problema. 16

2.3. Objetivos de la Investigación. 17

2.3.1. Objetivos Generales 17

2.3.2. Objetivos Específicos 17

2.4. Justificación. 17

3. Marco Teórico de la Investigación **19**

3.1. Ecuaciones de la Dinámica Atmosférica. 19

3.1.1. Ecuación de Continuidad. 19

3.1.2. Ecuaciones del Movimiento. 20

3.2. Relaciones Termodinámicas. 22

3.2.1. La Primera Ley de la Termodinámica. 22

3.2.2. Ecuación de Estado. 24

3.3. Energética. 25

3.3.1. Formas Básicas de Energía. 25

3.3.2. Flujos de Energía. 26

3.3.3. Disponibilidad de Energía en la Atmósfera. 27

3.4. Correlación de Spearman. 31

3.5. Energía Potencial Disponible Convectiva versus Descargas Eléctricas. 33
3.6. Detección Satelital 33
3.7. CWRF 34
3.8. NCL. 36
3.9. Región de Estudio. 37

4. Marco Metodológico de la Investigación. 38

5. Análisis y Discusión de los Resultados. 41
5.1. Climatología de los índices Energéticos. 42
5.1.1. Energía Potencial Disponible Convectiva. 42
5.1.2. Inhibición Convectiva. 47
5.1.3. Índices Normalizados. 48
5.2. Evolución temporal de las variables. 49
5.2.1. Flashes versus variables. 51
5.2.2. EPDC versus variables. 61
5.3. Correlaciones. 62
5.4. Descripción de los Flujos de Energía. 67
5.5. Tabla de Umbrales. 72

6. Conclusiones. 73

7. Recomendaciones. 76

A. Códigos NCL y Fortran. 77

Bibliografía 97

Capítulo 1

Introducción

Los Relámpagos del Catatumbo son un fenómeno electro-atmosférico de carácter tormentoso que se presenta durante la mayor parte del año en toda la zona sur y, en especial, en la costa sudoeste del Lago de Maracaibo, al occidente de Venezuela. Este singular meteoro siempre ha suscitado gran interés en los pobladores de la región debido a que, entre otras razones, presenta una elevada frecuencia de formación de celdas tormentosas con intensa actividad eléctrica en esta región [1].

Recientemente se ha observado una acelerada actividad en el estudio de este fenómeno. Gracias a estas investigaciones [1, 2, 3] se han podido entender muchos detalles del comportamiento físico-meteorológico del mismo y se han logrado obtener datos interesantes sobre los eventos eléctricos que éste presenta. A pesar de la actividad de investigación manifestada en estos trabajos, se hace necesario un estudio energético del fenómeno tormentoso basado en las ecuaciones del movimiento de los fluidos y de la termodinámica para comprender cuáles son los principales factores que propician y moldean la conducta de estos eventos.

La comprensión de las energías implicadas en los procesos tormentosos fue objeto de búsqueda por Margules [4, 5] al tratar de descifrar de dónde provenía la energía cinética que se observa en las tormentas atmosféricas sin tomar en cuenta los intercambios caloríficos con su entorno. En su trabajo logró desarrollar el concepto de Energía Potencial Disponible (EPD) para un sistema cerrado. Esto no es más que la energía sobrante que resultaría de una redistribución adiabática de masas que se utilizaría como energía cinética dentro de la tormenta. Además, sabiendo que la estimación del cociente entre la energía cinética y la

energía potencial de la atmósfera, para una rapidez de viento de 15 m/s y velocidad del sonido igual a 300 m/s, es del orden de 10^{-3}, se puede ver que la energía cinética es una pequeña fracción de la energía total en la atmósfera por lo que es más representativo considerar la EPD [6]. De este concepto se obtiene una definición más limitada espacialmente y más preponderante en la formación de núcleos tormentosos llamado Energía Potencial Disponible Convectiva (EPDC), que toma en cuenta los perfiles de temperatura potencial de la atmósfera y provee a la meteorología de un medio relativamente eficaz para obtener previsiones acerca la generación de tormentas en regiones micro-escalares.

El número de eventos luminosos (flashes) provenientes de las descargas eléctricas sobre un área determinanda es un indicador que da una visión satisfactoria acerca de la intensidad del fenómeno en el tiempo (y que es precisamente esta frecuencia lo que le da la peculiaridad al fenómeno en cuestión). Básicamente, lo más interesante de este meteoro es precisamente la sostenibilidad de las descargas eléctricas y, por consiguiente, la cantidad de las mismas en períodos determinados. Es por esto que se quiere utilizar esta variabilidad en los flashes como un medidor de la actividad del fenómeno [1]. Emerge pues la pregunta básica, ¿cuáles son los factores que afectan en mayor o menor medida este comportamiento? Una gran cantidad de datos está disponible a partir de instrumentos y modelos numéricos de predicción e investigación meteorológica.

Aunque existen muchas variables que pueden tomarse en cuenta para llevar a cabo la búsqueda de estos factores, sólo unas pocas podrían tener la virtud de adecuarse a las ecuaciones energéticas y, por ende, se ajustarían muy bien como factores preponderantes que pudieran influenciar esta variabilidad en el número de destellos. Sin embargo, este trabajo pudiera ser tedioso en extremo debido a la ingente cantidad de combinaciones de variables y de sus respectivos valores por lo que sería más ventajoso estudiar físicamente los efectos que tienen las fluctuaciones de la EPDC. Para comprender la influencia que ésta tiene en el comportamiento del fenómeno, se hace uso de la data satelital de las series temporales de destellos y del downscaling de los reanálisis meteorológicos obtenidos numéricamente para el dominio de la región en cuestión. En este caso se utilizará la data del Weather Research and Forecasting Model (WRF) generada por el Observatorio Lationamericano que está disponible

en el Data Library del International Research Institute for Climate and Society (IRI) [7].

En este trabajo se plantea estudiar correlativamente los factores energéticos más trascendentales que afectan a Los Relámpagos del Catatumbo basado en la fenomenología descrita en [1, 3], mediante las fluctuaciones de la EPDC.

Capítulo 2

El Problema de la Investigación

2.1. Planteamiento del Problema.

Los Relámpagos del Catatumbo son un meteoro local muy llamativo como consecuencia de la sostenibilidad de las descargas eléctricas visibles en la cuenca del Lago de Maracaibo. Si bien es cierto se han llevado a cabo algunas investigaciones para explicar el fenómeno en términos de agentes locales [3] y regionales [1], así como una caracterización de su variabilidad espacio-temporal [1], hasta la fecha no se ha estudiado el Relámpago del Catatumbo en términos de las energías implicadas. Un estudio de este tipo es importante en aras de entender a cabalidad desde el punto de vista físico la fenomenología, la interrelación entre los distintos agentes y tratar de reconocer posibles gatillos predictores de los eventos eléctricos.

2.2. Formulación del Problema.

¿Cómo se relaciona la energética del Relámpago del Catatumbo con su comportamiento?

2.3. Objetivos de la Investigación.

2.3.1. Objetivos Generales

El objetivo general del presente Trabajo Especial de Grado consiste en analizar la energética del fenómeno electroatmosférico conocido como El Relámpago del Catatumbo.

2.3.2. Objetivos Específicos

- Describir las expresiones correspondientes a los flujos de energía cinética y potencial en términos de observables físicos.
- Calcular, empleando un modelo de downscaling dinámico de alta resolución, el valor medio de las variables (los observables del punto anterior) necesarias para el período 1998-2008.
- Describir la evolución espacio-temporal de las distintas componentes/índices energéticos.
- Describir el papel de las distintas componentes energéticas en la fenomenología observable de El Relámpago del Catatumbo.

2.4. Justificación.

La aparición de células tormentosas en regiones tropicales es una situción tan recurrente como interesante debido a lo complicado del comportamiento termodinámico de la atmósfera en estas latitudes. Venezuela, como país tropical tiene una amplia presencia de estas estructuras inestables a lo largo del año. De todas ellas reluce, literalmente, un fenómeno tormentoso al occidente del país llamado Los Relámpagos del Catatumbo que no ha sido comprendido a cabalidad a nivel de la física implicada en su aparicición y ciclo de vida. El tratar de resolver esta interrogante trae diversas consecuencias importantes entre las que podemos destacar: la provisión de un método computacional para el estudio de cúmulos tormentosos en esta y en otras regiones tropicales, obtener un método correlacional para ver el comportamiento

eléctrico de las distintas inestabilidades atmosféricas a en regiones meso y microescalares además de facultar un medio de predicción de formación de estos cúmulos.

Capítulo 3

Marco Teórico de la Investigación

3.1. Ecuaciones de la Dinámica Atmosférica.

La atmósfera es referenciada como uno de los subsistemas del planeta Tierra y aunque esté íntimamente relacionada con los demás subsistemas (litósfera, hidrósfera, etc.) la trataremos en esta sección como un ente separado para entender mejor su dinámica [6]. Las ecuaciones que gobiernan la atmósfera no son más que las que expresan los principios de conservación de la masa, momentum (segunda ley de Newton) y energía. Consideraremos adicionalmente aquí el fluido como un sistema termo-hidrodinámico y continuo. El sistema de coordenadas es el cartesiano con el eje de las x paralelo al círculo de latitud y el de las y paralelo al círculo de longitud, z expresando la dirección vertical y t el tiempo.

3.1.1. Ecuación de Continuidad.

El principio de conservación de masa para un elemento de masa dado $\delta m = \rho \delta V$ está expresado por $\frac{d(\rho \delta V)}{dt} = 0$, lo que nos lleva a la ecuación de continuidad. Si expandimos esta derivada obtenemos:

$$-\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{\delta V}\frac{d}{dt}\delta V, \tag{3.1}$$

donde el lado derecho representa la tasa relativa de expansión del elemento de volumen. Esta expansión es justamente la divergencia tridimensional del vector velocidad de viento:

$$-\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dt} = \nabla.\mathbf{V}, \tag{3.2}$$

donde $\mathbf{V}$ es el vector tridimensional de velocidad del viento con componentes zonal u (positivo hacia el este), meridional v(hacia el norte), vertical w (hacia arriba), y ρ es la densidad.

La derivada temporal mostrada es una derivada material o substancial, que expresa la tasa de cambio vista por un observador que se mueve con el flujo. Ya que la densidad depende tanto de tiempo como del espacio podemos escribir:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial\rho}{\partial t} + u\frac{\partial\rho}{\partial x} + v\frac{\partial\rho}{\partial y} + w\frac{\partial\rho}{\partial z} = \frac{\partial\rho}{\partial t} + \mathbf{V}.\nabla\rho, \tag{3.3}$$

donde $\frac{\partial\rho}{\partial t}$ es la derivada temporal local euleriana, y $\mathbf{V}.\nabla\rho$ es la advección de masa. Por ende podemos escribir la ecuación de continuidad en su forma local como:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} = -\nabla.\rho\mathbf{V}, \tag{3.4}$$

donde $\nabla.\rho\mathbf{V} = \rho\nabla.\mathbf{V} + \mathbf{V}.\nabla\rho$

Hidrostáticamente la atmósfera se considera a macroescala en equilibrio. Sin embargo, a escalas pequeñas en donde la convección domina, no podemos asumir dicho equilibrio hidrostático.

3.1.2. Ecuaciones del Movimiento.

Las ecuaciones del movimiento son una expresión de la ley de conservación del momentum (segunda ley de Newton) Esto nos dice que, en un marco de referencia no acelerado, una masa en un volumen dado puede ganar momentum de tres maneras. La primera es a través de fuerzas provenientes de un campo que actúen en el cuerpo (como la gravedad), la segunda a través de fuerzas que actúen directamente sobre las fronteras del cuerpo (como las fuerzas de presión) y por último mediante el intercambio de masa que tengan distintos momenta a través de las fronteras del volumen. La fuerza por unidad de masa debida al campo gravitacional puede expresarse como el gradiente del potencial gravitacional terrestre $-\nabla\phi_T$. La fuerza

debida a cambios de presión es $-\nabla p$ tal que la fuerza neta por unidad de masa viene dada por $-\frac{1}{\rho}\nabla p$. Se puede escribir la ecuación del movimiento por unidad de masa como:

$$\frac{d\mathbf{V}_a}{dt} = -\frac{\nabla p}{\rho} - \nabla\phi_T + \mathbf{F}, \tag{3.5}$$

donde $\mathbf{V}$ es el vector velocidad tridimensional medido en un sistema de referencia irrotacional y $\mathbf{F}$ es la fuerza de fricción. A veces es conveniente expresar las fuerzas de fricción como esfuerzos de corte que actúan en las fronteras del volumen en cuestión. Estos esfuerzos son importantes [15] donde la atmósfera y los océanos hacen contacto con la litósfera o entre ellos.

Para el caso en que el sistema rota con la Tierra con una velocidad angular $\mathbf{\Omega}$, las ecuaciones deben modificarse. Permítase que el subíndice a haga referencia a las cantidades medidas con respecto al sistema de referencia absoluto y el subíndice r a aquellas medidas con respecto al sistema de referencia rotacional. Con esto en mente, un punto con una posición fija en el sistema rotacional $\mathbf{r}_r$ tendrá una velocidad $\mathbf{\Omega} \times \mathbf{r}_r$. Cuando el punto se mueve con respecto al sistema rotacional su velocidad con respecto al sistema absoluto será:

$$\frac{d\mathbf{r}_a}{dt} = \frac{d\mathbf{r}_r}{dt} + \mathbf{\Omega} \times \mathbf{r}_r, \tag{3.6}$$

y la aceleración será:

$$\frac{d\mathbf{V}_a}{dt} = \frac{d\mathbf{V}}{dt} + 2\mathbf{\Omega} \times \mathbf{V} + \mathbf{\Omega} \times (\mathbf{\Omega} \times \mathbf{r}_r), \tag{3.7}$$

Esta ecuación lo que nos dice es que la aceleración en el sistema de referencia inercial $\frac{d\mathbf{V}_a}{dt}$ viene dada por la suma de la aceleracióndel sistema rotacional $\frac{d\mathbf{V}}{dt}$, la aceleración de Coriolis $2\mathbf{\Omega} \times \mathbf{V}$ y la aceleración centrípeta $\mathbf{\Omega} \times (\mathbf{\Omega} \times \mathbf{r}_r)$ Este último término se puede escribir como:

$$\mathbf{\Omega} \times (\mathbf{\Omega} \times \mathbf{r}_r) = -\mathbf{\Omega}^2\mathbf{r} \tag{3.8}$$

donde $\mathbf{r}$ es el radiovector del círculo de la latitud ($\mid \mathbf{r} \mid = R\cos\theta$, R es el radio terrestre). Esto puede reescribirse de la siguiente manera:

$$\mathbf{\Omega}^2\mathbf{r} = \nabla\frac{1}{2}(\mathbf{\Omega} \times \mathbf{r})^2 \tag{3.9}$$

Podemos obtener finalmente:

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} + 2\mathbf{\Omega} \times \mathbf{V} = -\frac{\nabla p}{\rho} - \nabla\phi + \mathbf{F}, \tag{3.10}$$

donde hemos redefinido a ϕ como el geopotencial

$$\phi = \phi_T - \frac{1}{2}\mathbf{\Omega}^2 R^2 \cos^2\theta \tag{3.11}$$

Por último, haciendo $\mathbf{g} = -\nabla\phi$ encontramos que

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = -2\mathbf{\Omega}\times\mathbf{V} - \frac{\nabla p}{\rho} - \mathbf{g} + \mathbf{F}, \tag{3.12}$$

Para cada una de las componentes escribimos entonces [8]

$$\frac{du}{dt} = \frac{\tan\theta}{R}uv - \frac{uv}{R} - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + 2\mathbf{\Omega}v\,\mathrm{sen}\,\theta - 2\mathbf{\Omega}w\cos\theta + F_x, \tag{3.13a}$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{\tan\theta}{R}u^2 - \frac{uv}{R} - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} + 2\mathbf{\Omega}u\,\mathrm{sen}\,\theta + F_y, \tag{3.13b}$$

$$\frac{dw}{dt} = \frac{u^2+v^2}{R} - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} + 2\mathbf{\Omega}u\cos\theta - g + F_z \tag{3.13c}$$

Los dos primeros términos del lado derecho de las ecuaciones (3.13a) y (3.13b) son de la forma $\frac{\Gamma_i}{R}$ y se les llama términos de curvatura. Estos términos muestran la influencia de la geometría terrestre en el movimiento de la atmósfera. Es importante añadir que estos términos al ser multiplicados por las correspondientes velocidades no generan energía cinética ya que $u\frac{\Gamma_1}{R} + v\frac{\Gamma_2}{R} + w\frac{\Gamma_3}{R} = 0$.

3.2. Relaciones Termodinámicas.

3.2.1. La Primera Ley de la Termodinámica.

Otra de las ecuaciones importantes que se necesitan tomar en cuenta es la de la conservación de la energía y ésta se puede expresar por la primera ley de la termodinámica. Asumiendo que el aire se comporta como un gas ideal ($\frac{p}{\rho} = R_d T$, donde R_d es la constante de los gases para el aire seco) esta ley se puede escribir como:

$$c_p\frac{dT}{dt} = Q + \frac{1}{\rho}\frac{dp}{dt}, \tag{3.14}$$

donde c_p es el calor específico del aire a presión constante, Q es la tasa intercambio de calor por unidad de masa. Este último incluye varios efectos diabáticos, i. e., calentamiento

por radiación (solar e infrarroja), calor latente, calentamiento por fricción y calentamiento condutivo y turbulento cerca de la superficie terrestre. Podemos escribir (3.14) de la forma siguiente

$$c_p \frac{d(\mathbf{ln}\ T)}{dt} - R_d \frac{d(\mathbf{ln}\ p)}{dt} = \frac{Q}{T} \tag{3.15}$$

Un proceso adiabático es uno que se define por la inexistencia de intercambio de calor entre el sistema y el entorno, en este caso tenemos:

$$c_p \frac{d(\mathbf{ln}\ T)}{dt} = R_d \frac{d(\mathbf{ln}\ p)}{dt} \tag{3.16}$$

La integración de esta última ecuación desde un estado inicial (p_0, T_0) hasta uno final (p, T) nos provee la ecuación de Poisson:

$$\frac{T}{T_0} = \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\kappa}, \tag{3.17}$$

donde $\kappa = \frac{R_d}{p_p}$. Ahora introduciremos el concepto de temperatura potencial θ. Ésta es la temperatura que alcanzaría un parcela de aire en un proceso adiabático reversible si la parcela fuese desplazada a un nivel de referencia $p_{00}(1000mb)$:

$$\theta = T\left(\frac{p_{00}}{p}\right)^{\kappa}, \tag{3.18}$$

Esta parcela la podemos definir como un elemento material infinitesimal lo suficientemente pequeño como para considerarlo matemáticamente infinitésimo y lo suficientemente grande como para contener un número amplio de moléculas de aire y materiales disueltos para que sea representativo del ambiente.

Estabilidad Estática.

La relación entre la tasa de cambio de la temperatura (i. e., la tasa de decremento de la temperatura con respecto a la altura) y la tasa de cambio de la temperatura potencial con la altura y es [8]:

$$\frac{T}{\theta}\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{g}{c_p}. \tag{3.19}$$

Para una atmósfera en la que la temperatura potencial es constante con respecto a la altura, la tasa de la temperatura es entonces

$$-\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{g}{c_p} \equiv \Gamma_d. \tag{3.20}$$

Si la temperatura potencial es función de la altura, la tasa de cambio de temperatura atmosférica, $\Gamma \equiv -\frac{\partial T}{\partial z}$ diferirá de la tasa adiabática y

$$\frac{T}{\theta}\frac{\partial \theta}{\partial z} = \Gamma_d - \Gamma. \tag{3.21}$$

Si $\Gamma < \Gamma_d$ tal que θ se incremente con la altura, una parcela de aire que sufra un desplazamiento adiabático de su nivel de equilibrio será positivamente flotante cuando se desplace hacia abajo y negativamente flotante cuando se desplace hacia arriba por lo que tenderá a ir a su nivel de equilibrio y la atmósfera será estáticamente estable o establemente estratificada. Las condiciones serán

$$\Gamma < \Gamma_d;\ \text{estáticamente estable}, \tag{3.22a}$$

$$\Gamma = \Gamma_d;\ \text{estáticamente neutra}, \tag{3.22b}$$

$$\Gamma > \Gamma_d;\ \text{estáticamente inestable}. \tag{3.22c}$$

Equivalentemente:

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} > 0;\ \text{estáticamente estable}. \tag{3.23a}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = 0;\ \text{estáticamente neutra}. \tag{3.23b}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} < 0;\ \text{estáticamente inestable}. \tag{3.23c}$$

3.2.2. Ecuación de Estado.

La ecuación de estado para el aire húmedo es

$$p = \rho R_d T(1 + 0,61q), \tag{3.24}$$

donde q representa los gramos de vapor de agua por kilogramo de aire húmedo (humedad específica).

3.3. Energética.

3.3.1. Formas Básicas de Energía.

Las formas principales intrínsecas de energía en la atmófera son la energía interna I, la energía potencial gravitacional Φ, la energía cinética y la energía latente $\mathcal{L}_H$ asociada con las transiciones de fase del agua. Sus expresiones correspondientes son [6]:

$$I = c_v T, \tag{3.25a}$$

$$\Phi = gz, \tag{3.25b}$$

$$K = \frac{1}{2}\mathbf{V}.\mathbf{V} = \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2), \tag{3.25c}$$

$$\mathcal{L}_H = Lq. \tag{3.25d}$$

L es el calor latente asociado y depende de la transición de fase de la que se trate. La energía total será:

$$E = I + \Phi + K + \mathcal{L}_H. \tag{3.26}$$

La forma más relevante de energía externa es la radiación solar (entre otras están la geotérmica, la eléctrica y la nuclear). El efecto directo de la radiación solar es el de calentar la atmósfera y las superficies subyacentes (suelos y océanos) mediante la absorción de la radiación incidente de onda corta. En un sistema hidrostático, la energía interna de una columna de área unitaria de la atmósfera que se extiende desde la superficie terrestre hasta el tope de la atmósfera viene dada por

$$\int_0^\infty \rho I \; dz = \int_0^\infty \rho c_v T \; dz = \int_0^{p_0} c_v T \frac{dp}{g}, \tag{3.27}$$

y la energía potencial es

$$\int_0^\infty \rho \Phi \; dz = \int_0^\infty \rho g z \; dz = \int_0^{p_0} z \; dp = \int_0^\infty \rho R_d T \; dz \tag{3.28}$$

De aquí podemos ver que la energía interna y la potencial no son independientes por lo que es conveniente considerarlas juntas como una forma de energía, la llamada energía potencial total:

$$\int_0^\infty \rho (I + \Phi) \; dz = \int_0^\infty p c_p T \; dz = \int_0^{p_0} c_p T \frac{dp}{g}, \tag{3.29}$$

donde $c_p = R_d + c_v$. En términos de la temperatura potencial nos queda:

$$\int_0^\infty \rho(I+\Phi)\ dz = \frac{c_p}{g(1+\kappa)p_0^\kappa}\int_0^\infty \theta\ dp^{\kappa+1} \tag{3.30}$$

o

$$\int_0^\infty \rho(I+\Phi)\ dz = \frac{c_p}{g(1+\kappa)p_0^\kappa}\int_0^\infty p^{\kappa+1}\ d\theta. \tag{3.31}$$

3.3.2. Flujos de Energía.

La tasa de cambio de la energía potencial por unidad de masa es:

$$\frac{d\Phi}{dt} = gw, \tag{3.32}$$

y la tasa de cambio de la energía interna es, a partir de (3.14) y (3.4),

$$\frac{dI}{dt} = Q - \frac{p}{\rho}\nabla.\mathbf{V} \tag{3.33}$$

El término diabático Q en (3.33) puede escribirse explícitamente en la forma:

$$Q = Q_h + Q_f$$

donde

$$Q_h = -\frac{1}{\rho}\nabla.\mathbf{q}_{rad} - L - \frac{1}{\rho}\nabla J_c \tag{3.34}$$

y

$$Q_f = -\frac{1}{\rho}\tau : \nabla\mathbf{V} \tag{3.35}$$

donde ":" indica el producto tensorial y τ es el tensor de esfuerzos. Se ha descompuesto la parte calorífica total en una primera parte Q_h contentiva del calentamiento por radiación, calor latente, y calor por conducción, y una segunda Q_f asociada a la disipación por fricción. La conducción se denota por J_c. El flujo de la energía potencial total nos queda:

$$\frac{d(I+\Phi)}{dt} = gw + Q + \frac{1}{\rho}\mathbf{V}\nabla p - \frac{1}{\rho}\nabla.p\mathbf{V} \tag{3.36}$$

La energía cinética se obtiene de (3.12)

$$\frac{dK}{dt} = -gw + \frac{1}{\rho}p\nabla.\mathbf{V} - \frac{1}{\rho}\nabla.(p\mathbf{V} + \tau.\mathbf{V}) + \frac{1}{\rho}\tau : \nabla\mathbf{V} \tag{3.37}$$

Es importante notar que estas ecuaciones no son independientes una de la otra como lo demuestran sus términos comunes. De hecho, en la ecuación (3.32) se nota que la tasa de cambio de la energía potencial viene del trabajo hecho contra la gravedad gw. Este mismo término aparece con signo opuesto en la Ec. (3.37) lo que sugiere que hay una conversión de energía potencial en cinética y vice versa. Como muestra (3.33), las fuentes y sumideros de energía interna son la tasa de calentamiento Q y la tasa de trabajo efectuada mediante compresión contra el campo de presiones $\frac{p}{\rho}\nabla.\mathbf{V}$ Este último término conjuntamente con la parte del calentamiento Q_f también aparecen en (3.37) pero con signo negativo lo que muestra la conexión entre la energía cinética y la energía interna. El término $\frac{1}{\rho}\nabla.(p\mathbf{V}+\tau.\mathbf{V})$ indica el trabajo sobre las fronteras por fuerzas de presión y fricción. Movimientos de la atmósfera con o contra la fuerza de gradiente de presión a través de isobaras convertirán energía potencial en energía cinética y vice versa, respectivamente. Estos procesos son adiabáticos (reversibles) porque pueden suceder en ambas direcciones, sin embargo, la disipación por fricción es un proceso irreversible.

3.3.3. Disponibilidad de Energía en la Atmósfera.

La atmósfera es una máquina calorífica muy ineficiente para transportar calor desde las bajas latitudes y bajas altitudes hacia los polos y hacia arriba. Esta ineficiencia sugiere que la porción cinética de las energías es muy pequeña. comparada con las demás. Como la atmósfera no es un sistema completamente uniforme (canónico), ésta continuamente evolucionará a través de muchos estados naturales, cada uno con diferente energía potencial. Cuando la atmósfera pasa de un estado a otro hay un cambio de esta energía y esto se traduce en creación o destrucción de energía cinética. Sólo la diferencia de energía potencial está implicada en el proceso y, por ende, está disponible para ser convertida en energía cinética. El concepto de energía potencial disponible puede ser ahora definido respecto a un estado conceptual ideal de la atmósfera con un mínimo de energía potencial. Bajo esta condición, la suma de la energía cinética, interna y potencial es invariante. De todos los estados “muertos” de igual masa escogemos el que tenga la misma entropía y la energía potencial total mínima como el estado de referencia (subíndice r). Este estado se caracteriza por una estratificación horizontal con

estabilidad absoluta tanto en presión, temperatura potencial y altura. La disponibilidad de energía potencial total se define por:

$$\Lambda = \int (\Phi + I)\, dm - \int (\Phi + I)_r\, dm, \tag{3.38}$$

que representa el monto máximo posible de energía potencial total que puede ser convertida en energía cinética. Si la atmósfera se calentase uniformemente su energía potencial total crecería uniformemente pero nada de ella estaría disponible porque la atmósfera se mantendría barotrópica (las líneas isobáricas serían paralelas a las de igual temperatura potencial). Ahora bien, cuando se añade calor diferencialmente a zonas distintas de la atmófera, la energía potencial añadida estará disponible para restaurar el equilibrio. Así es como aparece la circulación en la atmósfera.

Energía Potencial Disponible Convectiva.

Existen diversos índices para obtener un estimado de la inestabilidad de la atmósfera [16]. Sin embargo, el índice EPDC (término acuñado por Moncrieff y Miller [18]) ha ganado popularidad debido a que provee un estimado más realista que considera integralmente toda la altitud de libre convección de la atmósfera y no sólamente niveles específicos de ésta como, por ejemplo, el Lifted Index (LI) [10]. Por definición, el EPDC no es más que un índice verticalmente integrado que mide la energía de flotación de una parcela de aire en la capa de libre convección (CLC) desde el nivel de libre convección (NLC, el nivel en el que la temperatura de la parcela excede la temperatura ambiente y por consiguiente ésta se hace inestable en relación con el entorno) hasta el nivel de equilibrio (NE, el nivel en el que la temperatura ambiente excede la de la parcela por lo que la parcela es estable con respecto al ambiente). La definición formal es [17]:

$$EPDC = g \int_{z_{NLC}}^{z_{NE}} \frac{T_{v_p} - T_{v_a}}{T_{v_a}}\, dz, \tag{3.39}$$

donde T_{v_p} es la temperatura virtual de la parcela (la temperatura a la que se tendría que elevar el aire seco para que tenga la misma densidad del aire húmedo a la misma presión) y T_{v_a} es la temperatura virtual del ambiente, z_{NE} es la altura del nivel de equilibrio, z_{NLC} es la altura del nivel de libre conveción y g es la gravedad. Debe notarse que EPDC no es

una medida de inestabilidad [18], al menos en el mismo sentido que el LI en el que se evalúa un exceso de temperatura entre la parcela y el ambiente. La unidad de el LI es de grados. El EPDC es una medida integrada de la energía de flotación de la parcela con unidades apropiadas de joules por kilogramo. No obstante, ha sido frecuentemente utilizado como un representante de la inestabilidad.

En un diagrama termodinámico (uno en el que el área es proporcional a la energía), tal como un diagrama de sonda meteorológica tipo T-log-P[1], es aparente que el área positiva [i. e., la integral en (3.39) y el área entre el perfil de temperatura ambiente y la de la traza de la tasa adiabática húmeda para la parcela elevada] está limitada por dos parámetros: a) la profundidad del CLC desde el NLC hasta el NE, y b) la magnitud promedio de la flotabilidad caracterizada por el exceso de temperatura virtual ΔT_v entre la parcela elevada y el ambiente. Si se ajusta el valor de la EPDC (i. e. el área positiva) e incrementamos (disminuimos) la profundidad de CLC, entonces la magnitud promedio de la flotabilidad debe decrecer (aumentar) a través de toda la CLC. Por ende es apropiado considerar una relación de aspecto del área positiva (i. e., si el EPDC es "alta y fina" o si es "baja y ancha") al interpretar los valores de EPDC.

EPDC Normalizado e Inhibición Convectiva.

Se presenta aquí un método simple [10] para cuantificar esta relación de aspecto del EPDC, o área positiva en un sondeo meteorológico como el presentado en la figura 3.1. El EPDC normalizado (EPDCN) se define como el EPDC total dividido entre la profundidad de la CLC, es decir,

$$EPDCN = \frac{EPDC}{CLC}, \tag{3.40}$$

donde $CLC = z_{NE} - z_{NLC}$. La EPDCN tiene unidades de joules por kilogramo por metro lo que se simplifica a metros por segundo al cuadrado (i. e., aceleración). Debido a que la EPDC ha sido ahora reescalada por su profundidad, representará la flotabilidad promedio, o aceleración, para la profundidad de la CLC. Esta normalización es importante a la hora de evaluar el potencial de crecimiento (aceleración) de nubes convectivas [19, 20, 21]. Alter-

[1]http://weather.unisys.com/upper_air/skew/details.htm.

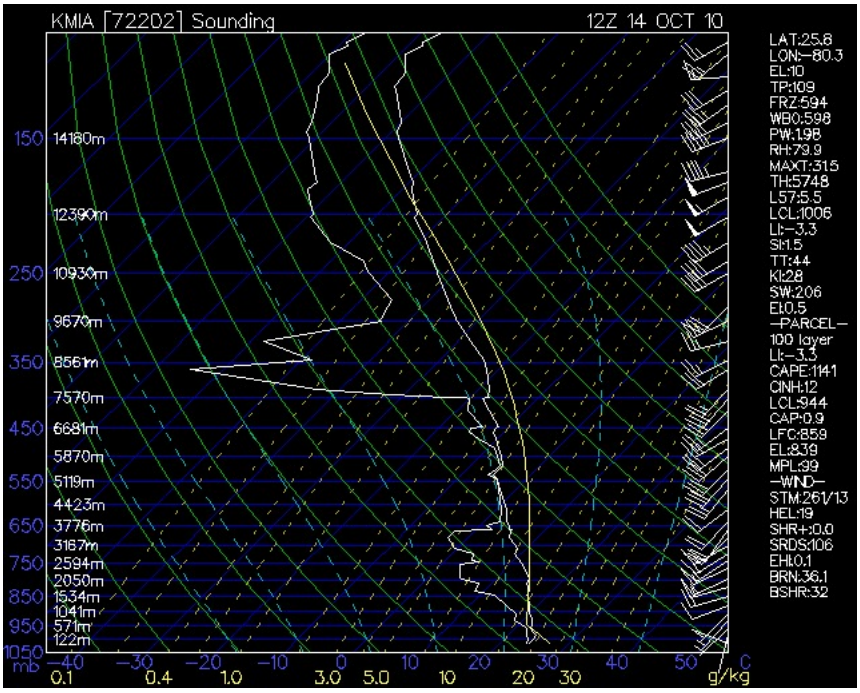


Figura 3.1: Sondeo meteorológico en el que se puede apreciar el EPDC (CAPE por sus siglas en inglés) e IC (CINH). Cortesía Unisys Corporation.

nativamente, el EPDC puede ser normalizado por la profundidad de la CLC en milibares, $CLC = p_{NE} - p_{NLC}$ que nos da las unidades más conocidas para EPDCN (joules por kilogramo por milibar). Sus valores típicos caen en el rango de 1-6 $J.Kg^{-1}.mb$.

La inhibición convectiva (IC) es una medida del "área negativa" en el diagrama del sondeo y la cantidad de trabajo requerido para levantar una parcela de aire a través de una capa que es más cálida que ella y que le permita ascender por encima del NLC. Se computa similarmente al EPDC y se define como:

$$IC = g \int_{z_{NSC}}^{z_{NLC}} \frac{T_{v_p} - T_{v_a}}{T_{v_a}} \, dz, \tag{3.41}$$

donde z_{NSC} es la altura de la superficie. También se puede obtener una normalización del IC (ICN) mediante

$$ICN = \frac{IC}{z_{NLC} - z_{NSC}}, \tag{3.42}$$

Estos indicadores meteorológicos pueden ser usados en cualquier sondeo y predicción numérica ya que existe una relación directa con las velocidades de ascenso o descenso del aire y por

EPDC debajo de 0	Estable.
EPDC = 0 a 1000	Marginalmente estable.
EPDC = 1000 a 2500	Moderadamente inestable.
EPDC = 2500 a 3500	Muy inestable.
EPDC = 3500 a 4000	Extremadamente inestable.

Cuadro 3.1: Márgenes de los valores típicos de la EPDC en J/kg.

IC = 0 a 50	Débil.
EPDC = 51 a 199	Moderada.
EPDC = +200	Fuerte.

Cuadro 3.2: Márgenes de los valores típicos de la IC.

ende con la capacidad de transportar humedad a través de la atmósfera. Esta relación viene dada por [22] $W_{max} = \sqrt{2.EPDC}$, pero debido a la carga de humedad, mezcla de aire, el entrampamiento y al enfriamiento por evaporación las velocidades son aproximadamente la mitad de las provistas por esta relación. La tabla 3.1 muestra los valores de la EPDC para efectos de las estimaciones de inestabilidad[2].

En el caso de la inhibición convectiva, los valores estimativos operacionales[3] para la IC se pueden observar en la tabla 3.2.

3.4. Correlación de Spearman.

Frecuentemente se necesita una medida abreviada de la asociación entre dos variables, llámense x e y. En tales circunstancias los analistas de datos casi automáticamente calculan el coeficiente de correlación. Ususalmente el término coeficiente de correlación se refiere al *coeficiente de producto-momento de Pearson de correlación lineal* entre dos variables x e y.

[2]http://www.crh.noaa.gov/lmk/soo/docu/indices.php
[3]http://www.theweatherprediction.com/habyhints/306/

Una manera de observar la correlación de Pearson es mediante la relación entre la covarianza de la muestra de las dos variables y el producto de las dos desviaciones estándar,

$$r_{xy} = \frac{Cov(x,y)}{s_x s_y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i^{'} y_i^{'}}{[\sum_{i=1}^{n}(x_i^{'})^2]^{1/2}[\sum_{i=1}^{n}(y_i^{'})^2]^{1/2}} \tag{3.43}$$

Donde las primas denotan las anomalías, o sustracción de los valores medios. Varía entre -1 y 1, siendo estos valores indicadores de una perfecta relación entre ambas variables (negativo para anticorrelación.) Sin embargo, la correlación de Pearson ni es robusta ni es resistente. No es robusta porque las relaciones no lineales altamente vinculadas pueden no ser reconocidas y no es resistente porque puede ser extremadamente sensible a uno o varios pares muy lejanos del grupo. Existen alternaitvas robustas y resistentes a la correlación de Pearson. La más usual es la conocida como la "Correlación de rangos de Spearman". La correlación de Spearman es simplemente el coeficiente de correlación de Pearson computado usando los rangos de los datos. Conceptualmente, se aplica la ecuación 3.43, pero a los rangos de los datos en vez de a los datos mismos. Por ejemplo, si tenemos un punto con valores (3,9) en una lista de 10 puntos y vemos que el 3 es el valor más pequeño de todos entonces su rango será 1. Si 9 es el séptimo valor más grande entonces su rango será 7. En la práctica no es necesario usar la ecuación 3.43 ya que como los valores son los rangos, ya se sabe de antemanno que serán los enteros desde 1 hasta el tamaño de la muestra n. Por ende, al generalizar, el promedio vendrá dado como $(n+1)/2$ y la varianza como $n(n^2-1)/[12(n-1)]$. Con esto, el cómputo de la correlación de Spearman se simplifica a [23]:

$$r_{rango} = \frac{6\sum_{i=1}^{n} D_i^2}{n(n^2-1)}, \tag{3.44}$$

siendo D_i la diferencia de rango entre el i-ésimo par de datos. En el caso de empates, donde un valor particular aparece más de una vez, a todos estos valores iguales se les asigna su rango promedio antes de computar los D_i. En esta investigación se usará la correlación de Spearman para ver el grado de asociación de las variables a estudiar.

3.5. Energía Potencial Disponible Convectiva versus Descargas Eléctricas.

Se ha sugerido consistentemente una relación entre la actividad eléctrica de las tormentas y parámetros ambientales medibles ya sea numéricamente [25] o semi-empíricamente [26] [22]. El tratar de predecir el estado eléctrico de una tormenta puede parecer a priori, una tarea muy compleja debido a la gran variabilidad potencial de la atmósfera. Sin embargo, en [25], se sugiere que la EPDC es una buena variable predictora para descargas eléctricas para una serie de celdas tormentosas de la región del estado de Nuevo México en Estados Unidos. En ese trabajo también se sugiere que esas conclusiones podrían ser aplicables a otras celdas convectivas en general. Otro trabajo interesante que muestra una imporante correlación entre el EPDC y la actividad eléctrica es [27], sobre todo con la radiancia (medida de la energía de la descarga eléctrica o la corriente de la descarga) de los flashes.

3.6. Detección Satelital

En este estudio, los datos referenciales a utilizar son los obtenidos por el LIS (Lightning Imaging Sensor) del satélite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) de la NASA [1]. Este sensor de descargas consiste en un telescopio que está optimizado para localizar y detectar las descargas con una resolución en escalas proporcionales a las de una tormenta (4-7 km) sobre una amplia región (cerca de 600 x 600 km) de la superficie terrestre. El satélite TRMM viaja a una distancia de 7 km.s^{-1} mientras orbita la Tierra permitiendo al LIS observar un mismo punto por 90 segundos. A pesar de la breve duración de una observación, es lo suficientemente larga para estimar la tasa de flashes de la mayoría de las tormentas. El instrumento registra el momento de ocurrencia del evento, la energía radiante y determina la localización de los eventos dentro de su campo de visión. Este sensor de descargas calibrado usa un lente de óptica expandida con un amplio campo de visión y un filtro de banda delgada en conjunción con un detector CCD (Charge-Coupled Device). Un procesador de eventos en tiempo real (RTEP por sus siglas en inglés), dentro de la unidad de electrónica, se usa

para determinar cuándo ocurre un flash, incluso en presencia de nubes muy iluminadas por el sol. Las señales débiles que ocurren durante el día son difíciles de detectar debido a la iluminación de fondo. El RTEP remueve esta señal de fondo permitiendo al sistema detectar estas descargas débiles y alcanzar un 90 % de eficiencia en la detección. La data del LIS se usa para estudiar fenómenos mesoescalares tales como tormentas convectivas (nuestro caso), dinámica y microfísica [28]. LIS considera las descargas intranube (IN) y nube-tierra (NT) (aunque en nuestro caso, diversas observaciones en tierra del Relápago del Catatumbo muestran que la mayoría de las descargas son del tipo IN [2]). Se pueden encontrar tres conjuntos de datos, todos provistos por el Global Hydrology Resource Center (GHRC) [31]. El primero es el LIS/OTD High Resolution Full Climatology (HRFC) de 0.5 grados y el segundo es el LIS/OTD Low Resolution Time Series (LRTS) de 2.5 grados. Ambos conjuntos de datos son mallados y para este estudio el período escogido para el LRTS es 1998-2005. El tercer conjunto de datos no está mallado y corresponde al LIS Granule Science Dataset [31]. El presente estudio usó el período 1998-2006 para el segundo conjunto de datos.

3.7. CWRF

El Weather Research and Forecasting Model (WRF, y CWRF para la variante climatológica) es un sistema numérico de modelado meteorológico y climatológico de meso escala de última generación diseñado para proveer un método de pronóstico operacional así como también una herramienta de investigación de la atmósfera planetaria. Este modelo se encuentra en el dominio público y está disponible para uso de la comunidad. Está soportado para ser usado en las plataformas disponibles de cómputo paralelo. El WRF se ajusta a un amplio abanico de aplicaciones a escalas de dominios de fluctúan desde metros hasta miles de kilómetros que incluyen:

- Simulaciones Idealizadas (e. g. convección, ondas baroclínicas, simulación de vórtices grandes)
- Investigación sobre parametrizaciones.
- Investigación sobre asimilación de datos.

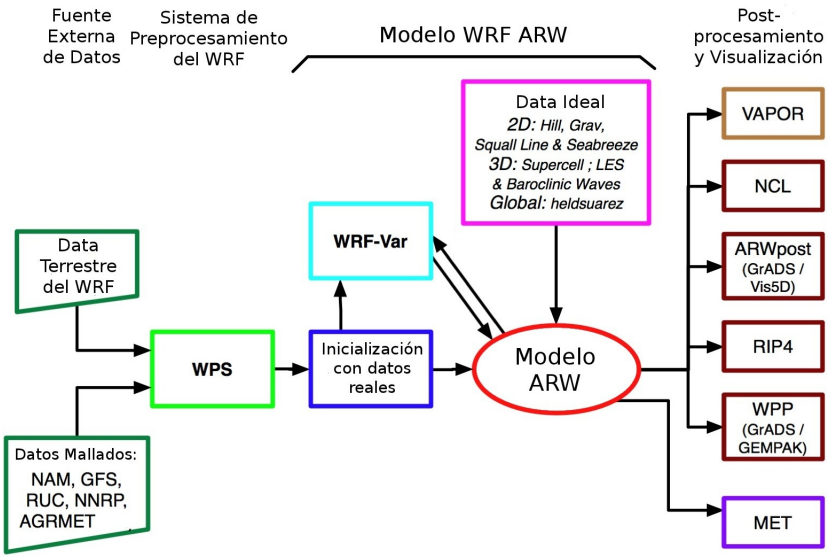


Figura 3.2: Diagrama de flujo del modelo WRF.

- Investigación de pronósticos.
- Predicción numérica meteorológica y climatológica en tiempo real.
- Aplicaciones de acoplamiento de modelos.
- Enseñanza.

El conjunto de ecuaciones del modelo es compresible, euleriana y no-hidrostática. Es conservativa para variables escalares. El modelo usa una coordenada vertical de presión hidrostática y con seguimiento del terreno siendo el tope del modelo una superficie de presión constante. El mallado horizontal es del tipo Arakawa-C. Para los tiempos de integración en el modelo el esquema es del tipo Runge-Kutta de tercer orden y la discretización espacial emplea esquemas de segundo hasta sexto orden. Admite aplicaciones tanto idealizadas como reales con variadas opciones para condiciones de frontera. El modelo admite, además, opciones de anidamiento tanto de una sola dirección como de retroalimentación. Corre en máquinas de uno o más procesadores con memorias distribuidas y/o compartidas. La figura 3.2 muestra el diagrama del funcionamiento del WRF.

Este diagrama ilustra los programas que componen el Sistema de Modelado WRF. El modelo WRF puede correrse ya sea con data idealizada de inicialización así como también con data real. El propósito de los programas ideal.F (rosado) y real_em.F (azul) es la de generar data de entrada y (si es necesario) archivos de frontera para el WRF. Esto involucra un ajuste del balance hidrostático en adición al arreglo de los campos 2D y 3D de las variables del WRF. La función del Sistema de Pre-procesamiento del WRF (WPS) es la de definir y generar la información de mallado, de mapas, de elevación y de topografía para el WRF, tomar análisis/pronósticos de data real de otro modelo, e interpolar la data a la malla del WRF. Los campos dependientes del tiempo (análisis) consisten en vientos 3D, temperatura potencial, vapor de agua y un número de campos 2D. El WRF-Var puede usarse para asimilar observaciones como condiciones iniciales del modelo. La salida estándar del WPS, real y el modelo WRF es en formato netCDF y puede visualizarse mediante una o más herramientas gráficas: NCAR Graphics NCL, GrADS o RIP4.

3.8. NCL.

Para trabajar con la data disponible es preciso tener un mecanismo de visualización y análisis que muestre la distribución de cualquier variable que se desee sobre el dominio escogido para la investigación. Para este fin, hemos elegido utilizar el NCL (NCAR Command Language). El NCL es un lenguaje interpretado específicamente diseñado para el análisis de datos científicos y su visualización. Tiene la ventaja de ser muy portátil, robusto y, sobre todo, de libre acceso y obtención. Es capaz de trabajar con diversos formatos de datos tales como netCDF 3/4, GRIB 1/2, HDF-SDS, HDF4-EOS, binarios, ascii, entre otros. Otra de sus grandes ventajas es que posee una numerosa documentación y una amplia disponibilidad de ejemplos[4]. Es capaz de crear con gran calidad y facilidad gráficos que pueden ser modificados de manera sencilla. El NCL es capaz de leer el formato de los datos de salida del modelo CWRF y es más versátil que, por ejemplo, el lenguaje GrADS. Tiene una enorme cantidad de funciones para procesar estos datos y obtener prácticamente lo que se desee de ellos. En conclusión, el NCL es un lenguaje excelente y expedito para la visualización y operación de

[4]http://www.ncl.ncar.edu

datos y esta investigación se apoya en él para esta labor. El apéndice A muestra diversas muestras de scripts creados en esta investigación.

3.9. Región de Estudio.

La región de interés se encuentra entre las latitudes $7\,^{\circ}$ - $14\,^{\circ}$ y los meridianos $-74\,^{\circ}$ - $-59\,^{\circ}$. Está dominada por dos fenómenos geográficos importantes. El primero es la Cordillera de los Andes el cual está dividido, en Venezuela, en dos vertientes bien definidas: la Cordillera de Perijá (extendiéndose a lo largo de la frontera colombo-venezolana) y los Andes Venezolanos (que se extienden hacia el nordeste hasta desaparecer en frente al Mar Caribe.) Con altitudes medias entre 1500 m y 3700, ambos brazos rodean casi completamente el segundo fenómeno: el Lago de Maracaibo, el más grande de Sudamérica. En la zona suroeste del mencionado lago tiene su desembocadura el Río Catatumbo, el más importante respecto a la hidrodinámica del lago. La localización de la cuenca del lago está afectada por diversos fenómenos climáticos tanto globales como regionales, e. g., El Niño Southern Oscillation (ENOS), las migraciones de la Zona de Convergencia Intertropical (ITZC), intrusiones de *troughs* troposféricos altos desde el hemisferio norte, perturbaciones sinópticas, los vientos alisios y la variabilidad del Chorro de Bajo Nivel del Caribe (CBNC)[34][35].

Capítulo 4

Marco Metodológico de la Investigación.

El tipo de investigación seguida en este trabajo fue correlacional.
Para llevar a cabo la investigación se usaron datos de salida del modelo WRF del OLE2-CMC[1] llamados en conjunto como OA_NOSA30[2]. De allí se obtuvieron variables meteorológicas del modelo CWRF cuya resolución es de 30 km, del período 1998-2008 para el dominio espacial de la cuenca del Lago de Maracaibo (figura 4.1). Éste se dividió en cuatro cuadrantes. Estos datos se cotejaron con la información observacional (proveniente de la misión TRMM) de eventos luminosos para el mismo dominio espacio-temporal. Con esto se pretendió ver cuáles son los efectos de la modulación de la energética del sistema de la zona de estudio y efectuar un análisis causal y evolutivo del fenómeno.

Esto se realizó en tres fases: la primera fue la de recaudar las salidas numéricas del modelo obtenidas por CMC-OA-INAMHI[3] [7], adicionalmente, la recolección de toda la información del instrumental LIS/OTD de la misión satelital TRMM. La segunda fase fue la del post-procesamiento, es decir, estructurar todos los datos obtenidos para hacerlos analizables, lo

[1]Observatorio Latinoamericano de Eventos Extraordinarios y Centro de Modelado Científico de la Universidad del Zulia

[2]http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.U_Zulia/.CMC/.OA_NOSA30/

[3]Centro de Modelado Científico de la Universidad del Zulia - Observatorio Latinoamericano - Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador

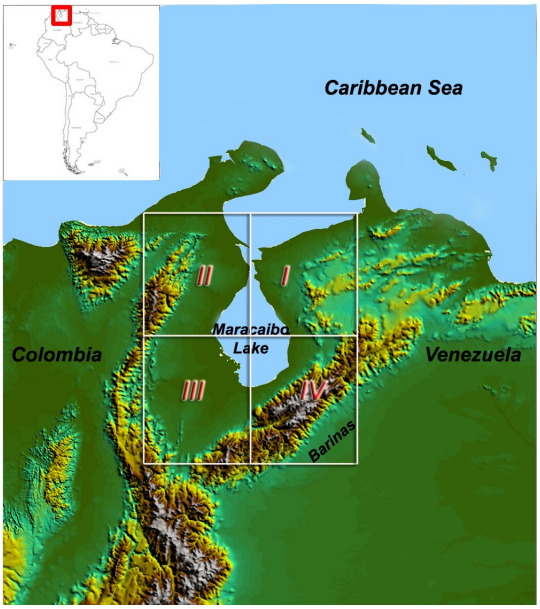


Figura 4.1: Dominio espacial de interés. [1]

que incluye la visualización y arreglo de los parámetros a utilizar. La tercera fase comprendió el análisis de esta información. En esta última fase se dió cumplimiento a los objetivos de la investigación. Es así como:

- Se estudió qué variables atmosféricas podían relacionarse con los términos de las expresiones (3.36) y (3.37) y se describieron los pesos de dichas variables en relación con el fenómeno.

- Se utilizó la data de salida provista por el modelo CWRF y se calcularon los valores medios de las variables observables para todos los meses de la totalidad del período. A partir de esta data se computaron los valores para la EPDC y la IC con las ecuaciones (3.39) y (3.41) así como también los valores normalizados, Ec. (3.40) y (3.42) . Para llevar a cabo esto se ejecutaron scripts expresamente confeccionados para ello con el lenguaje de visualización y análisis NCL.

- Se describió la evolución espacio-temporal de las componentes/índices energéticos medios obtenidos en el ítem anterior mediante gráficos de series de tiempo para cada cuadrante. Esto se hará mediante el lenguaje NCL.

- Se describió la correlación que existe entre estas series de tiempo para establecer patrones de ocurrencia e intensidad del fenómeno. Esto se llevó a cabo a través de scripts en lenguaje NCL. Se analizó esta correlación para establecer patrones de ocurrencia del fenómeno del Relámpago del Catatumbo.

Capítulo 5

Análisis y Discusión de los Resultados.

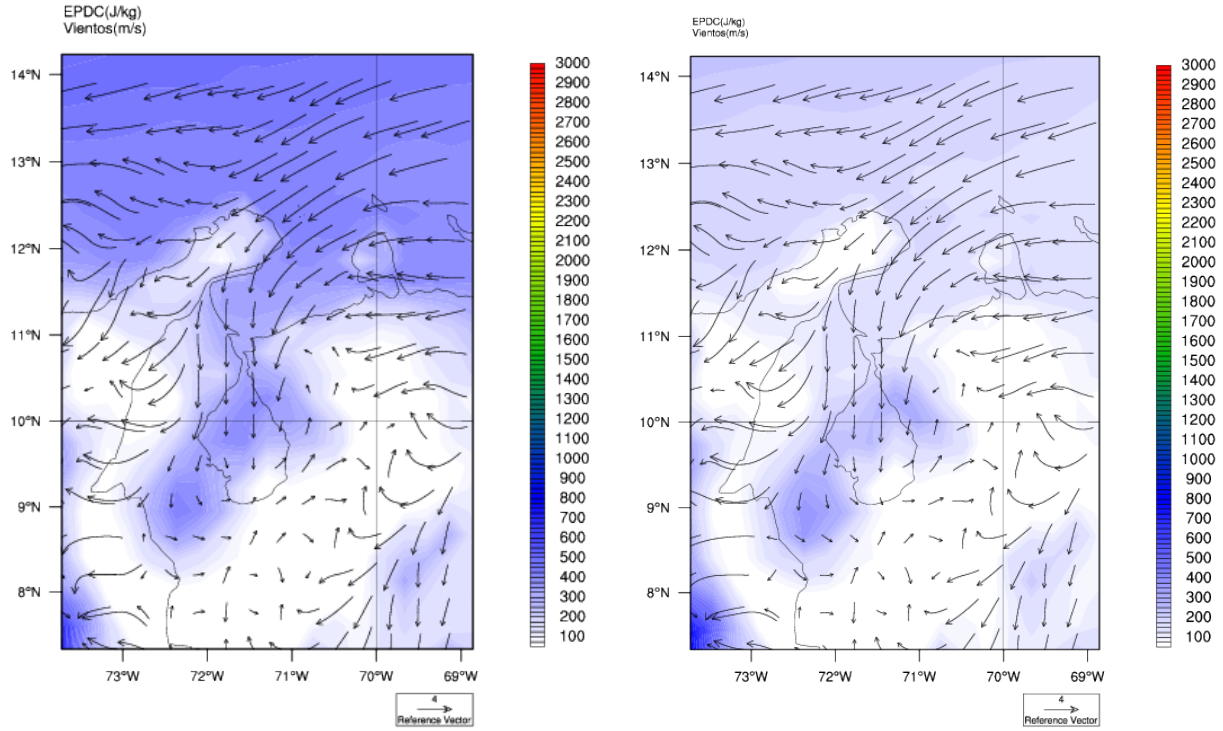
A partir de los datos de salida del modelo WRF se logró disponer de información de las diferentes variables meteorológicas necesarias para nuestra investigación. Estos archivos, denominados en su conjunto como **OA_NOSA30**, fueron tratados con el lenguaje de visualización y procesamiento NCL para obtener los resultados requeridos. A excepción de los cálculos de la EPDC, IC y sus valores normalizados, por motivos prácticos se utilizaron solamente las variables de superficie más usuales, es decir, temperatura, humedad, presión, radiación incidente y velocidad de vientos. Esto es más ventajoso así puesto que estas variables pueden ser medidas en diferentes puntos de la superficie de la cuenca y por ende se podría ampliar a futuro este estudio sin requerir instrumentación adicional para mediciones en altitud. Cabe añadir que se ha podido trabajar con los datos de salida del modelo WRF para el período 1998-2008. Sin embargo, para los datos de las descargas eléctricas LRTS detectadas por el satélite TRMM/LIS sólo se ha podido contar con el período 1998-2005, todo esto en virtud de que los datos faltantes para completar los años 2006, 2007 y 2008 no han salido del proceso de control de calidad practicado por la National Aeronautics and Space Administration (NASA)[50]. Sin embargo, este período es suficiente para completar consistentemente los objetivos pautados.

5.1. Climatología de los índices Energéticos.

Para poder visualizar cómo está distribuida la energía potencial disponible para convección, la inhibición convectiva y sus índices normalizados se llevó a cabo un cálculo de la climatología mensual multianual para el período de 1998-2008. Esto se realizó a través de la confección y ejecución de un código o script en NCL. Los datos de salida de OA_NOSA30 están escritos cada 6 horas por lo que es necesario procesarlos para obtener las 132 medias mensuales y posteriormente la climatología de esos meses. Se produjeron mapas de estas variables y la región o dominio de estudio que se escogió para ver los mapas de dichos parámetros es lo suficientemente grande como para abarcar toda la Cuenca del Lago de Maracaibo (CLM) y la geografía circundante. Para el caso de la climatología este dominio está delimitado por los paralelos 7° - 14° y por los meridianos -74° - -59°. Adicionalmente, se ha superpuesto el mapa cimatológico de vientos y con esto se pudo tener una clara perspectiva del comportamiento medio calculado a partir del modelo WRF para el período y abarcando un espacio más grande que la propia cuenca.

5.1.1. Energía Potencial Disponible Convectiva.

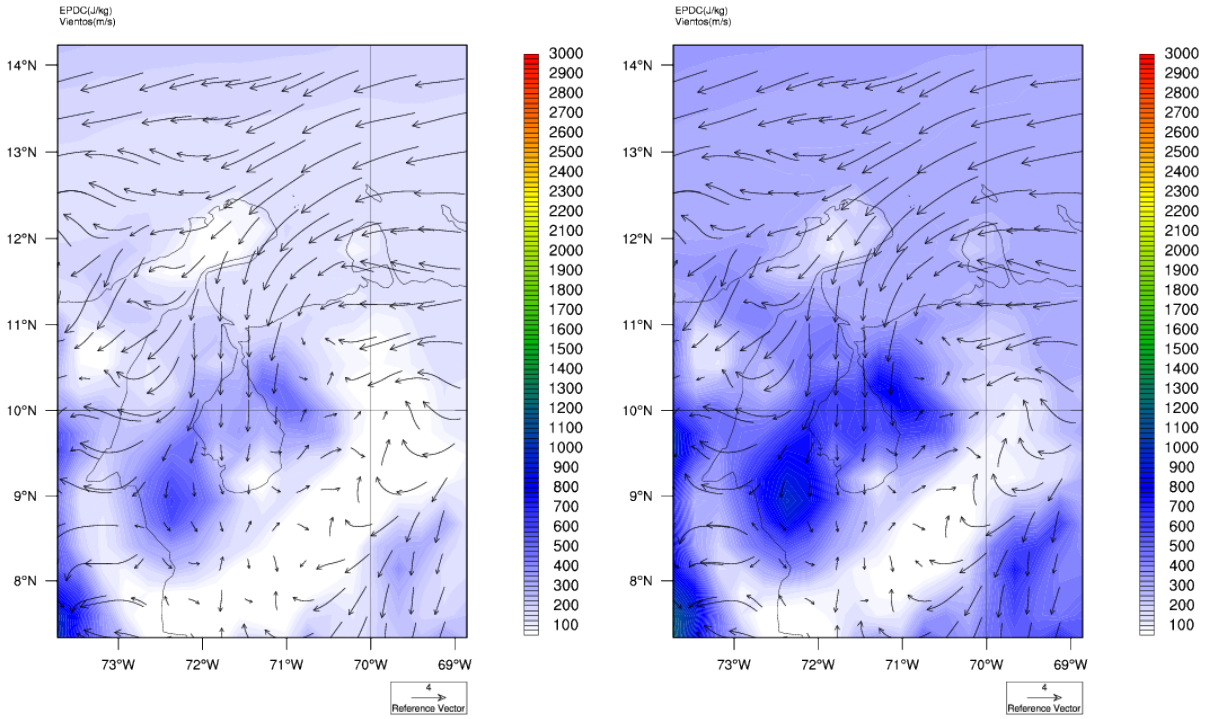
Las figuras 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 y 5.6 muestran la climatología de vientos y EPDC. Lo primero que se puede observar en todos los mapas es que para los primeros meses del año, a saber: enero, febrero y marzo, los niveles de la EPDC son los más bajos. En estos mismos meses se nota que la magnitud de los vientos es mayor que en el resto del año. Contrariamente, para los meses de agosto, septiembre y octubre climatológicos la EPDC se eleva a sus valores más al altos y los vientos se contraen a las magnitudes más bajas. La distribución espacial de la EPDC sigue un patrón general de estar presente en mayores niveles encima de superficies bajas y sobre las aguas.



(a) ***Enero*** **(b)** ***Febrero***

Figura 5.1: Climatología mensual multianual de la EPDC, IC y vientos para el período 1998-2008.

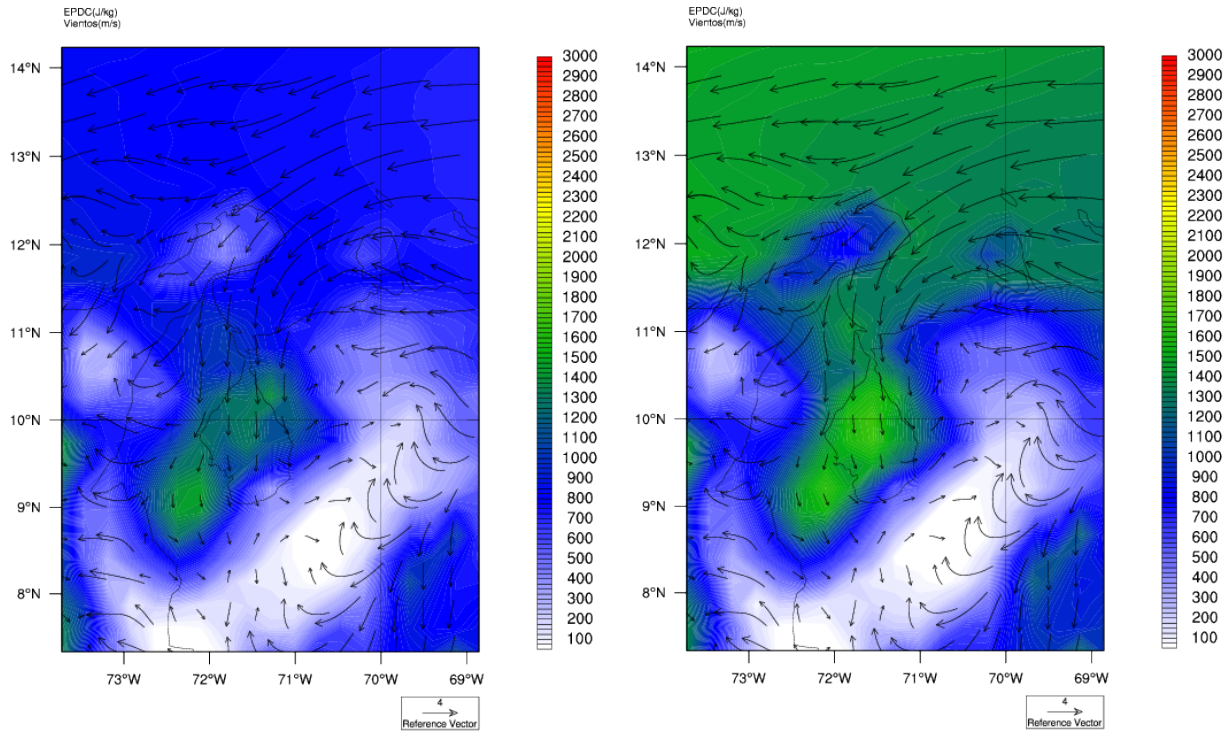
Se nota que sobre la desembocadura del Río Catatumbo y las zonas pantanosas del Parque Nacional Ciénagas de Juan Manuel de Aguas Claras y Aguas Negras (PNC) existe una región de alta convección y bajas magnitudes eólicas. A priori, la conjunción de estas dos situaciones parecen tener algo que ver con la aparición de células tormentosas con mayor frecuencia en esta zona que en el resto de la cuenca. Se puede observar también que los vientos alisios que entran por el norte de la cuenca cumplen un recorrido en sentido antihorario debido a la configuración orográfica de la zona y de esto se puede deducir que los cambios de la componente meridional de los vientos tiene un mayor impacto en la dinámica atmosférica de la cuenca. En septiembre estos vientos alisios penetran con energías cinéticas promedio de 4 a 9 $J\,kg^{-1}$ y pierden buena parte de energía al arrivar al sudoeste del Lago quedando en valores menores a $0,5\,J\,kg^{-1}$ por lo que la mayor parte de la humedad arrastrada en su



(a) ***Marzo*** **(b)** ***Abril***

Figura 5.2: Climatología mensual multianual de la EPDC, IC y vientos para el período 1998-2008.

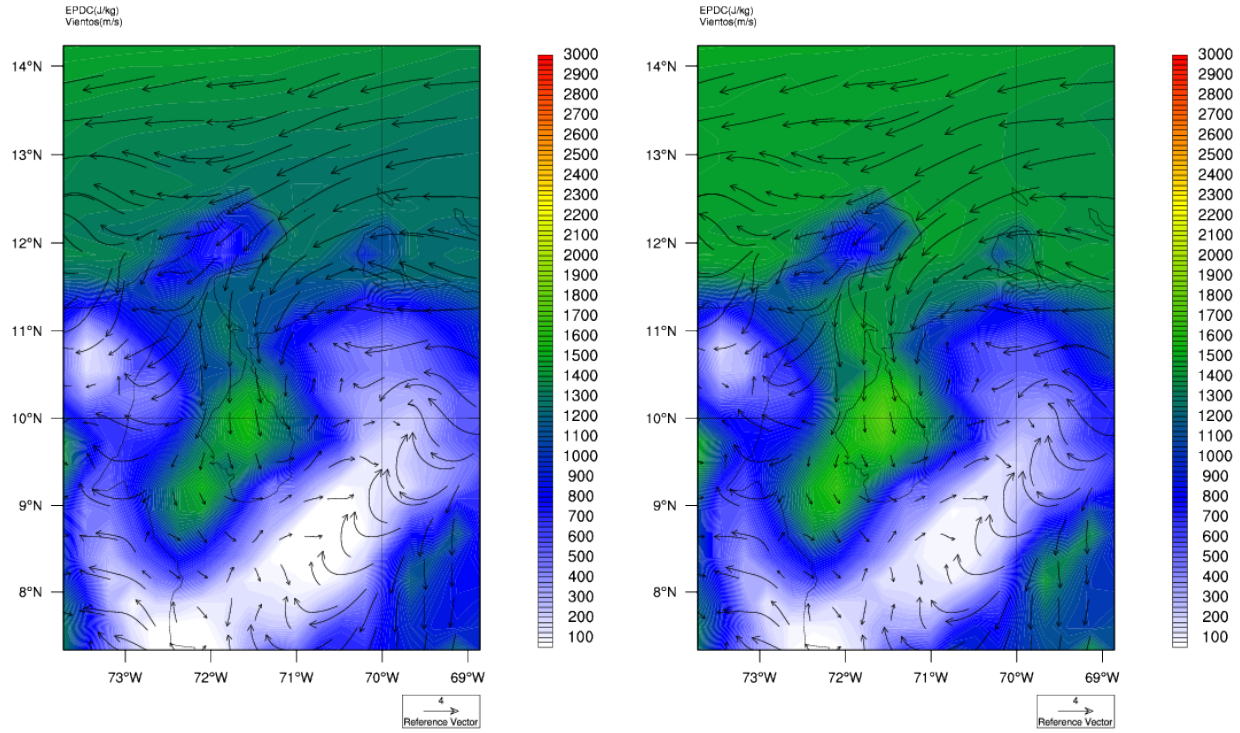
camino queda acumulada en esta región y por lo que el calentamiento es más efectivo en esta zona. Para el caso de enero, las energías cinéticas medias de entrada en la cuenca son mayores (12 a 18 $J\,kg^{-1}$) que al llegar a la zona sudoeste se reduce hasta tener de 1 a 2 $J\,kg^{-1}$.



(a) ***Mayo*** **(b)** ***Junio***

Figura 5.3: Climatología mensual multianual de la EPDC, IC y vientos para el período 1998-2008.

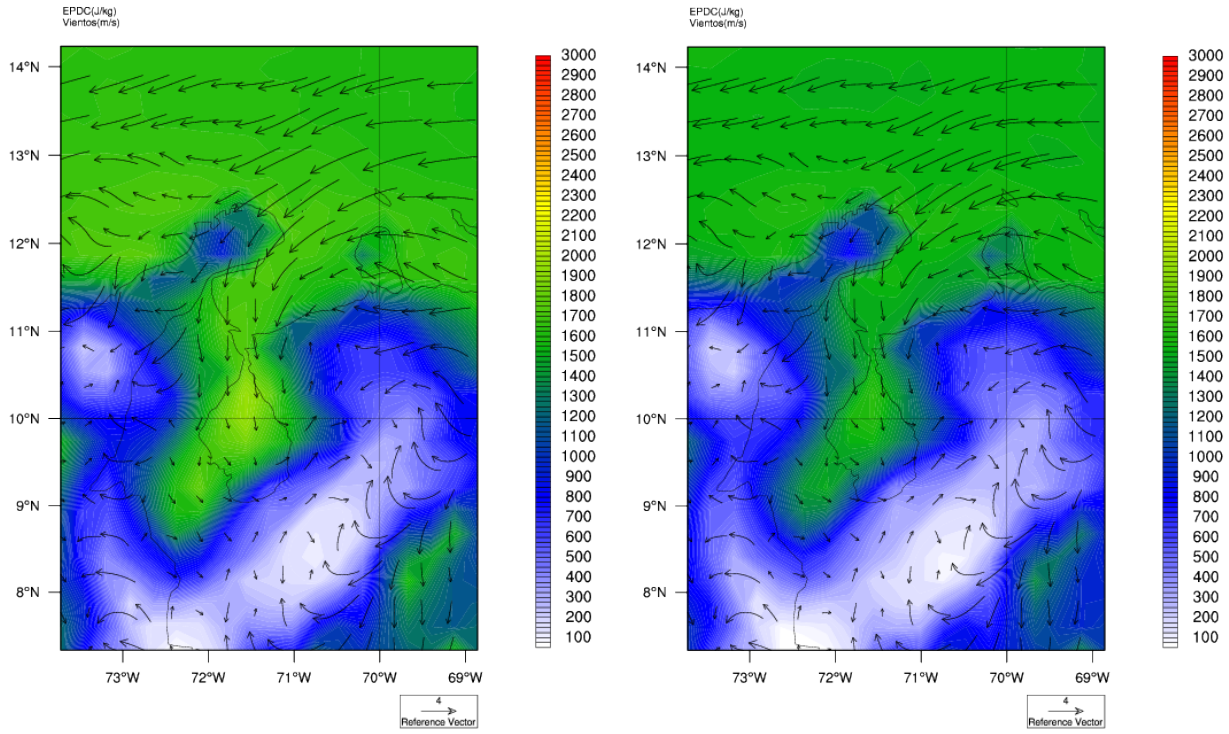
Esta climatología evidencia una mayor actividad convectiva en los meses de agosto, septiembre y octubre en un ciclo anual unimodal. El comportamiento de los vientos nos muestra la advección de humedad a la cuenca desde el Mar Caribe y cómo arrastran la humedad generada por la CLM y llegan a la zona del PNC habiendo perdido su movilidad por lo que buena parte de esta humedad está disponible para la formación de nubes.



(a) ***Julio*** **(b)** ***Agosto***

Figura 5.4: Climatología mensual multianual de la EPDC, IC y vientos para el período 1998-2008.

Los valores medios climatológicos más altos de la EPDC se registran para el mes de septiembre y se sitúan en el rango de los $2200 - 2400\, J\, kg^{-1}$. Los valores mensuales mínimos calculados en la zona donde hay mayor fluctuación de la EPDC van en el orden de $300 - 400\, J\, kg^{-1}$ y se presentan en los meses de enero y febrero. Teniendo en cuenta la tabla 3.1 se puede observar que estos últimos valores medios son bastante pequeños para generar una significativa actividad convectiva durante esos meses. La mayor EPDC reportada en las 132 medias mensuales para un punto de la malla del dominio aparece en el mes de septiembre de 2005 y su valor fue de $2427\, J\, kg^{-1}$. En este caso, se calcularon las medias de la distribución de la EPDC ya que se conocía de antemano, mediante los datos del LIS, que el mes de septiembre del año 2005 fue el más activo en cuanto a descargas eléctricas (con alrededor de 10700 por día) de todo el período.

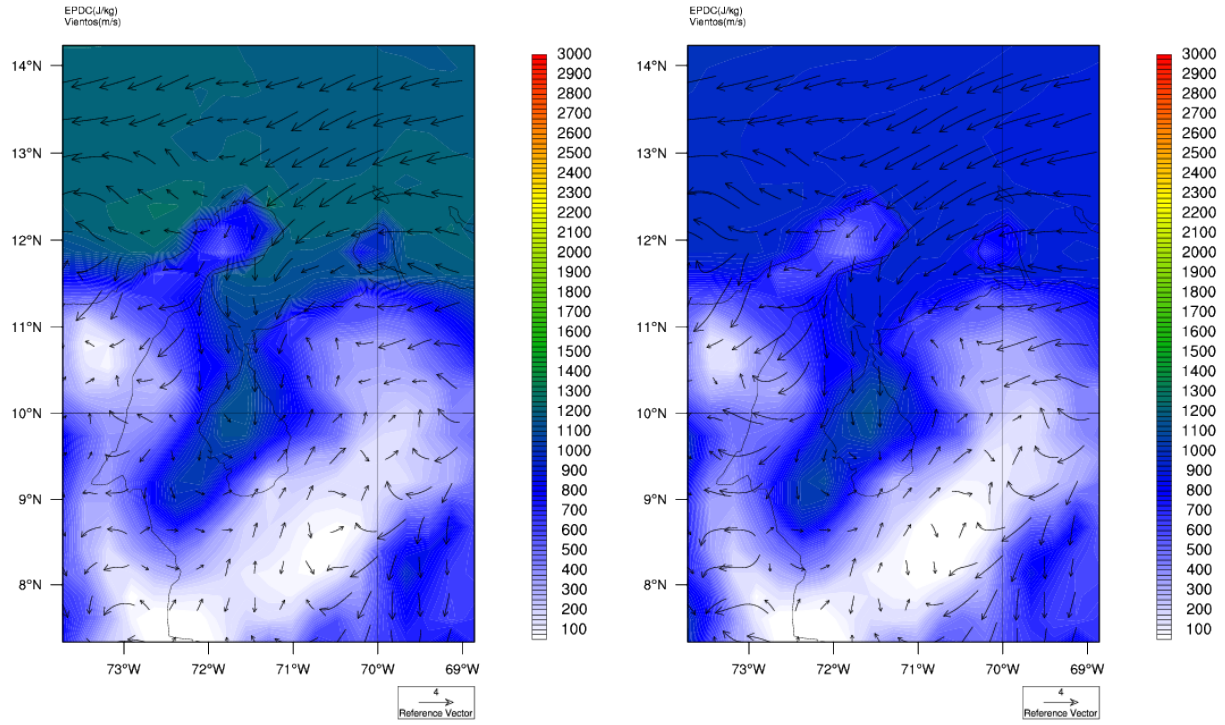


(a) ***Septiembre*** **(b)** ***Octubre***

Figura 5.5: Climatología mensual multianual de la EPDC y vientos para el período 1998-2008.

5.1.2. Inhibición Convectiva.

En el caso de la inhibición convectiva se obtuvieron los mapas de climatología mensual multianual para todos los meses y se observa una periodicidad análoga a la de la EPDC, con mínimos a principios de año y máximos a finales del tercer trimestre. La figura 5.7 muestra los meses extremos, es decir, enero y septiembre. Se destaca de ellos que aparecen dos zonas conexas con muy baja IC sobre el Lago de Maracaibo y sobre el PNC para el mes de septiembre. Cuando se observan los valores de la EPDC para este mismo mes, se concluye que estas zonas deben tener las mayores facilidades naturales para generar convección en toda la cuenca. De aquí que, en los datos registrados por el LIS, se observen sobre estas zonas la mayor densidad de destellos [29]. Los valores medios máximos en septiembre giran en torno a los $55 J.kg^{-1}$ y aunque la IC es muy baja en enero, los niveles también bajos de la EPDC para ese mes impiden frecuentes desarrollos convectivos en la zona y por ende existe



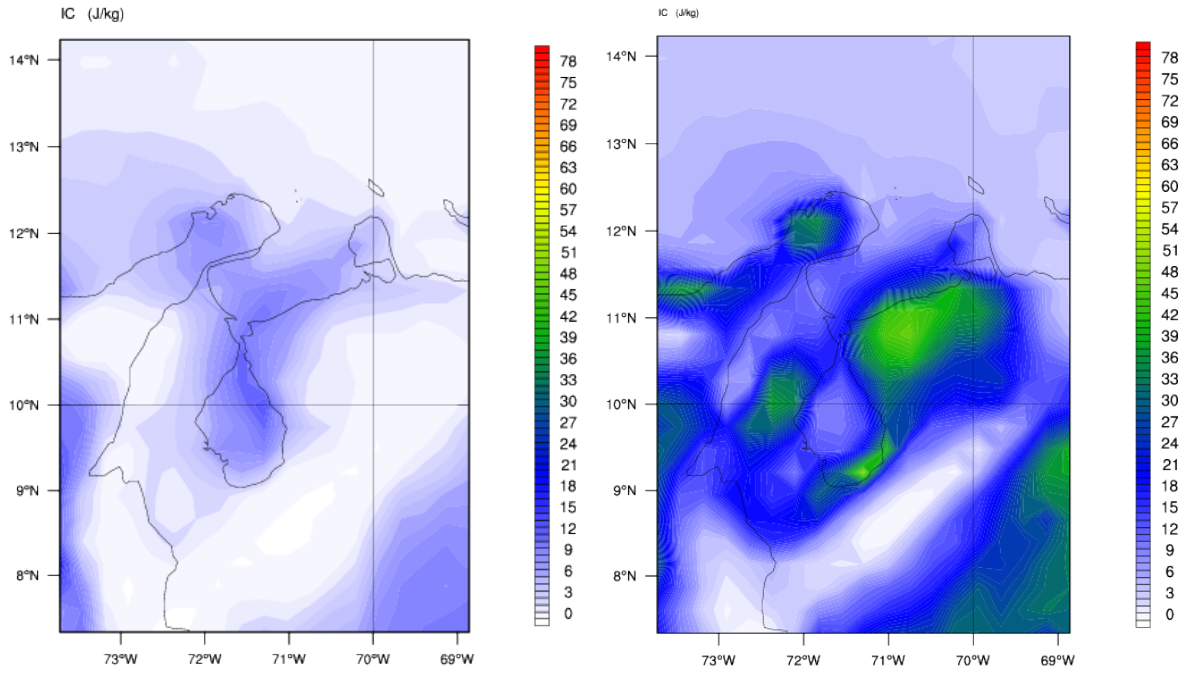
(a) ***Noviembre*** **(b)** ***Diciembre***

Figura 5.6: Climatología mensual multianual de la EPDC y vientos para el período 1998-2008.

poca actividad eléctrica durante esa parte del año. Hay que tener en cuenta que cuando la EPDC es muy baja o nula la IC carece de valor práctico ya que aunque una parcela alcance el nivel de libre convección, ésta no ascenderá por no poseer la energía requerida para vencer el gradiente de temperaturas.

5.1.3. Índices Normalizados.

A partir de la figura 5.8 se desprende que la EPDC normalizada posee una distribución muy similar a la de la EPDC con unos máximos sobre el Lago de Maracaibo y sobre el PNC para el mes de septiembre. Se obtuvo también el grosor de la capa de libre convección (CLC) y ésta presenta sus máximos (con alrededor de $13000\,m$) en septiembre sobre las mismas zonas de máximos de la EPDC. Esto subraya el hecho de que si bien los máximos de la EPDC son altos, éstos se encuentran distribuidos en una gran porción vertical por lo que la



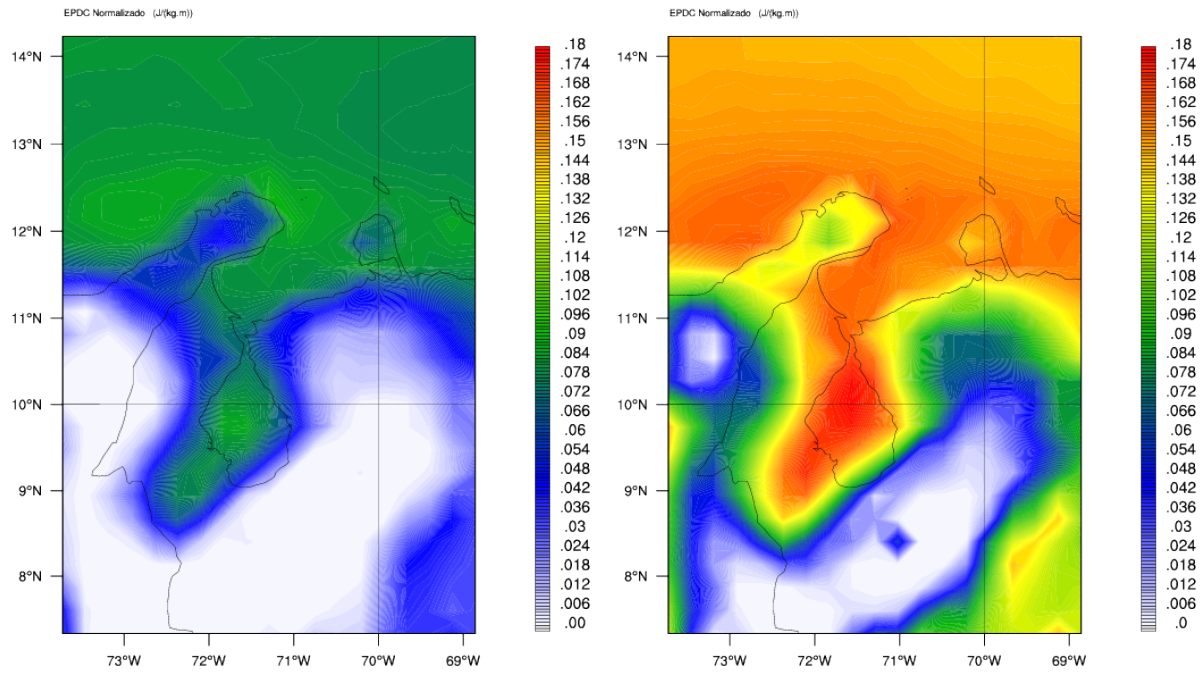
(a) ***Enero*** **(b)** ***Septiembre***

Figura 5.7: Climatología mensual multianual de la IC para el período 1998-2008. Meses de enero y septiembre.

convección promedio no es tan violenta. Esto entra en concordancia con el hecho de que por lo general la convección más violenta se presenta cuando existen niveles moderados de IC cosa que no ocurre en estas zonas. No se muestran las imágenes de la IC normalizada puesto que el comportamiento de la variable es también similar a la de la IC y no aporta información de relevancia.

5.2. Evolución temporal de las variables.

Como se ha mencionado, los datos de descargas eléctricas están limitados al período 1998-2005. Sin embargo, estos ocho años nos permiten hacer un balance de la conducta media de la actividad de los Relámpagos del Catatumbo en la CLM. Se calcularon las medias mensuales de las descargas para este período y se calcularon las medias mensuales para todas las variables del WRF para el período 1998-2008. En estos casos, además de hacer una media



(a) ***Enero*** **(b)** ***Septiembre***

Figura 5.8: Climatología mensual multianual de la EPDCN para el período 1998-2008. Meses de enero y septiembre.

temporal, se hace una media espacial de todo el dominio para obtener un valor representativo de dicho dominio que, cabe añadir, ha sido reducido a los límites 8 ° - 11 ° de latitud y −73 ° - −70 °. Esto se estructura de esta manera porque estos límites se ajustan mejor a la geografía de la cuenca (las barreras orográficas) y así evitamos que valores externos a estos límites introduzcan información que no esté vinculada con la fenomenología local de la CLM. Esto se efectúa para todos los cuadrantes propuestos los cuales tienen los siguientes límites:

Cuadrante	Latitudes	Longitudes
I	$9,5^\circ$ - 11°	$-71,5^\circ$ - -70°
II	$9,5^\circ$ - 11°	-73° - $-71,5^\circ$
III	8° - $9,5^\circ$	-73° - $-71,5^\circ$
IV	8° - $9,5^\circ$	$-71,5^\circ$ - -70°

Cuadro 5.1: Límites del dominio y de los cuadrantes.

5.2.1. Flashes versus variables.

Dominio completo.

Para ver el comportamiento de las medias mensuales espaciales del dominio tratado y de sus cuadrantes se obtienen las series de tiempo. Se grafican las series de tiempo de flashes para el dominio mayor y se superpone la serie de una de las demás variables. En la figura 5.9 se puede apreciar el comportamiento de las densidad media de descargas a lo largo del tiempo en el dominio conjuntamente con las variaciones medias de la EPDC . Ambas variables poseen una evolución muy similar con mínimos a principios de año y máximos generalizados en el tercer trimestre del año. Se observa que los picos más pronunciados de las descargas ocurrieron en 2001 y en 2005 con máximos por encima de los $0,12\, Flashes\, km^{-2}\, dia^{-1}$.

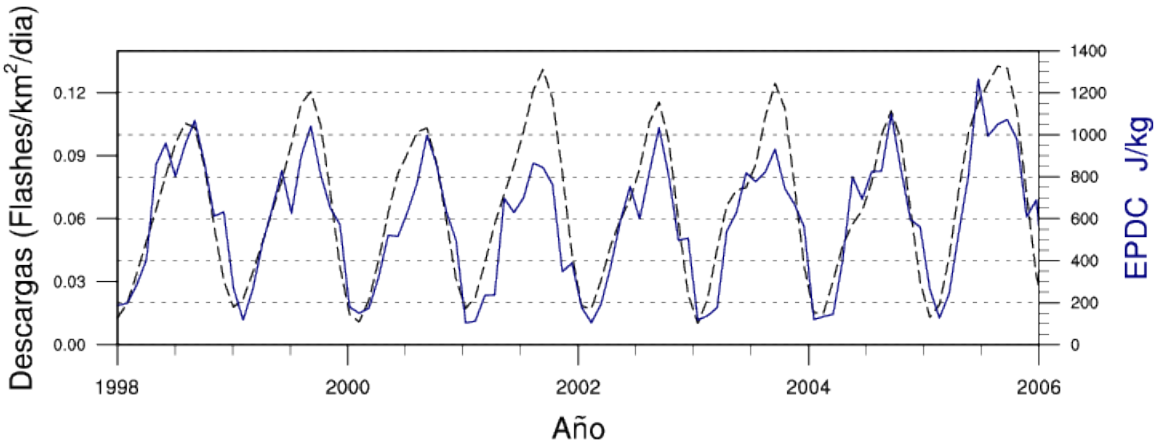


Figura 5.9: Serie de tiempo de Flashes y Energía Potencial Disponible Convectiva para el dominio completo.

No obstante, para el año 2005 el área bajo la curva de descargas es mayor y los valores máximos se mantienen durante más tiempo encima del mencionado umbral por lo que se establece que ese año fue el más activo de todo el período. Al ver la curva de la EPDC se nota el mismo patrón seguido por las descargas y por consiguiente se deduce que existe una relación estrecha entre ellas. Cabe añadir que al estar estas medias efectuadas espacialmente, los valores del EPDC son menores que los presentados en los mapas climatológicos y que aún así son valores medios altos en términos de convección con varios picos superando los 1000 J/kg (ver tabla 3.1.) Los valores mínimos son bastante similares para todos los comienzos de año.

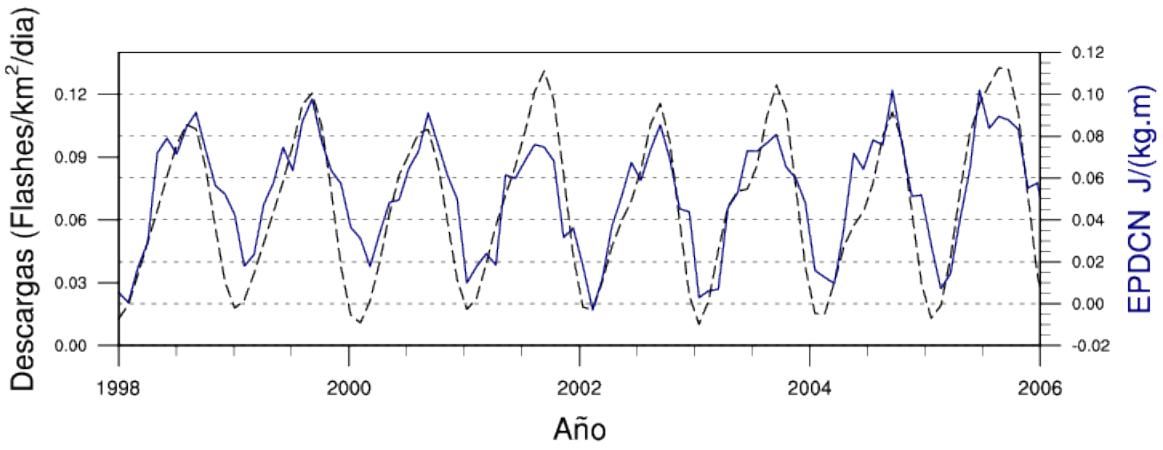


Figura 5.10: Serie de tiempo de Flashes y Energía Potencial Disponible Convectiva Normalizada para el dominio completo.

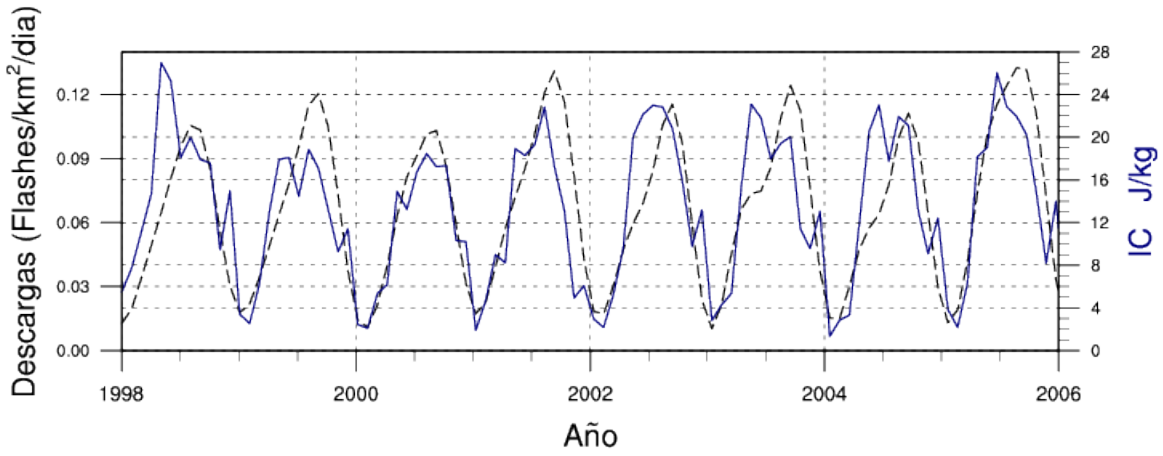


Figura 5.11: Serie de tiempo de Flashes e Inhibición Convectiva para el dominio completo.

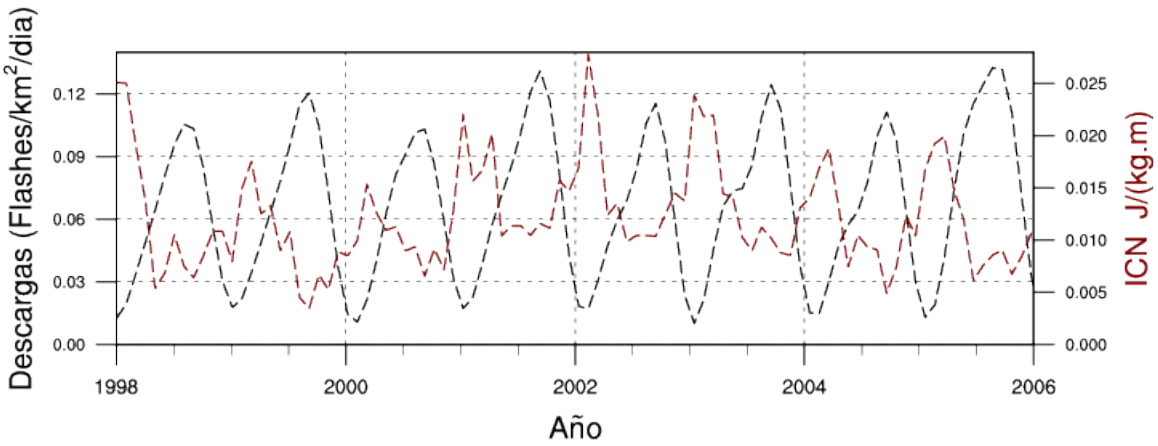


Figura 5.12: Serie de tiempo de Flashes e Inhibición Convectiva Normalizada para el dominio completo.

Para el caso de la figura 5.11 se puede ver de nuevo un patrón general similar al de las descargas para la inhibición convectiva. La inhibición convectiva aumenta al haber mayor radiación incidente y mayor contenido de vapor de agua en la capa inferior al Nivel de Libre Convección NLC se genera esta inversión de temperaturas y por ende se hace más difícil para una parcela alcanzar dicho nivel. Para sobreponerse a esta inhibición convectiva una parcela de aire requerirá ya sea poseer mayor contenido de humedad y/o ser calentada. Esto es precisamente lo que sugieren las figuras 5.13 y 5.14 ya que muestran una alta sincronía en sus fluctuaciones y proporciona las principales razones por las cuales la inhibición convectiva es superada: inyección de humedad y aumento de temperatura. Además, los valores medios son bastante pequeños (entre 20 y 28 J/kg) en comparación a los valores operativos típicos (ver tabla 3.2). La normalización de la IC, sin embargo, da cuenta de una anticorrelación para la actividad eléctrica como lo muestra la figura 5.12.

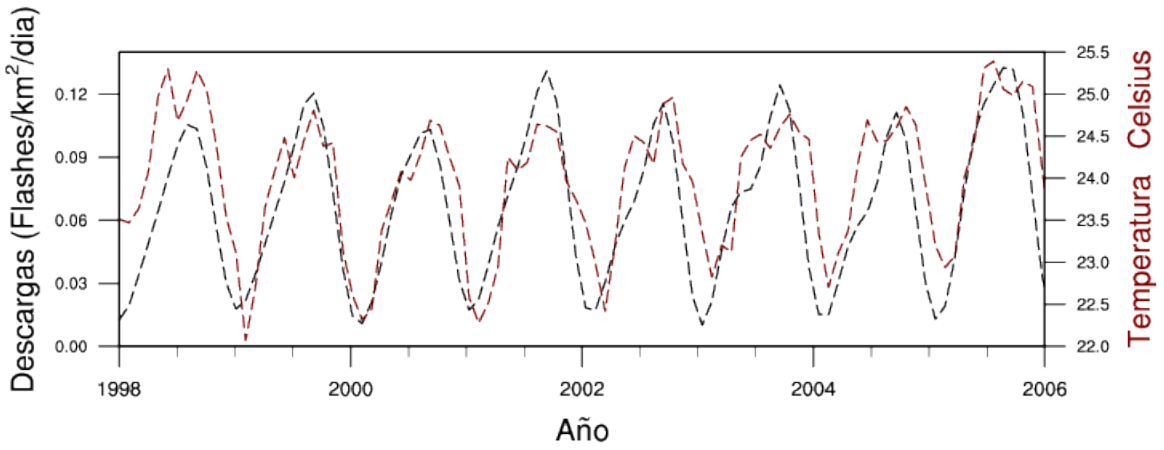


Figura 5.13: Serie de tiempo de Flashes y Temperatura Superficial (T) para el dominio completo.

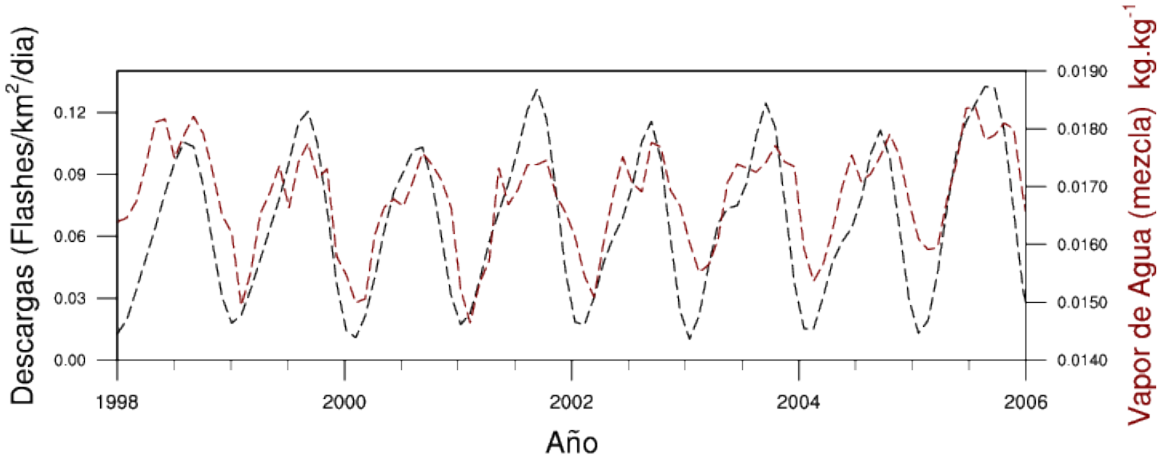


Figura 5.14: Serie de tiempo de Flashes y Relación de Mezcla de Humedad (Q) para el dominio completo.

La evolución de los vientos se presenta dominada por la componente meridional y por una falta aparente de correlación de las descargas con los vientos zonales. A partir de la figuras 5.16 y 5.15 se observa la unimodalidad anual de la componente meridional y la periodicidad de los vientos zonales. A pesar de las mayores magnitudes de la componente zonal no se observa ningún patrón que sugiera una directa relación con la actividad eléctrica en la zona.

Es importante destacar que el año 2005 fue histórico en cuanto al número de eventos extremos en el Caribe y que estos pudieron absorber buena parte de la energía traducible en vientos de toda la cuenca caribeña reduciendo la velocidad de entrada de los vientos meridionales.

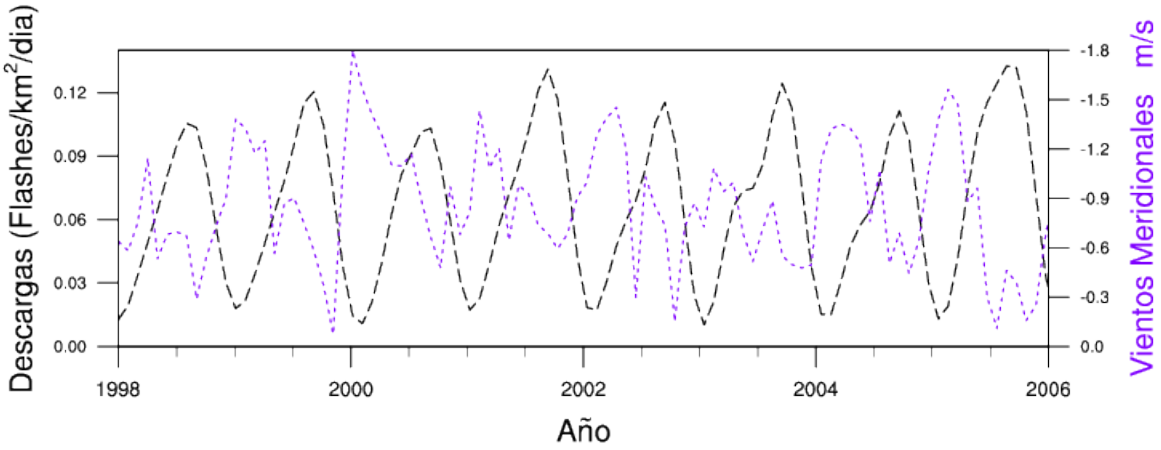


Figura 5.15: Serie de tiempo de Flashes y Vientos Meridionales para el dominio completo.

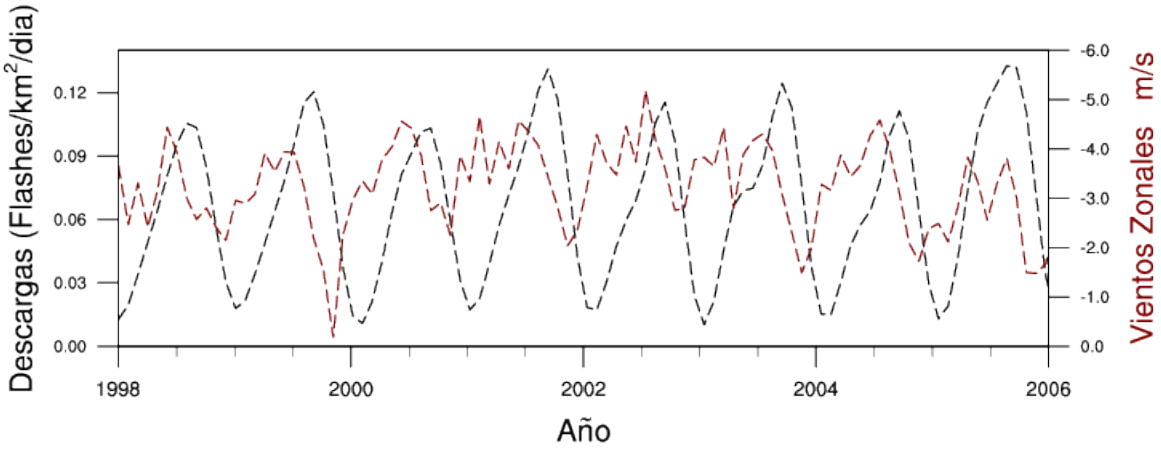


Figura 5.16: Serie de tiempo de Flashes y Vientos Zonales para el dominio completo.

La radiación media incidente en la superficie de la cuenca, tanto de onda corta como de onda larga, tiene máximos a mitad de año que se extienden desde junio hasta septiembre. Coincide con las épocas de mayor actividad del fenómeno eléctrico. El rango de fluctuación tiene una amplitud máxima de unos $70\,W.m^{-2}$ entre los mínimos y máximos anuales por lo

que las variaciones de la radiación solar incidente juega un papel importante en la dinámica atmosférica de la zona. Adicionalmente, se puede notar un rezago de las descargas con respecto al incremento de esta radiación lo que indica que el calentamiento de la cuenca mediante este agente no tiene un impacto directo a corto plazo. Esto indica que la radiación debe vencer otros factores que suavizan el calentamiento en la cuenca antes de que se presente la actividad convectiva. Se debe tener en cuenta que estos valores medios se calcularon también con los puntos situados en horas nocturnas y que por ello estn suavizados sobre todo si se compara con la constante solar que tiene un valor de $1360\,W.m^{-2}$ [6].

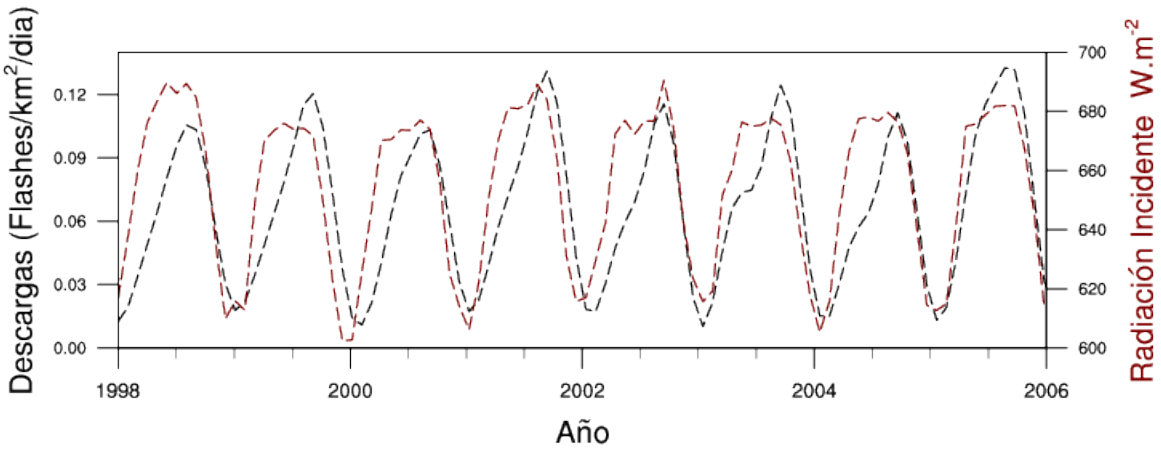


Figura 5.17: Serie de tiempo de Flashes y Radiación Incidente para el dominio completo.

El comportamiento de la presión de superficie no muestra una gran correlación con la evolución media de las descargas eléctricas en la cuenca. No obstante, se observa que tanto las variaciones de la presión como los niveles mismos son bajos por lo que se deduce que existe una constante entrada de vientos a la cuenca, y por tanto humedad, durante el año.

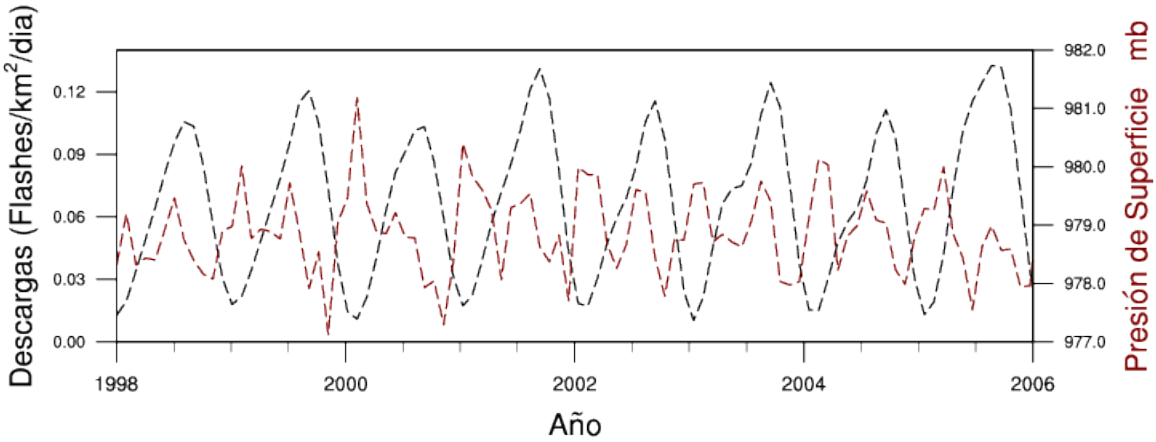


Figura 5.18: Serie de tiempo de Flashes y Presión de Superficie para el dominio completo.

Cuadrantes.

Se muestran las series de tiempo de los flashes y la EPDC en cada cuadrante. Se ve reproducida en ellas la misma periodicidad de las series del dominio completo. Las medias de la EPDC son mayores, por orden, en los cuadrantes II, III, I y IV al mismo tiempo que se observa que los picos más altos de descargas eléctricas se presentan, también de mayor a menor, en el III, II, I y IV. Esto implica que no sólo se debe tomar en cuenta la Energía Potencial Disponible Convectiva para entender el fenómeno de las descargas eléctricas en la cuenca. En efecto, se obtuvieron series de tiempo de la humedad y de la temperatura y se advierte que los niveles de estas variables se presentan en el mismo orden de los cuadrantes relativas a las descargas. Los cuadrantes I y III tienen las medias más grandes seguida por el cuadrante II y finalmente por el IV. Esto manifiesta la mayor facilidad para superar a inhibición convectiva vista en la figura 5.7 en estos cuadrantes, sobre todo en el segundo y tercero, que son precisamente donde se produce la mayor densidad de destellos medidos por el LIS además de que en el primer cuadrante los valores de la EPDC no son tan grandes como en el segundo y tercero. Otro resultado importante es el hecho de que en cuanto a radiación incidente, los cuadrantes I, II y III tienen los picos más altos.

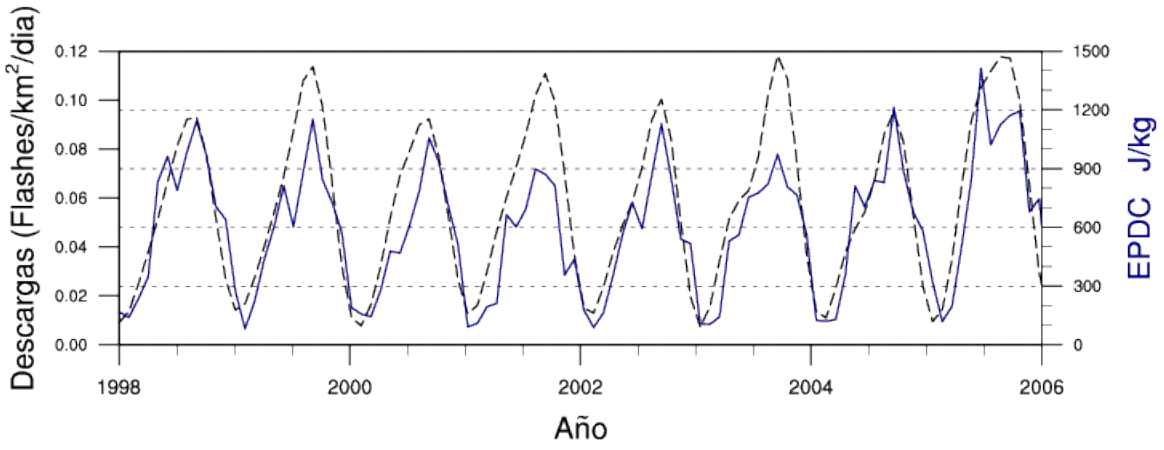


Figura 5.19: Serie de tiempo de Flashes y Energía Potencial Disponible Convectiva para el cuadrante I.

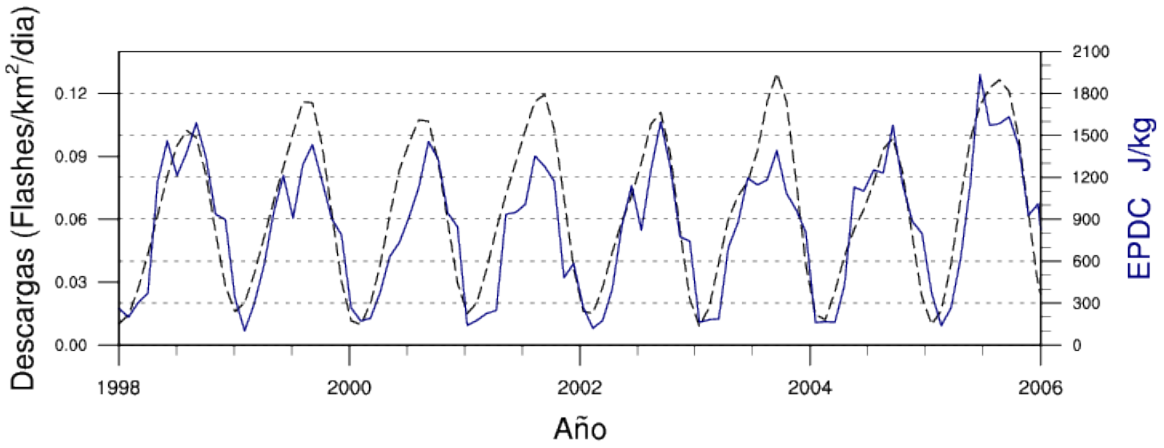


Figura 5.20: Serie de tiempo de Flashes y Energía Potencial Disponible Convectiva para el cuadrante II.

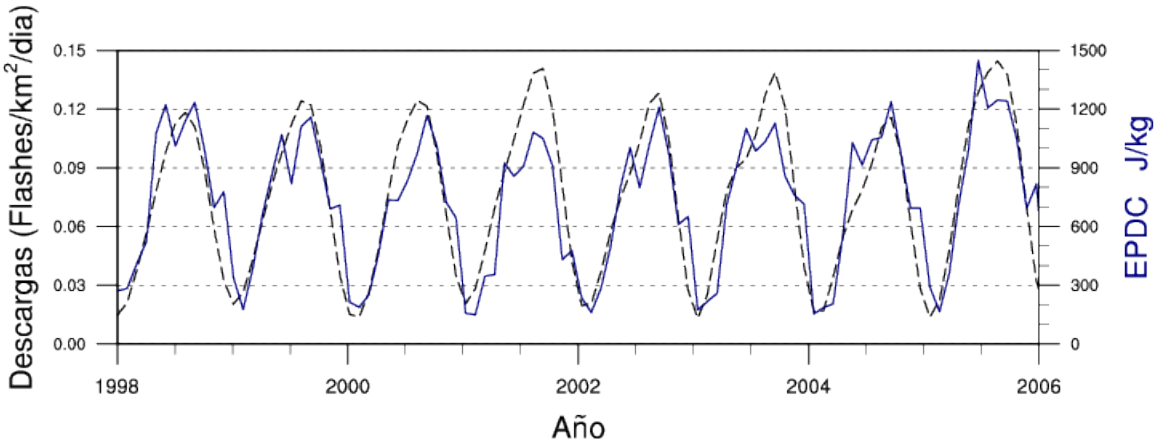


Figura 5.21: Serie de tiempo de Flashes y Energía Potencial Disponible Convectiva para el cuadrante III.

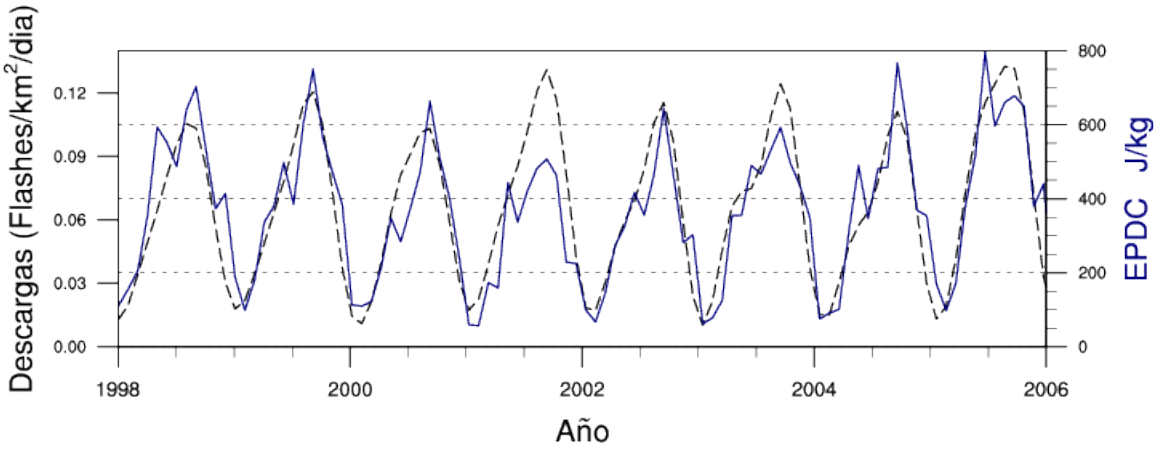


Figura 5.22: Serie de tiempo de Flashes y Energía Potencial Disponible Convectiva para el cuadrante IV.

5.2.2. EPDC versus variables.

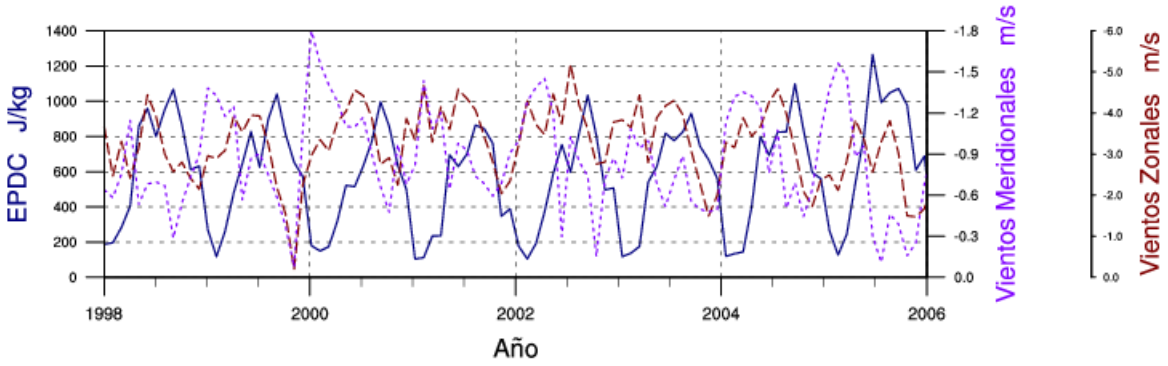


Figura 5.23: Serie de tiempo de la Energía Potencial Disponible Convectiva y Vientos de Superficie para el dominio completo.

En las figuras 5.25, se puede distinguir la estrecha relación entre la EPDC, la temperatura de superficie y humedad. Las fluctuaciones mostradas de la EPDC van de la mano con las de la temperatura y la humedad y por esto se deduce que son los principales agentes causantes de la EPDC en la cuenca. Con respecto a los vientos se observa una cierta vinculación con la EPDC para el caso de la componente meridional de los mismos.

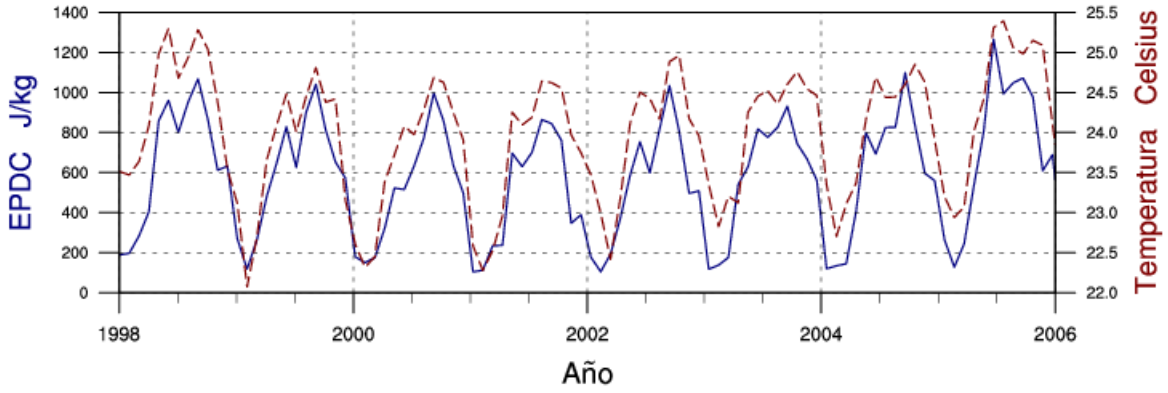


Figura 5.24: Serie de tiempo de la Energía Potencial Disponible Convectiva y Temperatura para el dominio completo.

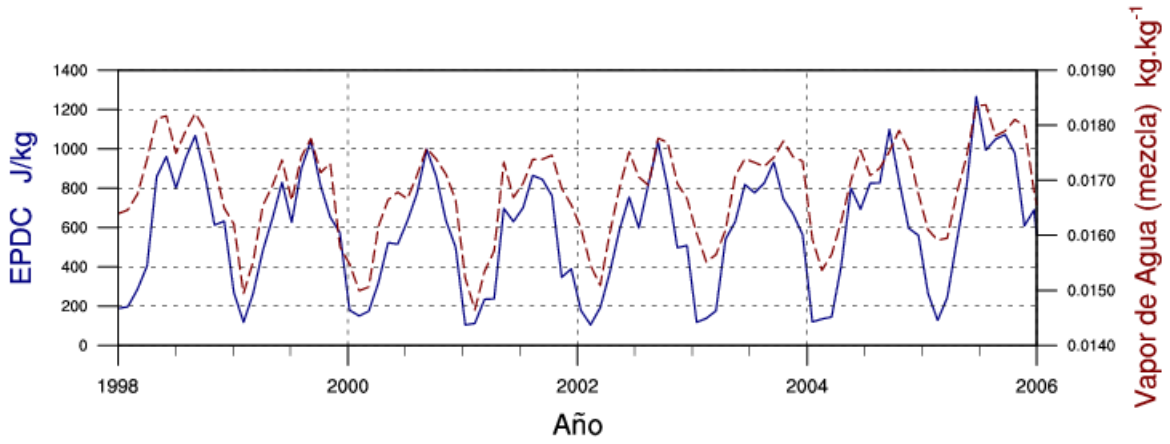


Figura 5.25: Serie de tiempo de la Energía Potencial Disponible Convectiva y Humedad para el dominio completo.

5.3. Correlaciones.

Se calcularon las correlaciones para todas las variables mediante la ecuación 3.44. Este método, como se indicó, es robusto y resistente además de ser relativamente sencillo para establecer relaciones entre diferentes parámetros por lo que se escogió para su aplicación entre las diferentes variables elegidas. Estas son, la densidad de descargas eléctricas ($FLASHES$), la energía potencial disponible convectiva ($EPDC$), la presión de superficie (P), la temperatura de superficie (T), los vientos zonales (U), los vientos meridionales (V), la radiación incidente en la zona (R), la relación de mezcla de la humedad (Q) y la inhibición convectiva (IC).

Correlación de Spearman entre variables. Dominio Completo.									
Variables	$FLASHES$	$EPDC$	P	T	U	V	R	Q	IC
$FLASHES$	1	**0,787**	**-0,340**	**0,722**	-0,036	**0,533**	**0,670**	**0,708**	**0,675**
$EPDC$	**0,787**	1	**-0,439**	**0,867**	-0,093	**-0,685**	**0,741**	**0,874**	**0,851**
P	**-0,340**	**-0,439**	1	**-0,549**	**-0,510**	**-0,581**	-0,126	**-0.592**	**-0,263**
T	**0,722**	**0,867**	**-0,549**	1	0,176	**0,836**	**0,645**	**0,983**	**0,704**
U	-0,036	-0,093	**-0,510**	0,176	1	**0,354**	**-0,397**	0.238	0,249
V	**0,533**	**-0,685**	**-0,581**	**0,836**	**0,354**	1	**0,356**	**0,829**	**0,502**
R	**0,670**	**0,741**	-0,126	**0,645**	**-0,397**	**0,356**	1	**0,639**	**0,838**
Q	**0,708**	**0,874**	**-0,592**	**0,983**	0,238	**0,829**	**0,639**	1	**0,708**
IC	**0,675**	**0,851**	**-0,263**	**0,704**	0,249	**0,502**	**0,838**	**0,708**	1

Cuadro 5.2: Tabla de correlaciones para el dominio entero. En negrita los valores estadísticamente significativos a un límite de confianza de p=0,01.

Dominio completo. El cuadro 5.2 exhibe las correlaciones entre todas las medias de las variables durante todo el período de estudio. La variable que más se correlaciona con las descargas eléctricas, con un $0,787$, es la EPDC. Este resultado augura la posibilidad de usar esta energía como predictor del fenómeno aunque no en solitario ya que no da cuenta con regularidad, como se muestran en las series de tiempo, de las diferencias en los picos de la densidad de descargas. Empero, se pueden establecer mínimos de EPDC para que las descargas medias, que no son nulas para ningún período del año, puedan ser caracterizadas en cada mes a manera de pronóstico. Las dos variables que siguen son la temperatura de superficie y la humedad. Estas dos variables están fuertemente ligadas a la EPDC como se mencionó antes y su aumento en la superficie de la cuenca tiene efectos positivos en el aumento de la EPDC y por ende de la actividad eléctrica en la zona. La inhibición convectiva tiene una correlación un tanto menor con las descargas eléctricas comparada con la EPDC a pesar de ser positiva. Es natural que al inyectar energía en una región se generen inversiones en la capa inferior al nivel de libre convección puesto que la perturbación genera convecciones hasta algún nivel de esa capa y esto se traduce en inhibición convectiva para otras parcelas

de aire que intenten superarla; es por esto que las correlaciones se presentan positivas. Así, se determina que el aumento de humedad y temperatura en la zona proveen a las parcelas de aire la energía requerida para superar estas inhibiciones convectivas. También se puede notar que la radiación juega un papel importante como agente causal en el aumento de las temperaturas y sobre todo en el aumento de la EPDC en la cuenca. El hecho de que la correlación entre la temperatura de superficie y la radiación no sea mayor implica que hay otros factores que afectan el crecimiento de la primera como, por ejemplo, los vientos meridionales.

La variable que menos correlación tiene con las demás es la velocidad de los vientos zonales. A pesar de que los vientos zonales medios en la cuenca no son despreciables éstos no tienen mayor relevancia a la hora de impactar en la EPDC y en las descargas eléctricas. Esto puede deberse a que estas componentes zonales aparecen primordialmente cuando interactúan con la orografía de la zona, es decir, lejos de las zonas de mayor convección que están dominadas principalmente por los vientos meridionales. La presión de superficie tiene débiles vínculos con el resto de las variables, si bien no despreciables. Es el caso de la humedad que tiende a acumularse en las zonas de baja presión. En el caso de la EPDC la presión de superficie no tiene una influencia notoria y de esto se desprende que en zonas de relativa alta presión también pueden presentarse zonas de gran desarrollo convectivo en la cuenca.

Cuadrantes. Los cuadros 5.3, 5.4, 5.5 y 5.6 revelan las correlaciones calculadas para los cuatro cuadrantes. En general todos los cuadrantes poseen correlaciones similares pero, no obstante, aparecen algunas diferencias. Es interesante percibir que en el cuadrante III los vientos tantos meridionales como zonales poseen muy poca o nula correlación con la densidad de descargas y que estos vientos tienen un peso moderado en la temperatura y la humedad. Se puede deducir por estos motivos que la radiación juega un papel más preponderante en el cuadrante II, pero sobre todo en el III con respecto a los destellos si se comparan con los otros dos cuadrantes. Esto último se puede juzgar también al comparar las correlaciones de la radiación en el cuadrante III con las de los demás cuadrantes. Las correlaciones entre la densidad de descargas, la EPDCN y la ICN para el dominio mayor es de **0.767** y **-0,546**, respectivamente.

Correlación de Spearman entre variables. Cuadrante I.								
Variables	*FLASHES*	*EPDC*	*P*	*T*	*U*	*V*	*R*	*Q*
FLASHES	1	**0,787**	**-0,366**	**0,663**	-0,108	**0.466**	**0,647**	**0,702**
EPDC	**0,787**	1	**-0,512**	**0,807**	0,213	**0,603**	**0,685**	**0,869**
P	**-0,366**	**-0,512**	1	**-0,625**	**-0,504**	**-0,621**	-0,113	**-0,621**
T	**0,663**	**0,807**	**-0,625**	1	0,200	**0,741**	**0,451**	**0,966**
U	-0,108	0,213	**-0,504**	0,200	1	0,190	**-0,509**	0,123
V	**0.466**	**0,603**	**-0,621**	**0,741**	0,190	1	**0,293**	**0,743**
R	**0,647**	**0,685**	-0,113	**0,451**	**-0,509**	**0,293**	1	**0,569**
Q	**0,702**	**0,869**	**-0,621**	**0,966**	0,123	**0,743**	**0,569**	1

Cuadro 5.3: Tabla de correlaciones para el primer cuadrante. En negrita los valores estadísticamente significativos a un límite de confianza de p=0,01.

Correlación de Spearman entre variables. Cuadrante II.								
Variables	*FLASHES*	*EPDC*	*P*	*T*	*U*	*V*	*R*	*Q*
FLASHES	1	**0,772**	**-0,373**	**0,657**	-0,149	-0,010	**0,687**	**0,684**
EPDC	**0,772**	1	**-0,530**	**0,835**	0,008	0,171	**0,724**	**0,882**
P	**-0,373**	**-0,530**	1	**-0,633**	**-0,459**	**-0,467**	-0,182	**-0,661**
T	**0,657**	**0,835**	**-0,633**	1	0,166	**0,462**	**0,526**	**0,971**
U	-0,149	0,008	**-0,459**	0,166	1	**0,667**	**-0,482**	0,153
V	-0,010	0,171	**-0,467**	**0,462**	**0,667**	1	**-0,338**	**0,381**
R	**0,687**	**0,724**	-0,182	**0,526**	**-0,482**	**-0,338**	1	**0,594**
Q	**0,684**	**0,882**	**-0,661**	**0,971**	0,153	**0,381**	**0,594**	1

Cuadro 5.4: Tabla de correlaciones para el segundo cuadrante. En negrita los valores estadísticamente significativos a un límite de confianza de p=0,01.

Correlación de Spearman entre variables. Cuadrante III.								
Variables	$FLASHES$	$EPDC$	P	T	U	V	R	Q
$FLASHES$	1	**0,771**	**-0,358**	**0,692**	0,227	0,184	**0.712**	**0,696**
$EPDC$	**0,771**	1	**-0,472**	**0,839**	**0,420**	**0,354**	**0,808**	**0,869**
P	**-0,358**	**-0,472**	1	**-0,613**	**-0,594**	**-0,505**	**-0,285**	**-0,620**
T	**0,692**	**0,839**	**-0,613**	1	**0,597**	**0,597**	**0,657**	**0,971**
U	0,227	**0,420**	**-0,594**	**0,597**	1	**0,920**	0,037	**0,584**
V	0,184	**0,354**	**-0,505**	**0,597**	**0,920**	1	-0,06	**0,534**
R	**0.712**	**0,808**	**-0,285**	**0,657**	0,037	-0,06	1	**0,721**
Q	**0,696**	**0,869**	**-0,620**	**0,971**	**0,584**	**0,534**	**0,721**	1

Cuadro 5.5: Tabla de correlaciones para el tercer cuadrante. En negrita los valores estadísticamente significativos a un límite de confianza de p=0,01.

Correlación de Spearman entre variables. Cuadrante IV.								
Variables	$FLASHES$	$EPDC$	P	T	U	V	R	Q
$FLASHES$	1	**0,784**	-0.212	**0,720**	0,002	**0,626**	**0,664**	**0,672**
$EPDC$	**0,784**	1	**-0,314**	**0,850**	**0,221**	**0,662**	**0,688**	**0,843**
P	-0.212	**-0,314**	1	**-0,320**	**-0,538**	-0,049	-0,007	**-0,471**
T	**0,720**	**0,850**	**-0,320**	1	0,130	**0,813**	**0,760**	**0,948**
U	0,002	0,221	**-0,538**	0,130	1	**-0,273**	**-0,294**	**0,366**
V	**0,626**	**0,662**	-0,049	**0,813**	**-0,273**	1	**0,814**	**0,652**
R	**0,664**	**0,688**	-0,007	**0,760**	**-0,294**	**0,814**	1	**0,607**
Q	**0,672**	**0,843**	**-0,471**	**0,948**	**0,366**	**0,652**	**0,607**	1

Cuadro 5.6: Tabla de correlaciones para el cuarto cuadrante. En negrita los valores estadísticamente significativos a un límite de confianza de p=0,01.

Asimismo se obtuvieron el coeficientes de la regresión lineal entre la medias mensuales

espaciales de la densidad de descargas y la EPDC así como también el punto de corte en el eje y. A partir de ello se puede escribir la siguiente relación:

$$FLASH = (11,07\,10^{-4})\,EPDC + 47,41\,10^{-3} \tag{5.1}$$

Por simplicidad no se escriben las unidades del coeficiente pero está claro que posee las unidades de la densidad de descargas por el inverso de las unidades de la EPDC.

5.4. Descripción de los Flujos de Energía.

Considérese un volumen de control V ubicado, por conveniencia, sobre la zona del Catatumbo (aproximadamente sobre la desembocadura del río Catatumbo en el Lago de Maracaibo, aunque la localización exacta no es importante). Se escoge que el mismo inicie a la altura del borde superior de la capa de frontera planetaria o en el NLC, y que las dimensiones del mencionado volumen no sean tan grandes como para que sus fronteras laterales coincidan con las montañas en la CLM. La frontera superior puede escogerse al NE o unos pocos kilómetros por encima del mismo (dado que aunque la aceleración desaparece en este nivel, aún pueden ocurrir ascensos de parcelas a velocidad constante antes de la estabilización). Estas consideraciones eliminan de las ecuaciones (3.36) y (3.37) los términos asociados con fricción y transferencia general de energía de la atmósfera al Lago o superficie del dominio en estudio. Asimismo, el término de conducción en el flujo calórico de la ecuación (3.34) puede obviarse en este caso y el término de disipación por fricción Q_f descrito por (3.35) también desaparece debido a que por simplicidad se considera que el fluido es no viscoso. Esto es, luego de una ligera manipulación,

$$\iiint_V \frac{d}{dt}\left(\Phi + I\right) dV = \iiint_V \left[gw - \left(\frac{1}{\rho}\nabla\cdot p\mathbf{v} + F_p\cdot\mathbf{v}\right) + Q_h\right] dV \tag{5.2}$$

$$\iiint_V \frac{d}{dt} K dV = \iiint_V \left[-gw + F_p\cdot\mathbf{v}\right] dV \tag{5.3}$$

donde $F_p \equiv -\frac{\nabla p}{\rho}$ es la fuerza por unidad de masa asociada a cambios en la presión.

Se deduce que para el volumen de control la energía potencial aumenta con incrementos del calor latente, sensible y radiativo, así como con la velocidad de ascenso de las parcelas

de aire. Sin embargo, disminuye con el incremento en las fronteras del campo de vientos y presiones, que involucran un aumento en la presión neta externa ejercida sobre el volumen (un efecto de compresión), y por ende ocurre un trabajo en contra del campo de presiones para contrarrestar este efecto. El mismo aumento del campo de vientos y presiones en la frontera, sin embargo, incrementa la energía cinética media, disminuyendo con los trabajos realizados en contra del campo gravitacional.

Así pues, la ecuación (5.2) en esencia revela un aspecto importante para la ocurrencia de celdas convectivas en el volumen de control. *El aumento de los vientos incidentes en las fronteras a la vez disminuye el flujo de energía potencial por medio del término entre paréntesis en la ecuación (5.2), y lo incrementa por medio del término* $-L(e-c)$ *de* Q_h *gracias a la advección de humedad (y energía).* Esto último es cierto debido a que en general en el Trópico y en zonas muy húmedas como la estudiada aquí la condensación total es mayor que la evaporación neta, y además $|\alpha\nabla\cdot\mathbf{F}_{rad}| < |L(e-c)|$, por lo que $Q_h > 0$. Vale recordar que en general la energía cinética es despreciable comparada con la energía potencial ($< 5\,\%$ de la energía total), y por ende no será considerada en este análisis.

El *quid* del asunto está entonces en determinar qué término es el dominante entre el trabajo realizado en contra de la presión en las fronteras ($p\alpha\nabla\cdot\mathbf{v}$) y el término que puede denominarse aquí de condensación o calor latente y radiación ($Q_h = -\alpha\nabla\cdot\mathbf{F}_{rad} + L(c-e)$). Esto dependerá, en principio, tanto de la magnitud de la velocidad como de la advección de masa y energía.

Si se considera un mismo valor medio de velocidad de ascenso $w = \overline{w} = constante$ en el volumen, para fines del presente análisis entonces se tienen los siguientes casos. Vale mencionar que la intensidad de las precipitaciones y la ocurrencia o no de descargas eléctricas depende del valor de la energía potencial disponible para convección.

1. $\iiint_V dV\,|p\alpha\nabla\cdot\mathbf{v}| > \iiint_V dV\,|Q_h| \Longrightarrow \iiint_V dV\,\frac{d^2}{dt^2}\,(\Phi + I) < 0$: El flujo de energía potencial va disminuyendo paulatinamente, y la energía potencial decrece no linealmente. Algunas celdas convectivas pueden formarse y producir precipitación y descargas elétricas, pero no ocurrirían en grandes extensiones espaciales y por largos períodos. Si la humedad es suficiente y ocurre conversión de condensación en precipitación se esper-

arían luego de este proceso valores muy bajos de energía potencial en el volumen de control. Podrían ocurrir también en este caso descargas eléctricas sin precipitación.

2. $\iiint_V dV\,|p\alpha\nabla\cdot\mathbf{v}| = \iiint_V dV\,|Q_h| \Longrightarrow \iiint_V dV\,\frac{d^2}{dt^2}\left(\Phi + I\right) = 0$: A este caso se le denominará acá *Equilibrio Advectivo-Radiativo* (EAR). Toda la advección presente en el volumen de control balancea exactamente el término de flujo calórico. El flujo de energía potencial permanece con un valor constante, así como la energía potencial (que es igual a $g\Delta z(t)$ donde $\Delta z(t)$ es el desplazamiento medio vertical de las parcelas en el volumen de control).

3. $\iiint_V dV\,|p\alpha\nabla\cdot\mathbf{v}| < \iiint_V dV\,|Q_h| \Longrightarrow \iiint_V dV\,\frac{d^2}{dt^2}\left(\Phi + I\right) > 0$: El flujo de energía potencial se incrementa con el tiempo, debido a la advección de humedad en el volumen de control. La energía potencial crece no linealmente. Hay mayor probabilidad de encontrar múltiples celdas convectivas, con mayor desarrollo vertical y extensión espacial, que pueden existir durante períodos de tiempo mayores que en el caso anterior. Dependiendo de las tasas de cambio y de advección, este caso puede estar asociado a precipitaciones de muy alta intensidad y corta duración o de intensidad media/baja y larga duración. Las precipitaciones y las descargas eléctricas pueden ocurrir simultáneamente.

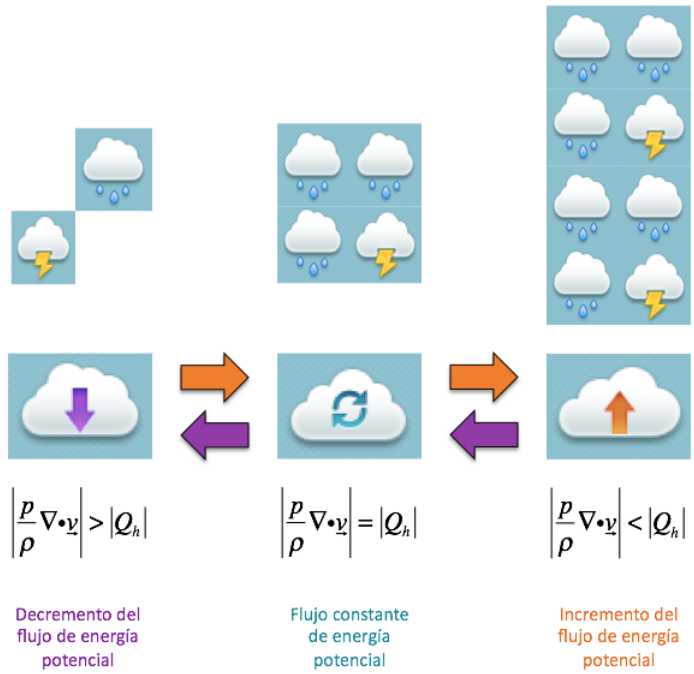


Figura 5.26: Ilustración cualitativa de los casos 1 (izquierda), 2 (centro) y 3 (derecha) de flujo de energía potencial para el volumen de control.

Observando las series de tiempo de las variables y la climatología de la EPDC y vientos se puede asociar estos casos a las épocas del año en las que en las que estas se manifiestan. Está claro que en los primeros tres meses del año prevalece el caso 1. La fuerte actividad ventosa sobre la cuenca aunada a las bajas tasas de radiación que inciden en la zona genera un decremento de la actividad convectivay es justo lo que sucede. A medida que se va incrementando el calentamiento de la región y va disminuyendo el trabajo ejercido por los vientos sobre la cuenca estos dos factores tienden a equilibrarse y la actividad convectiva aumenta con lo que se hace presente el caso 2. Esto es típico del segundo trimestre del año. A partir de allí se crea un desbalance en favor del calentamiento, perteneciente al caso 3, que hace frecuente la formación de celdas tormentosas y cuyo clímax aparece en los meses de agosto y septiembre.

Ampliando un poco más, es inmediato notar que los siguientes subcasos de interés surgen si la advección media es nula o despreciable, $\iiint_V dV\,|p\alpha\nabla\cdot\mathbf{v}| \cong 0$ y el sistema no está ejerciendo trabajo en contra del campo de presión ni recibe inyección de humedad:

– I-a – $Q_h < 0 \Longrightarrow L(c-e) < 0$: : Esto implica que la evaporacin es mayor que la condensacin, y por ende con el paso del tiempo la humedad en el volumen de control disminuye, desaparecen las nubes y aumenta la diafanidad de la atmsfera.

– II-a – $Q_h = 0 \Longrightarrow |\alpha\nabla \cdot \mathbf{F}_{rad}| = |L(c-e)|$: este es formalmente un caso particular de II (aunque formalmente I y III lo incluyen también). Se tiene *Equilibrio Convectivo-Radiativo* (ECR), y entonces $\overline{w} = 0$. El sistema no ingesta humedad, pero mantiene un balance entre la convección y la radiación que limita la cantidad de precipitación y descargas eléctricas.

– III-a – $Q_h > 0 \Longrightarrow L(c-e) > 0$: este es un caso particular de III. El volumen de control cuenta con una humedad inicial y la condensación es mayor que la evaporación. Pueden ocurrir precipitaciones y descargas eléctricas, limitadas por la humedad y energía potencial disponible.

Estos subcasos se podrían visualizar mejor para un estudio de la circulación interdiaria e interhoraria de los vientos en la cuenca.

Tomando en cuenta el comportamiento de las descargas eléctricas y mediante las variables de superficie se puede ver qué términos de las ecuaciones (3.36) y (3.37) tiene más peso en el fenómeno. La componente vertical de los vientos tiene muy poca correlación (-0.268) con la densidad de flashes y con el resto de las variables. Además, los valores de la componente vertical superficial de los vientos tiene unos valores muy pequeõs (del orden de los $0,006\, m\, s^{-1}$) que son despreciables en comparación con las componentes horizontales. Así, este término en los flujos no es relevante en la caracterización de los destellos. El término de las tasas de trabajo en contra del campo de presiones tienen como principal actor la componente meridional de los vientos y también el hecho de que la presión de superficie es relativamente baja ($\sim 980mb$) por lo que los vientos de superficie son los principales precursores de energía cinética en la cuenca. Las pérdidas de energía cinética de las masas de aire debidas a la fricción y a la presión ejercidas sobre la superficie del lago y de tierra firme se pueden observar cuando los vientos alisios arrivan al sur del lago. Estos vientos son la principal fuente de movimiento tangencial a la superficie del lago. En cuanto al calor, éste se provee fundamentalmente por la radiación solar incidente y la inyección de humedad (calor latente) por advección.

5.5. Tabla de Umbrales.

Se presenta a continuación un cuadro con los datos de los umbrales de las medias mensuales para caracterizar la actividad eléctrica en la cuenca. El valor medio máximo calculado para las medias mensuales de la EPDC en la cuenca fue de $2427 Jkg^{-1}$ y la densidad de descargas correspondiente a este registro fue de $0,132 Flash/km^2/dia$. Al aplicar el cálculo de la media espacial a las medias mensuales de la EPDC, el valor máximo que se obtiene es de $1091 Jkg^{-1}$. Se proponen umbrales para determinados valores de la densidad de descargas. La media de la evolución de las descargas es $0,0635 Flash/km^2/dia$ y su desviación estándar es $\sigma = 0{,}0368 Flash/km^2/dia$. Se proponen como valores extremos los puntos mayores a $1,5\sigma$.

Umbrales de actividad eléctrica.				
Actividad	*Baja*	*Media*	*Alta*	*Extrema*
$FLASHES$	$\leq 0,03$	$0,03 - 0,06$	$0,06 - 0,12$	$\geq 0,12$
$EPDC$	≤ 300	$300 - 600$	$600 - 1000$	≥ 1000
T	≤ 22	$22 - 23$	$23 - 25$	≥ 25
Q	$\leq 0,015$	$0,015 - 0,016$	$0,016 - 0,018$	$\geq 0,018$
V	$\leq 2,5$	$2,5 - 3$	$3 - 4$	≥ 4

Cuadro 5.7: Tabla de umbrales para la actividad eléctrica media en la cuenca. Densidad de descargas ($FLASHES$) en $Flash/km^2/dia$, temperaturas (T) en °C, mezcla de humedad Q en $kg\,kg^{-1}$ y vientos meridionales en (m/s)

Capítulo 6

Conclusiones.

1. Después de procesar mediante una serie de códigos en lenguaje NCL los datos de salida de un modelo de investigación y pronóstico de Meteorología y Climatología conocido como WRF y los datos satelitales de descargas eléctricas atmosféricas se lograron establecer los patrones de comportamiento de estas descargas así como su relación con variables meteorológicas de superficie provistas por el modelo.

2. Se obtuvo la climatología mensual multianual de la energía potencial disponible convectiva y de vientos de superficie para el período 1998-2008 a través de un código (ver el apéndice A) que calculó las medias temporales y luego las procesó para obtener la media multinanual. A partir de los gráficos obtenidos de esta climatología se observa que la distribución de esta energía a lo largo de la cuenca del Lago de Maracaibo, que da cuenta de la actividad convectiva durante el año, se presenta de manera unimodal con máximos en el mes de septiembre y mínimos en los meses de enero y febrero. La EPDC se manifiesta principalmente sobre los terrenos bajos de la cuenca y el lago mismo. En cuanto a los vientos, las magnitudes se presentan de manera inversa con mínimos en septiembre y máximos en enero y febrero con la característica de que las principales componentes que intervienen son las meridionales.

3. Posteriormente se calcularon las series de tiempo de las medias mensuales espaciales de todas las variables implicadas, es decir, primero se obtuvieron las medias mensuales y luego se ejecutaron las medias zonales y meridionales para obtener un valor repre-

sentativo de todo el dominio y de cada cuadrantes. Las dos variables más importantes, a saber, las descargas eléctricas y la EPDC, se superpusieron a pares en gráficas cada una con el resto de las variables. Se pudo observar su evolución en los 96 meses (descargas) y 132 meses (variables del WRF.) Además, esto proporcionó un medio visual para cotejar como primera aproximación cualquier correlación aparente entre las variables. En el proceso de obtención de las medias mensuales se identificó el mes con el nivel más alto de EPDC en la cuenca: septiembre del año 2005. Esto se corresponde con el mes de todo el período con la mayor densidad media de descargas eléctricas: 0,14 $flashes\, km^{-2}\, dia^{-1}$.

4. Al observar las series de tiempo conjunta de los flashes y la EPDC para todo el dominio se reconoció que ambas variables siguen un el mismo patrón de comportamiento durante todo el lapso estudiado. Adicionalmente, se observó que para el año 2005 la EPDC promedio supera los 1000 $J.Kg^{-1}$ y se mantiene sobre ese nivel por varios meses. Para el caso de la inhibiciń convectiva (IC) se observa que sigue un comportamiento análogo a los flashes. La EPDC es un buen predictor de la actividad de descargas en la cuenca del Lago de Maracaibo.

5. Fue posible obtener la correlación Spearman entre todas las variables mediante un código NCL con la consiguiente prueba estadística. Se obtuvieron altas correlaciones entre la densidad de flashes detectados y la EPDC. También se observaron vínculos fuertes entre la actividad eléctrica y los valores medios superficiales de las temperaturas y la humedad.

6. Los valores de la Energía Potencial Disponible Convectiva tienen una distribución similar a la de los valores normalizados y estos últimos no presentan ventajas relativas a la hora de relacionarse en el comportamiento de las descargas en la cuenca del Lago de Maracaibo. Sin embargo, para el caso de la Inhibición Convectiva, sus valores normalizados s poseen un comportamiento anticorrelacionado.

7. Se proveyeron umbrales en la Energía Potencial Disponible para convección, temperatura, humedad y vientos meridionales para la descripción el comportamiento mensual

de las descargas eléctricas en la cuenca.

Capítulo 7

Recomendaciones.

Se recomienda llevar a cabo esta metodología usando datos de salida del modelo WRF a mayor resolución. Con esto se puede especificar mejor la fenomenología dentro de la cuenca del Lago de Maracaibo a la par de hacer mapas de correlaciones sobre todo ese dominio.

También se recomienda utilizar datos de pronóstico en vez de los datos de reanálisis para calcular las energías convectivas en la cuenca y ver su relación con los datos de descargas. Esto sería el primer paso para la implementación de una herramienta de pronśtico de actividad eléctrica en la zona. Se podrían usar índices tales como los mencionados en [48] y [49].

Se sugiere llevar a cabo estudios con una mayor resolución temporal (en horas) usando este mismo modelo para observar los momentos del día en el que comportamiento de las variables atmsféricas tienen un mayor impacto en la actividad eléctrica.

Es importante aplicar estas metodologías a todo el territorio nacional para describir los factores que promueven la generación de tormentas y descargas eléctricas y tipificarlas en cada región.

Apéndice A

Algunos Códigos.

Se confeccionaron diversos scripts para efectuar los diferentes cálculos y visualizar sus resultados. A continuación se exhiben sólo algunos de ellos.

Cálculo de climatologías. Para calcular las climatologías de la EPDC e IC se ideó el siguiente script:

```
;************************************************
load "$NCARG_ROOT/lib/ncarg/nclscripts/csm/gsn_code.ncl"
load "$NCARG_ROOT/lib/ncarg/nclscripts/csm/gsn_csm.ncl"
load "$NCARG_ROOT/lib/ncarg/nclscripts/csm/contributed.ncl"
load "$NCARG_ROOT/lib/ncarg/nclscripts/wrf/WRFUserARW.ncl"
;************************************************
begin
 anoa=1998
 mesa=1
 lonmin=-73.
 latmin=8.
 lonmax=-70.
 latmax=12.
 diri = "./" ;
 f1= addfile ("1998_2008.nc","r")
 f2= addfile ("Cata1998_CAPEvars.nc","r")
 h = addfile("LIS_ST2.nc","r")
 archsalid = "Climat_CAPECIN.nc"
 system ("rm -Rf "+archsalid)
 fo = addfile(archsalid , "c") ;
 fo@TITULO = "Salidas Climaticas CAPE y CIN Zulia NOSA30k"
 fo@FUENTE = "Centro de Modelado Cientifico"
 fo@autor = "A. G. Munoz (agmunoz@cmc.org.ve) y J. E. Diaz Lobaton (jlobaton@cmc.org.ve)"
 fo@Procesado = "Centro de Modelado Cientifico (CMC). Universidad del Zulia. Maracaibo. Venezuela. http://cmc.org.ve"
 fo@Observaciones = "Script NCL. Abril 2011"

 llres = True
  llres@ReturnInt = False   ; Return integer values
  locmin = wrf_user_ll_to_ij(f2, lonmin, latmin, llres)
  locmax = wrf_user_ll_to_ij(f2, lonmax, latmax, llres)
  locXmin = locmin(0)
  locYmin = locmin(1)
```

```
  locXmax = locmax(0)
  locYmax = locmax(1)

tini=1096;  Para 98=1096; Aqui va el numero inicial de dias
 anoi=1998; aqui t final

 XLAT  = f1->XLAT
print("leidoXLAT")
 XLON  = f1->XLONG
 CAPECIN = f1->CAPECIN
 flash = h->LRTS_COM_FR({latmin:latmax},{lonmin:lonmax},tini:) ;LRTS_LIS_FR
 x     = h->Day_since_Jan_1_95_COM  ;Day_since_Jan_1_95_LIS
 lat   = h->Latitude({latmin:latmax})
 lon   = h->Longitude({lonmin:lonmax})

;******************************
;Calcular medias de los Flashes.
;******************************
superf=277.*277.;superficie de la celda en km2
  suma=(greg2jul(1998,1,1,-1))
x2=anoi+(x-tini)/365
 ndim = dimsizes(flash)
print(ndim)
  ntim=ndim(2)
  nlat=ndim(0)
  nlon=ndim(1)
  nmos = 12.
  ntimes=103;stringtoint((ntim-1096)/365.*nmos)
print(ntimes)
FLASHmen = new((/nlat,nlon,ntimes/),float)
  ini=0
  anoi=anoa
  mesi=mesa
  print("Procesando Valores Medios")
do i=0,ntimes-1
dt=days_in_month(anoi,mesi)
FLASHmen(:,:,i)=
 dim_avg_Wrap(flash(Latitude|:,Longitude|:,Day_since_Jan_1_95_COM|ini:ini+dt))
ini=ini+dt
print("Mes:"+mesi+"   Ao:"+anoi)
    mesi=mesi+1
    if(mesi.eq.13) then
      mesi=1
      anoi=anoi+1
      print("Mes:"+mesi+"   Ao:"+anoi)
    end if
  end do

;FLASHmen = FLASHmen(month|:,Latitude|:,Longitude|:)
print(FLASHmen)
;*************************
  CAPEclm = clmMonTLL (CAPECIN(:,0,0,:,:))
  CAPEstd = stdMonTLL (CAPECIN(:,0,0,:,:))
  CINclm = clmMonTLL (CAPECIN(:,1,0,:,:))
  CINstd = stdMonTLL (CAPECIN(:,1,0,:,:))
  FLASHclm = clmMonLLT (FLASHmen(:,:,0:95))
  FLASHstd = stdMonLLT (FLASHmen(:,:,0:95))
;*************************************************
MAXCAPE0=0.
MINCAPE0=100000.
do i=0,dimsizes(CAPECIN(:,0,0,0,0))-1
```

```
   medCAPE=CAPECIN(i,0,:,locYmin:locYmax,locXmin:locXmax)
   MAXCAPE = max(medCAPE)
   MINCAPE = min(medCAPE)>0
   if(MAXCAPE.gt.MAXCAPE0)
     MAXCAPE0=MAXCAPE
     tie=i
   end if
     if(MINCAPE.lt.MINCAPE0)
     MINCAPE0=MINCAPE
     tm=i
    end if
end do
tie=tie+1
tm=tm+1
print("El maximo CAPE para el dominio entero
ocurre en el mes "+tie+" con un valor de "+MAXCAPE0)
print("El minimo CAPE ocurre en el mes "+tm+" con un valor de "+MINCAPE0)

;Escritura
 ;Truco necesario (no es culpa de CMC, sino del WRF):
 XLAT!0="time"
 XLAT!1="lat"
 XLAT!2="lon"
 XLON!0="time"
 XLON!1="lat"
 XLON!2="lon"

 fo->CAPEclm=CAPEclm
 fo->CAPEstd=CAPEstd
 fo->CINclm=CINclm
 fo->CINstd=CINstd
 fo->FLASHclm=FLASHclm
 fo->FLASHstd=FLASHstd
 fo->XLAT=XLAT(0:11,:,:)
 fo->XLONG=XLON(0:11,:,:)
 fo->MAXCAPE=MAXCAPE
 fo->MINCAPE=MINCAPE

 att_names = getvaratts(f2)
  if(.not.all(ismissing(att_names))) then
    do i = 0,dimsizes(att_names)-1
      print("copy_fileatts: global attributes->" + att_names(i))
      fo@$att_names(i)$ = f2@$att_names(i)$
   end do
  end if
end
```

Mapas de climatologías. Para graficar los mapas de las climatologías de la EPDC, IC y vientos de superficie se creó el siguiente código:

```
load "$NCARG_ROOT/lib/ncarg/nclscripts/csm/gsn_code.ncl"
load "$NCARG_ROOT/lib/ncarg/nclscripts/csm/gsn_csm.ncl"
load "$NCARG_ROOT/lib/ncarg/nclscripts/wrf/WRFUserARW.ncl"

begin

nmes=12
maxlat=12
minlat=8
maxlon=-70
```

```
minlon=-74
;**********************************************
;**********************************************
;***********FIN INTERVENCION USUARIO*********
  a = addfile("Climat_CAPECIN.nc","r")
  b = addfile("climo_NOSA30k_Vent.nc","r")
  ;lat2d = a->XLAT(0,:,:)
  ;lon2d = a->XLONG(0,:,:)

  opt = True
  opt@returnInt = True
 ;locNO = wrf_user_ll_to_ij (a, minlon, maxlat, opt)
 ;locSE = wrf_user_ll_to_ij (a, maxlon, minlat, opt)

;  type = "x11"
; type = "pdf"
 type = "ps"
; type = "ncgm"

  res = True
  res@tiUseMainAttributes=True
  res@tiMainFontHeightF = 0.06
  res@gsnMaximize=True
  res@Footer=False
  res@MainTitlePos="Center"
  res@InitTime=False
  ;res@gsnDraw       = False          ; do not draw
  ;res@gsnFrame      = False          ; do not advance

mes=(/"Enero","Febrero","Marzo","Abril","Mayo","Junio","Julio",
"Agosto","Septiembre","Octubre","Noviembre","Diciembre"/)
 do per=0,nmes-1
  mesi=per+1
system ("rm -Rf CAPeCIN_climo"+mesi)
  wks = gsn_open_wks(type,"eCaPeVent_climo"+mesi)
  wks1 = gsn_open_wks(type,"eCiNVent_climo"+mesi)
  wks2 = gsn_open_wks(type,"VertVent_climo"+mesi)

  pltres = True
  pltres@gsnMaximize=True
  pltres@vcGlyphStyle = "CurlyVector"

  mpres = True
  mpres@mpGeophysicalLineColor = "Black"
  mpres@mpNationalLineColor    = "Black"
  mpres@mpGridLineColor        = "Black"
  mpres@mpLimbLineColor        = "Black"
  mpres@mpPerimLineColor       = "Black"
  ;mpres@mpOutlineBoundarySets = "National";Geophysical"
  mpres@mpDataSetName = "Earth..4"
  mpres@mpDataBaseVersion = "MediumRes"
  mpres@mpOutlineOn = True
  mpres@mpOutlineBoundarySets = "AllBoundaries"
  mpres@gsnMaximize=True
;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;
;Obtener variables.

    cape = wrf_user_getvar(a,"CAPEclm",-1)
    cin      = wrf_user_getvar(a,"CINclm",-1)
    U        = wrf_user_getvar(b,"Uclm",-1)
    V        = wrf_user_getvar(b,"Vclm",-1)
```

```
    cape@description = "CAPE (J/kg)"
    cin@description = "CIN"
    U@description = "Winds (m/s)"
;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;

;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;
   ; Opciones de graficado de EPDC y CIN
     opts_r = res
     opts_r@cnFillOn                 = True
     opts_r@cnLinesOn                = False;
     opts_r@cnLevelSpacingF          = 25.
     opts_r@cnLevelSelectionMode     = "ManualLevels"
     opts_r@cnMinLevelValF           = 100.
     opts_r@cnMaxLevelValF           = 3000.

     ;opts_r@mpProjection          = "Mercator"
     ;mpres@mpLimitMode           = "Corners"
     ;mpres@mpLeftCornerLatF      = lat2d(locNO(1),locNO(0))
     ;mpres@mpLeftCornerLonF      = lon2d(locNO(1),locNO(0))
     ;mpres@mpRightCornerLatF     = lat2d(locSE(1),locSE(0))
     ;mpres@mpRightCornerLonF     = lon2d(locSE(1),locSE(0))

     opts_r@gsnMaximize          =True
     opts_r@lbOrientation        ="vertical"
     opts_r@lbTitleOn            = False
     opts_r@pmLabelBarSide       ="right"
     opts_r@pmLabelBarOrthogonalPosF= 0.05
     opts_r@cnInfoLabelOn        = False
     opts_r@cnConstFLabelOn      = False
     opts_r@cnFillOn             = True
     pltres@vcRefMagnitudeF = 2.5
     pltres@vcRefLengthF              = 0.045
     pltres@vcRefMagnitudeF = 4
     pltres@vcRefLengthF              = 0.040
     pltres@vcRefAnnoOn = "True"

     opts_l = res
     opts_l@cnFillOn                 = True
     opts_l@cnLinesOn                = False;
     opts_l@cnLevelSpacingF          = 0.002
     opts_l@cnLevelSelectionMode     = "ManualLevels"
     opts_l@cnMinLevelValF           = -0.09
     opts_l@cnMaxLevelValF           = 0.07
     opts_l@gsnMaximize          =True
     opts_l@lbOrientation        ="vertical"
     opts_l@lbTitleOn            = False
     opts_l@pmLabelBarSide       ="right"
     opts_l@pmLabelBarOrthogonalPosF= 0.05
     opts_l@cnInfoLabelOn        = False
     opts_l@cnConstFLabelOn      = False
     opts_l@cnFillOn             = True

      gsn_define_colormap(wks,"WhBlGrYeRe");
      gsn_define_colormap(wks1,"WhBlGrYeRe");
      gsn_define_colormap(wks2,"WhBlGrYeRe");

   ; CAPE (color fill)
     contour = wrf_contour(a,wks,cape(per,:,:), opts_r)
     opts_r@cnLevelSpacingF          = 3.
     opts_r@cnLevelSelectionMode     = "ManualLevels"
     opts_r@cnMinLevelValF           = 10.
```

```
     opts_r@cnMaxLevelValF          = 100.
     contour1 = wrf_contour(a,wks1,cin(per,:,:), opts_r)


     opts_t = res
     opts_t@NoHeaderFooter            = True
     opts_t@cnFillOn                = True
     opts_t@cnLinesOn               = False;
     opts_t@cnLevelSpacingF         = 0.5
     opts_t@cnLevelSelectionMode    = "ManualLevels"
     opts_t@cnMinLevelValF          = 0.
     opts_t@cnMaxLevelValF          = 40.
     opts_t@lbOrientation       ="vertical"
     opts_t@lbTitleOn           = False
     opts_t@pmLabelBarSide      ="right"
     opts_t@pmLabelBarOrthogonalPosF=0.05
     opts_t@cnInfoLabelOn       = False
     opts_t@cnConstFLabelOn     = False
     opts_t@cnFillOn            = True

;***********************************************
;  txres               = True
;  txres@txFontHeightF = 0.014
;  gsn_text_ndc(wks,"CMC - LUZ (www.cmc.org.ve)",0.55,0.030,txres)
;  gsn_text_ndc(wks2,"CMC - LUZ (www.cmc.org.ve)",0.55,0.030,txres)
;**********************************************
   ; HACER GRAFICOS
  uv = wrf_vector(a,wks,U(per,:,:),V(per,:,:),pltres)
  uv1 = wrf_vector(a,wks1,U(per,:,:),V(per,:,:),pltres)
    plot = wrf_map_overlays (a, wks,(/contour,uv/), pltres, mpres)
    plot = wrf_map_overlays (a, wks1,(/contour1,uv1/), pltres, mpres)
print(per)
end do
end
```

Series de tiempo y medias espaciales. Para el cálculo y visualización de las series de tiempo de los promedios espaciales así como el cálculo de las correlaciones se creó el código mostrado más abajo. Sin embargo, sólo incluyen algunas variables y este script sólo calcula las medias y series de tiempo para el dominio mayor. Para los demás cuadrantes se crearon nuevos códigos.

```
;****************************************************
load "$NCARG_ROOT/lib/ncarg/nclscripts/csm/gsn_code.ncl"
load "$NCARG_ROOT/lib/ncarg/nclscripts/csm/gsn_csm.ncl"
load "$NCARG_ROOT/lib/ncarg/nclscripts/wrf/WRFUserARW.ncl"
;****************************************************
begin
;***************************
; Leer datos
;***************************
a = addfile("1998_2008.nc","r")
b = addfile("CATA_TempPrec.nc","r")
c = addfile("CATA_AdHum.nc","r")
d = addfile("CATA_radiacion.nc","r")
f= addfile ("Cata1998_CAPEvars.nc","r")
```

```
g = addfile("CATA_pres.nc","r")
h = addfile("LIS_ST2.nc","r")
j = addfile("CATA_vent.nc","r")

 fils=systemfunc ("ls /home/joaco/Documentos/Trabajo_Especial_de_Grado/Catatumbo/NCAPENCIN*")
 beta = addfiles (fils, "r") ; notar la "s"
 f2 = addfile("NCAPENCIN1998.nc","r")
ListSetType (beta, "cat") ; concatenar

 anoa=1998
 mesa=1
 lonmin=-73.
 latmin=8.
 lonmax=-70.
 latmax=10.
 llres = True
  llres@ReturnInt = False   ; Return integer values
  locmin = wrf_user_ll_to_ij(f, lonmin, latmin, llres)
  locmax = wrf_user_ll_to_ij(f, lonmax, latmax, llres)
  locXmin = locmin(0)
  locYmin = locmin(1)
  locXmax = locmax(0)
  locYmax = locmax(1)

 tini=1096;  Para 98=1096; Aqui va el numero inicial de dias
 anoi=1998; aqui t final

 XLAT  = a->XLAT
 XLON  = a->XLONG
 EPDC  = a->CAPECIN
    U  = c->Umen
    V  = c->Vmen
    W  = j->W14men
    Q  = c->Q2men
  Tem  = b->T
 PSFC  = g->PSFCmen
  PSFC = PSFC / 100.
  BAL  = d->DifRadmen
   flash = h->LRTS_COM_FR({latmin:latmax},{lonmin:lonmax},tini:) ;LRTS_LIS_FR
 x     = h->Day_since_Jan_1_95_COM  ;Day_since_Jan_1_95_LIS
 lat   = h->Latitude({latmin:latmax})
 lon   = h->Longitude({lonmin:lonmax})
ncape = wrf_user_getvar(beta,"NCAPE",-1)

time = fspan(1998,2009,132)
times = fspan(1998,2009,132)
;times = fspan(1998,2006,103)
timer= fspan(1998,2006,114)

superf=277.*277.;superficie de la celda en km2
  suma=(greg2jul(1998,1,1,-1))
x2=anoi+(x-tini)/365
 ndim = dimsizes(flash)
print(ndim)
  ntim=ndim(2)
  nlat=ndim(0)
  nlon=ndim(1)
  nmos = 12.
  ntimes=103;stringtoint((ntim-1096)/365.*nmos)
print(ntimes)
medeCAPE = new(dimsizes(EPDC(:,0,0,0,0)),"float")
```

```
do i=0,dimsizes(EPDC(:,0,0,0,0))-1
   medeCAPE(i)=dim_avg_Wrap(dim_avg_Wrap(EPDC(i,0,0,locYmin:locYmax,locXmin:locXmax)))
end do
medCAPE = new(ntimes,"float")
do i=0,ntimes-1
   medCAPE(i)=dim_avg_Wrap(dim_avg_Wrap(EPDC(i,0,0,locYmin:locYmax,locXmin:locXmax)))
end do
medeNCAPE = new(dimsizes(ncape(:,26,0,0)),"float")
do i=0,dimsizes(ncape(:,26,0,0))-1
   medeNCAPE(i)=dim_avg_Wrap(dim_avg_Wrap(ncape(i,26,locYmin:locYmax,locXmin:locXmax)))
end do
medNCAPE = new(ntimes,"float")
do i=0,ntimes-1
   medNCAPE(i)=dim_avg_Wrap(dim_avg_Wrap(ncape(i,26,locYmin:locYmax,locXmin:locXmax)))
end do
FLASHmen = new((/nlat,nlon,ntimes/),float)
  ini=0
  anoi=anoa
  mesi=mesa
  print("Procesando Valores Medios")
  do i=0,ntimes-1
    dt=days_in_month(anoi,mesi)
    FLASHmen(:,:,i)=dim_avg_Wrap(flash(Latitude|:,Longitude|:,Day_since_Jan_1_95_COM|ini:ini+dt))
  ini=ini+dt
print("Mes:"+mesi+"   Ao:"+anoi)
    mesi=mesi+1
    if(mesi.eq.13) then
      mesi=1
      anoi=anoi+1
      print("Mes:"+mesi+"   Ao:"+anoi)
    end if
  end do

print(FLASHmen)
medeFLASH = new(ntimes,"float")
printVarSummary(medeFLASH)
do i=0,ntimes-1
   medeFLASH(i)=dim_avg_n_Wrap(dim_avg_n_Wrap(FLASHmen(:,:,i),1),0)
end do
print(medeFLASH(0:10))

medV = new(dimsizes(V(:,0,0)),"float")
medU = new(dimsizes(U(:,0,0)),"float")
medW = new(dimsizes(W(:,0,0)),"float")
do i=0,dimsizes(U(:,0,0))-1
   medU(i)=dim_avg_Wrap(dim_avg_Wrap(U(i,locYmin:locYmax,locXmin:locXmax)))
   medV(i)=dim_avg_Wrap(dim_avg_Wrap(V(i,locYmin:locYmax,locXmin:locXmax)))
   medW(i)=dim_avg_Wrap(dim_avg_Wrap(W(i,locYmin:locYmax,locXmin:locXmax)))
end do
mediaV = new(ntimes,"float")
mediaU = new(ntimes,"float")
mediaW = new(ntimes,"float")
do i=0,ntimes-1
   mediaU(i)=dim_avg_Wrap(dim_avg_Wrap(U(i,locYmin:locYmax,locXmin:locXmax)))
   mediaV(i)=dim_avg_Wrap(dim_avg_Wrap(V(i,locYmin:locYmax,locXmin:locXmax)))
   mediaW(i)=dim_avg_Wrap(dim_avg_Wrap(W(i,locYmin:locYmax,locXmin:locXmax)))
end do

opt = True
  opt@PrintStat = True
  statb = stat_dispersion(medeFLASH, opt )
```

```
opt1 = True
  opt1@PrintStat = True
  statb = stat_dispersion(medCAPE, opt1 )
medQ = new(dimsizes(Q(:,0,0)),"float")
do i=0,dimsizes(U(:,0,0))-1
   medQ(i)=dim_avg_Wrap(dim_avg_Wrap(Q(i,locYmin:locYmax,locXmin:locXmax)))
end do
mediaQ = new(ntimes,"float")
do i=0,ntimes-1
   mediaQ(i)=dim_avg_Wrap(dim_avg_Wrap(Q(i,locYmin:locYmax,locXmin:locXmax)))
end do
medT = new(dimsizes(Tem(:,0,0)),"float")
do i=0,dimsizes(Tem(:,0,0))-1
   medT(i)=dim_avg_Wrap(dim_avg_Wrap(Tem(i,locYmin:locYmax,locXmin:locXmax)))
end do
mediaT = new(ntimes,"float")
do i=0,ntimes-1
   mediaT(i)=dim_avg_Wrap(dim_avg_Wrap(Tem(i,locYmin:locYmax,locXmin:locXmax)))
end do
medePSFC = new(dimsizes(PSFC(:,0,0)),"float")
do i=0,dimsizes(PSFC(:,0,0))-1
   medePSFC(i)=dim_avg_Wrap(dim_avg_Wrap(PSFC(i,locYmin:locYmax,locXmin:locXmax)))
end do
mediaPSFC = new(ntimes,"float")
do i=0,ntimes-1
   mediaPSFC(i)=dim_avg_Wrap(dim_avg_Wrap(PSFC(i,locYmin:locYmax,locXmin:locXmax)))
end do
medBAL = new(dimsizes(BAL(:,0,0)),"float")
do i=0,dimsizes(BAL(:,0,0))-1
   medBAL(i)=dim_avg_Wrap(dim_avg_Wrap(BAL(i,locYmin:locYmax,locXmin:locXmax)))
end do
mediaBAL = new(ntimes,"float")
do i=0,ntimes-1
   mediaBAL(i)=dim_avg_Wrap(dim_avg_Wrap(BAL(i,locYmin:locYmax,locXmin:locXmax)))
end do

rc    = regline(mediaV,medeFLASH)
                              ; Note use of attributes
      df   = rc@nptxy-2
      prob = (1 - betainc(df/(df+rc@tval^2), df/2.0, 0.5) )

      yReg = rc*x + rc@yintercept   ; NCL array notation
                                    ; yReg is same length as x, y
      print(rc)

      print("prob="+prob)

      print(yReg)

print("Correlacion de Spearman (LISOTD vs PSFC):" + spcorr(mediaPSFC,medeFLASH))
siglvl= 0.01           ; a-priori specified sig level
  prob  = rtest(spcorr(mediaPSFC,medeFLASH),ntimes, 0)
if (prob.lt.siglvl) then
  print("La correlacion es estadisticamente significativa a un limite de confianza de p="+siglvl+" ,
por lo que se rechaza la hipotesis nula. (Significancia= "+(1-prob)*100+"%)")
end if

print("Correlacion de Spearman (LISOTD vs CAPE):" + spcorr(medCAPE,medeFLASH))
siglvl= 0.01           ; a-priori specified sig level
  prob  = rtest(spcorr(medCAPE,medeFLASH),ntimes, 0)
if (prob.lt.siglvl) then
```

```
  print("La correlacion es estadisticamente significativa a un limite de confianza de p="+siglvl+" ,
por lo que se rechaza la hipotesis nula. (Significancia= "+(1-prob)*100+"%)")
end if

print("Correlacion de Spearman (LISOTD vs NCAPE):" + spcorr(medNCAPE,medeFLASH))
siglvl= 0.01           ; a-priori specified sig level
  prob  = rtest(spcorr(medNCAPE,medeFLASH),ntimes, 0)
if (prob.lt.siglvl) then
  print("La correlacion es estadisticamente significativa a un limite de confianza de p="+siglvl+" ,
por lo que se rechaza la hipotesis nula. (Significancia= "+(1-prob)*100+"%)")
end if

print("Correlacion de Spearman (TV vs LISOTD):" + spcorr(medeFLASH,TVmen))
siglvl= 0.01           ; a-priori specified sig level
  prob  = rtest(spcorr(medeFLASH,TVmen),ntimes, 0)
if (prob.lt.siglvl) then
  print("La correlacion es estadisticamente significativa a un limite de confianza de p="+siglvl+" ,
 por lo que se rechaza la hipotesis nula. (Significancia= "+(1-prob)*100+"%)")
end if

print("Correlacion de Spearman (QV vs LISOTD):" + spcorr(medeFLASH,TVmen))
siglvl= 0.01           ; a-priori specified sig level
  prob  = rtest(spcorr(medeFLASH,QVmen),ntimes, 0)
if (prob.lt.siglvl) then
  print("La correlacion es estadisticamente significativa a un limite de confianza de p="+siglvl+" ,
por lo que se rechaza la hipotesis nula. (Significancia= "+(1-prob)*100+"%)")
end if

print("Correlacion de Spearman (LISOTD vs U):" + spcorr(mediaU,medeFLASH))
siglvl= 0.01           ; a-priori specified sig level
  prob  = rtest(spcorr(mediaU,medeFLASH),ntimes, 0)
if (prob.lt.siglvl) then
  print("La correlacion es estadisticamente significativa a un limite de confianza de p="+siglvl+" ,
por lo que se rechaza la hipotesis nula. (Significancia= "+(1-prob)*100+"%)")
end if

print("Correlacion de Spearman (LISOTD vs V):" + spcorr(mediaV,medeFLASH))
siglvl= 0.01           ; a-priori specified sig level
  prob  = rtest(spcorr(mediaV,medeFLASH),ntimes, 0)
if (prob.lt.siglvl) then
  print("La correlacion es estadisticamente significativa a un limite de confianza de p="+siglvl+" ,
por lo que se rechaza la hipotesis nula. (Significancia= "+(1-prob)*100+"%)")
end if

print("Correlacion de Spearman (LISOTD vs W):" + spcorr(mediaW,medeFLASH))
siglvl= 0.01           ; a-priori specified sig level
  prob  = rtest(spcorr(mediaW,medeFLASH),ntimes, 0)
if (prob.lt.siglvl) then
  print("La correlacion es estadisticamente significativa a un limite de confianza de p="+siglvl+" ,
por lo que se rechaza la hipotesis nula. (Significancia= "+(1-prob)*100+"%)")
end if

print("Correlacion de Spearman (LISOTD vs Q):" + spcorr(mediaQ,medeFLASH))
siglvl= 0.01           ; a-priori specified sig level
  prob  = rtest(spcorr(mediaQ,medeFLASH),ntimes, 0)
if (prob.lt.siglvl) then
  print("La correlacion es estadisticamente significativa a un limite de confianza de p="+siglvl+" ,
 por lo que se rechaza la hipotesis nula. (Significancia= "+(1-prob)*100+"%)")
end if

print("Correlacion de Spearman (LISOTD vs T):" + spcorr(mediaT,medeFLASH))
```

```
siglvl= 0.01           ; a-priori specified sig level
  prob  = rtest(spcorr(mediaT,medeFLASH),ntimes, 0)
if (prob.lt.siglvl) then
  print("La correlacion es estadisticamente significativa a un limite de confianza de p="+siglvl+" ,
por lo que se rechaza la hipotesis nula. (Significancia= "+(1-prob)*100+"%)")
end if

print("Correlacion de Spearman (LISOTD vs BAL):" + spcorr(mediaBAL,medeFLASH))
siglvl= 0.01           ; a-priori specified sig level
  prob  = rtest(spcorr(mediaBAL,medeFLASH),ntimes, 0)
if (prob.lt.siglvl) then
  print("La correlacion es estadisticamente significativa a un limite de confianza de p="+siglvl+" ,
por lo que se rechaza la hipotesis nula. (Significancia= "+(1-prob)*100+"%)")
end if

;***************************
; plot parameters
;***************************
  wks = gsn_open_wks("ps","CAPEUV")
  wks1 = gsn_open_wks("ps","CAPETemp")
  wks2 = gsn_open_wks("ps","CAPEPres")
  wks3 = gsn_open_wks("ps","CAPEBAL")
  wks4 = gsn_open_wks("ps","CAPEQ")
 ;wks5 = gsn_open_wks("ps","FLASHCape")
  ;wks6 = gsn_open_wks("ps","FLASHU")
  ;wks7 = gsn_open_wks("ps","FLASHV")
;  wks8 = gsn_open_wks("ps","FLASHT")
 ; wks9 = gsn_open_wks("ps","FLASHPres")
 ; wks10 = gsn_open_wks("ps","FLASHBal")
 ; wks11 = gsn_open_wks("ps","FLASHQ")
 ; wks12 = gsn_open_wks("ps","FLASH")
  ;wks13 =gsn_open_wks("ps","CAPEW")
 ; wks14 =gsn_open_wks("ps","FLASHW")
  ;wks15 = gsn_open_wks("ps","NCAPEUV")
  ;wks15 =gsn_open_wks("ps","FLASHNcape")

  resL           = True
  resL@gsnFrame  = False
  resL@gsnDraw   = False
  resL@vpXF      = 0.1
  resL@vpWidthF  = 0.67
  resL@vpHeightF = 0.20
  resL@tmXBMode            = "Manual"
  resL@tmXBTickStartF = 1998.
  resL@tmXBTickEndF = 2006.
  resL@trXMinF = resL@tmXBTickStartF
  resL@trXMaxF = resL@tmXBTickEndF
  resL@tmXBValues        = time
  resL@xyLineColor       = "NavyBlue"
  resL@xyLineThicknesses = 2.
  resL@tmXTOn              = False
  resL@tmYLMinorOn         = False
  resL@tmXBLabelFontHeightF = 0.01
  resL@tmXMajorGrid                = True
  resL@tmYMajorGrid                = True
  resL@tmXMajorGridThicknessF      = 1.0
  resL@tmYMajorGridThicknessF      = 1.0
  resL@tmXMajorGridLineDashPattern = 2
  resL@tmYMajorGridLineDashPattern = 2

  resL@tiYAxisString               ="EPDCN  J/(kg.m)"
```

```
resL@tiYAxisFontColor            = resL@xyLineColor
resL@tiYAxisFontHeightF          = 0.015
resL@tmXBPrecision=4
resL@tiXAxisString         ="An~H-13V2F35~D~FV-2H3~o"
resL@tiXAxisFontHeightF          = 0.015
resL@gsnMaximize                 = True

resC           = True
resC@gsnFrame  = False
resC@gsnDraw   = False
resC@vpXF      = 0.1
resC@vpWidthF  = 0.67
resC@vpHeightF = 0.20
resC@tmXBMode            = "Manual"
resC@tmXBTickStartF = 1998.
resC@tmXBTickEndF = 2006.
resC@trXMinF = resL@tmXBTickStartF
resC@trXMaxF = resL@tmXBTickEndF
resC@trXMinF = 1998.
resC@trXMaxF = 2009.
resC@tmXBValues        = time
resC@xyLineColor       = "NavyBlue"
resC@xyLineThicknesses = 2.
resC@tmXTOn              = False
resC@tmYLMinorOn         = False
resC@tmXBLabelFontHeightF = 0.01
resC@tmXMajorGrid                = True
resC@tmYMajorGrid                = True
resC@tmXMajorGridThicknessF      = 1.0
resC@tmYMajorGridThicknessF      = 1.0
resC@tmXMajorGridLineDashPattern = 2
resC@tmYMajorGridLineDashPattern = 2

resC@tiYAxisString               = "EPDC (J/kg)"
resC@tiYAxisFontColor            = resL@xyLineColor
resC@tiYAxisFontHeightF          = 0.015
resC@tmXBPrecision=4
resC@tiXAxisString         = "An~H-13V2F35~D~FV-2H3~o"
resC@tiXAxisFontHeightF          = 0.015

resR                        = True
resR@xyLineColor            = "Brown"
resR@xyDashPatterns         = 1
resR@xyLineThicknesses      = 2
resR@trXMinF = resL@trXMinF
resR@trXMaxF = resL@trXMaxF
resR@tiYAxisString    = "Vientos Zonales   m/s"
resR@tiYAxisFontColor = resR@xyLineColor
resR@trYReverse              = True
resR@tmYRMinorOn         = False


resLa                        = True
resLa@trXMinF                = resL@trXMinF
resLa@trXMaxF                = resL@trXMaxF
resLa@xyDashPatterns         = 2
resLa@xyLineThicknesses      = 2
resLa@xyLineColor            = "Blue"
  resLa@tiYAxisString    = "Vientos Meridionales   m/s"
resLa@tiYAxisFontColor = resLa@xyLineColor
resLa@trYReverse              = True
```

```
resLa@tmYRMinorOn = False
resLa@amOrthogonalPosF = 0.65

resR1                        = True
resR1@xyLineColor            = "Brown"
resR1@xyDashPatterns         = 1
resR1@xyLineThicknesses      = 2
resR1@trXMinF = resL@trXMinF
resR1@trXMaxF = resL@trXMaxF
resR1@tiYAxisString    = "Temperatura   Celsius"
resR1@tiYAxisFontColor = resR@xyLineColor
resR1@tmYRMinorOn         = False

resR2                        = True
resR2@xyLineColor            = "Brown"
resR2@xyDashPatterns         = 1
resR2@xyLineThicknesses      = 2
resR2@tmYLMode            = "Manual"
resR2@trXMinF = resL@trXMinF
resR2@trXMaxF = resL@trXMaxF
resR2@tiYAxisString    = "Presio~H-13V2F35~B~FV-2H3~n de Superficie   mb"   ; axis string
resR2@tiYAxisFontColor = resR@xyLineColor
resR2@tmYLPrecision=4
resR2@tmYRMinorOn         = False

resR3                        = True
resR3@xyLineColor            = "Brown"
resR3@xyDashPatterns         = 1
resR3@xyLineThicknesses      = 2
resR3@trXMinF = resL@trXMinF
resR3@trXMaxF = resL@trXMaxF
resR3@tiYAxisString    = "Radiacio~H-13V2F35~B~FV-2H3~n Incidente  W.m~S~-2~N"
resR3@tiYAxisFontColor = resR@xyLineColor
resR3@tmYRMinorOn         = False

resR4                        = True
resR4@xyLineColor            = "Blue"
resR4@xyDashPatterns         = 1
resR4@xyLineThicknesses      = 2
resR4@trXMinF = resL@trXMinF
resR4@trXMaxF = resL@trXMaxF
resR4@tiYAxisString    = "Vapor de Agua (mezcla)  kg.kg~S~-1~N"
resR4@tiYAxisFontColor = resR4@xyLineColor
resR4@tmYRMinorOn         = False


resRF                        = True
resRF@vpWidthF  = 0.63            ;
resRF@vpHeightF = 0.20
resRF@xyLineColor            = "black"
resRF@xyDashPatterns         = 1
resRF@xyLineThicknesses      = 2
resRF@tmXTOn              = False
resRF@tmYLMinorOn         = False
resRF@tmXBPrecision=4
resRF@tmXBLabelFontHeightF = 0.01
resRF@trXMinF = resL@trXMinF
resRF@trXMaxF = resL@trXMaxF
resRF@tiYAxisString    ="Descargas (Flashes/km~S~2~N~/dia)"
resRF@tiYAxisFontHeightF          = 0.015
resRF@tiXAxisString         = An~H-13V2F35~D~FV-2H3~o"
```

```
  resRF@tiXAxisFontHeightF          = 0.015
  resRF@tiYAxisFontColor = resRF@xyLineColor
  resRF@tmYRMinorOn         = False
  resRF@gsnMaximize                 = True

; CREAR GRAFICOS
  plot = gsn_csm_xy3(wks,time,medeCAPE,medV,medU,resL,resLa,resR)
 ; plotw = gsn_csm_xy2(wks13,time,medeCAPE,medW,resL,resR5)
  plot1 = gsn_csm_xy2(wks1,time,medeCAPE,medT,resL,resR1)
  plot2 = gsn_csm_xy2(wks2,time,medeCAPE,medePSFC,resL,resR2)
 ; plot3 = gsn_csm_xy2(wks3,time,medeCAPE,medBAL,resL,resR3)
  plot4 = gsn_csm_xy2(wks4,time,medeCAPE,medQ,resL,resR4)
 ; plot5 = gsn_csm_xy2(wks5,times,medeFLASH,medCAPE,resRF,resC)

; plot6 = gsn_csm_xy2(wks6,times,medeFLASH,mediaU,resRF,resR)
;  plot7 = gsn_csm_xy3(wks7,times,medeFLASH,mediaV,mediaU,resRF,resLa,resR)
 ; plotfw = gsn_csm_xy2(wks13,times,medeFLASH,mediaV,resRF,resR5)
  ;plot8 = gsn_csm_xy3(wks8,times,medeFLASH,mediaT,mediaQ,resRF,resR1,resR4)
  ;plot9 = gsn_csm_xy2(wks9,times,medeFLASH,mediaPSFC,resRF,resR2)
  ;plot10 = gsn_csm_xy2(wks10,times,medeFLASH,mediaBAL,resRF,resR3)
  ;plot11 = gsn_csm_xy2(wks11,times,medeFLASH,mediaQ,resRF,resR4)
  ;plot = gsn_csm_xy2(wks15,time,medeFLASH,medNCAPE,resRF,resL)
  ;plot12 = gsn_csm_xy(wks12,time,medeFLASH,resRF)

end
```

Cálculo de la EPDCN e ICN. Lo que se muestra a continuación es la modificación de una subrutina ForTran (intríseca en el NCL) para que además de calcular la EPDC e IC obtenga también sus valores normalizados.

```
 c -----------------------------------------------------------------
C NCLFORTSTART
      SUBROUTINE DCAPECALC3D(PRS,TMK,QVP,GHT,TER,SFP,CAPE,CIN,NCAPE,
     +                       NCIN,MIY,MJX,
     +                       MKZH,I3DFLAG,TER_FOLLOW,PSAFILE)
c
      IMPLICIT NONE
      INTEGER MIY,MJX,MKZH,I3DFLAG,TER_FOLLOW
      DOUBLE PRECISION PRS(MIY,MJX,MKZH)
      DOUBLE PRECISION TMK(MIY,MJX,MKZH)
      DOUBLE PRECISION QVP(MIY,MJX,MKZH)
      DOUBLE PRECISION GHT(MIY,MJX,MKZH)
      DOUBLE PRECISION TER(MIY,MJX)
      DOUBLE PRECISION SFP(MIY,MJX)
      DOUBLE PRECISION CAPE(MIY,MJX,MKZH)
      DOUBLE PRECISION NCAPE(MIY,MJX,MKZH)
      DOUBLE PRECISION CIN(MIY,MJX,MKZH)
      DOUBLE PRECISION NCIN(MIY,MJX,MKZH)
      CHARACTER*(*) PSAFILE
C NCLEND
c Local variables
      INTEGER I,J,K,ILCL,IUP,KEL,KK,KLCL,KLEV,KLFC,KMAX,KPAR,KPAR1,KPAR2
      INTEGER MM,NN
      DOUBLE PRECISION DAVG,ETHMAX,Q,T,P,E,ETH,TLCL,ZLCL
      DOUBLE PRECISION CP,EPS,GAMMA,GAMMAMD,RGAS,RGASMD,TLCLC1,TLCLC2,
     +                 TLCLC3,TLCLC4
      DOUBLE PRECISION CPMD,THTECON1,THTECON2,THTECON3
      DOUBLE PRECISION CELKEL,EZERO,ESLCON1,ESLCON2,GRAV,THECON1,
     +                 THECON2,THECON3
      DOUBLE PRECISION PAVG,VIRTUAL,P1,P2,PP1,PP2,TH,TOTTHE,TOTQVP,
```

```
     +                TOTPRS
      DOUBLE PRECISION CPM,DELTAP,ETHPARI,GAMMAM,GHTPARI,QVPPARI,
     +                PRSPARI,TMKPARI
      DOUBLE PRECISION FACDEN,FAC1,FAC2,QVPLIFT,TMKLIFT,TVENV,TVLIFT,
     +                GHTLIFT
      DOUBLE PRECISION ESLIFT,TMKENV,QVPENV,TONPSADIABAT
      DOUBLE PRECISION BENAMIN,DZ,Z,PUP,PDN
      DOUBLE PRECISION BUOY(150),ZREL(150),BENACCUM(150),
     +                PRSF(MIY,MJX,MKZH)
      DOUBLE PRECISION PSADITHTE(150),PSADIPRS(150),PSADITMK(150,150)
c
C The comments were taken from a Mark Stoelinga email, 23 Apr 2007,
C in response to a user getting the "Outside of lookup table bounds"
C error message.
C
C TMKPARI  - Initial temperature of parcel, K
C    Values of 300 okay. (Not sure how much from this you can stray.)
C
C PRSPARI - Initial pressure of parcel, hPa
C    Values of 980 okay. (Not sure how much from this you can stray.)
C
C THTECON1, THTECON2, THTECON3
C     These are all constants, the first in K and the other two have
C     no units.  Values of 3376, 2.54, and 0.81 were stated as being
C     okay.
C
C TLCL - The temperature at the parcel's lifted condensation level, K
C        should be a reasonable atmospheric temperature around 250-300 K
C        (398 is "way too high")
C
C QVPPARI - The initial water vapor mixing ratio of the parcel,
C           kg/kg (should range from 0.000 to 0.025)
C
c Constants
      IUP = 6
      CELKEL = 273.15D0
      GRAV = 9.81D0
C hPa
      EZERO = 6.112D0
      ESLCON1 = 17.67D0
      ESLCON2 = 29.65D0
      EPS = 0.622D0
C J/K/kg
      RGAS = 287.04D0
C  J/K/kg  Note: not using Bolton's value of 1005.7
      CP = 1004.D0
      GAMMA = RGAS/CP
C  cp_moist=cp*(1.+cpmd*qvp)
      CPMD = .887D0
C  rgas_moist=rgas*(1.+rgasmd*qvp)
      RGASMD = .608D0
C  gamma_moist=gamma*(1.+gammamd*qvp)
      GAMMAMD = RGASMD - CPMD
      TLCLC1 = 2840.D0
      TLCLC2 = 3.5D0
      TLCLC3 = 4.805D0
      TLCLC4 = 55.D0
C  K
      THTECON1 = 3376.D0
      THTECON2 = 2.54D0
      THTECON3 = .81D0
```

```
c
c  Calculated the pressure at full sigma levels (a set of pressure
c  levels that bound the layers represented by the vertical grid points)

      CALL DPFCALC(PRS,SFP,PRSF,MIY,MJX,MKZH,TER_FOLLOW)
c
c  Before looping, set lookup table for getting temperature on
c  a pseudoadiabat.
c
      CALL DLOOKUP_TABLE(PSADITHTE,PSADIPRS,PSADITMK,PSAFILE)
c
C   do j=1,mjx-1
      DO J = 1,MJX
C   do i=1,miy-1
          DO I = 1,MIY
              CAPE(I,J,1) = 0.D0
              CIN(I,J,1) = 0.D0
c
              IF (I3DFLAG.EQ.1) THEN
                  KPAR1 = 2
                  KPAR2 = MKZH
              ELSE
c
c      Find parcel with max theta-e in lowest 3 km AGL.
c
                  ETHMAX = -1.D0
                  DO K = MKZH,1,-1
                      IF (GHT(I,J,K)-TER(I,J).LT.3000.D0) THEN
                          Q = MAX(QVP(I,J,K),1.D-15)
                          T = TMK(I,J,K)
                          P = PRS(I,J,K)
                          E = Q*P/ (EPS+Q)
                          TLCL = TLCLC1/ (LOG(T**TLCLC2/E)-TLCLC3) +
     +                           TLCLC4
                          ETH = T* (1000.D0/P)**
     +                          (GAMMA* (1.D0+GAMMAMD*Q))*
     +                          EXP((THTECON1/TLCL-THTECON2)*Q*
     +                          (1.D0+THTECON3*Q))
                          IF (ETH.GT.ETHMAX) THEN
                              KLEV = K
                              ETHMAX = ETH
                          END IF
                      END IF
                  END DO
                  KPAR1 = KLEV
                  KPAR2 = KLEV
c
c      Establish average properties of that parcel
c         (over depth of approximately davg meters)
c
c         davg=.1
                  DAVG = 500.D0
                  PAVG = DAVG*PRS(I,J,KPAR1)*GRAV/
     +                (RGAS*VIRTUAL(TMK(I,J,KPAR1),QVP(I,J,KPAR1)))
                  P2 = MIN(PRS(I,J,KPAR1)+.5D0*PAVG,PRSF(I,J,MKZH))
                  P1 = P2 - PAVG
                  TOTTHE = 0.D0
                  TOTQVP = 0.D0
                  TOTPRS = 0.D0
                  DO K = MKZH,2,-1
                      IF (PRSF(I,J,K).LE.P1) GO TO 35
```

```
                    IF (PRSF(I,J,K-1).GE.P2) GO TO 34
                    P = PRS(I,J,K)
                    PUP = PRSF(I,J,K)
                    PDN = PRSF(I,J,K-1)
                    Q = MAX(QVP(I,J,K),1.D-15)
                    TH = TMK(I,J,K)* (1000.D0/P)**
     +                   (GAMMA* (1.D0+GAMMAMD*Q))
                    PP1 = MAX(P1,PDN)
                    PP2 = MIN(P2,PUP)
                    IF (PP2.GT.PP1) THEN
                        DELTAP = PP2 - PP1
                        TOTQVP = TOTQVP + Q*DELTAP
                        TOTTHE = TOTTHE + TH*DELTAP
                        TOTPRS = TOTPRS + DELTAP
                    END IF
   34               CONTINUE
                END DO
   35           CONTINUE
                QVPPARI = TOTQVP/TOTPRS
                TMKPARI = (TOTTHE/TOTPRS)*
     +                (PRS(I,J,KPAR1)/1000.D0)** (GAMMA*
     +                (1.D0+GAMMAMD*QVP(I,J,KPAR1)))
            END IF
c
            DO KPAR = KPAR1,KPAR2
c
c   Calculate temperature and moisture properties of parcel
c     (Note, qvppari and tmkpari already calculated above for 2D case.)
c
                IF (I3DFLAG.EQ.1) THEN
                    QVPPARI = QVP(I,J,KPAR)
                    TMKPARI = TMK(I,J,KPAR)
                END IF
                PRSPARI = PRS(I,J,KPAR)
                GHTPARI = GHT(I,J,KPAR)
                GAMMAM = GAMMA* (1.D0+GAMMAMD*QVPPARI)
                CPM = CP* (1.D0+CPMD*QVPPARI)
c
                E = MAX(1.D-20,QVPPARI*PRSPARI/ (EPS+QVPPARI))
                TLCL = TLCLC1/ (LOG(TMKPARI**TLCLC2/E)-TLCLC3) +
     +                 TLCLC4
                ETHPARI = TMKPARI* (1000.D0/PRSPARI)**
     +                (GAMMA* (1.D0+GAMMAMD*QVPPARI))*
     +                EXP((THTECON1/TLCL-THTECON2)*QVPPARI*
     +                (1.D0+THTECON3*QVPPARI))
                ZLCL = GHTPARI + (TMKPARI-TLCL)/ (GRAV/CPM)
c
c   Calculate buoyancy and relative height of lifted parcel at
c   all levels, and store in bottom up arrays.  Add a level at the LCL,
c   and at all points where buoyancy is zero.
c
C  for arrays that go bottom to top
                KK = 0
                ILCL = 0
                IF (GHTPARI.GE.ZLCL) THEN
c
c     initial parcel already saturated or supersaturated.
c
                    ILCL = 2
                    KLCL = 1
                END IF
```

```
                DO K = KPAR,1,-1
C  for arrays that go bottom to top
   33                KK = KK + 1
C  model level is below LCL
                     IF (GHT(I,J,K).LT.ZLCL) THEN
                         QVPLIFT = QVPPARI
                         TMKLIFT = TMKPARI - GRAV/CPM*
     +                            (GHT(I,J,K)-GHTPARI)
                         TVENV = VIRTUAL(TMK(I,J,K),QVP(I,J,K))
                         TVLIFT = VIRTUAL(TMKLIFT,QVPLIFT)
                         GHTLIFT = GHT(I,J,K)
                     ELSE IF (GHT(I,J,K).GE.ZLCL .AND. ILCL.EQ.0) THEN
c
c     This model level and previous model level straddle the LCL,
c     so first create a new level in the bottom-up array, at the LCL.
c
                         TMKLIFT = TLCL
                         QVPLIFT = QVPPARI
                         FACDEN = GHT(I,J,K) - GHT(I,J,K+1)
                         FAC1 = (ZLCL-GHT(I,J,K+1))/FACDEN
                         FAC2 = (GHT(I,J,K)-ZLCL)/FACDEN
                         TMKENV = TMK(I,J,K+1)*FAC2 + TMK(I,J,K)*FAC1
                         QVPENV = QVP(I,J,K+1)*FAC2 + QVP(I,J,K)*FAC1
                         TVENV = VIRTUAL(TMKENV,QVPENV)
                         TVLIFT = VIRTUAL(TMKLIFT,QVPLIFT)
                         GHTLIFT = ZLCL
                         ILCL = 1
                     ELSE
                         TMKLIFT = TONPSADIABAT(ETHPARI,PRS(I,J,K),
     +                           PSADITHTE,PSADIPRS,PSADITMK,GAMMA)
                         ESLIFT = EZERO*EXP(ESLCON1* (TMKLIFT-CELKEL)/
     +                          (TMKLIFT-ESLCON2))
                         QVPLIFT = EPS*ESLIFT/ (PRS(I,J,K)-ESLIFT)
                         TVENV = VIRTUAL(TMK(I,J,K),QVP(I,J,K))
                         TVLIFT = VIRTUAL(TMKLIFT,QVPLIFT)
                         GHTLIFT = GHT(I,J,K)
                     END IF
C  buoyancy
                     BUOY(KK) = GRAV* (TVLIFT-TVENV)/TVENV
                     ZREL(KK) = GHTLIFT - GHTPARI
                     IF ((KK.GT.1).AND.
     +                   (BUOY(KK)*BUOY(KK-1).LT.0.0D0)) THEN
c
c   Parcel ascent curve crosses sounding curve, so create a new level
c   in the bottom-up array at the crossing.
c
                         KK = KK + 1
                         BUOY(KK) = BUOY(KK-1)
                         ZREL(KK) = ZREL(KK-1)
                         BUOY(KK-1) = 0.D0
                         ZREL(KK-1) = ZREL(KK-2) +
     +                              BUOY(KK-2)/ (BUOY(KK-2)-
     +                              BUOY(KK))* (ZREL(KK)-ZREL(KK-2))
                     END IF
                     IF (ILCL.EQ.1) THEN
                         KLCL = KK
                         ILCL = 2
                         GO TO 33
                     END IF
                END DO
                KMAX = KK
```

```
                IF (KMAX.GT.150) THEN
                    print *,
     +                'capecalc3d: kmax got too big. kmax=',KMAX
                    STOP
                END IF
c
c   If no LCL was found, set klcl to kmax.  It is probably not really
c   at kmax, but this will make the rest of the routine behave
c   properly.
c
                IF (ILCL.EQ.0) KLCL=KMAX
c
c   Get the accumulated buoyant energy from the parcel's starting
c   point, at all levels up to the top level.
c
                BENACCUM(1) = 0.0D0
                BENAMIN = 9D9
                DO K = 2,KMAX
                    DZ = ZREL(K) - ZREL(K-1)
                    BENACCUM(K) = BENACCUM(K-1) +
     +                            .5D0*DZ* (BUOY(K-1)+BUOY(K))
                    IF (BENACCUM(K).LT.BENAMIN) THEN
                        BENAMIN = BENACCUM(K)
                    END IF
                END DO
c
c     Determine equilibrium level (EL), which we define as the highest
c     level of non-negative buoyancy above the LCL. Note, this may be
c     the top level if the parcel is still buoyant there.
c
                DO K = KMAX,KLCL,-1
                    IF (BUOY(K).GE.0.D0) THEN
C  k of equilibrium level
                        KEL = K
                        GO TO 50
                    END IF
                END DO
c
c   If we got through that loop, then there is no non-negative
c   buoyancy above the LCL in the sounding.  In these situations,
c   both CAPE and CIN will be set to -0.1 J/kg.  Also, where CAPE is
c   non-zero, CAPE and CIN will be set to a minimum of +0.1 J/kg, so
c   that the zero contour in either the CIN or CAPE fields will
c   circumscribe regions of non-zero CAPE.
c
                CAPE(I,J,KPAR) = -0.1D0
                CIN(I,J,KPAR) = -0.1D0
                KLFC = KMAX
c
                GO TO 102
c
   50           CONTINUE
c
c   If there is an equilibrium level, then CAPE is positive.  We'll
c   define the level of free convection (LFC) as the point below the
c   EL, but at or above the LCL, where accumulated buoyant energy is a
c   minimum.  The net positive area (accumulated buoyant energy) from
c   the LFC up to the EL will be defined as the CAPE, and the net
c   negative area (negative of accumulated buoyant energy) from the
c   parcel starting point to the LFC will be defined as the convective
c   inhibition (CIN).
```

```
c
c   First get the LFC according to the above definition.
c
                  BENAMIN = 9D9
                  KLFC = KMAX
                  DO K = KLCL,KEL
                      IF (BENACCUM(K).LT.BENAMIN) THEN
                          BENAMIN = BENACCUM(K)
                          KLFC = K
                      END IF
                  END DO
c
c   Now we can assign values to cape and cin
c
                  CAPE(I,J,KPAR) = MAX(BENACCUM(KEL)-BENAMIN,0.1D0)
                  CIN(I,J,KPAR) = MAX(-BENAMIN,0.1D0)
  NCAPE(I,J,KPAR) = CAPE(I,J,KPAR)/(ZREL(KEL)-ZREL(KLFC))
  NCIN(I,J,KPAR) = CIN(I,J,KPAR)/(ZREL(KLFC)-ZREL(1))
c
c   CIN is uninteresting when CAPE is small (< 100 J/kg), so set
c   CIN to -.1 in that case.
c
                  IF (CAPE(I,J,KPAR).LT.100.D0) CIN(I,J,KPAR) = -0.1D0
  102             CONTINUE
c
              END DO
c
              IF (I3DFLAG.EQ.0) THEN
                  CAPE(I,J,MKZH) = CAPE(I,J,KPAR1)
                  CIN(I,J,MKZH) = CIN(I,J,KPAR1)
C  meters AGL
                  CIN(I,J,MKZH-1) = ZREL(KLCL) + GHTPARI - TER(I,J)
C  meters AGL
                  CIN(I,J,MKZH-2) = ZREL(KLFC) + GHTPARI - TER(I,J)
              END IF
c
          END DO
      END DO
c
      RETURN
      END
c                                                                    c
c********************************************************************c
```

Bibliografía

[1] M.J. Stock *et alii.*, "Lightning Activity in Northwestern Venezuela", submitted to Meteorology and Atmospheric Physics (Ref MAP-S-10-00041). 10pp. 2011.

[2] Falcón, M., Pitter, W., Muñoz, A.G., Nader, D., "Microfísica del Relámpago Del Catatumbo", Ingeniería UC, junio, año/vol. 7, número 001, Universidad de Carabobo. 2000.

[3] Falcón, M., Pitter, W., Muñoz, A.G., Barros, T, Viloria, A.,Nader, D., "Modelo Electroatmosférico del Relámpago sobre el Río Catatumbo", Sci. J. Exp. Faculty of Sc. (Ciencia), 8, 2,155-167. (2000)

[4] Tamura, T. S., "'Doctor Margules On the Energy of Storms", Special Articles, Monthly Weather Review. (1905)

[5] Margules, M., "Über die Energie der Stürme", Jhb. der k. k. Zentralanstalt für Meteorol. und Erdmagnetismus in Wien, NF, Bd. 42. 1905.

[6] Oort, A. H., Peixoto, J. P., "Physics of Climate", Springer-Verlag New York. 1992.

[7] Muñoz, . G., Recalde, C., "North Western South America Retrospective Simulation from CMC - OA INAMHI. Centro de Modelado Científico (CMC) e INAMHI". Base de datos disponible públicamente en http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.U_Zulia/.CMC/ [Consulta: Enero 2011]. 2010.

[8] Holton, J., "An Introduction to Dynamic Meteorology", Fourth Edition, Elsevier Acad. Pr. (2004)

[9] Muñoz, A. G., Lopez, M. P., Velasquez, R. et alii. An Environmental Watch System for the Andean Countries: El Observatorio Andino. Bulletin of the American Meteorological Society, 2010. Doi 10.1175/2010BAMS2958.1

[10] Blanchard, D. O., "Assessing the Vertical Distribution of Convective Available Potential Energy", Am. Met. Soc. Weather and Forecasting, Vol.13, 870-877. (1998)

[11] Johnson, D. R., "The Available Potential Energy of Storms", J. Atmos. Sci. 727-741. (1970)

[12] Goddard, L., Philander, S. G., "The Energetics of El Niño and La Niña", J. Clim. Vol 13, 1496-1516. (2000)

[13] Jacobson, M. Z., "Fundamentals of Atmospheric Modeling", Second Edition, Cambridge Univ. Pr. (2005)

[14] Haltiner, G.; Martin, F., "Dynamical and Physical Meteorology", McGraw-Hill, New York, 1957.

[15] Gill, A. E., "Atmosphere-Ocean Dynamics", Academic Press. (1982)

[16] Peppler, R. A., "A Review of Static Stability Indices and Related Thermodynamic Parameters", Illinois State Water Survey Misc. Publ. 104, 87 pp. 1988.

[17] Doswell, C. A., III, and E. N. Rasmussen, "The Effect of Neglecting the Virtual Temperature Correction on CAPE Calculations", Wea. Forecasting, 9, 625629. 1994.

[18] Moncrieff, M. W., Miller, M. J., "The Dynamics and Simulation of Tropical Cumulonimbus and Squall Lines". Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 102, 373-394. 1976.

[19] Lucas, C. *et alii.*, "Vertical Velocity in Oceanic Convection off Tropical Australia". J. Atmos. Sci., 51, 31823193. 1994a.

[20] Lucas, C. *et alii.*, "Convective Available Potential Energy in the Environment of Oceanic and Continental Clouds: Corrections and Comments". J. Atmos. Sci., 51, 38293930. 1994b.

[21] Zipser, E. J., and M. A. LeMone, "Cumulonimbus Vertical Velocity Events in GATE. Part II: Synthesis and Model Core Structure". J. Atmos. Sci., 37, 24582469. 1980.

[22] Williams, E., Renno, N., "An Analysis of the Conditional Instabiliy of the Tropical Atmosphere", Am. Met. Soc., Vol. 121, 21-36. 1993.

[23] Wilks, D. S., "Statistical Methods in the Atmospheric Sciences", Second Edition, Elsevier Academic Press. 2006.

[24] Rakov, W., A.; Uman, M., A., "Lightning, Physics and Effects", Camb. Univ. Press. Cambridge, UK. 2003.

[25] Solomon, R.; Baker, M., "Electrification in New Mexico Storms", Month. Wea. Rev. Vol. 122, 1872-1886. 1993.

[26] Goodman, S. J., "Predicting Thunderstorm Evolution Using Ground-Based Lightning Detection Networks", NASA Tech. Memo. 103521, 117-120. 1990.

[27] Qie, Xiushu *et alii.*, "Lightning Activity on the Central Tibetan Plateau and its Response to Convective Available Potential Energy", Chinese Science Bulletin. Vol 48. N 3. 296-299. 2003.

[28] Christian, H .J. *et alii.*, "Optical Detection of Lightning from Space", Proceedings of the 11th International Conference on Atmospheric Electricity, Guntersville, Alabama, June 7-11, pp. 715-718. 1999.

[29] Albrecht, R. *et alii.*, "Tropical Frequency and Distribution of Lightning Based on 10 Years of Observations From Space by the Lightning Imaging Sensor", Fourth Conference on the Meteorological Applications of Lightning Data, Colorado State University. Session P2.12, 2009.

[30] Christian, H. J. *et alii.*, "Global Frequency and Distribution of Lightning as Observed from Space by the Optical Transient Detector", J. Geophys. Res., 108 (D1), 4005, doi:10.1029/2002JD002347. 2003.

[31] Goodman, S. *et alii.*, "Lightning, in Our Changing Planet: The View from Space", pp. 4452, Cambridge Univ. Press. 2007.

[32] Bruyére, C. *et alii.*, "Version 3 Modeling System User's Guide", National Center for Atmospheric Research. Disponible en "http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/". 2009.

[33] Gould, H.; Tobochnik, J., "An Introduction to Computer Simulation Methods: Applications to Physical Systems", Second edition, Addison-Wesley, Reading MA. 1996.

[34] Amador, J. A., "The Intra-Americas Sea Low-Level Jet", Ann. N. Y. Acad. Sci., 1146, 153 188, doi:10.1196/annals.1446.012. 2008.

[35] Pulwarty, R. S., "Precipitation in the Venezuelan Andes in the Context of Regional Climate", Meteorol. Atmos. Phys. 67, 217-237. 1998.

[36] Rasmussen, E. N., "Refined Supercell and Tornado Forecast Parameters", Weather and Forecasting, Am. Met. Soc., Notes and Correspondence. Vol. 18, 530-535. 2002-2003.

[37] Williams, E. R. *et alii.*, "A Radar and Electrical Study of Tropical "Hot Towers", Journal of Atmospheric Sciences. Vol. 49, N 15. 1386-1395. Am. Met. Soc. 1991.

[38] Livingston, E. S., "A Climatology, Synoptic Assessment, and Thermodynamic Evaluation for Cloud-to-Ground Lightning in Georgia: A Study for the 1996 Summer Olympics", Bulletin of the American Meteorological Society, 1483-1495. Am. Met. Soc. 1996.

[39] Zipser, E. J.; Lutz, K. R., "The Vertical Profile of Radar Reflectivity of Convective Cells: A Strong Indicator of Storm Intensity and Lightning Probability?" Am. Met. Soc. Vol. 122, 1751-1759. 1994.

[40] Zipser, E. J., "Deep Cumulonimbus Systems in the Tropics with and without Lightning", Am. Met. Soc. Vol. 122, 1837-1851. 1994.

[41] Lambert, W.; Wheeler, M., "Objective Lightning Probability Forecasting for Kennedy Space Center and Cape Canaveral Air Force Station", NASA Contractor Report

NASA/CR-2005-212564, National Aeronautics and Space Administration, Scientific and Technical Information Program. 2005.

[42] Francis, J. R. D., "Fluid Mechanics for Engineering Students", Fourth edition. Edward Arnold (Publishers) Ltd. 1975.

[43] Arfken, G., "Métodos Matemáticos para Físicos", Editorial Diana. 1981.

[44] McIlveen, R., "Fundamentals of Weather and Climate", Chapman & Hall. 1992.

[45] Darkow, G. L., "The Total Energy Environment of Severe Storms", J. Appl. Meteor., 7, 199205. 1968.

[46] Fuenmayor, W. "Atlas del Estado Zulia", Splanos C. A. 2005.

[47] Dwyer, J. R. *et alii.* "Energetic Radiation Produced During Rocket-Triggered Lightning", Science Magazine, Vol. 299. 694-697. Jan. 2003.

[48] Lynn, B. ; Yair, Y. "Prediction of lightning ?ash density with the WRF model", Adv. Geosci., 23, 11?16. 2010.

[49] Mazany, R. A. *et alii.* "A Lightning Prediction Index that Utilizes GPS Integrated Precipitable Water Vapor", Am. Met. Soc. Weather and Forecasting. Vol. 17. 1034-1047.

[50] Christian, H. J. *et alii.* "Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the Lightning Imaging Sensor (LIS)", NASA, 2000. (http://eospso.gsfc.nasa.gov/eos_homepage/for_scientists/atbd/docs/LIS/atbd-lis-01.pdf)