

# **PATRONES REGIONALES DE DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN GENERADA POR CICLONES TROPICALES EN CUBA ESTIMADA POR EL MODELO WRF**

*Lic. Daylin Perdigón Cuellar*  
*Dr. Yoel Martínez González*  
*Lic. Albenis Pérez Alarcón*  
*MSc. Diego Rafael Ulloa López*

Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicada (InSTEC-UH), Avenida Salvador Allende #1110  
e/. Infanta y Rancho Boyeros, Quinta de los Molinos, Plaza de la Revolución, La Habana, Cuba,  
[ymg@instec.cu](mailto:ymg@instec.cu)

## ***Resumen***

Los ciclones tropicales juegan un papel muy importante en la distribución de la lluvia en nuestro país. En la presente investigación se determinan patrones regionales de distribución temporal de la precipitación generada por estos organismos en Cuba estimada por el modelo atmosférico Weather Research and Forecasting (WRF); patrones que constituyen un elemento esencial para la anticipación y enfrentamiento de desastres hidrológicos de todo tipo, aportando una base técnica y teórica apropiada para la toma de decisiones en cada territorio. Es desarrollado entonces un procedimiento por medio del cual se obtienen los diagramas de masa y hietogramas regionales respectivos. La elección de los casos de estudio está determinada por la disponibilidad de datos de reanálisis de precipitación de las corridas del WRF del SPNOA realizadas en el Centro de Física de la Atmósfera (CFA) del Instituto de Meteorología. Por tanto, el período de análisis se limita a los años 2004-2012 dentro de los cuales se hallan los casos disponibles. Los diagramas de masa obtenidos se comparan con los propuestos por el Soil Conservation Service (SCS) del U. S. Department of Agriculture (1986) y los diagramas de masa característicos en función de la lámina máxima de Planos (1991). El análisis de la tendencia de estas curvas arrojó que: la regionalización tenida en cuenta en esta investigación da peso a la heterogeneidad espacial que manifiesta el sistema ciclónico tropical; y que las características físico-geográficas y otros elementos del paisaje determinan influencias significativas sobre la distribución temporal de la precipitación provocada por estos organismos.

## ***Abstract***

Tropical cyclones play a very important role in the distribution of rainfall in our country. In the present research, regional patterns of temporal distribution of the precipitation generated by these organisms in Cuba are estimated by the atmospheric model Weather Research and Forecasting (WRF); patterns that constitute an essential element for the anticipation and confrontation of hydrological disasters of all types, providing a technical and theoretical basis appropriate for the decision making in each territory. A procedure is then developed by means of which the respective regional mass diagrams and hietograms are obtained. The choice of case studies is determined by the availability of precipitation reanalysis data from SPNOA WRF runs conducted at the Atmospheric Physics Center (CFA) of the Meteorology Institute. Therefore, the period of analysis is limited to the years 2004-2012 within which are available cases. The mass diagrams obtained are compared with those proposed by the Soil Conservation Service (SCS) of the U.S. Department of Agriculture (1986) and the characteristic mass diagrams as a function of the maximum sheet of Planos (1991). The analysis of the trend of these curves showed that: the regionalization taken into account in this research gives weight to the spatial heterogeneity manifested by the tropical cyclonic system; and that the physical-geographic characteristics and other elements of the landscape determine significant influences on the temporal distribution of the precipitation provoked by these organisms.

## *Introducción*

En la distribución de la lluvia en nuestro país los ciclones tropicales juegan un papel importante. A pesar de que pueden causar muchos daños por efecto del viento, el oleaje, la lluvia y la marea de tormenta, gracias a la precipitación producida, es factible que las presas se llenen y los acuíferos se recarguen, facilitando con ello el suministro de agua para el consumo humano, la agricultura y la generación hidroeléctrica. [Jiménez et al., 2014]

Sin embargo, las lluvias intensas y las inundaciones que provocan estos organismos han sido los factores destructivos que más frecuentemente han estado asociados a la afectación de incalculable valor económico, así como de pérdida de vidas humanas que han dejado a su paso estos organismos de forma directa o indirecta en la geografía cubana.

La distribución en el tiempo de la precipitación provocada por estos sistemas tropicales es un factor determinante de la forma, magnitud y volumen de la crecida resultante. Su conocimiento es esencial para estimar tormentas sintéticas, es decir, patrones de precipitación para la utilización en el diseño de un sistema hidrológico, para proyectos de redes de aguas lluvias, sistemas de drenaje de carreteras, estudios de erosión, estimación de arrastres y socavación y otros problemas de ingeniería hidráulica. [Dolling and Varas, 2006]

En Cuba para un completo estudio de la distribución temporal de esta variable meteorológica y en consecuencia, la determinación de un patrón de precipitación, resulta en la actualidad deficiente la red pluviográfica en comparación con la red pluviométrica. Esta situación limita la toma de decisiones para administrar los recursos hídricos y dificulta el desarrollo de sistemas de alerta temprana, por ejemplo, para el control de las inundaciones o el diseño de obras hidráulicas.

Por lo general, la condición de las cuencas cubanas (en cuanto a información disponible) es que cuentan con muchos pluviómetros instalados con alrededor de 30 años de observación, pero en pocas existen pluviógrafos en funcionamiento y las cartas pluviográfica de los que pudieron existir, en su mayoría, no están disponibles por diferentes motivos. Es por esta razón que predecir el comportamiento temporal de las lluvias es una tarea que requiere de un trabajo investigativo profundo. [Rodríguez and Marrero, 2010]

Una alternativa a este problema para estos autores [Rodríguez and Marrero, 2010] fue evaluar diferentes variantes a partir de estudios realizados del comportamiento de las precipitaciones tanto para Cuba como para las zonas de Estados Unidos más próximas a la Isla. De dicha evaluación elaboraron una metodología para distribuir temporalmente la lluvia de 24 horas en el territorio nacional a falta de registros pluviográficos, en la que reconocieron dos variantes: una, haciendo uso del patrón de comportamiento de la lluvia determinado por el Servicio de Conservación del Suelo (SCS) de los Estados Unidos y la otra, basada en el estudio de Planos et al. (2004) sobre las intensidades de lluvia mayores de 50 mm para Cuba. No obstante, con la primera variante utilizada por estos autores se corre el riesgo del uso inadecuado del concepto de analogía y la transposición de tormentas, uno de los elementos que de manera general ha incidido desfavorablemente en los estudios de este tipo realizados en el país según Planos et al. (2011).

Por otro lado, la variación de la precipitación dentro de una tormenta, es grande y depende de varios factores como son: la magnitud, la duración y el tipo de tormenta, por lo que no se puede aplicar un solo patrón para todos los casos [Aroné Epinoza, 2016]. Es por esta razón que se recomienda determinar el patrón según el tipo de evento meteorológico que origina la lluvia.

Para enfrentar el fenómeno de las inundaciones, por ejemplo, resulta imprescindible realizar análisis hidrometeorológicos a escalas de tiempo pequeñas, pero una limitante fundamental en nuestro país continúa siendo la ausencia de datos hidrométricos y pluviométricos a escala horaria, ya que la mayor densidad de observaciones con la que se cuenta provienen de las redes de estaciones pluviométricas del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) y son de 24 horas.

Esto, unido a la advertencia y/o recomendación sobre que aún falta avanzar más para lograr el desarrollo de aplicaciones prácticas que haga más efectiva la prevención y el pronóstico hidrológico en Cuba, resaltando el salto cualitativo que desde el punto de vista conceptual se aprecia en los estudios realizados en el país, pero sin abordar, con la fuerza y el grado de generalización requeridos [...] la modelación matemática determinística; del mismo modo que las metodologías utilizadas son predominantemente estadísticas, sin tener un sustento físico apoyado en estudios de la física y la circulación de la atmósfera [Planos et al., 2011]; justifican la propuesta del uso de la modelación físico-matemática para la estimación de la precipitación en registros de intervalos de tiempo menores a 24 horas, obteniéndose de esta forma una mayor distribución espacial y temporal del comportamiento de la misma para diferentes eventos hidrometeorológicos y principalmente, en el caso que nos ocupa: el comportamiento de la precipitación generada por ciclones tropicales.

Por tanto, el empleo del modelo atmosférico Weather Research and Forecasting (WRF) constituye una herramienta práctica con una resolución espacial y temporal alta que garantiza un alto grado de precisión para el estudio de esta variable meteorológica, aun cuando se recomienda la mejora de las salidas de precipitación de este modelo y su evaluación.

No obstante los resultados obtenidos en esta investigación son una contribución a la actualización del conocimiento científico de las precipitaciones y su distribución temporal, incorporando además a la práctica hidrometeorológica el uso del modelo WRF.

### ***Objetivo General***

- Determinar patrones regionales de distribución temporal de la precipitación generada por ciclones tropicales en Cuba estimada por el modelo atmosférico WRF.

### ***Objetivos Específicos***

- Obtener los diagramas de masa y los hietogramas por regiones a partir de las salidas de precipitación del modelo atmosférico WRF disponibles de los diferentes casos de ciclones tropicales del periodo 2004-2012.
- Comparar los patrones regionales de distribución temporal determinados de la precipitación generada por ciclones tropicales en Cuba estimada por el modelo atmosférico WRF.

### ***Materiales y métodos***

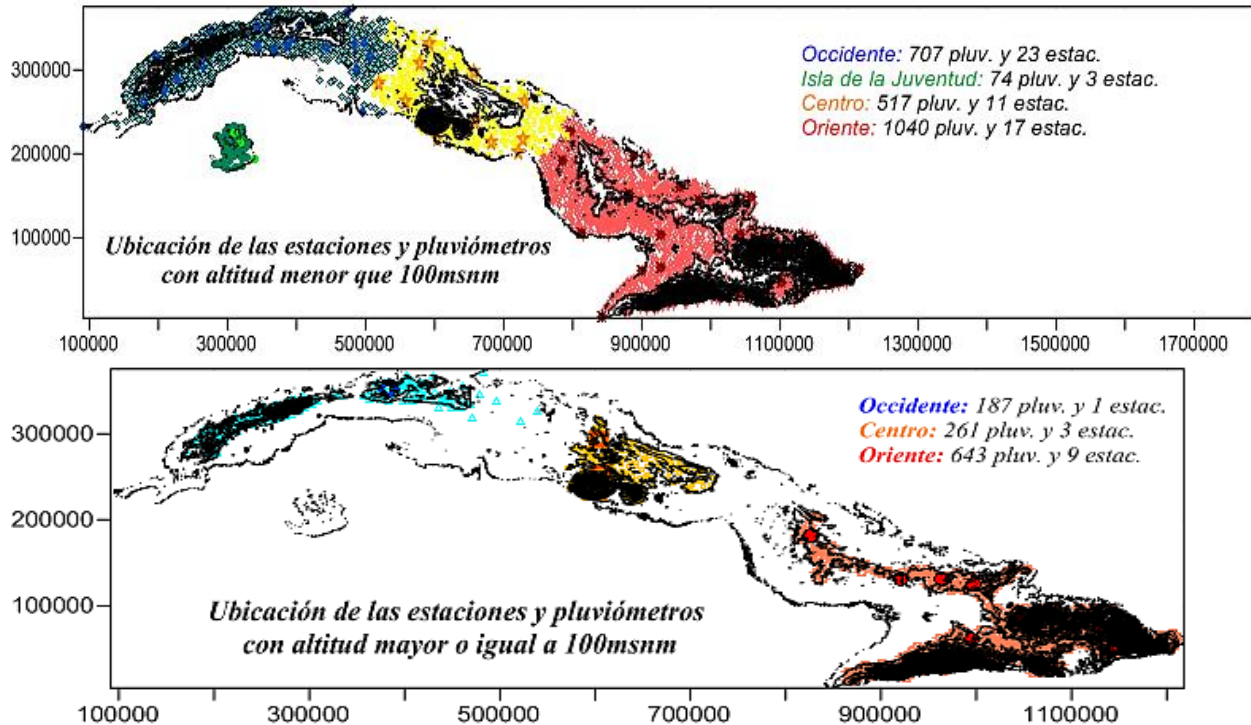
#### **Regiones y subregiones de estudio**

El territorio nacional se divide en cuatro regiones de estudio: Occidente (desde Pinar del Río hasta Matanzas), Isla de la Juventud, Centro (desde Villa Clara hasta Ciego de Ávila) y Oriente (desde Camagüey hasta Guantánamo).

Resulta válido destacar que se estudia a la Isla de la Juventud por sí sola, con independencia de la regionalización físico-geográfica natural de Cuba descrita por [Jiménez, 1972] que la incluye dentro de la región occidental. Esto se debe a la hipótesis de que la Isla de la Juventud, por constituir en sí misma un accidente geográfico rodeado de mar, que a los efectos del ciclón tropical se comporta como una elevación que ejerce fricción y reduce así su velocidad de desplazamiento, determina una distribución

temporal de la precipitación generada por estos organismos distinta a la distribución en el tiempo de la región que en esta investigación se define como Occidente.

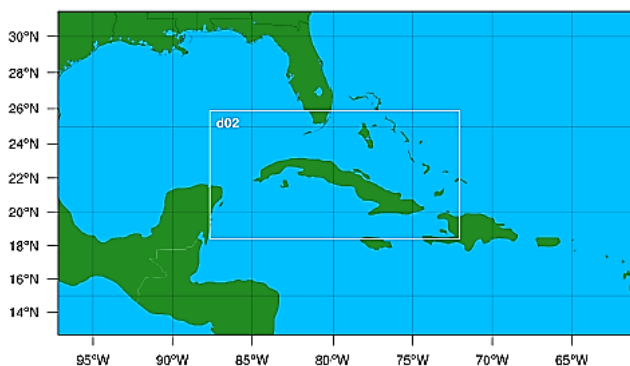
A partir de la cota 100 metros sobre el nivel del mar (msnm) según la escala hipsométrica del Nuevo Atlas Nacional de Cuba de 1989 [Magaz, 1989] se identifican además para el estudio dos subregiones en las respectivas regiones occidental, central y oriental definidas anteriormente. La Isla de la Juventud no presenta elevaciones por encima de los 100 m de altitud por lo que se cuenta finalmente con un total de 7 escenarios delimitados para el estudio como se muestran en la figura 1.



**Figura 1.** Ubicación de las estaciones meteorológicas y los pluviómetros seleccionados a partir de la cota 100 msnm.

### Modelo atmosférico Weather Research and Forecasting (WRF)

Para el desarrollo de los objetivos propuestos en esta investigación se emplean las salidas de reanálisis de la precipitación para todos los plazos de tiempo [resolución temporal y espacial de 3 hora y 9 km respectivamente, dominio 2 (ver figura 2)] de los diferentes ciclones tropicales simulados por el WRF (ARW) del SPNOA en el Centro de Física de la Atmósfera (CFA) del Instituto de Meteorología (INSMET) [Bello et al., 2014].



**Figura 2.** Dominio 2 de 9 km utilizado en el CFA del Insmet.

Se emplean las coordenadas de localización de cada pluviómetro de la red básica nacional de pluviómetros del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), excluyendo aquellos ubicados en los cayos y los que presentan datos faltantes de coordenadas y/o altitud, y 67 (excluyendo la estación de Cayo Coco) de las 68 estaciones meteorológicas del INSMET para la obtención de la precipitación estimada por el modelo WRF por interpolación en esas coordenadas y así establecer futuras comparaciones entre la lluvia simulada y la medida, comparación que no se contempla dentro de los objetivos de la presente investigación, pero que sería de utilidad para una posterior evaluación del modelo y de los patrones a obtener .

### Casos de estudio y período de análisis

La elección de los mismos está determinada por la disponibilidad de datos de reanálisis de la precipitación de las corridas del WRF realizadas en el CFA del INSMET. Por tanto, el período de análisis se ve limitado entonces a los años del 2004 al 2012.

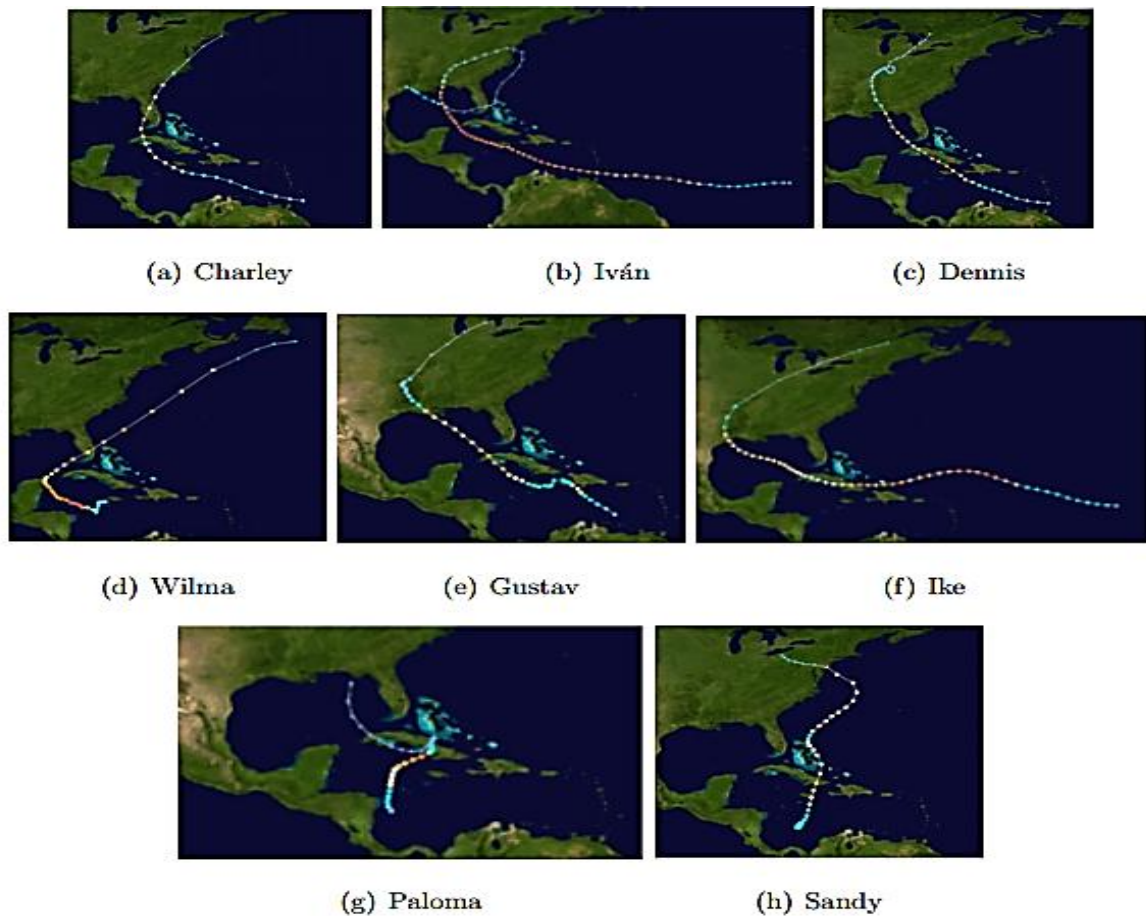
No obstante, los casos de estudio seleccionados son relevantes y permiten apreciar el comportamiento de las lluvias ciclónicas en las regiones del país y establecer diferencias notables entre ellas.

**Tabla 1.** Características fundamentales de interés de los huracanes en estudio.

**Fuente:** Resúmenes de temporada ciclónica elaborados por el Centro Nacional de Huracanes de los Estados Unidos (NHC por sus siglas en inglés).

Ciclón tropical	Escala Saffir-Simpson	Fecha de incidencia de la precipitación	Región de influencia de la precipitación
Charley	3	12 y 13 agosto 2004	Occidente e Isla de la Juventud
Iván	5	12-14 sept 2004	Occidente e Isla de la Juventud
Dennis	4	7-10 julio 2005	Occidente, Isla de la Juventud, Centro y Oriente
Wilma	5	20-22 oct 2005	Occidente e Isla de la Juventud
Gustav	4	30 y 31 agosto 2008	Occidente, Isla de la Juventud y Centro
Ike	4	7-11 sept 2008	Occidente, Isla de la Juventud, Centro y Oriente
Paloma	3	8-10 nov 2008	Oriente
Sandy	3	24 y 25 oct 2012	Matanzas, Centro y Oriente

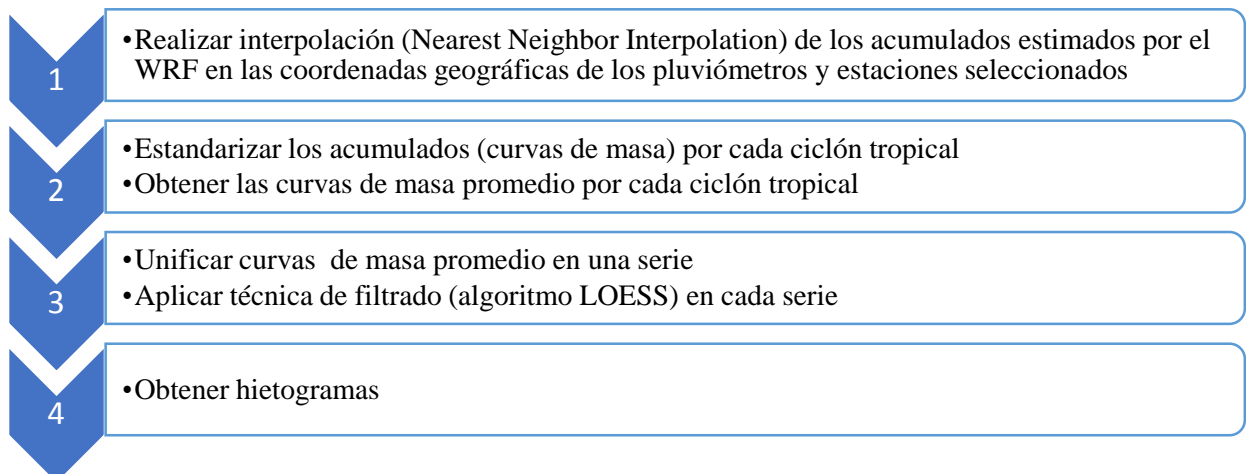
En la figura 3 se muestran las trayectorias descritas por estos 8 ciclones tropicales, los cuales alcanzaron en todos los casos la categoría de huracán de gran intensidad.



**Figura 3.** Trayectoria descrita por los diferentes casos de estudio.

### Pasos de la metodología empleada

La metodología empleada para la determinación de los patrones de distribución temporal de la precipitación generada por ciclones tropicales en cada región y subregión definidas en este estudio cuenta con una serie de pasos descritos en el siguiente diagrama de flujo lineal.



## Procesamiento de datos

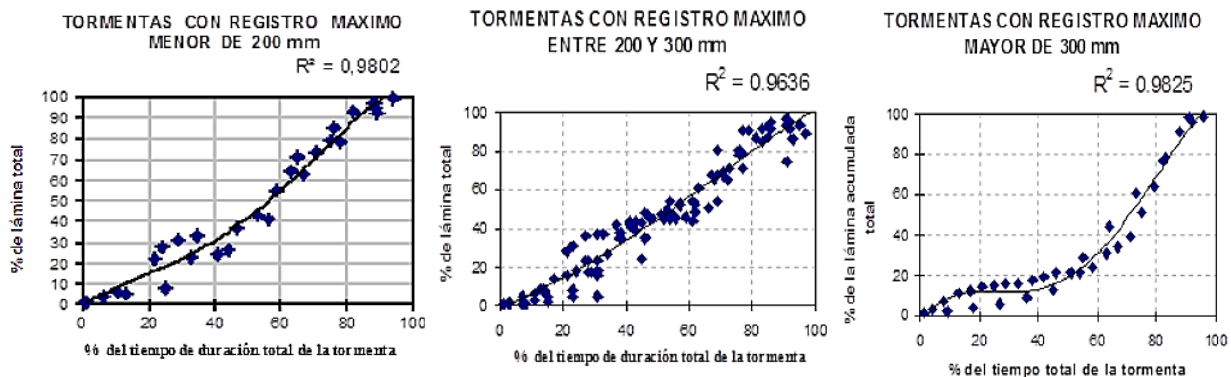
En el lenguaje de programación Python se elaboran todos los scripts necesarios para la interpolación usada (Nearest Neighbor Interpolation), la estandarización de los acumulados por cada ciclón tropical en cada región y subregión establecidas, así como para la obtención de las curvas de masa y los hietogramas.

A las curvas de masa obtenidas tras unificar en una serie las curvas de masa promedio de cada caso de estudio en cada región y subregión definida se le aplica la técnica de filtrado: regresión local (también conocida por sus siglas en inglés, LOESS o LOWESS) [Cohen, 1999], uno de los muchos métodos modernos de construcción de modelos basados en los clásicos, como la regresión lineal y no lineal, para el suavizado de las mismas. [Cleveland, 1979]

## Comparación

Cada uno de los patrones de distribución temporal determinados (diagramas de masa de cada región y subregión definida) se comparan con dos de los patrones de este tipo que recoge la literatura. La comparación realizada consiste en el análisis de la tendencia de las curvas. Los patrones son:

1. Diagramas de masa característicos en función de la lámina máxima propuestos por Planos (1991).

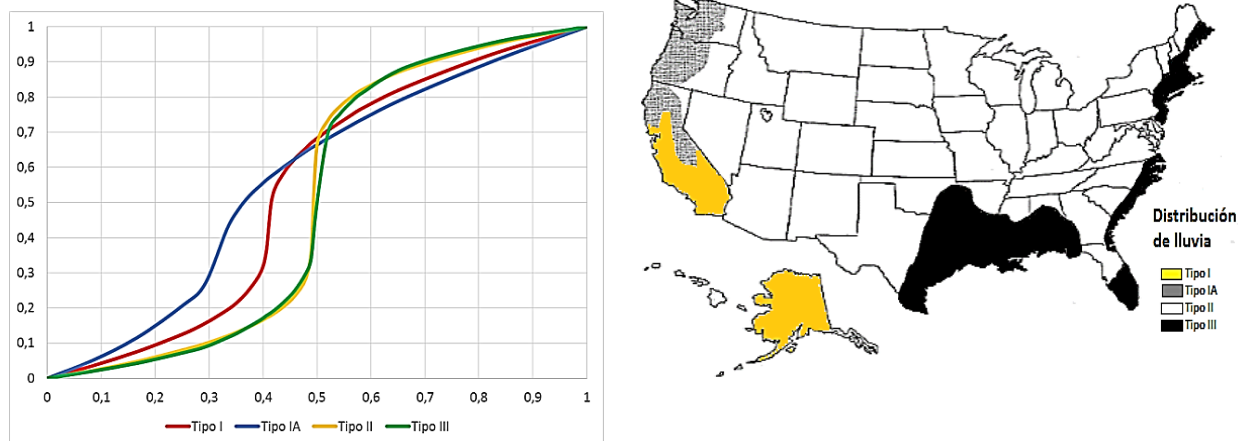


**Figura 4.** Diagramas de masa característicos en función de la lámina máxima propuestos por Planos (1991). [Fuente: (Planos et al., 2011, p.147)]

Planos (1991), citado por [Planos et al., 2011], estudió 100 diagramas de masa pertenecientes a tormentas originadas por sistemas tropicales ciclónicos demostrando que durante las primeras 10 o 15 horas de la actividad pluvial no se producen incrementos importantes en la lámina de lluvia, pero, transcurrido este intervalo, se intensifica la precipitación, ocurriendo períodos de 4 a 8 horas en los que se acumula más del 50% de la lámina total.

El análisis de los diagramas de masa de las precipitaciones de origen ciclónico propuestos por Planos (1991) permitió caracterizar curvas típicas dependientes de la magnitud de la lámina máxima de precipitación (ver figura 4), que a la vez sirvieron para comprobar que este comportamiento es general en todo el territorio sometido al azote de la lluvia, con la única diferencia que en las localidades distantes del centro isoyético la intensidad del incremento de la lluvia es menor. Lo anterior, según Planos et al. (2011) es sumamente importante para la modelación de estas lluvias y la prevención hidrológica, particularmente en lo relacionado con el tiempo que ha de transcurrir entre el inicio de la lluvia y su momento más intenso.

2. Patrón Tipo III con duración de la tormenta de 24 horas de la Soil Conservation Service (SCS) del U. S. Department of Agriculture (1986). [Chow et al., 1994]



**Figura 5.** Hietogramas de lluvia de 24 horas del Soil Conservation Service y la localización en los Estados Unidos para su aplicación. [Fuente: U. S. Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, (1986)]

El Soil Conservation Service del U. S. Department of Agriculture (1986) desarrolló hietogramas sintéticos de tormentas para utilizarse en los Estados Unidos con duraciones de tormentas de 6 y 24 horas. Existen cuatro tormentas de 24 horas de duración, llamadas Tipo I, IA, II y III, respectivamente; la figura 5 muestra los respectivos hietogramas y la localización geográfica en los Estados Unidos donde los mismos pueden aplicarse. Los Tipos I y IA corresponden al clima marítimo del Pacífico con inviernos húmedos y veranos secos. El Tipo III corresponde al Golfo de México y las áreas costeras del Atlántico, donde las tormentas tropicales producen lluvias de 24 horas muy grandes. El Tipo II corresponde al resto del país.

Campos Aranda (1984), citado por [Planos et al., 2011], señala que “. . . debido a la escasez de registros de lluvia de corta duración, ha surgido la necesidad de utilizar las relaciones promedio entre lluvias encontradas en otros países...” y cita a diversos investigadores que han demostrado que las relaciones encontradas para los EE.UU pueden ser aplicadas en muchas partes del mundo, con independencia de las diferencias en las características climáticas. Según Campos Aranda, esto es admisible, porque los mecanismos físicos que producen las lluvias convectivas en cualquier parte del globo terráqueo son similares. Es por esta razón que se justifica la comparación con respecto al patrón Tipo III con duración de la tormenta de 24 horas de la Soil Conservation Service (SCS) del U. S. Department of Agriculture.

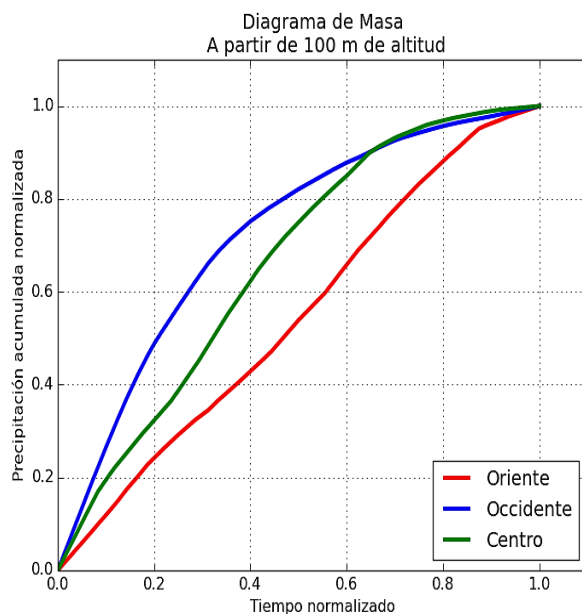
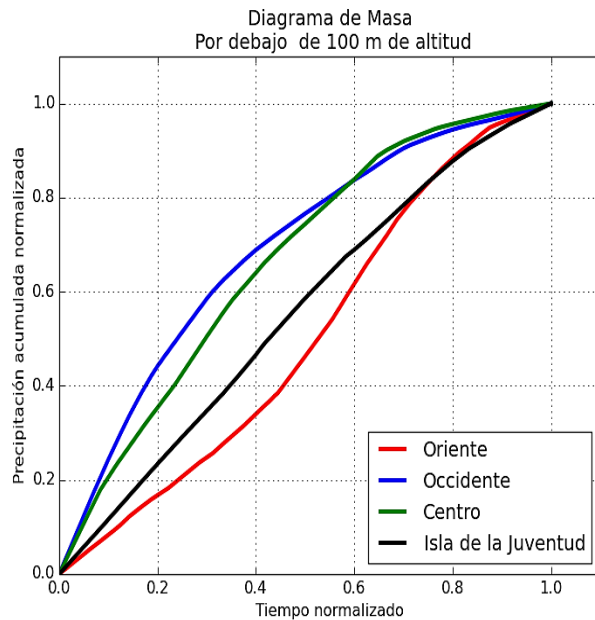
### *Análisis de los resultados*

#### **1. Diagramas de masa obtenidos para las regiones y subregiones definidas.**

En la figura se muestran los diagramas de masa obtenidos a partir de los cuales se puede saber el patrón de comportamiento de la lámina acumulada de precipitación estimada por el modelo WRF para cualquier intervalo de tiempo, así como de la intensidad; sin embargo, no es objetivo de esta investigación conocer los valores puntuales de estas variables, sino determinar en cada región y subregión respectiva



la distribución temporal descrita, de ahí la estandarización realizada a los datos. La posición que dentro de una curva adopta con respecto al tiempo (eje de las abscisas) una pendiente más abrupta indica en que parte de la duración total del evento ocurre la lámina máxima de lluvia.

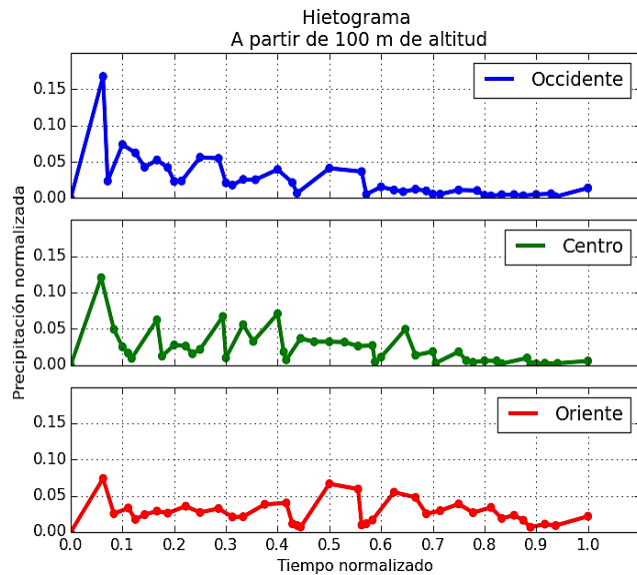
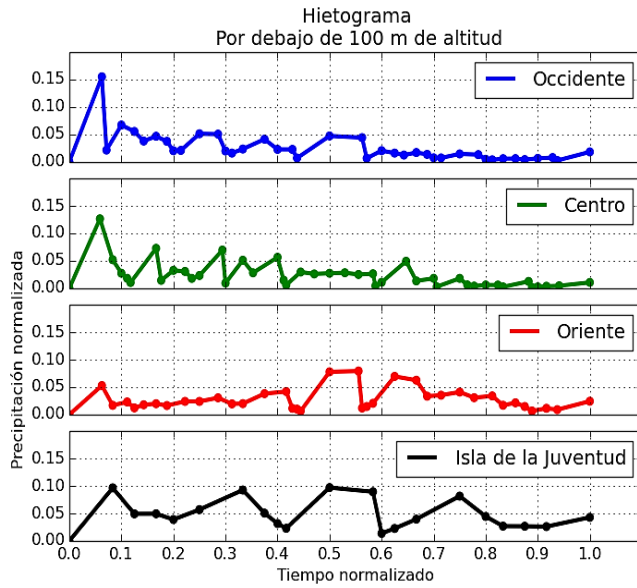


Por tanto, el análisis por simple inspección de los diagramas de masa obtenidos arrojan las siguientes conclusiones:

- Para ambas subregiones definidas, la curva de Occidente presenta los mayores acumulados de precipitación en la primera mitad del evento.
- Para ambas subregiones definidas la curva del Centro del país muestra un comportamiento similar en el tiempo, pero con menores acumulados con respecto a Occidente.
- Las curvas de Occidente y Centro para ambas subregiones definidas convergen en el último tercio de duración del evento, lo que representa similar comportamiento en cuanto a acumulados.
- La curva de la Isla de la Juventud presenta una pendiente suave en toda la duración del evento, lo que indica que los máximos acumulados de la precipitación se repiten en el tiempo, lo que se traduce en persistencia de la lluvia.
- La curva de Oriente para las zonas que se encuentran por debajo de los 100 metros de altitud representa un máximo sostenido de los acumulados en los inicios de la segunda mitad de duración del evento.
- La curva de Oriente para las zonas que se encuentran a partir de los 100 metros de altitud representa un máximo acumulado en los inicios de duración del evento, pero un segundo máximo más sostenido a partir de la segunda mitad.
- En las zonas que se encuentran por debajo de los 100 metros de altitud convergen las curvas de la Isla de la Juventud y Oriente, lo que denota el registro de similares acumulados de precipitación.

## 2. Hietogramas obtenidos para las regiones y subregiones definidas.

La figura muestra los hietogramas normalizados obtenidos, los cuales reflejan en qué parte de la duración total del evento ciclónico tropical la precipitación alcanza la lámina máxima. Los hietogramas normalizados ilustran que:



de sus etapas, desde depresión tropical hasta huracán, ocurren principalmente en el semicírculo derecho con respecto a la dirección del movimiento y pueden extenderse a grandes distancias de su región central quedando así el Centro del país bajo esta afectación.

- La precipitación de la Isla de la Juventud y Oriente se caracteriza por su persistencia a través del tiempo. Este comportamiento indica que en el transcurso del evento existe una variación de la lámina de lluvia ocasionada por la configuración del terreno, ya que las islas y las montañas son elementos fundamentales sobre la estructura de un ciclón tropical. Ello se debe a la fricción que ejercen, lo cual reduce la velocidad de desplazamiento del meteoro y por otra parte, los movimientos ascendentes y las diferencias de los flujos superficiales de calor y humedad, durante su paso por las regiones montañosas incrementan la cantidad y persistencia de la lluvia.

- Tanto por debajo como a partir de los 100 m de altitud, el mayor acumulado de la precipitación tiene lugar en el Occidente del país y en el primer intervalo de duración del evento. Esto se asocia al paso de la pared del ojo del ciclón tropical donde se concentra parte de la precipitación más intensa de este organismo. Luego se denota una marcada persistencia de la lluvia hasta un poco después de la primera mitad del tiempo, lo que se atribuye a la influencia de las bandas espirales del sistema en cuestión.

- En el Centro el patrón de distribución temporal de la precipitación presenta un comportamiento semejante al de Occidente en las dos subregiones definidas, pero alcanzando un menor valor en la lámina de lluvia. Esto no puede ser explicado por la influencia de la pared del ojo, ya que ninguno de los casos de estudio en su trayectoria pasó directamente por esta región como sí varios de ellos atravesaron el Occidente. Este comportamiento puede atribuirse entonces al hecho de que

parte de las lluvias intensas asociadas a los ciclones tropicales en cualquiera

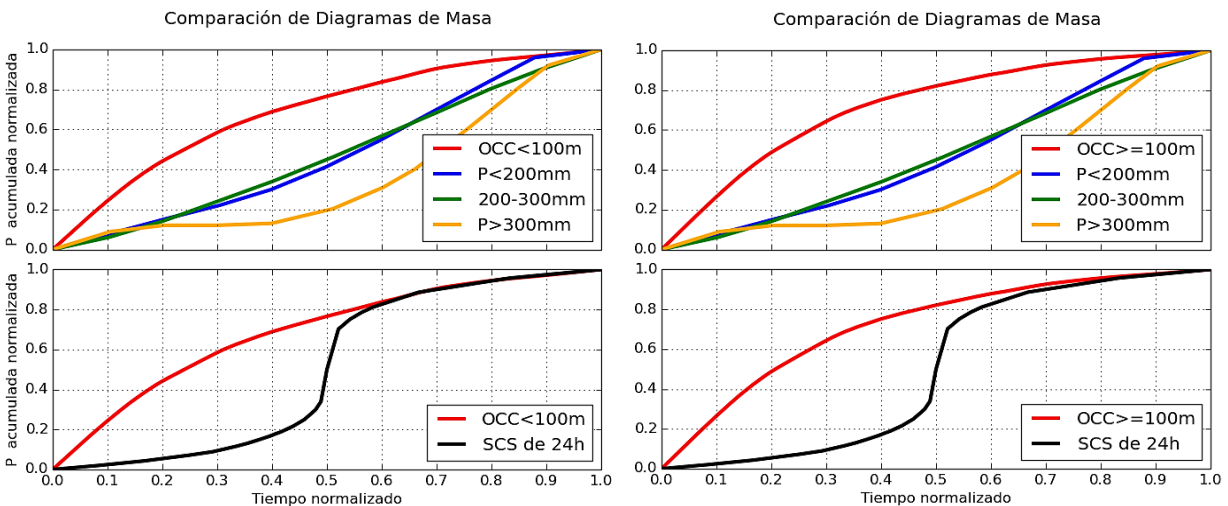
- En todas las regiones y sus respectivas subregiones se aprecia un último tercio de duración del evento marcado por los menores acumulados de lluvia determinados por la precipitación estratiforme que presenta el ciclón tropical en la periferia de sus bandas espirales.

Los hietogramas obtenidos concuerdan con lo expresado por Koshiasvili (1976) y Díaz Arenas (1983), citado por [Planos et al., 2011], sobre que las distribuciones horarias características de la precipitación generada por ciclones tropicales reflejan el predominio de hietogramas con dos, tres y cuatro picos, lo que acentúa la peligrosidad de estos sistemas, por la forma de las crecidas fluviales que pueden producir; y con lo señalado por Díaz Arenas (1983), citado también por [Planos et al., 2011], de que las grandes precipitaciones de este origen se caracterizan por su persistencia e intensidad sostenida en intervalos de tiempo prolongados; de forma tal que los aguaceros disminuyen, e incluso cesan por intervalos, pero en lapsos tan breves que pueden considerarse ininterrumpidos.

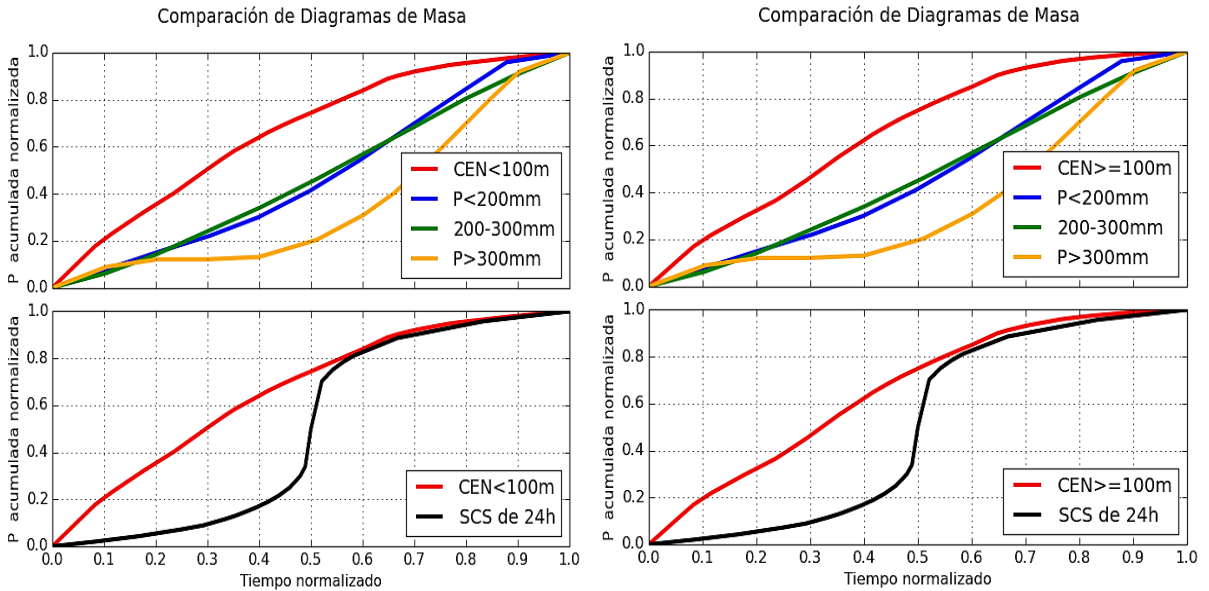
### 3. Comparación de los resultados obtenidos con los diagramas de masa de Planos (1991) y el patrón Tipo III del SCS del U. S. Department of Agriculture (1986).

La comparación de tendencia establecida entre los diagramas de masa obtenidos a partir de los valores acumulados de precipitación estimados por el modelo WRF, primero con los diagramas de masa característicos en función de la lámina máxima propuestos por Planos (1991), y segundo, con el patrón Tipo III con duración de la tormenta de 24 horas del SCS del U. S. Department of Agriculture (1986) evidenció que:

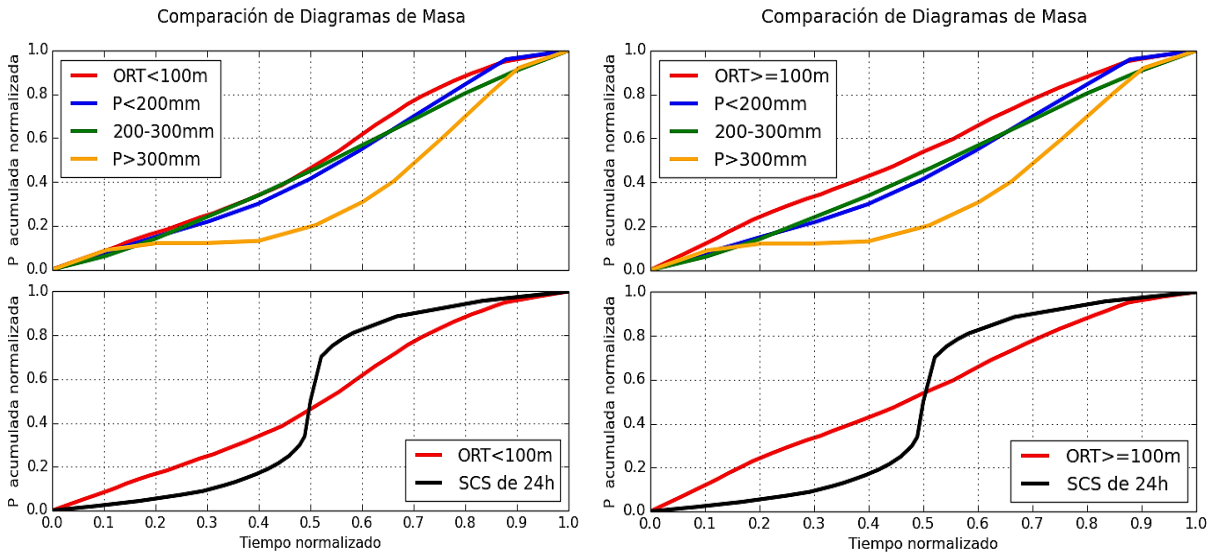
- El patrón obtenido para Occidente en sus respectivas subregiones difiere significativamente de los diagramas de masa característicos en función de la lámina máxima propuestos por Planos (1991); y en cuanto al patrón Tipo III del SCS (1986) también, sin embargo la convergencia de las dos curvas en la segunda mitad de duración del evento arroja el hecho de que se registran similares valores de acumulados de precipitación tanto en la región occidental de Cuba como en el Golfo de México y las áreas costeras del Atlántico en este intervalo de tiempo.



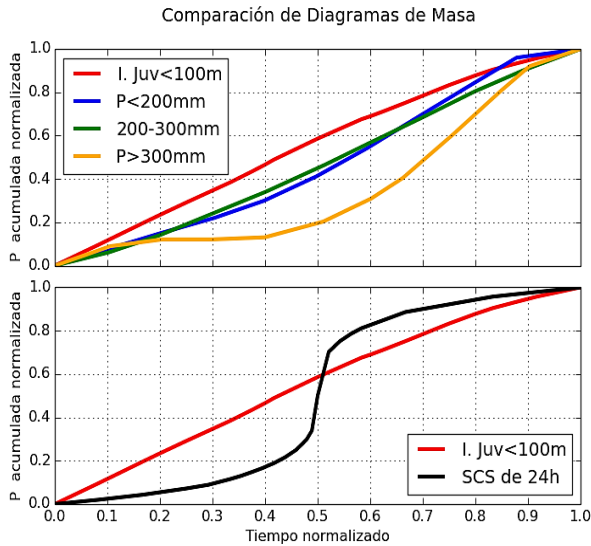
- El patrón obtenido para el Centro del país muestra un comportamiento semejante al descrito para Occidente.



- El diagrama de masa obtenido para Oriente coincide con sus similares propuestos por Planos (1991) para láminas de lluvia menores que 300 mm en las zonas por debajo de los 100 m de altitud; de igual manera ocurre para las zonas a partir de esta cota, solo que se registran acumulados un poco mayores en el patrón de Oriente. En cuanto al Tipo III ambos patrones difieren significativamente en cualquiera de las subregiones definidas.



- El patrón obtenido para la Isla de la Juventud muestra un comportamiento semejante al descrito para Oriente.



Las diferencias de tendencia encontradas entre los diagramas de masa obtenidos a partir de la precipitación estimada por el modelo WRF y los diagramas de masa propuestos por Planos (1991) pueden explicarse por el empleo de la regionalización en la presente investigación, la cual da peso a la heterogeneidad espacial de las tormentas; mientras que Planos (1991) no da importancia a la dependencia geográfica para hallar sus curvas de distribución, sino que las clasifica por acumulados en función del tiempo en que ocurre la precipitación, ya que, acorde con este autor, ellas son válidas en toda el área afectada por la lluvia de origen ciclónico tropical.

Las diferencias de tendencia encontradas con respecto al patrón Tipo III del SCS (1986) responden a que las distintas características físico-geográficas y otros elementos del paisaje que presenta el archipiélago cubano en relación a las áreas de Estados Unidos correspondientes al Golfo de México y costas del Atlántico donde se aplica este patrón, necesariamente deben influir en las lluvias que provoca el ciclón tropical en uno u otro territorio. Las marcadas diferencias en cuanto a la latitud geográfica, la disposición zonal de Cuba y la presencia de cadenas montañosas en las diferentes regiones del país, situación no manifestada en las áreas de EE.UU (zonas bajas principalmente); así como que se ha establecido una comparación indirecta entre islas (isla de Cuba e Isla de la Juventud) y zonas que son parte de un territorio continental, configuraciones ante las cuales el ciclón tropical interactúa de manera distinta; el hecho de que el mar cálido que las separa actúa sobre el meteoro ingresándole en los niveles bajos cantidades grandes de vapor de agua que al entrar en tierra (de los EE.UU) hace que ocurran lluvias intensas que pueden llegar a ser más fuertes que las producidas antes en su paso por la geografía cubana; y finalmente se espere una mayor cantidad de lluvia cuando el centro del ciclón permanece por mucho más tiempo en tierra como ocurre en el Norte, no así en Cuba donde las lluvias hidrológicamente significativas perduran alrededor de 48 horas, de las cuales se desarrolla la situación más desfavorable en menos de 24 horas [Planos et al., 2011], es que pueden ser explicadas las diferencias significativas de tendencia halladas durante la comparación de los diagramas de masa. Una conclusión importante que se deriva de este análisis es que, en cuanto a la precipitación generada por ciclones tropicales, es inadecuado el empleo del patrón Tipo III con duración de la tormenta de 24 horas de la Soil Conservation Service (SCS) del U. S. Department of Agriculture. Por lo que para hacer uso del concepto de analogía y transposición de tormentas se debe estudiar con profundidad las características sinópticas y del patrón de lluvia del evento en cuestión, así como el análisis y la evaluación de los efectos orográficos.

### *Conclusiones*

- Se determinó un procedimiento para obtener los diagramas de masa y hietogramas regionales respectivos, utilizando la precipitación generada por ciclones tropicales del período 2004-2012 estimada por el modelo WRF.
- La distribución temporal que arrojan los diagramas de masa (hietogramas) obtenidos presentó mayores diferencias por región que a nivel de las subregiones

definidas ya que la escala de variación altimétrica es poco significativa comparada con la escala de variación planimétrica.

- Los diagramas de masa fueron comparados con sus semejantes obtenidos por el SCS (1986) y Planos (1991) donde se detectó que:
  - La regionalización tenida en cuenta en este estudio da peso a la heterogeneidad espacial que manifiesta el evento ciclónico tropical.
  - Las características físico-geográficas y otros elementos del paisaje determinan influencias significativas sobre la distribución temporal de la precipitación generada por ciclones tropicales.
- Los patrones de distribución temporal de la precipitación generada por ciclones tropicales estimada por el modelo WRF reflejó acertadamente los aspectos que influyen en las lluvias de estos organismos a su paso por cada una de las regiones del país.

### ***Recomendaciones***

Aunque los resultados alcanzados en este trabajo constituyen un paso de avance importante ante la necesaria disponibilidad de herramientas físico-matemáticas, computacionales y de observación que alcancen alta resolución espacial y temporal para el pronóstico hidrometeorológico, aún queda mucho por hacer, por lo que se recomiendan las siguientes acciones para la continuación de la presente investigación.

- Tomando en cuenta la resolución espacial de las corridas de reanálisis del CFA del INSMET (Dominio 2, 9 km x 9 km), se recomienda realizar un estudio de sensibilidad de la malla de cómputo del WRF para evaluar las salidas de precipitación con datos de estaciones a lo largo de todo el territorio nacional.
- Corregir los resultados obtenidos tomando en cuenta la anterior recomendación e incorporando las salidas de precipitación de un mayor número de ciclones tropicales simulados por el WRF.
- Determinar patrones de distribución temporal de la precipitación generada por otros sistemas meteorológicos aplicando el procedimiento desarrollado en esta investigación.
- Estudiar y aplicar otros criterios físico-geográficos más rigurosos para la regionalización de las precipitaciones y así obtener patrones más representativos.

### ***Referencias bibliográficas***

1. [Aroné Epinoza, 2016] Aroné Epinoza, J. (2016). Slideshare. <https://es.slideshare.net/JhoelOaronEpinoza/precipitacion-57357311>.
2. [Pérez et al., 2014] Pérez, A. et al (2014). Sistema de predicción numérica océano-atmósfera para la República de Cuba. Informe resultado científico, Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología.
3. [Campos Aranda, 1992] Campos Aranda, D. F. (1992). *Procesos del Ciclo Hidrológico*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México.
4. [Chow et al., 1994] Chow, V. T., Maidment, D., and Mays, L. (1994). Tormentas de Diseño. *Libro: Hidrología Aplicada*, Capítulo 14:455.
5. [Cleveland, 1979] Cleveland, W. S. (1979). Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. *Journal of the American Statistical Association*, 74(368):829–836.
6. [Cohen, 1999] Cohen, R. A. (1999). An introduction to PROC LOESS for local regression. In *Proceedings of the 24th SAS users group international conference, Paper*, volume 273.

7. [Dolling and Varas, 2006] Dolling, O. R. and Varas, E. A. (2006). Tormentas de diseño usando redes neuronales artificiales. *Ing. Hidráulica en México*, 21.
8. [Jiménez, 1972] Jiménez, A. N. (1972). *Geografía de Cuba*. La Habana: Pueblo y Educación.
9. [Jiménez et al., 2014] Jiménez, M., Guadalupe, L., Fuentes, O. A., and Prieto, R. (2014). *Serie Fascículo: Ciclones Tropicales*. Centro Nacional de Prevención de Desastres; Secretaría de Gobernación, México, D.F.
10. [Lorente, 1967] Lorente, J. M. (1967). *Meteorología*. Editorial Labor, Madrid, España.
11. [Magaz, 1989] Magaz, A. (1989). Mapa Relieve. Hipsometría. In *Nuevo Atlas Nacional de Cuba*. Instituto de Geografía de la Academia de Ciencias de Cuba e Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía, La Habana.
12. [Planos et al., 2004] Planos, E., Limia, M., and Vega, R. (2004). Intensidad de las precipitaciones en Cuba. *Informe científico del Proyecto 4053, Instituto de Meteorología, Ciudad de La Habana*.
13. [Planos et al., 2011] Planos, E., Limia, M., Vega, R., Boudet, D., and Hernández, M. (2011). Las grandes precipitaciones y las precipitaciones intensas en Cuba: causas y características. *Informe científico del Proyecto 0801, Instituto de Meteorología, Ciudad de La Habana*.
14. [Rodríguez and Marrero, 2010] Rodríguez, Y. and Marrero, N. (2010). Metodología para la simulación hidrológica de eventos extremos máximos en ausencia de datos hidrométricos a escala horaria. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 19(4):53–59.