

# ENFOQUE ANALÍTICO PARA LA DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE AVANCE DE LA TORMENTA CONSIDERANDO EL ORIGEN Y PELIGRO DE LAS PRECIPITACIONES

~~Dr.~~ *Yoel Martínez González*<sup>1</sup>

y ~~Dr.~~ *Eduardo O. Planos Gutiérrez*<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, InSTEC  
Universidad de La Habana, e-mail: [ymg@instec.cu](mailto:ymg@instec.cu)

<sup>2</sup> Centro del Clima, Instituto de Meteorología, INSMET, e-mail: [eduardo.planos@insmet.cu](mailto:eduardo.planos@insmet.cu)

## RESUMEN

El coeficiente de avance de la tormenta es un parámetro hidrológico utilizado para determinar el instante donde tiene lugar la intensidad máxima de la precipitación, durante eventos pluviales específicos. Esto facilita la selección del modelo de distribución temporal de precipitaciones, lo cual es muy útil para el diseño de obras ingenieras y la predicción hidrológica. En este artículo se aborda este tema, definiendo el coeficiente de avance según el origen y peligrosidad de la precipitación; fundamentalmente para las precipitaciones causadas por los eventos meteorológicos propios de la interacción trópico - latitudes medias, los tropicales no ciclónicos y los ciclónicos. Entre los resultados obtenidos, figura la obtención de los hietogramas de precipitación para diferentes sistemas hidrometeorológicos, así como diversos tipos de peligrosidad, lo cual le otorga carácter climático y regional.

Palabras clave: precipitaciones, coeficiente de avance de la tormenta, peligro

## ABSTRACT

The storm advancement coefficient is a hydrological parameter used to determine the instant where the maximum rainfall intensity occurs for specific storms. This avoid the selection of the rainfall temporal distribution model, which is very useful for hydraulic engineering design and hydrological prediction. The proposed approach, define the coefficient according to rainfall origin and its hazard; mainly for the meteorological events typical of the tropic interaction - middle latitudes, non-cyclonic tropical and cyclonic. Finally, rainfall hyetographs for different hydrometeorological systems was obtained, as well as several types of hazards, which gives it a climatic and regional character.

Keywords: rainfalls, storm advancement coefficient, hazard

## INTRODUCCIÓN

Los patrones conductuales de precipitaciones en el archipiélago cubano, han sido estudiados por Planos et al. (2011), con un enfoque hidrometeorológico e hidrológico, basado en el origen de los eventos pluviales. En esta contribución se caracterizan las particularidades de las grandes precipitaciones y las precipitaciones intensas. Para este trabajo se asume la agrupación general de los sistemas meteorológicos utilizada por dicho autor: a) sistemas de interacción trópico-latitudes medias - SITLM y b) sistemas de tipo tropical (no ciclónicos - STNC y ciclónicos - STC).

Bajo la denominación de SITLM se agrupan las situaciones sinópticas que fundamentalmente se desarrollan en el período poco lluvioso (noviembre-abril), tales como: baja extra tropical, débil gradiente barométrico, zonas frontales y anticiclón típico continental. En sentido general, se puede afirmar que las precipitaciones de este origen no suelen producir frecuentemente fenómenos hidrometeorológicos relevantes, y aún en el caso en que éstas sean significativas, la humedad antecedente en el suelo no favorece la generación de crecidas y, mucho menos, la simultaneidad de ellas en una región.

De forma análoga, se definen STNC y STC para situaciones típicas de la temporada lluviosa, aunque la actividad ciclónica y de otros tipos de fenómenos meteorológicos tropicales se extiende hasta mediados de noviembre; mes comprendido entre los poco lluviosos. Los sistemas que prevalecen en esta época del año son ondas tropicales y ciclones (en este último se incluyen las depresiones tropicales); fenómenos que frecuentemente producen copiosas e intensas precipitaciones. Esta división (STNC y STC) ha sido propuesta por Planos et al. (2011) teniendo en cuenta las diferencias en la potencialidad pluvial de estos fenómenos, en términos de magnitud e intensidad, así como de la extensión del área que afectan. En las tablas 1, 2 y 3 se muestran las curvas que relacionan la intensidad de las precipitaciones, duración y frecuencia (IDF) obtenidas por Planos et al. (2011), de acuerdo a la génesis u origen de las precipitaciones, según clasificación establecida por dichos autores.

**Tabla 1. Sistemas de Interacción Trópico-Latitudes Medias (SITLM)**

t (min)	Intensidad (mm/min)				
	prob = 0,999	prob = 0,99	prob = 0,94	prob = 0,8	prob = 0,5
5	3,87	2,93	2,2	1,68	1,22
20	2,76	2,05	1,49	1,09	0,74
40	2,28	1,68	1,2	0,87	0,58
60	1,79	1,31	0,93	0,66	0,43
300	0,37	0,27	0,19	0,13	0,08
1440	0,21	0,15	0,1	0,07	0,04

**Tabla 2. Sistemas Tropicales No Ciclónicos (STNC)**

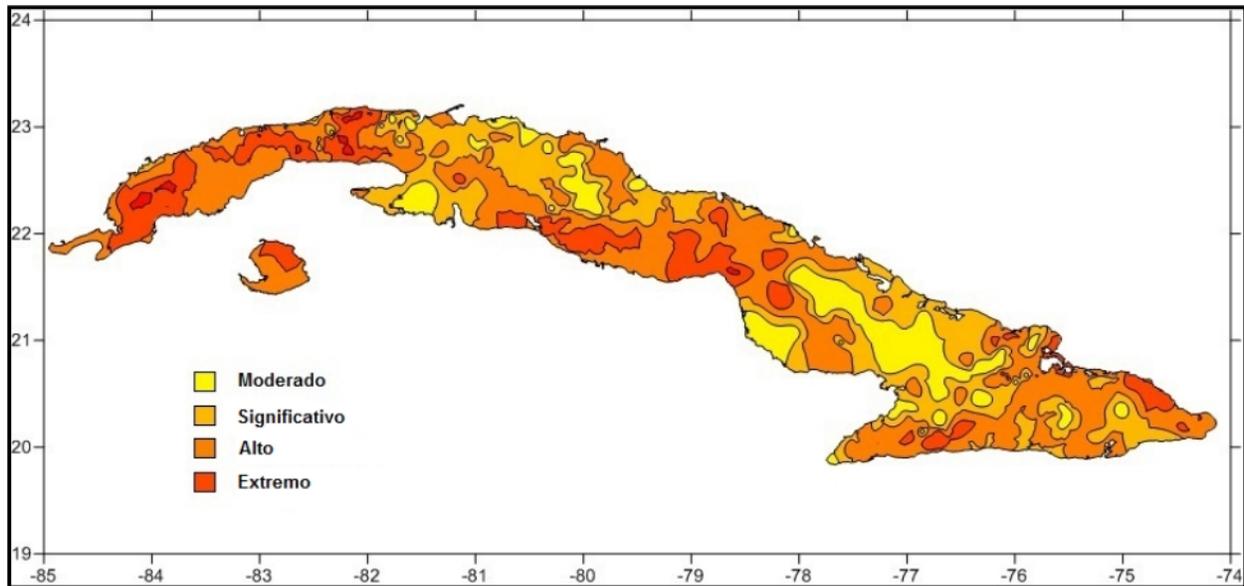
t (min)	Intensidad (mm/min)				
	prob = 0,999	prob = 0,99	prob = 0,94	prob = 0,8	prob = 0,5
5	4,68	3,49	2,55	1,89	1,3
20	3,91	2,87	2,06	1,48	0,98
40	2,75	2,04	1,47	1,07	0,72
60	2,25	1,66	1,19	0,87	0,58
300	0,73	0,55	0,4	0,3	0,21
1440	0,33	0,24	0,17	0,12	0,07

**Tabla 3. Sistemas Tropicales Ciclónicos (STC)**

t (min)	Intensidad (mm/min)				
	prob = 0,999	prob = 0,99	prob = 0,94	prob = 0,8	prob = 0,5
5	5,7	4,2	3	2,2	1,4
10	4,8	3,6	2,6	1,9	1,3
20	4,1	3	2,2	1,6	1,1
40	3,3	2,4	1,7	1,2	0,8
60	2,7	1,9	1,4	0,9	0,6
90	2,2	1,6	1,1	0,8	0,5
300	1,5	1	0,7	0,4	0,2
720	0,9	0,6	0,4	0,3	0,1
1440	0,5	0,4	0,2	0,2	0,1

Otro enfoque relacionado con los patrones de las precipitaciones es el análisis del peligro asociado a éstas, tanto en magnitud como en intensidad, por los desastres que provocan en prácticamente todos los ecosistemas naturales y antrópicos (Planos et al. 2011). Además de las inundaciones, existen otras consecuencias, como la pérdida de suelo por la erosión, el incremento de la sedimentación en los embalses, la influencia en la disponibilidad de agua y en las políticas de manejo de este recurso.

En este sentido, Planos et al. (2005), elaboraron un mapa de peligro (Figura 1), el cual fue actualizado por Planos et al. (2011), a partir de los criterios establecidos en las tablas 4 y 5. Este mapa, y el material complementario que le acompaña, tienen un elevado valor práctico, ya que permite utilizarlo con propósitos medioambientales e ingenieriles. Este mapa puede ser empleado en cualquiera de las aplicaciones donde el impacto de las grandes precipitaciones y las precipitaciones intensas sea nocivo; y, además, como criterio de analogía para trabajar en zonas donde no existan datos.



**Figura 1. Mapa de peligro de precipitaciones intensas y gran magnitud**  
(Fuente: Planos et al. 2011)

**Tabla 4. Criterios para clasificar el peligro de magnitud e intensidad de las precipitaciones** (Fuente: Planos et al. 2011)

Indicador	Rango	Categoría
Lámina máxima absoluta (mm)	< 100	1
	100 - 149	2
	150 - 199	3
	200 - 249	4
	> 250	5
Frecuencia láminas > 100 mm	< 0,2	1
	0,2 - 0,49	2
	0,5 - 0,69	3
	0,7 - 0,99	4
	> 1,00	5
Lámina con periodo de retorno de 100 años (mm)	< 250	1
	250 - 349	2
	350 - 399	3
	400 - 449	4
	> 450	5
Probabilidad de una lámina de lluvia $\geq 100$ mm en 2 años	< 0,2	1
	0,2 - 0,49	2
	0,5 - 0,69	3
	0,7 - 0,99	4
	> 1,00	5

**Tabla 5. Categoría de peligro de las precipitaciones**

(Fuente: Planos et al. 2011)

Rango Categoría	Descripción
< 2	Peligro moderado
2 – 2,9	Peligro significativo
3 – 4,9	Alto peligro
5	Peligro extremo

En las tablas 6, 7 y 8 se muestran las curvas IDF obtenidas por Planos et al. (2011), de acuerdo peligro de las precipitaciones, según clasificación de la tabla 5.

**Tabla 6. Peligro moderado**

t (min)	Intensidad (mm/min)			
	prob = 0,2	prob = 0,1	prob = 0,02	prob = 0,01
5	1,01	1,52	2,29	3,02
20	0,69	1,07	1,66	2,23
60	0,35	0,58	0,94	1,31
150	0,18	0,29	0,47	0,65
1440	0,02	0,04	0,07	0,09

**Tabla 7. Peligro significativo**

t (min)	Intensidad (mm/min)			
	prob = 0,2	prob = 0,1	prob = 0,02	prob = 0,01
5	1,00	1,50	2,25	2,95
20	0,77	1,13	1,67	2,16
60	0,40	0,63	0,99	1,34
150	0,18	0,30	0,49	0,69
1440	0,02	0,04	0,07	0,10

**Tabla 8. Peligros alto y extremo**

t (min)	Intensidad (mm/min)			
	prob = 0,2	prob = 0,1	prob = 0,02	prob = 0,01
5	1,03	1,54	2,31	3,03
20	0,69	1,06	1,62	2,15
60	0,33	0,58	1,01	1,46
150	0,16	0,29	0,52	0,76
1440	0,02	0,04	0,07	0,12

Los patrones conductuales de las precipitaciones, ya sea clasificados por su origen o por el peligro asociado a su magnitud e intensidad, pueden ser representados por las curvas IDF (Martínez et al, 2019). Estas curvas, entre múltiples aplicaciones, facilita que los diseños

ingenieriles de obras civiles, y en particular las hidráulicas, sean más confiables (Gutiérrez et al. 2015 y Balbastre 2018), y constituye una herramienta de análisis y planificación en el corto, mediano y largo plazos, que tiene un peso significativo en las decisiones de las inversiones y su protección. En la tabla 9 se muestra un grupo de ecuaciones, utilizadas en la práctica hidrológica, para estimar la intensidad de la precipitación. Según estas ecuaciones la intensidad de la precipitación decrece con la duración del evento lluvioso, lo cual se puede asociar a cierta probabilidad de ocurrencia.

**Tabla 9. Ecuaciones empíricas para curvas IDF (Fuente: Martínez et al. 2019)**

Autor	Formulación
Talbot	
Bernard	
Sherman	
Wenzel	
a, b y n = parámetros de ajuste relacionados a los datos	

No obstante la contribución de Planos et al. (2011) y el reciente trabajo de Martínez et al. (2019), relacionado con STC; aún persiste un vacío en el estudio del comportamiento de otros tipos de sistemas hidrometeorológicos (SITLM y STNC), y el peligro asociado a éstos. Planos et al (2011) hacen una detallada caracterización de las grandes precipitaciones y las precipitaciones intensas, según su origen; mientras que Martínez et al (2019) emplea el modelo de Wenzel para obtener los parámetros de las curvas IDF para los STC ; construye los hietogramas adimensionales de precipitación y estima el coeficiente de avance para este tipo de sistemas. Teniendo en cuenta lo anterior, en este trabajo se pretende cubrir el vacío de conocimiento que existe en esta temática.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### *Formulación general para la determinación del coeficiente de avance de la tormenta*

Al realizar una inspección en las ecuaciones (1.a) – (1.d), es posible extender la estructura de las mismas, considerando que cada parámetro de ajuste varía con la probabilidad de ocurrencia, utilizando el siguiente modelo:

A continuación, en la tabla 10 se muestran los valores que deben adoptar los parámetros de la ecuación (2), para describir los modelos de curvas IDF de Talbot, Bernard, Sherman y Wenzel, presentados con anterioridad en la tabla 9.

**Tabla 10. Valores de los parámetros de la ecuación (2) para casos particulares**

Autor	Parámetros
Talbot	$n = 1, c = 1$

Bernard	$b = 0, c = 1$
Sherman	$n = 1$ $c$ : reemplaza a $n$ en (1.c)
Wenzel	$c = 1$

La utilización de curvas adimensionales es un recurso técnico de excelencia para hacer comparables los registros en localidades físico-geográficamente homogéneas; para dar mayor certidumbre a otras técnicas como la transposición de valores y para tratar los valores anómalos (Martínez et al. 2019). Para hacer esto, primeramente, se normalizan los tiempos e intensidades. En este caso, se considera la duración  $T_d = 1440$  min y la intensidad media  $I_m$  para cada probabilidad de ocurrencia, como  $I_m$ , siendo  $I_m$  la precipitación acumulada en  $T_d$ . De esta manera, se establecen las siguientes relaciones adimensionales  $I/I_m$  e  $T/T_d$ , para tiempo e intensidad respectivamente y entonces la ecuación (2) se puede reescribir como:

Keifer y Chu (1957), desarrollaron un modelo de intensidad instantánea basado en las curvas IDF, siendo descrito en detalle por Chow et al. (1994). Este modelo fue aplicado por Na y Yoo (2018), para evaluar la distribución temporal de precipitaciones con eventos máximos anuales en Seoul, Corea, así como por Martínez et al. (2019) para los STC. Al aplicar este modelo a la ecuación (3), puede demostrarse que la intensidad instantánea  $i$  vendrá dada, de forma general por:

En la expresión anterior es introducida la variable  $\tau$ , la cual representa una escala temporal relativa al coeficiente de avance de la tormenta  $r$ , y se define como:

$$(5)$$

El procedimiento tradicional para determinar el parámetro  $r$ , es calcular la relación entre el tiempo de intensidad máxima y la duración total de la tormenta para una serie de tormentas ( $j = 1, 2, \dots, m$ ) de diferentes duraciones  $T_{dj}$ . La media de estas relaciones, ponderada de acuerdo con la duración de cada evento, es el valor representativo de  $r$  (Chow et al. 1994):

Martínez et al. (2019), proponen un procedimiento analítico para estimar dicho parámetro, partiendo del hietograma obtenido por el método de la intensidad instantánea. De forma análoga, este procedimiento será extendido y generalizado a los sistemas abordados en esta contribución, relacionado además con el peligro de las precipitaciones, utilizando el modelo general de intensidad, definido por la ecuación (4). La intensidad máxima se obtiene evaluando para  $\tau = r$  (equivalente a  $\tau = 0$ ), o sea:

El hietograma descrito por la ecuación (4) es una función por tramos, es continua en  $\zeta = 0$ , pero no es derivable ya que . Por esta razón, Martínez et al. (2019), proponen establecer una vecindad en torno a  $\zeta = 0$ , es decir  $\zeta = \pm \tau$  y para el modelo en discusión resulta:

siendo  $k$  un coeficiente muy próximo a 1, por lo que la ecuación (4), puede rescribirse como:

Para  $[a,b,c,n]$  conocidos, se impone un valor de  $k$  suficientemente próximo a la unidad (por ejemplo,  $k = 0.95 \div 0.99$ ) y la ecuación (9) puede ser resuelta por algún método numérico de separación de raíces conocido, en términos de la variable  $\tau$ . La dependencia de  $[a,b,c,n]$  con la probabilidad de ocurrencia de las precipitaciones según su origen, condiciona a la vecindad funcionalmente dependiente de la probabilidad de ocurrencia de dicha variable hidrometeorológica. Para el caso particular de  $c = 1$  (modelo de curvas IDF propuesto por Wenzel), se puede demostrar fácilmente que la ecuación (9) se reduce a la forma:

En la ecuación (10), se introduce la sustitución  $z = \tau$  y ésta queda reducida a un polinomio de segundo grado, cuyas raíces  $\tau_1$  y  $\tau_2$  quedan determinadas por:

Martínez et al. (2019) destacan que el valor de  $r$  tiene carácter regional y a la vez probabilístico, pues depende de parámetros asociados a las curvas IDF. También está determinado por los niveles de aproximación preestablecidos por los coeficientes  $a$  y  $k$ . Esto dificulta la determinación de  $r$  a través de las ecuaciones (9) u (11) porque los parámetros  $a$  y  $k$  están correlacionados. Por esta razón, en la vecindad de  $r$ , se diferencia la ecuación (4) respecto a  $\tau$  y se evalúa para  $\tau = r - \epsilon$ , es decir:

En la vecindad considerada, la ecuación (12) puede aproximarse por:

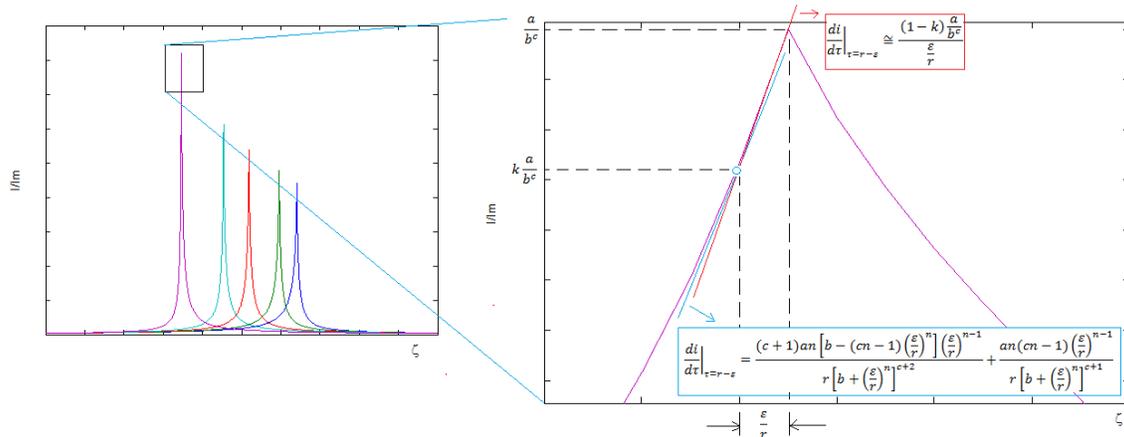
Igualando las ecuaciones (12) y (13) es posible obtener la ecuación general para el coeficiente de avance de la tormenta, aplicable a cualquiera sea el origen de las precipitaciones:

siendo  $\tau$  solución numérica de la ecuación (9), tal que .

Para  $c = 1$ , la ecuación (14) se reduce a la obtenida por Martínez et al. (2019) para determinar el coeficiente de avance de la tormenta  $r$ , o sea:

En este caso,  $\zeta$  es la raíz positiva de la ecuación (11), es decir:

En las ecuaciones (14) y (15),  $\zeta$ , pues los parámetros  $b$ ,  $c$  y  $n$  varían con la probabilidad de ocurrencia, según sea el origen de las precipitaciones. En la figura 2 se muestra gráficamente la interpretación geométrica del procedimiento propuesto, considerando  $\zeta$ .



**Figura 2. Interpretación geométrica del procedimiento propuesto**

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### *Estimación de los parámetros de las curvas IDF según el origen y peligro de las precipitaciones*

Planos et al. (2011) demuestran que existe un patrón identificable en las relaciones temporales y espaciales de las precipitaciones, lo que permitió a dichos autores determinar relaciones tipo en localidades homogéneas. Dentro de éstas se presentan relaciones tipos que son de extendido uso ingenieril, teniendo especial relevancia las curvas IDF, así como el coeficiente de avance de la tormenta  $r$ . Las curvas IDF se obtienen a partir de las características de las precipitaciones según su origen, peligro y probabilidad de ocurrencia. El conocimiento de las precipitaciones asociadas a diversos sistemas hidrometeorológicos y tipos de peligro, puede establecer criterios de diseño para obras ingenieras diversas.

En esta contribución, de forma análoga a lo hecho por Martínez et al. (2019), serán determinados los parámetros de las curvas IDF, correspondientes al modelo de Wenzel (ecuación 1.d), sin restarle generalidad al procedimiento aquí presentado, el cual se sustenta sobre el modelo general de curvas IDF dado por la ecuación (3). En la tablas 11 y 12 se muestran los valores de  $[a,b,n]$  a partir de los resultados Planos et al (2011) según el origen y peligro de las precipitaciones respectivamente, obtenidos al aplicar el conocido método de los mínimos cuadrados, caracterizados por las altas correlaciones obtenidas.

**Tabla 11. Parámetros de curvas IDF del modelo de Wenzel según el origen y probabilidad de ocurrencia de las precipitaciones**

Parámetros	Sistemas de Interacción Trópico - Latitudes Medias (SITLM)				
	prob = 0,999	prob = 0,99	prob = 0,94	prob = 0,8	prob = 0,5
a	1,0055459	1,0031818 5	0,9996423 4	0,9956794	0,9941 1433
b	0,04493726	0,0417717 8	0,0362670 7	0,031846	0,0240 8982
n	0,8202653	0,8203031 6	0,8271135 2	0,8181176 9	0,8395 0346
Coeficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,99601815	0,9963058 8	0,9968935 9	0,9968933 2	0,9973 5852
Parámetros	Sistemas Tropicales No Ciclónicos (STNC)				
	prob = 0,999	prob = 0,99	prob = 0,94	prob = 0,8	prob = 0,5
a	1,02555233	1,0264220 9	1,0259757	1,0285810 3	1,0310 4293
b	0,05876699	0,0573078 1	0,0551962 4	0,0524755 6	0,0451 634
n	0,78201672	0,7827663 3	0,7809309 8	0,7811411 1	0,8138 8196
Coeficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,998627	0,9996137 7	0,9997685 2	0,9998595 5	0,9999 9486
Parámetros	Sistemas Tropicales Ciclónicos (STC)				
	prob = 0,999	prob = 0,99	prob = 0,94	prob = 0,8	prob = 0,5
a	1,08115658	1,0691529 7	1,0766697 3	1,0433900 8	0,9961 0462
b	0,07081438	0,0688126 3	0,0568480 3	0,0587743 8	0,0524 1834
n	0,65109633	0,6037223 8	0,7400349 2	0,5941304 3	0,7281 2478
Coeficiente de	0,99732172	0,9979584	0,9983300	0,9983753	0,9986

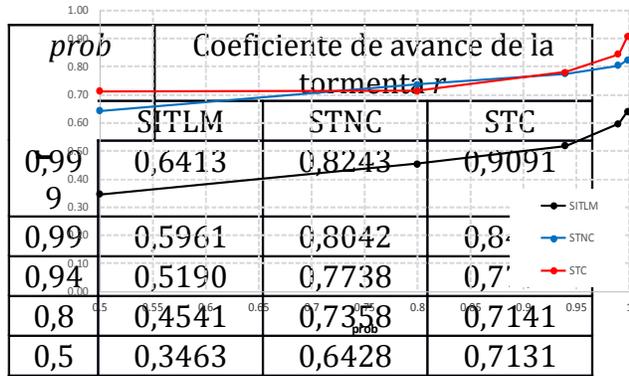
determinación R <sup>2</sup>		6	2	4	7582
------------------------------	--	---	---	---	------

**Tabla 12. Parámetros de curvas IDF del modelo de Wenzel según el peligro y probabilidad de ocurrencia de las precipitaciones**

Parámetros	Peligro moderado			
	prob = 0,2	prob = 0,1	prob = 0,02	prob = 0,01
a	1,01836241	1,0064680 2	1,0117613 5	1,0161458
b	0,01716559	0,0222401 1	0,0263349 6	0,02652005
n	1,02622485	0,9664545 2	0,9533433 1	0,9875706
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,99979561	0,9998580 8	0,9998055 9	0,99990775
Parámetros	Peligro significativo			
	prob = 0,2	prob = 0,1	prob = 0,02	prob = 0,01
a	1,00558929	1,0097485 6	1,0313102 5	1,04442169
b	0,01787631	0,0218350 8	0,0272546 6	0,03495176
n	1,07872786	0,9597654 8	0,9731707 4	0,88854247
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,99856711	0,9999651 8	0,9994297 3	0,99863044
Parámetros	Peligros alto y extremo			
	prob = 0,2	prob = 0,1	prob = 0,02	prob = 0,01
a	1,00971041	1,0097485 6	1,0313102 5	1,04442169
b	0,01557916	0,0218350 8	0,0272546 6	0,03495176
n	0,97415468	0,9597654 8	0,9731707 4	0,88854247
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,99890429	0,9999651 8	0,9994297 3	0,99863044

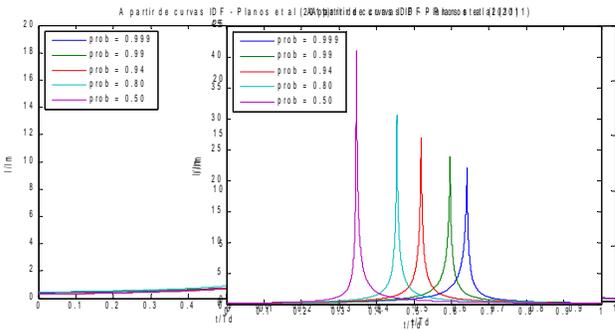
***Determinación del coeficiente de avance de la tormenta según el origen y peligro de las precipitaciones***

Una vez conocidos los parámetros  $[a,b,n]$ , para determinar el coeficiente de avance de la tormenta  $r$ , pueden ser aplicadas las ecuaciones (14) o (15), haciendo  $k = 0,99$ . En este caso, para ser consecuente al proceso de estimación de parámetros del modelo de curvas IDF de Wenzel, será aplicada la ecuación (15) y de acuerdo al origen y peligro de las precipitaciones se obtienen los resultados que se muestran en las figuras 3, 4, 5 y 6.

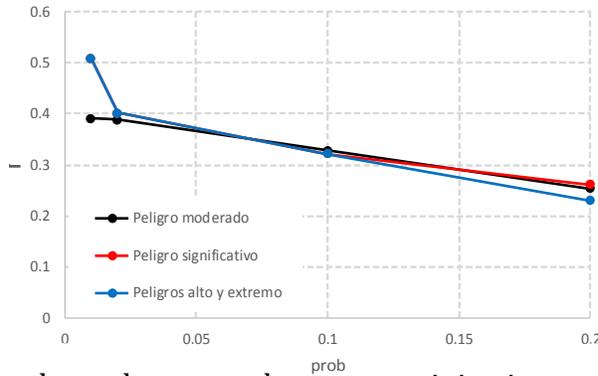


**Figura 3. Coeficiente de avance de la tormenta según el origen y probabilidad de ocurrencia de las precipitaciones**

Como se aprecia en la figura 4, de acuerdo con Chow et al. (1994), para  $prob < 0,94$ , los SITLM tienden a ser de tipo *avanzado*, ya que  $r < 0,5$ ; lo que significa que la intensidad máxima ocurre antes del punto medio de duración total de la tormenta. En el resto de las probabilidades y tipos de sistemas (STNC y STC), debido a que  $r > 0,5$  la intensidad máxima ocurre después de la mitad de duración de la tormenta y por tanto los sistemas son de tipo *retardado* (figura 4). Otro aspecto de interés es que, en el rango de probabilidades analizado, el coeficiente de avance de la tormenta para los sistemas tropicales ciclónicos y no ciclónicos es muy similar. Además, en términos adimensionales, las intensidades máximas son del mismo orden. Estos sistemas, como se explicó anteriormente, se diferencian fundamentalmente en su potencial pluvial, así como la extensión del área que afectan.



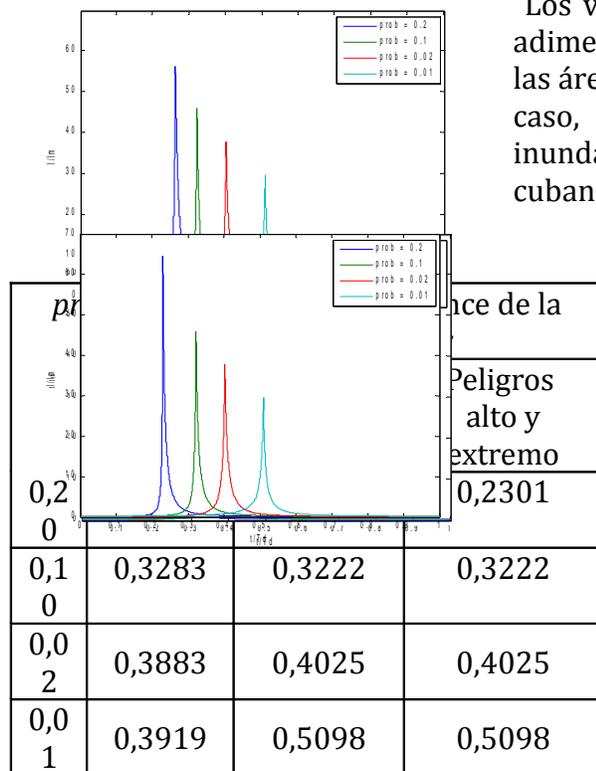
**Figura 4. Hietogramas adimensionales según el origen de las precipitaciones para cada probabilidad de ocurrencia a) SITLM, b) STNC, c) STC**



**Figura 5. Coeficiente de avance de la tormenta según el peligro y probabilidad de ocurrencia de las precipitaciones**

El enfoque relacionado con la peligrosidad de las precipitaciones aporta nuevos elementos, ya que considera el efecto regional de áreas de igual peligro. El patrón

conductual de precipitaciones intensas y de gran magnitud, en sentido general, arroja hietogramas de tipo *avanzado* para los distintos tipos de peligro establecidos (moderado, significativo, alto y extremo), en el rango de probabilidades de 0,01 a 0,2. Es válido destacar que estos valores reflejan la probabilidad de sobrepasar cierto valor de precipitación (acorde con Planos et al. 2011, 100 mm), ya que marca la tendencia del coeficiente de avance de la tormenta en el rango analizado (figura 5).



Los valores de  $r$  obtenidos, así como los hietogramas adimensionales de la figura 6 pueden ser aplicados a las áreas de peligro del mapa de la figura 1, según sea el caso, lo cual permitirá establecer estudios de inundaciones en cuencas hidrográficas del archipiélago cubano.

**Figura 6. Hietogramas adimensionales según el peligro de las precipitaciones para cada probabilidad de ocurrencia a) moderado, b) significativo, c) alto y extremo**

## CONCLUSIONES

El procedimiento analítico desarrollado para la determinación del coeficiente de avance de la tormenta permite determinar instante de tiempo donde tiene lugar la intensidad máxima

de la precipitación en cada uno de los sistemas meteorológicos analizados en este trabajo; facilitando la selección del modelo de distribución temporal de precipitaciones. Lo anterior tiene un valioso uso en la Hidrología aplicada y, particularmente, en la determinación de los parámetros de seguridad de las obras ingenieras.

Este procedimiento constituye una generalización al presentado por Martínez et al. (2019) y de acuerdo con la literatura consultada, es un aporte al análisis del impacto de las grandes precipitaciones y las precipitaciones intensas en el escurrimiento máximo. Entre sus bondades más representativas, permite la obtención de los hietogramas de precipitación para diferentes sistemas hidrometeorológicos, así como diversos tipos de peligrosidad, lo cual le otorga carácter climático y regional.

Fueron determinados los coeficientes de avance de las tormentas y su impacto en los hietogramas adimensionales, demostrándose que para los SITLM predomina el modelo avanzado, porque  $r < 0.5$  y que en los STNC y STC prevalece el modelo retardado, con  $r > 0.5$ .

## REFERENCIAS

**Balbastre R.** (2018). "Análisis comparativo de metodologías de cálculo de tormentas de diseño para su aplicación en hidrología urbana", Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Valencia, España, extraído de: <https://riunet.upv.es/handle> en junio de 2019.

**Chow V. T., Maidment D., y Mays L.** (1994). "Hidrología aplicada", McGraw-Hill Interamericana, S.A., ISBN 958-600-171-7, Santafé de Bogotá, Colombia.

**Keifer, C.J.; Chu, H.H.** (1957). "Synthetic storm pattern for drainage design", J. Hydraul. Div, 1957, 83, 1-25.

**Martínez Y., Planos E., Perdigón D.** (2019). "Hietogramas instantáneos adimensionales para ciclones tropicales que afectan al archipiélago cubano". Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Vol. XL, No. 1, Ene- Abr 2019, pp 17-31, ISSN 1815-591X, RNPS 2066

**Na W., Yoo C.** (2018). "Evaluation of rainfall temporal distribution models with annual maximum rainfall events in Seoul, Korea", Water 2018, 10, 1468; doi:10.3390/w10101468, extraído de: <https://www.mdpi.com/journal/water> en julio de 2019.

**Planos E., Limia M. y Vega R.** (2005). "Intensidad de las precipitaciones en Cuba", Informe científico del Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba.

**Planos E., Limia M., Vega R., Boudet D., y Hernández M.** (2011). "Las grandes precipitaciones y las precipitaciones intensas en Cuba: causas y características", Informe científico del Proyecto 0801, Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba.