

DOI: 10.24850/j-tyca-14-04-04

Artículos

Modelos paramétricos de distribución temporal de precipitaciones en la estación meteorológica Yabú de la provincia Villa Clara, Cuba

Parametric models of rainfall temporal distribution at the Yabú meteorological station in Villa Clara province, Cuba

Carlos Castillo-García¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6430-2775>

Ismabel Domínguez-Hurtado², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7841-8031>

Yoel Martínez-González³, ORCID: <https://www.orcid.org/0000-0002-8023-7897>

¹Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Santa Clara, Cuba, ccgarcia@uclv.cu

²Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara, Santa Clara, Cuba, ismabel.dominguez@vcl.insmet.cu



³Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, La Habana, Cuba,
ymg@instec.cu

Autor para correspondencia: Carlos Castillo-García, ccgarcía@uclv.cu

Resumen

La obtención de patrones de distribución temporal de la lluvia mediante curvas de masa sintéticas o hietogramas es un recurso aplicado a nivel internacional para elaborar la tormenta de diseño. En el presente artículo se realizó un análisis de 243 eventos lluviosos convectivos de más de 25 mm ocurridos en la estación meteorológica Yabú de la provincia Villa Clara, Cuba, en el periodo comprendido desde 1989 hasta 2019, con el objetivo de elaborar los hietogramas sintéticos característicos de la estación mediante el método de Huff. Se categorizaron las lluvias y se identificaron tres tipos SC-T1, SC-T2, SC-T3 de acuerdo con la relación entre el tiempo de duración del aguacero y el tiempo donde ocurren las mayores intensidades. Las curvas de masa obtenidas para cada probabilidad de ocurrencia se expresaron en hietogramas adimensionales, los cuales fueron ajustados a los modelos paramétricos de Sherman, Wenzel y uno propio elaborado por los autores, que describen la distribución de las intensidades con respecto al tiempo. Este resultado permitió obtener las curvas de intensidad-frecuencia-duración para cada

tipo de aguacero, y cada probabilidad de ocurrencia. Se lograron elevados coeficientes de correlación de Pearson y el modelo elaborado por los autores mostró el mejor desempeño. Los resultados indican que los hietogramas adimensionales obtenidos reflejan satisfactoriamente el fenómeno de lluvias convectivas en la localidad de estudio.

Palabras clave: curva de masa, coeficiente de retardo, hietograma sintético, pluviograma, precipitación convectiva.

Abstract

Obtaining patterns of rainfall temporal distribution through synthetic mass curves or hyetographs is a resource applied internationally to develop the design storm. In this paper, an analysis of 243 convective rainfall events of more than 25 mm that occurred in the Yabú meteorological station of Villa Clara province, Cuba in the period from 1989 to 2019, was carried out with the objective of elaborating the synthetic hyetographs characteristic of the station using Huff's method. The rainfall was classified and three types SC-T1, SC-T2, SC-T3 were identified according to the relationship between the duration of storm and the time where the highest intensities occur. The mass curves obtained for each probability of occurrence were expressed in dimensionless hyetographs, which were adjusted to the parametric models of Sherman,

Wenzel and one model elaborated by the authors, which describe the distribution of the intensities with respect to time. This result allowed obtaining the intensity-frequency-duration curves for each type of storm, and each probability of occurrence. High Pearson correlation coefficients were achieved and the model developed by the authors showed the best performance. The results indicate that the dimensionless hyetographs obtained satisfactorily reflect the phenomenon of convective rainfall in the study location.

Keywords: synthetic hyetograph, convective rainfall, pluviogram, mass curve, precipitation.

Recibido: 07/09/2021

Aceptado: 27/12/2021

Introducción



La tormenta de diseño es uno de los componentes de mayor relevancia en modelos de lluvia-escurrimiento debido a que es el punto inicial de cualquier análisis a escala de eventos que se pretenda realizar. Chow, Maidment y Mays (1994) definen de una manera práctica a la tormenta de diseño como un patrón de precipitación definido para utilizarse en el diseño de un sistema hidrológico e incluso puede ser utilizada para estudios de erosividad sobre terrenos con capacidad potencial de deslaves de tierra (Singh & Singh, 2020).

La lluvia es usualmente descrita por varios parámetros asociados con sus características propias (Pochwat, Słyś, & Kordana, 2017): la intensidad (mm/min o mm/h), la lámina de precipitación (mm) y su duración (min, h). Sin embargo, estos no son suficientes para su total descripción, ya que el factor forma o distribución se hace imprescindible obtenerlo, pues puede ser definitorio en un modelo de escorrentía. Mazurkiewicz y Skotnicki (2018b) determinan que puede existir un incremento del pico de la descarga con un incremento del valor del coeficiente de avance de la tormenta r (o retardo del pico), el cual no es más que la relación entre el tiempo desde el inicio de la tormenta hasta donde se produce la mayor intensidad (o mayores intensidades) y el tiempo total de la tormenta.

Acorde con El-Sayed (2018), Dauji (2019), y Balbastre-Soldevila, García-Bartual y Andrés-Doménech (2019), tradicionalmente existen dos formas para encontrar hietogramas patrones para tormentas de diseño. La primera está basada en estudios de los patrones de precipitación reales de eventos lluviosos ocurridos en una estación de medición determinada. En 1986, el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de Estados Unidos del Departamento de Agricultura publicó tormentas sintéticas para el uso en ese país, con duraciones que varían de 6 a 24 horas (Serna & Taipe, 2019); los resultados para 24 h se conocen internacionalmente como Tipo I, IA, II y III (Bezák, Šraj, Rusjan, & Mikoš, 2018), los cuales corresponden a regiones específicas de EUA. Es recomendada según MacCuen (1989) —citado en García-Bartual y Andrés-Doménech (2017)— para cuencas menores de 250 km², y son aplicables para cualquier periodo de retorno.

El método de Huff también obtiene patrones de precipitación (Huff, 1990), y en los últimos años ha ganado en fuerza en muchos países del mundo. Como los propios modelos del SCS, las curvas de Huff son curvas acumulativas adimensionales, con una específica probabilidad de ocurrencia (Pan, Wang, Liu, Huang, & Wang, 2017), y son ampliamente utilizadas en modelos de lluvia-escurrimiento como tormenta de diseño. En la práctica, los datos históricos de tormentas se dividen en cuatro cuartiles de acuerdo con el tiempo del pico normalizado; cada uno de ellos presenta curvas con base en la probabilidad de ocurrencia.

Varios estudios han adoptado la metodología de Huff para la obtención de curvas de masa, así como hietogramas sintéticos representativos de una localidad determinada. El-Sayed (2018) construyó los hietogramas patrones para el área del Sinaí en Oriente medio y llegó a la conclusión de que sus resultados son un 17 % mayor a los del SCS con respecto al pico de la descarga en un modelo de escorrentía teórico-conceptual. Serna y Taipe (2019) realizaron un trabajo muy interesante sobre la variación de los tipos de tormentas obtenidas con el método de Huff con respecto a la latitud donde ocurrían en la zona de los Andes Centrales en Perú. Sumarauw, Pandey, & Legrans (2019); Duka, Lasco, Veyra Jr. y Aralar (2017); Jun, Qin y Lu (2019), así como Priambodo, Suhardjono, Montarcihc y Suhartanto (2019), obtuvieron patrones en varios países del sudeste asiático. Otros estudios en países como Eslovenia y Polonia, reportados por Bezak *et al.* (2018), y Mazurkiewicz y Skotnicki (2018a), realizan análisis similares sobre la influencia de los tipos de lluvia obtenidos en modelos de escorrentía.

La segunda forma para obtener patrones conductuales de distribución temporal de las precipitaciones es la obtención de hietogramas mediante las curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF). Este método fue propuesto inicialmente por Keifer y Chu (1957), y a partir de éste han surgido derivaciones que, según Watt y Marsalek —citados por Krvavica y Rubinić (2020)—, pueden considerarse en dos ramas: a) métodos de figuras geométricas simples y b) métodos basados

en la frecuencia. Entre los más utilizados se encuentran el hietograma rectangular, hietograma triangular, método de Sifalda, tormenta de diseño de Chicago, y su variante mejorada de bloques alternos tal y como reportan Pochwat *et al.* (2017); Balbastre-Soldevila *et al.* (2019), y García-Bartual y Andrés-Doménech (2017). El modelo de intensidad instantánea desarrollado por Keifer y Chu (1957) fue aplicado por Na y Yoo (2018) para evaluar la distribución temporal de precipitaciones con eventos máximos anuales en Seúl, Corea. Recientemente, Martínez Planos y Perdigón (2020) han obtenido patrones de distribución temporal en forma de hietogramas, considerando el origen y peligro de las precipitaciones.

El fenómeno de tormenta local ha sido causante de muchos problemas de inundación súbita en cuencas pequeñas, tal es el caso de la cuenca de los ríos Bélico y Cubanicay en la ciudad de Santa Clara; con la adopción de modelos de lluvia se pretende predecir los impactos de cada tipo de tormenta en la red fluvial; la variación temporal junto con la espacial (esta última reducida casi a cero para cuencas lo suficientemente pequeñas) permite conocer con exactitud la ubicación de los picos del hidrograma resultante en un sistema de drenaje determinado, para la adopción de medidas no estructurales oportunas que permitan salvaguardar bienes y recursos, los cuales son continuamente dañados ante la imposibilidad de predecir dichos eventos.

El objetivo principal de esta contribución es la obtención de los hietogramas de precipitación correspondientes a la estación meteorológica Yabú, cercana a la ciudad de Santa Clara, a través del estudio de 31 años de registros comprendidos entre 1989 y 2019 de eventos lluviosos superiores a 25 mm en 24 h. El estudio se basa en un gráfico unitario de lámina contra tiempo, lo cual permite una flexibilidad mayor para distintos usos tanto ingenieriles como hidrometeorológicos. En este sentido, serán evaluados tres modelos a partir del método de la intensidad instantánea, a partir de la estimación de parámetros mediante un ajuste mínimo cuadrático. Con posterioridad se obtendrán las respectivas curvas IDF, características de la estación en estudio, para utilizarlas en un futuro estudio de regionalización en próximas contribuciones.

Materiales y métodos



La estación meteorológica Yabú (Código 78343) se encuentra en la provincia de Villa Clara, Cuba, localizada en los 22° 26' N y 79° 59' W, a 116.44 m sobre el nivel medio del mar, con presencia de un relieve llano (ver Figura 1), a unos 7 km del centro de la ciudad de Santa Clara. Está enmarcada en la margen este de la cuenca del río Sagua La Grande, sistema fluvial más amplio de la provincia y en donde se encuentran dos de los embalses de mayor importancia económica de la región: embalse Palmarito y Alacranes; aunque no es la única estación meteorológica de la cuenca, su privilegiada posición en la misma permite tener un certero comportamiento de las variables climáticas que afectan el lugar. Comenzó su funcionamiento el 3 de septiembre de 1976, fecha de su primer registro de medición de todas las variables propias. Posee varios instrumentos adecuados para la actividad meteorológica, entre los cuales se encuentran el pluviómetro y pluviógrafo:

1. Pluviómetro: modelo (USWB), con fecha de inicio de mediciones en 1976; las mediciones se realizan en milímetros (mm).
2. Pluviógrafo: marca (Estándar), modelo (P-2), serie (281), fabricado en la antigua Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS), con fecha de inicio de mediciones en 1976.



Figura 1. Ubicación geográfica de la estación meteorológica Yabú, provincia de Villa Clara, Cuba.

Se realiza un análisis de 31 años de registros pluviográficos desde el año 1989 hasta el 2019, con registros solo interrumpidos en periodos que no exceden los tres meses debido a roturas, mantenimiento, mal funcionamiento o mala calidad del pluviograma para su lectura. En el caso del año 1990, sus registros se extraviaron, por ello se considera comenzar el análisis en 1989. El periodo comprendido entre los años 1976 y 1988 no se incluyó por la ausencia intermitente de datos debido a las causas expuestas con anterioridad, además de considerar un futuro análisis de las estaciones restantes en la provincia donde la más joven de las estaciones comienza sus mediciones a finales de la década de 1980. Los pluviogramas fueron discretizados de la siguiente manera:

1. Pluviograma analizado (PAN): carta con presencia de más de dos marcas de sifonados, lo cual significa que en cartas bien calibradas el registro excede los 20 mm y en su gran mayoría los 25 mm. Estos pluviogramas son digitalizados mediante curvas de masas.
2. Pluviograma no analizado (PNA): carta con presencia de 1 a 2 marcas de sifonado, lo cual asegura de 10 a 20 mm de medición en 24 h de registro. A estos pluviogramas no se les realiza curvas de masa, solo se obtienen los valores de lámina medida por el equipo; tiempo medido por el equipo; intensidad media de la precipitación medida en el equipo, y lámina total de 24 horas (esta última es un valor que el operador del equipo escribe en la ficha técnica de la carta; valor obtenido de la medición del pluviómetro que se encuentra a menos de dos metros del pluviógrafo; los PAN también recogerán este valor).
3. Pluviograma perdido (PPE): no se cuenta datos de lluvia en un periodo determinado o el equipo es defectuoso; en algunos casos se obtiene la medición de 24 h; en otros, la causa exacta de la mala medición u otra descripción.

La Tabla 1 muestra un resumen de la obtención de estos datos iniciales por quinquenios. Es importante señalar que la cifra total de PAN no coincide con la de eventos lluviosos registrados debido a que en algunas oportunidades los eventos no superan los 25 mm de lluvia y aunque se digitalice su curva de masa no son incluidos en el análisis. En otros casos,

la lluvia no es estadísticamente significativa para el caso de este estudio, pero sí para la obtención de sus relaciones de IDF paramétricas de corta duración en posteriores contribuciones.

Tabla 1. Resumen de datos de los pluviogramas.

Periodo de medición	PAN	PNA	PPE	Días sin pluviogramas
1989-1994	62	80	6	413
1995-1999	58	72	24	0
2000-2004	55	72	12	120
2005-2009	48	73	16	28
2010-2014	55	81	15	61
2015-2019	43	91	4	122

Fuente: elaboración propia.

El análisis de los PAN y PNA discretiza los eventos lluviosos del periodo 1989-2019, ocurridos en la estación meteorológica Yabú en varios tipos de lluvias, las cuales serán clasificadas de acuerdo con el uso que se les da en esta investigación en:

1. No significativa: lluvia frontal de 0 a 10 mm, generalmente presente en los meses secos y de las cual no se analizará pluviograma.
2. Poco significativa: lluvia de entre 10 y 25 mm, presente por lo general en PNA, aunque de ella solo se obtienen parámetros como intensidad promedio, lámina y tiempo. Se cuantifica un total de 409 eventos.
3. Significativa: lluvia mayor a 25 mm, utilizada para la obtención de curvas de masa; se extraen todos los datos necesarios y se realiza el procesamiento detallado. Están todas en PAN y se cuantifica un total de 243 eventos con duraciones que oscilan de 20 a 285 min, y láminas entre 20 y 125 mm.
4. Eventos ciclónicos: en total se compilan en el periodo la ocurrencia de 20 eventos ciclónicos extremos desde Lily en 1996 hasta Alberto en 2018, la mayoría con problemas en el registro o que el nivel de precipitación en la estación fue poco o no significativo.

Para obtener los patrones de distribución temporal de las precipitaciones representativos de la estación meteorológica Yabú, primero se estudian los procedimientos de Huff (1990), siendo válido destacar que en este caso el propio autor cita que, en su estudio elaborado en 1967, la relación de estas curvas unitarias podía obtenerse a partir de una estación puntual o de un registro de un área desde 130 hasta 1 035 km². Señala además que la distribución de la lluvia es agrupada de acuerdo con la posición del momento donde ocurren las

máximas intensidades del evento, lo cual, a su consideración, podría ocurrir en el primer, segundo, tercer y cuarto cuartil de la tormenta.

La revisión de la literatura indica que existen ejemplos de reducción de cantidad de cuartiles, tal es el caso de Serna y Taipe (2019), quienes proponen tres, cuya filosofía será adoptada en este estudio. Dauji (2019) propone una nueva metodología, también inspirada en el método de Huff, que detalla la elaboración de hietogramas sintéticos usando la curva de masa generalizada del 95 % de nivel de confianza para cada año; su resultado es la obtención de una curva de masa unitaria global, la cual se dimensiona con los parámetros de curvas IFD de la región de estudio. Para elaborar las curvas de masa unitarias en este estudio se propone la siguiente secuencia de pasos:

1. Obtener las curvas de masa dimensionales de cada evento lluvioso ocurrido mayor de 25 mm de la estación de estudio.
2. Elaborar la curva de masa unitaria de todos los eventos registrados en el paso 1, no considerando en esta curva los tramos iniciales y finales, donde la intensidad sea menor a 0.033 mm/min consideradas débiles (AEMET, 2015).
3. Clasificar en tres grupos (Tipo 1, 2 y 3, respectivamente) las curvas de masa unitaria de acuerdo con las probabilidades de ocurrencia (obtenida para cada valor unitario de tiempo con intervalos de 5 % usando los valores percentiles en P_{10} , P_{20} , P_{30} ,... P_{90}), y a la relación entre el tiempo de duración del aguacero y el tiempo donde ocurren las mayores

intensidades (coeficiente de avance de la tormenta r). Tipo 1 ($r < 0.5$, aguaceros de tipo adelantado); Tipo 2 ($r \sim 0.5$, aguaceros de tipo centrado), y Tipo 3 ($r > 0.5$, aguaceros de tipo retardado).

4. Encontrar los hietogramas adimensionales de Tipo 1, 2 y 3, respectivamente, a partir de las curvas de masa unitaria del paso 3.
5. Obtener los parámetros de ajuste de modelos paramétricos de distribución temporal de las precipitaciones en la estación de referencia.
6. Obtener las respectivas curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF).

Los patrones conductuales de las precipitaciones pueden ser representados por las curvas IDF (Planos, Limia, & Vega, 2005; Martínez *et al.*, 2020). Estas curvas, entre múltiples aplicaciones, facilitan que los diseños ingenieriles de obras civiles, y en particular las hidráulicas, sean más confiables (Gutiérrez, Pérez, Angulo, Chiriboga, & Valdés, 2017; Balbastre, 2018), y constituyen 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 2 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 con cierta probabilidad de ocurrencia.

Tabla 2. Ecuaciones empíricas para curvas IDF.

Autor	Formulación
Talbot	$I = \frac{a}{t+b}$ (1a)
Bernard	$I = \frac{a}{t^n}$ (1b)
Sherman	$I = \frac{a}{(t+b)^n}$ (1c)
Wenzel	$I = \frac{a}{t^{n+b}}$ (1d)

a , b y n = parámetros de ajuste relacionados con los datos, los cuales varían con la probabilidad de ocurrencia.

Fuente: Martínez *et al.* (2020).

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

$$I = \frac{a}{(t^n+b)^c} \quad (2)$$

El empleo 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.*, 2020). Para hacer esto, primero se normalizan los tiempos e intensidades. En este caso, se considera la duración T_d y la intensidad media I_m para cada probabilidad de ocurrencia, como $I_m(prob) = \frac{P_{acum}(prob)}{T_d}$, siendo $P_{acum}(prob)$ la precipitación acumulada de cierta probabilidad de ocurrencia en el tiempo T_d . De esta manera se establecen las siguientes relaciones adimensionales $\tau = \frac{t}{T_d}$ e $i = \frac{I}{I_m}$, para tiempo e intensidad, respectivamente, y entonces la Ecuación (2) se puede reescribir como:

$$i = \frac{a}{(\tau^n + b)^c} \quad (3)$$

En las ecuaciones (1a) a (1d), (2) y/o (3), los parámetros son considerados constantes para cada probabilidad de ocurrencia, con independencia de la duración de las precipitaciones. Esta particularidad permite obtener una relación lineal en un sistema coordenado doblemente logarítmico, o sea:

$$\log i = \log a - c \log(\tau^n + b) \quad (4)$$

Sin embargo, a pesar de la extensión en complejidad introducida en las ecuaciones (2) y (3), es posible que, para todas las duraciones, no se obtengan resultados satisfactorios en la regresión. Por esta razón, se introduce una extensión con un término de segundo orden en un sistema coordenado doblemente logarítmico, es decir:

$$\log i = \log a - c \log(\tau^n + b) - m \log^2 (\tau^n + b) \quad (5a)$$

o bien:

$$i = \frac{a}{(\tau^n + b)^{c+m \log(\tau^n + b)}} \quad (5b)$$

Nótese que es introducido un parámetro adicional m , el cual es particularmente necesario para ajustar eventos de precipitación de corta duración. En la Tabla 3 se muestran los valores que deben adoptar los parámetros de la Ecuación (5b) para describir los casos particulares correspondientes a los modelos de curvas IDF de Talbot, Bernard, Sherman y Wenzel, presentados con anterioridad en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores de los parámetros de la Ecuación (2) para casos particulares.

Autor	Parámetros
Talbot	$n = 1, c = 1, m = 0$
Bernard	$b = 0, c = 1, m = 0$
Sherman	$n = 1, m = 0$ c : reemplaza a n en (1c)
Wenzel	$c = 1, m = 0$

Fuente: elaboración propia a partir de varios autores.

De acuerdo con el método de intensidad instantánea desarrollado por Keifer y Chu (1957), la intensidad de lluvia instantánea R en un aguacero de tormenta puede ser descrito por la siguiente ecuación diferencial ordinaria, como una función de la intensidad i de las curvas IDF:

$$R = i + \tau \frac{di}{d\tau} \quad (6)$$

Al aplicar este método a las ecuaciones (1a) a (1d) y (5b) se puede demostrar que la intensidad instantánea R vendrá dada para cada modelo paramétrico, tal y como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Hietogramas instantáneos adimensionales.

Autor	Formulación
Talbot	$R = \frac{a b}{(\zeta + b)^2} \quad (7a)$
Bernard	$R = \frac{a(1-n)}{\zeta^n} \quad (7b)$
Sherman	$R = \frac{a [b+(1-n)\zeta]}{(b+\zeta)^{n+1}} \quad (7c)$
Wenzel	$R = \frac{a [b+(1-n)\zeta^n]}{(b+\zeta^n)^2} \quad (7d)$
Autores	$R = \frac{a \{b + [1 - c n - 2mn \log(b + \zeta^n)] \zeta^n\}}{(b + \zeta^n)^{c + m \log(b + \zeta^n) + 1}} \quad (7e)$
Autores ($m = 0$)	$R = \frac{a [b + (1 - c n) \zeta^n]}{(b + \zeta^n)^{c+1}} \quad (7f)$

a, b, c, n y m = parámetros de ajuste relacionados con los datos, los cuales varían con la probabilidad de ocurrencia.

Fuente: elaboración propia a partir de varios autores.

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

$$\zeta = \begin{cases} \frac{r-\tau}{r} & 0 \leq \tau \leq r \\ \frac{\tau-r}{1-r} & r \leq \tau \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

Para $\zeta = 0$ se obtiene la intensidad máxima R_{max} , y en este sentido el parámetro α puede obtenerse en función de dicho valor de intensidad, evidenciándose su proporcionalidad lineal con relación a dicho valor de intensidad. Es válido destacar que, en el modelo de Bernard, existe una indefinición debido a la estructura simple de su ecuación. Sin embargo, puede introducirse un valor pequeño en la escala adimensional de tiempo $\zeta = \varepsilon$, por ejemplo $\varepsilon = 0.01$, y de forma aproximada queda resuelto ese inconveniente. En efecto, para cada caso en particular resultará tal y como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Dependencia del parámetro a .

Autor	Formulación
Talbot	$a = R_{max} b$
Bernard	$a = \frac{R_{max} \varepsilon^n}{(1 - n)}$
Sherman	$a = R_{max} b^n$
Wenzel	$a = R_{max} b$
Autores	$a = R_{max} b^{c + m \log(b)}$
Autores ($m = 0$)	$a = R_{max} b^c$

Fuente: elaboración propia a partir de varios autores.

En esta contribución, aunque el análisis puede ser conducido para todos los modelos paramétricos presentes en la Tabla 4, sin restar generalidad serán seleccionados por su robustez el de Sherman (Ecuación (7c)); Wenzel (Ecuación (7d) y Ecuación (7e)), desarrollado este último por los autores. Los parámetros serán obtenidos a partir de un ajuste no lineal, de forma tal que se minimice la siguiente función objetivo:

$$F.O(\bar{p}) = \min \log \sqrt{1 + \sum_{j=1}^N (R_j(\bar{p}) - R_{oj})^2} \quad (9)$$

siendo $\bar{p}$ = vector de parámetros (en sentido general $\bar{p} = [R_{max}, b, c, n, m, r]$); N = número de observaciones; R = intensidad instantánea simulada, y R_o = intensidad instantánea registrada (observada).

Resultados y discusión

La aplicación del método de Huff con las modificaciones propuestas por Serna y Taipe (2019) conduce a las siguientes curvas de masa, con incremento en la escala de tiempo del 5 % e hietogramas instantáneos adimensionales para cada agrupación establecida (ver Figura 2).

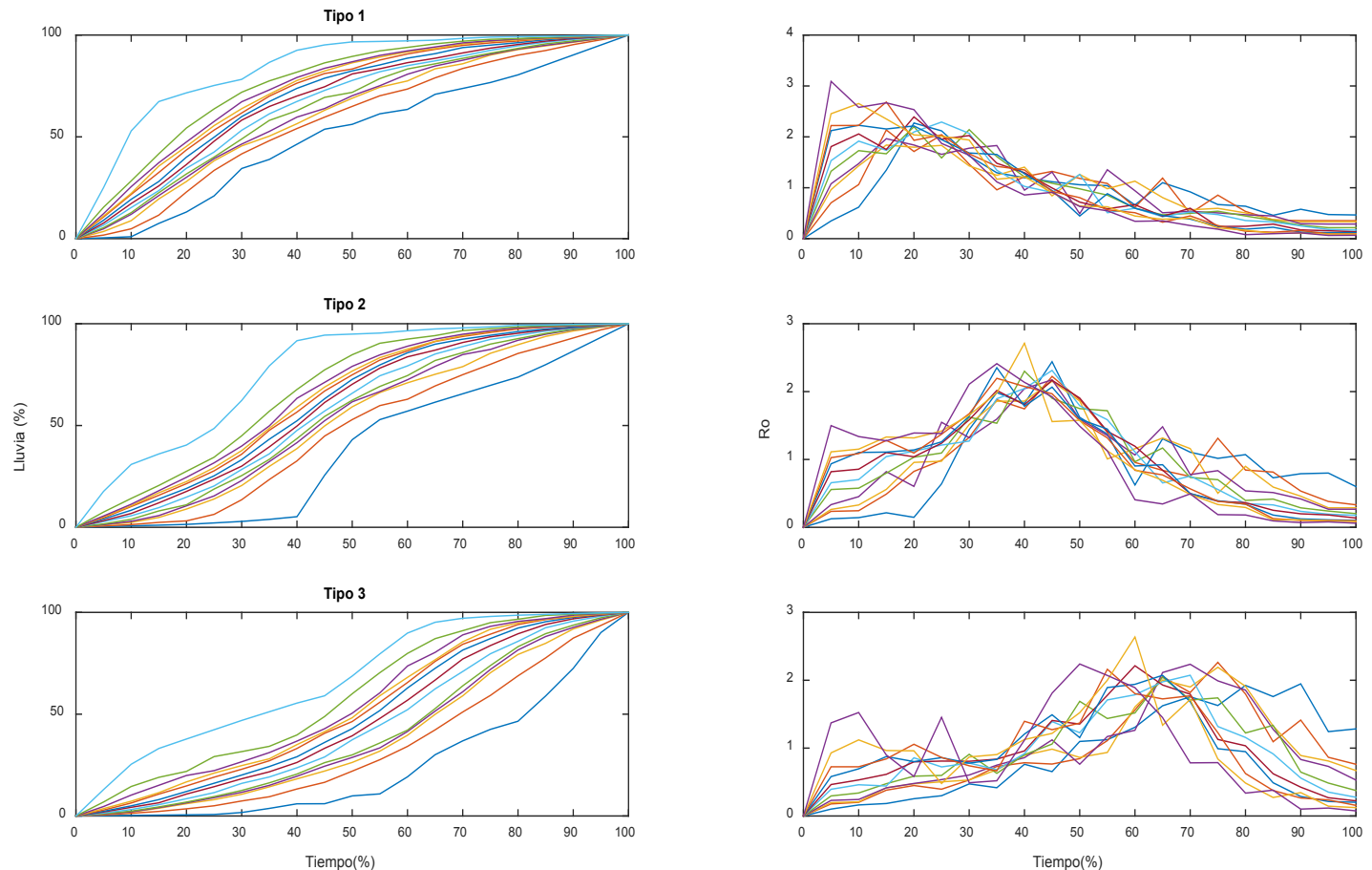


Figura 2. Curvas de masa e hietogramas instantáneos adimensionales agrupados. Fuente: elaboración propia.

Los parámetros de los modelos de distribución temporal de las precipitaciones son obtenidos aplicando el método de Levenberg-

Marquardt —descrito en detalle por Gill, Murray y Wright (1981)— para minimizar la función objetivo descrita por la Ecuación (9). Por la importancia que revierte para el territorio, para cada tipo de distribución y modelo se exponen los resultados en la Tabla 7, Tabla 8 y Tabla 9, caracterizados por satisfactorias correlaciones a partir de los valores del coeficiente de correlación de Pearson, de acuerdo con la estrategia seguida en esta contribución. Es válido destacar, a partir del incremento temporal del 5 %, que se tiene un total de $N = 21$ pares de datos para cada distribución. Para una prueba unilateral, según grados de libertad ($N - 2$), el valor del crítico del coeficiente de correlación de Pearson para un nivel del 5 % de significación es de 0.369. En tal sentido, todos los valores alcanzados que se reportan en la Tabla 7, Tabla 8 y Tabla 9 son estadísticamente significativos, pues son superiores al crítico.

Tabla 7. Parámetros y correlación del modelo de Sherman.

Prob. (%)	Rmax	b	n	r	Coef. correlación de Pearson
Tipo 1 ($r < 0.5$)					
10	2.3152	0.8051	1.07	0.2016	0.5600
25	2.1842	1.1502	1.25	0.1239	0.9076
40	2.4491	0.9604	1.25	0.1660	0.8866
50	2.6833	0.8697	1.25	0.0636	0.8970
60	2.6739	0.8447	1.25	0.1641	0.8589
75	3.1079	0.6938	1.25	0.1084	0.8851
90	3.9217	0.5169	1.25	0.0527	0.9640
Tipo 2 ($r \sim 0.5$)					
10	2.5308	0.6468	1.01	0.4324	0.5426
25	2.4088	0.9808	1.25	0.4220	0.9260
40	2.4182	0.9683	1.25	0.3998	0.9320
50	2.5300	0.9113	1.25	0.3883	0.9510
60	2.5001	0.9350	1.25	0.3715	0.9291
75	2.5520	0.8955	1.25	0.3598	0.9055
90	2.8367	0.7676	1.25	0.3226	0.8453
Tipo 3 ($r > 0.5$)					
10	2.3756	0.9970	1.25	0.8927	0.5531
25	2.5551	0.8867	1.25	0.7802	0.9142
40	2.2181	1.1157	1.25	0.6848	0.8561
50	2.3718	0.9959	1.25	0.6812	0.9202
60	2.4403	0.9519	1.25	0.6275	0.9239
75	2.2467	1.0822	1.25	0.5846	0.9050
90	2.7299	0.3355	0.74	0.5260	0.7450

Fuente: elaboración propia.

Tabla 8. Parámetros y correlación del modelo de Wenzel.

Prob. (%)	Rmax	b	n	r	Coef. correlación de Pearson
Tipo 1 ($r < 0.5$)					
10	2.3402	0.7157	1.0003	0.2022	0.5601
25	2.2212	0.8212	0.9961	0.1232	0.9039
40	2.4918	0.6905	1.0001	0.1137	0.8951
50	2.7205	0.6169	1.0019	0.0629	0.8850
60	2.9278	0.5540	1.0056	0.0589	0.8916
75	3.4391	0.4399	1.0010	0.0560	0.9443
90	4.1019	0.3406	1.0001	0.0527	0.9531
Tipo 2 ($r \sim 0.5$)					
10	2.5357	0.6343	1.0004	0.4324	0.5432
25	2.4631	0.6878	1.0004	0.4228	0.9227
40	2.5259	0.6585	0.9995	0.4091	0.9316
50	2.6857	0.5966	0.9987	0.4202	0.9428
60	2.5373	0.6578	1.0005	0.4180	0.9388
75	2.6242	0.6199	1.0013	0.3619	0.8990
90	2.9401	0.5208	0.9999	0.3235	0.8365
Tipo 3 ($r > 0.5$)					
10	2.4723	0.6986	0.9988	0.9299	0.6725
25	2.6357	0.6103	1.0003	0.7801	0.9121
40	2.2575	0.7941	1.0001	0.6832	0.8509
50	2.4306	0.6961	0.9996	0.6812	0.9124
60	2.5085	0.6604	1.0006	0.6271	0.9157
75	2.2916	0.7674	1.0026	0.6188	0.9285
90	2.5356	0.6244	1.0001	0.5271	0.7639

Fuente: elaboración propia.

Tabla 9. Parámetros y correlación del modelo propuesto, Ecuación (7e).

Prob. (%)	<i>R</i> max	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>n</i>	<i>m</i>	<i>r</i>	Coef. correlación de Pearson
Tipo 1 ($r < 0.5$)							
10	2.2175	1.1874	1.1280	1.125	0.2174	0.2000	0.5687
25	2.0539	6.6532	1.2499	1.125	1.0000	0.1255	0.9133
40	2.2936	5.2155	1.2500	1.125	1.0000	0.1128	0.9226
50	2.4120	4.6426	1.2500	1.125	1.0000	0.1080	0.9362
60	2.6434	3.3379	1.0006	1.125	0.9999	0.0609	0.9376
75	2.0000	0.1178	1.0326	1.125	0.3530	0.0586	0.9893
90	2.6246	0.1000	1.0879	1.125	0.3037	0.0522	0.9911
Tipo 2 ($r \sim 0.5$)							
10	2.5289	0.6371	1.0000	1.125	0.0073	0.4325	0.5292
25	2.2254	5.5032	1.2500	1.125	1.0000	0.4193	0.9285
40	2.2718	5.2030	1.2500	1.125	1.0000	0.4008	0.9540
50	2.3330	4.9219	1.2496	1.125	1.0000	0.3899	0.9668
60	2.3172	5.0418	1.2500	1.125	1.0000	0.3684	0.9404
75	2.3398	4.9122	1.2500	1.125	1.0000	0.3384	0.9181
90	2.6725	0.5580	1.0000	1.125	0.2527	0.3198	0.8606
Tipo 3 ($r > 0.5$)							
10	2.2608	5.3520	1.2499	1.125	1.0000	0.9255	0.6468
25	2.4432	0.7447	1.0000	1.123	0.2347	0.7809	0.9136
40	2.1011	6.2876	1.2500	1.125	1.0000	0.7234	0.9130
50	2.1813	4.8065	1.2468	1.126	0.8807	0.6813	0.9414
60	2.2753	1.8480	1.2500	1.126	0.4059	0.6288	0.9413
75	2.0824	6.3258	1.2498	1.126	1.0000	0.5895	0.9193
90	2.5356	0.6244	1.0000	1.125	0.0000	0.5271	0.7698

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 3, Figura 4 y Figura 5 se presentan las tendencias de los modelos paramétricos de distribución temporal de precipitaciones analizados, así como las correspondientes curvas IDF para cada probabilidad de ocurrencia. Por simple inspección, se puede apreciar que existe convergencia en el comportamiento de los resultados obtenidos. Un análisis a partir de gráficos complementarios de tipo caja (*box*, en inglés) del coeficiente de correlación de Pearson para cada modelo con sus probabilidades asociadas se ilustra en la Figura 6. De ese análisis se desprende que los resultados en términos prácticos son similares. No obstante, los diagramas apuntan a que el modelo propuesto por los autores, a partir de la Ecuación (7e), presenta el mejor desempeño en todos los tipos de hietogramas. Este resultado revierte gran importancia, ya que puede ser utilizado posteriormente para una regionalización en otras estaciones del territorio de la provincia de Villa Clara.

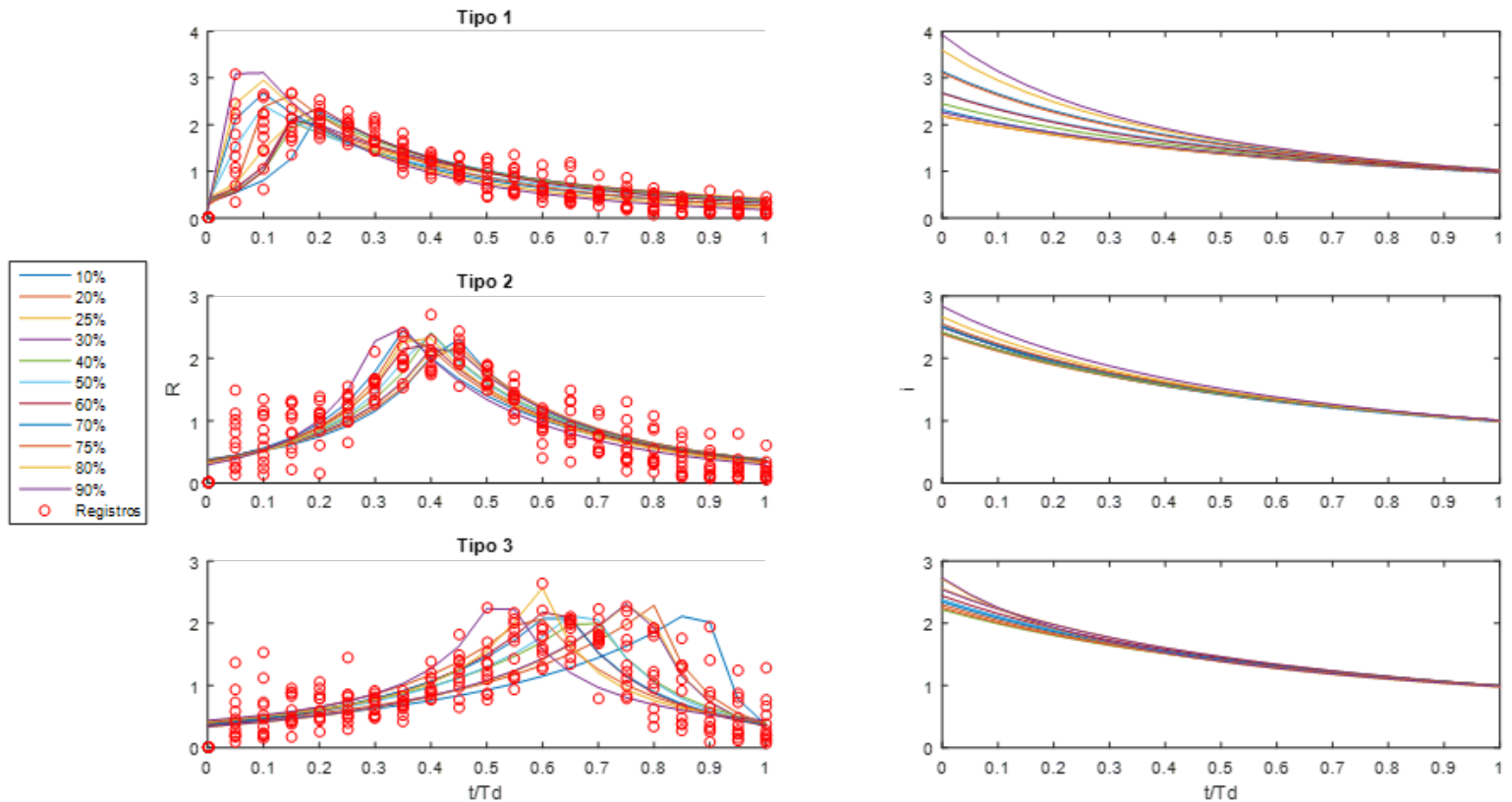


Figura 3. Ajuste de hietogramas instantáneos adimensionales y curvas IDF agrupados según modelo de Sherman. Fuente: elaboración propia.

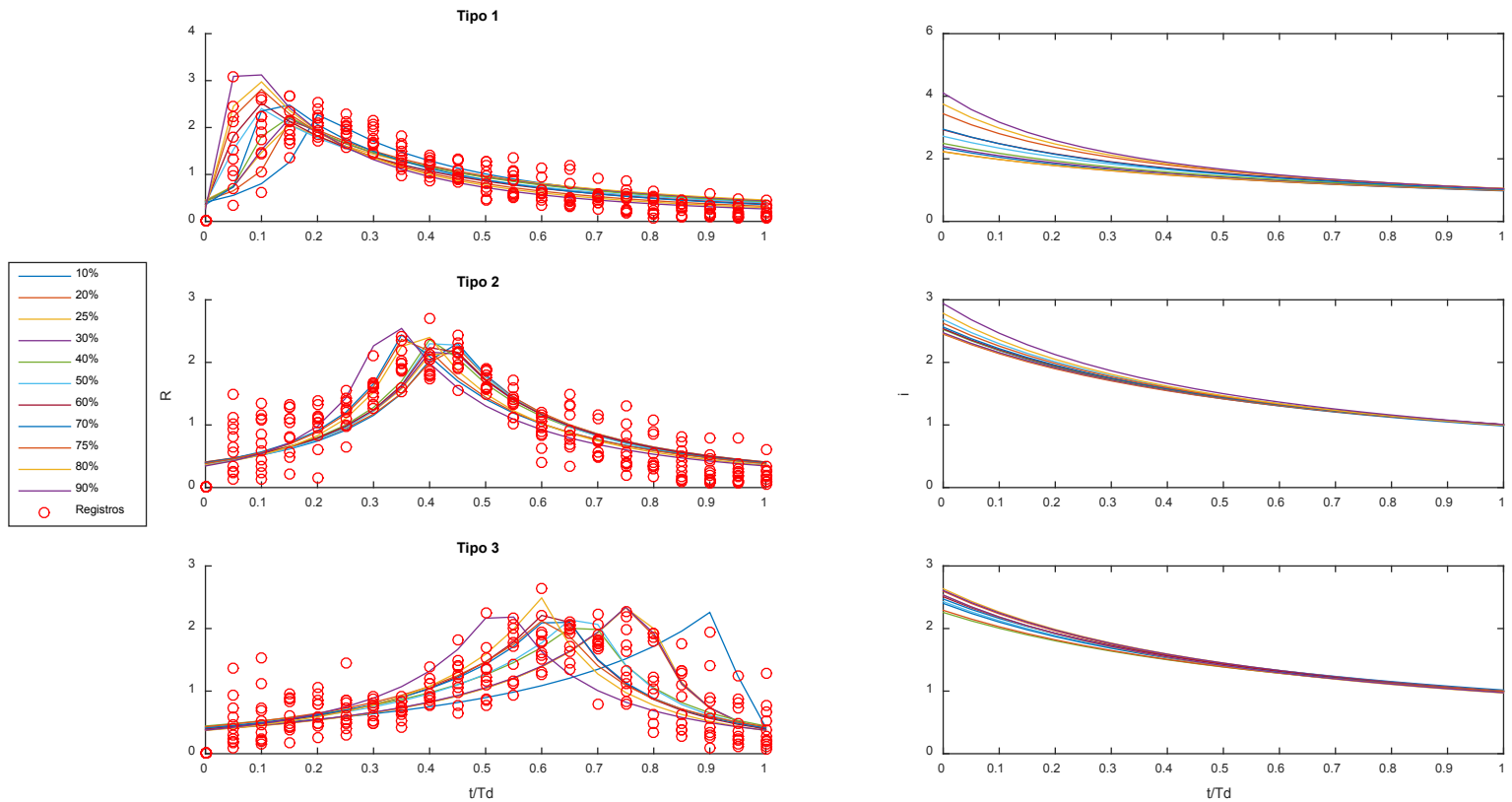


Figura 4. Ajuste de hietogramas instantáneos adimensionales y curvas IDF agrupados según modelo de Wenzel. Fuente: elaboración propia.

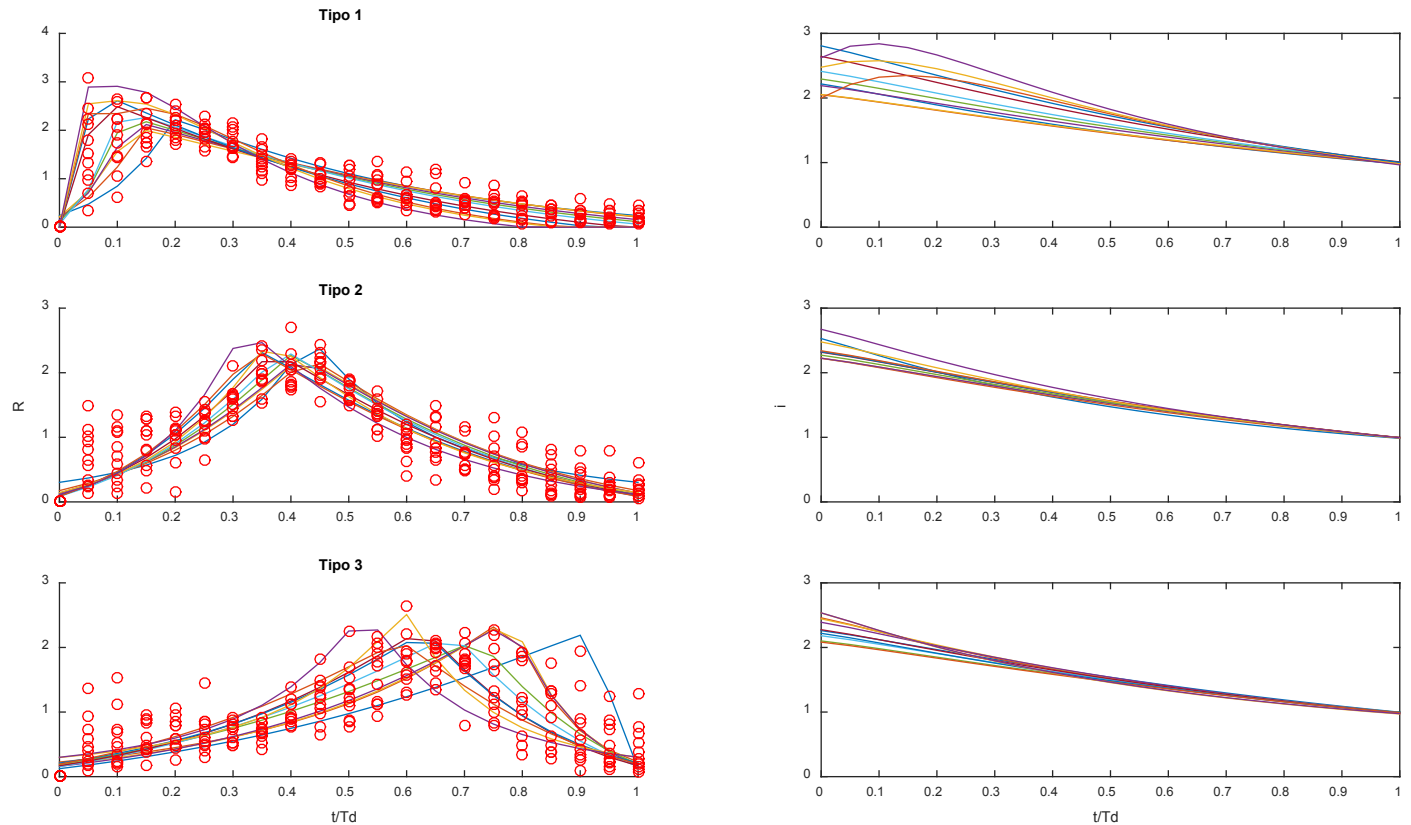


Figura 5. Ajuste de hietogramas instantáneos adimensionales y curvas IDF agrupados según la Ecuación (7e). Fuente: elaboración propia.

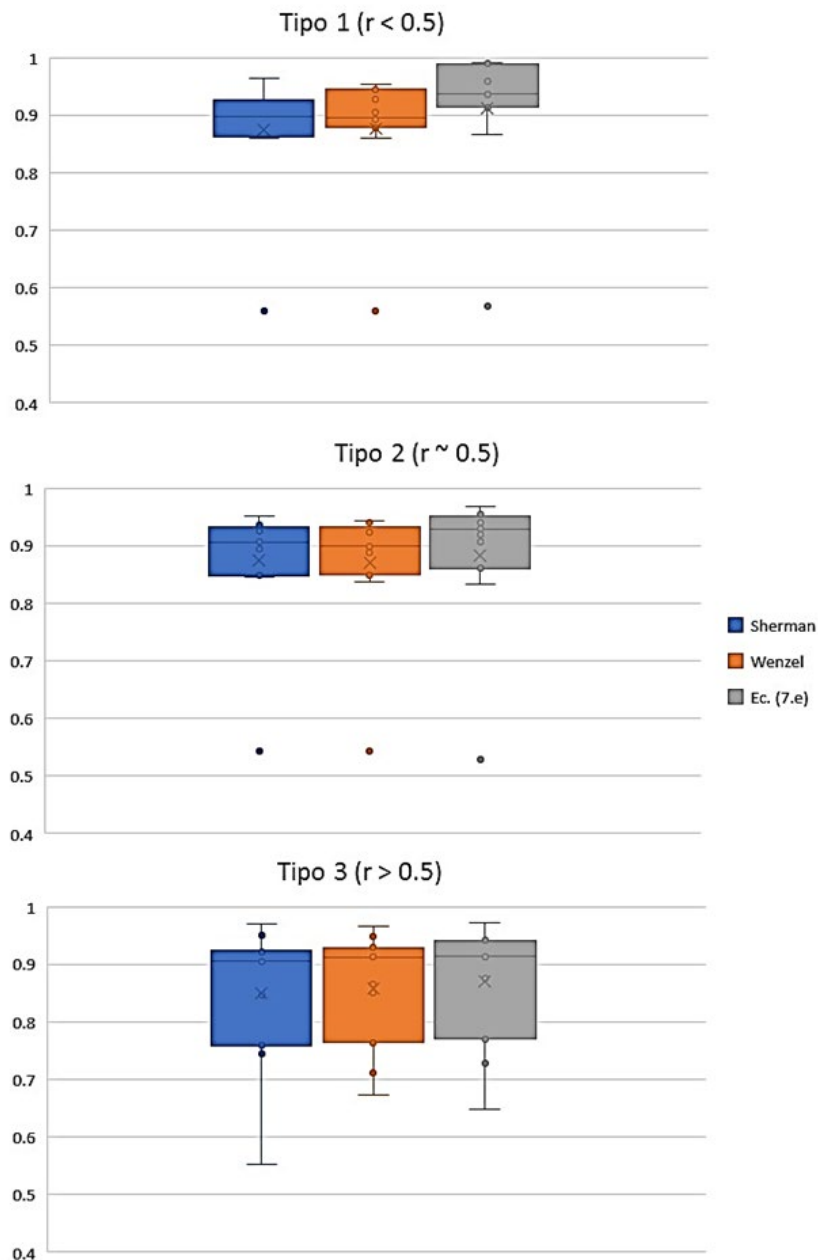


Figura 6. Diagramas de caja para las correlaciones de cada modelo y tipo de hietograma. Fuente: elaboración propia.

Las curvas IDF obtenidas por la Ecuación (7e) presentan un comportamiento diferente en la vecindad de cortas duraciones, donde se observa cierta curvatura, principalmente detectada en hietogramas de Tipo 1. Como ya se mencionó, los modelos de Sherman y Wenzel constituyen casos particulares ($m = 0$). Nótese en la Tabla 9 que el parámetro m solamente se anula por ajuste en hietogramas de Tipo 3 para las probabilidades de 90 %. Todas las curvas IDF convergen en $i = 1$ para $\tau = 1$. Esto quiere decir que $I = I_m = \frac{P_{acum}}{T_d}$, lo cual era esperado al realizar un tratamiento adimensional de los datos pluviográficos.

Los resultados obtenidos en el modelo presentado por la Ecuación (7e) demuestran una alta convergencia para $t/T_d > 0.5$ en los tres tipos de tormenta, además de valores de intensidades máximas instantáneas entre 2.0 y 3.0 también para cada tipo; estas deducciones matemáticas se corresponden con un análisis previo realizado por los autores que demuestran que varios parámetros descriptivos de la lluvia son similares, como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Algunos parámetros comparativos de las lluvias observadas en los registros pluviográficos en la estación Yabú.

Tipo	Intensidad máxima observada para 5 min (mm/min)	Lámina máxima observada (Mm)	Intensidad media (máxima) observada (mm/min)	Tiempo máximo registrado (min)
Tipo I	3.33	124.6	1.33	210
Tipo II	2.80	118.0	1.10	285
Tipo III	2.50	96.8	1.40	230

Fuente: elaboración propia.

El análisis de los resultados permite establecer entonces los límites de confianza para el modelo propuesto de acuerdo con los siguientes puntos:

1. El modelo es válido para tormentas convectivas; en ningún caso el modelo puede ser utilizado ante efectos de eventos ciclónicos o sistemas frontales, pues los registros superan el límite de tiempo y/o lámina que establecen los datos analizados.

2. El modelo es válido para tormentas cuya duración oscile entre 25 y 250 minutos continuos, con intensidades superiores a 0.033 mm/min; por lo general todo fenómeno convectivo con más de 20 mm de precipitación cumple este criterio.
3. El modelo es válido para láminas entre 20 y 150 mm continuas.
4. El modelo es válido para intensidades medias (I/T_d) entre 0.15 y 1.50 mm/min. Esto no quiere decir que intensidades superiores a la establecida como máxima no se puedan valorar, pero se recomienda discreción en los resultados.

Conclusiones

En esta contribución han sido obtenidas las curvas de masa de eventos lluviosos superiores a acumulados de 25 mm en la estación Yabú. Los datos fueron normalizados y clasificados en tres tipos de patrones: Tipo 1 ($r < 0.5$, aguaceros de tipo adelantado); Tipo 2 ($r \sim 0.5$, aguaceros de

tipo centrado), y Tipo 3 ($r > 0.5$, aguaceros de tipo retardado), siendo posible encontrar los hietogramas respectivos.

Se compararon y analizaron dos modelos existentes en la literatura, Sherman y Wenzel. Un tercer modelo más general se desarrolló por los autores e incorporó al proceso de análisis y comparación durante el ajuste paramétrico de éstos para obtener patrones empírico-analíticos de distribución temporal de precipitaciones en la estación meteorológica de referencia. En paralelo se obtuvieron las curvas IDF de cada modelo.

El modelo desarrollado por los autores mostró mejor desempeño al poder reproducir la tendencia de los hietogramas con mayores niveles de correlación. Al poseer un mayor número de parámetros se mostró mucho más flexible, siendo capaz de reproducir los comportamientos de los hietogramas de cada probabilidad con los mínimos errores. Estos resultados parecen sugerir que puede extenderse su aplicación a otras estaciones existentes en el territorio villaclareño, lo cual permitirá regionalizar el modelo de distribución temporal de precipitaciones aquí desarrollado. Por la importancia que revierte en la práctica ingenieril e hidrológica será abordado en próximas investigaciones.

Agradecimientos

Los autores desean transmitir su más profundo agradecimiento al Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara, cuyo apoyo en el desarrollo de las

investigaciones ha sido encomiable y digno de destacar a pesar de las duras condiciones impuestas por la pandemia de Covid-19 que afecta al país. También se desea agradecer al Ing. Diego Emilio Abreu Franco por su constante apoyo y asesoramiento en los temas relacionados al estudio, y a los estudiantes de Ingeniería Hidráulica de la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas: José Solís Quintana, Alejandro Marrero, José Manuel Alba Bacallao y Roberto Fernández.

Referencias

- AEMET, Agencia Estatal de Meteorología de España. (2015). *Manual de uso de términos meteorológicos*. Madrid, España: Agencia Estatal de Meteorología de España. Recuperado de <http://www.aemet.es/es/eltiempo/prediccion/provincias/ayuda>
- 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. Recuperado de <https://riunet.upv.es/handle>
- Balbastre-Soldevila, R., García-Bartual, R., & Andrés-Doménech, I. (2019). A comparison of design storms for urban drainage system applications. *Water*, 11(4), 1-15. DOI: 10.3390/w11040757

- Bezák, N., Šraj, M., Rusjan, S., & Mikoš, M. (2018). Impact of the rainfall duration and temporal rainfall distribution defined using the Huff curves on the hydraulic flood modelling results. *Geosciences*, 8(2), 1-15. DOI: 10.3390/geosciences8020069
- Chow, V. T., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada*. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Interamericana, S. A.
- Dauji, S. (2019). Novel data-driven approach for development of synthetic hyetograph. *Journal of Hydrologic Engineering*, 24(10), 06019007. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001846
- Duka, M., Lasco, J. D., Veyra Jr., C., & Aralar, A. (2017). Comparative assessment of different methods in generating design storm hyetographs for the Philippines. *Journal of Environmental Science and Management*, 21(1), 82-89.
- El-Sayed, E. A. H. (2018). Development of synthetic rainfall distribution curves for Sinai area. *Ain Shams Engineering Journal*, 9(4), 1949-1957. DOI: 10.1016/j.asej.2017.01.010
- García-Bartual, R., & Andrés-Doménech, I. (2017). A two-parameter design storm for Mediterranean convective rainfall. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(5), 2377-2387. DOI: 10.5194/hess-21-2377-2017
- Gill, P. E., Murray, W., & Wright, M. H. (1981). *Practical optimization*. London, UK: Academic Press.

- Gutierrez, J., Pérez, F., Angulo, G., Chiriboga, G., & Valdés, L. (2017). *Determinación de las curvas de intensidad-frecuencia-duración (IDF) para la ciudad de Cartagena de Indias en Colombia durante el periodo comprendido entre los años 1970 y 2015*. 15th LACCEI International Multi-Conference for Engineering Education, and Technology: "Global Partnerships for Development and Engineering Education", 19-21 July 2017, Boca Raton, USA. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/318574137>
- Huff, F. A. (1990). *Time distributions of heavy rainstorms in Illinois* (Circular No. 173). Recuperado de <https://www.isws.illinois.edu>
- Jun, C., Qin, X., & Lu, W. (2019). *Temporal pattern analysis of rainstorm events for supporting rainfall design in a tropical city*. Conferencia presentada en New Trends in Urban Drainage Modelling, Cham, Suiza. DOI: 10.1007/978-3-319-99867-1_64
- Keifer, C. J., & Chu, H. H. (1957). Synthetic storm pattern for drainage design. *Journal of the Hydraulics Division*, 1957, 83, 1-25. Recuperado de <https://www.ascelibrary.org/doi/pdf>
- Krvavica, N., & Rubinić, J. (2020). Evaluation of design storms and critical rainfall durations for flood prediction in partially urbanized catchments. *Water*, 12(7), 1-20. DOI: 10.3390/w12072044

- Martínez, Y., Planos, E., & Perdigón, D. (2020). Hietogramas adimensionales para ciclones tropicales que afectan al archipiélago cubano. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 41(2), mayo-agosto, 48-63.
- Mazurkiewicz, K., & Skotnicki, M. (2018a). A determination of the synthetic hyetograph parameters for flow capacity assessment concerning stormwater systems. *E3S Web Conference*, 45, 00053. DOI: 10.1051/e3sconf/20184500053
- Mazurkiewicz, K., & Skotnicki, M. (2018b). The influence of synthetic hyetograph parameters on simulation results of runoff from urban catchment. *E3S Web Conference*, 30, 01018. DOI: 10.1051/e3sconf/20183001018
- Na, W., & Yoo, C. (2018). Evaluation of rainfall temporal distribution models with annual maximum rainfall events in Seoul, Korea. *Water*, 10, 1468. DOI: 10.3390/w10101468
- Pan, C., Wang, X., Liu, L., Huang, H., & Wang, D. (2017). Improvement to the Huff curve for design storms and urban flooding simulations in Guangzhou, China. *Water*, 9(6), 1-18. DOI: 10.3390/w9060411
- Planos, E., Limia, M., & Vega, R. (2005). *Intensidad de las precipitaciones en Cuba* (informe científico). La Habana, Cuba: Instituto de Meteorología.

- Pochwat, K., Słyś, D., & Kordana, S. (2017). The temporal variability of a rainfall synthetic hyetograph for the dimensioning of stormwater retention tanks in small urban catchments. *Journal of Hydrology*, 549, 501-511. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.04.026
- Priambodo, S., Suhardjono, S., Montarcih, L., & Suhartanto, E. (2019). Hourly rainfall distribution patterns in Java island. *MATEC Web Conference*, 276, 04012. DOI: 10.1051/matecconf/201927604012
- Serna, J. R. V., & Taipe, C. L. R. (2019). Determination of storm profiles in the Central Andes of Peru. *E-proceedings of the 38th IAHR World Congress*, Sept. 2019, Panamá, DOI: 10.3850/38WC092019-1859
- Singh, J., & Singh, O. (2020). Assessing rainfall erosivity and erosivity density over a western Himalayan catchment, India. *Journal of Earth System Science*, 129(1), 97. DOI: 10.1007/s12040-020-1362-8
- Sumarauw, J. S. F., Pandey, S. V., & Legrans, R. R. I. (2019). Hourly rainfall distribution pattern in the northern coast of Bolaang Mongondow. *Journal of Sustainable Engineering: Proceedings Series*, 1(1), 75-83. DOI: 10.35793/joseps.v1i1.10