

Regionalización de factores de reducción por área en una cuenca hidrográfica de Venezuela

Ana Beatriz Ortega Acacio

Centro de Investigación en Recursos Hídricos (CIDRHI) de la Universidad Nacional Experimental “Francisco de Miranda, Coro, Estado Falcón, Venezuela.

email: abo284@gmail.com

Miguel Ángel Perozo Ynestroza

Centro de Investigación en Recursos Hídricos (CIDRHI) de la Universidad Nacional Experimental “Francisco de Miranda, Coro, Estado Falcón, Venezuela.

email: maperozo40@gmail.com

RESUMEN

Para la cuenca del río Coro (600,369 km²) se construyeron las relaciones Altura–Área–Duración (A-A-D) y con ellas el modelo regional del factor de reducción por área (FRA) el cual varía entre 0,43 y 0,63 para duraciones de tormenta entre 3 y 24 horas. Los resultados obtenidos evidencian marcadas diferencias entre las magnitudes estimadas del FRA con un modelo general y el regionalizado, así como respecto a valores estimados en otras regiones, lo que demuestra que los FRA son de carácter regional. La estimación de precipitaciones de diseño a partir de los FRA del modelo regionalizado, evidencia que el empleo de esta metodología permite reducir en más de un 43% la magnitud de tales eventos.

Palabras clave: cuenca hidrográfica, factor de reducción por área, modelo regional.

Regionalization of area reduction factors in a watershed of Falcón state in Venezuela

ABSTRACT

For Coro river basin (600,369 km²) relationships Height-Area-Duration (DAH) were constructed and from them the regional model of the area reduction factor (ARF) which varies between 0,43 and 0,63 for storm durations from 3 to 24 hours. The results show marked differences between the magnitudes of ARF estimated with a general model and with the regionalized one, also with respect to values estimated in other regions, demonstrating that the ARF values are regional. The estimation of design rainfall from the ARF, with the regionalized model, evidences that the use of this methodology reduces by more than 43% the magnitude of such events.

Keywords: river basin, area reduction factor, regional model.

INTRODUCCIÓN

La estimación del evento máximo de precipitación sobre una cuenca hidrográfica constituye uno de los aspectos más importantes a definir previo al proceso de diseño de las obras con fines de aprovechamiento del recurso hídrico o de mitigación de los impactos negativos.

Al realizar la estimación de la precipitación a partir de valores puntuales no es posible reflejar toda la naturaleza del fenómeno, el cual se presenta en la realidad sobre un área con un determinado comportamiento espacial, que se encuentra influenciado principalmente por las características climatológicas y fisiográficas circundantes.

El análisis de eventos máximos de precipitación en una cuenca permite estimar relaciones entre la altura o profundidad de precipitación con el área y la duración, a partir de las cuales es posible determinar un factor que indica el porcentaje de precipitación puntual a tomar como promedio sobre la cuenca. Tal factor es conocido como Factor de Reducción por Área (FRA) o también Coeficiente de Decaimiento Areal (CDA), el cual es función del área de aporte y de la duración de lluvia.

Este tipo de factores se encuentran disponibles para diferentes áreas alrededor del mundo, y en algunos casos son extrapolados a otras regiones que carecen de información. Sin embargo, el uso generalizado de estos factores de atenuación para regiones con rasgos fisiográficos y/o climáticos diferentes a los empleados para su deducción, disminuye la fiabilidad de los resultados de las estimaciones de la precipitación reduciendo la veracidad de la distribución espacial del fenómeno. Por tanto, es necesario llevar a cabo estudios de regionalización del comportamiento espacial de la precipitación con la información que se encuentre disponible, con el fin de poder estimar la precipitación promedio en la cuenca a partir de los FRA.

En este trabajo se presenta un modelo matemático para la regionalización de los Factores de Reducción por Área para la cuenca del río Coro, que permite caracterizar desde el punto de vista espacial las precipitaciones de gran magnitud que ocurren en dicha cuenca, constituyendo un importante insumo para el desarrollo de proyectos de gestión del riesgo a inundaciones, para modelaciones hidrológicas muchos más acertadas, y para un dimensionamiento más adecuado de las obras hidráulicas en general.

ESTADO DEL ARTE

El análisis de la precipitación máxima es un punto de interés principalmente en países en desarrollo, donde la limitada disponibilidad de datos hidrométricos conduce al análisis de este tipo de eventos con el fin de, entre otros, encontrar relaciones que permitan estimar el evento máximo que se conoce como “precipitación o tormenta de diseño” y con base en ella posteriormente estimar los escurrimientos máximos.

La precipitación de diseño puede definirse como un evento pluvial de magnitud tal que refleja las exigencias de origen hidrometeorológico a las que se verán sometidas las obras, constituyendo además una entrada a modelos de transformación lluvia – escurrimiento.

En términos generales la precipitación de diseño viene definida por cinco rasgos o componentes que son: magnitud, duración, probabilidad, distribución y atenuación.

La precipitación es por naturaleza una variable espacialmente distribuida, por tanto debe ser tratada y analizada considerando este aspecto con el fin de lograr la representación más acertada de su comportamiento.

El conocer como varía la magnitud de la precipitación en un área y en qué proporción tiende a distribuirse esa magnitud a lo largo de la duración total del evento, constituye un aspecto de interés para el diseño y operación de cualquier obra hidráulica principalmente si estará ubicada en una cuenca con disponibilidad limitada o nula de registros de escurrimientos. Para la atenuación o reducción de la lluvia puntual de una estación meteorológica a un espacio más extenso, existen diferentes metodologías entre las cuales se encuentra el uso de los FRA.

El FRA se define como un coeficiente que se emplea para extrapolar las precipitaciones puntuales a precipitaciones sobre un área, siendo una forma de considerar el efecto de la variabilidad espacial de las lluvias.

La precipitación media sobre un área es obtenida como el producto entre la precipitación en la estación núcleo (máximo observado) y el factor de reducción por área (Catalini et al. 2009). Este concepto de FRA surge en los Estados Unidos en la década de los 50, por el US Weather Bureau (1957), el cual dedujo una metodología para la estimación de estos FRA y estimó los ábacos que relacionan la reducción con el área y la duración de las tormentas para cuencas situadas al este del río Mississippi y que posteriormente fue popularizado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) en el año 1983.

Estas curvas de factores de reducción de la precipitación desarrolladas por la OMM, han sido utilizadas de forma universal, aún sabiendo que la extrapolación de dicho comportamiento es un procedimiento que conlleva errores de consideración.

En este sentido, muchas son las experiencias en países y regiones como África en 1963, Reino Unido en 1975, Canadá en 1981, México en 1982, España en 1990, Australia en 1993, Argentina en 2001, entre otros, relacionadas con la estimación del factor de reducción por área regionalizado, con el propósito de determinar la precipitación media en una cuenca o bien caracterizar el comportamiento espacial de esta variable (Guichard et al. 2004).

Específicamente en Venezuela, se conocen las experiencias desarrolladas por la Dirección de Hidrología del extinto Ministerio de Obras Públicas, el cual obtuvo un modelo matemático para estimar el factor de reducción de la precipitación para duraciones de 1, 3 y 6 horas; así como también el modelo obtenido por Guevara (2003) a partir de relaciones de Altura – Área - Duración (AAD) para tormentas en Venezuela, en el cual se desarrolló un modelo sencillo para estimar la lluvia media sobre el área, a través de la modelación regional del Factor de Reducción de la lluvia puntual como una función de la duración de la tormenta y de su área de influencia (Guevara 2003).

MATERIALES Y MÉTODOS

Cuenca de estudio e información básica

Se realizó la regionalización de los factores de reducción por área para la cuenca del río Coro, la cual ha sido objeto de diversos estudios motivados por severas inundaciones que han ocurrido en su cuenca baja, produciendo daños en la infraestructura que se encuentra asentada en dicha planicie. El río Coro se encuentra ubicado entre las coordenadas 11°06'09'' y 11°27'40'' latitud norte y 69°51'00'' y 69°27'00'' longitud oeste, en la zona central del estado Falcón, al noroeste de la sierra de San Luis, y al sur de la ciudad de Santa Ana de Coro, capital del estado Falcón, Venezuela. De acuerdo con su delimitación (figura 1), la cuenca presenta un área total de 600,369 km², con un perímetro igual a 196,520 km. (Perozo 2012).

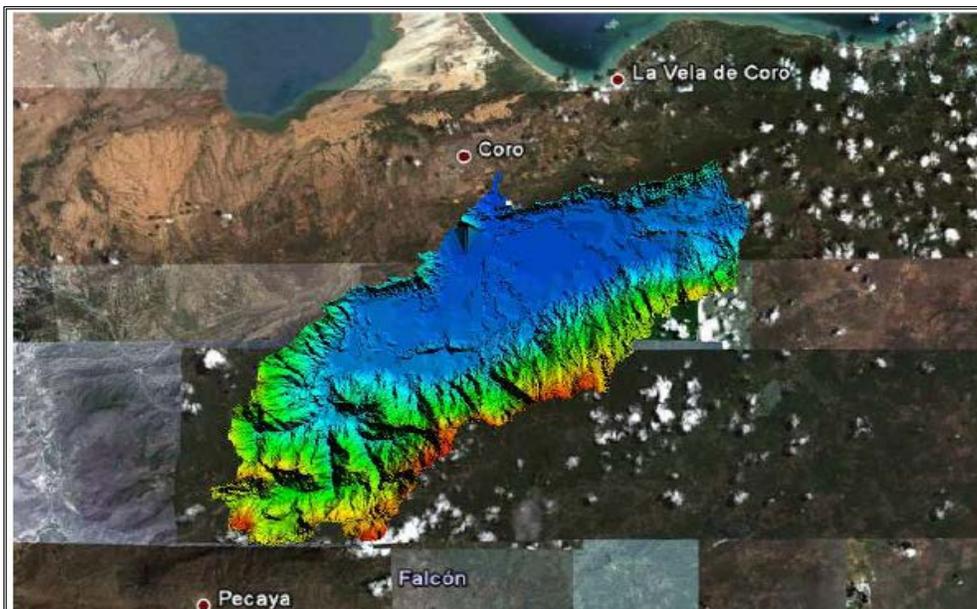


Figura 1. Ubicación y delimitación de la cuenca del río Coro

Existen ocho (8) estaciones de influencia: El Mamón, La Negrita – Isiro II, Macuquita, Fundo Padilla, Curimagua, El Palmar, Paso Florida y Las Polonias, ubicadas dentro y en las adyacencias de la divisoria de la cuenca (figura 2), para las cuales se realizó la recopilación y procesamiento de, en promedio, 26 años de registros horarios siendo el período común entre las estaciones los años comprendidos entre 1985 y 2008.

Se identificaron 54 tormentas las cuales fueron seleccionadas del análisis de los eventos máximos horarios registrados en la cuenca, considerando aquellos eventos de mayor cobertura espacial, con una lámina máxima precipitada igual o mayor que 10 mm y con una duración igual o superior a 5 horas.

Para las tormentas seleccionadas se construyeron las relaciones AAD para eventos de diferentes duraciones, tal como se ejemplifican en las figuras 3, 4 y 5 para duraciones de 5, 6 y 15 horas respectivamente.

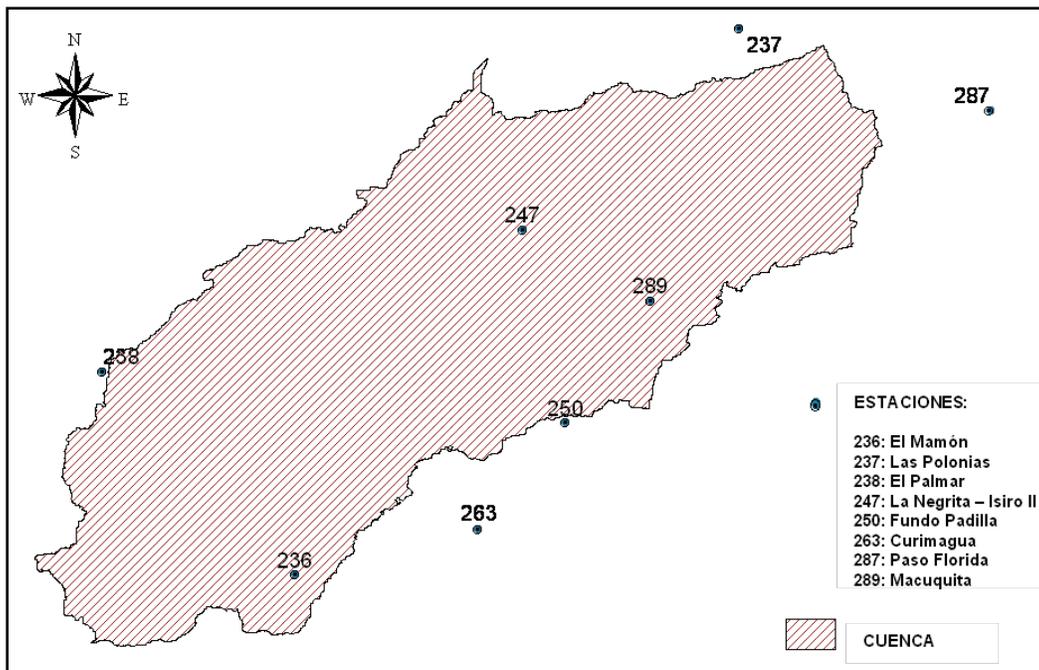


Figura 2. Ubicación de las estaciones meteorológicas en la cuenca del río Coro

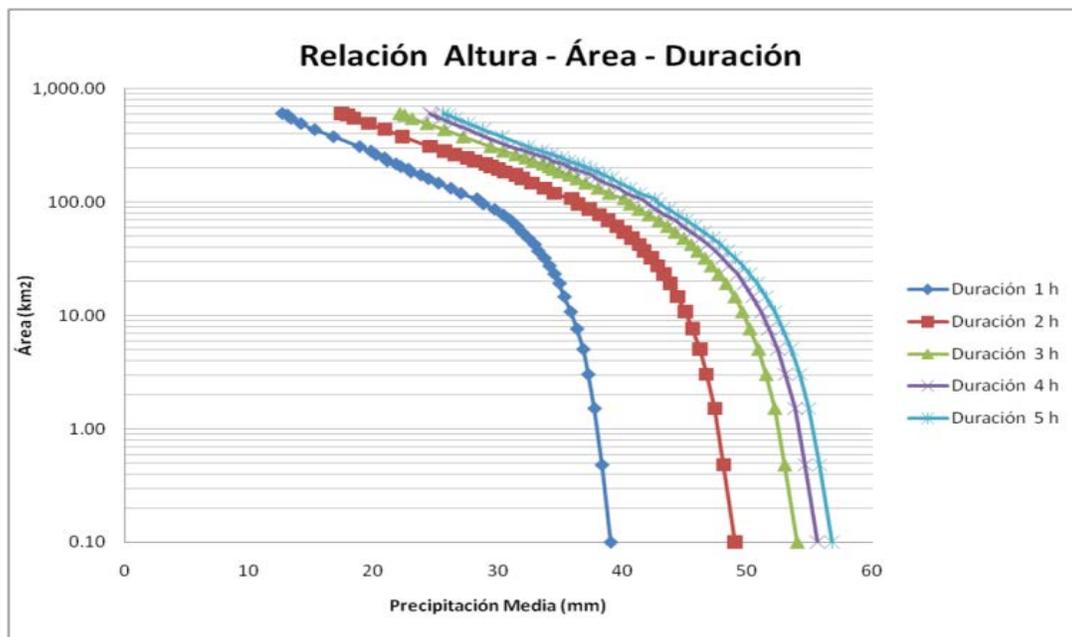


Figura 3. Relación Altura – Área – Duración para un evento máximo de 5 horas en la cuenca del río Coro

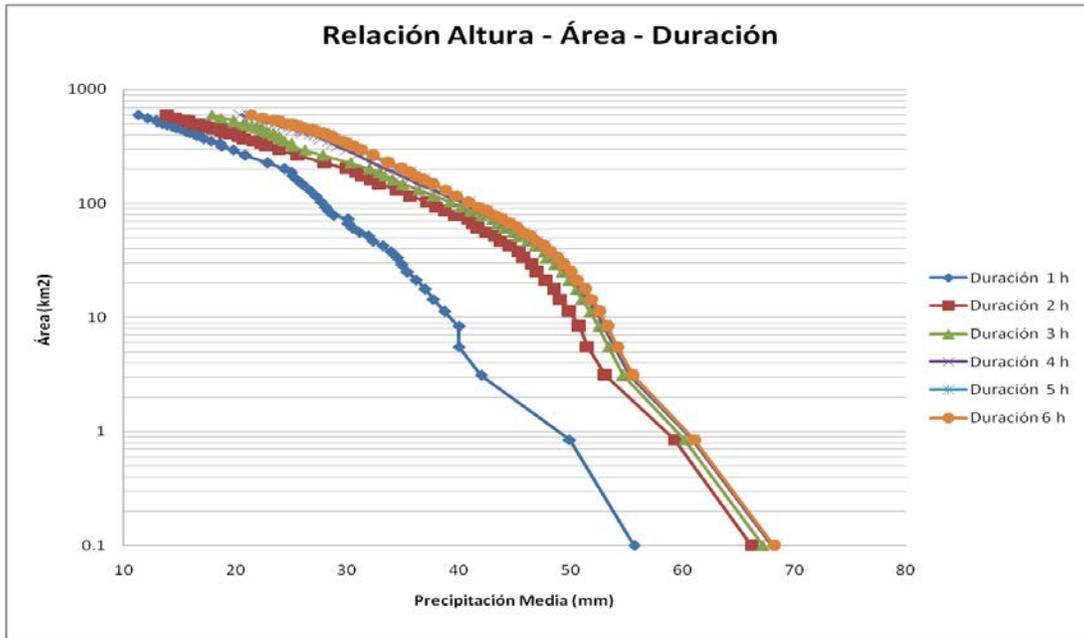


Figura 4. Relación Altura – Área – Duración para un evento máximo de 6 horas en la cuenca del río Coro

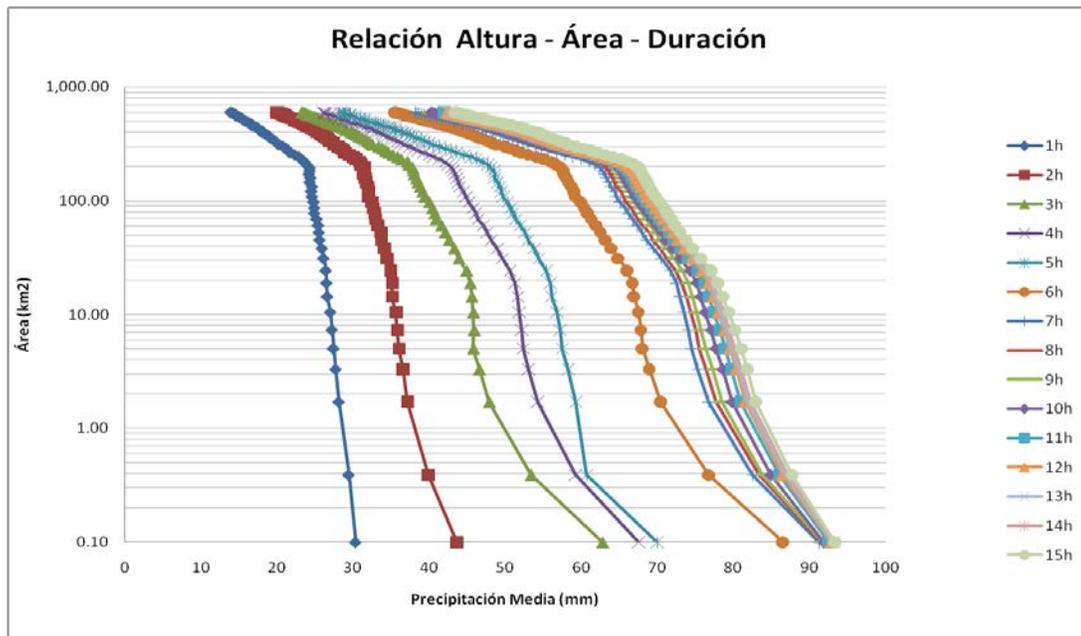


Figura 5. Relación Altura – Área – Duración para un evento máximo de 15 horas en la cuenca del río Coro

Fundamentación del modelo regional

Se desarrolló el modelo regional para la cuenca del río Coro considerando la fundamentación del modelo general propuesto por Guevara (2003), el cual parte del concepto matemático de linealización de las curvas AAD de las tormentas consideradas, de acuerdo con el siguiente razonamiento:

- Sea X el área de influencia “ A ” de la tormenta sobre la que se desea estimar la precipitación media “ P ”
- Sea Y la inversa de la precipitación media estimada (P_A):

$$Y = 1/P_A \quad (1)$$

- Aplicando la función inversa de la relación “Precipitación Acumulada - Duración” se obtiene:

$$Y = 1/P_A = a + bX \quad (2)$$

donde: a y b son parámetros de ajuste del modelo resultante en esa relación.

La ecuación (2) puede expresarse como:

$$P_A = 1/Y = a + bX \quad (3)$$

Por definición se sabe que la lluvia puntual P_p es aquella que corresponde a un valor de área igual a cero; es decir, para $X = 0$, en tanto será:

$$P_p = 1/a \quad (4)$$

A partir de las ecuaciones (3) y (4), se obtiene el factor de reducción de la lluvia puntual (FRA), mediante el siguiente modelo matemático:

$$\frac{P_A}{P_p} = FRA = \frac{a}{a + bX} \quad (5)$$

La ecuación (5) constituye un modelo general para estimar el factor de reducción de la lluvia puntual sobre el área de influencia de la tormenta. El análisis realizado por Guevara (2003), indica que este modelo general es aplicable en forma individual para cada duración.

De acuerdo con la información disponible de los eventos, se estimó el modelo de ajuste de los parámetros a y b de las ecuaciones (2) y (3) en función del área, para cada duración considerada.

Obtenidos los valores de a y b , se procedió a ajustar un modelo matemático que defina el comportamiento de estos parámetros a y b en función de la duración. Reemplazando tales

modelos en la ecuación (5), fue posible estimar un modelo de regionalización de los FRA para la cuenca del río Coro.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Empleando el método de los mínimos cuadrados, se calcularon los parámetros de correlación y regresión del modelo de ajuste de a y b por cada duración analizada, obteniéndose modelos que se ajustan al comportamiento de los datos con coeficientes de correlación entre 0,98 y 0,99.

Analizando los valores de a y b obtenidos para cada duración se estimaron los parámetros del modelo general para el cálculo del factor de reducción, determinándose que tales valores disminuyen a medida que la duración aumenta. Los modelos resultantes para dichos parámetros en función de la duración D en horas, son:

$$a = \frac{1}{n + m * D^{2,5}} \quad (6)$$

donde: n y m son los parámetros del modelo que toman valores de $n= 49,560045$ y $m= 0,038007791$ con una correlación $r = 0,99$.

$$b = \frac{1}{j + k * D^3} \quad (7)$$

donde: j y k son los parámetros del modelo que toman valores de $j= 22721,305$ y $k= 9,9386044$ con una correlación $r = 0,92$.

Sustituyendo ecuaciones (6) y (7) en la (5) se obtiene la expresión para determinar el Factor de Reducción por Área (FRA) regional, dada la duración de la tormenta D (horas) y el área de la cuenca A (km²):

$$FRA = \frac{1}{1 + \left[\frac{49,560045 + 0,0380078 * D^{2,5}}{22\ 721,305 + 9,9386044 * D^3} * A \right]} \quad (8)$$

A partir de la ecuación (8) se obtuvieron curvas de FRA para la cuenca del río Coro y duraciones de tormentas de 3, 6, 9, 12 y 24 horas, como se muestra en la figura 6.

El comportamiento de las curvas FRA indica que los valores de los factores que reducen la precipitación puntual en función del área, tienden a hacerse menores que la unidad a medida que el área considerada aumenta. Específicamente para valores entre 3 y 12 horas, se produce un fuerte decaimiento de los FRA desde áreas de 100 km², tendiendo a reducirse este decaimiento para áreas cercanas a los 600 km².

Para el área total de la cuenca (600,369 km²) y duraciones entre 3 y 9 horas, el valor de FRA varía entre 0,43 y 0,46. Para duraciones de 12 horas, el factor de reducción está alrededor de los 0,49. Para duraciones de 24 horas el factor de reducción tiene un comportamiento que indica un menor decaimiento, de hecho, se observa que para áreas menores o iguales a 300 km² los valores

de FRA son superiores a 0,75, mientras que para el área total de la cuenca el valor del FRA es de 0,63. De esto se deduce que a medida que la duración de la tormenta aumenta, el factor de reducción aumenta también, por lo que es menor la variación espacial de la precipitación en el área considerada.

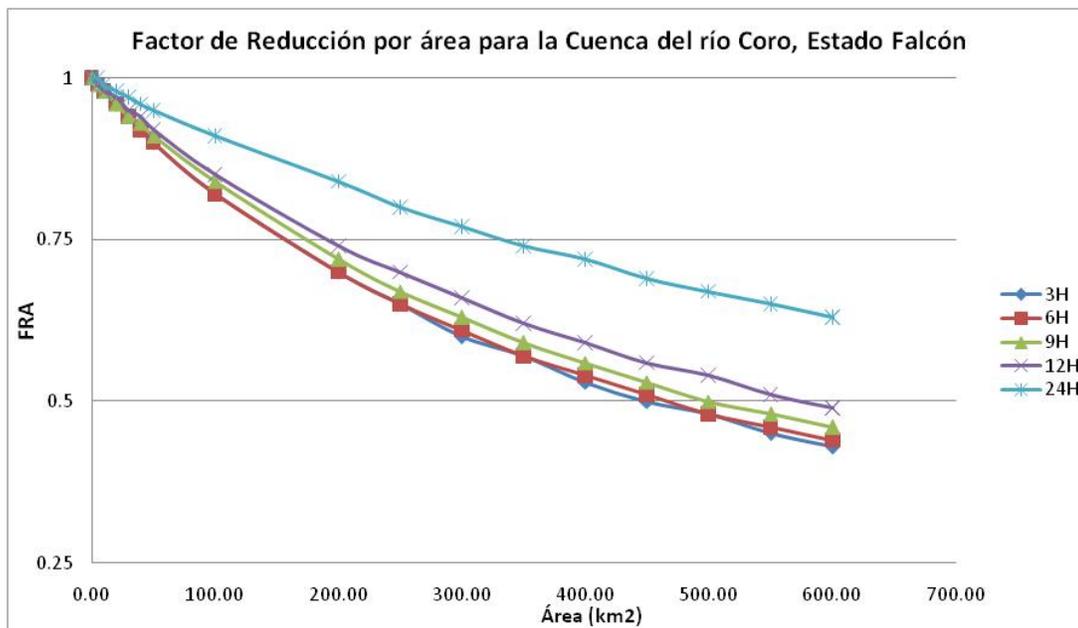


Figura 6. Curvas del factor de reducción por área obtenidas con el modelo propuesto para la cuenca del río

Se realizó la comparación de las curvas de FRA obtenidas para la cuenca del río Coro, con las curvas de FRA estimadas para la misma cuenca, a partir del modelo propuesto por Guevara (2003) (ver figura 7) y así mismo se comparó el comportamiento de las curvas obtenidas, con curvas de otras regiones a nivel mundial recopiladas por Caamaño y Dasso (2003) (ver figura 8).

Se observaron notables diferencias de los FRA obtenidos en este estudio con los estimados a través del modelo propuesto por Guevara (2003). En este último para todas las duraciones y considerando el área total de la cuenca, el FRA se mantiene por encima de 0,75, situación que solo ocurre en el modelo regionalizado para la duración de 24 horas y áreas menores o iguales que 300 km².

Dado que el modelo propuesto en esta investigación, a diferencia del de Guevara (2003), se determinó con base en eventos registrados directamente sobre la cuenca del río Coro, se considera que las estimaciones obtenidas reflejan con mayor precisión la influencia de los factores climáticos y morfológicos de la región en el comportamiento espacial de la precipitación.

En cuanto a la comparación realizada con curvas de otras regiones del mundo, existen notables diferencias en relación con el comportamiento de las curvas y las magnitudes de los

factores, particularmente cuando las características climatológicas y fisiográficas entre las regiones donde fueron determinadas, son diferentes de las de la cuenca del río Coro.

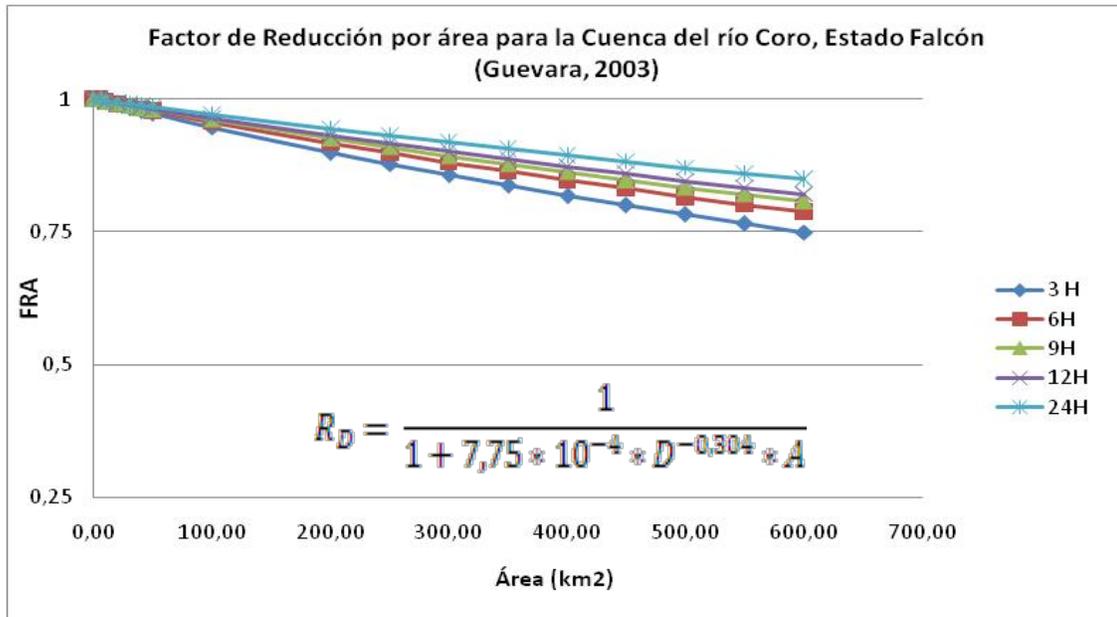


Figura 7. Curvas del factor de reducción por área para la cuenca del río Coro obtenidas mediante el modelo propuesto por Guevara

Tal es el caso de las curvas propuestas por la Organización Meteorológica Mundial (río Mississippi) de la figura 8, que son de uso casi generalizado y cuyos valores de FRA son superiores a 0,75 en áreas entre 0 y 600 km² para duraciones mayores o iguales a 3 horas, lo que difiere considerablemente de los resultados obtenidos en este estudio para iguales condiciones de área y duración.

Además se compararon las curvas de FRA con las de la cuenca del río San Antonio (figura 8), ubicada en la provincia de Córdoba, República Argentina, que presenta características similares con la cuenca del río Coro en cuanto a área total de la cuenca, altitud máxima, precipitación media anual y número de estaciones meteorológicas, presentándose en ambas un comportamiento semejante tanto en las curvas como en las magnitudes de los factores de reducción para las duraciones comparables.

Esto confirma lo ya indicado en estudios previos (Guichard et al. 2004), (Caamaño y Dasso 2003) y (Zamanillo et al. 2008) que los factores de reducción de la precipitación por efecto del área no son universales, sino de carácter regional ya que estos reflejan la influencia de las características fisiográficas y climáticas, del área empleada para su deducción, en el comportamiento espacial de la precipitación máxima.

Los FRA permiten analizar la distribución espacial de la precipitación, sin embargo es de considerar que la importancia de su determinación radica en la utilidad de estos factores para

obtener una estimación de la precipitación de diseño que sea lo más aproximada a su comportamiento real.

En este sentido se compara para la cuenca en estudio, la estimación del FRA y de la precipitación de diseño para diferentes periodos de retorno realizada por Perozo (2012) utilizando el modelo propuesto por Guevara para Venezuela y la estimación realizada para ambas variables, a partir del modelo regional obtenido.

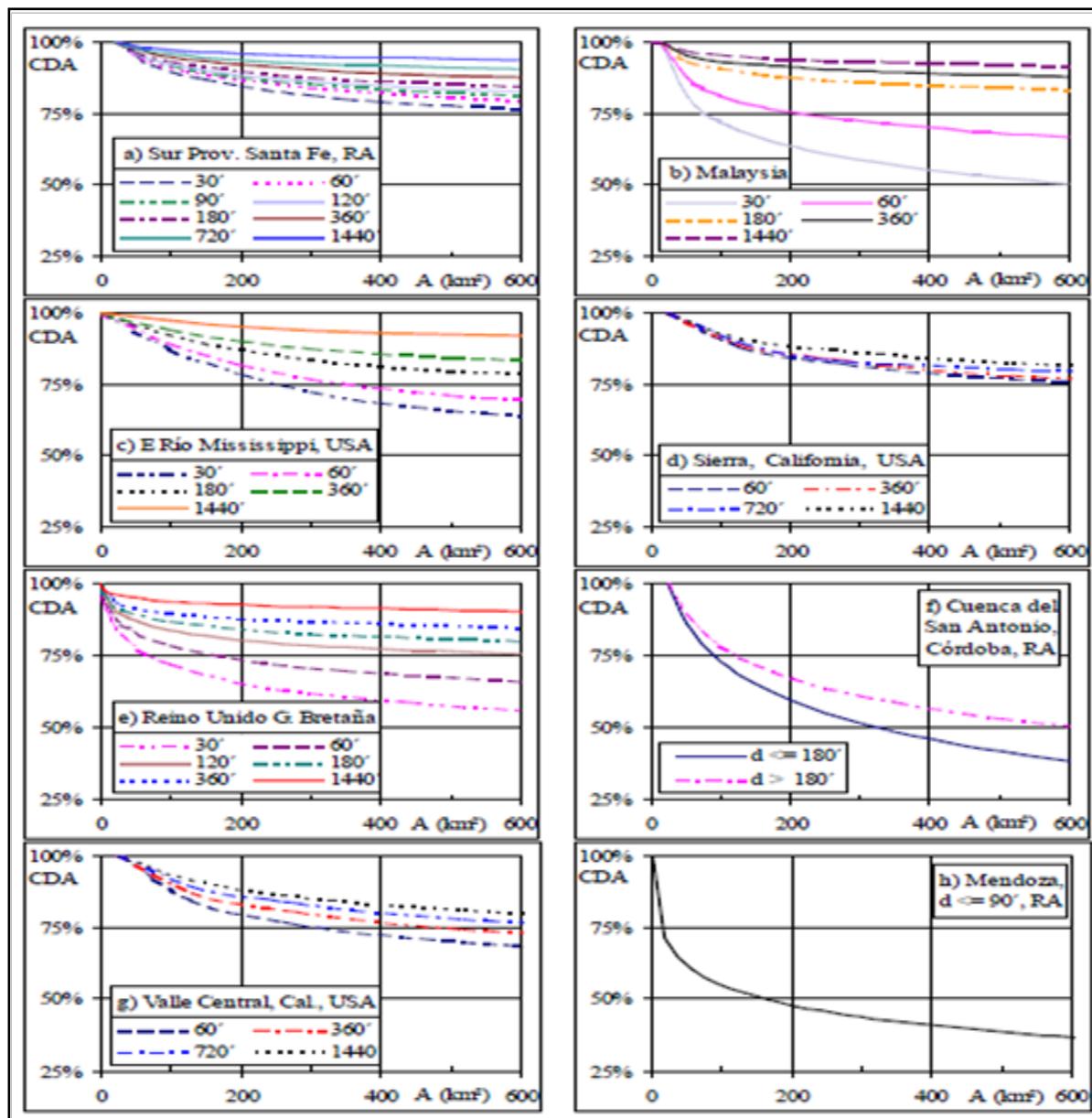


Figura 8. Curvas del factor de reducción por área para diferentes regiones del mundo. (Caamaño y Dasso 2003)

Para el área total de la cuenca de 600,369 km² y una duración de tormenta de 6 horas (igual a su tiempo de concentración), el valor de FRA por ambos modelos difiere considerablemente, siendo igual a 0,788 y 0,44 la magnitud obtenida a través del modelo propuesto para Venezuela y el modelo regionalizado para la cuenca, respectivamente.

Por su parte la precipitación de diseño para períodos de retorno entre 2 y 500 años, estimada como la fracción de la precipitación máxima puntual a partir de los valores de FRA obtenidos, arroja por tanto resultados diferentes entre ambos modelos, siendo considerablemente menores los valores obtenidos con el modelo regionalizado para la cuenca del río Coro, alcanzándose una reducción de la precipitación de diseño en más del 43% para todos los períodos de retorno, tal como se presenta en la tabla 1.

Tabla 1. Precipitación de diseño para diferentes períodos para la cuenca del río

DURACIÓN (Horas)	PERÍODO DE RETORNO							
	500	200	100	50	25	10	5	2
6								
PRECIPITACIÓN PUNTUAL (mm)	185,92	165,76	150,48	135,15	119,7	98,88	82,44	57,5
PRECIPITACIÓN DE DISEÑO (mm) (RD = 0,7875) (Modelo General Guevara 2003)	146,274	130,068	117,809	105,549	93,2895	77,0833	64,8237	48,617
PRECIPITACIÓN DE DISEÑO (mm) (FRA = 0,44) (Modelo Regionalizado)	81,805	72,934	66,211	59,466	52,668	43,507	36,274	25,300
REDUCCIÓN DE LA PRECIPITACIÓN (mm)	64,469	57,134	51,598	46,083	40,622	33,576	28,550	23,317
PORCENTAJE DE REDUCCIÓN	44,074	43,926	43,798	43,660	43,543	43,558	44,043	47,961

Estos resultados reafirman el carácter regional de los factores de reducción por área así como el impacto e importancia de su regionalización a partir de la estimación de la precipitación de diseño en una cuenca hidrográfica.

CONCLUSIONES

- Las metodologías del modelo general y el modelo regionalizado, aplicadas a la cuenca de estudio, generan una marcada diferencia en los valores de FRA obtenidos.
- La estimación de los FRA, empleando eventos registrados en la cuenca de estudio, evidencia la importancia del comportamiento espacial de la precipitación y supone una mayor confiabilidad en la estimación de la precipitación de diseño.
- La extrapolación de patrones generales de comportamiento espacial a otras cuencas con características fisiográficas y morfológicas disímiles, induce a variaciones considerables en

la estimación de la precipitación de diseño, lo que posiblemente incidirá en el dimensionamiento de las obras hidráulicas y los costos asociados a las mismas.

REFERENCIAS

- Caamaño G. y Dasso C.** (2003). “Lluvias de diseño. Conceptos, técnicas y experiencias”, Editorial Científica Universitaria, Córdoba, Argentina.
- Catalini C., Montero G., García C. y Caamaño, G.** (2009). “Abatimiento espacial temporalmente distribuido de lámina precipitada en cuencas de montaña”, II Taller sobre Regionalización de Precipitaciones Máximas, Instituto Nacional del Agua, Córdoba, Argentina.
- Guevara E.** (2003) "Un modelo de altura-área-duración (ADD) de tormentas en Venezuela", Revista Ingeniería UC, Universidad de Carabobo, Vol.10, No.1, pp. 47 - 51, Valencia, Venezuela.
- Guichard D., Domínguez R. y García R.** (2004). "Factores de reducción areal: revisión histórica. Aplicación en cuencas de la zona mediterránea de España.", XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Sao Paulo, Brasil.
- Perozo M.** (2012). "Sistema de medidas para reducir el riesgo de inundación en llanuras ribereñas. Caso de estudio: llanura del río Coro". Tesis de Doctorado, Centro de Investigaciones Hidráulicas, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana.
- Zamanillo E., Larenze G., Tito M., Pérez M. y Garat M.** (2008). “Procedimientos para la estimación de tormentas de diseño para la provincia de Entre Ríos”, Editorial Universidad Tecnológica Nacional, Buenos Aires, Argentina.