

ECUACIONES QUE ESTIMAN LAS CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-PERÍODO DE RETORNO DE LA LLUVIA

Domitilo Pereyra-Díaz, José Antonio A. Pérez-Sesma y Leonorilda Gómez-Romero
Carrera de Ciencias Atmosféricas de la Facultad de Instrumentación Electrónica, Universidad Veracruzana
Circuito Gonzalo Aguirre Beltrán s/n, Zona Universitaria, Xalapa, Veracruz, 91000, México
E-mail:dpereyra@uv.mx

RESUMEN

En este estudio se presentan algunos modelos matemáticos no lineales que estiman las curvas intensidad-duración-período de retorno de la lluvia (IDT), los cuales se ajustaron a registros pluviométricos de la ciudad de Xalapa, Veracruz. Para esto se utilizaron datos de precipitación de las tormentas más intensas de cada año, registradas en el observatorio climatológico del Servicio Meteorológico Nacional (1927-1998) y en la estación climatológica de la Zona Universitaria (1999-2002). Conocida la intensidad de la lluvia, i , para la duración, d , y el período de retorno correspondiente, T , se resolvieron las ecuaciones de cada modelo utilizando el método de aproximaciones sucesivas de Quasi-Newton, en el módulo de estimación no-lineal del software STATISTICA v.5.5. También se realizó el análisis de residuales y se calculó el error estándar de estimación. Lo anterior mostró que el modelo de Koutsoyiannis *et al.* (1998) es el que mejor explica la intensidad de la lluvia, con base en la duración de la tormenta y al período de retorno asignado, con $R^2 = 0.988$ y error estándar de estimación $R_e = 2.7$ mm/hr, seguido por Chow *et al.* (1994) y Sherman (1931) con $R^2 = 0.934$ y $R_e = 6.5$ mm/hr ambos, y Bernard (1932) con $R^2 = 0.903$ y $R_e = 7.8$ mm/hr. Por lo anterior se recomienda utilizar, como primera opción, el de Koutsoyiannis *et al.* (1998) y como segunda opción los modelos de Chow *et al.* (1994) y Sherman (1931) si se cuenta con herramienta computacional y, por su sencillez, se recomienda el de Bernard (1932), que genera resultados aceptables.

Palabras clave: Retorno de lluvia, modelos matemáticos, registros pluviométricos.

ABSTRACT

Some non-linear mathematical models that estimate the rain intensity-duration-return period curves (IDT), fitted to pluviometric records of the city of Xalapa, Veracruz, are presented. Precipitation data of each year's most intense storms registered by the climatologic observatory of the Servicio Meteorológico Nacional (1927-1998) and by the climatological station in the Zona Universitaria (1999-2002) were used. Given the rain intensity i , the equations for each model were solved for the duration d , and for the corresponding return period T , by a Quasi-Newton method of successive approximations, using the non-linear estimation module of the STATISTICA v.5.5 software. A residuals analysis was also made, and the estimation standard error was calculated. The results showed that the Koutsoyiannis *et al.* (1998) model is the one that best explains the rain intensity, based on the storm duration and the assigned return period, with $R^2 = 0.988$ and estimation standard error $R_e = 2.7$ mm/hr, followed by Chow *et al.* (1994) and Sherman (1931), with $R^2 = 0.934$ and $R_e = 6.5$ mm/hr ambos, and by Bernard (1932) with $R^2 = 0.903$ and $R_e = 7.8$ mm/hr. Thus, it is recommended to use, as a first option the Koutsoyiannis *et al.* (1998) model and, as a second option, the Chow *et al.* (1994) and Sherman (1931) models if one has the computational tools. The Bernard (1932) model is recommended because it is very simple but gives acceptable results.

Keywords: Rain return, mathematical models, pluviometric records.

INTRODUCCIÓN

Antes de entrar en materia es conveniente definir que es la intensidad de la lluvia. La intensidad de la lluvia se define como la cantidad de agua de lluvia que cae, en un punto, por unidad de

tiempo, y ésta es inversamente proporcional a la duración de la tormenta. La duración de la tormenta es el tiempo que transcurre desde que inicia la precipitación de la tormenta hasta que ésta cesa.

Willems (2000) define las curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) como la relación que existe entre la intensidad de precipitación media y la frecuencia de ocurrencia (inverso del período de retorno); estas curvas son herramientas ampliamente utilizadas en

ingeniería para fines de planeación, diseño y operación de los proyectos hidráulicos, así como para la protección de obras de ingeniería contra avenidas máximas (Koutsoyiannis *et al.*, 1998). Según Smith (1993) el análisis de frecuencia de la precipitación es usado ampliamente para diseño de obras de ingeniería que controlan los escurrimientos generados por las tormentas. Esto incluye sistemas de alcantarillado municipales, vertedores, puentes y sistemas de drenaje agrícola. Willems (2000) menciona también que la relación intensidad-duración-frecuencia de precipitaciones extremas es ampliamente usada para estimar las avenidas de diseño en los sitios donde se construirán las obras hidráulicas.

El planteamiento de las primeras relaciones matemáticas data desde el inicio de la década de los treinta, del siglo pasado; Sherman (1931) y Bernard (1932). Desde entonces varios conjuntos de relaciones han sido desarrollados para varias partes del mundo. Desde la década de los sesenta, la distribución geográfica de la relación IDF ha sido estudiada en varios países desarrollados y algunos mapas han sido construidos para conocer la intensidad de la lluvia o la lámina de lluvia [esta última se define como la cantidad de lluvia acumulada durante una tormenta y se mide generalmente en milímetros] para varios períodos de retorno y duración. Según Koutsoyiannis *et al.* (1998) en Estados Unidos de América los mapas han sido desarrollados desde 1961 por el US Weather Bureau, posteriormente por la NOAA para el Oeste, Este y Centro. Estos mapas han sido reproducidos en algunos manuales y libros de texto de hidrología como en Chow (1964), Linsley *et al.* (1977), Viessman *et al.* (1989), Ponce (1989), Maidment (1993) y Chow *et al.* (1994). Koutsoyiannis *et al.* (1998) también menciona que en el Reino Unido e Irlanda los mapas han sido realizados por el instituto de Hidrología y que mapas similares han sido construidos para Australia, India, SWA-Namibia e Italia.

Genovez y Pegoraro (2001) realizaron un estudio validando y adecuando las ecuaciones de Bell y Chen, de lluvias intensas generalizadas, con registros pluviográficos de 23 ciudades del estado de Sao Pablo, Brasil. En ambos casos se obtuvieron resultados satisfactorios.

Para la República Mexicana se sabe, por comunicación personal, que existe un mapa de curvas IDT elaborado por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes pero no se conoce la metodología; en la literatura se encuentran estudios como el de Campos (1990) que obtuvo las curvas IDT para Cazadero, Zacatecas, aplicando las ecuaciones de Bell y Chen, de lluvias intensas generalizadas; también existe el de Pereyra y Bando (2002) que, en un estudio preliminar, ajustaron las ecuaciones de Sherman (1931), Wenzel (modificada por Chow *et al.*, 1994) y Koutsoyiannis *et al.* (1998) a las intensidades de 11 tormentas severas, registradas durante el período 1999-2002, en la estación climatológica automática ubicada en el edificio que alberga la carrera de Ciencias Atmosféricas de la Universidad Veracruzana, zona universitaria de Xalapa, mostró que el mejor modelo fue el de Koutsoyiannis con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.952$.

Debido a la escasez de registros pluviométricos para duraciones pequeñas (del orden de minutos) en la República Mexicana, en este estudio se plantean los siguientes objetivos: a) presentar los

diferentes modelos matemáticos que se han utilizado, a nivel mundial, para estimar las curvas IDT, b) ajustar los modelos a los registros de precipitación de tormentas severas ocurridas en la ciudad de Xalapa, Veracruz, en el período 1927-2002, y c) recomendar el más viable y fácil de aplicar para la República Mexicana. El mejor modelo propuesto en c) puede ser utilizado en la construcción del mapa de curvas IDT para la República Mexicana, que es tan importante para el diseño hidráulico.

MODELOS MATEMÁTICOS PARA LAS CURVAS IDT

Las curvas de intensidad-duración-frecuencia también pueden expresarse como ecuaciones, con el fin de evitar la lectura de la intensidad de la lluvia de diseño, en una gráfica (Chow *et al.*, 1994). A continuación se presentan los modelos matemáticos más conocidos, a nivel mundial, que se utilizan para estimar las curvas IDT.

A) ECUACIONES QUE RELACIONAN LA INTENSIDAD DE LA LLUVIA CON LA DURACIÓN DE LA TORMENTA

Una ecuación que relaciona la lámina de lluvia, generada por una tormenta, con su duración, es:

$$h = cd^n \quad (1)$$

donde h es la lámina de lluvia registrada, en centímetros, d es la duración de la tormenta, en horas, c es un coeficiente y n es un exponente positivo menor que uno; típicamente n varía entre 0.2 y 0.5 (Ponce, 1989).

Se sabe que la intensidad y duración de una tormenta están inversamente relacionadas, por lo que de la ecuación (1) se puede obtener la intensidad de la lluvia diferenciando la lámina de lluvia con respecto al tiempo,

$$\frac{dh}{dt} = i = cnd^{n-1} \quad (2)$$

donde i es la intensidad de la tormenta, simplificando la ecuación (2) se obtiene

$$i = \frac{\lambda}{d^n} \quad (3)$$

En este caso $\lambda = cn$ y $\eta = 1-n$. Se sabe que n es menor que 1, por lo que η también es menor que 1.

Otro modelo intensidad-duración es el descrito por la ecuación (4), (Ponce, 1989),

$$i = \frac{\lambda}{d + \theta} \quad (4)$$

donde λ y θ son parámetros que se determinan por análisis de regresión. Un modelo general que combina las ecuaciones (3) y (4) es el siguiente:

$$i = \frac{\lambda}{(d + \theta)^\eta} \quad (5)$$

Para $\theta = 0$, la ecuación (5) se reduce a la ecuación (3); para $\eta = 1$ la ecuación (5) se reduce a la ecuación (4).

B) ECUACIONES QUE RELACIONAN LA INTENSIDAD DE LA LLUVIA DE UNA TORMENTA CON LA DURACIÓN Y FRECUENCIA DE OCURRENCIA DE ÉSTA

1. *Modelo propuesto por Bernard (1932)*. Este modelo relaciona simultáneamente la intensidad, la duración y el período de retorno de la lluvia en una familia de curvas (Ec. 6). Bernard supuso que si el parámetro I de las ecuaciones (3), (4) y (5) está relacionado con el período de retorno, la ecuación (3) se podía escribir de la siguiente manera:

$$i = \frac{\lambda T^\psi}{d^\eta} \quad (6)$$

donde ψ es un parámetro adimensional constante e independiente de la duración.

2. *Modelo propuesto por Sherman (1931)* para la ciudad de Boston, Massachusetts, USA (Raudkivi, 1979):

$$i = \frac{\lambda T^\psi}{(d + \theta)^\eta} \quad (7)$$

3. *Modelo propuesto por Wenzel (1982)*. Wenzel propuso y estimó los coeficientes λ , η , y θ de la ecuación (8) para algunas ciudades de los Estados Unidos:

$$i = \frac{\lambda}{d^\eta + \theta} \quad (8)$$

4. *Modelo propuesto por Chow et al. (1994)*, que consiste en incluir el período de retorno T a la ecuación propuesta por Wenzel (1982),

$$i = \frac{\lambda T^\psi}{d^\eta + \theta} \quad (9)$$

5. *Modelo propuesto por Koutsoyiannis et al. (1998)*. Este modelo fue ajustado para Atenas, Grecia, y considera que la variable intensidad i , tiene una distribución doble exponencial o Gumbel,

con el parámetro adimensional ψ constante e independiente de la duración, y el parámetro de escala varía con la duración d , como $1/(d + \theta)^\eta$. La ecuación es:

$$i = \lambda \left\{ \frac{\psi - \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right]}{(d + \theta)^\eta} \right\} \quad (10)$$

donde i es la intensidad de la lluvia en mm/h, T es el período de retorno en años, d es la duración de la tormenta en horas y λ , ψ , η y θ son parámetros que varían con el lugar y el período de retorno, cuyos valores se estiman por aproximaciones sucesivas cuando se ajusta cada modelo.

METODOLOGÍA PARA AJUSTAR LAS ECUACIONES IDT

Para ajustar las ecuaciones IDT presentadas anteriormente, se utilizaron los registros pluviográficos correspondientes al periodo 1927-1998 del observatorio climatológico de la ciudad de Xalapa, Veracruz del Servicio Meteorológico Nacional (S.M.N.) y los del periodo 1999-2002 de la estación climatológica automática (marca Davis) de la Universidad Veracruzana ubicada en la zona universitaria. Se eligieron 53 tormentas severas, considerando como tormenta severa aquella que generó precipitaciones de al menos 7 mm en 10 minutos y causó fuertes escurrimientos en las calles, e inundaciones en algunas partes bajas de la ciudad.

Las precipitaciones generadas por las tormentas severas, registradas durante el período 1927-2002, que se utilizaron en este estudio se muestran en la tabla 1. Los años sin registro de tormenta severa se deben a la falta de información o a su dudosa precisión al leer los pluviogramas.

En la figura 1 se muestra, como ejemplo, el hietograma de la tormenta severa más intensa del período 1927-2002, ocurrida el día 26 de marzo del año 1996, en el cual se observa que la tormenta fue aumentando su intensidad hasta alcanzar los 30 mm en 10 minutos. Esta tormenta se originó por el paso del frente N° 54, acompañado de una masa de aire ártico, que ocasionó nublados de gran desarrollo vertical, lo que originó precipitaciones intensas. Cabe comentar que esta tormenta tiene el record de precipitación en 24 horas (119.4 mm) para el mes de marzo.

El primer paso para ajustar los modelos (ecuaciones 3 a 10) fue transformar las precipitaciones máximas registradas (tabla 1) para las duraciones de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110 y 120 minutos en intensidades (mm/h; tabla 2).

El segundo paso fue ordenar las intensidades máximas de cada duración, de mayor a menor, para asignarle el período de retorno, T , correspondiente (tabla 3).

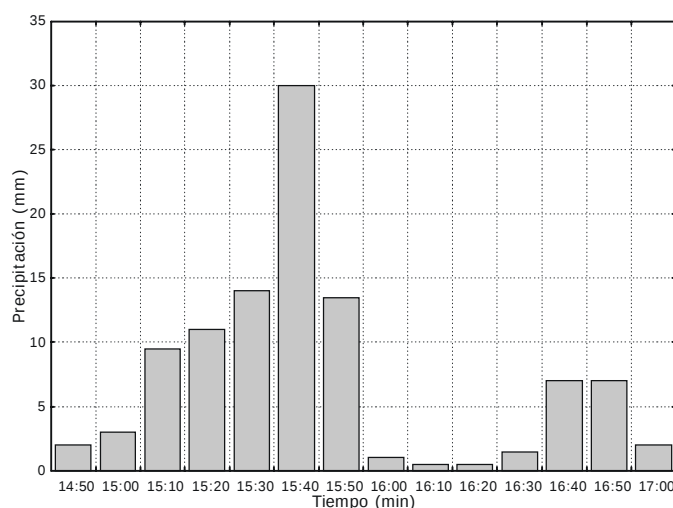


Figura 1. Histograma de la tormenta ocurrida el 26 de marzo de 1996 en la ciudad de Xalapa, Veracruz.

Con los valores de i , d y T de la tabla 3 se procedió a ajustar cada uno de los modelos presentados anteriormente (ecs. 3 a 10). Debido a que las ecuaciones que describen cada modelo son no-lineales e hiperbólicas, para resolverlas se utilizó el método de aproximaciones sucesivas de Quasi-Newton (Nocedal y Wright, 2000; Fletcher, 2000), esto en el módulo de estimación no-lineal del software STATISTICA v.5.5, Statsoft (1999). Luego del ajuste se hizo el análisis de residuales (R_e = intensidad observada - intensidad estimada por el modelo) con el propósito de verificar que éstos se distribuyeran aleatoriamente alrededor del cero. Finalmente, se calculó el error estándar de estimación que se define como la raíz cuadrada de la varianza residual (Haber y Runyon, 1973).

RESULTADOS

La tabla 4 muestra los parámetros de cada modelo, resultado del ajuste a las precipitaciones extremas de la ciudad de Xalapa, registradas en el período 1927-2002, así, como el coeficiente de determinación R^2 y el error estándar de estimación, R_e .

La tabla 4 muestra que el modelo que mejor se ajustó a las precipitaciones de las tormentas severas registradas en la ciudad de Xalapa, fue el de Koutsoyiannis *et al.* (1998) con un $R^2 = 0.988$, es decir que éste explica 98.8% de los casos (Figura 2). En segundo lugar están el de Chow *et al.* (1994) y Sherman (1931) con un $R^2 = 0.934$ (Figuras 3 y 4, respectivamente), seguido por Bernard (1932) con un $R^2 = 0.904$ (Figura 5); estos tres últimos explican más del 90% de los casos. En cuanto al modelo de Wenzel (ec.8) y los descritos por las ecuaciones 3, 4 y 5 su coeficiente de determinación varió entre 0.473 y 0.493, es decir que explican menos del 50% de los casos.

Finalmente, las figuras 6 a 9 muestran las curvas IDF ajustadas a las precipitaciones de la ciudad de Xalapa durante el período 1927-2002.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

De los modelos ajustados en este estudio, resultó que el de Koutsoyiannis *et al.* (1998) es el mejor con $R^2 = 0.988$ y error estándar de estimación de $R_e = 2.7$ mm/hr. Este resultado es congruente con el obtenido por Koutsoyiannis *et al.* (1998) para la ciudad de Atenas, Grecia, cuando compararon su ecuación con la de Sherman (1931). Este modelo puede ser utilizado si se cuenta con una PC que tenga un paquete estadístico que resuelva ecuaciones no-lineales.

Además del modelo de Koutsoyiannis *et al.* (1998) los presentados por Sherman (1931) y Chow *et al.* (1994) mostraron un buen ajuste, $R^2 = 0.934$, y un error estándar de estimación de $R_e = 6.5$ mm/hr, por lo que se recomienda en el cálculo de las curvas IDT. Para su aplicación se requiere la misma herramienta computacional que en el modelo de Koutsoyiannis *et al.* (1998).

Por último se recomienda el modelo de Bernard (1932) por su sencillez, ya que no es necesario utilizar la herramienta computacional recomendada en los otros. Este modelo presentó un $R^2 = 0.903$, y un error estándar de estimación de $R_e = 7.8$ mm/hr. Cabe aclarar que dicho modelo sobreestima las intensidades para duraciones pequeñas entre 10 y 20 minutos.

En cuanto al modelo de Wenzel (Ec. 8) y los descritos por las ecuaciones (3), (4) y (5) se puede comentar que no son recomendables, debido a que explican menos del 50% de los casos (tabla 4).

Los modelos ajustados en este estudio (Ecs. 6, 8, 9 y 10) pueden ser utilizados en el diseño urbano, con cierta reserva, para otra ciudad donde se presenten lluvias convectivas y que tenga características climáticas similares a la ciudad de Xalapa, Veracruz, si es que no se cuenta con registros continuos de precipitación para validarlos.

Como se mencionó anteriormente, el presente estudio muestra la necesidad de contar con registros continuos de precipitación, para las principales ciudades del país, con el fin de utilizar las precipitaciones extremas en el diseño urbano.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Servicio Meteorológico Nacional por haber proporcionado la información pluviométrica de las tormentas más intensas registradas en el observatorio climatológico de la ciudad de Xalapa, Veracruz, a la DEPMI-UNAM por haber permitido el acceso a su biblioteca para realizar la investigación bibliográfica, así como a los dos árbitros, que revisaron el texto, por sus valiosas observaciones, en particular al Dr. Ernesto S. Caetano Neto que se identificó en su evaluación.

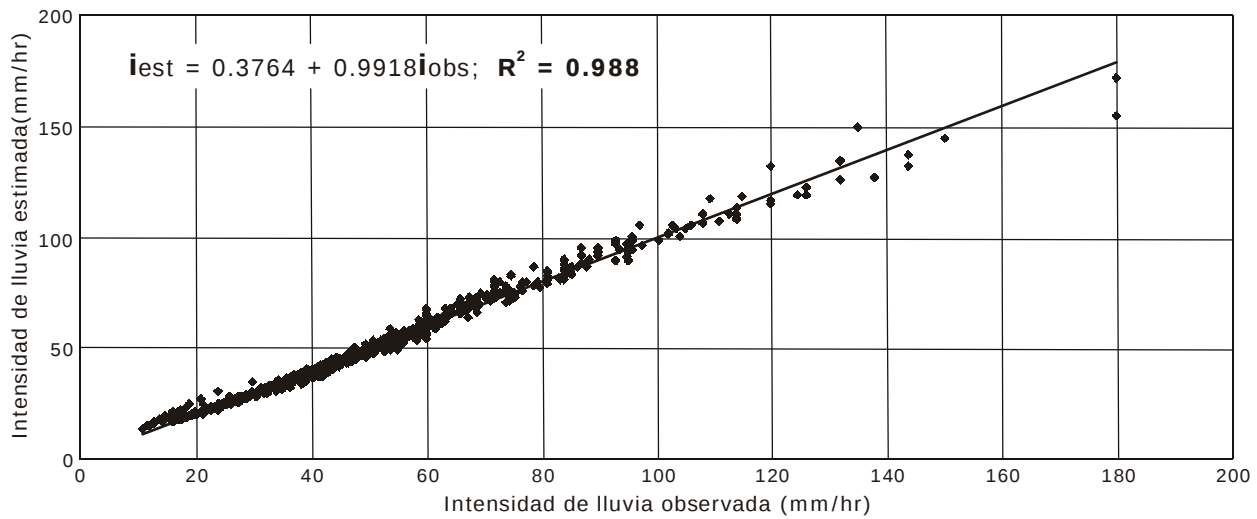


Figura 2. Correlación entre intensidades observadas y estimadas por la ecuación de Koutsoyiannis et al. (1998) para la ciudad de Xalapa, durante el período 1927-2002.

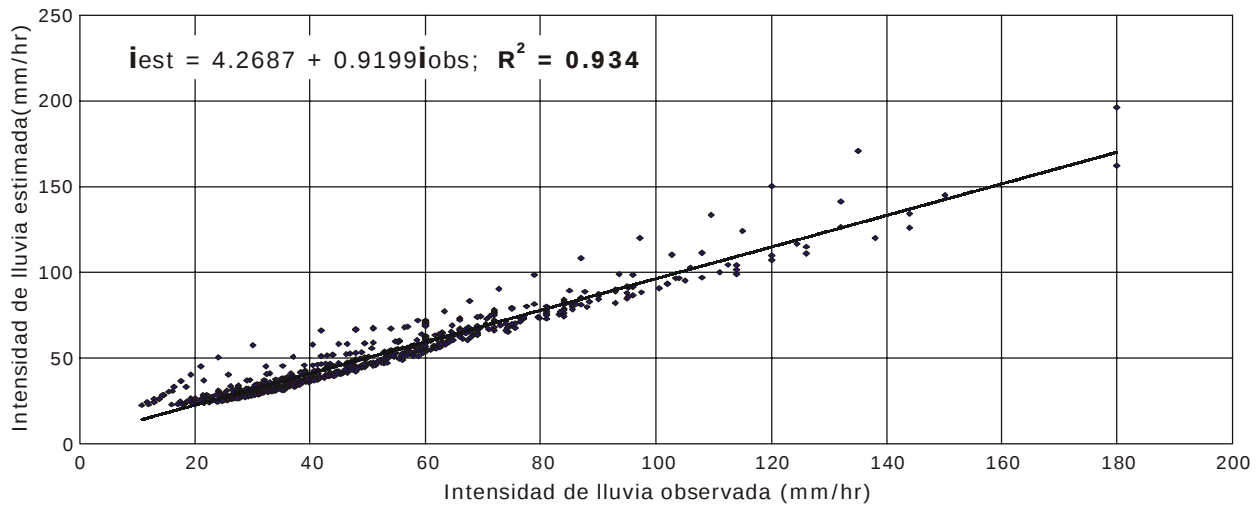


Figura 3. Correlación entre intensidades observadas y estimadas por la ecuación de Chow et al. (1994) para la ciudad de Xalapa, durante el período 1927-2002.

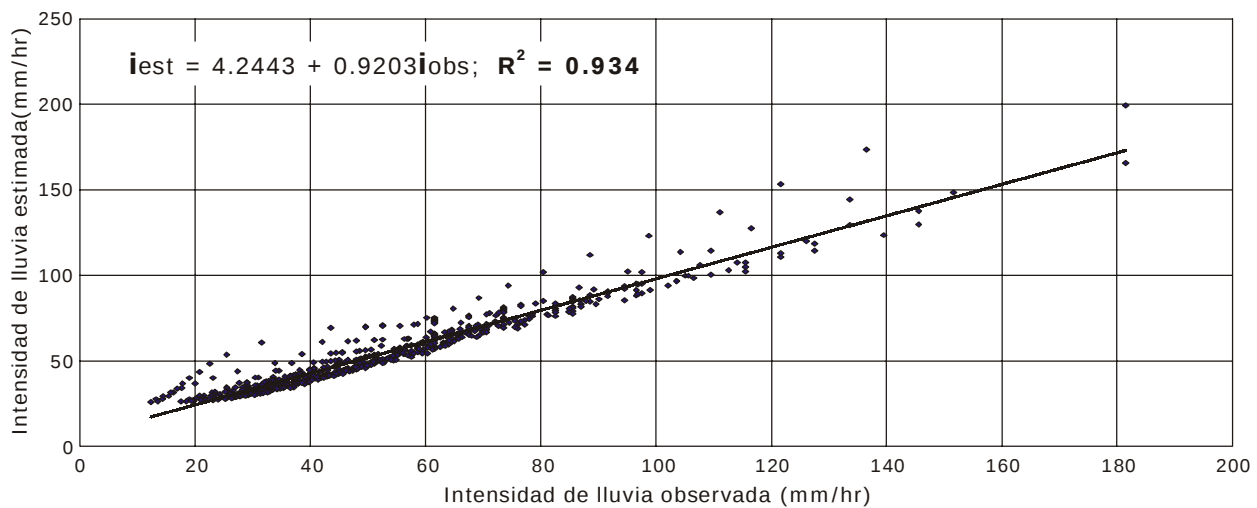


Figura 4. Correlación entre intensidades observadas y estimadas por la ecuación de Sherman (1931) para la ciudad de Xalapa, durante el período 1927-2002.

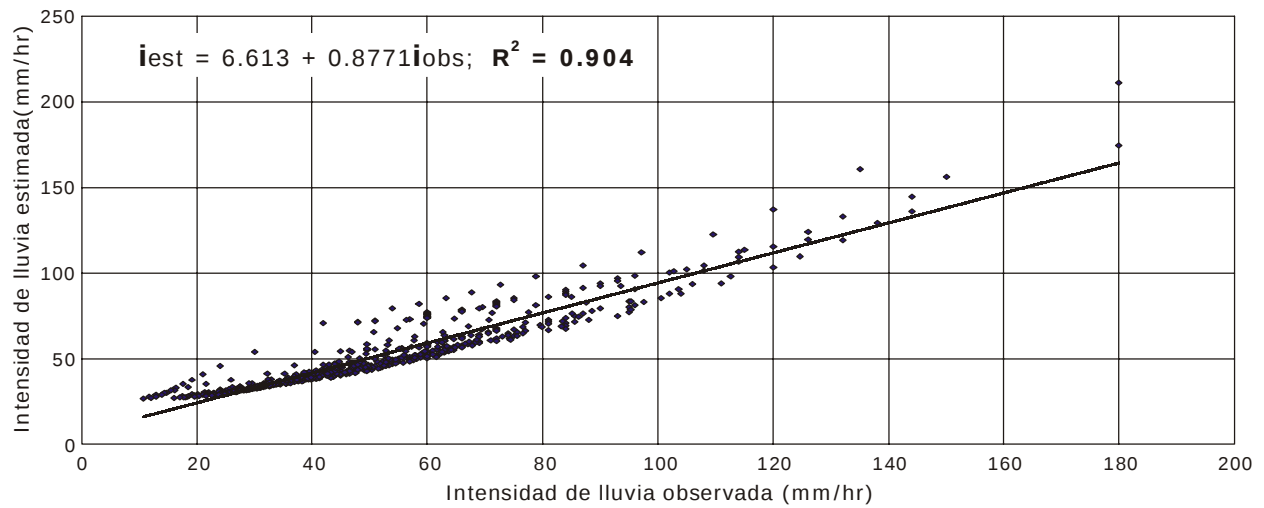


Figura 5. Correlación entre intensidades observadas y estimadas por la ecuación de Bernard (1932) para la ciudad de Xalapa, durante el período 1927-2002.

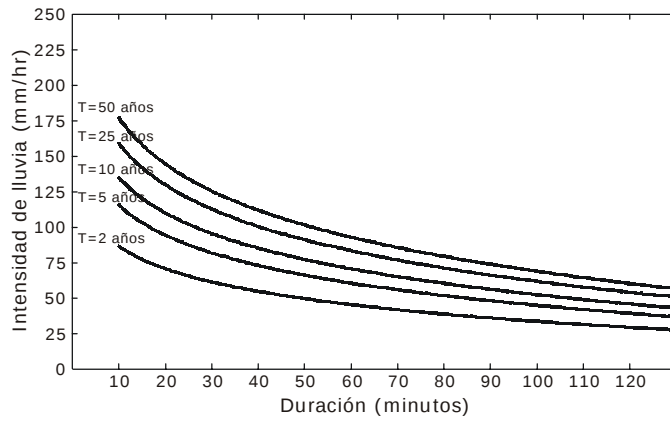


Figura 6. Curvas IDT generadas a partir del modelo de Koutsoyiannis et al. (1998) para la ciudad de Xalapa, Veracruz.

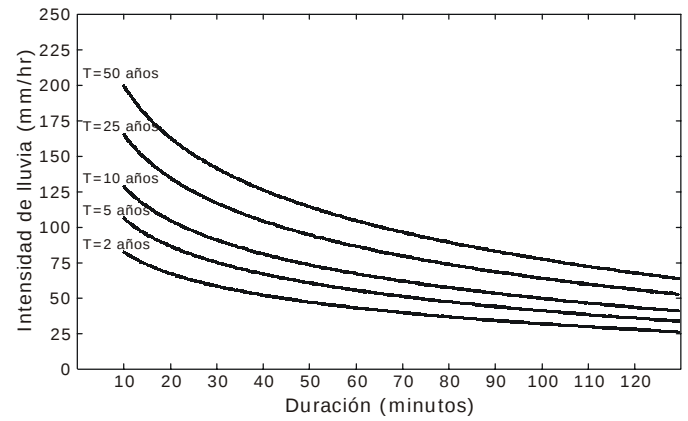


Figura 8. Curvas IDT generadas a partir del modelo de Sherman (1931) para la ciudad de Xalapa, Veracruz.

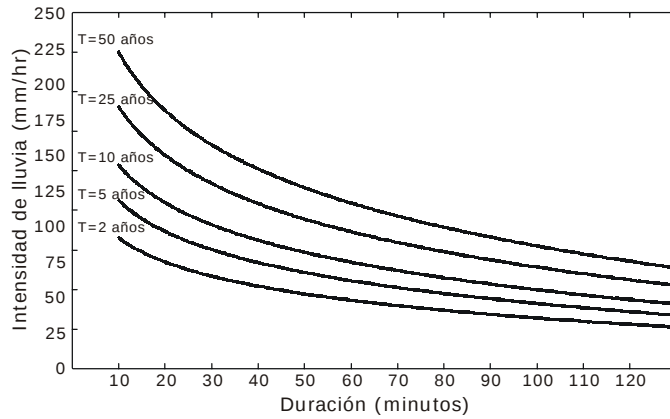


Figura 7. Curvas IDT generadas a partir del modelo de Chow et al. (1994) para la ciudad de Xalapa, Veracruz.

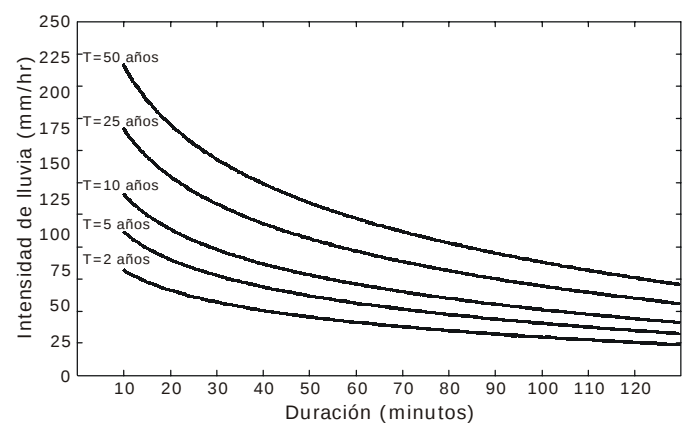


Figura 9. Curvas IDT generadas a partir del modelo de Bernard (1932) para la ciudad de Xalapa, Ver.

REFERENCIAS

Willems, P., 2000. Compound intensity/duration/frequency-relationships of extreme precipitation for two season and two storm types. *Journal of Hydrology*, vol. 233, p.189-205.

Bernard, M.M., 1932. Formulas for rainfall intensities of long durations. *Trans. ASCE*, vol. 96, p. 592-624.

Campos, D.F., 1964. Procedimiento para obtener curvas I-D-Tr a partir de registros pluviométricos. *Ingeniería Hidráulica en México*, vol. V, núm. 2, 1990, p. 39-52.

Chow, V.T., 1964. *Handbook of Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York.

Chow, V.T., Maidment, D.R. y Mays, L.W., 1994. *Hidrología Aplicada*. McGraw-Hill. Interamericana, S. A. Colombia, 584 pp.

Fletcher, R., 2000. *Practical Methods of Optimization*. John Wiley y Sons LTD, Great Britain, 436pp.

Genovez, A.M. y Pegoraro, R. de C.F., 2001. Análisis y evaluación de las ecuaciones de lluvias intensas generalizadas, *Ingeniería Hidráulica en México*, vol. XVI, núm. 3, p. 15-23.

Haber, A. y Runyon, R.P., 1973. *Estadística General*. Fondo Educativo Interamericano, S.A., USA, 371 pp.

Koutsoyiannis, D., Kozonis, D. and Manetas, A., 1998. A Mathematical Framework for Studying Rainfall Intensity-Duration-Frequency Relationships. *Journal of Hydrology*, vol. 206, p. 118-135.

Linsley, Jr., R.K., Kohler, M.A. y Paulhus J.L., 1977. *Hidrología para ingenieros*, McGraw-Hill, Inc. segunda edición, 386 pp.

Maidment, D.R., 1993. *Handbook of Hydrology*, Ch. III: Precipitation, McGraw-Hill, Inc., 1st Ed., USA, p. 1-47.

Nocedal, J. and Wright, J., 2000. *Springer Series in Operations Research: Numerical Optimization*. Springer-Verlag New York, Inc, 636 pp.

Pereyra, D. y Bando, U., 2002. Aplicación de tres ecuaciones para estimar las curvas intensidad de la lluvia-duración-período de retorno de la ciudad de Xalapa, Veracruz, México. XII Congreso Nacional de Meteorología, del 23 al 26 de octubre, Cancún, Quintana Roo, México.

Ponce, V.M., 1989. *Engineering Hydrology. Principles and Practices*, Prentice Hall, primera edición. New Jersey, USA, 640 pp.

Raudkivi, A.J., 1979. *Hydrology. An Advanced Introduction to Hydrological Processes and Modeling*, Pergamon Press Ltd., Headington Hill Hall, England, 479 pp.

Sherman, C.W., 1931. Frequency and intensity of excessive rainfall at Boston, Mass. *Trans. Am. S.C.E.*, vol. 95, p. 951-960.

Smith, J.A., 1993. *Handbook of Hydrology*, capítulo III, Precipitation, McGraw-Hill, Inc. primera edición, USA, p. 1-47.

Statsoft, Inc., 1999. *Statistica for windows, computer program manual*, 99 edition, Tulsa OK. USA.

Viessman, Jr., W., Lewis, G. L., and Knapp, J. W., 1989. *Introduction to Hydrology*, Harper y Row, tercera edición., New York, 704 pp.

Wenzel, H.G., 1982. Rainfall for urban stormwater design, in *Urban Storm Water Hydrology*. Water Resources Monograph 7, American Geophysical Union. Washington, D.C., USA.

Tabla 1. Precipitación máxima, por intervalos de tiempo, de las tormentas severas registradas en la ciudad de Xalapa, Veracruz. Período 1927-2002.

Fecha	Duración (min)											
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
16-06-27	11.0	21.5	30.5	36.5	42.0	47.5	52.5	57.5	62.0	66.5	70.5	74.0
07-07-28	14.0	23.5	31.0	38.0	44.5	49.5	54.0	57.0	59.0	60.5	62.0	63.0
05-06-29	10.0	19.5	29.0	38.0	44.5	50.5	56.5	62.0	66.0	68.0	70.0	71.5
18-04-30	15.0	28.0	37.0	46.0	54.0	61.0	67.5	74.0	77.0	80.0	83.0	85.0
22-05-31	14.0	27.0	33.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0
03-07-33	11.0	21.0	30.0	33.5	34.5	35.5	35.5	35.5	35.5	35.5	35.5	35.5
11-07-34	19.0	33.5	47.5	57.0	66.5	75.0	82.5	89.5	94.0	96.5	98.0	99.0
22-06-35	08.5	16.5	24.0	31.0	36.5	41.5	44.5	47.5	49.5	51.5	53.5	55.0
11-07-36	15.5	25.5	32.0	38.0	43.0	47.5	50.5	52.5	54.5	55.5	56.5	57.5
03-08-37	12.0	23.5	33.5	43.5	53.5	63.0	72.0	79.5	84.5	88.0	91.0	94.0
20-06-38	16.0	28.5	35.5	42.5	48.5	51.0	53.5	55.0	56.0	56.5	57.0	57.5
07-06-39	23.0	32.5	42.0	49.5	56.5	63.0	67.5	70.5	73.5	75.5	76.5	77.5
29-07-43	14.5	23.0	30.0	35.5	41.0	46.0	51.0	54.5	57.5	59.0	60.0	60.5
10-06-44	08.0	13.5	18.5	23.5	27.0	29.5	32.0	34.0	36.0	38.0	39.5	40.5
21-04-46	24.0	34.0	42.0	48.0	49.0	50.0	50.5	51.0	51.5	52.0	52.5	52.5
13-06-47	12.0	22.0	29.5	36.0	42.0	47.5	51.0	53.5	55.5	57.0	58.5	59.5
05-03-48	08.0	15.0	22.0	28.5	32.5	36.5	39.5	42.0	43.5	45.0	46.5	48.0
05-08-49	18.0	29.0	36.0	41.0	45.5	49.5	52.5	55.0	57.0	59.0	61.0	63.0
01-06-50	09.5	17.0	22.0	27.0	30.5	34.0	37.0	38.5	40.0	41.0	42.0	43.0
25-05-52	30.0	44.0	54.0	63.5	73.0	77.0	80.5	83.5	86.0	87.5	88.5	89.5
24-06-53	12.0	22.0	28.0	32.0	36.0	40.0	44.0	47.5	48.0	48.5	49.0	49.5
11-06-54	21.0	40.0	46.5	51.0	52.5	53.5	54.0	54.5	54.5	54.5	54.5	54.5
13-07-56	07.0	10.0	12.0	14.0	16.0	17.5	19.0	20.5	22.0	23.0	23.5	24.0
11-06-58	12.0	24.0	34.0	43.0	50.0	56.0	60.5	63.5	66.5	69.5	72.5	74.5
08-06-59	21.0	41.5	53.0	63.5	71.0	77.5	81.0	84.0	86.5	88.5	90.5	92.5
20-06-61	10.0	20.0	27.0	31.5	35.5	36.0	36.5	37.0	37.5	38.0	38.5	39.0
08-07-62	10.0	20.0	30.0	40.0	48.0	53.0	58.0	63.0	67.0	69.0	70.0	71.0
11-08-63	12.5	22.0	28.5	33.0	35.5	37.0	38.5	40.0	41.5	43.0	44.0	45.0
07-06-64	10.0	20.0	26.5	31.5	36.0	39.0	41.5	43.5	45.5	47.5	49.5	51.0
03-10-67	12.5	22.5	27.5	32.5	37.0	40.5	44.0	47.5	50.5	53.5	56.0	58.5
14-05-70	15.5	30.0	44.0	54.0	63.0	68.5	74.0	78.5	80.0	80.5	81.0	81.5
18-04-73	13.5	26.5	36.5	43.0	49.0	52.5	56.0	59.0	60.5	61.5	62.0	62.0
20-06-75	19.0	37.0	52.0	64.0	69.5	74.0	78.5	82.5	84.0	85.0	85.5	86.0
22-09-78	14.0	24.0	33.0	41.5	49.5	54.5	58.0	61.0	64.0	66.5	68.5	70.0
01-06-80	14.0	24.0	33.0	41.0	47.5	52.5	57.5	62.5	65.0	67.0	69.0	71.0
24-04-81	25.0	45.0	60.0	73.0	81.0	87.0	92.0	97.0	101.5	105.5	107.5	108.0
21-04-82	20.0	32.0	42.0	50.0	57.0	60.0	61.0	62.0	62.5	63.0	63.0	63.0
22-06-83	15.0	27.0	37.0	42.0	44.0	45.0	45.5	46.0	46.5	47.0	47.5	47.5
14-05-84	10.0	20.0	29.0	32.0	34.0	35.0	36.0	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5
18-06-85	10.0	20.0	21.0	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5
02-05-86	17.0	27.0	34.5	41.0	43.5	45.0	46.5	48.0	49.0	50.0	50.0	50.0
21-08-87	08.5	15.5	21.5	27.5	32.5	35.0	37.0	39.0	40.5	41.5	42.5	43.0
09-06-88	10.0	20.0	27.0	30.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0
24-05-90	24.0	37.5	47.5	57.5	62.0	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5
05-02-91	12.0	21.0	27.0	33.0	38.5	43.5	47.5	51.5	55.5	59.5	62.5	65.5
02-06-92	10.0	18.5	24.5	29.0	32.0	35.0	37.5	40.0	42.0	43.5	44.5	45.0
26-03-96	30.0	44.0	57.5	68.5	78.0	85.0	92.0	95.0	97.0	99.0	100.5	101.5
22-06-97	19.0	29.5	38.5	43.0	46.5	49.5	51.5	51.5	51.5	51.5	51.5	51.5
10-09-98	11.5	18.5	23.5	26.0	27.5	29.0	30.5	32.0	33.0	33.5	34.0	34.0
12-07-99	09.4	18.4	23.2	28.0	32.6	36.8	40.4	44.0	47.4	50.6	53.2	55.4
07-05-00	11.6	20.6	29.0	36.6	43.2	46.6	48.2	48.6	49.0	49.2	49.4	49.4
14-10-01	11.0	20.8	27.6	32.0	36.2	40.0	42.4	44.6	46.4	48.0	49.6	51.0
05-06-02	17.5	34.5	47.5	55.5	63.0	66.5	69.5	70.5	71.0	71.2	71.4	71.6

Precipitación (mm)

Tabla 2. Intensidades máximas, por intervalos de tiempo, de las tormentas registradas en la ciudad de Xalapa, Veracruz.

Fecha	Duración (min)											
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
16-06-27	66.0	64.5	61.0	54.8	50.4	47.5	45.0	43.1	41.3	39.9	38.5	37.0
07-07-28	84.0	70.5	62.0	57.0	53.4	49.5	46.3	42.8	39.3	36.3	33.8	31.5
05-06-29	60.0	58.5	58.0	57.0	53.4	50.5	48.4	46.5	44.0	40.8	38.2	35.8
18-04-30	90.0	84.0	74.0	69.0	64.8	61.0	57.9	55.5	51.3	48.0	45.3	42.5
22-05-31	84.0	81.0	66.0	54.0	43.2	36.0	30.9	27.0	24.0	21.6	19.6	18.0
03-07-33	66.0	63.0	60.0	50.3	41.4	35.5	30.4	26.6	23.7	21.3	19.4	17.8
11-07-34	114.0	100.5	95.0	85.5	79.8	75.0	70.7	67.1	62.7	57.9	53.5	49.5
22-06-35	51.0	49.5	48.0	46.5	43.8	41.5	38.1	35.6	33.0	30.9	29.2	27.5
11-07-36	93.0	76.5	64.0	57.0	51.6	47.5	43.3	39.4	36.3	33.3	30.8	28.8
03-08-37	72.0	70.5	67.0	65.3	64.2	63.0	61.7	59.6	56.3	52.8	49.6	47.0
20-06-38	96.0	85.5	71.0	63.8	58.2	51.0	45.9	41.3	37.3	33.9	31.1	28.8
07-06-39	138.0	97.5	84.0	74.3	67.8	63.0	57.9	52.9	49.0	45.3	41.7	38.8
29-07-43	87.0	69.0	60.0	53.3	49.2	46.0	43.7	40.9	38.3	35.4	32.7	30.3
10-06-44	48.0	40.5	37.0	35.3	32.4	29.5	27.4	25.5	24.0	22.8	21.5	20.3
21-04-46	144.0	102.0	84.0	72.0	58.8	50.0	43.3	38.3	34.3	31.2	28.6	26.3
13-06-47	72.0	66.0	59.0	54.0	50.4	47.5	43.7	40.1	37.0	34.2	31.9	29.8
05-03-48	48.0	45.0	44.0	42.8	39.0	36.5	33.9	31.5	29.0	27.0	25.4	24.0
05-08-49	108.0	87.0	72.0	61.5	54.6	49.5	45.0	41.3	38.0	35.4	33.3	31.5
01-06-50	57.0	51.0	44.0	40.5	36.6	34.0	31.7	28.9	26.7	24.6	22.9	21.5
25-05-52	180.0	132.0	108.0	95.3	87.6	77.0	69.0	62.6	57.3	52.5	48.3	44.8
24-06-53	72.0	66.0	56.0	48.0	43.2	40.0	37.7	35.6	32.0	29.1	26.7	24.8
11-06-54	126.0	120.0	93.0	76.5	63.0	53.5	46.3	40.9	36.3	32.7	29.7	27.3
13-07-56	42.0	30.0	24.0	21.0	19.2	17.5	16.3	15.4	14.7	13.8	12.8	12.0
11-06-58	72.0	72.0	68.0	64.5	60.0	56.0	51.9	47.6	44.3	41.7	39.5	37.3
08-06-59	126.0	124.5	106.0	95.3	85.2	77.5	69.4	63.0	57.7	53.1	49.4	46.3
20-06-61	60.0	60.0	54.0	47.3	42.6	36.0	31.3	27.8	25.0	22.8	21.0	19.5
08-07-62	60.0	60.0	60.0	60.0	57.6	53.0	49.7	47.3	44.7	41.4	38.2	35.5
11-08-63	75.0	66.0	57.0	49.5	42.6	37.0	33.0	30.0	27.7	25.8	24.0	22.5
07-06-64	60.0	60.0	53.0	47.3	43.2	39.0	35.6	32.6	30.3	28.5	27.0	25.5
03-10-67	75.0	67.5	55.0	48.8	44.4	40.5	37.7	35.6	33.7	32.1	30.5	29.3
14-05-70	93.0	90.0	88.0	81.0	75.6	68.5	63.4	58.9	53.3	48.3	44.2	40.8
18-04-73	81.0	79.5	73.0	64.5	58.8	52.5	48.0	44.3	40.3	36.9	33.8	31.0
20-06-75	114.0	111.0	104.0	96.0	83.4	74.0	67.3	61.9	56.0	51.0	46.6	43.0
22-09-78	84.0	72.0	66.0	62.3	59.4	54.5	49.7	45.8	42.7	39.9	37.4	35.0
01-06-80	84.0	72.0	66.0	61.5	57.0	52.5	49.3	46.9	43.3	40.2	37.6	35.5
24-04-81	150.0	135.0	120.0	109.5	97.2	87.0	78.9	72.8	67.7	63.3	58.6	54.0
21-04-82	120.0	96.0	84.0	75.0	68.4	60.0	52.3	46.5	41.7	37.8	34.4	31.5
22-06-83	90.0	81.0	74.0	63.0	52.8	45.0	39.0	34.5	31.0	28.2	25.9	23.8
14-05-84	60.0	60.0	58.0	48.0	40.8	35.0	30.9	27.4	24.3	21.9	19.9	18.3
18-06-85	60.0	60.0	42.0	32.3	25.8	21.5	18.4	16.1	14.3	12.9	11.7	10.8
02-05-86	102.0	81.0	69.0	61.5	52.2	45.0	39.9	36.0	32.7	30.0	27.3	25.0
21-08-87	51.0	46.5	43.0	41.3	39.0	35.0	31.7	29.3	27.0	24.9	23.2	21.5
09-06-88	60.0	60.0	54.0	45.0	38.4	32.0	27.4	24.0	21.3	19.2	17.5	16.0
24-05-90	144.0	112.5	95.0	86.3	74.4	62.5	53.6	46.9	41.7	37.5	34.1	31.3
05-02-91	72.0	63.0	54.0	49.5	46.2	43.5	40.7	38.6	37.0	35.7	34.1	32.8
02-06-92	60.0	55.5	49.0	43.5	38.4	35.0	32.1	30.0	28.0	26.1	24.3	22.5
26-03-96	180.0	132.0	115.0	102.8	93.6	85.0	78.9	71.3	64.7	59.4	54.8	50.8
22-06-97	114.0	88.5	77.0	64.5	55.8	49.5	44.1	38.6	34.3	30.9	28.1	25.8
10-09-98	69.0	55.5	47.0	39.0	33.0	29.0	26.1	24.0	22.0	20.1	18.5	17.0
12-07-99	56.4	55.2	46.4	42.0	39.1	36.8	34.6	33.0	31.6	30.4	29.0	27.7
07-05-00	69.6	61.8	58.0	54.9	51.8	46.6	41.3	36.5	32.7	29.5	26.9	24.7
14-10-01	66.0	62.4	55.2	48.0	43.4	40.0	36.3	33.5	30.9	28.8	27.1	25.5
05-06-02	105.0	103.5	95.0	83.3	75.6	66.5	59.6	52.9	47.3	42.7	38.9	35.8

Intensidad (mm/h)

Tabla 3. Intensidades máximas, ordenadas de mayor a menor, con sus respectivos períodos de retorno, para las tormentas registradas en la ciudad de Xalapa, Veracruz.

N	T	Duración (min)											
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
1	54.0000	180.0	135.0	120.0	109.5	97.2	87.0	78.9	72.8	67.7	63.3	58.6	54.0
2	27.0000	180.0	132.0	115.0	102.8	93.6	85.0	78.9	71.3	64.7	59.4	54.8	50.8
3	18.0000	150.0	132.0	108.0	96.0	87.6	77.5	70.7	67.1	62.7	57.9	53.5	49.5
4	13.5000	144.0	124.5	106.0	95.3	85.2	77.0	69.4	63.0	57.7	53.1	49.6	47.0
5	10.8000	144.0	120.0	104.0	95.3	83.4	75.0	69.0	62.6	57.3	52.8	49.4	46.3
6	9.0000	138.0	112.5	95.0	86.3	79.8	74.0	67.3	61.9	56.3	52.5	48.3	44.8
7	7.7143	126.0	111.0	95.0	85.5	75.6	68.5	63.4	59.6	56.0	51.0	46.6	43.0
8	6.7500	126.0	103.5	95.0	83.3	75.6	66.5	61.7	58.9	53.3	48.3	45.3	42.5
9	6.0000	120.0	102.0	93.0	81.0	74.4	63.0	59.6	55.5	51.3	48.0	44.2	40.8
10	5.4000	114.0	100.5	88.0	76.5	68.4	63.0	57.9	52.9	49.0	45.3	41.7	38.8
11	4.9091	114.0	97.5	84.0	75.0	67.8	62.5	57.9	52.9	47.3	42.7	39.5	37.3
12	4.5000	114.0	96.0	84.0	74.3	64.8	61.0	53.6	47.6	44.7	41.7	38.9	37.0
13	4.1538	108.0	90.0	84.0	72.0	64.2	60.0	52.3	47.3	44.3	41.4	38.5	35.8
14	3.8571	105.0	88.5	77.0	69.0	63.0	56.0	51.9	46.9	44.0	40.8	38.2	35.8
15	3.6000	102.0	87.0	74.0	65.3	60.0	54.5	49.7	46.9	43.3	40.2	38.2	35.5
16	3.3750	96.0	85.5	74.0	64.5	59.4	53.5	49.7	46.5	42.7	39.9	37.6	35.5
17	3.1765	93.0	84.0	73.0	64.5	58.8	53.0	49.3	46.5	41.7	39.9	37.4	35.0
18	3.0000	93.0	81.0	72.0	64.5	58.8	52.5	48.4	45.8	41.7	37.8	34.4	32.8
19	2.8421	90.0	81.0	71.0	63.8	58.2	52.5	48.0	44.3	41.3	37.5	34.1	31.5
20	2.7000	90.0	81.0	69.0	63.0	57.6	51.0	46.3	43.1	40.3	36.9	34.1	31.5
21	2.5714	87.0	79.5	68.0	62.3	57.0	50.5	46.3	42.8	39.3	36.3	33.8	31.5
22	2.4545	84.0	76.5	67.0	61.5	55.8	50.0	45.9	41.3	38.3	35.7	33.8	31.3
23	2.3478	84.0	72.0	66.0	61.5	54.6	49.5	45.0	41.3	38.0	35.4	33.3	31.0
24	2.2500	84.0	72.0	66.0	61.5	53.4	49.5	45.0	40.9	37.3	35.4	32.7	30.3
25	2.1600	84.0	72.0	66.0	60.0	53.4	49.5	44.1	40.9	37.0	34.2	31.9	29.8
26	2.0769	81.0	70.5	64.0	57.0	52.8	47.5	43.7	40.1	37.0	33.9	31.1	29.3
27	2.0000	75.0	70.5	62.0	57.0	52.2	47.5	43.7	39.4	36.3	33.3	30.8	28.8
28	1.9286	75.0	69.0	61.0	57.0	51.8	47.5	43.3	38.6	36.3	32.7	30.5	28.8
29	1.8621	72.0	67.5	60.0	54.9	51.6	46.6	43.3	38.6	34.3	32.1	29.7	27.7
30	1.8000	72.0	66.0	60.0	54.8	50.4	46.0	41.3	38.3	34.3	31.2	29.2	27.5
31	1.7419	72.0	66.0	60.0	54.0	50.4	45.0	40.7	36.5	33.7	30.9	29.0	27.3
32	1.6875	72.0	66.0	59.0	54.0	49.2	45.0	39.9	36.0	33.0	30.9	28.6	26.3
33	1.6364	72.0	64.5	58.0	53.3	46.2	43.5	39.0	35.6	32.7	30.4	28.1	25.8
34	1.5882	69.6	63.0	58.0	50.3	44.4	41.5	38.1	35.6	32.7	30.0	27.3	25.5
35	1.5429	69.0	63.0	58.0	49.5	43.8	40.5	37.7	35.6	32.0	29.5	27.1	25.5
36	1.5000	66.0	62.4	57.0	49.5	43.4	40.0	37.7	34.5	31.6	29.1	27.0	25.0
37	1.4595	66.0	61.8	56.0	48.8	43.2	40.0	36.3	33.5	31.0	28.8	26.9	24.8
38	1.4211	66.0	60.0	55.2	48.0	43.2	39.0	35.6	33.0	30.9	28.5	26.7	24.7
39	1.3846	60.0	60.0	55.0	48.0	43.2	37.0	34.6	32.6	30.3	28.2	25.9	24.0
40	1.3500	60.0	60.0	54.0	48.0	42.6	36.8	33.9	31.5	29.0	27.0	25.4	23.8
41	1.3171	60.0	60.0	54.0	47.3	42.6	36.5	33.0	30.0	28.0	26.1	24.3	22.5
42	1.2857	60.0	60.0	54.0	47.3	41.4	36.0	32.1	30.0	27.7	25.8	24.0	22.5
43	1.2558	60.0	60.0	53.0	46.5	40.8	36.0	31.7	29.3	27.0	24.9	23.2	21.5
44	1.2273	60.0	58.5	49.0	45.0	39.1	35.5	31.7	28.9	26.7	24.6	22.9	21.5
45	1.2000	60.0	55.5	48.0	43.5	39.0	35.0	31.3	27.8	25.0	22.8	21.5	20.3
46	1.1739	60.0	55.5	47.0	42.8	39.0	35.0	30.9	27.4	24.3	22.8	21.0	19.5
47	1.1489	57.0	55.2	46.4	42.0	38.4	35.0	30.9	27.0	24.0	21.9	19.9	18.3
48	1.1250	56.4	51.0	44.0	41.3	38.4	34.0	30.4	26.6	24.0	21.6	19.6	18.0
49	1.1020	51.0	49.5	44.0	40.5	36.6	32.0	27.4	25.5	23.7	21.3	19.4	17.8
50	1.0800	51.0	46.5	43.0	39.0	33.0	29.5	27.4	24.0	22.0	20.1	18.5	17.0
51	1.0588	48.0	45.0	42.0	35.3	32.4	29.0	26.1	24.0	21.3	19.2	17.5	16.0
52	1.0385	48.0	40.5	37.0	32.3	25.8	21.5	18.4	16.1	14.7	13.8	12.8	12.0
53	1.0189	42.0	30.0	24.0	21.0	19.2	17.5	16.3	15.4	14.3	12.9	11.7	10.8

Intensidad (mm/h)

Tabla 4. Parámetros de las ecuaciones IDT ajustadas a registros de precipitación de la ciudad de Xalapa, Veracruz.

Ecuación	λ	θ	ψ	η	R^2	Error estándar de estimación
$i = \frac{\lambda}{d^\eta}$	269.876	-----	-----	0.446	0.473	18.7
$i = \frac{\lambda}{d + \theta}$	5362.611	50.607	-----	-----	0.491	17.8
$i = \frac{\lambda}{(d + \theta)^\eta}$	203548.7	108.451	-----	1.625	0.493	17.8
$i = \frac{\lambda T^\psi}{d^\eta}$	174.603	-----	0.275	0.394	0.904	7.8
$i = \frac{\lambda T^\psi}{(d + \theta)^\eta}$	120.794	1.388	0.274	1.378	0.934	6.5
$i = \frac{\lambda}{d^\eta + \theta}$	98.655	1.014	-----	1.175	0.493	17.8
$i = \frac{\lambda T^\psi}{d^\eta + \theta}$	70.218	-----	0.274	1.12	0.934	6.5
$i = \lambda \left\{ \frac{\psi - \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right]}{(d + \theta)^\eta} \right\}$	12046.41	82.71	3.036	1.368	0.988	2.7

Recepción del manuscrito: 17 de junio, 2004

Recepción del manuscrito corregido: 17 de agosto, 2004

Aceptación del manuscrito: 18 de agosto, 2004