

Ajuste de funciones de distribución de probabilidad a la precipitación máxima diaria de la cuenca El Salto, Durango

Fitting probability distribution functions to the maximum daily precipitation of the El Salto Durango basin

Recepción del artículo: 24/03/2026 • Aceptación para publicación: 26/04/2026 • Publicación: 01/05/2026

Sacramento Corral Rivas

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7624-0623>

Erik Orlando Luna Robles

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5133-0403>

José Encarnación Lujan Soto

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9427-1909>

Silvia Janeth Bejar Pulido*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5163-704X>

Instituto Tecnológico de El Salto. El Salto, Pueblo Nuevo, Durango, México.

*Autor para correspondencia:
siljan2411@gmail.com

Resumen

La caracterización espacio temporal de la precipitación es importante para actividades productivas y la infraestructura en una cuenca; sin embargo, los eventos extremos representan un riesgo social; siendo los modelos probabilísticos clave para planear acciones de mitigación con antelación. El objetivo fue ajustar *funciones de distribución de probabilidad (FDP)* para determinar la *precipitación máxima probable (PMP)* asociado a diferentes periodos de retorno, empleando los registros de precipitación del periodo de 1963 a 2023. Gumbel resulto ser la *FDP* más efectiva. La lámina de lluvia de diseño osciló entre 70 (T: 2 años) y 285 (T: 10, 000 años) mm. Las curvas de *intensidad–duración–período (IDF)* de retorno desarrolladas con el método de Bell Modificado para una duración de 120 minutos indican que las intensidades más altas ocurren en los primeros 15 minutos. Los hietogramas de precipitación revelan una distribución temporal asimétrica con un pico máximo alrededor de los 40 minutos. La PMP por el método de Hershfield (144.2 mm) fue cercana al método probabilístico (159 mm, T: 60 años). La estimación de la precipitación de diseño resulta importante para su uso en los modelos de lluvia – escurrimiento para las cuencas hidrológicas no aforadas en esta región.

Palabras clave: Lluvia de diseño, FDP Gumbel, modelos, período de retorno, curvas IDF.

Abstract

The spatiotemporal characterization of precipitation is important for productive activities and infrastructure in a basin; however, extreme events represent a social risk; probabilistic models are key to planning mitigation actions in advance. The objective was to adjust *probability distribution functions (FDPs)* to determine the maximum probable precipitation (*PMP*) associated with different return periods, using precipitation records from the period from 1963 to 2023. Gumbel turned out to be the most effective FDP. The design rainsheet ranged from 70 (T: 2 years) to 285 (T: 10, 000 years) mm. Return *intensity–duration–period (IDF)* curves developed with the Modified Bell method for a duration of 120 minutes indicate that the highest intensities occur in the first 15 minutes. Precipitation hyetograms reveal an asymmetrical temporal distribution with a maximum peak around 40 minutes. The PMP by the Hershfield method (144.2 mm) was close to the probabilistic method (159 mm, T: 60 years). The estimation of design precipitation is important for use in rainfall-runoff models for non-gauged hydrological basins in this region.

Keywords: Design rain, FDP Gumbel, models, return period, IDF curves.

Introducción

La precipitación es una de las variables climáticas considerada clave en los procesos naturales, así como para desarrollar las actividades socioeconómicas. En particular el agua precipitada en una cuenca hidrográfica es un recurso importante para los sectores agrícolas, pecuarios y forestales (Suarez *et al.*, 2022); no obstante, cuando se presentan precipitaciones extremas puede provocar serios problemas tales como; inundaciones y deslizamientos de tierra repercutiendo de manera negativa en la infraestructura civil y en las actividades productivas en la parte baja de la cuenca (Bejar *et al.*, 2025).

En este sentido, durante décadas se han desarrollado e implementado modelos estadísticos basados en distribuciones de probabilidad para pronosticar la ocurrencia de precipitaciones bajo diferentes regímenes de intensidad, y duración contemplando aspectos geográficos y climáticos; cuya finalidad es anticipar y responder con las medidas adecuadas para enfrentar estos eventos hidrológicos extremos (Haseeb *et al.*, 2025). Siendo el período de retorno un concepto probabilístico comúnmente aplicado en los estudios hidrológicos, que ha permitido comprender de manera más óptima los procesos hidrológicos complejos en un entorno de cambio climático (Olofintoye *et al.*, 2025). Alam *et al.* (2018) definen el período de retorno como el tiempo promedio entre eventos de la misma magnitud o mayor precipitación; de igual forma señalan que es importante elegir la *función distribución de probabilidad* (FDP) más idónea para una región determinada. Existe una gran variedad de FDP usadas para describir variables hidrometeorológicas, sin embargo, destacan la FDP Gumbel, Log-Pearson III, Pearson III, Log-Normal y Normal en estudios hidrológicos en las cuencas hidrográficas no aforadas en México (Zapata, 2023; Hussein & Kasim, 2024; Olofintoye *et al.*, 2025).

De manera particular en la Sierra Madre Occidental en México los patrones de precipitación están influenciados directamente por los gradientes altitudinales que coloca a los eventos de precipitación bajo la influencia de cambiantes corrientes de vientos alisos; que en conjunto con su orografía resultan en aumentos significativos de humedad en comparación con regiones planas (valles). Además, los efectos directos del Monzón de Norteamérica generan la principal fuente de precipitación anual en los estados de Durango, Chihuahua y Sinaloa. La caracterización de eventos extremos de precipitación asociados a períodos de retorno es una herramienta fundamental para la planificación actividades productivas en una cuenca hidrográfica (agrícola, pecuario y forestal) así como para el desarrollo de infraestructura civil (embalses, puentes, carreteras y obras de desarrollo urbano); ya que en Durango

los fenómenos meteorológicos extremos suelen presentarse con cierta recurrencia; que aunado con su orografía accidentada y problemáticas ambientales tales como fragmentación de ecosistemas, tala excesiva y erosión de las cuencas de abasto de agua maximizan los daños ante eventos climáticos extremos (Bejar *et al.*, 2025).

En este contexto el objetivo de este trabajo fue ajustar FDP para estimar la precipitación de diseño de la cuenca hidrográfica del arroyo El Salto, Durango a partir de los registros de precipitación máxima diaria de 1963 a 2023 de la estación meteorológica de mayor influencia para los períodos de retorno recomendados para obras hidráulicas y cuencas no aforadas (Lima *et al.*, 2021).

Materiales y métodos

Área de estudio

La cuenca hidrográfica del arroyo El Salto, Durango se encuentra en la Región Hidrológica 11 (Presidio - San Pedro) ubicada al sureste del estado de Durango entre las coordenadas geográficas 23° 67' 37.35" N y 23° 78' 85.80" N, 105° 35' 75.45" W y 105° 44' 38.59" W. El vaso de escurrimientos forma parte de la subcuenca El Salto - El Jaral de la cuenca del río Presidio (Dc). Posee una superficie de 44.87 km² con un rango de altitud que oscila entre 2 557 a 2 860 msnm, el relieve evidencia un desnivel bajo (303 m) con una pendiente media de 2.23% (moderadamente inclinado); además, presenta un clima semifrío subhúmedo con lluvias en verano (CEw₂) y templado subhúmedo con lluvias en verano (Cw₂) (Méndez-Gutiérrez *et al.*, 2021). Esta cuenca abastece de agua a la ciudad del mismo nombre (El Salto, Pueblo Nuevo, Durango) considerada la quinta ciudad más poblada a nivel estatal, cuya población corresponde a 26 678 habitantes que representa el 52.04% del total municipal (INEGI, 2021).

Datos

Se utilizaron registros de precipitación máxima diaria para una serie continua mayor a 50 años como lo recomienda Campos (2014) desde el año 1966 a 2023 (58 años) de la estación meteorológica de mayor influencia en el área de estudio (10093 - El Salto, DGE) del Sistema Meteorológico Nacional (SMN, 2024). Es común que, en algunos registros mensuales de las estaciones pluviométricas se encuentren incompletos, ya sea por ausencia del operador, desperfectos en los equipos de medición, por interrupciones, etc., lo que limita su uso en estudios hidrometeorológicos (Campos, 2015). Por ello, en este estudio los datos faltantes de PMD fueron obtenidos usando el método del inverso de la distancia al cuadrado o U.S National Weather Service (US-NWS) (Valencia-González *et al.*, 2022) de las estaciones más cercanas.

Con propósito de garantizar la consistencia interna y confiabilidad en los análisis y resultados esperados, se realizó un análisis de homogeneidad a la serie de registros de PMD. Este procedimiento es fundamental en estudios hidrológicos, ya que datos no homogéneos pueden reflejar discontinuidades y modificaciones en el entorno o errores de registro, lo cual podría sesgar los resultados esperados (WMO, 2017). Para probar la hipótesis de homogeneidad se aplicó la prueba *t* de Student, la cual permite identificar la existencia de rupturas significativas en la media de la serie temporal. Esta prueba se utilizó por su simplicidad, sensibilidad a cambios abruptos y amplia aceptación en estudios hidrometeorológicos nacionales e internacionales (Aguilar *et al.*, 2020). En este caso los datos resultaron ser homogéneos, ya que el valor del estadístico fue menor que el valor del percentil de la distribución t_d de Student.

Análisis de frecuencias de precipitación

El análisis de frecuencias de precipitación nos permite determinar la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos al relacionar su magnitud con la frecuencia mediante el uso de FDP. Campos (2016), menciona que, para realizar un análisis de frecuencias, se tiene que disponer de una serie histórica de registros de PMD para cierta duración, y con ello estimar predicciones de tal variable aleatoria asociada a una probabilidad de excedencia, cuyo recíproco es el llamado periodo de retorno (*T*), o intervalo promedio en años entre la ocurrencia de un evento igual o mayor (El-Bagoury *et al.*, 2024). Para representar la probabilidad de ocurrencia de la serie de PMD y con el fin de relacionar la magnitud y la frecuencia, en este trabajo se evaluaron siete FDP de más amplia utilización en estudios hidrológicos (Montes-Pajuelo *et al.*, 2024). La expresión de las PDP se presenta en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Funciones de distribución de probabilidad ajustadas a la precipitación máxima diaria.

| Nombre | FDP | Rango | Ecuación |
|----------------------|---|------------------------------|----------|
| Normal | $F(x) = \frac{1}{\beta\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\alpha}{\beta}\right)^2\right] dx$ | $-\infty \leq x \leq \infty$ | 1 |
| Log-Normal | $F(x) = \frac{1}{\beta x \sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \alpha}{\beta}\right)^2\right] dx$ | $x > 0$ | 2 |
| Gumbel | $F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\alpha}{\beta}\right)\right]$ | $-\infty \leq x \leq \infty$ | 3 |
| Gamma | $F(x) = \frac{1}{\alpha\Gamma(\beta)} \int_0^x \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\frac{x}{\alpha}\right) dx$ | $x \geq 0$ | 4 |
| Log-Gamma | $F(x) = \frac{1}{\alpha\Gamma(\beta)} \int_0^x \left(\frac{\ln x}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\frac{\ln x}{\alpha}\right) dx$ | $\ln x \geq 0$ | 5 |
| Pearson tipo III | $F(x) = \frac{1}{\alpha\Gamma(\beta)} \int_0^x \left(\frac{x-\delta}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\frac{x-\delta}{\alpha}\right) dx$ | $x \geq \delta$ | 6 |
| Log-Pearson tipo III | $F(x) = \frac{1}{\alpha\Gamma(\beta)} \int_0^x \left(\frac{\ln x - \delta}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\frac{\ln x - \delta}{\alpha}\right) dx$ | $\ln x \geq \delta$ | 7 |

Los parámetros de las FDP fueron estimados mediante el método de momentos ordinarios (MMO) que considera que una estimación adecuada es donde los momentos de la función de densidad de probabilidad alrededor del origen

son iguales a los momentos correspondientes a la información de la muestra (Scasserra *et al.*, 2023). Los parámetros estimados por el MMO son asintóticamente eficientes principalmente en distribuciones asimétricas, las cuales son las más requeridas y empleadas en el campo de la hidrología (Koutsoyiannis, 2004). Debido a la eficiencia y parsimonia de este método, éste se utilizó para estimar los parámetros de las PDF de una forma rápida. El Cuadro 2 presenta las ecuaciones para estimar los parámetros de las FDP evaluadas en este trabajo.

Cuadro 1. Funciones de distribución de probabilidad ajustadas a la precipitación máxima diaria.

| FDP | Escala (α) | Forma (β) | Localización (δ) | Ecuación |
|----------------------|--|--|---|----------|
| Normal | $\mu = \bar{x}$ | $\sigma = S_x$ | -- | 8 |
| Log-Normal | \bar{y} , para $y = \ln x$ | S_y , para $y = \ln x$ | -- | 9 |
| Gumbel | $1/0.779696 \cdot S_x$ | $\bar{x} - 0.450047 \cdot S_x$ | -- | 10 |
| Gamma | $\frac{\bar{x}^2}{S_x^2}$ | $\frac{S_x^2}{\bar{x}}$ | -- | 11 |
| Log-Gamma | $\frac{\bar{y}^2}{S_y^2}$, para $y = \ln x$ | $\frac{S_y^2}{\bar{y}}$, para $y = \ln x$ | -- | 12 |
| Pearson tipo III | $\frac{\sigma y}{2}$ | $\frac{4}{y^2}$ | $\mu - (\alpha \cdot \beta)$ | 13 |
| Log-Pearson tipo III | $\frac{\sigma_y y}{2}$, para $y = \ln x$ | $\frac{4}{y^2}$, para $y = \ln x$ | $\bar{y} - (\alpha_y \cdot \beta_y)$, para $y = \ln x$ | 14 |

Evaluación del desempeño de las FDP

La calidad de ajuste (precisión) de las FDP se evaluó mediante los estadísticos siguientes; la raíz del error medio cuadrático (REMC), sesgo medio (SM) y error medio absoluto (EMA) que miden la precisión del modelo, las desviaciones de los valores reales y predichos y evita la compensación de las desviaciones, respectivamente. La expresión de estos estadísticos es la siguiente (Getahun *et al.*, 2026).

$$REMC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F(x_i) - \hat{F}(x_i))^2}{n-p}} \tag{15}$$

$$SM = \frac{\sum_{i=1}^n (F(x_i) - \hat{F}(x_i))}{n} \tag{16}$$

$$EMA = \frac{\sum_{i=1}^n |F(x_i) - \hat{F}(x_i)|}{n} \tag{17}$$

donde: $F(x_i)$ $\hat{F}(x_i)$ = frecuencia observada (valor real) y estimada, respectivamente; n = número de observaciones; p = número de parámetros de la FDP.

Corrección de registros por intervalo fijo de observación

De acuerdo con Pöschmann *et al.* (2023) cuando se realizan lecturas de precipitación en único y fijo intervalo de observación, es necesario realizar una corrección de valores a través del factor por intervalo fijo de observación, dicho factor representa un incremento del 13% de los valores tomados en campo. Por tanto, la corrección permite obtener la lluvia máxima de 24 horas de determinado periodo de retorno.

Período de retorno

Para realizar el análisis de frecuencia se necesitó calcular el intervalo de recurrencia o el periodo de retorno.

Si la variable (x) es igual o mayor que un evento de magnitud , ocurre una vez en años, entonces la probabilidad de ocurrencia $P(X \geq x)$ en un año dado de la variable es:

$$P(x \geq X_T) = \frac{1}{T} \tag{18}$$

$$T = \frac{1}{1 - P(x \geq x_T)} \tag{19}$$

donde: = probabilidad de que ocurra y = periodo de retorno.

Las cantidades de precipitación asociadas con los periodos de retorno de interés no pueden estimarse directamente a partir de un conjunto de datos, por tanto, éstos deben extraerse de los percentiles que corresponden a cada T específico de una FDP ajustada. Se utilizaron los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100, 200, 500, 1000, 5000 y 10000 años para estimar la precipitación de diseño como lo recomienda la CONAGUA para el diseño de obras civiles como embalses y puentes.

Curvas de intensidad, duración y frecuencia

Para conocer la variación de la intensidad y la duración de la precipitación se realizó un análisis de la altura de precipitación a través de las curvas de *intensidad-duración-frecuencia* (IDF) que consiste en medir la frecuencia a cada una de las series de valores máximos de precipitación obtenidos para cada duración. Se utilizaron los valores promedio y el rango de duraciones de $5 \text{ min} \geq d \geq 120 \text{ min}$ y $2 \text{ años} \geq T \geq 10000 \text{ años}$. Las curvas de *precipitación-duración-periodo de retorno* (PDT) e *intensidad-duración-periodo de retorno* (IDT) fueron construidas con el método de Bell-Modificado propuesto por Bell (1969) (ecuación 20) considerando un factor de conectividad de 0.55 para la región y una duración de 120 minutos (Sangüesa *et al.*, 2023).

$$p_T^d = (0.54 d^{0.25} - 0.50) p_{1h}^T \tag{20}$$

donde: p_T^d = precipitación acumulada en una duración determinada y periodo de retorno dado (mm), p_{1h}^T = precipitación máxima acumulada en 1 hora a diferentes periodos de retorno (mm) y d = duración (min).

Hietograma de diseño

Para generar los hietogramas de diseño, se utilizó el método de la tormenta equilibrada (Método del bloque alterno) propuesto por Chow *et al.* (1994) con la finalidad de contribuir a diseñar obras hidráulicas, donde, su aplicación es una forma rápida de hacer una estimación del hietograma de diseño de una tormenta. Para la construcción de un hietograma se debe elegir una curva que relacione la intensidad con la duración, ambas para el periodo de retorno deseado. El hietograma resultante está

formado por bloques de precipitación, con intervalos de tiempo constantes, Δt , de tal forma que la duración total es: $d = n\Delta t$ (Sangüesa *et al.*, 2023).

Precipitación máxima probable

La precipitación máxima probable (PMP) es considerada la mayor cantidad de lluvia físicamente posible que pueda presentarse en la cuenca en un tiempo determinada, siendo una estimación crítica sin riesgo de ser excedida para el diseño de infraestructura civil. Este valor se estimó con el método estadístico de Hershfield (1961), el cual es recomendado su uso cuando se dispone de series de PMD de más de veinte años, es particularmente útil para hacer estimaciones rápidas y donde otros datos meteorológicos no existen o son muy escasos (Sarkar y Maity, 2020). La expresión es la siguiente:

$$PMP = \bar{x}_n \text{ajustada} + k_m S_n \text{ajustada} \tag{21}$$

donde: PMP = Precipitación máxima probable diaria (mm), \bar{x}_n, S_n = media y desviación estándar ajustadas, respectivamente, k_m factor de frecuencia (adimensional).

Resultados

Desempeño de las funciones de distribución de probabilidad

El Cuadro 3 presenta los valores de los estadísticos usados para evaluar la precisión de las FDP, se observa que la FDP Gumbel fue más precisa al presentar los valores más bajos de la REMC y EMA, seguida por las FDP Log-Pearson tipo III y Pearson tipo III. En contraste, las FDP Log-Normal y Normal resultaron tener bajo desempeño, puesto que los valores de la REMC y EMA fueron los más altos. Al analizar el valor del sesgo medio, la FDP Gumbel se encuentra dentro del grupo con los valores más cercanos a cero, además, debido al hecho que solo presenta dos parámetros (parsimonia) esta función fue seleccionada para estimar la precipitación de diseño para los diferentes periodos de retorno considerados en este estudio.

Cuadro 3. Valores de los estadísticos de bondad de ajuste utilizados para evaluar las FDP.

| FDP | REMC | SM | EMA | REMC (%) | EMA (%) | SM (%) |
|----------------------|------|------|------|----------|---------|--------|
| Normal | 6.82 | 0.16 | 0.16 | 9.08 | 0.21 | 0.23 |
| Log-Normal | 3.93 | 0.29 | 0.29 | 5.23 | 0.39 | 0.42 |
| Pearson tipo III | 4.00 | 0.12 | 0.12 | 5.33 | 0.17 | 0.18 |
| Log-Pearson tipo III | 3.97 | 0.15 | 0.15 | 5.29 | 0.20 | 0.21 |
| Gumbel | 3.67 | 0.18 | 0.18 | 4.89 | 0.23 | 0.25 |
| Gamma | 4.06 | 0.21 | 0.21 | 5.40 | 0.28 | 0.31 |
| Log-Gamma | 3.97 | 0.25 | 0.25 | 5.28 | 0.33 | 0.35 |

En general, la altura precipitación de diseño para cualquier duración, periodo de retorno y área de la cuenca se obtuvo a partir del percentil de la función FDP Gumbel con la expresión siguiente.

$$x = \beta - \frac{1}{\alpha} \cdot \ln\left(-\ln\left(\frac{1}{F(x)}\right)\right) \quad 22$$

donde: x = variable aleatoria (precipitación de diseño, mm), β = parámetro de forma (62.083), α = parámetro de escala (0.042) y $F(x)$ = función de distribución de probabilidad.

Puesto que la magnitud de la precipitación de diseño está en función a los periodos de retorno propuestos, se sabe que la probabilidad de ocurrencia de un evento determinado es recíproco al periodo de retorno. Por lo que al modificar la variable $F(x)$ por T , se puede estimar la lluvia de diseño para cada T deseado. Para los periodos de retorno de 5 a 500 años se utilizó la ecuación anterior y para establecer predicciones de altos periodos retorno ($T > 500$) se realizó una extrapolación logarítmica lineal utilizando regresión lineal, obteniendo los valores de los parámetros de la pendiente e intercepto como se muestra en la figura siguiente.

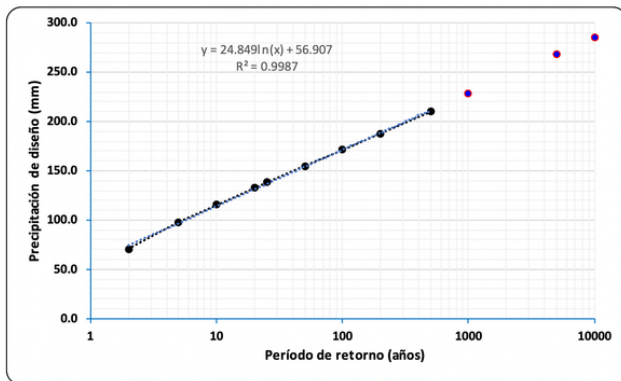


Figura 1. Precipitación de diseño para la cuenca arroyo El Salto.

Hietogramas de diseño

La Figura 2 muestra las curvas de precipitación acumuladas (mm) para las diferentes duraciones y periodos de retorno (PDT) generadas con la ecuación de Bell. Las curvas muestran una relación directa entre la cantidad de lluvia y el tiempo del evento (mayor duración = mayor precipitación). Las curvas permiten observar una marcada diferencia entre los periodos de retorno para las precipitaciones cortas o ligeras (denominadas lluvias convectivas donde la precipitación suele ser intensas y breves); mientras que al incrementar la duración del evento la lámina acumulada incrementa de forma no lineal lo cual es un comportamiento normal de las tormentas de diseño.

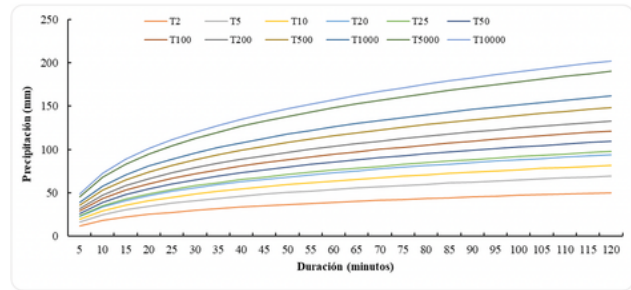


Figura 2. Curvas de precipitación-duración-periodo de retorno para la cuenca arroyo El Salto.

En la Figura 3 se ilustran las curvas de intensidad-duración-periodo de retorno (IDT), calculadas a razón de la lámina de precipitación entre su duración en mm/hora. Específicamente se puede observar que las intensidades de precipitación son muy altas en el rango de 5 a 10 minutos, posteriormente disminuyen conforme aumenta la duración. Lo que significa que los eventos de precipitación cortos pueden concentrar mucha lluvia en poco tiempo. Por otra parte, las curvas para largos periodos de retorno (1000, 5000 y 10 000 años) indican la ocurrencia de eventos más extremos y menos frecuentes.

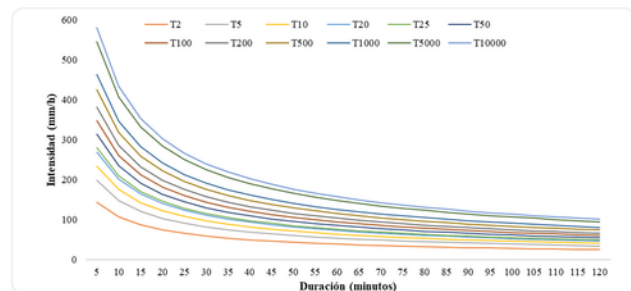


Figura 3. Curvas de intensidad-duración-periodo de retorno para la estación pluviométrica El Salto.

Los hietogramas de diseño elaborados con el método de los bloques alternos se presentan en el Cuadro 4. En general, todos los periodos de retorno muestran una distribución temporal asimétrica con un pico máximo alrededor de los 40 minutos, lo que puede interpretarse como precipitaciones intensas en un intervalo corto. Esta información es muy útil como insumo para caracterizar la distribución temporal de la lluvia en los modelos hidrológicos lluvia - escurrimiento.

Precipitación máxima probable

La lamina de PMP fue estimada en 144.22 mm, la cual es muy cercana a la precipitación de diseño para un periodo de retorno de 58 años (158.1 mm) con el método probabilístico. En general, esta lámina representa la cantidad máxima de lluvia que es físicamente posible se presente en la cuenca en un periodo de 24 horas. Este valor incluye la corrección por intervalo fijo y única observación, tal como lo recomienda Weiss (1964).

Cuadro 4. Hietogramas de diseño de la cuenca hidrológica arroyo El Salto.

| Duración (min) | Período de retorno (T, años) | | | | | | | | | | | |
|-------------------|------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| | 2 | 5 | 10 | 20 | 25 | 50 | 100 | 200 | 500 | 1000 | 5000 | 10000 |
| 5 | 1.1 | 1.5 | 1.8 | 2.1 | 2.2 | 2.4 | 2.7 | 3.0 | 3.3 | 3.6 | 4.2 | 4.5 |
| 10 | 1.3 | 1.7 | 2.1 | 2.4 | 2.5 | 2.8 | 3.0 | 3.3 | 3.7 | 4.1 | 4.8 | 5.1 |
| 15 | 1.5 | 2.0 | 2.4 | 2.7 | 2.8 | 3.2 | 3.5 | 3.9 | 4.3 | 4.7 | 5.5 | 5.9 |
| 20 | 1.7 | 2.4 | 2.8 | 3.3 | 3.4 | 3.8 | 4.2 | 4.6 | 5.1 | 5.6 | 6.6 | 7.0 |
| 25 | 2.2 | 3.0 | 3.6 | 4.1 | 4.3 | 4.8 | 5.3 | 5.8 | 6.5 | 7.1 | 8.3 | 8.9 |
| 30 | 3.1 | 4.3 | 5.0 | 5.8 | 6.0 | 6.7 | 7.5 | 8.2 | 9.1 | 10.0 | 11.7 | 12.5 |
| 35 | 5.9 | 8.2 | 9.7 | 11.1 | 11.6 | 13.0 | 14.4 | 15.8 | 17.6 | 19.2 | 22.6 | 24.0 |
| 40 | 12.0 | 16.5 | 19.5 | 22.4 | 23.4 | 26.2 | 29.0 | 31.8 | 35.5 | 38.7 | 45.4 | 48.3 |
| 45 | 4.0 | 5.5 | 6.5 | 7.5 | 7.8 | 8.7 | 9.7 | 10.6 | 11.8 | 12.9 | 15.1 | 16.1 |
| 50 | 2.6 | 3.5 | 4.2 | 4.8 | 5.0 | 5.6 | 6.2 | 6.8 | 7.6 | 8.2 | 9.7 | 10.3 |
| 55 | 1.9 | 2.7 | 3.2 | 3.6 | 3.8 | 4.2 | 4.7 | 5.1 | 5.7 | 6.2 | 7.3 | 7.8 |
| 60 | 1.6 | 2.2 | 2.6 | 3.0 | 3.1 | 3.5 | 3.8 | 4.2 | 4.7 | 5.1 | 6.0 | 6.4 |
| 65 | 1.3 | 1.9 | 2.2 | 2.5 | 2.6 | 2.9 | 3.3 | 3.6 | 4.0 | 4.4 | 5.1 | 5.4 |
| 70 | 1.2 | 1.6 | 1.9 | 2.2 | 2.3 | 2.6 | 2.9 | 3.1 | 3.5 | 3.8 | 4.5 | 4.8 |
| 75 | 1.1 | 1.5 | 1.7 | 2.0 | 2.1 | 2.3 | 2.6 | 2.8 | 3.1 | 3.4 | 4.0 | 4.3 |
| 80 | 1.0 | 1.4 | 1.6 | 1.9 | 2.0 | 2.2 | 2.4 | 2.7 | 3.0 | 3.2 | 3.8 | 4.1 |
| 85 | 1.0 | 1.3 | 1.6 | 1.8 | 1.9 | 2.1 | 2.3 | 2.5 | 2.8 | 3.1 | 3.6 | 3.9 |
| 90 | 0.9 | 1.3 | 1.5 | 1.7 | 1.8 | 2.0 | 2.2 | 2.4 | 2.7 | 3.0 | 3.5 | 3.7 |
| 95 | 0.9 | 1.2 | 1.4 | 1.7 | 1.7 | 1.9 | 2.1 | 2.3 | 2.6 | 2.8 | 3.3 | 3.6 |
| 100 | 0.8 | 1.2 | 1.4 | 1.6 | 1.7 | 1.9 | 2.1 | 2.2 | 2.5 | 2.7 | 3.2 | 3.4 |
| 105 | 0.8 | 1.1 | 1.3 | 1.5 | 1.6 | 1.8 | 2.0 | 2.2 | 2.4 | 2.6 | 3.1 | 3.3 |
| 110 | 0.8 | 1.1 | 1.3 | 1.5 | 1.5 | 1.7 | 1.9 | 2.1 | 2.3 | 2.5 | 3.0 | 3.2 |
| 115 | 0.8 | 1.1 | 1.2 | 1.4 | 1.5 | 1.7 | 1.8 | 2.0 | 2.3 | 2.5 | 2.9 | 3.1 |
| 120 | 0.7 | 1.0 | 1.2 | 1.4 | 1.4 | 1.6 | 1.8 | 2.0 | 2.2 | 2.4 | 2.8 | 3.0 |

Gráficamente en la figura 4 se muestran los hietogramas de diseño para 10, 100, 500 y 1000 años de período de retorno considerando un intervalo de 5 y una duración de 120 minutos.

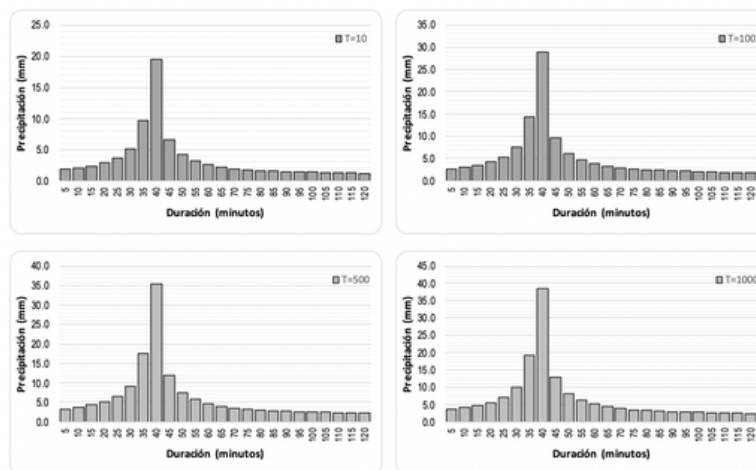


Figura 4. Hietograma de diseño (10, 100, 500, 1000 años de periodo de retorno).

Discusión

La serie de registros de precipitación máxima diaria usada en este trabajo resultó idónea para caracterizar la distribución geoespacial del régimen de precipitación en la cuenca arroyo El Salto, coincidiendo con Alam *et al.* (2018) quienes señalan que la fuente de datos usada en los estudios hidrometeorológicos es el principal insumo para lograr estimaciones precisas y confiables.

Los resultados del análisis de frecuencia de precipitación muestran un ajuste favorable de la FDP Gumbel frente a las otras evaluadas. La elección de la FDP Gumbel para series de máximas sigue siendo habitual en hidrología debido a su simplicidad y razonable desempeño en muchos conjuntos de datos hidrológicos; no obstante, estudios recientes advierten sobre la necesidad de validar su uso localmente y compararlo con distribuciones más flexibles cuando se requiere estimaciones en colas extremas o para extrapolaciones a muy largos períodos de retorno (Anghel, 2024). Además, en trabajos similares como Manke *et al.* (2022) y Olofintoye *et al.* (2025) recomiendan su uso por su simplicidad en su ajuste y uso práctico en cuencas no aforadas menores a mil kilómetros cuadrados. Sin embargo, considerando la heterogeneidad en los patrones de distribución de la precipitación en la Sierra Madre Occidental no es recomendable apropiarse de una sola FDP, sino que es importante evaluar diversas FDP para cada región en particular.

En este trabajo, las curvas IDF se construyeron utilizando el método de Bell modificado, siendo un método adecuado para zonas donde predominan eventos de tormentas de corta duración. En la mayoría de los estudios toman en cuenta el factor de convectividad estimado por Baeza (2007). Un ejemplo de ello es la investigación de Domínguez *et al.* (2020), donde, presentan un análisis regional de las lluvias diarias máximas anuales registradas en más de 2000 estaciones de la república mexicana. Sin embargo, recientemente la literatura documenta cambios observados y proyectados en la intensidad de las precipitaciones extremas y plantea procedimientos para actualizar curvas IDF usando escenarios climáticos o ajustes empíricos, por ejemplo, la metodología propuesta por Martel *et al.* (2021). Las curvas IDF desarrolladas revelan eventos de tormentas de corta duración, menores a 2 horas; sin embargo, diversos estudios hidrológicos a nivel global y regional señalan que el diseño de las curvas IDF está en función de los datos disponibles, el tipo de cuenca, y el comportamiento de las precipitaciones (Lanciotti *et al.*, 2022; Noboa *et al.*, 2025). Aunado a lo anterior, Yan *et al.*, (2023) indican que las curvas IDF pueden estar influenciadas por el tipo de zona evaluada en lo que refiere al nivel de urbanización o ruralidad; ya que en zonas urbanas la presencia de infraestructura y el desarrollo de ciudades influyen en los

patrones precipitación extrema por lo que el método de Bell requiere ajustes para lograr estimaciones más precisas, mientras que, en áreas rurales con cobertura forestal, donde las tormentas son más distribuidas espacialmente la metodología empleada por Bell suele ser más consistente.

Sobre la estimación de la PMP, el método estadístico de Hershfield es uno de los más utilizados a nivel mundial en cuencas hidrográficas, como lo sugieren estudios en Europa y Norteamérica (OMM, 2011) y Sarkar y Maity (2020). Asimismo, Campos (2014) hace mención que este método es ampliamente utilizado en México y otras partes de América. Hoy en día hay iniciativas recientes que indican que los métodos tradicionales para estimar la PMP están siendo revisados para tener en cuenta un clima cambiante y nuevas fuentes de datos apuntan a incorporar variables orográficas con enfoques físicamente basados para mejorar la representatividad de la PMP bajo escenarios de cambio climático (NOAA Physical Sciences Laboratory [PSL], 2025).

Conclusión

El monitoreo a largo plazo de los patrones de lluvia es clave para implementar medidas para el equilibrio ecológico y social en las cuencas de abasto de agua. Los resultados indicaron que la FDP Gumbel presentó el mejor desempeño para estimar la precipitación de diseño de la cuenca. Las curvas de IDF muestran un comportamiento típico de regiones donde predominan tormentas convectivas: intensidades muy altas para duraciones cortas, por tanto, los hietogramas desarrollados servirán de mucha ayuda en los estudios hidrológicos para distribuir la cantidad de lluvia en el tiempo en los modelos que transforma la lluvia en escurrimiento de la cuenca. En este sentido, los hietogramas pueden contribuir en la toma de decisiones orientadas al manejo del recurso hídrico, el uso del suelo, desarrollo de infraestructura civil y prevención de desastres.

Cabe mencionar, que en los últimos años se ha observado un marcado aumento en la frecuencia e intensidad de fenómenos naturales, como inundaciones y sequías, alterando la disponibilidad y el suministro de agua. Por ello, los estudios hidrológicos son una herramienta indispensable para comprender y gestionar los sistemas hídricos, permitiendo predecir la escorrentía y diseñar estrategias de mitigación de inundaciones.

Literatura citada

- Alam, M. A., K. Emura, C. Farnham & J. Yuan. (2018). Best-fit probability distributions and return periods for maximum monthly rainfall in Bangladesh. *Climate*, 6(1), 9. <https://doi.org/10.3390/cli6010009>
- Baeza, R. C. (2007). *Estimación regional de factores de convectividad para el cálculo de las relaciones intensidad-duración-frecuencia*. (Tesis de Maestría). México, DF: Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, UNAM. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/2060/baezaramirez.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [consultado 05 Febrero 2026].
- Bejar, P.S.J., R.E.O. Luna, S.I. Cantú, G. T. G. Domínguez & S.J.E. Lujan. (2025). Caracterización y análisis de riesgo de taludes carreteros en el sur de Durango, México. *BUIYYA TIERRA*, 2(4), 69-87. <https://doi.org/10.62457/pvr64751>
- Campos, D.F. (2016). Modelo probabilístico simple para análisis de frecuencias en registros hidrológicos extremos con tendencia. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(3), 171-186. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v7n3/2007-2422-tca-7-03-00171.pdf>
- Chow, V.T., D.R. Maidment & L.W. Mays. (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill. Santafé de Bogotá, Colombia. 584 pp.
- Domínguez, R., E. Carrizosa, G.E. Fuentes, M.L. Arganis, J. Osnaya & A.E. Galván-Torres. (2020). Análisis regional para estimar precipitaciones de diseño en la república mexicana. *Tecnología y ciencias del agua*, 9(1), 5-29. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-01-01>
- El-Bagoury, H. & A. Gad. (2024). Integrated hydrological modeling for watershed analysis, flood prediction, and mitigation using meteorological and morphometric data, SCS-CN, HEC-HMS/RAS, and QGIS. *Water*, 16(2), 356. <https://doi.org/10.3390/w16020356>
- Getahun, A., U.J.P. Raju & G. Yirga. (2026). Statistical analysis of the return period and probability distribution of annual maximum rainfall in southern Ethiopia. *Journal of Water and Climate Change*, 17(2), 403-425. <https://doi.org/10.2166/wcc.2026.307>
- Haseeb, F., S. Ali, N. Ahmed, N. Alarifi. Y.M. Youssef. (2025). Comprehensive probabilistic analysis and practical implications of rainfall distribution in Pakistan. *Atmosphere*, 16(2), 122. <https://doi.org/10.3390/atmos16020122>
- Hershfield, D.M. (1961). Rainfall frequency atlas of the United States. *Technical paper*, 40. https://reduceflooding.com/wp-content/uploads/2018/09/TechnicalPaper_No40.pdf
- Hussein, A. H. & M.N. Kasim. (2024). Utilizing statistical distribution tests to develop rainfall intensity-duration-frequency curves for enhanced hydrological analysis in Kirkuk city, Iraq. *Water Practice & Technology*, 19(11), 4378-4389. <https://doi.org/10.2166/wpt.2024.258>
- Koutsoyiannis, D. (2004). Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: II. Empirical investigation of long rainfall records. *Hydrological Sciences Journal*, 49(4), 1-610. <http://dx.doi.org/10.1623/hysj.49.4.591.54424>
- Lanciotti, S., E. Ridolfi, F. Russo & F. Napolitano. (2022). Intensity-duration-frequency curves in a data-rich era: A review. *Water*, 14(22), 3705. <https://doi.org/10.3390/w14223705>
- Lima, A.O., G.B. Lyra, M.C. Abreu, J.F. Oliveira-Júnior, M. Zeri. & G. Cunha-Zeri. (2021). Extreme rainfall events over Rio de Janeiro State, Brazil: Characterization using probability distribution functions and clustering analysis. *Atmospheric Research*, 247, 105221. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105221>
- Manke, E.B., C.F. Teixeira-Gandra, R.D.C. Damé, A.B. Nunes, M.C.C. Neta & R.M. Karsburg. (2022). Seasonal intensity-duration-frequency relationships for Pelotas, Rio Grande do Sul, Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 26(2), 85-90. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n2p85-90>
- Méndez-Gutiérrez, A.G., S. Corral-Rivas, J.A. Nájera-Luna, F. Cruz-Cobos, & M. Pompa-García. (2021). Análisis morfométrico de la cuenca El Salto, Durango, México. *Terra Latinoamericana*, 39. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.641>
- Montes-Pajuelo, R., A.M. Rodríguez-Pérez, R. López, & C.A. Rodríguez. (2024). Analysis of probability distributions for modelling extreme rainfall events and detecting climate change: Insights from mathematical and statistical methods. *Mathematics*, 12(7), 1093. <https://doi.org/10.3390/math12071093>
- Noboa, J.P.B., N.E.P. Vaca, M.E.L. Caba, & D.A.P. Sarabia. (2025). Generación de Curvas IDF para la Quebrada Las Abras a partir de Regresión Lineal Múltiple y el Método de Talbot. *ASCE MAGAZINE*, 4(3), 685-710. <https://doi.org/10.70577/ASCE/685.710/2025>

- Olofintoye, O.O., F. Alao, A.A. Olanipekun, D.U. Idusuyi, O. Bayode, J.I. Braimah, A.W. Salami, A.M. Ayanshola, S.O. Bilewu, T.S. Abdulkadir, & B.F. Sule. (2025). Best-fit probability distribution models for estimating maximum daily rainfall in Uyo, Nigeria. *Nigerian Journal of Applied Science and Innovative Technology (NiJASIT)*, 1(4), 488–498. https://www.researchgate.net/profile/John-Braimah/publication/399089333_Best-fit_Probability_Distribution_Models_for_Estimating_Maximum_Daily_Rainfall_in_Uyo_Nigeria/links/694e93eaa1fd0179890d1f40/Best-fit-Probability-Distribution-Models-for-Estimating-Maximum-Daily-Rainfall-in-Uyo-Nigeria.pdf
- Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2011). *Guía de prácticas climatológicas*. <https://www.perrosalpinos.cl/imagenes/relatosdelosperros/andrade/meteorologia/Guia%20de%20Practicas%20Climatologicas%20-%202011.pdf> [consultado 02 Marzo 2026].
- Pöschmann, J., R. Kronenberg, & C. Bernhofer. (2023). Variability of sampling adjustment factors for extreme rainfall in Germany: J. Pöschmann et al. *Theoretical and Applied Climatology*, 153(3), 1463–1477. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04511-3>
- Sanguesa, C., R. Pizarro, B. Ingram, A. Ibañez, D. Rivera, P. García-Chevesich, J. Pino, F. Pérez, F. Balocchi, & F. Peña. (2023). Comparing methods for the regionalization of intensity-duration-frequency (IDF) curve parameters in Sparsely-Gauged and Ungauged areas of Central Chile. *Hidrology*, 10(9), 179. <https://doi.org/10.3390/hydrology10090179>
- Sarkar, S., & R. Maity. (2020). Estimation of probable maximum precipitation in the context of climate change. *MethodsX*, 7, 100904. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.100904>
- Scasserra, D.C., P. Pompilio, M. Rolla, & G. Najle. (2023). Precipit. Ar: IDR Curves for Argentina using rainfall rate estimates from TRMM and GPM Missions. *LACCEI*, 1(8). <https://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2023.1.1.1566>
- Suárez, J.A.H., A.M.S. López, & M.A. Ruiz-Ochoa. (2022). Estimación de datos faltantes de precipitación mediante variabilidad climática estacional. *Inclusión y Desarrollo*, 9(2), 77–88. <https://doi.org/10.26620/uniminuto.inclusion.9.2.2022.77-88>
- Valencia-González, J.N., R. Arteaga-Ramírez, M.A. Vásquez-Peña, & A. Quevedo-Nolasco. (2022). Relleno de datos diarios faltantes en registros de series climatológicas temporales. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 13(4), 617–629. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i4.2514>
- Weiss, L.L. (1964). Ratio of True to Fixed-Interval Maximum Rainfall. *Journal of Hydraulics Division*. 90(HY1), 77–82. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:124925923>
- World Meteorological Organization (WMO). (2009). *Manual for estimation of probable maximum precipitation*. Secretariat of the WMO. <https://damfailures.org/wp-content/uploads/2020/10/WMO-1045-en.pdf> [consultado 07 Marzo 2026].
- Yan, L., D. Lu, L. Xiong, H. Wang, Q. Luan, C. Jiang, ... & C.Y. Xu. (2023). Derivation of nonstationary rainfall intensity-duration-frequency curves considering the impacts of climate change and urbanization. *Urban Climate*, 52, 101701. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101701>
- Zapata, P.G.C. (2023). Modelación de la distribución de probabilidad de las precipitaciones máximas en la Estación Meteorológica Salache. *Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas*, 7(2), 71–80. <https://investigacion.utc.edu.ec/index.php/ciya/article/view/618/847>