



INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE  
MONTERREY

INTELIGENCIA ARTIFICIAL AVANZADA PARA LA CIENCIA DE DATOS II

GRUPO 101

28 Octubre de 2024

---

## Actividad Integradora 1 - Precipitaciones máximas mensuales para el diseño de obras hidráulicas

---

*Autor:*

Adrian Pineda Sánchez - A00834710

*Profesor:*

Dra. Blanca Rosa Ruiz Hernandez

## Introducción

La ingeniería civil enfrenta numerosos desafíos debido a factores climáticos, siendo la lluvia y la temperatura dos de los más significativos. En particular, el diseño y la construcción de infraestructuras adecuadas requieren un conocimiento preciso de la **máxima precipitación probable** que puede registrarse en un período determinado de retorno. Este concepto es esencial para garantizar que las obras de ingeniería, tales como presas, puentes, carreteras y edificios, estén diseñadas para resistir condiciones climáticas extremas, asegurando así la seguridad y la durabilidad de estas estructuras (1; 2; 3).

Este estudio se enfoca en el análisis de las precipitaciones máximas históricas mensuales en el estado de Tamaulipas, México, utilizando datos recopilados entre 1994 y 2023. El objetivo principal de este análisis es calcular la precipitación más extrema para un periodo de retorno seleccionado, permitiendo así evaluar los riesgos asociados y facilitar la planificación de diseños de infraestructura más seguros y eficientes (4; 5). El informe está estructurado en diversas secciones que incluyen una revisión detallada de la metodología empleada, seguidas de un análisis y discusión sobre los resultados obtenidos. A través de este estudio, se busca no solo entender el comportamiento de las precipitaciones en Tamaulipas, sino también aportar al campo de la ingeniería civil mediante el uso de herramientas estadísticas (1).

## Metodología

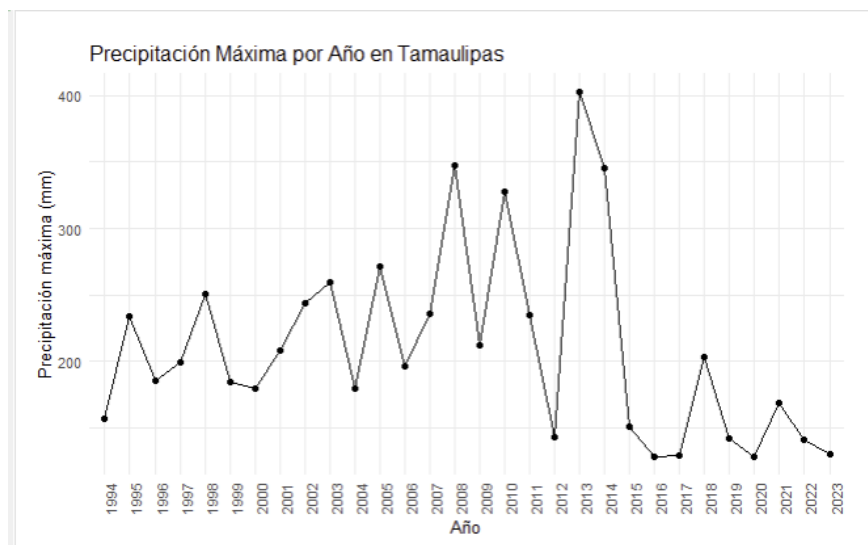
Este apartado presenta un panorama general de la metodología empleada en el análisis de la precipitación máxima probable en el estado de Tamaulipas. A continuación, se describen los pasos generales; cada uno de ellos será profundizado en las secciones correspondientes.

### Obtención de Datos

Se seleccionó **Tamaulipas** como área de estudio debido a su susceptibilidad a eventos de lluvias intensas, que representan un riesgo significativo para la infraestructura. Este análisis se basó en datos históricos de la base de CONAGUA, que proporciona información detallada sobre precipitaciones y temperatura en los estados de México (5). Los datos abarcan el periodo de **1994 a 2023**, permitiendo el estudio de casi tres décadas de variabilidad y la detección de posibles tendencias o cambios en la magnitud de las precipitaciones.

### 1. Análisis Estadístico Descriptivo

La gráfica de Precipitación Máxima por Año en Tamaulipas presenta la evolución de los valores máximos de precipitación registrados anualmente en el estado de Tamaulipas. Cada punto en la gráfica representa el valor máximo de precipitación mensual observado en un año específico. La línea que conecta los puntos permite visualizar cambios a lo largo del tiempo y ayuda a identificar posibles tendencias o patrones en la serie histórica de precipitaciones.



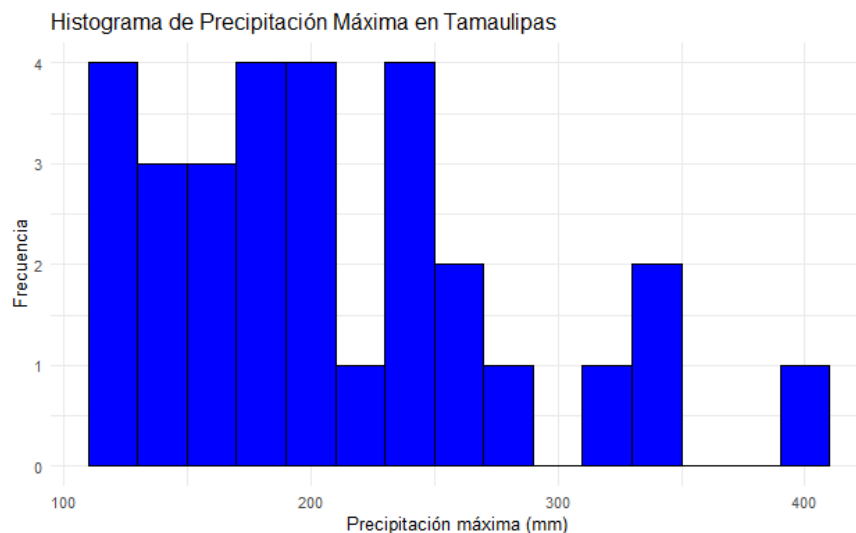
**Figura 1**  
*Gráfica de Precipitaciones Máximas Anuales*

- **Medidas de Centralización y Variación:** Para proporcionar un panorama de las características de las precipitaciones en Tamaulipas, se calcularon medidas de tendencia central (media y mediana) y de dispersión (desviación estándar). Estos estadísticos permiten resumir el comportamiento de las precipitaciones extremas, una práctica común en análisis hidrológicos para definir patrones base.

Medida	Valor
Media (Precipitación máxima promedio)	210.6533 mm
Mediana	197.65 mm
Varianza	5197.215
Desviación estándar	72.09171 mm

**Cuadro 1**  
*Medidas descriptivas de la precipitación máxima anual*

- **Visualización de Datos:** Se crearon histogramas y diagramas de caja (boxplots) para identificar la forma de la distribución, sesgos y posibles valores atípicos en las precipitaciones máximas mensuales. En general, la distribución de las precipitaciones máximas en Tamaulipas muestra una variabilidad considerable entre los años. Aunque la mayoría de los años presentan precipitaciones cercanas a los 200 mm, hay algunos años con precipitaciones mucho más altas, como lo indica el outlier y el sesgo positivo. Esto sugiere que aunque la precipitación en Tamaulipas es en promedio estable, existen eventos extremos que resultan en lluvias mucho más intensas en algunos años.
- **Análisis de Tendencias:** Se evaluó la serie temporal para identificar posibles tendencias, lo cual es crucial en el contexto de cambio climático, ya que permite observar aumentos o disminuciones en la intensidad de las precipitaciones que pueden impactar la infraestructura.



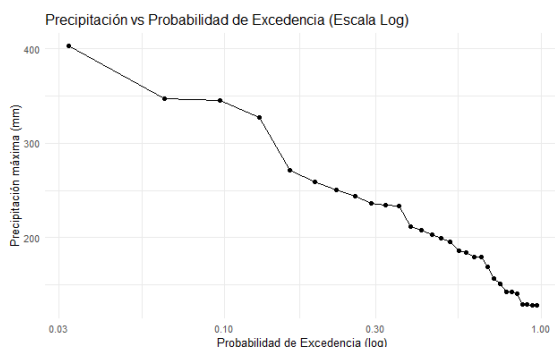
**Figura 2**

*Gráfica de Precipitaciones Máximas Anuales*

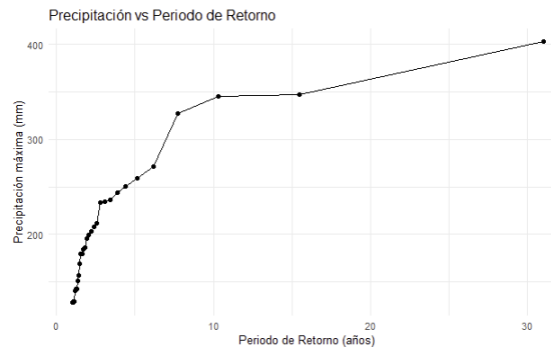
- No parece haber un ciclo regular de años en los que la precipitación sube o baja. Sin embargo, sí se puede observar que, aproximadamente cada 3 a 6 años, ocurre un pico de precipitación alta.
- **Picos marcados:** Se observan picos notables en los años 2007, 2010, 2013, y 2014, donde las precipitaciones alcanzaron valores por encima de los 350 mm. Estos años parecen ser excepcionales y podrían estar asociados a fenómenos climáticos extremos, como huracanes o tormentas intensas.
- **Disminución reciente:** Desde el año 2016, las precipitaciones máximas tienden a ser más bajas, con valores que en su mayoría no superan los 200 mm.

## 2. Análisis de Frecuencias: Método Gráfico

- **Organización de Datos:** Los datos se ordenaron de mayor a menor para calcular probabilidades de excedencia, una técnica estándar en hidrología para analizar eventos extremos de precipitación.
- **Cálculo de Probabilidad de Excedencia y No Excedencia:** Se asignó un rank.<sup>a</sup> cada observación de precipitación máxima y se utilizó la fórmula  $P_{exce} = \frac{m}{N+1}$  para calcular la probabilidad de excedencia ( $P_{exce}$ ) y su complemento, la probabilidad de no excedencia ( $P_{noexce} = 1 - P_{exce}$ ). Este enfoque sigue la metodología comúnmente utilizada en estudios de diseño hidrológico.
- **Cálculo del Periodo de Retorno:** A partir de la probabilidad de excedencia, se calculó el periodo de retorno  $P_{ret} = \frac{1}{P_{exce}}$ , lo cual proporciona una estimación de la frecuencia con que se espera un evento de magnitud similar en el futuro.



**Figura 3**  
*Precipitación vs Probabilidad de Excedencia*



**Figura 4**  
*Precipitación vs Periodo de Retorno*

La primera gráfica, **Precipitación vs Probabilidad de Excedencia (Escala Logarítmica)**, muestra que las precipitaciones máximas más altas en Tamaulipas tienen una probabilidad de excedencia baja, indicando que estos niveles de precipitación son eventos raros en un año específico.

La segunda gráfica, **Precipitación vs Periodo de Retorno**, refleja que los eventos de precipitación más altos presentan un periodo de retorno largo, lo que significa que estos eventos ocurren, en promedio, cada varios años en Tamaulipas (por ejemplo, cada 30 años para precipitaciones extremas de alrededor de 400 mm). Este tipo de información es esencial para planificar y diseñar infraestructuras en Tamaulipas, garantizando que las construcciones sean capaces de resistir eventos de gran magnitud y minimizando riesgos de falla en caso de lluvias extremas.

### 3. Análisis de Frecuencias Método Analítico

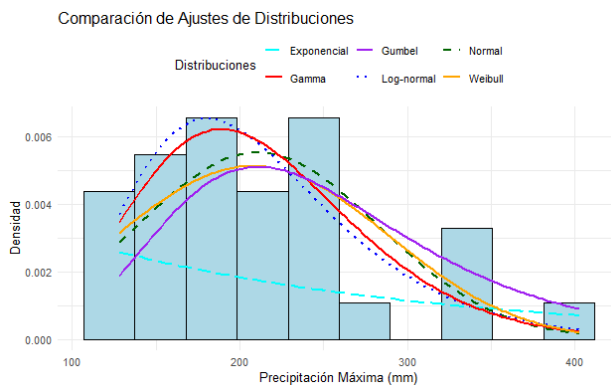
Para evaluar el ajuste de cada distribución a los datos de precipitaciones máximas en Tamaulipas, se aplicaron los siguientes procedimientos comunes:

- **Generación de Histogramas y Ajuste Visual:** Se creó un histograma para cada distribución y se superpuso la función de densidad teórica correspondiente.
- **Comparación de Distribuciones de Probabilidad Acumuladas (Ojivas):** Se generaron ojivas empíricas y teóricas para comparar las distribuciones acumuladas.
- **Pruebas de Bondad de Ajuste:** Se realizaron pruebas estadísticas como Kolmogorov-Smirnov (KS) y otras según el caso, para determinar si los datos seguían la distribución propuesta.

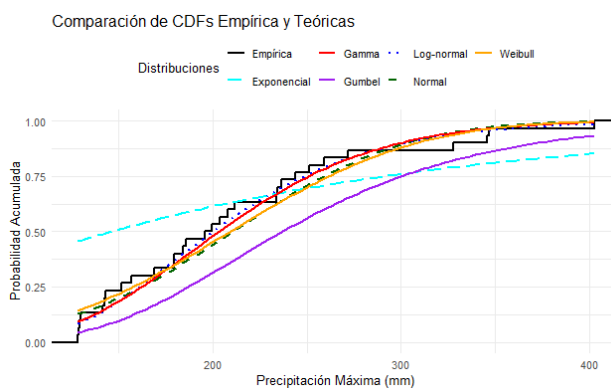
Distribución	Descripción y Aplicación	Procedimientos Adicionales	Parámetros
Normal	Distribución simétrica en forma de campana, que es común para fenómenos naturales donde los valores tienden a agruparse alrededor de un promedio. En hidrología, es utilizada para modelar eventos de precipitación promedio, aunque no siempre captura adecuadamente los eventos extremos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Creación de un gráfico Q-Q para ajuste visual.</li> <li>■ Prueba adicional de Shapiro-Wilk.</li> </ul>	Media ( $\mu$ ), Desviación estándar ( $\sigma$ )
Log-normal	Adecuada para variables positivas que presentan una asimetría a la derecha, como la precipitación, donde los valores altos son infrecuentes pero extremos. Es útil para modelar datos en hidrología, ya que captura la naturaleza sesgada de eventos extremos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Aplicación del método de momentos para cálculo de parámetros.</li> </ul>	Media logarítmica ( $\mu_{\log}$ ), Desviación estándar logarítmica ( $\sigma_{\log}$ )
Exponencial	Describe el tiempo o espacio entre eventos en procesos de ocurrencia aleatoria (Poisson). En hidrología, se usa para modelar eventos infrecuentes, como precipitaciones de alta magnitud en intervalos largos. Esta distribución es adecuada para capturar la tasa de eventos extremos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Cálculo del parámetro de tasa <math>\lambda</math> basado en la media.</li> </ul>	Tasa ( $\lambda$ )
Gamma	Flexible y capaz de modelar una amplia variedad de formas de distribución, especialmente útil para datos positivos y asimétricos. En hidrología, la distribución Gamma se emplea para modelar fenómenos como la precipitación, al capturar tanto el rango de eventos frecuentes como extremos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Implementación del método de momentos para estimación de parámetros.</li> </ul>	Forma ( $k$ ), Tasa ( $\theta$ )
Weibull	Utilizada en análisis de confiabilidad y para modelar tiempos de fallo o eventos extremos. En hidrología, es aplicada para eventos de precipitación máxima, ayudando a estimar la frecuencia de eventos raros y extremos en periodos largos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Estimación de parámetros con <code>fitdistrplus</code>.</li> </ul>	Forma ( $\beta$ ), Escala ( $\eta$ )
Gumbel	Especialmente diseñada para modelar valores extremos de una serie de datos, como las mayores precipitaciones anuales. En hidrología, la distribución Gumbel es crucial para el análisis de eventos extremos, tales como inundaciones, permitiendo el diseño de infraestructuras de mitigación.	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Estimación de parámetros mediante media y desviación estándar, verificada con <code>fitdistrplus</code>.</li> <li>■ Creación de gráfico Q-Q específico.</li> </ul>	Localización ( $\mu$ ), Escala ( $\beta$ )

**Cuadro 2**

*Resumen de Distribuciones, Procedimientos Adicionales y Parámetros en el Análisis de Frecuencias*



**Figura 5**  
*Gráfica de Precipitaciones Máximas Anuales*



**Figura 6**  
*Gráfica de Precipitaciones Máximas Anuales*

Distribución	Prueba	Estadístico	P-Value
Normal	Shapiro-Wilk	0.90238374	0.0096
Normal	KS	0.12643485	0.6771
Log-normal	KS	0.09024551	0.9491
Exponencial	KS	0.45587856	0.0000
Gamma	KS	0.09202005	0.9410
Weibull	KS	0.14182197	0.5357
Gumbel	KS	0.09872854	0.9041

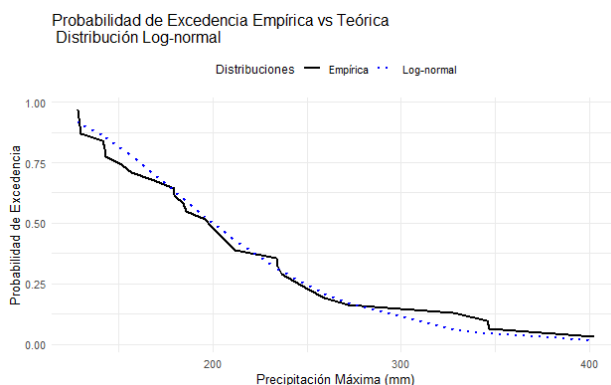
**Cuadro 3**  
*Resultados de las Pruebas de Bondad de Ajuste para Diferentes Distribuciones*

Con base en los análisis visuales y estadísticos, la Log-normal es la distribución que mejor ajusta los datos de precipitación máxima mensual en Tamaulipas. Este ajuste es respaldado tanto por su desempeño en los gráficos de densidad y probabilidad acumulada como por los resultados de las pruebas estadísticas. En particular, la prueba de Kolmogorov-Smirnov (KS) para la Log-normal arroja un estadístico de 0.0902 con un p-valor de 0.95, lo cual indica un ajuste adecuado al no rechazar la hipótesis nula de normalidad. La

Gamma y la Gumbel también presentan buenos ajustes, con valores de estadísticos KS de 0.0920 y 0.0987 y p-valores de 0.94 y 0.90, respectivamente. Estas distribuciones logran capturar de manera aceptable la variabilidad de los datos y representan opciones viables, aunque la Log-normal sigue destacando en precisión.

#### 4. Precipitación de diseño de obras hidráulicas

Tomando en cuenta que se trata de una zona de riego mediana, con un periodo de retorno estimado entre 100 y 500 años (6), se realizaron los siguientes análisis: un **Gráfico de Probabilidad de Excedencia Teórica vs. Empírica** para validar la distribución Log-normal, el **Cálculo de la Probabilidad de Excedencia** utilizando la fórmula:  $P_{exce} = \frac{1}{P_{ret}}$  y por ende también su **Cálculo de la Precipitación Máxima para un Periodo de Retorno**



**Figura 7**  
*Gráfica de Probabilidad de Excedencia Teórica vs Empírica*

Años de Retorno	Probabilidad de Excedencia	Precipitación Máxima Mensual Estimada (mm)
70	0.0143	404.37
100	0.01	422.58
150	0.0067	443.22
200	0.005	457.86
500	0.002	504.6

**Cuadro 4**

*Probabilidad de Excedencia y Precipitación Máxima Mensual Estimada para Diferentes Periodos de Retorno*

La precipitación máxima estimada para un periodo de retorno de 100 años (422.58 mm) representa una cantidad de precipitación que, en promedio, ocurriría una vez cada 100 años en la región de Tamaulipas. Al aumentar el periodo de retorno, el valor esperado de la precipitación máxima también incrementa. Esto se debe a que un periodo de retorno más largo implica una menor probabilidad de excedencia, y esto ocurre de forma inversa al disminuir también, pues la precipitación máxima decrece con periodos mas cortos pues implica una probabilidad de excedencia mayor.



## Discusión y conclusiones

El presente análisis ha permitido identificar la distribución Log-normal como la opción más precisa para modelar las precipitaciones máximas mensuales históricas en Tamaulipas. Esta distribución destaca tanto en el ajuste visual como en las pruebas estadísticas aplicadas, logrando captar adecuadamente la asimetría y los valores extremos de precipitación, lo que resulta crucial para estimar valores de precipitación asociados a periodos de retorno específicos. Esta capacidad de la Log-normal para reflejar la dispersión de los datos y los picos extremos la convierte en la herramienta más confiable para calcular la precipitación máxima probable (PMP) en distintos escenarios de periodo de retorno, mejorando la evaluación de riesgo en infraestructura hidráulica.

Otras distribuciones, como la Gamma y Gumbel, también presentaron ajustes razonables y podrían ser consideradas en casos específicos, pero no alcanzaron el nivel de precisión de la Log-normal. La utilización de una distribución adecuada, fundamentada en pruebas de ajuste visual y estadístico, es esencial para optimizar el diseño de infraestructuras como presas, sistemas de drenaje y canales, asegurando su resistencia ante eventos de precipitaciones extremas. Este enfoque sigue las recomendaciones de estudios nacionales, como las guías y normativas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) para el diseño de obras hidráulicas en México (5), que subrayan la importancia de integrar datos históricos en combinación con proyecciones actuales de cambio climático. Estas recomendaciones nacionales se complementan con las directrices de instituciones extranjeras como la NOAA y las Academias Nacionales de Ciencias, Ingeniería y Medicina de EE.UU., que también abogan por metodologías actualizadas para enfrentar condiciones meteorológicas cada vez más extremas (1; 2; 3).

La estadística aplicada desempeña un papel crucial en el área de ingeniería civil e infraestructura, ya que permite traducir datos históricos y proyecciones climáticas en información tangible para la toma de decisiones. La aplicación de distribuciones como la Log-normal y el uso de herramientas como  $P_{exe}$  y  $P_{ret}$  no solo ayudan a prever los eventos de precipitación extrema, sino que también permiten un diseño más resiliente y seguro frente a cambios climáticos y fenómenos meteorológicos severos. Este estudio contribuye al campo mediante un análisis estadístico riguroso y fundamentado, aportando una metodología confiable para la planificación y diseño de infraestructura en regiones vulnerables a eventos climáticos extremos.

## Referencias

- Comisión Nacional del Agua. (2024). Recomendaciones de periodos de retorno para la estimación del gasto máximo de diseño en las obras hidráulicas, hidrología de avenidas, México. Sdsu.edu.  
[https://pon.sdsu.edu/periodos\\_de\\_retorno\\_cna.html](https://pon.sdsu.edu/periodos_de_retorno_cna.html)
- NOAA. (2024). *Roadmap for PMP Modernization*. Propuesta de actualización de métodos de estimación de PMP para mejorar la resiliencia de infraestructuras críticas. Disponible en:  
<https://www.noaa.gov/pmp-modernization>.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2024). *Modernizing PMP Estimation Methods*. Estudio interdisciplinario que discute la modernización de métodos de estimación de PMP en el contexto de eventos climáticos extremos. Disponible en:  
<https://www.nationalacademies.org/pmp-estimation>.
- Casas, J., et al. (2008). *Análisis espacial de las precipitaciones máximas diarias en Cataluña*. Agencia Estatal de Meteorología. Disponible en:  
[https://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/publicaciones/Detall/AEMET\\_08-2018.pdf](https://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/publicaciones/Detall/AEMET_08-2018.pdf).
- CONAGUA. (2016). *Estimación de las precipitaciones máximas probables para el diseño de obras hidráulicas en México*. Comisión Nacional del Agua. Disponible en: <https://www.gob.mx/conagua>.
- Recomendaciones de periodos de retorno para la estimacion del gasto maximo de diseno en las obras hidraulicas, Comision Nacional del Agua, hidrologia de avenidas, Mexico. (2024). Sdsu.edu.  
[https://pon.sdsu.edu/periodos\\_de\\_retorno\\_cna.html](https://pon.sdsu.edu/periodos_de_retorno_cna.html)