*Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey*

# **“Actividad Integradora 1 - Precipitaciones Máximas Mensuales para el Diseño de Obras Hidráulicas”**

Inteligencia Artificial Avanzada para la Ciencia de Datos II (Gpo 101)

10/28/2024

Blanca R. Ruiz Hernández

**Estudiante:**

Eryk Elizondo González A01284899

## Introducción

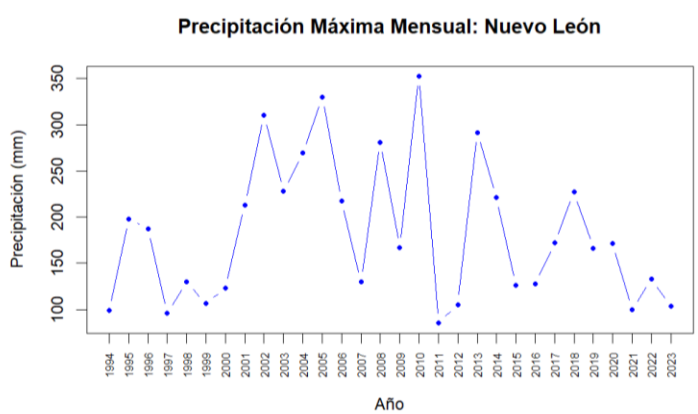
Las obras de Ingeniería Civil, como presas, puentes y sistemas de drenaje requieren un diseño fundamentado en las características climáticas y los registros hidrológicos de la región donde se emplazarán, dado que el clima, en particular la precipitación, afecta significativamente su rendimiento y durabilidad (United States Water Resources Council, 1981). Para estimar la capacidad de estas estructuras, se utilizan periodos de retorno, que son intervalos de tiempo promedio esperados para la ocurrencia de un evento extremo, como una inundación o una lluvia torrencial. Un periodo de retorno más largo implica un evento menos frecuente pero potencialmente más severo, lo que resulta crucial para proyectar obras resilientes y seguras a largo plazo (Mays, 2010). En hidrología, la probabilidad de excedencia y los modelos de distribución de probabilidad, como la distribución normal o gamma, permiten estimar de manera precisa la precipitación máxima esperada para un periodo de retorno específico, proporcionando una base sólida para el diseño de infraestructuras de contención y drenaje de agua (Chow et al., 1988).

En este documento, se emplearán datos históricos de precipitaciones máximas mensuales (1994-2023) para calcular la precipitación extrema que corresponde a diferentes periodos de retorno. La metodología se ajusta a guías como el "Bulletin No. 17B" de la USWRC, que establece estándares en la estimación de flujos de inundación para periodos de retorno definidos. Estos enfoques permiten optimizar la vida útil de infraestructuras críticas y asegurar su resistencia frente a eventos climáticos extremos

## Metodología

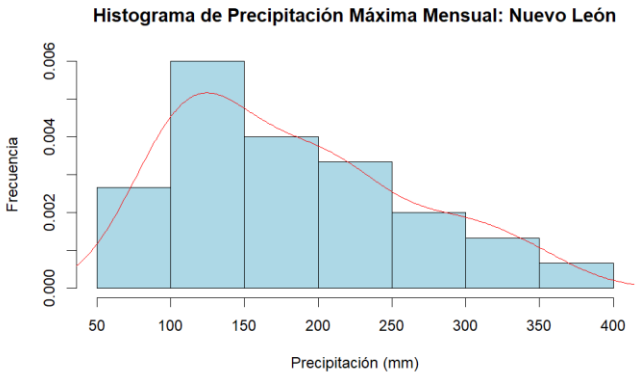
### Análisis Estadístico Descriptivo

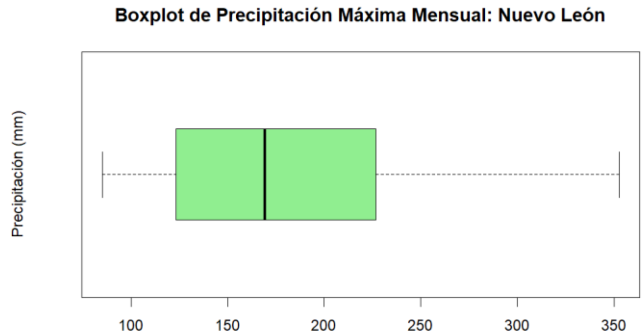
Iniciando con la base de datos de precipitaciones máximas históricas mensuales de todos los estados de la república, la cual posee información de los resúmenes mensuales de lluvia y temperatura de CONAGUA, se selecciona el conjunto de datos pertinentes al estado de Nuevo León. Después, se calcula la precipitación mensual máxima de cada año y se despliega en el siguiente gráfico:




Además, para complementar el análisis, se calcula las siguientes medidas de centralización y variación de las precipitaciones máximas mensuales además de gráficos para describir la distribución de los datos:

| Mín. | Q1 | Mediana | Media | Q3 | Máx. | σ | Sesgo | Curtosis |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 85.1 | 124.1 | 169.25 | 182.31 | 225.5 | 352.7 | 76.8403 | 0.6538 | 2. 3446 |



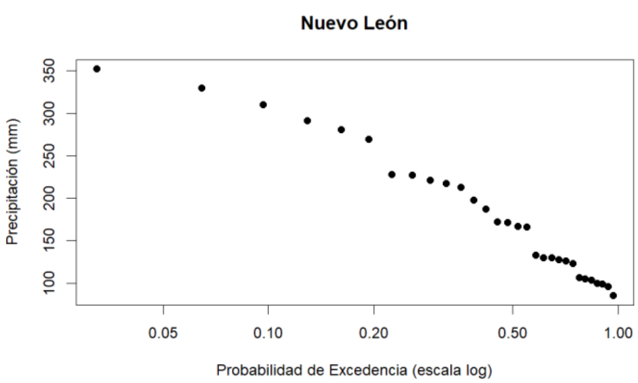



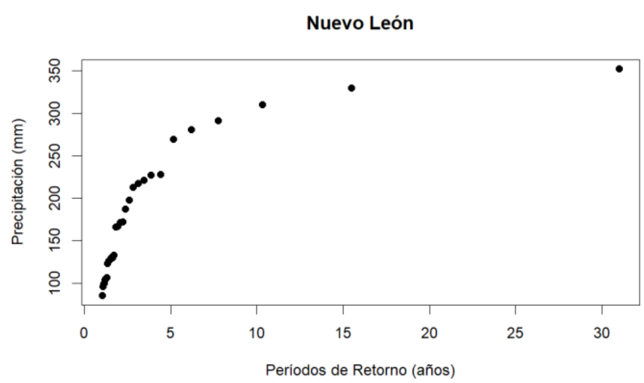

La distribución de la precipitación máxima mensual en Nuevo León muestra una ligera asimetría positiva, con una media de 182.31 mm y una mediana de 169.25 mm. La desviación estándar de 76.84 mm indica una variabilidad moderada, mientras que el rango intercuartílico de 101.4 mm refleja la dispersión de los valores centrales. El sesgo de 0.6538 sugiere que la distribución está ligeramente inclinada hacia valores más altos, y la curtosis de 2.3446 muestra una distribución un poco más achatada, sin valores extremos significativos.

La gráfica de la precipitación máxima mensual en Nuevo León entre 1994 y 2023 muestra fluctuaciones significativas, sin una tendencia clara de aumento o disminución constante. Se observan picos en años como 2003, 2010 y 2013, pero no hay un patrón cíclico predecible. Este análisis es útil para anticipar eventos climáticos extremos, planificar infraestructuras resilientes y estudiar la variabilidad climática, aunque no se puede concluir que la precipitación siga un ciclo fijo a lo largo del tiempo.

## Análisis de Frecuencias Método Gráfico

En el dataframe de los datos de precipitación máxima se agrega una columna con los datos de lluvias máximas ordenados de mayor a menor, así como una columna con el número de orden que tiene asignado cada precipitación máxima. Después se calcula la probabilidad de excedencia o de ocurrencia de acuerdo con Weibull, donde el numerador es el número de orden (m) o “rank” y el denominador es la suma del total de datos (N) y 1.




Después se calcula la probabilidad de no excedencia para cada precipitación, este siendo el complemento de la probabilidad de excedencia. Finalmente, se calcula el periodo de retorno como el inverso de la probabilidad de excedencia:

| | max_rain | order_max_rain | rank_rain | Pexe | Pnoexe | Pret |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1994 | 98.7 | 352.7 | 1 | 0.03225806 | 0.9677419 | 31.000000 |
| 1995 | 197.8 | 329.9 | 2 | 0.06451613 | 0.9354839 | 15.500000 |
| 1996 | 187.4 | 310.4 | 3 | 0.09677419 | 0.9032258 | 10.333333 |
| 1997 | 96.2 | 291.3 | 4 | 0.12903226 | 0.8709677 | 7.750000 |
| 1998 | 129.8 | 281.1 | 5 | 0.16129032 | 0.8387097 | 6.200000 |
| 1999 | 106.2 | 269.3 | 6 | 0.19354839 | 0.8064516 | 5.166667 |
| 2000 | 123.3 | 228.1 | 7 | 0.22580645 | 0.7741935 | 4.428571 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2001 | 213.0 | 226.9 | 8 | 0.25806452 | 0.7419355 | 3.875000 |
| 2002 | 310.4 | 221.4 | 9 | 0.29032258 | 0.7096774 | 3.444444 |
| 2003 | 228.1 | 217.5 | 10 | 0.32258065 | 0.6774194 | 3.100000 |

La probabilidad de excedencia representa la probabilidad de que un evento de precipitación de una cierta magnitud sea superado en un año determinado. A medida que aumenta la precipitación, esta probabilidad disminuye, lo que significa que eventos de alta precipitación son menos frecuentes. Es clave en hidrología para evaluar riesgos de inundación.

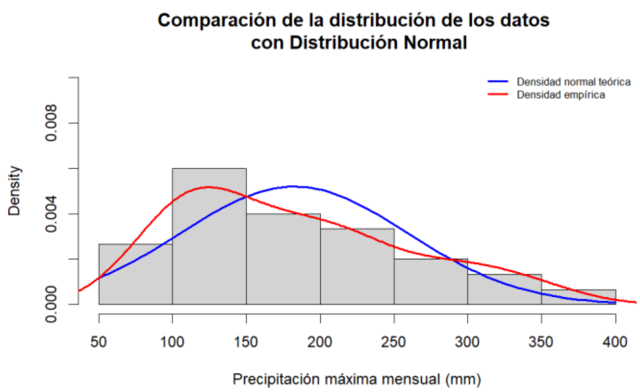
El periodo de retorno es el tiempo promedio que transcurre entre eventos de precipitación de una determinada magnitud. A mayor precipitación, mayor es el periodo de retorno, lo que indica que eventos más extremos ocurren con menor frecuencia. Este concepto es crucial para el diseño de infraestructuras.

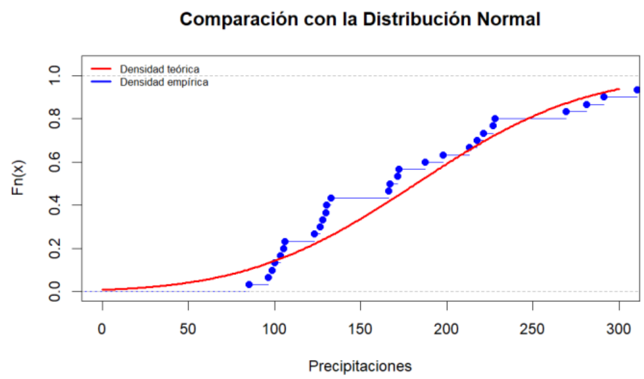
En hidrología, estos valores son importantes para asegurar que las obras puedan soportar eventos extremos. Para la precipitación de diseño, se eligen probabilidades de excedencia bajas (1% o menos), lo que garantiza que las estructuras estén preparadas para eventos anormales, pero de gran impacto.

## Análisis de Frecuencias Método Analítico

### Ajuste a una Distribución Normal

Para determinar qué tan certera es la Distribución Normal para ajustar los datos, se realiza un análisis visual y otro con pruebas de bondad de ajuste.

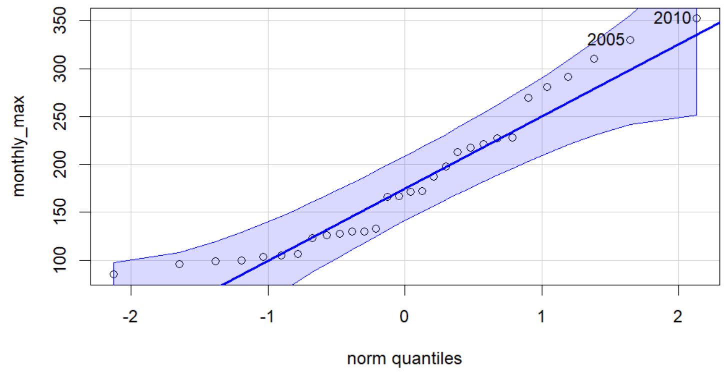



Visualmente, los datos no se ajustan completamente a una distribución normal, ya que la curva de densidad empírica (en rojo) presenta una asimetría hacia la derecha, con una mayor concentración de valores en las precipitaciones bajas, mientras que la densidad normal teórica (en azul) es más simétrica. Esto sugiere que los datos están sesgados y no siguen perfectamente una distribución normal.

La distribución normal tiene dos parámetros: la media (que determina la ubicación del centro de la distribución) y la desviación estándar (que indica la dispersión de los datos alrededor de la media). Estos parámetros se calculan usando la media aritmética y la desviación estándar muestral para reflejar la mejor estimación de los datos reales, permitiendo modelar la distribución en torno a su centro y dispersión.

En la gráfica se comparan las distribuciones de probabilidad acumuladas (ojiva) de los datos empíricos (en azul) y los teóricos (en rojo) basados en la distribución normal. Los datos empíricos son aquellos obtenidos directamente de las observaciones, en este caso las precipitaciones, mientras que los datos teóricos son los valores que se esperarían si las precipitaciones siguieran una distribución normal ajustada con los parámetros calculados. Visualmente, las distribuciones se parecen en gran medida, aunque hay algunas diferencias en los extremos. Esto indica que los datos se ajustan razonablemente bien a la distribución normal, pero no perfectamente, lo que sugiere que las precipitaciones podrían no seguir una distribución normal exacta.




En el Q-Q plot, se observa que los datos se desvían de la línea recta en los extremos, lo que indica que no siguen perfectamente una distribución normal. En la parte central del gráfico, los puntos están cerca de la línea, pero a medida que nos movemos hacia los valores más extremos (cuantiles altos y bajos), los puntos se alejan de la línea. Este comportamiento sugiere que los datos tienen una ligera asimetría o colas más gruesas que una distribución normal, lo cual es común en fenómenos naturales como las precipitaciones.

Las pruebas de bondad de ajuste nos brindan información sobre si los datos se ajustan a una distribución normal.

Prueba de Shapiro-Wilk:

*Hipótesis 0: Los datos provienen de una distribución normal.*

*Hipótesis 1: Los datos no provienen de una distribución normal.*

| Estadístico W | Valor P |
|---|---|
| 0.91693 | 0.02235 |

Dado que el valor p es menor que el nivel de significancia comúnmente utilizado ($\alpha = 0.05$), se rechaza la hipótesis nula. Esto significa que, según esta prueba, los datos de las precipitaciones máximas mensuales no siguen una distribución normal.

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (KS):

*Hipótesis 0: Los datos provienen de una distribución normal.*

*Hipótesis 1: Los datos no provienen de una distribución normal.*

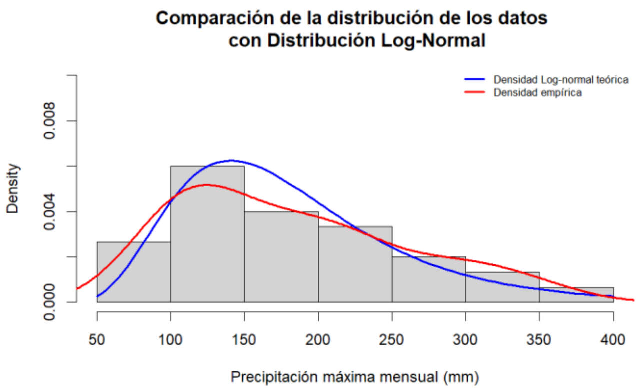
| Estadístico D | Valor P |
|---|---|
| 0.17323 | 0.2938 |

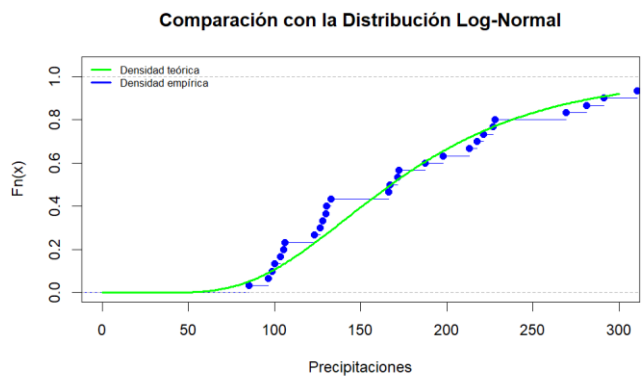
Dado que el valor p es mayor que el nivel de significancia comúnmente utilizado ($\alpha = 0.05$), no se rechaza la hipótesis nula. Según esta prueba, no hay evidencia suficiente para decir que los datos de las precipitaciones no provienen de una distribución normal, lo que sugiere que los datos podrían ajustarse a la normalidad.

En conclusión, las dos pruebas ofrecen resultados diferentes. La prueba de Shapiro-Wilk indica que los datos no son normales, mientras que la prueba de Kolmogórov-Smirnov sugiere que los datos podrían ser normales. Este desacuerdo podría deberse a la sensibilidad de cada prueba ante ciertos tipos de desviaciones de la normalidad. Aunque no podemos concluir con total certeza que los datos siguen una distribución normal, hay evidencia suficiente para sospechar que no lo hacen, especialmente considerando el resultado de Shapiro-Wilk.

**Ajuste a una Distribución Log-Normal**

Para determinar qué tan certera es la Distribución Log-Normal para ajustar los datos, se realiza un análisis visual y otro con pruebas de bondad de ajuste.




A simple vista, los datos empíricos no se ajustan de manera precisa a la distribución log-normal teórica. Aunque ambas curvas siguen una tendencia similar, se observan discrepancias notables. En el tramo inicial, con precipitaciones bajas, la densidad empírica (en rojo) es menor que la teórica (en azul). En el pico central, la densidad empírica supera ligeramente a la de la log-normal, y hacia las colas, en los valores altos de precipitación, la densidad empírica disminuye más rápidamente que la distribución teórica, especialmente a partir de los 250 mm. Esto indica que, si bien hay un cierto grado de ajuste, los datos no parecen seguir una distribución log-normal de forma exacta.

Al observar la gráfica, se puede notar que las distribuciones de probabilidad acumulada, tanto la empírica (en azul) como la teórica (en verde), son bastante similares. A pesar de algunas pequeñas discrepancias en ciertos puntos, especialmente entre los valores de precipitaciones de 100 a 150 mm, la mayoría de los puntos empíricos se ajustan bastante bien a la curva teórica. Esto sugiere que, en términos generales, la distribución log-normal teórica proporciona un buen ajuste para los datos empíricos acumulados, aunque no es perfecto.

La prueba Kolmogórov-Smirnov (KS) nos permite comparar la distribución empírica de los datos con una distribución teórica, en este caso, la log-normal, y determinar si los datos siguen dicha distribución.

*H0: Los datos provienen de una distribución log-normal.*

*H1: Los datos no provienen de una distribución log-normal.*

| **Estadístico D** | **Valor P** |
|---|---|
| 0.14493 | 0.5083 |

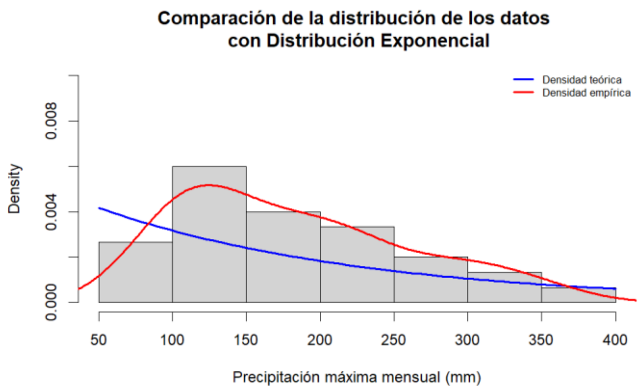
Dado que el valor p es mayor que el nivel de significancia comúnmente utilizado (α = 0.05), no se rechaza la hipótesis nula. Esto indica que no hay suficiente evidencia para afirmar que los datos no siguen una distribución log-normal, lo que sugiere que los datos de las precipitaciones máximas mensuales podrían ajustarse a esta distribución.

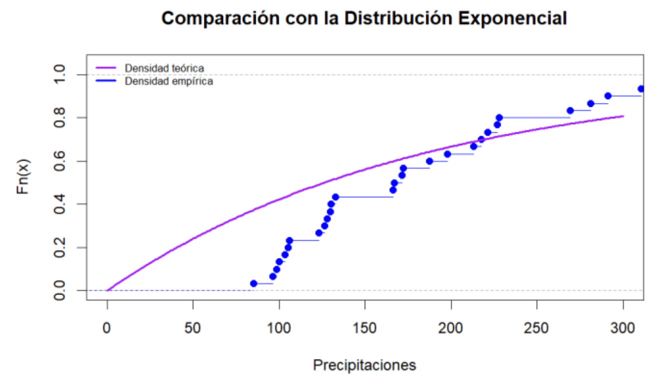
No se rechaza la hipótesis nula, por lo que se puede concluir que, según la prueba de Kolmogórov-Smirnov, los datos podrían seguir una distribución log-normal. El valor p alto implica que no se encontraron grandes diferencias entre la distribución empírica de los datos y la log-normal teórica.

La distribución log-normal tiene dos parámetros la media de los logaritmos naturales de los datos y la desviación estándar de los logaritmos naturales de los datos. Estos parámetros se calculan de manera que la distribución log-normal se ajuste a los momentos de los datos originales, es decir, su media y varianza. El método de momentos consiste en igualar los momentos teóricos de la distribución log-normal con los momentos muestrales, para luego resolver las ecuaciones y obtener los parámetros.

**Ajuste a una Distribución Exponencial**

Para determinar qué tan certera es la Distribución Exponencial para ajustar los datos, se realiza un análisis visual y otro con pruebas de bondad de ajuste.




A simple vista, los datos empíricos (en rojo) no se ajustan bien a la distribución exponencial teórica (en azul). Se observa que la densidad empírica tiene un pico alrededor de los 150 mm, mientras que la distribución exponencial decrece de manera continua sin mostrar un pico claro. Además, la distribución empírica presenta un comportamiento más disperso que el esperado por la distribución exponencial, especialmente en las precipitaciones menores a 200 mm. Esto sugiere que la distribución exponencial no es un buen ajuste para estos datos de precipitaciones máximas mensuales.

En el gráfico, se comparan la distribución de probabilidad acumulada teórica (en morado) y la distribución empírica (en azul). Aunque ambas distribuciones siguen una tendencia similar, hay diferencias notables en ciertos intervalos. La distribución empírica presenta variaciones y saltos que no están presentes en la distribución teórica, lo que sugiere que los datos empíricos no se ajustan perfectamente a la distribución exponencial teórica.

La prueba Kolmogórov-Smirnov (KS) nos permite comparar la distribución empírica de los datos con una distribución teórica, en este caso, la exponencial, y determinar si los datos siguen dicha distribución.

*H0: Los datos provienen de una distribución exponencial.*

*H1: Los datos no provienen de una distribución exponencial.*

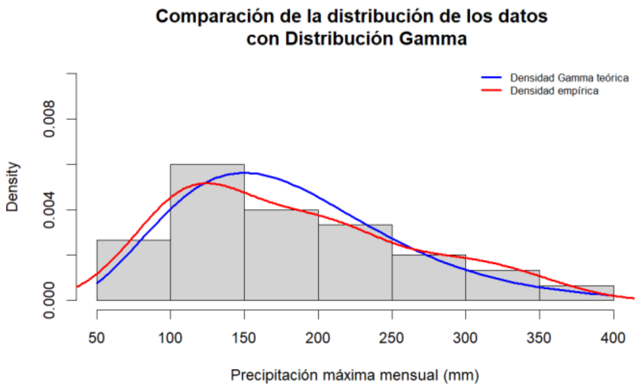
| **Estadístico D** | **Valor P** |
|---|---|
| 0.37669 | 0.0002474 |

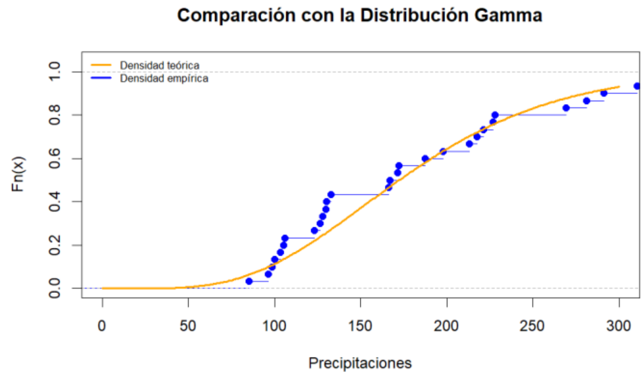
Dado que el valor p es menor que el nivel de significancia comúnmente utilizado ($\alpha = 0.05$), se rechaza la hipótesis nula de que los datos siguen una distribución exponencial. Por lo tanto, no podemos concluir que las precipitaciones máximas mensuales sigan una distribución exponencial, ya que la evidencia sugiere lo contrario.

La distribución exponencial tiene un solo parámetro, la tasa (lambda), que se calcula como el inverso de la media de los datos. Este cálculo se realiza de esta manera porque la media de una distribución exponencial es el inverso de la tasa, lo que permite estimar el parámetro a partir de los datos observados.

**Ajuste a una Distribución Gamma**

Para determinar qué tan certera es la Distribución Gamma para ajustar los datos, se realiza un análisis visual y otro con pruebas de bondad de ajuste.




En el gráfico, la densidad empírica (en rojo) y la densidad teórica de la distribución Gamma (en azul) muestran un ajuste razonablemente cercano, especialmente en el rango central de los datos. Sin embargo, hay algunas discrepancias visibles en los extremos: la densidad empírica es más alta que la teórica en el extremo izquierdo y más baja en el extremo derecho. Esto sugiere que, aunque la distribución Gamma captura la tendencia general de los datos, no representa perfectamente todas las características de la distribución empírica, especialmente en las colas.

En el gráfico, se comparan la distribución de probabilidad acumulada teórica (en naranja) y la distribución empírica (en azul) de las precipitaciones. Ambas distribuciones muestran una tendencia similar, especialmente en el rango intermedio de valores, donde los puntos empíricos siguen de cerca la curva teórica. Sin embargo, hay algunas discrepancias en los extremos, donde la distribución empírica se desvía ligeramente de la teórica. En general, la similitud sugiere que la distribución Gamma es un buen modelo para los datos empíricos, aunque no perfecto.

La prueba Kolmogórov-Smirnov (KS) nos permite comparar la distribución empírica de los datos con una distribución teórica, en este caso, la gamma, y determinar si los datos siguen dicha distribución.

*H0: Los datos provienen de una distribución gamma.*

*H1: Los datos no provienen de una distribución gamma.*

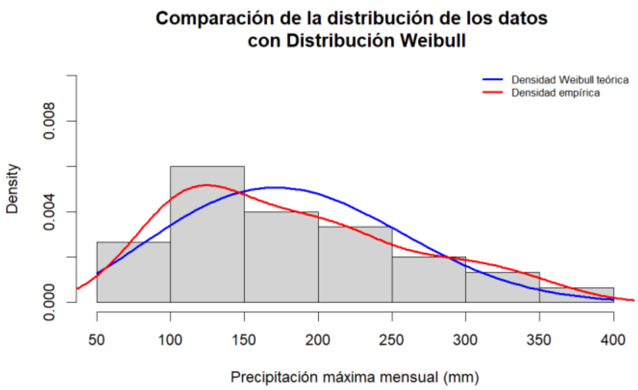
| **Estadístico D** | **Valor P** |
|---|---|
| 0.14833 | 0.4789 |

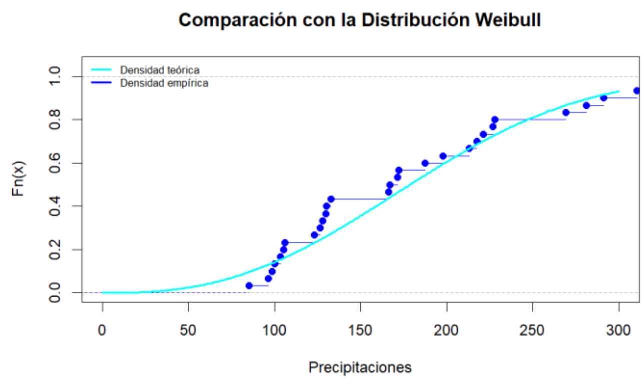
Dado que el valor p es mayor que el nivel de significancia comúnmente utilizado ($\alpha = 0.05$), no se rechaza la hipótesis nula, lo que sugiere que no hay evidencia suficiente para concluir que los datos no siguen una distribución Gamma. Por lo tanto, podemos aceptar la hipótesis nula y concluir que los datos de las precipitaciones máximas mensuales podrían seguir una distribución Gamma.

La distribución Gamma tiene dos parámetros: la forma (k) y la escala (θ). Estos parámetros se calculan generalmente mediante métodos de estimación como el método de momentos o el de máxima verosimilitud, que buscan ajustar la distribución teórica a los datos observados de la mejor manera posible.

**Ajuste a una Distribución Weibull**

Para determinar qué tan certera es la Distribución Weibull para ajustar los datos, se realiza un análisis visual y otro con pruebas de bondad de ajuste.




Visualmente, parece que los datos no se ajustan perfectamente a una distribución Weibull. La densidad teórica (en azul) de Weibull, no sigue de manera precisa la forma de la densidad empírica (en rojo) ni del histograma. Hay discrepancias notables, especialmente en las colas y en el pico de la distribución, donde la densidad empírica es más alta que la teórica. Esto sugiere que la distribución Weibull no es el mejor ajuste para estos datos.

En el gráfico, se comparan la distribución de probabilidad acumulada teórica (en celeste) y la distribución empírica (en azul). Ambas distribuciones muestran una tendencia similar, especialmente en el rango intermedio de precipitaciones, donde los puntos empíricos siguen de cerca la curva teórica. Sin embargo, hay algunas desviaciones en los extremos, donde los puntos empíricos se alejan un poco de la línea teórica. En general, las distribuciones se parecen bastante, lo que sugiere que la distribución teórica de Weibull es un buen ajuste para los datos empíricos.

La prueba Kolmogórov-Smirnov (KS) nos permite comparar la distribución empírica de los datos con una distribución teórica, en este caso, la weibull, y determinar si los datos siguen dicha distribución.

*H0: Los datos provienen de una distribución* weibull*.*

*H1: Los datos no provienen de una distribución* weibull*.*

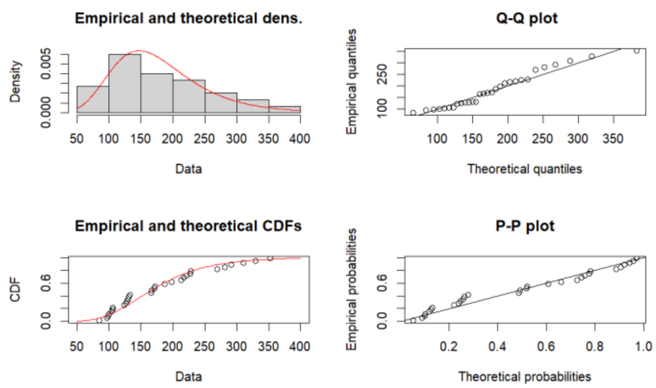
| Estadístico D | Valor P |
|---|---|
| 0.15926 | 0.3909 |

Dado que el valor p es mayor que el nivel de significancia comúnmente utilizado (α = 0.05), no se rechaza la hipótesis nula. Esto significa que no hay evidencia suficiente para concluir que los datos de las precipitaciones máximas mensuales no siguen una distribución Weibull.

La distribución Weibull tiene dos parámetros: el parámetro de forma (k) y el parámetro de escala (λ). La estimación de estos parámetros es más compleja que en distribuciones más simples, como la normal, debido a la naturaleza no lineal de la función de densidad de probabilidad de Weibull, lo que requiere métodos iterativos o de optimización para obtener estimaciones precisas.

**Ajuste a una Distribución Gumbel**

Para determinar qué tan certera es la Distribución Gumbel para ajustar los datos, se realizó un análisis visual y otro con pruebas de bondad de ajuste.




Visualmente, los datos parecen ajustarse razonablemente bien a una distribución Gumbel. En el gráfico de densidad (arriba a la izquierda), la línea roja que representa la densidad teórica sigue de cerca el histograma de los datos empíricos. En el gráfico Q-Q (arriba a la derecha), los puntos se alinean bastante bien a lo largo de la línea diagonal, lo que indica que las cuantiles empíricas y teóricas son similares. En el gráfico de CDF (abajo a la izquierda), las curvas empírica y teórica también están bastante alineadas. Finalmente, en el gráfico P-P (abajo a la derecha), los puntos siguen de cerca la línea diagonal, lo que sugiere un buen ajuste en términos de probabilidades acumuladas. Aunque hay algunas desviaciones menores, en general, el ajuste parece adecuado.

La prueba Kolmogórov-Smirnov (KS) nos permite comparar la distribución empírica de los datos con una distribución teórica, en este caso, la gumbel, y determinar si los datos siguen dicha distribución.

*H0: Los datos provienen de una distribución* gumbel*.*

*H1: Los datos no provienen de una distribución* gumbel*.*

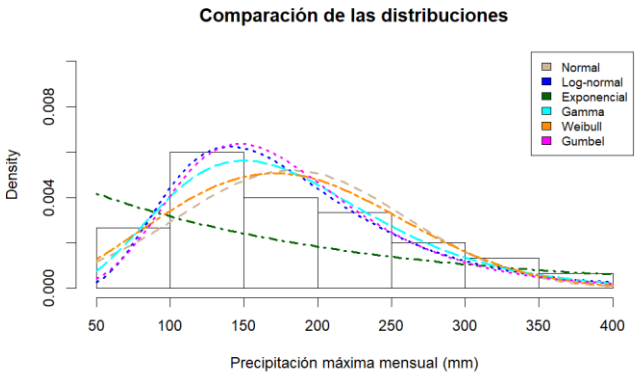
| **Estadístico D** | **Valor P** |
|---|---|
| 0.16667 | 0.808 |

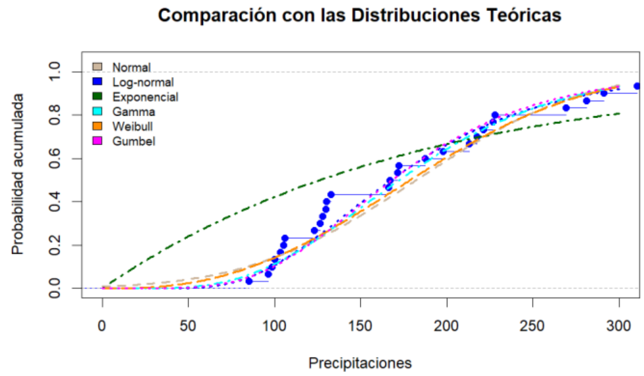
Dado que el valor p es significativamente mayor que el nivel de significancia comúnmente utilizado (α = 0.05), no se rechaza la hipótesis nula. Esto sugiere que no hay evidencia suficiente para concluir que las probabilidades de excedencia de las precipitaciones máximas mensuales no siguen una distribución Gumbel.

La distribución Gumbel tiene dos parámetros: la ubicación (mu) y la escala (beta). Para estimar estos parámetros a partir de la media y la desviación estándar de los datos, se utilizan las fórmulas específicas de la distribución Gumbel. Al comparar estos valores con los obtenidos mediante el comando "fitdistrplus" en R, puede haber diferencias debido a los métodos de estimación utilizados. "fitdistrplus" generalmente utiliza métodos de máxima verosimilitud, que pueden diferir de los métodos basados en momentos (media y desviación estándar). Estas diferencias pueden surgir debido a la naturaleza de los datos y la sensibilidad de los métodos de estimación a las características específicas de la muestra.

**Gráficas Conjuntas**

Para identificar la diferencia entre las distribuciones, se realizó un histograma de función de densidad, así como de probabilidad acumulada empírica vs teórica de todas las distribuciones conjuntas.




Basado en la comparación visual de las distribuciones, la distribución Gamma parece ajustarse mejor a los datos de precipitación máxima mensual. Su curva sigue de cerca la forma del histograma, capturando tanto el pico como la cola de la distribución de los datos. Aunque la distribución Weibull también muestra un buen ajuste, la Gamma parece representar mejor la densidad en el rango medio de los datos.

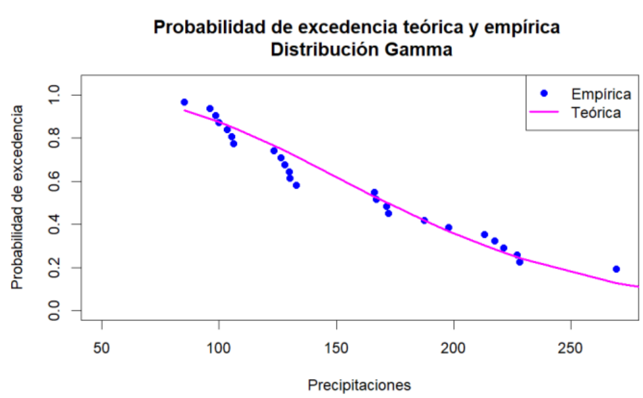
En el gráfico de comparación de distribuciones teóricas, se observa que las distribuciones Log-normal, Gamma y Weibull se ajustan mejor a los datos de precipitaciones, ya que sus curvas siguen de cerca la tendencia de los puntos de datos observados. La distribución Exponencial y Gumbel muestran un ajuste menos preciso, especialmente en los extremos de la distribución. La distribución Normal parece no capturar adecuadamente la asimetría de los datos.

Basado en lo anterior, la distribución Gamma parece ser la que mejor se ajusta a los datos de precipitación máxima mensual. Aunque hay algunas discrepancias en los extremos, tanto el análisis visual como la prueba de Kolmogórov-Smirnov sugieren que la distribución Gamma captura adecuadamente la tendencia general de los datos. Las distribuciones Weibull y Log-Normal también muestran un buen ajuste, pero presentan más discrepancias visuales en comparación con la Gamma. Por lo tanto, se concluye que la distribución Gamma es la mejor opción para modelar estos datos.

## Discusión y Conclusiones

## Precipitación de Diseño de Obras Hidráulicas

El periodo de retorno recomendado para el diseño de una presa derivadora para una zona de riego mediana para esta obra hidráulica es de entre 100 y 500 años. Ya que se desea calcular el caudal máximo para el límite inferior del intervalo de periodo de retorno (100 años), se realiza el gráfico comparativo de la probabilidad de excedencia teórica vs empírica:




El gráfico muestra la comparación entre la probabilidad de excedencia empírica (en azul) y la probabilidad de excedencia teórica de una distribución Gamma (en magenta) para los datos de precipitaciones.

La proximidad entre los puntos empíricos y la línea teórica indica que la distribución Gamma es adecuada para modelar estos datos, ya que la curva teórica sigue de cerca la tendencia de los puntos observados. La prueba visual sugiere que la distribución Gamma captura bien el comportamiento de los datos, especialmente en la cola derecha, lo cual respalda la elección de esta distribución para representar las precipitaciones máximas mensuales.

Después, se utiliza el límite inferior del intervalo de periodo de retorno sugerido (100 años) para encontrar la probabilidad de excedencia o de ocurrencia para ese valor. El resultado siendo 0.01 o 1%

Una vez conociendo la probabilidad de excedencia, se calcula su complemento y se utiliza esta probabilidad para encontrar el valor de la precipitación máxima mensual que tendrá ese periodo de retorno. Dándonos que la aproximación del caudal máximo que se tendría en Nuevo León con un periodo de retorno de 100 años es 406.6562 mm.

El valor de 406.6562 mm representa la precipitación máxima mensual esperada en Nuevo León con un periodo de retorno de 100 años, lo cual significa que existe una probabilidad baja (1/100 o 1%) de que una precipitación de esta magnitud o mayor ocurra en un año cualquiera. Al aumentar el periodo de retorno, el valor de la precipitación máxima aumenta, ya que eventos de mayor intensidad tienen menor probabilidad de ocurrencia, pero podrían ser más extremos cuando suceden.

Si utilizamos datos históricos de otro estado, el caudal máximo para el mismo periodo de retorno probablemente será diferente, ya que la distribución y características climáticas varían geográficamente. Cada región tiene su propio comportamiento hidrológico, influido por factores locales como geografía, clima y patrones de precipitación.

Las obras hidráulicas deben diseñarse considerando periodos de retorno sugeridos para garantizar su capacidad de resistir eventos extremos sin fallos. Elegir un periodo de retorno adecuado balancea la seguridad y el costo de la infraestructura, permitiendo que las obras funcionen eficientemente durante su vida útil. Conocer la distribución de probabilidad que mejor se ajusta a los datos históricos permite realizar estimaciones más precisas y confiables, facilitando el diseño y planificación de estructuras resilientes frente a eventos de precipitación extremos.

## Referencias Bibliográficas

- United States Water Resources Council (USWRC). (1981). Guidelines for Determining Flood Flow Frequency. Bulletin No. 17B, pp. 15-19. *Esta guía es una referencia estándar en la hidrología para establecer estimaciones de frecuencia de flujos de inundación.*

- Mays, L. W. (2010). Water Resources Engineering. John Wiley & Sons. *Este libro aborda conceptos clave en el diseño y análisis de sistemas de recursos hídricos, incluyendo el uso de periodos de retorno para la estimación de eventos extremos.*

- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). Applied Hydrology. McGraw-Hill. *Este texto ofrece una introducción detallada a los principios y métodos de hidrología aplicada, incluyendo técnicas para el análisis de datos hidrológicos y el diseño de infraestructura de control de agua.*

## Anexos

- Código Fuente (pdf)
- Código Fuente (Rmd)