

6. ESTIMACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS MEDIANTE MÉTODOS PROBABILÍSTICOS DE LA CUENCA ILAVE, PUNO PERÚ 2022³¹

Forecast of Maximum Flows Through Probabilistic Methods in Ilave Basin, Puno Perú– 2022

Juan Reynaldo Paredes-Quispe³²

Elqui Yeye Pari Condori³³

Fred Torres-Cruz³⁴

Ramiro Pedro Laura-Murillo³⁵

Alain Paul Herrera-Urtiaga³⁶

Pares evaluadores: Red de Investigación en Educación, Empresa y Sociedad – REDIEES.³⁷

³¹ Derivado del proyecto de investigación: “Determinación de caudales máximos de diseño mediante métodos convencionales probabilísticos en la cuenca Ilave, Puno – 2022”

³² Ing. Estadístico, Doctor en Administración, Universidad Nacional del Altiplano de Puno – Perú, correo electrónico: jpquispe@unap.edu.pe.

³³ Ing. Estadístico, Magister en Informática, Universidad Nacional del Altiplano de Puno – Perú correo electrónico: epari@unap.edu.pe.

³⁴ Ing. Estadístico e Informático, Magister en Ingeniería de Sistemas, Universidad Nacional del Altiplano de Puno. ftorres@unap.edu.pe

³⁵ Ing. Estadístico e Informático, Doctor en Ciencias de la Computación, Universidad Nacional del Altiplano de Puno, correo electrónico: rlaura@unap.edu.pe

³⁶ Ing. Estadístico e Informático, Magister en Informática, Universidad Nacional del Altiplano de Puno, correo electrónico: aherrera@unap.edu.pe.

³⁷ Red de Investigación en Educación, Empresa y Sociedad – REDIEES. www.rediees.org

ESTIMACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS MEDIANTE MÉTODOS PROBABILÍSTICOS DE LA CUENCA ILAVE, PUNO PERÚ 2022

*Juan Reynaldo Paredes-Quispe, Elqui Yeye Pari Condori, Fred Torres-Cruz, Ramiro
Pedro Laura-Murillo, Alain Paul Herrera-Urtiaga*

RESUMEN

El estudio hidrológico es importante, para fines de diseño de obras hidráulicas y en temas de prevención de la gestión de riesgos, por lo que el caudal máximo que se registra durante el aumento inusual por eventos extremos supera los valores medios normales. El objetivo principal es determinar los caudales máximos de diseño mediante métodos convencionales probabilísticos en la cuenca Ilave, Puno – 2022. Los métodos que se usaron fueron la distribución Gumbel; Normal y Gamma (Pearson Tipo III). Se ha utilizado los datos de precipitación máxima de 24 horas al año, de la estación pluviométrica de Ilave, provincia de El Collao, región de Puno - Perú, la estimación de los caudales máximos de diseño fueron procesados por el método de Servicio de Conservación de Suelos (SCS) y el hidrograma unitario. Cuyos resultados alcanzados fueron: mediante la distribución Gumbel una estimación de caudal máximo de diseño aproximado de 141.6 m³/s, mediante la distribución Normal una estimación de caudal máximo de diseño aproximado de 175.5 m³/s y mediante la distribución Gamma (Pearson Tipo III) una estimación de caudal máximo de diseño aproximado de 168.2 m³/s. Llegando a la conclusión que la distribución normal es la de mejor ajuste a los datos de precipitación máxima de 24 horas al año, por el método de máximo verosimilitud (maximum likelihood) y por mostrar menor variabilidad en la estimación por tiempos de retorno (TR).

Palabras Clave: caudal máximo; cuenca; estimación; precipitación máxima; tiempo de retorno.

ABSTRACT

The hydrological study is important, for purposes of design of hydraulic works and in issues of prevention of risk management, the maximum flow rate that is recorded during the unusual increase by extreme events, exceeding the normal average values. The main objective is to determine the maximum design flows using conventional probabilistic methods in the Ilave basin, Puno - 2022. The methods used were the Gumbel distribution; Normal and Gamma (Pearson Type III). It has been considered the maximum precipitation data to 24 hours to year from Ilave station from El Collao province, Puno region – Perú country, the estimation of the maximum design flows was processed by the soil conservation service (SCS) method and the unit hydrograph. Whose results were achieved through the Gumbel distribution an approximate maximum design flow estimate of 141.6 m³/s, using de normal distribution, an approximate maximum design flow estimate of 175.5 m³/s and by means of the Gamma distribution (Pearson Tipo III) an estimation of approximate maximum flow of 168.2 m³/s. Concluding that the normal distribution is the one with the best fit to the maximum precipitation data for 24 hours a year, by the maximum likelihood method and by showing less variability in the estimation by return times (TR).

Keywords: maximum flow; basin; estimation; precipitation; return time.

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se plantea como problema general: ¿Cuánto son los caudales máximos de diseño usando métodos convencionales probabilísticos en la cuenca Ilave, Puno - 2022? Como también se plantean los problemas específicos: ¿Cuánto es los Caudales máximos de diseño mediante la distribución Gumbel en la cuenca Ilave, Puno - 2022?, ¿Cuánto es los Caudales máximos de diseño mediante la distribución normal en la cuenca Ilave, Puno - 2022? Y ¿Cuánto es los Caudales máximos de diseño mediante Gamma (Pearson Tipo III) en la cuenca Ilave, Puno - 2022?

Se propone una investigación para calcular los caudales máximos de diseño en la cuenca Ilave, Puno, utilizando modelos hidrológicos y modelaciones probabilísticas. La justificación incluye aspectos metodológicos, sociales, económicos y ambientales. Los objetivos generales son calcular los caudales máximos de diseño mediante métodos convencionales probabilísticos y los objetivos específicos incluyen determinar los caudales máximos de diseño mediante la distribución Gumbel, la distribución normal y la distribución Gamma (Pearson Tipo III). En la hipótesis general se plantea que: los caudales máximos de diseño mediante métodos convencionales probabilísticos son iguales en la cuenca Ilave, Puno – 2022. y las hipótesis específicas incluyen que los caudales máximos de diseño mediante la distribución Gumbel son similares a los caudales máximos de diseño mediante la distribución normal o iguales a los demás métodos los caudales máximos de diseño mediante Gamma (Pearson Tipo III), son iguales a los demás métodos.

MATERIAL Y MÉTODOS

Tipo y diseño de investigación

La metodología de la investigación “Estimación de caudales máximos de diseño mediante métodos convencionales probabilísticos en la cuenca Ilave, Puno – 2022” es de tipo cuantitativo y su objetivo es recopilar información a partir de los conocimientos teóricos y prácticos adquiridos durante la carrera, con el fin de resolver los problemas investigados. La

metodología cuantitativa implica el uso de técnicas para acercarse a una población y estimar sus características, discusiones, referencias o demandas. Además, se utiliza la recopilación de datos para comprobar hipótesis basadas en medir y analizar los resultados con la estadística. La investigación también busca establecer asociaciones puras entre variables de interés y determinar relaciones causales.

Específicamente, se busca determinar los caudales máximos de diseño en la cuenca Ilave, Puno mediante el uso de métodos convencionales probabilísticos. Para ello, se realizará una recopilación de datos relevantes y se aplicarán técnicas estadísticas para analizar los resultados y obtener las estimaciones deseadas. El enfoque cuantitativo permitirá una evaluación objetiva y sistemática de los datos recopilados y se utilizarán modelos matemáticos para comprender mejor el comportamiento de los caudales máximos en la cuenca Ilave.

Variables y operacionalización

En este trabajo se estudian métodos convencionales de distribución probabilística como variable dependiente, utilizando técnicas de cálculo Gumbel, log Normal y Gamma (Pearson Tipo III), con parámetros de forma, ubicación y escala. La variable independiente es el caudal máximo de diseño como plantea Chow et al. (1994) examina las características geomorfológicas de las cuencas hidrográficas y utiliza el caudal máximo de diseño como variable independiente. Se miden los máximos mensuales de precipitación y se calcula la probabilidad de eventos en un período determinado (tiempo de retorno) para implementar los caudales máximos de diseño basados en factores como área, pendiente y frecuencia de drenaje. La dimensión del tiempo de retorno se divide en indicadores de 2, 10, 50, 100 y 200 años.

Población y muestra

La investigación realizada así como dijo Arias (2012) se enfoca en determinar los caudales máximos de diseño en la cuenca de Ilave, utilizando métodos convencionales probabilísticos. La población estudiada son los datos de caudales obtenidos de estaciones pluviométricas y la muestra es una parte representativa de la población. El tipo de muestreo es no probabilístico y se evalúan diferentes tiempos de retorno para determinar la distribución

de probabilidad. La variable dependiente es la distribución de probabilidad y la variable independiente es el caudal máximo. Las técnicas de recolección de datos incluyen la observación directa, entrevistas y herramientas como archivos, cuestionarios y sistemas de información geográfica. La validez y confiabilidad de las técnicas e instrumentos se evalúan en relación con los métodos de investigación utilizados. En general, el estudio se enfoca en solucionar un problema existente y aportar nuevos hechos a través de un enfoque aplicado y no experimental.

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

En la Tabla 1 se consideran parámetros de validez para nuestro estudio.

Tabla 9.

Parámetros de Validez

Rango	Magnitud
0.53 a menos	Validez nula
0.54 a 0.65	Validez baja
0.60 a 0.65	Válida
0.66 a 0.71	Muy válida
0.72 a 0.99	Excelente validez
1.00	Validez perfecta

Nota: tomado de Oseda et al. (2015)

Para validar las variables planteadas en la estimación de los caudales máximos de diseño mediante técnicas convencionales probabilísticos en la cuenca Ilave, Puno – 2022, se tuvo la evaluación por pares mostrados en la Tabla 2:

Tabla 10

Validez de contenido de las variables

N°	Título profesional	Apellidos y nombres	DNI	CIP	Dictamen	Evaluación
1	Ingeniero Civil	Deza Ramos, Darwin	42477401	128272	0.954	0.933
2	Ingeniero Civil	Coyla Idme, Leonel	02146851	46961	0.927	
3	Ingeniero Civil	Quispe Quea, Juan Pablo	01345604	87217	0.919	

Nota: elaboración propia.

Métodos de análisis de datos

Para el análisis de datos, se utilizó la técnica de estadística descriptiva y se procesaron los datos con Microsoft Excel. Además, se compararon los resultados con programas de hidrología, como HidrosEsta, HyFran Plus, y ArcGIS. Se identificaron estaciones meteorológicas e hidrométricas para recopilar datos de precipitación y características de la cuenca, y se utilizó un SIG (Sistema de Información Geográfica) durante la caracterización geomorfológica. Finalmente, se usó el software HEC HMS para determinar las cantidades máximas de lluvia.

Procedimientos

Se adquirieron los datos de precipitación máxima diaria de la cuenca del Ilave de 1966 a 2021 con permiso de SENAMHI-Puno y complementados con la búsqueda de datos. Se visitaron expertos en hidrología y drenaje de la región de Puno, y se utilizó software GeoHMS y HecHMS para estimar los caudales máximos. Los datos se procesaron con la ayuda de expertos en hidrología con experiencia en el uso de estos programas.

RESULTADOS

Tabla 11

Precipitaciones máximas en mm/día/anual de la cuenca Ilave 1964-1958

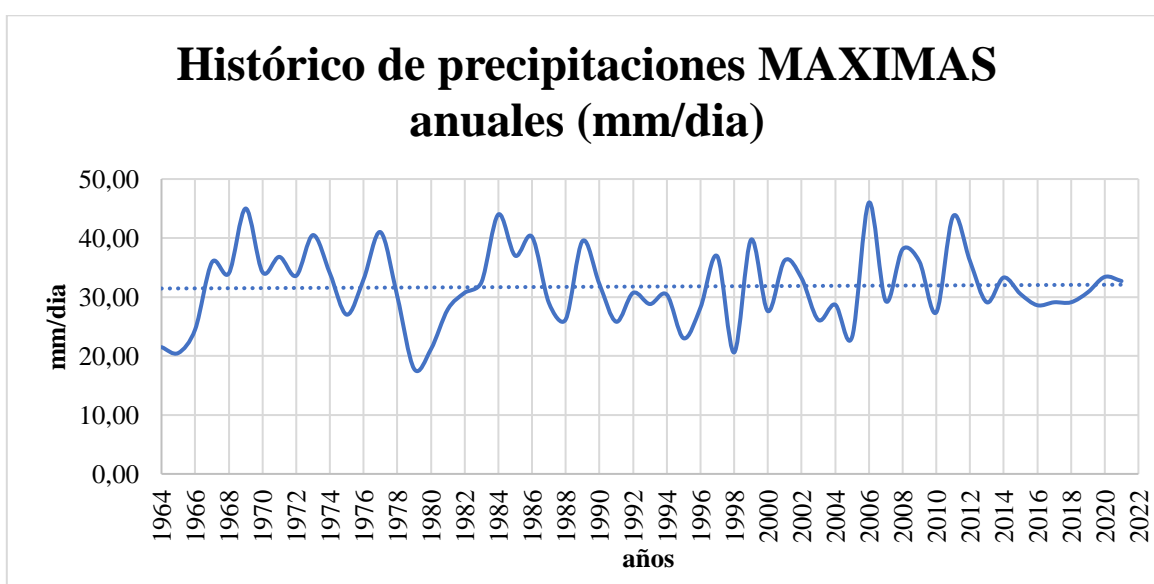
años	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78
precipMax (mm/día/anual)	17.81	20.5	20.6	21.16	21.5	23	23.2	24.5	25.8	26.1	26.2	27	27.4	27.6	27.91
años	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93
precipMax (mm/día/anual)	28.2	28.6	28.7	28.8	29	29.1	29.1	29.1	29.3	30.1	30.4	30.5	30.7	30.72	30.8
años	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08
precipMax (mm/día/anual)	32.2	32.52	32.7	33	33.2	33.3	33.4	33.6	34	34	34.2	35.9	36	36.1	36.2
años	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21		
precipMax (mm/día/anual)	36.8	36.9	37	38.1	39.5	39.7	40.2	40.5	41	43.7	44	45	46		

Nota: SENAMHI – Puno, elaboración del investigador.

En la Tabla se presentan los registros de precipitaciones máximas diarias de 24 horas en milímetros (mm) en la región de Puno desde el año 1964 hasta 2021, un total de 58 años. Según los registros, en 1964 se tuvo la más baja precipitación (17.81mm) y en 2021 se tuvo la más alta (46.00mm). Durante los años 1977 a 1980, no se registraron las precipitaciones en la región de Puno, pero los valores para esos años se estimaron a través de un modelamiento matemático lineal simple de los años previos.

Figura 1

Histórico de precipitaciones máximas anuales (mm/día) Ilave

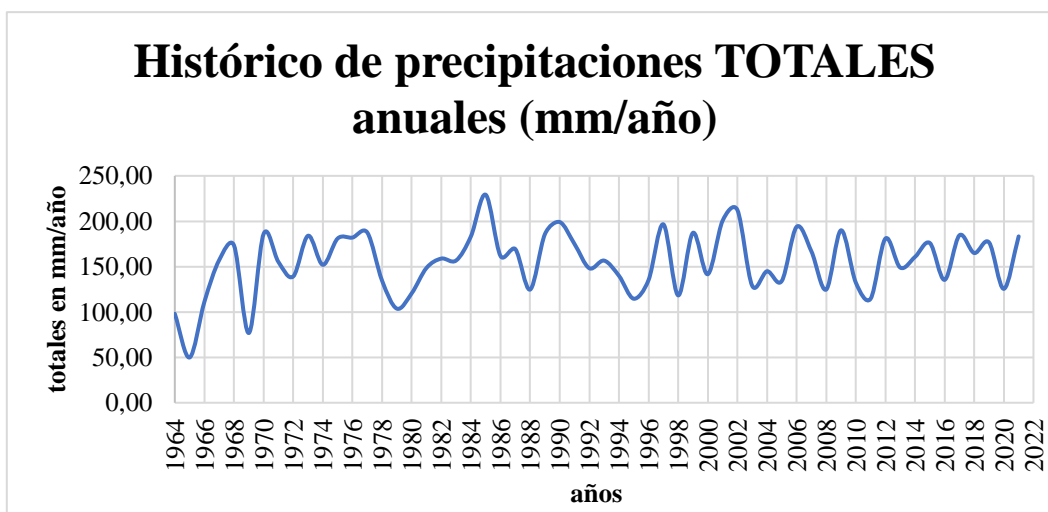


Nota: elaboración propia.

La Figura muestra la historia de precipitaciones máximas anuales en mm con una tendencia regular y altibajos. Entre 1968 y 1972 hubo precipitaciones por encima del promedio de 31.76mm, mientras que entre 1980 y 1986 hubo precipitaciones fuertes en la cuenca del río Ilave que superaron los 40mm. Hubo escasez de precipitaciones entre 1990 y 1996, pero en 2006 hubo una fuerte precipitación. En promedio, cada 10 a 12 años se registran precipitaciones similares en la cuenca del río Ilave.

Figura 2

Histórico de precipitaciones totales anuales (mm/año) - Ilave

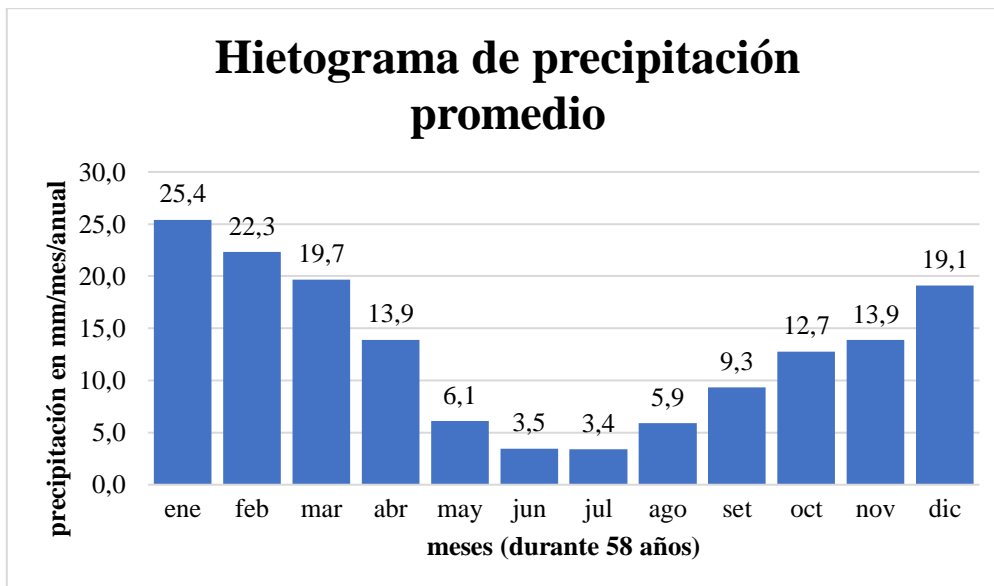


Nota: elaboración propia.

En la Figura se muestra el histórico de precipitaciones totales anuales en mm con una tendencia lineal regular. Destaca el año 1986 por las inundaciones en la región de Puno y en 2002 hubo inundaciones moderadas. La tendencia de fuertes precipitaciones está entre 15 a 20 años. Hubo sequías fuertes de 1964 a 1970 y sequías moderadas en 1979, 1994 y 2010 en el altiplano peruano.

Figura 3

Hietograma de precipitaciones promedio mensual (mm/mes) - Ilave

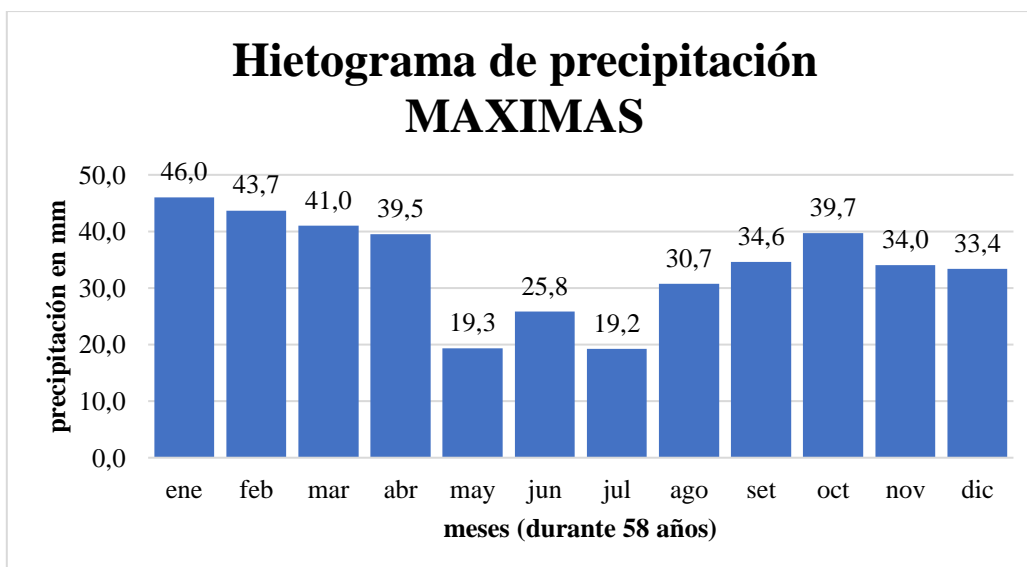


Nota: elaboración propia.

La Figura muestra que los meses con más precipitación son enero a marzo y octubre a diciembre, mientras que abril a setiembre son de precipitaciones bajas.

Figura 4

Hietograma de precipitaciones máximas por mes (mm/mes) – Ilave.



Nota: elaboración propia.

La Figura muestra una tendencia irregular en el acumulado de precipitaciones máximas anuales, con los meses de enero, febrero, marzo y abril teniendo la mayor acumulación de precipitaciones y los meses de mayo, junio y julio siendo de menor acumulación.

Objetivo específico 1:

Según el objetivo determinar los caudales máximos de diseño mediante la distribución Gumbel para modelar la distribución máxima de precipitaciones anuales de 24 horas. Los valores se estimaron con los parámetros de posición $U=28.57$ y de variabilidad $\alpha=6.0862$

Además, se utilizó el software Hidroesta2 para probar la bondad de ajuste a la distribución Gumbel, utilizando la prueba estadística de Smirnov-Kolmogorov,

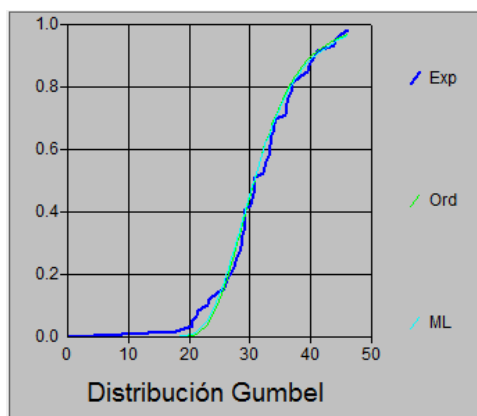
El ajuste de los datos de precipitación a la distribución de probabilidad de Gumbel se realizó con momentos ordinarios. La prueba estadística Smirnov-Kolmogorov demostró que los datos se ajustan a la distribución con un nivel de significación del 5%, con un delta teórico de 0.0744 que es menor que el delta tabular de 0.1786. Los parámetros de la distribución Gumbel son de 28.8568 para el parámetro de posición (μ) y 5.0307 para el parámetro de escala (alfa).

Con momentos lineales:

- Parámetro de posición (μ)= 28.7001
- Parámetro de escala (alfal)= 5.3021

Figura 5

Ajuste de precipitaciones máximas por la distribución Gumbel



Nota: elaboración propia.

La Figura muestra la tendencia acumulada de las precipitaciones máximas de 24 horas en la cuenca llave y la estimación con la distribución Gumbel, mostrando un buen ajuste ya que la gráfica de la distribución Gumbel tiene semejanza con la gráfica acumulada de los datos originales.

Tabla 12

Probabilidades de las precipitaciones para distintos tiempos de retorno, intervalos de confianza y caudales máximos estimados con la distribución Gumbel

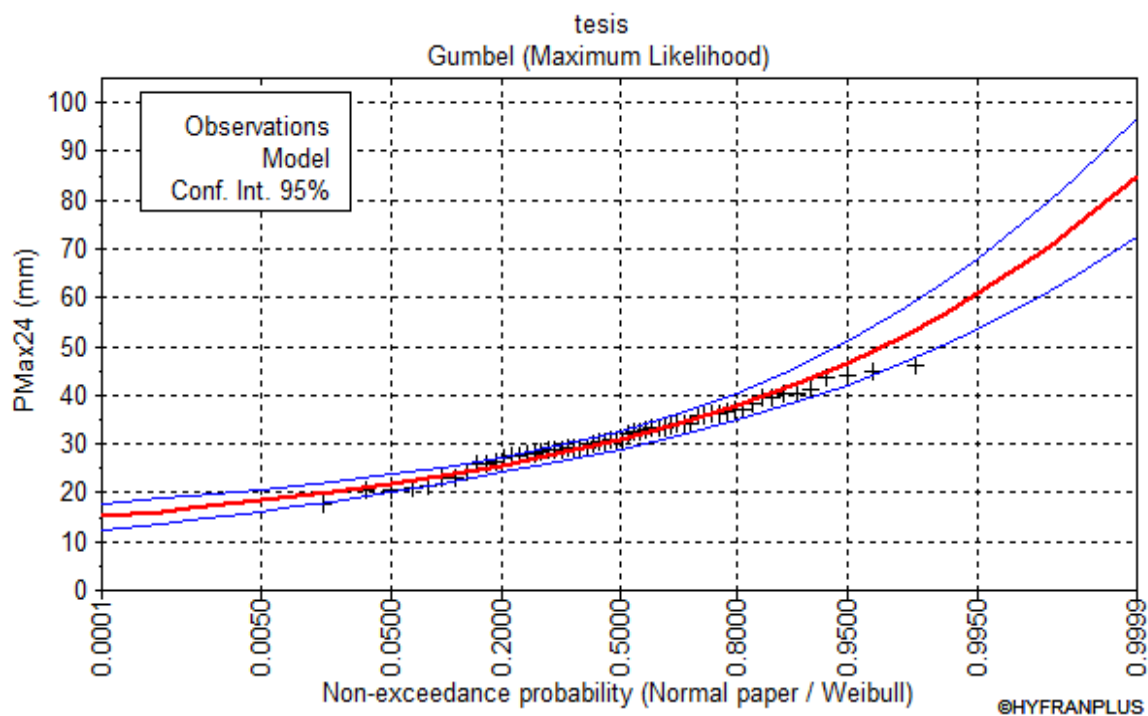
TR	probabilida d	Precipitació n	DesvStand ar	interval conf(95%)	Diferenci a	caudal max m ³ /s
200	0.995	60.8	3.69	53.6	68	3305.7
100	0.99	56.6	3.26	50.2	63	3002.8
75	0.9867	54.8	3.09	48.8	60.9	2679.5
50	0.98	52.3	2.84	46.8	57.9	2255.7
20	0.95	46.6	2.28	42.2	51.1	1406.5
10	0.9	42.3	1.86	38.6	45.9	911.8
5	0.8	37.7	1.44	34.9	40.5	5.6
3	0.6667	34.1	1.15	31.8	36.3	4.5
2	0.5	30.8	0.936	29	32.6	3.6

Nota: elaboración propia.

Para tiempos de retorno de 2, 10, 50 y 100 años, se estimaron precipitaciones máximas de 24 horas en 30.8, 42.3, 52.3 y 56.6 mm respectivamente, lo cual a su vez estimó los caudales máximos de diseño en 141.6, 911.8, 2255.7 y 3002.8 m³/s en la cuenca Ilave, cerca al punto más crítico que es el puente internacional de Ilave

Figura 6

Tendencia de precipitaciones máximas por la distribución Gumbel



Nota: elaboración propia

La Figura muestra un buen ajuste entre las precipitaciones máximas de 24 horas en la cuenca de Ilave y la distribución Gumbel, ya que la mayoría de los puntos están dentro de los límites inferior y superior representados por el color azul.

Objetivo específico 2:

La distribución normal se utiliza para modelar los datos de precipitación máxima de 24 horas anuales en la cuenca Ilave muestra los valores estimados para la distribución normal (parámetro de posición $\mu=31.76$ y parámetro de dispersión $\sigma=6.45$).

Además, se utiliza el software Hidroesta2 para realizar la prueba de bondad de ajuste a la distribución normal, mediante la prueba estadística de Smirnov-Kolmogorov, y se

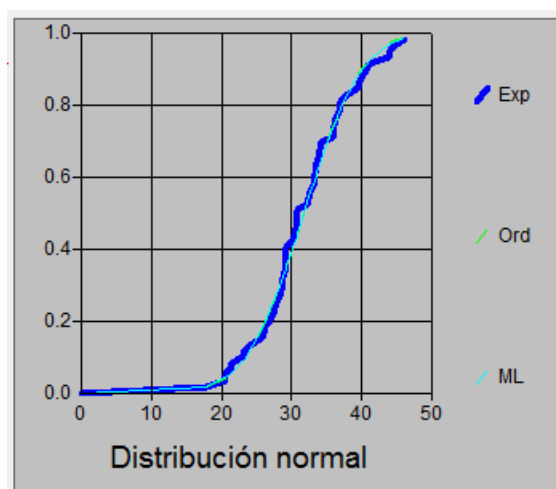
encuentra que los datos se ajustan a la distribución normal con un nivel de significación del 5%. Los parámetros de la distribución normal con momentos ordinarios son el parámetro de localización (X_m)= 31.7605 y el de escala (S)= 6.4521

Con momentos lineales:

- Media lineal (X_l)= 31.7605
- Desviación estándar lineal (S_l)= 6.514

Figura 7

Ajuste de precipitaciones máximas por la distribución Normal



Nota: elaboración propia.

En la Figura se muestra un buen ajuste entre la tendencia acumulada de las precipitaciones máximas de 24 horas en la cuenca de Ilave y la estimación con la distribución Normal, ya que ambas siguen una misma tendencia ascendente acelerado entre los 20 y 40 años y desacelerado después de los 40 años.

Tabla 13

Probabilidades de las precipitaciones para distintos tiempos de retorno, intervalos de confianza y caudales máximos estimados con la distribución Normal

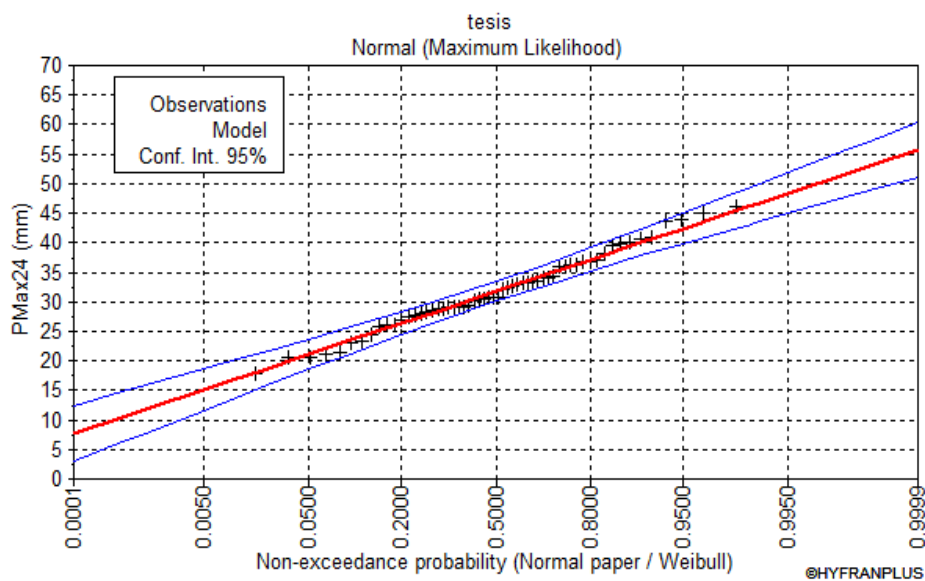
TR	Probabilidad	Precipitación	DesvStand	interval		Diferencia	caudal
				conf(95%)			max
							m³/s
200	0.995	48.4	1.77	44.9	51.9	7	1540.5
100	0.99	46.8	1.64	43.6	50	6.4	1433.4
75	0.9867	46.1	1.58	43	49.2	6.2	1340.2
50	0.98	45	1.5	42.1	48	5.9	1203.8
20	0.95	42.4	1.31	39.8	44.9	5.1	922.0
10	0.9	40	1.15	37.8	42.3	4.5	690.1
5	0.8	37.2	0.988	35.3	39.1	3.8	
3	0.6667	34.5	0.886	32.8	36.3	3.5	
2	0.5	31.8	0.847	30.1	33.4	3.3	175.5

Nota: elaboración propia.

La Tabla se muestra los resultados de la probabilidad de las precipitaciones máximas de 24 horas anuales en términos de tiempos de retorno, procesados por HyFran Plus. Además, se estimaron los caudales máximos de diseño a partir de las precipitaciones máximas estimadas por la distribución normal de probabilidades con Hec HMS 4.10. Los valores estimados de las precipitaciones máximas de 24 horas para los tiempos de retorno de 2, 10, 50 y 100 años son 31.8, 40.0, 45.0 y 46.8 mm, lo que estima 175.5, 690.1, 1203.8 y 1433.4 m³/s de caudales máximos de diseño para la cuenca Ilave cerca al punto más crítico, que es el puente internacional de Ilave.

Figura 8

Tendencia de precipitaciones máximas por la distribución Normal



Nota: elaboración propia.

El ajuste de las precipitaciones máximas de 24 horas en la cuenca de Ilave con la distribución Normal se muestra como bueno en la Figura, ya que la mayoría de los puntos están dentro de los límites inferior y superior.

Objetivo específico 3:

Donde se estimar los caudales máximos de diseño mediante la distribución Gamma (Pearson Tipo III), la cual es aplicada para describir la distribución de probabilidad de picos decrecientes de máximos anuales. Se usó una transformación log para reducir la asimetría. La Tabla 9 muestra los valores estimados de la distribución con parámetros $\alpha = 1.6052$, $\lambda = 105.55$ y $M = -33.998$. Además, se realizó una prueba de bondad de ajuste a la distribución Gamma con Smirnov-Kolmogorov, y los datos se ajustaron a la distribución Gamma con un nivel de significación del 5% con el parámetro de forma (γ)= 23.9355 y el de escala (β)= 1.3269

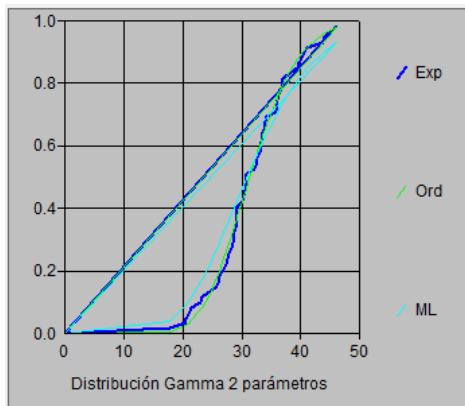
Con momentos lineales:

- Parámetro de forma (γ)= 12.1948

- Parámetro de escala (beta)= 2.6044

Figura 9

Ajuste de precipitaciones máximas por la distribución Gamma (Pearson Tipo III)



Nota: elaboración propia.

La Figura muestra que la tendencia acumulada de las precipitaciones máximas de 24 horas en la cuenca de Ilave se ajusta bien a la distribución Gamma (Pearson Tipo III) con una buena relación entre ambos, siguiendo una tendencia ascendente acelerado entre los 20 a 40 años y desacelerado más allá de los 40 años.

Tabla 14

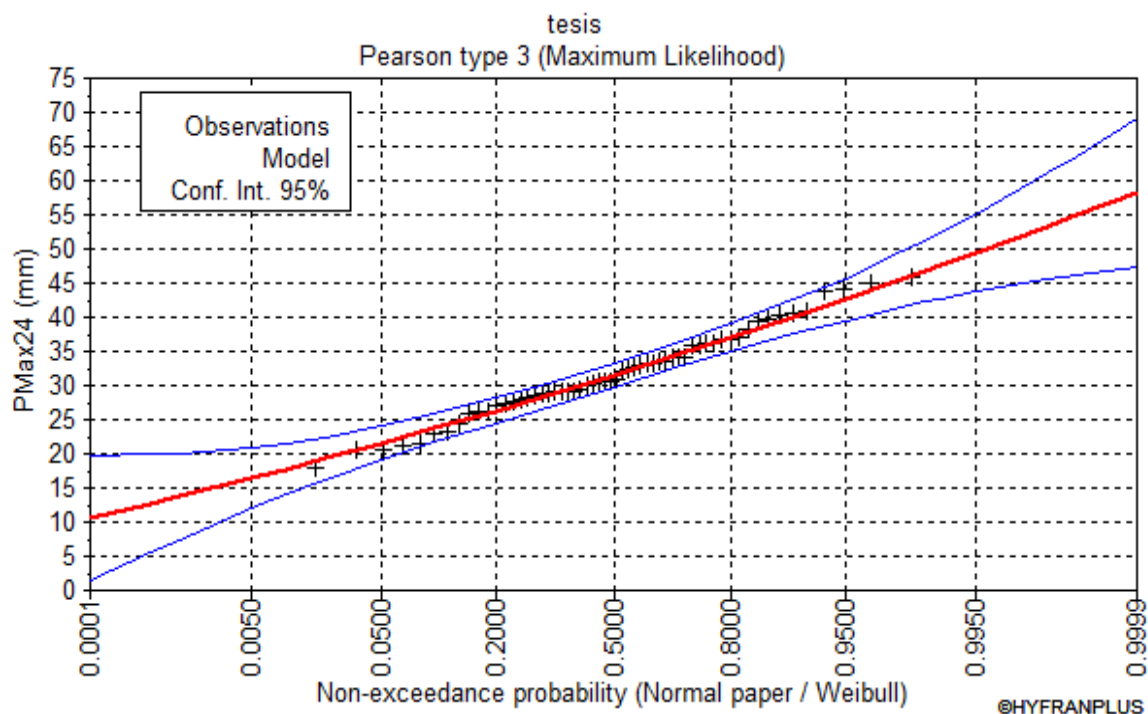
Probabilidades de las precipitaciones para distintos tiempos de retorno, intervalos de confianza y caudales máximos estimados con la distribución Gamma (Pearson Tipo III)

TR	probabilida d	Precipitació n	DesvStanda r	interval conf(95%)		Diferenci a	caudal max m ³ /s
200	0.995	49.4	2.92	43.7	55.1	11.4	1671.2
100	0.99	47.6	2.48	42.7	52.4	9.7	1543.3
75	0.9867	46.8	2.3	42.2	51.3	9.1	1433.4
50	0.98	45.6	2.06	41.5	49.6	8.1	1275.3
20	0.95	42.6	1.57	39.6	45.7	6.1	942.6
10	0.9	40.1	1.26	37.6	42.5	4.9	699.2
5	0.8	37.1	1.03	35.1	39.1	4	
3	0.6667	34.4	0.936	32.6	36.2	3.6	
2	0.5	31.6	0.902	29.8	33.3	3.5	168.2

Nota: elaboración propia.

Figura 10

Tendencia de precipitaciones máximas por la distribución Gamma (Pearson tipo III)



Nota: elaboración propia.

Los resultados de la Tabla 10 muestran estimaciones de precipitaciones máximas anuales y caudales máximos de diseño para la cuenca Ilave. La estimación se basa en la distribución Gamma (Pearson Tipo III) y se presentan para tiempos de retorno de 2, 10, 50 y 100 años, con valores de 31.6, 40.1, 45.6 y 47.6 mm y 168.2, 699.2, 1275.3 y 1533.4 m³/s respectivamente. Estos valores se refieren al punto más crítico de la cuenca, el puente internacional de Ilave.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Discusión

En la cuenca de Ayaviri-Puno-Perú, se estimaron las precipitaciones máximas de 24 horas por el método de la distribución de probabilidad de Gumbel para los tiempos de retorno de 50, 100 y 200 años, siendo estas 52.865, 57.330 y 61.781 mm respectivamente. Además, los caudales máximos fueron calculados por el método de Mac-Math, siendo estos 270.305, 293.135 y 315.893 m³/s.

Tabla 15

Estimaciones de precipitaciones máximas de 24 horas y caudales máximos según periodos de retorno por la distribución Gumbel

Distribucion Gumbel	Periodos de retorno en años			
	50	100	200	
precipMax	52.865	57.33	61.781	mm
caudalMax	270.305	293.135	315.893	m ³ /s

Nota: elaboración propia.

La estimación de las precipitaciones máximas de 24 horas por el modelo de distribución de probabilidades de Gumbel tiene similitudes para los tiempos de retorno de 50 y 100 años, pero existe una fuerte discrepancia en la estimación de los caudales máximos de diseño para los mismos tiempos de retorno. La estimación de los caudales máximos de diseño por el trabajo de Mamani es 270.31 m³/s para el tiempo de retorno de 50 años y 293.14 m³/s para el tiempo de retorno de 100 años, mientras que la estimación en el trabajo actual es 2255.7 m³/s y 3002.8 m³/s respectivamente para los mismos tiempos de retorno.

El estudio de Mamani estimó la precipitación máxima de 24 horas para los tiempos de retorno de 50, 100 y 200 años utilizando el método de distribución de probabilidad Normal, obteniendo valores de 40.32 mm, 41.66 mm y 42.88 mm, respectivamente. Además, los caudales máximos fueron calculados utilizando el método de Mac-Math y los resultados fueron 206.161 m³/s, 213.012 m³/s y 219.250 m³/s.

Tabla 16

Estimaciones de precipitaciones máximas de 24 horas y caudales máximos según periodos de retorno por la distribución Normal

Distribución	Periodos de retorno en años			
	50	100	200	
Normal				
precipMax	40.32	41.66	42.88	mm
caudalMax	206.161	213.012	219.25	m3/s

En el trabajo de Mamani, las precipitaciones máximas de 24 horas estimadas para los tiempos de retorno de 50 y 100 años son similares a las estimadas en otro trabajo con el modelo de distribución de probabilidades Normal (40.32mm y 41.66mm frente a 45.00mm y 46.8mm). Sin embargo, hay una fuerte discrepancia en la estimación de los caudales máximos de diseño, ya que para el tiempo de retorno de 50 años el caudal en el trabajo de Mamani es de 206.16 m3/s y en el otro trabajo es de 1203.8 m3/s. Para el tiempo de retorno de 100 años, el caudal en el trabajo de Mamani es de 213.012 m3/s y en el otro trabajo es de 1433.4 m3/s.

En el trabajo de Mamani en la cuenca de Ayaviri, se estimó que la precipitación máxima de 24 horas para los tiempos de retorno de 50, 100 y 200 años, usando el modelo de distribución de probabilidad de Gamma (Pearson Tipo III), fueron de 52.865mm, 57.33mm y 61.781mm respectivamente. Además, los caudales máximos estimados por el método de Mac-Math fueron de 270.305m3/s, 293.135m3/s y 315.893m3/s para los mismos tiempos de retorno.

Tabla 17

Estimaciones de precipitaciones máximas de 24 horas y caudales máximos según periodos de retorno por la distribución Pearson Tipo III

Distribución	Periodos de retorno en años			
	50	100	200	
Pearson T III				
precipMax	52.865	57.33	61.781	mm
caudalMax	270.305	293.135	315.893	m3/s

Nota: elaboración propia

Existe una cierta similitud entre las estimaciones de las precipitaciones máximas de 24 horas para los tiempos de retorno de 50 y 100 años en los trabajos de Mamani y el nuestro. Sin embargo, hay una fuerte discrepancia en las estimaciones de caudales máximos de diseño para los mismos tiempos de retorno. La estimación de Mamani es significativamente menor en comparación con la de nuestro trabajo.

Conclusiones

- El modelo de distribución de probabilidades de Gumbel estima que la precipitación máxima de 24 horas para tiempos de retorno de 2, 10, 50 y 100 años será de 30.8 mm a 56.6 mm, lo que equivale a 141.6 m³/s a 3002.8 m³/s de caudal máximo de diseño para la cuenca Ilave en el punto crítico que es el puente internacional de Ilave.
- El modelo de distribución de probabilidades Normal estima que la precipitación máxima de 24 horas para tiempos de retorno de 2, 10, 50 y 100 años será de 31.8 mm a 46.8 mm, lo que equivale a 175.5 m³/s a 1433.4 m³/s de caudal máximo de diseño para la cuenca Ilave en el punto crítico que es el puente internacional de Ilave.
- El modelo de distribución de probabilidades Gamma (Pearson Tipo III) estima que la precipitación máxima de 24 horas para tiempos de retorno de 2, 10, 50 y 100 años será de 31.6 mm a 47.6 mm, lo que equivale a 168.2 m³/s a 1533.4 m³/s de caudal máximo de diseño para la cuenca Ilave en el punto crítico que es el puente internacional de Ilave.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez, A. J., Orduña, L. M. y Montañés, C. G. (2014). Análisis y selección de modelos estadísticos para el ajuste de la ley de frecuencia de caudales máximos anuales en España. *Revista Digital del Cedex*, (174), 5-31.
- Arias, F. G. (2012). *El proyecto de investigación. Introducción a la metodología científica* (6ta edición). Episteme.
- Baena, G. M. E. (2017). *Metodología de la investigación* (3a edición). Grupo Editorial Patria.
- Beven, K. (2012). *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*. Wiley.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781119951001.ch3>
- Breña, A. F. y Jacobo, M. A. (2006). *Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial*. Universidad Autónoma Metropolitana.
- Chavarría, L., Guzmán, I., Quesada, F. y Watson, F. (2020). *Determinación del caudal ambiental requerido para río Pejibaye mediante la implementación de una metodología de cálculo hidrobiológica, considerando variables de cambio climático*. [Tesis de pregrado]. Repositorio Instituto Tecnológico de Costa Rica.
<https://hdl.handle.net/2238/11562>
- Chen, L. y Wang, L. (2018). Recent advance in earth observation big data for hydrology. *Big Earth Data*, 2(1), 86 - 107. <https://doi.org/10.1080/20964471.2018.1435072>
- Domínguez, M. C., Medina, M. C. y Martínez, M. I. (2018). *Metodología de investigación para la educación y la diversidad*. Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- Fattorelli, S. y Fernández, P. C. (2011). *Diseño Hidrológico*. World Water Assessment Programme (WWAP).
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, M. P. (2018). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill Interamericana.
- Jain, S. K. y Singh, V. P. (2019). *Engineering Hydrology: An Introduction to Processes, Analysis, and Modeling*. McGraw - Hill Education.

- <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781259641978>
- Khan, M. A. (2015). *Flood Scour for Bridges and Highways: Prevention and Control of Soil Erosion*. McGraw - Hill Education. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071825078>
- Lujano, E. (2019). *Análisis regional de frecuencia para la estimación de caudales máximos en la cuenca amazónica del Perú*. Universidad Nacional del Altiplano.
- Mackenzie, L. D. (2019). *Water and Wastewater Engineering: Design Principles and Practice*. McGraw-Hill Education. <https://books.google.com.br/books?id=XypnwwEACAAJ>
- Mamani, G. (2021). *Determinación de caudales máximos de diseño mediante métodos convencionales probabilísticos en la subcuenca Ayaviri, Puno – 2020*. [Tesis de pregrado]. Repositorio Universidad César Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/59788>
- Mias, C. D. (2018). *Metodología de investigación, estadística aplicada e instrumentos neuropsicología: guía práctica para investigación*. Editorial Brujas.
- Oseña, D., Huamán, E., Ramos, E., Shimbucat, F., Zevallos, K. y Barrera, M. (2015). *Teoría y Práctica de la Investigación Científica*. Soluciones Gráficas SAC.
- Renaud, F. G., Sudmeier, K., Estrella, M. y Nehren, U. (2016). *Ecosystem-based disaster risk reduction and adaptation in practice*. Springer.
- Scheffran, J. (2020). Climate extremes and conflict dynamics. J. Sillmann, S. Sippel, S. Russo (eds.) *Climate Extremes and Their Implications for Impact and Risk Assessment*. Elsevier. (pp. 293 – 315). <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128148952000161>
- Schleussner, C. F. y Guillod, B. (2020). Avoiding impacts and impacts avoided: Impact science to inform adaptation action and policy-relevant assessments. J. Sillmann, S. Sippel, S. Russo, (eds.) *Climate Extremes and Their Implications for Impact and Risk Assessment*. Elsevier. (pp. 317 – 339). <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128148952000173>

Varouchakis, E. A. (2019). Geostatistics: Mathematical and Statistical Basis. G. Corzo, E. A. Varouchakis (eds). *Spatiotemporal Analysis of Extreme Hydrological Events*. Elsevier. (pp. 1 – 38).
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012811689000001X>

Vergara, L. E. (2020). *Simulación y pronóstico de caudales diarios del Río Amazonas usando un enfoque híbrido Wavelet y Redes Neuronales*. [Tesis de maestría]. Repositorio Universidad Nacional Agraria La Molina.