

Ecuaciones empíricas para la estimación de las intensidades de lluvias máximas anuales de diferentes duraciones y períodos de retorno, Huaraz – Perú

Resumen

Toribio Reyes Rodríguez

Ingeniero Agrícola, Maestro en Ciencias e Ingeniería- Gestión Ambiental, Doctor en Economía, y Doctor en Ingeniería Ambiental. Dedicado al Diseño, Gestión, Evaluación de Impacto Ambiental e Investigación Científica de Obras Hidráulicas, Hidrología e Hidroeconomía.

<https://orcid.org/0000-0002-4017-6153>
treyes2@gmail.com

El objetivo del trabajo de investigación fue obtener ecuaciones empíricas de estimación de las intensidades de precipitaciones máximas anuales de diferentes duraciones y períodos de retorno en la ciudad de Huaraz, que sirvan para el diseño hidrológico de estructuras hidráulicas de drenaje pluvial. Las precipitaciones máximas anuales en 24 horas de la estación meteorológica Santiago Antúnez de Mayolo se ajustan mejor a la distribución de probabilidades Gumbel. Para este propósito, se empleó el software MINITAB 20. Con la ecuación de Dyck – Peschke, las precipitaciones máximas anuales se desagregaron para duraciones menores de 24 horas. Con estos valores desagregados se obtuvieron las ecuaciones empíricas de las intensidades de precipitaciones máximas anuales de diferentes duraciones en la estación meteorológica Santiago Antúnez de Mayolo. La ecuación de Koutsoyannis es la más adecuada para las intensidades de precipitación para duraciones menores de 24 horas y diferentes períodos de retorno para la estación meteorológica Santiago Antúnez de Mayolo – Huaraz.

Palabras clave: Intensidad de precipitación, Duración, Período de retorno, Distribución Gumbel

Cómo citar este artículo: Reyes Rodríguez, T. (2024). Ecuaciones empíricas para la estimación de las intensidades de lluvias máximas anuales de diferentes duraciones y períodos de retorno, Huaraz – Perú. *Aporte Santiaguino*, 17(2), Pág. 195–206. <https://doi.org/10.32911/as.2024.v17.n2.1194>

Recibido: 2024-09-20 | **Aceptado:** 2024-11-20



Empirical equations for estimating the intensities of maximum annual rainfall of different durations, Huaraz – Peru

The objective of the research work was to obtain empirical equations for estimating the intensities of maximum annual rainfall of different durations and return periods in the city of Huaraz, which serve for the hydrological design of hydraulic storm drainage structures. The maximum annual rainfall in 24 hours from the Santiago Antúnez de Mayolo meteorological station best fits the Gumbel probability distribution, for this purpose the MINITAB 20 software was used. With the Dyck – Peschke equation, the maximum annual rainfall was disaggregated for durations of less than 24 hours. With these disaggregated values, the empirical equations of the intensities of maximum annual rainfall of different durations at the Santiago Antúnez de Mayolo meteorological station were obtained. The Koutsoyannis equation is the most appropriate for precipitation intensities for durations less than 24 hours and different return periods for the Santiago Antúnez de Mayolo – Huaraz meteorological station.

Keywords: Precipitation intensity, Duration, Return period, Gumbel Distribution

Introducción

La ciudad de Huaraz se caracteriza por ser lluviosa. Por eso, se requiere realizar diseños de estructuras de drenaje pluvial tales como alcantarillas pluviales en las calles, zanjas de desvío y cunetas en las carreteras y otras estructuras de drenaje. Para la estimación de los caudales de diseño se emplea la ecuación racional o de Mac Math, siendo una de las variables la intensidad de la precipitación para una determinada duración y período de retorno.

En el Perú, se dispone de registros de precipitaciones máximas anuales en 24 horas. Pero, para precipitaciones máximas anuales con menos de 24 horas, los datos son escasos. Por ello, se tuvo como objetivo la generación de ecuaciones empíricas de las intensidades de lluvias máximas anuales de diferentes duraciones y períodos de retorno en la ciudad de Huaraz.

Yamoat et al. (2023) destaca la importancia de la propiedad de invariancia de escala temporal en los patrones de lluvia; es decir, la repetición de estos patrones a diferentes escalas temporales. Este comportamiento se tiene en cuenta en la predicción de eventos extremos como inundaciones o sequías.

A falta de datos de precipitaciones máximas de corta duración, se pueden utilizar los datos del satélite TRMM, que comprenden duraciones de 3 a 24 horas. Además, se constata que las precipitaciones máximas en intervalos de 5 minutos a 2 horas son bastante constantes en diferentes climas debido a la similitud de las tormentas convectivas (Awadallah, 2011).

Para la elaboración de las curvas de intensidad, duración y frecuencia (IDF), se necesitan datos de precipitaciones máximas anuales de alta resolución, obtenidos de una red densa de estaciones pluviométricas, con mediciones de al menos una vez por hora durante un periodo mínimo de 20 años. La modelización de las curvas IDF se basa en el supuesto de estacionariedad de la serie temporal; no obstante, en el contexto del cambio climático, este supuesto ya no es válido por que se requiere actualizar las curvas IDF (Kourtis & Tsihrintzis, 2022).

Según Hu y Ayyub (2019), los algoritmos de aprendizaje automático (ML) permiten reducir la escala temporal de las precipitaciones máximas anuales de 24 horas a escalas temporales menores. Las intensidades de precipitación de corta duración tienen un impacto significativo en el diseño de sistemas de drenaje pluvial.

La desagregación de las precipitaciones puede realizarse desde enfoque temporal como espacial. Las redes neuronales artificiales (RNA) permiten identificar, clasificar y predecir patrones no lineales en fenómenos naturales, como la agregación y desagregación de las precipitaciones (Kim & Singh, 2015).

Monjo y Mesenguer-Ruiz (2024) precisa que los valores del exponente de Hurst varían entre 0 y 1. Las series temporales se clasifican según este exponente. Así, un valor de $H = 0,5$ sugiere que la serie es aleatoria; si $0 < H < 0,50$ indica una serie antipersistente; y si $0,5 < H < 1,0$ señala una serie persistente. El exponente de Hurst se relaciona con la dimensión fractal D de la serie temporal mediante la siguiente ecuación $D = 2 - H$.

Gamarra (2021), en el artículo “Metodología para la estimación de parámetros de cálculo de tormentas de diseño con datos pluviométricos en Bolivia”, encontró que el exponente de la ecuación para la desagregación de las precipitaciones máximas anuales en 24 horas a otras precipitaciones máximas anuales de D minutos de duración varía de 0,231 a 0,377 con un valor promedio de 0,294. El valor de n se puede regionalizar en función a la latitud, longitud y altitud.

$$P_D = P_{24} \left(\frac{D}{1440} \right)^n \quad 1$$

Villón (2020) indica que la ecuación de Dyck – Peschke se emplea para la desagregación de las precipitaciones máximas anuales en 24 horas a otras precipitaciones máximas anuales de D minutos de duración

$$P_D = P_{24} \left(\frac{D}{1440} \right)^{1/4} \quad 2$$

En las ecuaciones (1) y (2), P_D designa la precipitación máxima anual (mm) para una duración de D minutos, que varía de 15 minutos a 1440 minutos. P_{24} designa la precipitación máxima anual (mm) en 24

horas y D representa la duración de la precipitación máxima anual en minutos.

Villón (2020) indica también que, para la agregación de las precipitaciones máximas anuales en 24 horas, a otras precipitaciones máximas anuales de D horas de duración ($D > 24$ horas), se emplea la ecuación de Dyck – Peschke

$$P_D = P_{24} D^{0.40} \quad 3$$

En la ecuación (3), P_D designa la precipitación máxima anual para una duración de D horas ($D > 24$ horas); P_{24} designa la precipitación máxima anual en 24 horas y D representa la duración de la precipitación máxima anual en horas.

Álvaro (2020) indica la ecuación de desagregación de precipitaciones máximas anuales en 24 horas empleadas en Brasil

$$P_D = \left(\frac{D}{24,9327 + 3,8346D^{0,7924}} \right) P_{24} \quad 4$$

En la ecuación (4), P_D representa la precipitación máxima anual en D minutos, D representa la duración de la precipitación, acotada a menos de 1440 minutos. Por otro lado, P_{24} designa la precipitación máxima anual medida en 24 horas, expresada en milímetros.

Gamarra (2021) indica que la ecuación de Grunsky se emplea en Bolivia para la desagregación de las precipitaciones máximas anuales en 24 horas a otras precipitaciones máximas anuales de D horas de duración.

$$P_D = P_{24} \left(\frac{D}{1440} \right)^{1/2} \quad 4$$

En la ecuación (5), P_D designa la precipitación máxima anual para una duración de D horas, P_{24} designa la precipitación máxima anual en 24 horas y D representa la duración de la precipitación máxima anual en minutos.

Priambodo et al. (2019) empleó la ecuación de Mononobe para la desagregación de las precipitaciones máximas anuales en 24 horas en la isla de Java (Indonesia) a otras precipitaciones máximas anuales de D minutos de duración.

$$P_D = P_{24} \left(\frac{D}{1440} \right)^{1/3} \quad 6$$

En la ecuación (6), P_D designa la precipitación máxima anual para una duración de D horas; P_{24} designa la precipitación máxima anual en 24 horas y D representa la duración de la precipitación máxima anual en minutos.

Linsley et al. (1988) precisa que para el análisis probabilístico se requieren por lo menos datos de 20 años de registro para que el análisis de frecuencias sea confiable.

Para obtener resultados confiables en los análisis probabilísticos, se requiere al menos 20 años de datos para incluir los ciclos meteorológicos que afectan las precipitaciones extremas.

Chow et al. (1994) indica las ecuaciones para la estimación de las intensidades de lluvias máximas anuales.

$$I = \frac{aT^b}{(D+c)} \quad 7$$

$$I = \frac{aT^b}{(D^c+d)} \quad 8$$

En las ecuaciones (7) y (8), I designa la intensidad máxima anual, T representa el período de retorno, D la duración; a , b , c y d son parámetros de las ecuaciones. A la ecuación también se conoce como la ecuación de Kimijima.

Pereyra-Díaz (2012), en su artículo “Dos modelos matemáticos no lineales para estimar la intensidad - duración - período de retorno de eventos de lluvia”, muestra la ecuación de Koutsoyiannis.

$$I = a \left(\frac{b - \ln(-\ln(1 - \frac{1}{T}))}{(D+c)^d} \right) \quad 9$$

En la ecuación (9), I designa la intensidad de la precipitación, T representa el período de retorno, D representa la duración de la precipitación máxima anual y a , b , c , d son parámetros de la ecuación.

McCuen (2005) precisa que para estimar el tiempo de concentración de una cuenca basado en el análisis de la onda cinemática de la escorrentía superficial se emplea la ecuación

$$t_c = 6.978 \frac{L^{0.6} n^{0.6}}{i^{0.4} S_c^{0.3}} \quad 10$$

En la ecuación (10), t_c designa el tiempo de concentración (min), L representa la longitud de la superficie (m), n designa el coeficiente de rugosidad de Manning, i representa la intensidad de lluvia (mm/h) y S_c denota la pendiente de la superficie (m/m).

McCuen (2005) indica que el coeficiente de determinación múltiple (R^2) es igual a la proporción de la variación de la variable dependiente, que es explicada por la ecuación empírica. Alternativamente, el coeficiente de determinación es una medida estadística que indica la proporción de la variación de una variable dependiente que es explicada por una o más variables independientes en un modelo de regresión. Matemáticamente, se expresa de la siguiente manera:

$$R^2 = \frac{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad 11$$

En la ecuación (11), es la variable dependiente i predicha, y_i es la variable dependiente observada, es la media aritmética de la variable dependiente observada.

Materiales y métodos

Se emplearon los registros de las precipitaciones máximas anuales en 24 horas de la estación meteorológica Santiago Antúnez de Mayolo (Independencia – Huaraz) que se indica en la Tabla 1, desde el año 1996 hasta el año 2015. La estación meteorológica indicada estuvo ubicada en la siguiente coordenada geográfica: latitud $09^{\circ}30'S$, longitud $77^{\circ}31'W$ y altitud 3090 m.s.n.m.

Tabla 1

Precipitaciones máximas anuales en 24 horas, estación Santiago Antúnez de Mayolo

Año	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
P24, mm	26,6	52,5	47,4	43,0	28,0	34,8	40,5	22,4	37,7	35,8
Año	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
P24, mm	24,8	32,7	30,8	27,3	25,7	25,8	50,5	32,1	33,2	26,4

Nota. Datos obtenidos de SENAMHI (2015).

Es una aplicada, no experimental-relacional. El método de investigación empleado es el inductivo.

Las precipitaciones máximas anuales en 24 horas de la estación meteorológica Santiago Antúnez de Mayolo se sometieron a las pruebas de la bondad de ajuste con las distribuciones de probabilidades de valores extremos tipo I, lognormal – 2 y gamma. Para tal fin, se empleó el software MINITAB 20.

Las intensidades de precipitación para diferentes duraciones se obtuvieron con la ecuación de Dyck – Peschke.

$$I_D = I_{24} \left(\frac{1440}{D} \right)^{0.75} \quad 12$$

En la ecuación (12), I_D designa la intensidad de precipitación máxima anual en D minutos (mm/h); I_{24} denota la intensidad de precipitación máxima anual en 24 horas (mm/h); D representa la duración de la precipitación máxima anual en D minutos.

Las intensidades de las precipitaciones máximas anuales obtenidas para diferentes duraciones y períodos de retorno se ajustaron a las ecuaciones de Chow (1994) y Koutsoyiannis, para la determinación de los parámetros de las ecuaciones indicadas se empleó el complemento solver de excel.

Resultados

Ubicación de la estación meteorológica

La estación meteorológica Santiago Antúnez de Mayolo estuvo ubicada en la ciudad universitaria Shancayán, Independencia, Huaraz (Perú). Fue desactivada en el año 2018 para la construcción del edificio de la Facultad de Ciencias Agrarias. Estuvo ubicada en las coordenadas geográficas (longitud: 77°31'W, latitud: 09°30'S, altitud:3090 m s. n. m.). La ubicación de la estación meteorológica se indica en la Figura 1.

Figura 1

Ubicación de la estación meteorológica Santiago Antúnez de Mayolo - Huaraz



Análisis comparativo de las ecuaciones de desagregación de las precipitaciones máximas anuales en 24 horas

Se realizaron comparaciones de las razones P_D/P_{24} para duraciones que varían entre 5 y 1440 minutos. En este análisis, las ecuaciones de desagregación de Grunsky, Mononobe, Dyck-Peschke y la propuesta por Álvaro (2020) proporcionan valores de precipitaciones máximas anuales en orden creciente.

Distribución de probabilidades adecuada para las precipitaciones máximas anuales en 24 horas

Las precipitaciones máximas anuales en 24 horas se ajustan mejor a la distribución de probabilidades de valores extremos tipo I (Gumbel), aunque también se

ajustan a la distribución de probabilidades gamma de dos parámetros y a la distribución lognormal de dos parámetros.

Prueba de hipótesis

H_0 : Las precipitaciones máximas anuales en 24 horas se ajustan a la distribución Gumbel

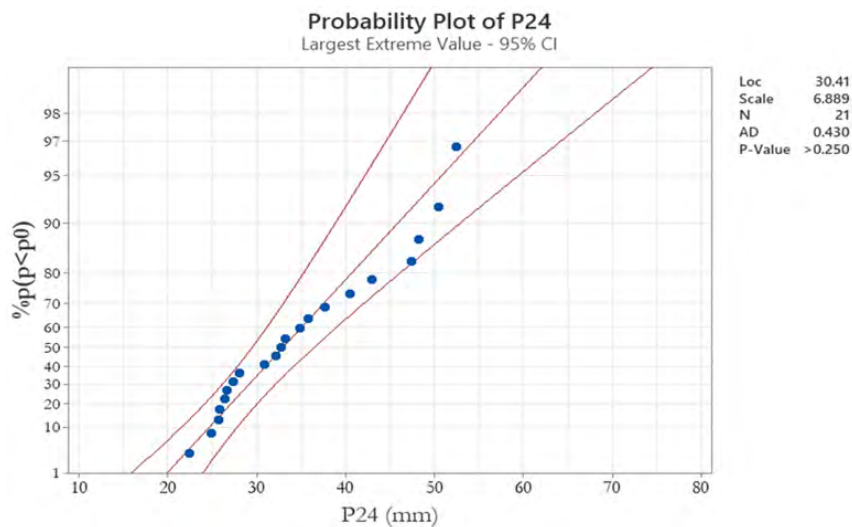
H_1 : Las precipitaciones máximas anuales en 24 horas no se ajustan a la distribución Gumbel

Decisión: $p > 0,05$ se acepta la hipótesis H_0

En la Figura 2, se indica el ajuste de los datos de precipitaciones máximas anuales en 24 horas a la distribución de probabilidades Gumbel.

Figura 2

Ajuste a la distribución de probabilidades Gumbel de las precipitaciones máximas anuales en 24 horas, estación Santiago Antúnez de Mayolo



Precipitaciones máximas anuales en 24 horas (P24) para diferentes períodos de retorno

En la Tabla 2, se indican las precipitaciones máximas anuales en 24 horas y los períodos de retorno

correspondientes en la estación meteorológica Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz.

Tabla 2*Precipitaciones máximas anuales en 24 horas y períodos de retorno en la estación Santiago Antúnez de Mayolo*

T(años)	2	5	10	25	50	100	200	500
P24(mm)	33,1	41,3	46,7	53,6	58,7	61,8	63,8	75,5

Intensidades, duraciones y períodos de retorno

En la Tabla 3, se indican las intensidades máximas anuales para diferentes duraciones y los períodos de retorno correspondientes en la estación meteorológica Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz.

Tabla 3*Intensidades (mm/h) – duraciones (min) y períodos de retorno (años), estación meteorológica Santiago Antúnez de Mayolo*

T (años)	2	5	10	25	50	100	200	500
Duración (min)	Intensidades (mm/h)							
10	57,3	71,5	80,9	92,8	101,7	107,0	110,5	130,8
30	25,2	31,4	35,5	40,7	44,6	47,0	48,5	57,4
45	18,6	23,2	26,2	30,0	32,9	34,6	35,8	42,3
60	15,0	18,7	21,1	24,2	26,5	27,9	28,8	34,1
90	11,0	13,8	15,6	17,9	19,6	20,6	21,3	25,2
120	8,9	11,1	12,5	14,4	15,8	16,6	17,1	20,3
150	7,5	9,4	10,6	12,2	13,3	14,0	14,5	17,2
180	6,6	8,2	9,3	10,6	11,6	12,2	12,6	15,0
300	4,5	5,6	6,3	7,2	7,9	8,4	8,6	10,2
600	2,7	3,3	3,8	4,3	4,7	5,0	5,1	6,1

Ecuaciones empíricas generadas de intensidad – duración y período de retorno

En la ecuación (13), I designa la intensidad de precipitación máxima anual (mm/h) de D minutos de duración y T representa el periodo de retorno en años.

a) Ecuación de Ven Te Chow

$$I = \frac{327,81T^{0,13}}{D^{0,75}} \quad 13$$

$$R^2 = 0,997$$

$$ECM = 1,48 \text{ mm} / h$$

b) Ecuación de Koutsoyiannis

$$I = 66,42 \left(\frac{4,55 - \ln(-\ln(1 - \frac{1}{T}))}{D^{0,75}} \right) \quad 14$$

$$R^2 = 0,997$$

$$ECM = 0,995 \text{ mm} / h$$

En la ecuación (15), I designa la intensidad de precipitación máxima anual (mm/h) de D minutos de duración y T representa el periodo de retorno en años.

Discusión

Las precipitaciones máximas anuales en 24 horas se ajustan mejor a las distribuciones de valores extremos tipo I (Gumbel); aunque también se ajustan a la distribución Gamma y lognormal de dos parámetros.

Las ecuaciones empíricas obtenidas son válidas para la ecuación de desagregación de la precipitación máxima anual en 24 horas de Dyck-Peschke que se emplea en Perú. No obstante, es importante indicar que las razones P_D/P_{24} , correspondientes a duraciones que varían entre 5 y 1440 minutos, en orden creciente, están determinadas por las ecuaciones de desagregación de Grunsky, Mononobe, Dyck-Peschke y la propuesta por Álvaro (2020).

La ecuación de Koutsoyannis es mejor que la ecuación de Ven Te Chow porque el coeficiente de determinación (R^2) $0,999 > 0,997$ y el error cuadrático medio (ECM) $0,995 < 1,48$ mm/h. Las ecuaciones empíricas obtenidas son válidas para duraciones menores a 24 horas.

Conclusiones

La desagregación de las precipitaciones máximas anuales en 24 horas se realizó utilizando la ecuación de Dyck-Peschke. Para el análisis probabilístico se empleó la distribución de probabilidades de Gumbel.

La ecuación (14) de Koutsoyannis predice mejor las intensidades de las precipitaciones máximas anuales para duraciones menores de 24 horas.

Donde I designa la intensidad de precipitación máxima anual (mm/h) de D minutos de duración y T representa el periodo de retorno en años.

Se recomienda acoplar la ecuación de Koutsoyannis con la ecuación de onda cinemática de McCuen porque permite determinar la duración e intensidad de las precipitaciones máximas anuales para un determinado periodo de retorno, la misma que se puede emplear el diseño hidrológico de estructuras de drenaje pluvial en la ciudad de Huaraz.

Referencias

- Álvaro, J. (2020). Alternative model of intense rainfall equation obtained from daily rainfall disaggregation. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 25(2). <https://acortar.link/5WzvAT>
- Awadallah, A., ElGamal, M., ElMostafa, ElBadry, H. (2011) Developing Intensity-Duration-Frequency Curves in Scarce Data Region: An Approach using Regional Analysis and Satellite Data. *Engineering*, 3, 215-226. <https://acortar.link/SqfpQN>
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill
- Gamarra, M. (2021). Metodología para la estimación de parámetros de cálculo de tormentas de diseño con datos pluviométricos en Bolivia. *Ventana Científica: 11(18)*. <https://acortar.link/hVtg5E>
- Hu, H., & Ayyub, B. (2019). Machine learning for projecting extreme precipitation intensity for short durations in changing climate. *Geosciences* 2019, 9(5). <https://acortar.link/sJB1w>
- Kim, S., & Singh, V. (2015). Spatial disaggregation of areal rainfall using two different artificial neural networks models. *Water*. <https://acortar.link/c2Xaix>
- Kourtis, I., & Tsihrintzis, V. (2023). Update of intensity – duration – frequency (IDF) curves under climate change: a review. *Water Supply* 2(3), 49 – 51. <https://acortar.link/foXiiw>

- McCuen, R. (2005). *Hydrologic analysis and design*. Pearson Prentice Hall.
- Monjo, R., & Mesenguer-Ruiz, O. (2024). Review: Fractal geometry in precipitation. *Atmosphere* 2024. 15(1). <https://acortar.link/XsiV4a>
- Linsley, R., Kohler, M., & Paulhus, J. (1988). *Hidrología para ingenieros*. México: McGraw-Hill
- Pereyra-Díaz (2012). Two nonlinear mathematical models to estimate the intensity – duration –return period of rainfall events. *Universidad y Ciencia* 28 (3). <https://acortar.link/U94X4s>
- Priambodo, S., Montarjih, L., Suhartanto, E. (2019). Hourly rainfall distribution patterns in Java island. Conferencia Web MATEC, 276. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201927604012>
- Villón, M. (2020). *Hidrología*. Ediciones Villón.
- Yamoat, N., Hanchowong, R., Yamoat, O., Chaimoon, N., & Kangrang, A. (2023). Estimation of regional intensity – duration – frequency relationships of extreme rainfall by simple scaling in Thailand. *Journal of Water and Climate Change* 14(3). <https://acortar.link/2FQkF3>

