

DOI: <https://doi.org/10.46296/ig.v7i14.0219>

MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LA QUEBRADA EL TEJADO PARA LA ANÁLISIS DE ZONAS DE INUNDACIÓN EN LA CIUDAD DE QUITO EN 2023

HYDROLOGICAL AND HYDRAULIC MODELING OF EL TEJADO RAVINE FOR FLOOD ZONE ANALYSIS IN QUITO CITY IN 2023

Orosco-Tacuri Marcia Katherine ¹; Reyes-Zambrano Jimmy Leandro ²;
Chavarría-Párraga Jesús Enrique ³; Alarcón-Loor José Ramona ⁴

¹ Maestría Hidráulica, Pontificia Universidad Católica del Ecuador - Sede Manabí. Portoviejo, Ecuador. Correo: morosco9395@pucesm.edu.ec.
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9703-5071>.

² Maestría Hidráulica, Pontificia Universidad Católica del Ecuador - Sede Manabí. Portoviejo, Ecuador. Correo: jlreyesz@pucesm.edu.ec. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0962-519X>.

³ Maestría Hidráulica, Pontificia Universidad Católica del Ecuador - Sede Manabí. Portoviejo, Ecuador. Correo: jechavarria@pucesm.edu.ec. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8868-394X>.

⁴ Maestría Hidráulica, Pontificia Universidad Católica del Ecuador - Sede Manabí. Portoviejo, Ecuador. Correo: jralarcon@pucesm.edu.ec. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8868-394X>.

Resumen

Se llevó a cabo una investigación de enfoque mixto para modelar hidrológica e hidráulicamente la quebrada El Tejado, con el objetivo de identificar las áreas de riesgo de inundación en la ciudad de Quito. El estudio, de carácter exploratorio, se realizó entre noviembre de 2023 y abril de 2024, utilizando como base metodológica la elaboración de una lluvia de diseño para un período de retorno de 50 años. Las características morfométricas e hidrológicas se modelaron mediante el software HEC-HMS, mientras que el análisis del flujo, en términos de velocidad y altura, se realizó con HEC-RAS. Los resultados indican que, dadas las condiciones topográficas, hidrológicas y meteorológicas, el caudal máximo esperado es de 7,40 m³/s para un período de retorno de 50 años, facilitando la gestión hídrica. La simulación hidráulica mostró velocidades de flujo de hasta 3,51 m/s, con calados de hasta 5,62 m en zonas específicas debido a la topografía y capacidad de retención. El mapa de riesgo identificó dos niveles: alto en las áreas montañosas y muy alto en las zonas pobladas más bajas. Se concluye que una categorización precisa de los riesgos de inundación requiere integrar la mayor cantidad de datos disponibles.

Palabras clave: Simulación, lluvias, inundación.

Abstract

A mixed-methods investigation was carried out to hydrologically and hydraulically model the El Tejado ravine, with the aim of identifying flood risk areas in the city of Quito. The exploratory study was conducted between November 2023 and April 2024, using as a methodological basis the development of a design rainfall for a 50-year return period. The morphometric and hydrological characteristics were modeled using the HEC-HMS software. The results indicate that, given the topographic, hydrological, and meteorological conditions, the maximum expected flow is 7.40 m³/s for a 50-year return period, facilitating water resource management. The hydraulic simulation showed flow velocities of up to 3.51 m/s, with depths of up to 5.62 m in specific areas due to topography and retention capacity. The risk map identified two levels: high in the mountainous areas and very high in the lower populated areas. It is concluded that a precise flood risk categorization requires integrating the greatest amount of available data.

Keywords: Simulation, rainfall, flooding.

Información del manuscrito:

Fecha de recepción: 15 de abril de 2024.

Fecha de aceptación: 25 de junio de 2024.

Fecha de publicación: 10 de julio de 2024.



1. Introducción

Las inundaciones son fenómenos naturales que ocurren cuando el agua excede los límites de confinamiento en ríos, océanos u otros cuerpos, invadiendo áreas pobladas, agrícolas o industriales. Estos eventos, desencadenados por factores como lluvias intensas, rupturas de presas o mareas ciclónicas, pueden causar graves impactos humanos, económicos y ambientales, así como daños en infraestructura (Arreguín et al., 2016). En respuesta, es crucial implementar estrategias de mitigación, como la gestión adecuada de cuencas y una zonificación eficiente (Vergara et al., 2018).

En América Latina, las inundaciones son recurrentes, especialmente en países como Brasil, Argentina, Perú, Colombia y Ecuador, donde la falta de medidas preventivas, como diques y sistemas de alerta temprana, agrava el problema (Paz, 2023). En Ecuador, los efectos de estos desastres han aumentado desde la década de 1970, con 4705 eventos registrados hasta 2021, atribuibles al crecimiento poblacional, la urbanización no

planificada y las precipitaciones intensas (Jácome, 2022; Mena et al., 2021).

En Quito, la rápida expansión urbana ha reducido la capacidad de infiltración del suelo, afectando la estabilidad de las laderas y aumentando el riesgo de inundaciones, como se observó en la quebrada El Tejado, ubicada en una zona montañosa. El 31 de enero de 2022, fuertes lluvias en esta área desencadenaron un aluvión que causó graves daños a viviendas y pérdida de vidas humanas (Cargua, 2023; EL COMERCIO, 2022). Eventos similares se han repetido, exacerbados por cambios climáticos y la erosión del suelo.

En la urbe de Quito, el acelerado crecimiento demográfico ha conllevado a un aumento en la construcción de infraestructuras, lo cual impermeabiliza el suelo y altera el ciclo hidrológico; provocando una disminución en la capacidad de infiltración del suelo y un aumento en la inestabilidad de las laderas de las quebradas (Loayza, 2022)

Este estudio propone la modelación hidrológica e hidráulica para determinar las zonas de riesgo de inundación en la quebrada El Tejado,

Para el desarrollo experimental de la investigación se consideró una revisión bibliográfica en revistas indexadas (Cabezas et al., 2018). El análisis en campo consideró fuentes primarias, y mediante un proceso científico se exploraron los factores en la zona de estudio.

Localización

El área en análisis fue la quebrada El Tejado de la ciudad de Quito, localizada en la provincia Pichincha, misma que atraviesa las parroquias La Comuna, La Gasca y Pambachupa con su desembocadura a 4 km aguas abajo en el río Machángara (Paredes et al., 2022). La investigación se efectuó desde enero a marzo del 2024.

Diseño de la Investigación

Ubicación Geográfica

Datum: WGS 1984 UTM zona 17 S.

Coordenada Este (X): 774797.0 m

Coordenada Norte (Y): 9979347.7 m

Condiciones Climatológicas

Las condiciones climatológicas nacen a partir del estado y variaciones del clima en una región específica durante un determinado periodo de tiempo, mismas que tienden a ser cambiantes en función a la ubicación geográfica (Díaz, 2012). La precipitación máxima en 24 horas es uno de los factores obtenidos desde las estaciones meteorológicas, siendo un elemento que expresa la máxima precipitación registrada en un lapso. En el presente estudio los datos fueron el sustento para generar el modelo precipitación – escorrentía de la quebrada, obtenida desde la estación M0003 IZOBAMBA perteneciente al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), considerando un periodo de tiempo desde el año 2010 al 2022.

Tabla 1. Precipitaciones máximas en 24 horas desde el año 2010 al 2022.

Año	Máxima Precipitación 24 h (mm)
	IZOBAMBA (M0003)
2010	45,00
2011	42,40
2012	45,20
2013	40,00
2014	43,20
2015	38,50
2016	44,60
2017	33,00
2018	57,90
2019	40,10
2020	81,10
2021	63,50
2022	31,30

Referencia: INAMHI, 2024.

Lluvias de Diseño

La lluvia de diseño se refiere a la cantidad de precipitación esperada en una región específica durante un periodo de tiempo definido, generalmente expresada en milímetros por hora (Guerrero, 2018). En el presente estudio, la estimación de la lluvia de diseño se basó en la metodología propuesta por Chúa (2017), que utiliza fórmulas empíricas para calcular esta variable clave. Estas fórmulas permiten modelar y predecir los patrones de precipitación, facilitando la planificación y gestión de riesgos

hídricos en zonas susceptibles a inundaciones.

Distribución de Probabilidades pluviométricas mediante Gumbel

La distribución de Gumbel, también conocida como distribución doble exponencial o distribución Tipo I de Fisher-Tippett, es una distribución de probabilidad continua ampliamente utilizada en el análisis de eventos extremos. Esta herramienta es clave para modelar fenómenos como inundaciones, sequías y otros eventos que requieren la simulación de valores máximos o mínimos (Torres y Roldán, 2019). Su aplicación es crucial en la gestión de riesgos, ya que permite predecir la ocurrencia de eventos extremos y mitigar sus impactos.

Media Estadística.

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

Fórmula 1. Media estadística.

Donde:

$\bar{x}$ = Media estadística.

X_i = Conjunto de observaciones.

n = Número de observaciones.

Desviación Estándar.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Fórmula 2. Desviación estándar.

Donde:

S = Desviación estándar.

n = Número de observaciones.

x_i = Observación número i de la variable x .

$\bar{x}$ = Media estadística.

Probabilidades mediante Gumbel.

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} * S$$

Fórmula 3. Probabilidad de Gumbel.

Donde:

α = Probabilidad de Gumbel.

S = Desviación estándar de la muestra.

$$u = \bar{x} - \mu_y * \sigma_y$$

Fórmula 4. Probabilidad de Gumbel.

Donde:

u = Probabilidad de Gumbel.

$\bar{x}$ = Media estadística.

σ_y, μ_y = Factores de Gumbel según el número de datos (ver tabla 2).

Tabla 2. Tabla para considerar variables σ_y y μ_y según el número de datos.

Número de datos	μ_y	σ_y
10	0,4952	0,9496
15	0,5128	1,0206
20	0,5236	1,0628
25	0,5309	1,0914
30	0,5362	1,1124
35	0,5403	1,1285
40	0,5436	1,1413
45	0,5463	1,1518
50	0,5485	1,1607
55	0,5504	1,1682
60	0,5521	1,1747
65	0,5535	1,1803
70	0,5548	1,1854
75	0,5559	1,1898
80	0,5569	1,1938
85	0,5578	1,1974
90	0,5586	1,2007
95	0,5593	1,2037
100	0,5600	1,2065

Fuente: Sánchez, 2013.

**Precipitaciones Diarias Máximas
Probables para Distintas
Frecuencias**

Probabilidad de Ocurrencia.

$$F(xt) = 1 - \frac{1}{Tr}$$

Fórmula 5. Probabilidad de
ocurrencia.

Donde:

F (xt) = Probabilidad de ocurrencia.

Tr = Periodo de retorno (años).

Precipitación.

$$P = \mu_y - \ln \left(\frac{-\ln(F(xt))}{\frac{1}{\sigma_y}} \right)$$

Fórmula 6. Precipitación.

Donde:

P = Precipitación (mm).

u_y = Probabilidad de Gumbel.

σ_y = Factores de Gumbel.

F (xt) = Probabilidad de ocurrencia.

Corrección del Intervalos.

$$XT = P * 1,14$$

Fórmula 7. Corrección de intervalos fijos.

Donde:

XT= Corrección del Intervalos.

P = Precipitación.

Intensidades de Lluvia.

$$I = \frac{P}{t}$$

Fórmula 8. Intensidades de Lluvia.

Donde:

I= Intensidades de Lluvia (mm).

P = Precipitación (mm).

t = Tiempo de duración (horas).

Curvas de Intensidad Duración Frecuencia (IDF)

Las curvas IDF son una herramienta esencial en proyectos hidrológicos, ya que definen la tormenta de diseño

mediante la relación entre la intensidad, duración y frecuencia, ofreciendo una valiosa información sobre la distribución temporal de las precipitaciones (Marcus et al., 2019); para su obtención se usó la fórmula 9 propuesta por Aparicio en el año 1977 (Pizarro et al., 2003):

$$I = \frac{k * T^m}{D^n}$$

Fórmula 9. Analítica para construir la ecuación de intensidad.

Donde:

I = Intensidad de precipitación (mm/h).

k, m y n = Constantes calculadas mediante una regresión lineal múltiple.

T = Periodo de retorno (años).

D = Duración (horas o minutos).

Los logaritmos se emplean conforme se evidencia en la fórmula 10 con el fin de derivar un modelo de regresión múltiple.

$$\log I = \log k + m \log T - n \log D$$

Fórmula 10. Modelo de regresión múltiple.

Tiempo de Concentración

El tiempo de concentración es un elemento crucial en modelos de lluvia-escorrentía, el cual describe el tiempo que transcurre desde que una gota de agua precipita en las áreas montañosas hasta su llegada al punto de salida del curso fluvial, siendo la base para calcular el caudal máximo de escorrentía en una cuenca. Para su cálculo se emplearon los métodos de Kirpich (ver fórmula 11) y Témez (ver fórmula 12) (Castillo et al., 2021).

$$tc = 0,02 * L^{0,77} * S^{0,385}$$

Fórmula 11. Tiempo de concentración mediante Kirpich.

Donde:

tc = Tiempo de concentración (minutos).

L = Longitud máxima a la salida (m).

S = Pendiente media del lecho (m/m).

$$tc = 0,03 * L^{0,76} * S^{-0,19}$$

Fórmula 12. Tiempo de concentración mediante Témez.

Donde:

tc = Tiempo de concentración (minutos).

L = Longitud máxima a la salida (m).

S = Pendiente media del lecho (m/m).

Lag Time

El término "Lag Time" o tiempo de retardo en una cuenca hidrográfica describe el lapso entre el inicio de una precipitación notable y el momento en que se registra el máximo flujo en el sistema fluvial como respuesta a dicha precipitación.

$$\text{Lag Time} = 0,35 * tc$$

Fórmula 13. Tiempo de retardo.

Donde:

Lag Time = Tiempo de retardo (minutos).

tc = Tiempo de concentración (minutos).

Modelo Hidráulico

En el modelo hidráulico de la cuenca, se empleó el software HEC-HMS para la estimación de los parámetros morfométricos, tomando como referencia un umbral de 20 km² hasta el punto de aforo. A partir de este punto, se calcularon diversas variables clave como el área, perímetro, longitud del cauce principal, y las pendientes tanto del

cauce principal como de la quebrada (Duque et al., 2019). Estos parámetros son esenciales para caracterizar la dinámica hidrológica de la cuenca y mejorar la precisión de las simulaciones hidráulicas.

Morfometría de la Quebrada

Área.

Es la superficie total que drena hacia un punto común, esencial para la gestión hídrica. Se midió en kilómetros cuadrados con el software HEC-HMS (Castro, 2023).

Perímetro.

Longitud de la línea parteaguas que delimita la cuenca, clave para analizar el flujo de agua. Medido en kilómetros con HEC-HMS (Castro, 2023).

Longitud del Cauce Principal.

Distancia total del curso de agua principal, desde su origen hasta la desembocadura, estimada en kilómetros con HEC-HMS (Castro, 2023).

Pendiente Media del Cauce.

Relación entre desnivel y longitud del cauce, crucial para analizar la velocidad del flujo. Medida en m/m y

calculada con la fórmula 12 (Castro, 2023).

Pendiente Media de la Quebrada.

La inclinación promedio del terreno en toda su área ayuda a comprender el flujo de agua en la quebrada. En el estudio se emplearon datos vectoriales en formato shape y datos raster en formato TIFF, analizados con ArcGIS. La inclinación se mide en porcentaje (%) o en metros sobre metros (m/m) (Castro, 2023).

$$j = \frac{DA}{Lc}$$

Fórmula 14. Pendiente media del cauce.

Donde:

j = Pendiente media del Cauce (%).

DA = Desnivel Altitudinal (km²).

Lc = Longitud del cauce principal (km).

Modelo Muskingum Cunge

El método Muskingum Cunge relaciona el almacenamiento, el flujo y la propagación temporal de la quebrada para estimar el tránsito de avenida, considerando la fórmula 13 propuesta a continuación (Cunge, 1969).

$$k = \frac{\Delta x}{c} \quad X = \frac{1}{2} * \left(1 - \frac{Q}{B * S_0 * X * \Delta x} \right)$$

$$S = \frac{25400 - 254 * CN}{CN}$$

Fórmula 15. Modelo Muskingum Cunge.

Donde:

Δx = Longitud del tramo del cauce principal.

c = Celeridad.

S_0 = Pendiente media del cauce.

Q = Caudal.

B = Anchura del cauce.

Esquema de Trabajo

Para ello se sigue el esquema de trabajo que se detalla en la figura 2.

Número de Escurrimiento

Describe la proporción de la precipitación que se convierte en escorrentía superficial y fluye hacia los cuerpos de agua en una quebrada, para su estimación se empleó la fórmula 16 (Pacheco et al., 2018).

Fórmula 16. Número de Escurrimiento.

Donde:

S = Potencial máximo de retención (-).

CN = Número de curva (-).

3. Resultados y discusión

Lluvia de Diseño

Para generar la lluvia de diseño, se estimó la precipitación máxima diaria probable, tomando en cuenta los registros de lluvia máxima en 24 horas desde 2012 hasta 2022, obtenidos de la estación meteorológica M0003 IZOBAMBA. Se calcularon variables probabilísticas con una media de 40,60 mm, una desviación estándar de 13,58 mm y factores de Gumbel $\alpha = 10,585$ mm y $\mu = 40,49$ mm. Estos valores se evaluaron para periodos de retorno entre 2 y 500 años.

Tabla 3. Precipitaciones máximas probables diarias para diferentes frecuencias.

Periodo de retorno (Años)	Precipitación (mm)	Probabilidad de ocurrencia F (XT)	Corrección de intervalo fijo XT (mm)
2	44,3698	0,5000	50,5816

5	56,3675	0,8000	64,2589
10	64,3109	0,9000	73,3145
20	71,9305	0,9500	82,0008
50	81,7933	0,9800	93,2443
100	89,1840	0,9900	101,6698
500	106,2629	0,9980	121,1397

Intensidades de Lluvia

Se tomo la precipitación y la frecuencia según cada periodo de

retorno para calcular la intensidad de lluvia diaria tal como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Intensidad de lluvia diaria.

Tiempo de duración		Intensidad de la lluvia (mm /hr)						
Hr	min	2 años	5 años	10 años	20 años	50 años	100 años	500 años
24,00	1440	2,4869	3,1594	3,6046	4,0317	4,5845	4,9988	5,9560
12,00	720	4,2278	5,3710	6,1279	6,8539	7,7937	8,4979	10,1253
6,00	360	8,0576	10,2364	11,6790	13,0627	14,8538	16,1960	19,2976
2,00	120	19,4906	24,7608	28,2502	31,5973	35,9297	39,1763	46,6787
1,00	60	35,2149	44,7370	51,0415	57,0889	64,9167	70,7825	84,3375
0,75	45	41,8447	53,1595	60,6510	67,8369	77,1384	84,1085	100,2154
0,50	30	54,9353	69,7898	79,6248	89,0588	101,2701	110,4207	131,5665
0,25	15	76,9094	97,7057	111,4747	124,6823	141,7781	154,5890	184,1931
0,08	5	118,6601	150,7460	171,9895	192,3669	218,7433	238,5087	284,1836

**Representación de Curvas
Intensidad - Duración - Período de Retorno**

períodos de retornos en análisis, a fin de generar los hidrogramas de diseño (visualizar tabla 5).

Se consideró la vinculación entre la intensidad de lluvia, duración y probabilidad de ocurrencia para los

Tabla 5. Regresión potencial.

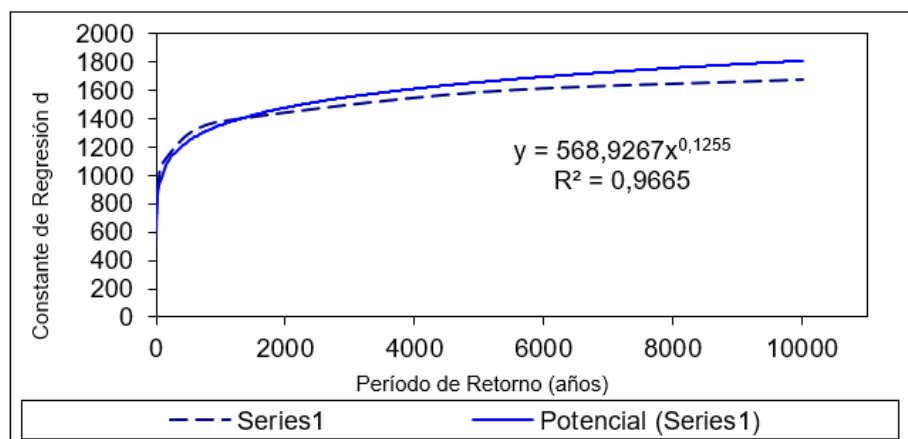
Periodo de Retorno (años)	Término constante de regresión (d)	Coefficiente de regresión [n]
2	539,1092	-0,7169
5	684,8848	-0,7169
10	781,4009	-0,7169
20	873,9815	-0,7169
50	993,8175	-0,7169
100	1083,6178	-0,7169
500	1291,1325	-0,7169
Promedio	892,5634	-0,7169

A partir de la adaptación de la variable, se procedió a deducir una segunda regresión de potencia que vincula el período de retorno (T) con

el término constante de la regresión (d), con el fin de adquirir un coeficiente adicional previo a la elaboración de las curvas IDF.

Tabla 6. Segunda regresión potencial.

N.º	x	y	Ln x	Ln y	Ln x*Ln y	(Ln x) ²
1	2	539,1092	0,6931	6,2899	4,3598	0,4805
2	5	684,8848	1,6094	6,5293	10,5084	2,5903
3	10	781,4009	2,3026	6,6611	15,3377	5,3019
4	20	873,9815	2,9957	6,7731	20,2903	8,9744
5	50	993,8175	3,9120	6,9016	26,9990	15,3039
6	100	1083,6178	4,6052	6,9881	32,1812	21,2076
7	500	1291,1325	6,2146	7,1633	44,5169	38,6214
Ln (K) = 6,3438			K = 568,9267	m = 0,1255		

Figura 2. Curva de regresión potencial.

Mediante la Figura 2 que muestra una segunda regresión potencial se estimaron factores para generar la fórmula de intensidad de precipitación, siendo la base para el cálculo de las curvas IDF, consiguiendo un factor k de 568,926, factor m de 0,1255, y factor n de 0,7169.

Curvas IDF (Intensidad Duración Frecuencia)

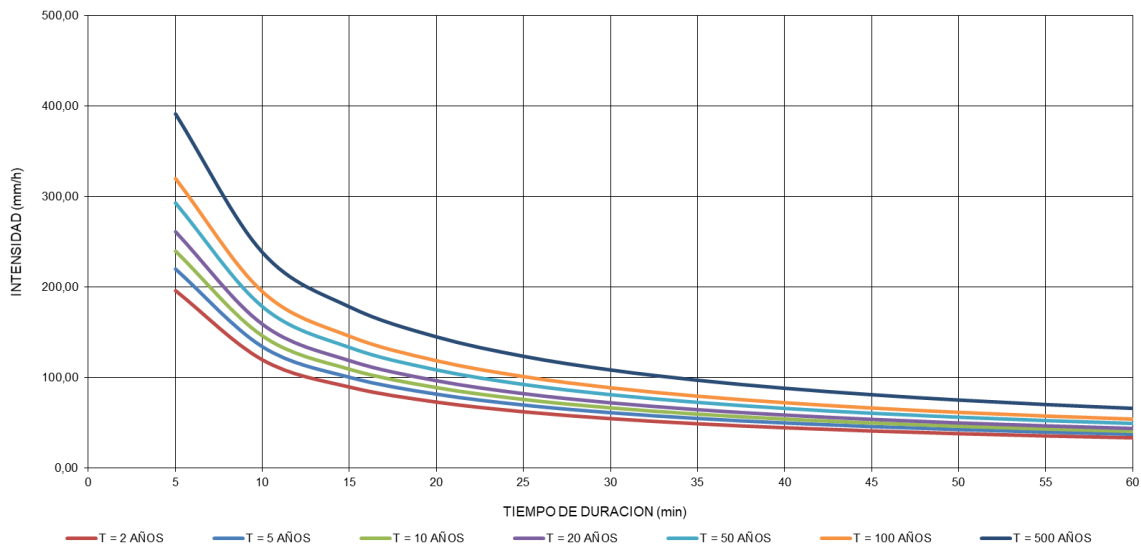
Los resultados de la segunda regresión se utilizaron para crear las

curvas IDF y derivar la ecuación de intensidad aplicable a nuestra área de investigación. A continuación, se presenta dicha ecuación, donde "T" representa el periodo de retorno y "t" indica el tiempo de precipitación. Mediante ella se calcularon las intensidades en relación con cada período de retorno, tal como se especifica en la tabla 7, y fueron representados gráficamente mediante las curvas IDF, detalladas en la figura 3.

Tabla 7. Intensidades para cada intervalo de tiempo y periodo de retorno.

Frecuencia años	Duración en minutos											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
2	195,77	119,11	89,06	72,47	61,75	54,19	48,52	44,09	40,52	37,57	35,09	32,97
5	219,62	133,62	99,91	81,29	69,28	60,79	54,43	49,46	45,46	42,15	39,36	36,98
10	239,58	145,76	108,99	88,68	75,57	66,31	59,37	53,95	49,59	45,98	42,94	40,34
20	261,34	159,00	118,90	96,74	82,44	72,34	64,77	58,86	54,09	50,16	46,84	44,01
50	293,19	178,38	133,38	108,53	92,48	81,15	72,66	66,03	60,68	56,27	52,55	49,37
100	319,83	194,58	145,50	118,39	100,89	88,52	79,26	72,03	66,20	61,38	57,33	53,86
500	391,39	238,13	178,06	144,88	123,46	108,33	97,00	88,15	81,01	75,11	70,15	65,91

Figura 3 Curvas IDF (Intensidad – Duración – Frecuencia).



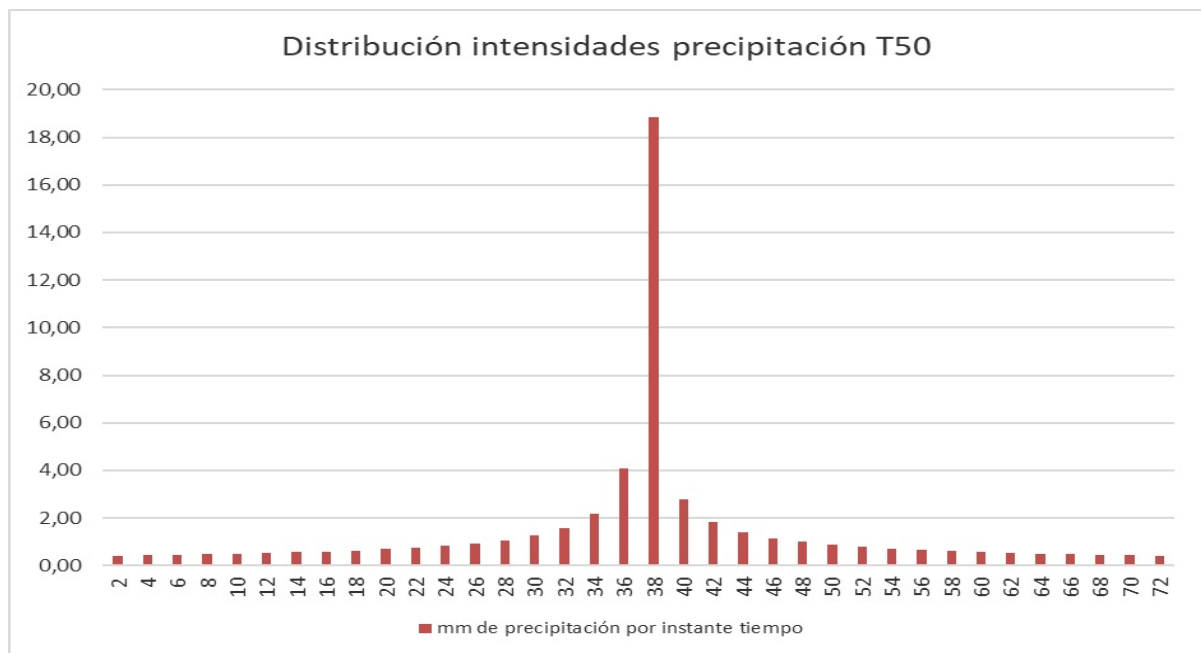
Hietograma de Diseño

Para establecer la tormenta de diseño se consideró el uso de bloques alternos en la generación del hietograma de precipitación, tomando como base un periodo de retorno (Tr) de 50 años con

intervalos cada 5 minutos (visualizar figura 4). Este hietograma nos permitió generar la

simulación hidráulica e hidrológica, en relación con las condiciones pluviométricas en la quebrada.

Figura 4. Hietograma de precipitación en la quebrada El Tejado para un Tr=50 años.



Modelación Hidrológica

Se efectuó la estimación de las variables morfométricas de la quebrada El Tejado mediante la modelación hidrológica en HEC-HMS teniendo como base la lluvia de diseño para un periodo de retorno de

50 años (ver figura 5). Se delimitó un área de 2,05 km² con un perímetro de 15,80 km, se calculó un coeficiente de escorrentía (CN) de 79,25 para la quebrada. Además, se determinó una longitud de 5,88 km y una pendiente de 0,20 m/m en el curso principal de agua.

Figura 5. Quebrada El Tejado, Quito delimitada en HEC-HMS.



Se calculó el tiempo de concentración mediante los métodos de Kirpich y Témez, logrando valores de 28,8 minutos y 92,20 minutos respectivamente, con un tiempo promedio igual de 62,0 minutos. Con el valor promedio se calculó el lag time (tiempo de retardo) de 37,20 minutos. En el proceso de modelado hidrológico mediante el software HEC-HMS, se consideró la precipitación de diseño con un período de retorno de 50 años, estimando un caudal máximo de 7,40 m³/seg a partir de las variables

morfométricas y la topografía base de la quebrada (ver en anexos el hidrograma unitario para para un $T_r = 50$ años).

Los resultados de la caracterización guardan relación con las condiciones mencionadas por Rondal (2022), quien señala que el aluvión provocó un aumento repentino y significativo en la quebrada, lo suficientemente grande como para causar graves daños y afectar varios sectores, trayendo consigo un depósito de lodo de 7,162.77 m³.

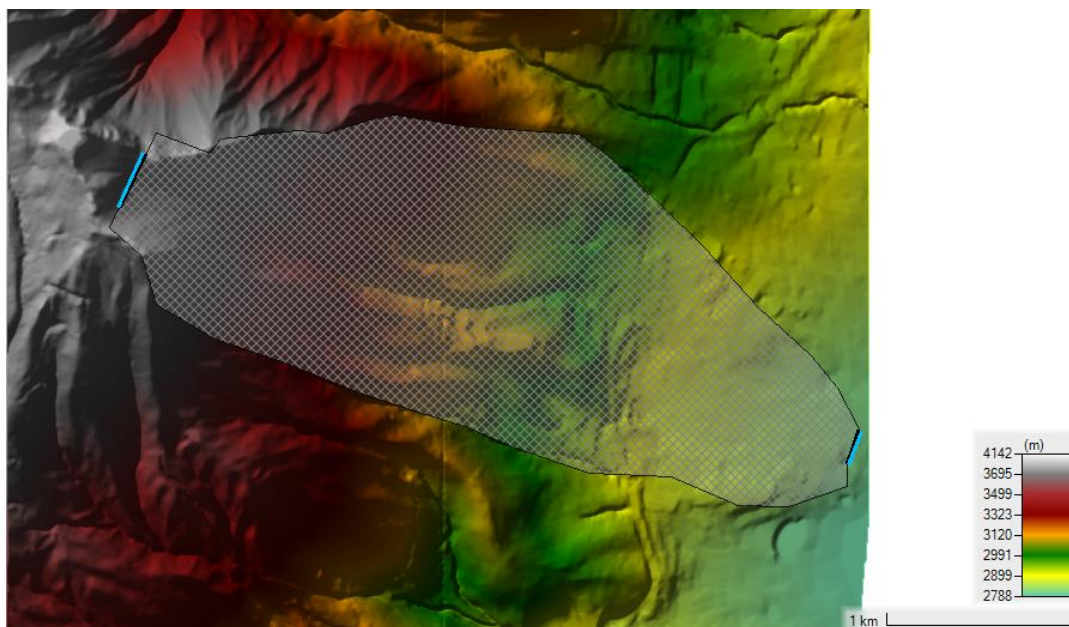
Tabla 8. Número de Curva y Caudales máximos para la quebraras Las Abras.

Periodo de Retorno (años)	Número de Curva (CN)	Caudal (m ³ /s)
50	79.25	8,30

Modelación Hidráulica

Mediante una simulación hidráulica se pudo analizar las posibles profundidades y velocidades a las

que el agua podría llegar, considerando un caudal de 8,3 m³/seg aguas abajo de la quebrada El Tejado, como se presentan a continuación.

Figura 6. Quebrada El Tejado modelada en el software HEC-RAS.

Velocidades del Agua.

El análisis hidrodinámico de la quebrada El Tejado arrojó velocidades del agua que oscilan entre un mínimo de 0,18 m/s y un máximo de 3,51 m/s. Estos valores fueron obtenidos mediante simulaciones que evalúan el comportamiento del flujo en distintos puntos del cauce. La figura 7 ilustra

detalladamente los resultados, proporcionando el sustento visual de las velocidades indicadas.

La velocidad del agua es un factor crítico para evaluar el potencial erosivo de la corriente y los riesgos asociados a desbordamientos. Las áreas con mayores velocidades, cercanas a los 3,51 m/s, son especialmente propensas a sufrir

daños por erosión y arrastre de sedimentos, lo que puede comprometer la estabilidad de las márgenes de la quebrada. Por otro lado, las zonas con velocidades más

bajas (0,18 m/s) indican áreas de menor energía, donde es menos probable que ocurran eventos de erosión significativa.

Figura 7. Velocidades mínimas y máximas obtenidas de la simulación hidráulica.

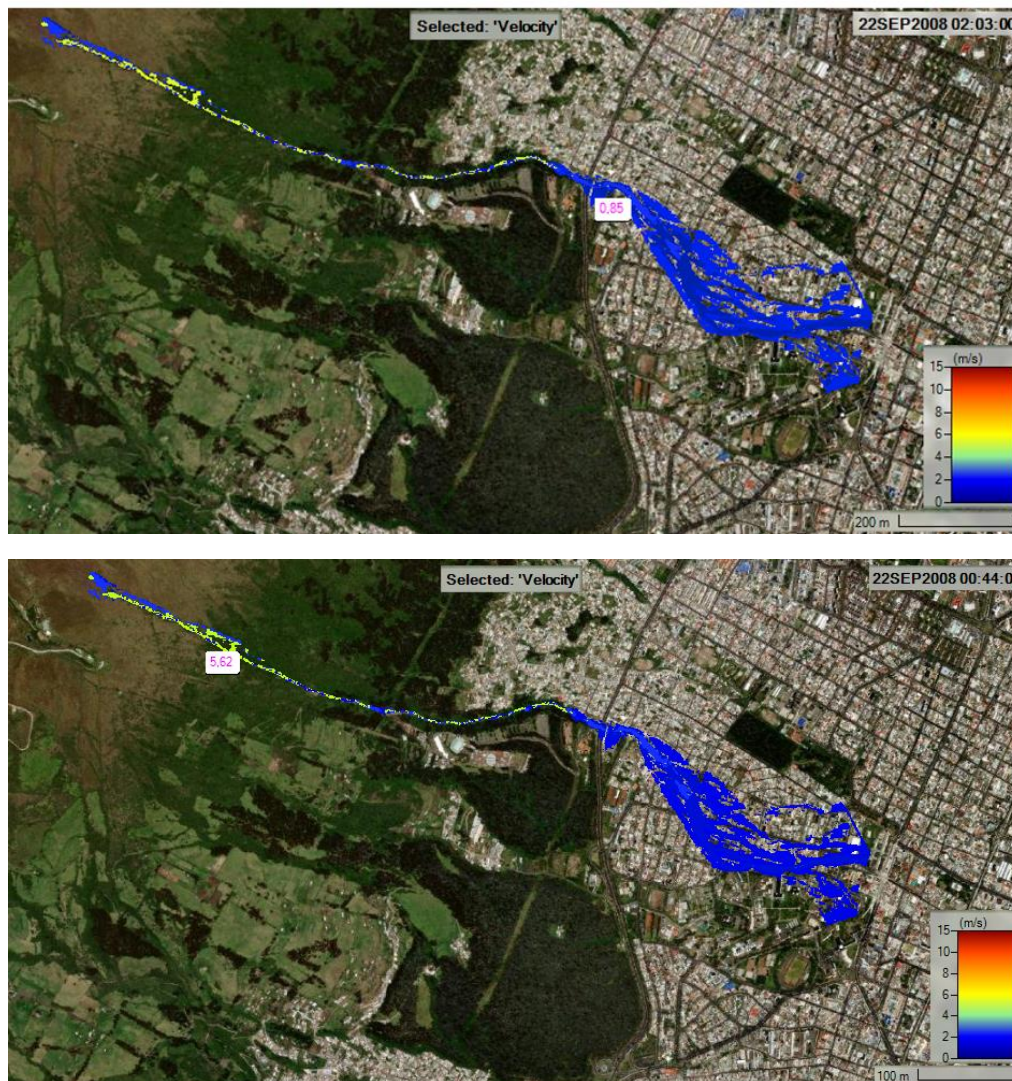


Alturas de agua.

En el análisis de la quebrada El Tejado, se determinaron las alturas de agua mediante simulaciones hidrodinámicas. Los resultados arrojaron un valor mínimo de 0,85 m y un máximo de 5,62 m, lo que refleja la variabilidad del flujo a lo largo del cauce. Estos valores fueron

obtenidos a partir de simulaciones que consideran las condiciones topográficas y climáticas de la cuenca, así como eventos extremos de precipitación. La figura 8 presenta una representación visual detallada de estos resultados, que sirven como base para la validación de los datos obtenidos.

Figura 8. Profundidades del agua máximas y mínimas obtenidas de la simulación hidráulica.



El comportamiento hidrodinámico de la quebrada El Tejado, en Quito, fue evaluado mediante simulaciones que arrojaron datos relevantes sobre las velocidades y alturas del agua a lo largo del cauce. Los resultados de la simulación indicaron velocidades mínimas de 0,18 m/s y máximas de 3,51 m/s, con variaciones significativas que van desde flujo laminar hasta condiciones más

turbulentas. Estas fluctuaciones en la velocidad pueden atribuirse a la presencia de obstáculos naturales y artificiales en el cauce, así como a las variaciones en la sección transversal del lecho, tal como lo indica Jiménez (2018). Las áreas con mayores velocidades son propensas a sufrir erosión y otros impactos sobre la estabilidad del terreno y las estructuras cercanas,

mientras que las zonas con velocidades más bajas presentan un menor riesgo de arrastre de sedimentos y erosión.

En cuanto a las alturas de agua, los valores obtenidos en la simulación reflejan una gran variabilidad, con una altura mínima de 0,85 m y una máxima de 5,62 m. Según Carrera (2019), esta variabilidad está directamente influenciada por el caudal que transcurre por la quebrada, su topografía y la capacidad de almacenamiento en las áreas inundables. Las diferencias marcadas en las alturas de agua revelan la relación entre la capacidad del cauce para manejar grandes volúmenes de agua y su topografía. En las zonas donde la quebrada tiene una menor capacidad de almacenamiento o donde la pendiente es más pronunciada, las alturas de agua tienden a ser mayores durante eventos de lluvias intensas, lo que incrementa el riesgo de inundaciones.

El análisis de estas variables es clave para comprender los riesgos asociados al flujo de agua en la quebrada El Tejado, especialmente en periodos de lluvias extremas. Las

velocidades del agua no solo determinan el potencial erosivo, sino también las condiciones de transporte de sedimentos y la interacción del flujo con las infraestructuras cercanas. En áreas con velocidades más altas, es probable que se genere un mayor desgaste en las márgenes del cauce, lo que podría causar deslizamientos o el colapso de estructuras cercanas. En contraposición, las velocidades más bajas indican zonas donde el flujo es más controlado, lo que reduce el riesgo de erosión, pero podría aumentar la sedimentación y el riesgo de obstrucción en el cauce.

4. Conclusiones

Se estima un caudal máximo de 8,30 m³/seg para un periodo de retorno de 50 años, un dato clave para el diseño de infraestructuras hidráulicas que prevengan riesgos de inundaciones y para una planificación adecuada del uso del recurso hídrico. Este caudal proyectado constituye una base sólida para anticipar los desafíos que plantean los eventos climáticos extremos.

Las velocidades y alturas del flujo destacan la complejidad inherente a

los eventos de inundación, evidenciando la importancia de tener en cuenta la geografía local en su análisis. La interacción dinámica entre la topografía, la vegetación y las infraestructuras existentes es fundamental para entender cómo se propaga el agua durante estos fenómenos. Ignorar estas variables podría conducir a evaluaciones inexactas y a una planificación ineficaz en la gestión de riesgos.

El análisis detallado de los riesgos de inundación fortalece la capacidad de prevención y gestión al proporcionar una comprensión clara de los factores que desencadenan estos eventos, particularmente aquellos asociados a los patrones climáticos. Esto permite a las autoridades y planificadores tomar decisiones informadas, facilitando la implementación de medidas de mitigación más efectivas que reduzcan el impacto de futuras inundaciones en las zonas afectadas.

Bibliografía

Arreguín, F., López, M., y Marengo, H. (2016). Las inundaciones en un marco de incertidumbre climática. Obtenido de

Revista Tecnología y Ciencias del Agua, volumen 7: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=353549829001>

Cabezas, E., Andrade, D., y Torres, J. (2018). Introducción a la metodología de la investigación científica. Obtenido de Universidad de Fuerzas Armadas, Quito – Ecuador: <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/15424/1/Introduccion%20a%20la%20Metodologia%20de%20la%20investigacion%20cientifica.pdf>

Carrera, J. (2019). Simulación de los procesos naturales mediante un modelo numérico para modelar fenómenos relacionados con procesos de flujo y transporte de sedimentos en cauces naturales. Obtenido de Universidad de Cuenca: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/446/1/Tesis.pdf>

Cargua, E. (2023). Estudio geohistórico de la quebrada el Tejado: una aproximación al Aluvión del 31 de enero del 2022 en los Barrios La Comuna y La Gasca. Obtenido de Universidad Nacional de Chimborazo: <http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/11582/1/UNA-CH-EC-FCEHT-CS-00020-2023.pdf>

- Castillo, L., Abreu, D., y Álvarez, M. (2020). Evaluación de distintas fórmulas empíricas para el cálculo del tiempo de concentración en la cuenca urbana del río Bélico y Cubanicay, ciudad de Santa Clara. Obtenido de Revista Enfoque UTE, volumen 12: <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.729>
- Castro, F. (2023). Atenuadores de Escorrentía para la Quebrada Cañitas, Parroquia Charapotó, Manabí, Utilizando Herramientas SIG. Obtenido de Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, volumen 7, Ecuador: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i4.6841
- Chúa, R. (2017). Desarrollo y calibración de un sistema informático para el análisis de tormentas, máximas avenidas y generación de lluvia escorrentía. Obtenido de Universidad Nacional Agraria La Molina: <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/2947>
- Cunge, J. (1969). On the subject of A flood propagation computation method. Obtenido de Journal of Hydraulic Research: <https://doi.org/10.1080/00221686909500264>
- Díaz, G. (2012). El cambio climático. Obtenido de Revista Ciencia y Sociedad, volumen 37: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=87024179004>
- Duque, P., Patiño, D., y López, X. (2019). Evaluación del Sistema de Modelamiento Hidrológico HEC-HMS para la Simulación Hidrológica de una Microcuenca Andina Tropical. Obtenido de Revista Scielo, Información tecnológica, volumen 30: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000600351>
- EL COMERCIO. (2022). Aluvión en el barrio La Gasca deja fallecidos en el norte de Quito. Obtenido de Actualidad: <https://www.elcomercio.com/actualidad/quito/aluvion-lagasca-lodo-afectados-lluvia.html>
- Guerrero, F. (2018). Evaluación y análisis de la intensidad de lluvia de diseño influenciada por oscilaciones decadales de precipitación mediante la determinación de una metodología de cálculo para la cuenca del río Paute. Obtenido de Universidad de Cuenca: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/31528/3/TesisGuerreroCoronel.pdf>
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología [INAMHI]. (2024). Biblioteca-Inamhi.

Publicaciones
meteorológicas.

- Jácome, M., (2022). Determinación de zonas urbanas vulnerables a inundaciones de la quebrada Cunduana mediante el uso de modelos hidrológicos e hidráulicos. Obtenido de Universidad Nacional de Chimborazo: http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/9069/1/8.Tesis_J%C3%A1come_Mirian.pdf
- Jiménez, C. (2018). Mecánica de los fluidos, viscosidad y turbulencias. Obtenido de Tecnológico de Costa Rica: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/10194/Din%C3%A1mica%20de%20fluidos%20viscosos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Loayza, G. (2022). ¿Cuáles fueron las causas que provocaron el aluvión de la quebrada “El Tejado” en Quito? Obtenido de Universidad Espíritu Santo: <https://uees.edu.ec/cuales-fueron-las-causas-que-provocaron-el-aluvion-de-la-quebrada-el-tejado-en-el-sector-de-la-gasca-la-comuna-y-pambachupa-en-la-ciudad-de-quito/>
- Marcus, R., Del Valle, M., Elizalde, E., y Macor, J. (2019). Curvas de Intensidad - Duración - Frecuencia (IDF) de la estación meteorológica del CIM-FICH. Serie 1986 - 2016. Obtenido de Universidad Nacional del Litoral Santa Fe, Argentina: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7260055.pdf>
- Mena, M., Scheffczyk, K., Urrutia, M., Huerta, B., y Walz, Y. (2021). Evaluación de riesgos de inundación en Ecuador. Obtenido de United Nations University, Mundialis y Servicio Nacional de gestión de riesgos y emergencia en Ecuador: https://collections.unu.edu/eserv/UNU:8434/VALE_Flood_Risk_Assesment_Report_Ecuador_SPA_FINAL_META.pdf
- Pacheco, R., Ortiz, E., y Martínez, I. (2018). Determinación del parámetro número de curva en la cuenca Las Coloradas en un entorno SIG. Obtenido de Revista Scielo, Ingeniería Hidráulica y Ambiental, volumen 39: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382018000200005
- Paredes, M., Molina, M., y Paz, M. (2022). Aluvión de Quito: una mirada comunicacional del desastre. Obtenido de TSAFIQUI, Revista científica en Ciencias Sociales, volumen 12: <https://doi.org/10.29019/tsafiqui.v12i18.1042>
- Paredes, M., Molina, M., y Paz, M. (2022). Aluvión de Quito: una mirada comunicacional del

- desastre. Obtenido de TSAFIQUI, Revista científica en Ciencias Sociales, volumen 12: <https://doi.org/10.29019/tsafiqui.v12i18.1042>
- Paz, A. (2023). Inundaciones y sequías: los desastres que más afectaciones han provocado en América Latina. Obtenido de MONGABAY, Periodismo ambiental independiente de Latinoamérica: <https://es.mongabay.com/2023/09/desastres-que-mas-afectaciones-han-provocado-en-america-latina-informe/>
- Pizarro, R., Abarza, A., Farias, C., y Jordán, C. (2003). Construcción de Curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) en zonas semiáridas de Chile central. Obtenido de: <https://www.fao.org/3/XII/0397-B3.htm>
- Rondal, N. (2022). Caracterización del depósito del flujo de lodo de la quebrada El Tejado, Quito, 31 de enero del 2022. Obtenido de Universidad Central del Ecuador: <https://www.dspace.uce.edu.ec/entities/publication/1da90328-1998-4eee-b155-c20bb39f5d39>
- Sánchez, J. (2013). Distribución de Gumbel. Obtenido de Universidad de Salamanca: https://hidrologia.usal.es/temas/calculos_esta.pdf
- Torres, I., y Roldán, B. (2019). Distribución de Gumbel: Antecedentes y aplicación. Obtenido de Universidad Nacional Autónoma de México: https://miscelaneamatematica.org/download/tbl_articulos.pdf2.8f3b5fceb28337a2.363930372e706466.pdf
- UNICEF y GWP. (2017). Desarrollo resiliente al clima de los servicios de agua, saneamiento e higiene. Obtenido de <https://www.gwp.org/globalassets/global/about-gwp/publications/unicef-gwp/gwp-unicef-linking-risk-with-response-sp.pdf>
- Vergara, M., Ellis, E., Cruz, J., Alarcón, L., y Galván, U. (2018). La conceptualización de las inundaciones y la percepción del riesgo ambiental. Obtenido de Revista Políticas y cultura, volumen 36: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=26721226003>