

DOI: <https://doi.org/10.46296/ig.v7i14.0221>

MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE INUNDACIÓN EN LA QUEBRADA LAS ABRAS, RIOBAMBA

HYDROLOGICAL AND HYDRAULIC MODELING FOR THE IDENTIFICATION OF FLOOD ZONES IN LAS ABRAS CREEK, RIOBAMBA

Vallejo-Vizhuete Dennys Paúl ¹; Reyes-Zambrano Jimmy Leandro ²;
Tenesaca-Saca Margoth Elizabeth ³; Alarcón-Loor José Ramona ⁴

¹ Maestría Hidráulica, Pontificia Universidad Católica del Ecuador - Sede Manabí. Portoviejo, Ecuador. Correo: dvallejo3360@pucesm.edu.ec. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4895-5603>.

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: mtenesaca5456@pucesm.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-9012-4639>.

⁴ Maestría Hidráulica, Pontificia Universidad Católica del Ecuador - Sede Manabí. Portoviejo, Ecuador. Correo: jralarcon@pucesm.edu.ec. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9716-3170>.

Resumen

La investigación cuantitativa realizada sobre la quebrada Cunduana, en el cantón Riobamba, se centró en un análisis hidrológico e hidráulico para generar mapas de inundación que contribuyan a la gestión de riesgos en la región. Este estudio exploratorio se llevó a cabo entre enero y marzo de 2024 y utilizó una lluvia de diseño con un período de retorno de 50 años para crear un hietograma. Posteriormente, se realizó una simulación hidráulica con el software HEC-HMS para caracterizar la quebrada y determinar el caudal máximo esperado. A continuación, se empleó el software HEC-RAS para analizar las profundidades y velocidades del flujo en la zona. Los resultados revelaron que las características hidrológicas de la quebrada producen un caudal máximo estimado de 5,40 m³/s. Las simulaciones de eventos de inundación indicaron niveles de agua que oscilan entre 0,03 m en condiciones mínimas y 0,343 m en situaciones extremas, con velocidades que varían desde 0,84 m/s en condiciones normales hasta 3,64 m/s en eventos severos. En conclusión, la integración de parámetros morfométricos de la quebrada con los resultados de simulaciones hidráulicas proporciona una comprensión integral de los riesgos de inundación, lo que es crucial para el desarrollo de planes preventivos de mitigación efectivos.

Palabras clave: Riesgo, inundación, simulación.

Abstract

The quantitative research conducted on the Cunduana ravine, in the Riobamba canton, focused on a hydrological and hydraulic analysis to generate flood maps that contribute to risk management in the region. This exploratory study was carried out between January and March 2024 and used a design rainfall with a return period of 50 years to create a hyetograph. Subsequently, a hydraulic simulation was performed using HEC-HMS software to characterize the ravine and determine the expected maximum discharge. Then, HEC-RAS software was used to analyze flow depths and velocities in the area. The results revealed that the hydrological characteristics of the ravine produce an estimated maximum discharge of 5.40 m³/s. Flood event simulations indicated water levels ranging from 0.03 m under minimum conditions to 0.343 m under extreme situations, with velocities varying from 0.84 m/s under normal conditions to 3.64 m/s under severe events. In conclusion, the integration of morphometric parameters of the ravine with the results of hydraulic simulations provides a comprehensive understanding of flood risks, which is crucial for the development of effective preventive mitigation plans.

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.



Keywords: Risk, flood, simulation.

1. Introducción

Las inundaciones en América Latina representan un problema significativo debido a los efectos del cambio climático y la expansión urbana, lo que genera graves repercusiones en zonas tanto urbanas como rurales. Estas consecuencias incluyen pérdidas económicas, daños a la infraestructura, riesgos para la salud y desplazamientos poblacionales (Novillo, 2018). En Ecuador, la vulnerabilidad a las inundaciones se ha intensificado debido a cambios en el uso del suelo y al crecimiento urbano descontrolado, lo que subraya la necesidad de implementar estrategias integrales que combinen la prevención, preparación y respuesta para mitigar estos eventos. Es crucial incorporar una planificación urbana sostenible y la preservación de espacios naturales como parte de estas medidas (Burgos et al., 2019).

En la ciudad de Riobamba, ubicada en la región central de Ecuador, estas problemáticas son especialmente relevantes debido a su topografía montañosa y la presencia de la quebrada Cunduana,

que atraviesa el área urbana. La gestión efectiva de estos desafíos requiere un enfoque que incluya la simulación de inundaciones como herramienta esencial para comprender y reducir el impacto de estos eventos extremos. En este contexto, los Sistemas de Información Geográfica (SIG), junto con software especializado como HEC-RAS, juegan un papel fundamental en la evaluación y análisis detallado de posibles escenarios de inundación (Martínez y García, 2018; Zúñiga, 2018).

La quebrada Cunduana, situada en la parroquia Lican de Riobamba, a 2870 metros sobre el nivel del mar, se caracteriza por sus suelos altamente permeables y una pendiente pronunciada del 45,14%. Con una extensión aproximada de 15.67 km² y un perímetro de 23.41 km, presenta una forma alargada e irregular, reflejada en su coeficiente de compacidad de 1.67 y su factor de forma de 0.17. Su corriente principal, de orden dos, se extiende por 14.81 km con una pendiente de 7.91 m/m (Jácome y Montalvo, 2022).

El uso de modelos hidráulicos como HEC-HMS y HEC-RAS para prever y

simular inundaciones es una práctica común en la gestión de riesgos asociados a eventos extremos. Estos modelos permiten delinear zonas de riesgo de inundación en función de diferentes periodos de retorno, proporcionando un análisis detallado de la respuesta hidrológica de una cuenca bajo diversos escenarios de precipitaciones. La capacidad de estos modelos para integrar datos topográficos, hidrológicos y meteorológicos los convierte en herramientas fundamentales para evaluar el sistema hidrológico de la quebrada Cunduana, posibilitando simulaciones precisas de sus características actuales y futuras (Cabrera et al., 2019; Zúñiga et al., 2024).

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo principal simular inundaciones en la quebrada Cunduana en Riobamba, utilizando modelaciones hidráulicas en el software HEC-RAS y evaluar las características hidrológicas de la quebrada en el software HEC-HMS, para formular posibles eventos de inundación apoyados en la modelación hidráulica en 2D.

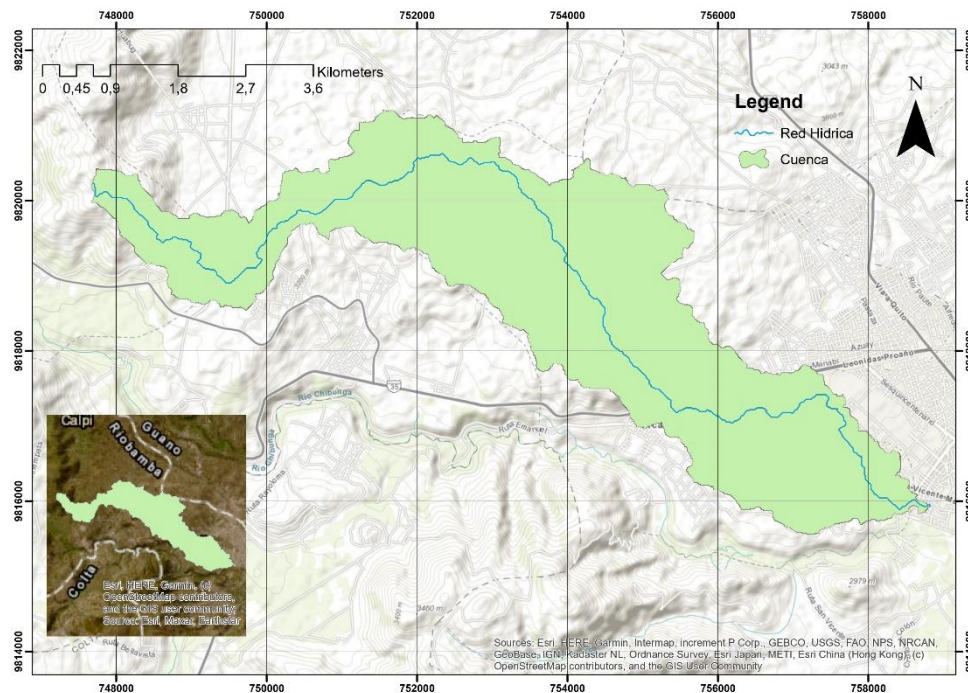
2. Materiales y métodos

La investigación generada fue de tipo exploratoria, ya que se determinó la relación causa - efecto de un fenómeno, considerando datos cuantitativos para el desarrollo de mapas de vulnerabilidad ante posibles eventos de inundación (Borjas, 2016).

Localización

La zona de estudio fue la quebrada Cunduana perteneciente a la parroquia Licán, en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo, donde se efectuó el plan de investigación de enero a marzo del 2024. La quebrada posee trazos definidos en su cause con un bajo porcentaje de alteraciones por parte de los asentamientos urbanísticos y agrícolas (Montalvo y Salazar, 2023).

Figura 1. Localización de la quebrada Cunduana, Riobamba - Chimborazo.



Diseño de la Investigación

Se presenta la metodología considerada en la investigación, respondiendo a una exploración exhaustiva del tema propuesto considerando una revisión bibliográfica en revistas indexadas, principalmente en la base de datos de Scopus, Redalyc, Scielo, entre otras más (Cabezas et al., 2018; Gallardo, 2017). El estudio desarrollado es de campo, y consistió en la recopilación de datos nuevos de fuentes primarias con un propósito específico, y mediante un proceso de carácter científico se exploran los factores y/o condiciones presentes en el área de estudio (la quebrada Cundwana) (Baena, 2017).

Condiciones Climatológicas

Las condiciones climatológicas son elementos del clima para una zona en particular durante un determinado periodo, mismas que suelen ser variantes en relación a la ubicación geográfica, a la estación del año y a los demás factores ambientales (Reyes, 2023). En la presente investigación se consideran las precipitaciones máximas en 24 horas obtenidas desde la estación Agrometeorológica FRN ESPOCH desde el año 2000 al 2021(ver tabla 1).

Tabla 1. Precipitaciones máximas en 24 horas desde el año 2000 al 2021

Año	Máxima Precipitación 24 h (mm)
2000	52,70
2001	44,80
2002	33,80
2003	32,00
2004	42,70
2005	27,90
2006	26,40
2007	33,30
2008	24,80
2009	13,90
2010	24,20
2011	29,60
2012	16,90
2013	59,60
2014	29,50
2015	23,30
2016	41,00
2017	49,30
2018	22,20
2019	28,50
2020	32,30
2021	25,60

Referencia: ESPOCH, 2024.

Lluvias de Diseño

Denominadas también como precipitaciones de diseño o intensidades de lluvia, son valores utilizados para evaluar y proyectar obras hidráulicas y estimar la cantidad de agua que puede caer en un área durante un período

específico, siendo su unidad de medida los milímetros por hora. En la investigación se sigue la metodología propuesta por Chúa (2017):

Distribución de Probabilidades pluviométricas mediante Gumbel

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 3).

Tabla 3. 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 instrumentos empleados en ingeniería hidrológica y de drenaje para calcular la intensidad, duración y frecuencia de las precipitaciones en un área particular. El término "IDF" abrevia "Intensidad-Duración-Frecuencia".

Estas representaciones gráficas ilustran la conexión entre la intensidad de la lluvia (en mm/h), la duración de la lluvia (en horas) y la frecuencia o período de retorno (habitualmente en años) (López, 2012).

Para obtener la ecuación de intensidad a partir de las curvas IDF se emplea la fórmula 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.

Modelo Hidráulico

Para la delimitación de la cuenca hidrográfica se considera el software HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System), el cual permite modelar procesos hidrológicos y analizar datos de esorrentía de lluvia, considerando un umbral hasta el punto de aforo de 20 km², donde se evalúan los parámetros como el área, perímetro, longitud del cauce principal, pendiente del cauce principal y de la quebrada (Castro 2023; López et al, 2012).

Morfometría de la Quebrada

Área.

Es la extensión de suelo sobre la que circula el agua que se dirige hacia un río u océano, responsable de captar el agua precipitada para recolectarse y distribuirse a lo largo de un territorio, su unidad de medida es el

kilómetro cuadrado y se estima mediante HEC-HMS (Espinoza y Pérez, 2019).

Perímetro.

Es la longitud del límite exterior que se define por la línea parteaguas, siendo necesario para conocer la extensión y forma de la quebrada, su unidad de medida es el kilómetro y se estimó mediante el uso de HEC-HMS (Espinoza y Pérez, 2019).

Longitud del Cauce Principal.

Es la longitud de mayor tamaño desde la desembocadura de la quebrada hasta su salida en línea recta, su unidad de medida fue es el metro y para su determinación se considera el uso de HEC-HMS (Espinoza y Pérez, 2019).

Pendiente Media del Cauce.

Representa la pendiente promedio del terreno a lo largo del curso principal de agua en una cuenca, su unidad de medida es en porcentaje y se calcula mediante la fórmula 14 (Castro, 2023).

Pendiente Media de la Quebrada.

Según Castro (2023), la pendiente media se calcula agregando todas las pendientes de las áreas básicas, manteniendo constante la pendiente

máxima, que a su vez denota la rugosidad del terreno en porcentaje. Su unidad de medida es en metros y se utilizan datos vectoriales de la cuenca (formato shape) y datos Raster (formato TIFF) procesados en los SIG.

Modelo Muskingum Cunge

Para definir el tránsito de avenida se considera el modelo Muskingum Cunge, el cual relaciona el almacenamiento, el flujo y su propagación temporal en un canal (Cunge, 1969).

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

Fórmula 11. Modelo Muskingum Cunge.

Donde:

Δx = Longitud del tramo del cauce principal.

c = Celeridad.

S_0 = Pendiente media del cauce.

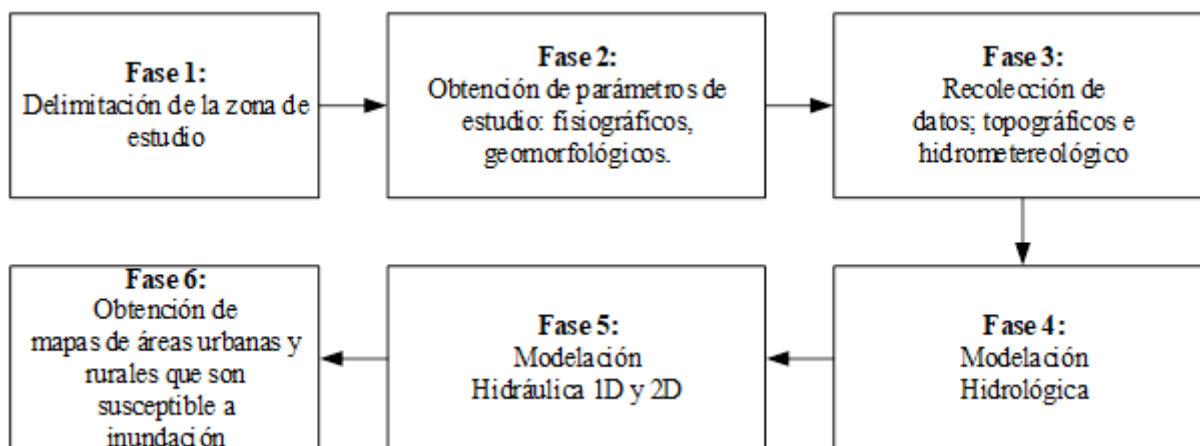
Q = Caudal.

B = Anchura del cauce.

Esquema de Trabajo

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

Figura 2. Esquema del diseño de modelamiento hidráulico.



Fuente: Elaboración propia del autor.

3. Resultados y discusión

Lluvia de Diseño

Precipitación Diaria Máxima Probable

En la determinación de la precipitación diaria máxima probable, se realizó una ponderación de los datos disponibles de lluvias máximos en 24 horas desde el año

2000 hasta el 2021, obtenidos de la estación meteorológica SPOCH colindante a la zona de estudio. Para lograrlo, se calcularon variables probabilísticas en relación a la cantidad de datos disponibles, otorgando una media de 32,47 mm,

una desviación estándar de 11,55 mm, y factores de ajustes de Gumbel $\alpha = 9,007$ mm y $\mu = 27,28$ mm, los cuales fueron evaluados para periodos de retornos entre 2 años y 500 años (ver tabla 4).

Tabla 4. Precipitaciones diarias máximas probables para distintas frecuencias.

Periodo de retorno (Años)	Precipitación (mm)	Probabilidad de ocurrencia F (XT)	Corrección de intervalo fijo XT (mm)
2	30,57	0,5000	34,85
5	40,78	0,8000	46,49
10	47,54	0,9000	54,19
20	54,02	0,9500	61,59
50	62,41	0,9800	71,15
100	68,70	0,9900	78,32
500	83,24	0,9980	94,89

Intensidades de Lluvia

Para estimar la intensidad de lluvia diaria se consideró la duración de la

precipitación y la frecuencia que tendría según cada periodo de retorno como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Intensidad de lluvia diaria para distintas frecuencias.

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	1,7135	2,2857	2,6645	3,0279	3,4983	3,8508	4,6654
12,00	720	2,9129	3,8857	4,5297	5,1475	5,9472	6,5464	7,9312
6,00	360	5,5517	7,4056	8,6331	9,8106	11,3346	12,4767	15,1159
2,00	120	13,4289	17,9134	20,8826	23,7306	27,4172	30,1798	36,5636
1,00	60	24,2628	32,3653	37,7299	42,8758	49,5365	54,5278	66,0619
0,75	45	28,8307	38,4587	44,8332	50,9478	58,8626	64,7936	78,4992
0,50	30	37,8500	50,4899	58,8587	66,8862	77,2769	85,0634	103,0566
0,25	15	52,9900	70,6859	82,4021	93,6406	108,1877	119,0887	144,2792
0,08	5	81,7560	109,0583	127,1347	144,4741	166,9182	183,7369	222,6022

Representación Matemática de las Curvas Intensidad - Duración - Período de Retorno

Se generó una relación entre la intensidad de lluvia, su duración y la probabilidad de ocurrencia en un

período específico de tiempo como se muestra en la tabla 6, siendo el sustento para la creación del hietograma de diseño previo a las modelaciones hidrológicas e hidráulicas.

Tabla 6. Resumen de aplicación de regresión potencial.

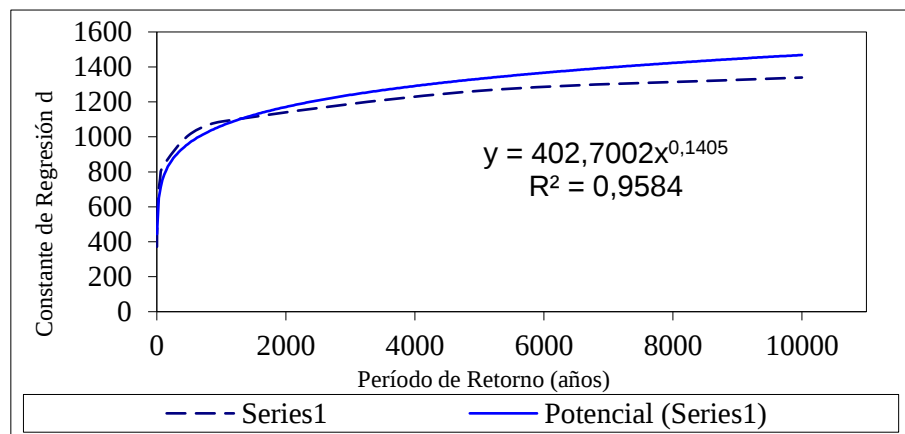
Periodo de Retorno (años)	Término constante de regresión (d)	Coeficiente de regresión [n]
2	371,4424	-0,7169
5	495,4849	-0,7169
10	577,6118	-0,7169
20	656,3900	-0,7169
50	758,3602	-0,7169
100	834,7725	-0,7169
500	1011,3498	-0,7169
Promedio	839,5426	-0,7169

En función al cambio de variable realizado, se generó una segunda regresión de potencia entre el periodo de retorno (T) y el término

constante de regresión (d), para obtener un nuevo termino previo a la creación de las curvas IDF (Intensidad - Duración - Frecuencia).

Tabla 7. Segunda regresión potencial.

N.º	x	y	Ln x	Ln y	Ln x*Ln y	(Ln x)²
1	2	371,4424	0,6931	5,9174	4,1016	0,4805
2	5	495,4849	1,6094	6,2055	9,9874	2,5903
3	10	577,6118	2,3026	6,3589	14,6419	5,3019
4	20	656,3900	2,9957	6,4868	19,4326	8,9744
5	50	758,3602	3,9120	6,6312	25,9412	15,3039
6	100	834,7725	4,6052	6,7272	30,9797	21,2076
7	500	1011,3498	6,2146	6,9190	42,9991	38,6214
8	16687	8395,4256	46,9680	66,5789	323,5186	297,5700
Ln (K) =	5,9982	K =	402,7002	m =	0,1405	

Figura 3. Curva de regresión potencial.

A partir de la segunda regresión potencial se logró obtener un término constante (k) igual a 402,7002, un coeficiente (m) igual a 0,1405, y un coeficiente (n) igual a 0,71689, mismos que fueron usados en la fórmula de intensidad de precipitación para la creación de las curvas IDF.

Curvas IDF (Intensidad Duración Frecuencia)

Los valores obtenidos de la segunda regresión fueron empleados en la generación de las curvas IDF y en la derivación de la ecuación de

intensidad “I” aplicable en la zona de estudio. Esta ecuación se presenta a continuación, donde “T” denota el periodo de retorno y “t” representa el tiempo de precipitación.

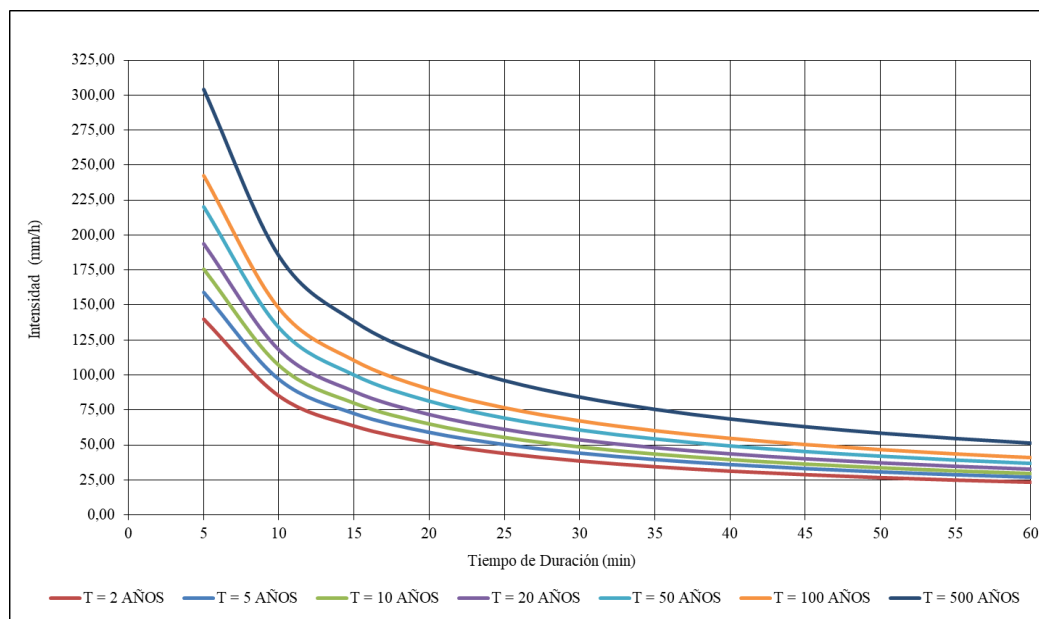
$$I = \frac{402,7002 * T^{0,14056}}{t^{0,71689}}$$

A partir de la ecuación presentada anteriormente, se calcularon las intensidades correspondientes a cada intervalo de tiempo, como se detalla en la tabla 8. Estos valores se representaron gráficamente en las curvas IDF (ver figura 4).

Tabla 8. Intensidades para cada intervalo de tiempo y periodo de retorno.

Frecuencia	Duración en minutos											
	años	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60
2		140,02	85,19	63,70	51,83	44,17	38,76	34,70	31,53	28,98	26,87	25,10
5		159,25	96,89	72,45	58,95	50,23	44,08	39,47	35,86	32,96	30,56	28,54
10		175,53	106,79	79,86	64,97	55,37	48,59	43,50	39,53	36,33	33,69	31,46
20		193,48	117,71	88,02	71,62	61,03	53,55	47,95	43,57	40,04	37,13	34,68
50		220,05	133,88	100,11	81,45	69,41	60,91	54,54	49,56	45,55	42,23	39,44
100		242,55	147,57	110,35	89,78	76,51	67,14	60,11	54,63	50,20	46,55	43,48
500		304,08	185,00	138,34	112,56	95,92	84,17	75,36	68,48	62,94	58,36	54,50

Figura 4. Curva de Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF).

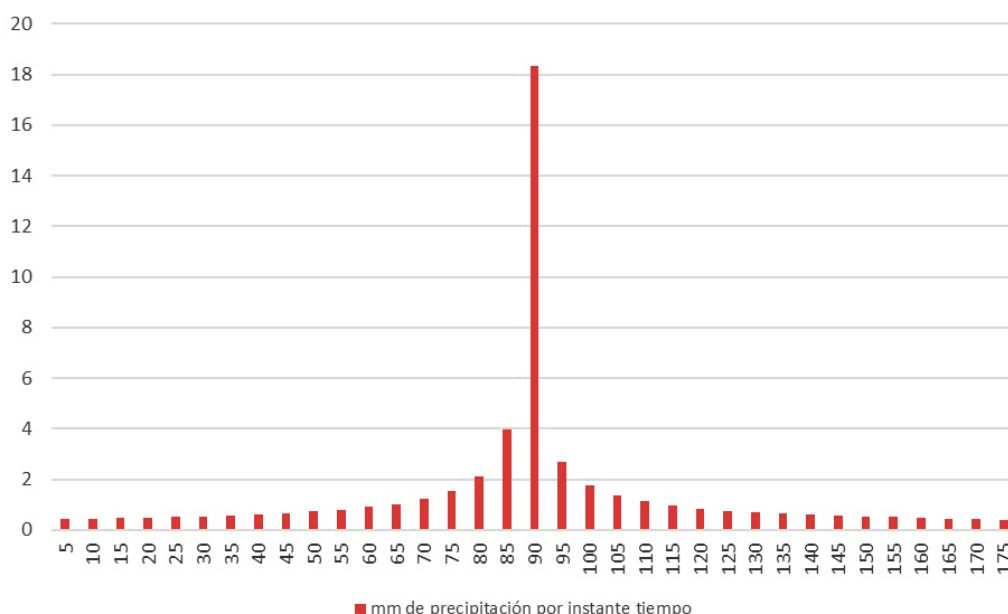


Hietograma de Diseño

Finalmente, para la obtención de la tormenta de diseño se aplicó la metodología de bloques alternos para obtener el hietograma de precipitación, considerando un periodo de retorno de 50 años con

intervalos de tiempo cada 5 minutos (ver figura 5). Este insumo fue necesario para entender cómo varía la intensidad de la lluvia a lo largo del tiempo y cómo esto afecta a la respuesta de los sistemas hidrológicos.

Figura 5. Hietograma de precipitación para un $Tr = 50$ años en la quebradas Cunduana.



Modelación Hidrológica

Se realizó la modelación hidrológica de la quebrada Cunduana utilizando el software HEC-HMS, tomando como base la lluvia de diseño estimada. Este procedimiento permitió calcular las características hidrológicas más relevantes de la

cuenca (ver figura 6). La cuenca presenta un área de 18,74 km² y un perímetro de 44,55 km. Asimismo, se determinó un Número de Curva (CN) de 62,80. En cuanto al curso principal de la quebrada, se registró una longitud de 16,64 km y una pendiente promedio de 0,04 m/m.

Figura 6. Quebrada Cunduana, Riobamba - Chimborazo delimitada en HEC-HMS



El tiempo de concentración estimado mediante el método de Kirpich fue de 118,82 minutos, mientras que el cálculo con el método de Pizarro arrojó un valor de 113,4 minutos. A partir de estos resultados, se obtuvo un tiempo promedio de 116 minutos, a partir del cual se determinó un tiempo de retardo (lag time) de 40,6 minutos.

Utilizando la lluvia de diseño correspondiente a un período de retorno de 50 años y considerando factores como el número de curva

(CN), tiempo de retardo, precipitación y el proceso de tránsito, se procedió a realizar la modelación hidrológica en el software HEC-HMS. Como resultado, se obtuvo un caudal máximo en la quebrada de 5,40 m³/s (ver anexos para el hidrograma unitario y los resultados de la simulación).

Estos resultados muestran coherencia en el orden de magnitud con los hallazgos de Jácome y Montalvo (2022), quienes reportaron un área de 15,67 km², un perímetro

de 23,41 km, un Número de Curva (CN) de 74,89, una longitud del curso hídrico principal de 14,81 km y una pendiente de 0,08 m/m, con un tiempo de concentración de 56 minutos y un caudal máximo estimado de 2,70 m³/s para un

período de retorno de 50 años. Las diferencias observadas entre los resultados podrían deberse a las variaciones en las precipitaciones máximas consideradas, así como a las discrepancias en los archivos DEM empleados en los análisis.

Tabla 9. Número de Curva y Caudal máximo en la quebrada Cunduana.

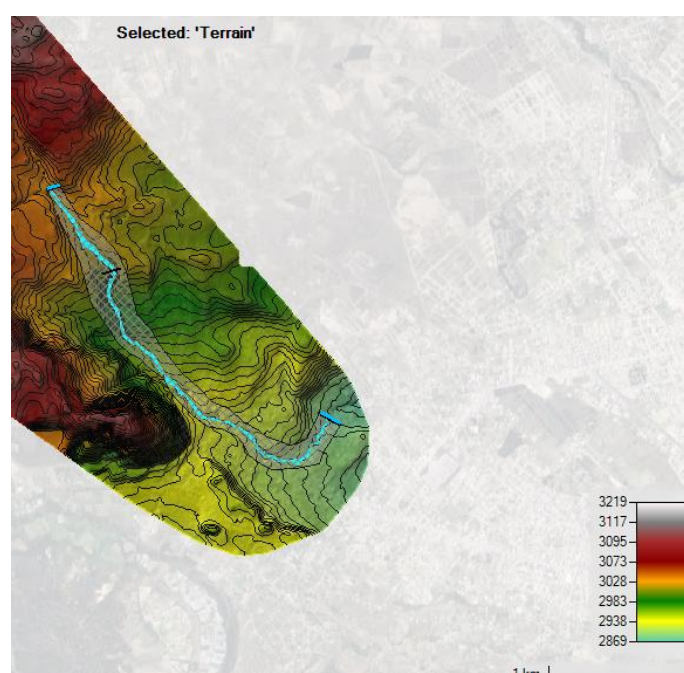
Periodo de Retorno (años)	Número de Curva (CN)	Caudal (m ³ /s)
50	74,89	2,70

Modelación Hidráulica

Las zonas de inundación en la quebrada Cunduana fueron estimadas a través de una simulación hidráulica empleando el software HEC-RAS. En esta simulación se integraron diversos

valores de entrada, con un análisis detallado de factores como las velocidades del flujo y las profundidades hidráulicas alcanzadas durante los eventos de inundación, cuyas características principales se detallan a continuación.

Figura 7. Modelo de elevación de la quebrada Cunduana en el modelo HEC-RAS.



Velocidades hidráulicas alcanzadas.

La velocidad mínima registrada en la simulación fue de 0,84 m/s, mientras que la velocidad máxima alcanzó los 3,64 m/s, tal como se ilustra en la figura 8. Estas velocidades representan un comportamiento típico en zonas de inundación donde se presentan variaciones

significativas entre áreas más confinadas y aquellas con mayor dispersión del flujo. Cabe destacar que la velocidad máxima excede el rango permisible de 1 m/s, lo que indica la posibilidad de arrastre de personas y objetos, tal como lo señala Témez (1992) en su estudio sobre peligros asociados a flujos rápidos.

Figura 8. Velocidades hidráulicas máximas y mínimas alcanzadas.

Velocidad Mínima



Velocidad Máxima

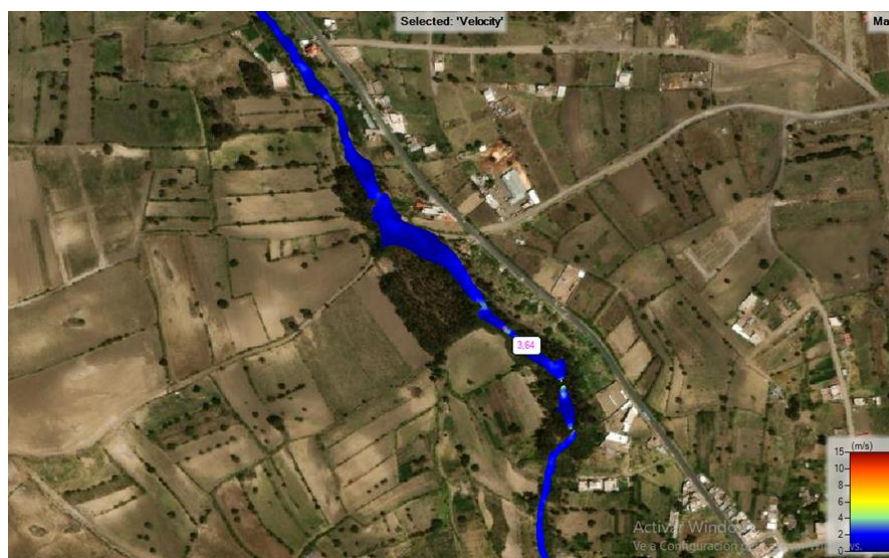
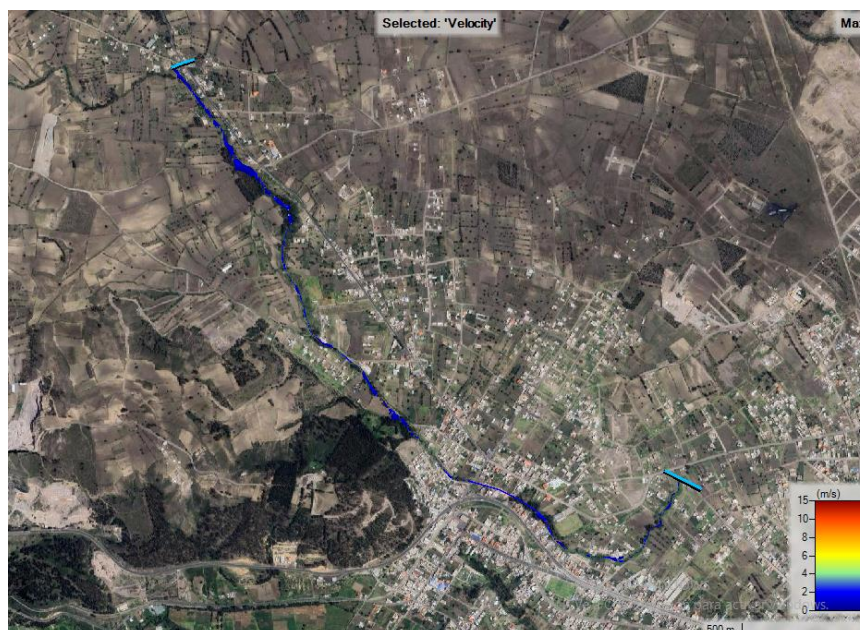


Figura 9. Distribución de las velocidades hidráulicas en la quebrada Cunduana.



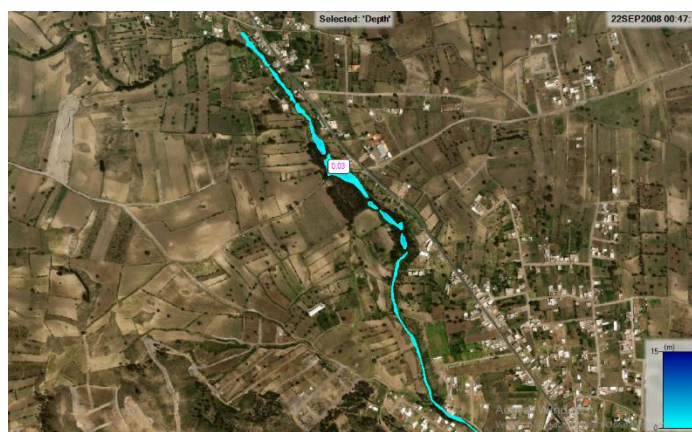
Profundidades hidráulicas alcanzadas.

En cuanto a las profundidades hidráulicas alcanzadas durante la simulación, el valor mínimo registrado fue de 0,03 m, mientras que el valor máximo fue de 3,43 m, como se muestra en la figura 10. Estas profundidades varían según la topografía del área de estudio y la

capacidad de los cauces para manejar el volumen de agua durante los eventos de precipitación intensa. Las profundidades más bajas, como 0,03 m, son típicas en áreas de mayor pendiente o donde el flujo se dispersa, mientras que las máximas de 3,43 m reflejan zonas más bajas o confinadas, como en áreas cercanas a desarrollos urbanos.

Figura 10. Profundidades hidráulicas máximas y mínimas alcanzadas.

Profundidad Mínima



Profundidad Máxima

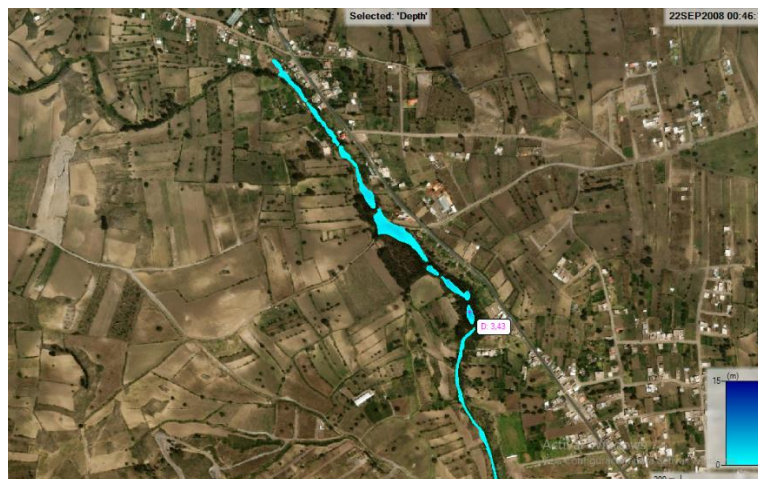


Figura 11. Distribución de las profundidades hidráulicas en la quebrada Cunduana.

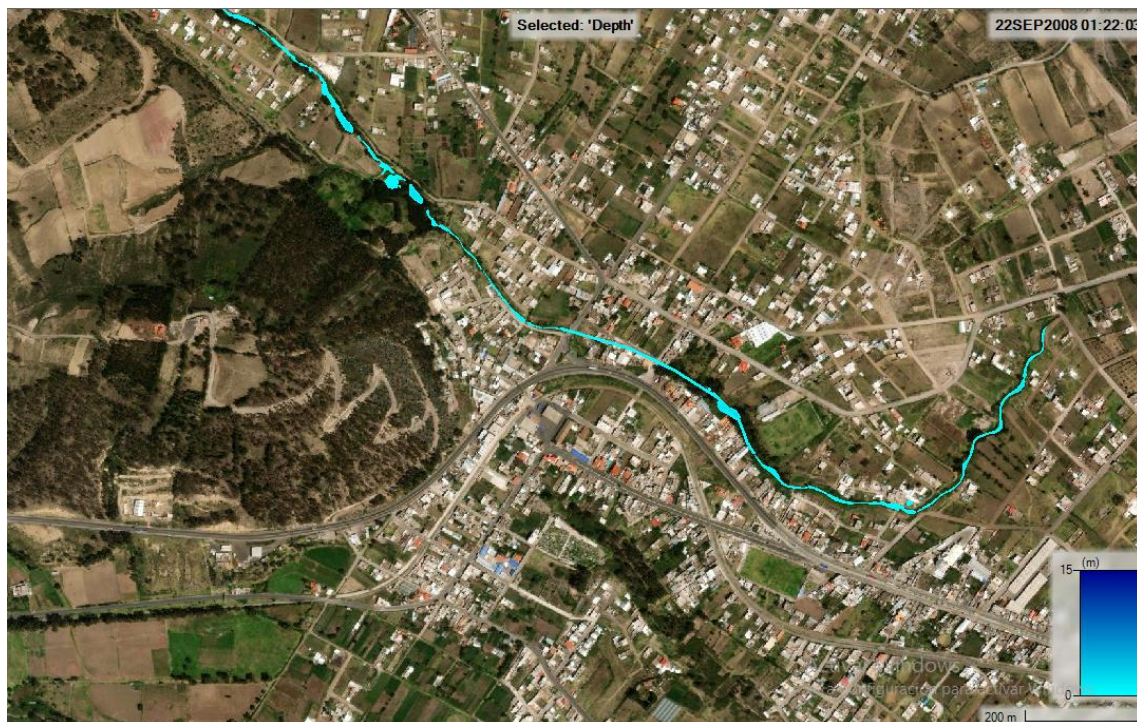


Tabla 10. Resumen de simulación hidráulica en HEC-RAS.

Parámetros	Mínima	Máxima
Velocidades (m/s)	0,84	3,64
Profundidades (m)	0,03	3,43

Al comparar los resultados de la simulación con el mapa de inundación histórico, se observaron

similitudes claras con las inundaciones documentadas en el área de estudio. Los tirantes de

agua, que oscilan entre 0,03 m y 3,43 m en las zonas pobladas, señalan un potencial significativo de riesgo de inundación en estas áreas, lo que sugiere que la infraestructura existente podría no estar preparada para soportar estos eventos sin sufrir daños. Estos resultados ponen de manifiesto la necesidad de medidas de mitigación y una planificación más detallada para prevenir impactos mayores en futuras inundaciones.

En cuanto a las velocidades, se observó que estas exceden el límite de seguridad de 1 m/s, lo que representa un riesgo elevado para la población y los objetos presentes en las áreas inundadas. Este comportamiento es coherente con lo señalado por Jácome y Montalvo (2022), quienes obtuvieron velocidades máximas de 3,60 m/s en su investigación, lo que sugiere que los modelos hidráulicos utilizados son consistentes en la simulación de flujos en quebradas similares.

No obstante, se observan discrepancias en los niveles de agua en comparación con otros estudios. Zúñiga et al. (2024) estimaron profundidades de hasta 2,28 m para un período de retorno similar, lo que

podría deberse a diferencias en los datos topográficos o a la resolución de los archivos DEM utilizados en el análisis. Este contraste pone de manifiesto la importancia de considerar múltiples escenarios y la necesidad de contar con datos de alta precisión para obtener proyecciones más ajustadas a la realidad local.

4. Conclusiones

Las características hidrológicas de la quebrada Cunduana, con un caudal máximo estimado de 5,40 m³/s para un período de retorno de 50 años, subrayan la importancia de su consideración en la planificación y gestión de riesgos en la zona de estudio. Este valor no solo refleja el potencial de la quebrada para generar flujos significativos durante eventos extremos, sino que también es un indicador crucial para la formulación de estrategias de mitigación y la implementación de infraestructuras adecuadas para reducir el impacto de posibles inundaciones.

Los resultados de las simulaciones de inundaciones en el tramo aguas abajo de la quebrada Cunduana

revelan niveles de agua que podrían alcanzar hasta 0,343 m, y velocidades de flujo de hasta 3,64 m/s. Estas condiciones extremas representan un riesgo considerable, no solo por el potencial de causar daños a la infraestructura existente, sino también por el peligro que suponen para la seguridad de las personas, ya que tales velocidades pueden provocar el arrastre de personas, vehículos y otros objetos.

La magnitud de estos riesgos destaca la necesidad urgente de implementar medidas de prevención y mitigación en la zona. Estas medidas podrían incluir la construcción de obras de protección hidráulica, como diques o canales de desvío, así como la instalación de sistemas de alerta temprana que permitan a la población local responder de manera efectiva ante la amenaza de una inundación. Además, es fundamental desarrollar programas de concienciación comunitaria y simulacros periódicos para fortalecer la capacidad de respuesta de la población ante estos eventos.

Bibliografía

- Baena, G. (2017). Metodología de la investigación (3ra ed.). Obtenido de: http://www.biblioteca.cij.gob.mx/Archivos/Materiales_de_consulta/Drogas_de_Abuso/Articulos/metodologia%20de%20la%20investigacion.pdf
- Borjas, M. (2016). Metodología de la Investigación científica para Ingenieros. Obtenido de Studylib: <https://studylib.es/doc/8929463/metodologia-de-investigacion-cientifica-para-ingenieros>
- Burgos, B., Cartaya, S., y Mero, D. (2019). Análisis de la vulnerabilidad a inundaciones de la parroquia Santa Ana de Vuelta Larga, provincia de Manabí, Ecuador. Obtenido de Instituto de Geografía INANM, Investigaciones geográficas: <https://doi.org/10.14350/rig.59767>
- 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>

- Cabrera, J., Timbe, L., y Crespo, P. (2019). Evaluación del modelo HEC-HMS para la simulación hidrológica de una cuenca de páramo. Obtenido de Universidad Nacional de Colombia:
<https://doi.org/10.15446/dyna.v86n210.70738>
- Castillo, C., Abreu, D., y Álvarez, M. (2021). 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 Universidad Tecnológica Equinoccial, Ecuador:
<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
- Espinoza, J., y Pérez, S. (2019). Caracterización hidrológica de una cuenca mediante un sistema de información geográfico caso de estudio cuenca del río Casacay. Obtenido de Universidad Técnica de Machala:
<http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/14126>
- 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>
- Gallardo, E. (2017). Metodología de la investigación. Huancayo, Huancayo - Perú. Obtenido de Universidad Continental:
https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/4278/1/DO_UC_EG_MAI_UC0584_2018.pdf
- García, D. (2018). Factores de riesgo de la quebrada Cunduana sobre las zonas de expansión urbanas de Riobamba. Obtenido de Universidad Nacional de Chimborazo, Ecuador:
<http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/4681/1/UNACH-EC-ING-CIVIL-2018-0008.pdf>

- Jácome, M., y Montalvo, C. (2022). Determinación de zonas urbanas vulnerables a inundaciones de la quebrada Cundwana mediante el uso de modelos hidrológicos e hidráulicos. Obtenido de Universidad Nacional de Chimborazo
- López, A. (2012). Análisis multifractal y modelación de la precipitación. Obtenido de Universidad Autónoma de Querarétaro: <https://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/531/1/RI003642.pdf>
- Martínez, A., y García, D. (2018). Factores de riesgo de la quebrada Cundwana sobre las zonas de expansión urbanas de Riobamba. Obtenido de Universidad Nacional de Chimborazo: <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/4681>
- Montalvo, L., y Salazar, D. (2023). Simulación de inundaciones utilizando geo tecnologías para gestionar el uso y ocupación del suelo, en la quebrada de Cunduhuana cantón Riobamba, Chimborazo. Obtenido de Universidad Nacional de Chimborazo: <http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/10567/1/2.%20MONTALVO%20L.%20LENI%20E.%20SALAZAR%20C.%20DANNY%20G.%282023%29-SIMULACION%20DE%20INUNDACIONES%20CUNDUANA.pdf>
- Novillo, N. (2018). Cambio climático y conflictos socioambientales en ciudades intermedias de América Latina y el Caribe. Obtenido de Letras Verdes. Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales: DOI: <http://dx.doi.org/10.17141/letrasverdes.24.2018.3323>
- 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>
- Reyes, J. (2023). Eficiencia del recurso hídrico en el riego de pasto para la adaptación al cambio climático. (Tesina de titulación no publicada). Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Chone.
- Témez, J. (1992). Control del desarrollo urbano en las zonas inundables. Control del desarrollo urbano en las zonas inundables. Obtenido de Monografías del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 10, pp 105–115. Madrid.
- Zúñiga, M., Montalvo, C., Zarate, V., y Andrade, A. (2024).

Influencia del cambio
climático sobre el régimen de
crecidas en la quebrada de
Cunduana. Obtenido de
Revista Científica
"INGENIAR": Ingeniería,
Tecnología e Investigación,
volumen 7:
[https://doi.org/10.46296/ig.v7i
13.0151](https://doi.org/10.46296/ig.v7i13.0151)