



Modelamiento hidráulico del río Blanco y el río Cristal, para el análisis de inundaciones en la cabecera parroquial de Valle Hermoso, cantón Santo Domingo, 2022

Hydraulic modeling of the Blanco river and the Crystal river, for flood analysis in the head parish of Valle Hermoso, cantón Santo Domingo, 2022

José Andrés Gordon Morillo ¹ (jogordon@mailes.ueb.edu.ec) (<https://orcid.org/0009-0009-0448-7681>)

Martha Alexandra Ramírez Guamán ² (martramirez@mailes.ueb.edu.ec) (<https://orcid.org/0009-0006-2566-7479>)

Paúl Sánchez Franco ³ (paulsanchez@mailes.ueb.edu.ec) (<https://orcid.org/0000-0002-2581-1737>)

Resumen

Este artículo presenta un proyecto de investigación en el que se realizó un modelamiento hidráulico de los ríos Blanco y Cristal para identificar las zonas de inundación en la cabecera parroquial de Valle Hermoso. El enfoque del proyecto combinó métodos cualitativos y cuantitativos para recopilar, analizar y sistematizar la información. Se obtuvieron caudales máximos para períodos de retorno de 50, 100 y 500 años en la microcuenca del río Cristal y en la subcuenca Blanco DJ Toachi. Además, se generó un Modelo Digital del Terreno (MDT) y un ortomosaico mediante un dron DJI Mavic. Se llevó a cabo un análisis de sensibilidad del coeficiente de rugosidad de Manning para calibrar el modelo utilizando datos de eventos reales ocurridos en la cabecera parroquial de Valle Hermoso. El modelo se validó y se realizaron simulaciones para diferentes períodos de retorno, para identificar las áreas de inundación al combinar el calado y la velocidad. Las zonas más afectadas fueron las áreas cercanas a las riberas de los dos ríos, incluyendo la Unidad Educativa San Pedro de Valle Hermoso, la iglesia, el parque central, el GAD parroquial y el recinto ferial como los principales espacios públicos del sector.

Palabras claves: modelamiento hidráulico, caudales máximos, coeficiente de rugosidad, ortofoto, MDT, calado y velocidad.

Abstract

This article presents a research project in which hydraulic modeling of the Blanco and Cristal rivers was carried out to identify flood zones in the parish headwaters of Valle Hermoso. The project approach combined qualitative and quantitative methods to collect, analyze and systematize the information. Maximum flows were obtained for return periods of 50, 100 and 500 years in the Cristal River micro-basin and in the Blanco DJ Toachi sub-basin. In addition, a

¹Docente de la Universidad Estatal de Bolívar. Ecuador

²Docente de la Universidad Estatal de Bolívar. Ecuador

³Docente de la Universidad Estatal de Bolívar. Ecuador

Digital Terrain Model (DTM) and an orthomosaic were generated using a DJI Mavic drone. A sensitivity analysis of the Manning's roughness coefficient was carried out to calibrate the model using data from real events that occurred in the parish headwaters of Valle Hermoso. The model was validated and simulations were performed for different return periods to identify flooding areas by combining draft and velocity. The most affected areas were the areas near the banks of the two rivers, including the San Pedro de Valle Hermoso Educational Unit, the church, the central park, the parish GAD and the fairgrounds as the main public spaces in the sector.

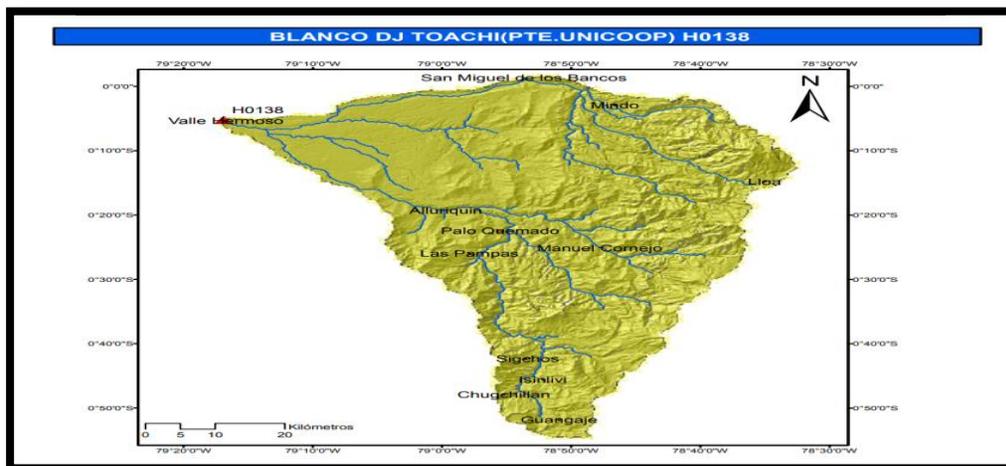
Key words: hydraulic modeling, peak flows, roughness coefficient, orthophoto, DTM, draft and velocity.

Introducción

La parroquia Valle Hermoso, en el cantón Santo Domingo de los Colorados, provincia Santo Domingo de los Tsáchilas, enfrenta graves problemas debido a los desbordamientos de los ríos Blanco y Cristal. Estos desbordamientos son causados por las intensas lluvias en la región y la unión del río Blanco con el Toachi aguas arriba del centro poblado, por lo que se forma un río de gran envergadura. A pesar de las medidas tomadas para controlar el río Blanco, los asentamientos en el centro poblado están en riesgo debido a la falta de mantenimiento y refuerzos en las defensas ribereñas. Además, el río Cristal carece de diques protectores, lo que provoca inundaciones, especialmente, en la zona de la Unidad Educativa San Pedro de Valle Hermoso, y esto tiene un impacto significativo en la comunidad.

Análisis hidrológico. Subcuenca Blanco DJ Toachi

La subcuenca del río Blanco se extiende por las provincias de Santo Domingo de los Tsáchilas, Cotopaxi y Pichincha, cubre un área de 4153 km². Entre los cursos de agua más destacados en esta área se encuentran el río Blanco y el río Toachi. Estos dos ríos se unen aguas arriba de la cabecera parroquial de Valle Hermoso, en una zona conocida como La Bocana. Este lugar es reconocido como uno de los principales atractivos turísticos de la región (figura 1).



Fuente: INAMHI (2015)

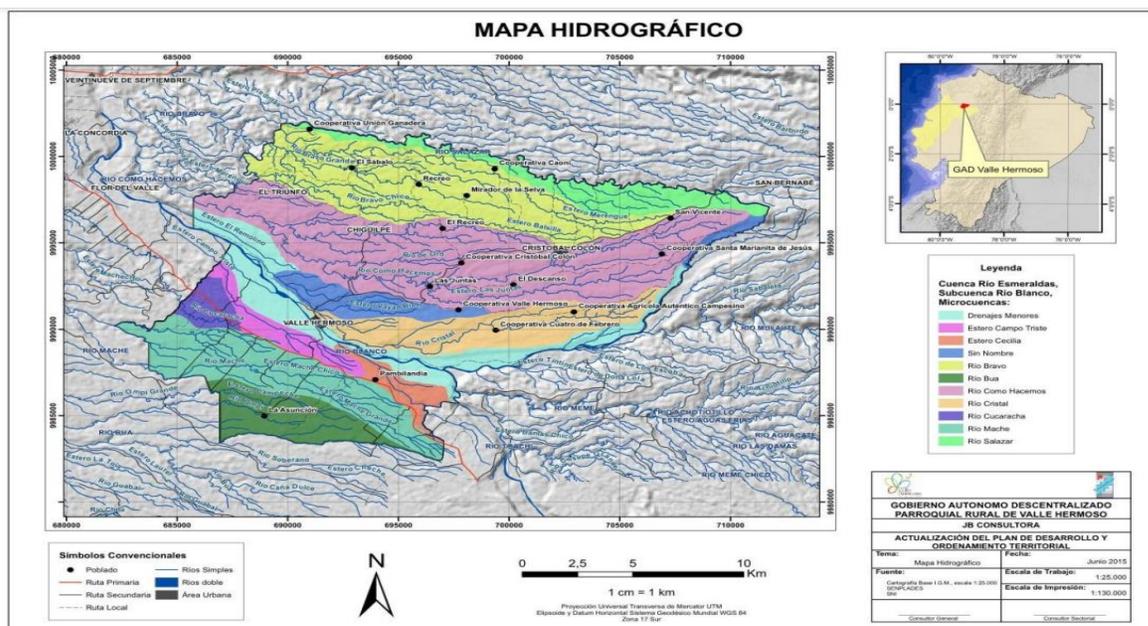
Tabla 1. Características morfológicas de la cuenca hidrográfica

| Descripción | Indicador |
|--|-----------|
| Perímetro | 437 km |
| Longitud del río hasta el punto del cierre del cauce | 138.07 km |
| Longitud en línea recta hasta el punto de cierre del cauce | 96 km |
| Cota superior | 3125 msnm |
| Cota inferior | 283 msnm |
| Pendiente del río | 2,06 % |
| Índice de compacidad | 1,89698 |
| Pendiente media de la cuenca | 2,95 % |
| Tiempo de concentración | 13,14 h |
| Relieve | Escarpado |

Fuente: INAMHI (2015)

La microcuenca del río Cristal

La microcuenca abarca una superficie de 27,29 km² y se encuentra a una distancia de 16,641 km del cauce, según los datos proporcionados por el GAD Parroquial de Valle Hermoso, en 2015. Estos detalles son fundamentales para realizar cálculos precisos relacionados con las máximas avenidas (figura 2).



Fuente: GAD Parroquial de Valle Hermoso (2015)

Método racional modificado

La creación de este método se atribuye a Lloid-George (1906) y, posteriormente, fue modificado por Témez, durante el XXIV Congreso de la Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas en Madrid (1991). El propósito de este método es calcular los caudales máximos en cuencas pequeñas o microcuencas para diferentes periodos de retorno (T_r). Se basa en la siguiente expresión:

$$Q_{max} = \frac{KCIA}{3,6}$$

Donde

$Q_{máx}$ = Caudal máximo de la microcuenca

C = Coeficiente de escorrentía medio ponderado de la microcuenca

I = Intensidad máxima respecto al tiempo de concentración

A = Área de la microcuenca

K = Coeficiente de ajuste de la sección de estudio

Hidrograma triangular del SCS

Para Sánchez (2012) el hidrograma triangular del SCS es uno de los enfoques más habituales para conectar la precipitación y la escorrentía, lo que permite estimar el caudal pico en relación con el tiempo pico y el tiempo base. A continuación, se proporcionan las ecuaciones para llevar a cabo estos cálculos.

$$T_p = 0,5 * D + T_r$$

$$T_b = 2,67 T_p$$

$$Q_p = (P_e * A) / (1,8 T_b)$$

Donde

D = Duración de la lluvia, D igual al tiempo de concentración para cuencas pequeñas (horas)

T_r = Tiempo de retardo $\approx 0.6 * T_c$ (horas)

T_p = Tiempo punta (horas)

T_b = Tiempo base (horas)

Q_p = Caudal pico (m^3/s)

A = Área de la cuenca (km^2)

P_e = Precipitación Efectiva (mm)

Modelamientos hidráulicos bidimensionales

Los modelamientos hidráulicos bidimensionales en el software HEC-RAS representan una técnica avanzada empleada para simular el flujo de agua en ríos, canales y zonas propensas a inundaciones. HEC-RAS, creado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE), es una herramienta de amplio reconocimiento en el ámbito de la modelización hidráulica. Su destacada capacidad para llevar a cabo análisis bidimensionales es una de sus características más sobresalientes (Soto, 2020).

Software HEC-RAS

El *Hydrological Engineering Center - River Analysis System* (HEC-RAS) es un software gratuito que posibilita la simulación de flujos en cursos de agua, tanto naturales como artificiales, con el propósito principal de llevar a cabo estudios de inundación. Este programa se compone de cuatro tipos de análisis fluviales.

- Modelo de flujo en régimen permanente.
- Modelo de flujo en régimen no permanente.
- Modelo de transporte de sedimentos.
- Análisis de calidad del agua.

Para Lluén (2017), HEC-RAS es una herramienta en constante evolución a través de nuevas versiones. Esta aplicación cuenta con una extensión que permite simular el flujo de agua mediante la combinación de modelos 1D/2D. Para llevar a cabo estos cálculos se utilizan ecuaciones de onda difusiva y ecuaciones de San Venant, según los criterios definidos por el usuario. La resolución de estas ecuaciones se lleva a cabo mediante algoritmos de volúmenes finitos implícitos. La evaluación de esta herramienta nos brinda una comprensión profunda de sus capacidades y limitaciones al desarrollar simulaciones hidráulicas.

Antecedentes de la investigación

El autor Bolívar (2020) realizó una investigación de modelamiento hidrológico e hidráulico bidimensional en el río Marañón, específicamente, en el sector del puente Tingo Chico de la carretera Huánuco-Conococha. El estudio incluyó un análisis hidrológico que involucró el procesamiento de datos sobre precipitaciones máximas en 24 horas y caudales máximos anuales. Se seleccionó el período de retorno en función de la vida útil y el nivel de riesgo del puente Tingo Chico. Para el modelamiento hidrológico, se empleó el software HEC-HMS, obteniendo un caudal pico de 1169.2 m³/s en la primera simulación con un período de retorno de 200 años. Se realizó la optimización de los parámetros CN e IA en HEC-HMS.

En cuanto al modelamiento hidráulico, se utilizó HEC-RAS 2D y IBER. Ambos modelos mostraron similitudes en el perfil de flujo. Aguas arriba del puente Tingo Chaco, predominó el régimen subcrítico con tirantes altos y velocidades bajas. En la sección del puente, el flujo fue en régimen subcrítico con velocidades moderadas. Aguas abajo del puente, las velocidades aumentaron y los tirantes disminuyeron, lo que se corresponde con el régimen supercrítico.

Camargo (2016), en su artículo científico publicado en la Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo, en Colombia, abordó la modelación hidrológica e hidráulica de eventos de inundación en el río Bogotá, específicamente, en el sector Tocanzipa-Chis, para lo cual utilizó el software HEC-RAS y ArcGIS. Los cálculos empleados en la investigación fueron proporcionados por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). Se modeló la cuenca media, y se observó el desbordamiento del nivel del río en algunos diques bajo condiciones de caudal máximo en diferentes partes del territorio: zona alta, media y baja.

Además, se realizó un modelamiento 3D de diversas secciones de la parte media de la cuenca bajo la condición inicial de caudal mínimo. En este análisis detallado, se concluyó que no hubo desbordamiento del nivel del río en ninguna sección. Se prestó particular atención a la primera y última sección transversal en estudio aguas arriba del río en relación con el nivel inicial, así como a las estaciones hidrológicas cercanas al área de estudio.

En el Ecuador, se han llevado a cabo diversos estudios hidráulicos, y uno de ellos realizado por el autor Pérez (2019), quien se enfocó en el río Yanuncay en la ciudad de Cuenca. Su investigación se titula Frente de Pareto de la calibración en régimen impermanente de un modelo hidráulico del río Yanuncay, y tuvo como objetivo obtener el coeficiente de rugosidad inicial para la calibración del modelo hidráulico del río Yanuncay en régimen impermanente utilizando el software HEC-RAS.

El autor generó varios escenarios de simulación con diferentes valores de rugosidad inicial, que variaron de 0,04 a 0,11. Luego, comparó los niveles de agua simulados en el río con los datos observados para determinar el escenario que mejor se ajustaba a la realidad. Para realizar esta evaluación, Pérez (2019) calculó varios frentes de Pareto y utilizó diversas funciones, así como pruebas de bondad de ajuste. El objetivo principal fue lograr una calibración precisa del modelo hidráulico del río Yanuncay.

Metodología

Nivel de la investigación

El presente trabajo de investigación está encaminado a una metodología mixta, la cual abarca los dos enfoques de la investigación, tanto cualitativo como cuantitativo.

El enfoque cualitativo se refiere a la indagación de la información de datos textuales reflejados en las diferentes fuentes bibliográficas como pueden ser artículos científicos, revistas, tesis doctorales, libros, etc.; todos estos estudios relacionados con los modelamientos hidráulicos en ríos y medidas estructurales y no estructurales, que se pueden establecer.

El enfoque cuantitativo se centra en la medición y comprobación de datos numéricos, para los cuales se calculó los caudales máximos para periodos de retorno de 50, 100 y 500 años en la microcuenca del río Cristal y en la subcuenca del río Blanco DJ Toachi, pertenecientes a la demarcación hidrográfica del río Esmeraldas. Por otro lado, mediante el software Hec-Ras 2D se identificaron las velocidades y tirantes críticos para, posteriormente, multiplicarlos entre sí y, de esta manera, definir las zonas de inundación en la cabecera parroquial de Valle Hermoso.

Metodología de trabajo

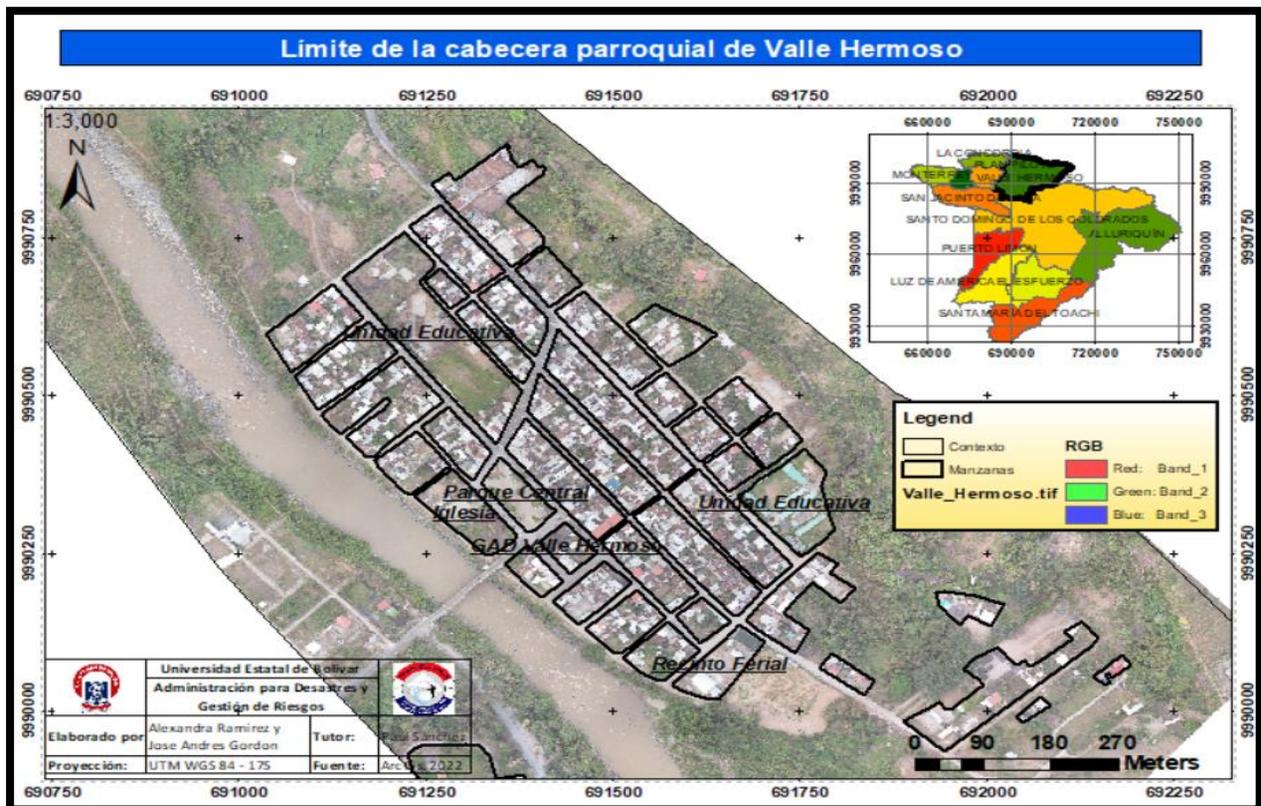
Tabla 1. Metodología de trabajo

| Nivel | Descripción |
|---------------|---|
| Amenaza Alta | Peligro alto para las personas, daños graves en las infraestructuras. Calado * velocidad $\geq 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ |
| Amenaza Media | Peligro medio para las personas, afectaciones a las viviendas, vehículos y personas por objetos que son arrastrados. Calado * velocidad = $0,081 - 0,49 \text{ m}^2/\text{s}$ |
| Amenaza Baja | Presencia de leves afectaciones en medio de la población con poca importancia. Calado * velocidad $V. \text{ min} - 0,080 \text{ m}^2/\text{s}$ |
| Sin Amenaza | Sin amenaza o exposición de personas e infraestructura a inundaciones. |

Fuente: Ramírez y Gordon (s/f)

Contexto de estudio

Figura 2. Manzanas de la cabecera parroquial de Valle Hermoso



Fuente: Ramírez y Gordon (s/f)

Análisis y discusión de los resultados

Microcuenca del río Cristal

El método racional modificado se emplea para cuencas pequeñas con poca información hidrológica en la estimación de caudales máximos para diferentes periodos de retorno con respecto al coeficiente de escorrentía, intensidad (mm/h), área de la cuenca (km²), un factor K correspondientes a la extensión y corrección de las precipitaciones en el contexto de estudio; estos valores se comparan con el método del hidrograma triangular del SCS para diferentes periodos de retorno. Se debe recalcar la investigación de las ecuaciones del INAMHI de la estación meteorológica M0025 (La Concordia) para los cálculos pertinentes de las máximas avenidas en la microcuenca del río Cristal.

Tabla 3. Caudales máximos de la microcuenca del río Cristal

| Periodo de Retorno | Método racional modificado | Método del hidrograma triangular del SCS |
|--------------------|----------------------------|--|
| | Río Cristal | |
| 50 años | 266,13 (m ³ /s) | 167,96 (m ³ /s) |
| 100 años | 294,46 (m ³ /s) | 185,84 (m ³ /s) |
| 500 años | 484,77 (m ³ /s) | 305,95 (m ³ /s) |

Fuente: Ramírez y Gordon (s/f)

La microcuenca del río Cristal tiene un área de 27,29 km² y una distancia del cauce 16,64 km, según (GAD Parroquial de Valle Hermoso, 2015); en cuanto a la intensidad máxima para los diferentes periodos de retorno se aplicó las ecuaciones propuestas por el INAMHI para la estación meteorológica M0025, según (INAMHI, Determinación de ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación, 2015), y el tiempo de concentración propuesto por Kirpich en 1946. Por otro lado, se calculó el coeficiente de escorrentía identificando el grupo de suelo hidrológico, uso de suelo, condiciones de humedad, CN, precipitaciones perdidas por infiltración y por abstracciones iniciales; en función de estos resultados se establece la relación entre precipitaciones totales y precipitaciones perdidas. Finalmente se obtiene el coeficiente de ajuste K, cuyo valor se obtiene a partir de, la extensión y tiempo de concentración de la microcuenca según el método racional modificado.

Por otro lado, en el método triangular del SCS se calculó el tiempo pico, tiempo base y el caudal pico. En la precipitación efectiva se tomó como referencia los mismos valores identificados en el anterior método. Al considerar eventos extremos los valores de las máximas avenidas obtenidas por el método racional modificado son los considerados para el modelamiento hidráulico del río Cristal.

Subcuenca Blanco DJ Toachi

La subcuenca del río Blanco abarca los territorios provinciales de Santo Domingo de los Tsáchilas, Cotopaxi y Pichincha con un área de 4153 km². Entre los principales ríos del contexto de estudio se identifica al río Blanco y río Toachi, los mismo que confluyen aguas arriba de la cabecera parroquial de Valle Hermoso, en el sector se la conoce como la Bocana.

Las estimaciones de los caudales máximos de la subcuenca Blanco DJ Toachi se obtuvo a través del registro histórico de la estación Blanco DJ Toachi (H0138) (INAMHI, Anuarios Hidrológicos, 1991 - 2015), donde consta los datos diarios de caudales desde 1991 a 2015.

Tabla 4. Registro histórico de la estación H0138

| Año | Nivel (cm) | Caudal (m ³ /s) |
|------|------------|----------------------------|
| 1991 | 320 | 1128,672 |
| 1992 | 340 | 1272,601 |
| 1993 | 370 | 1510,41 |
| 1994 | 300 | 995,315 |
| 1995 | 380 | 1271,981 |
| 1996 | 380 | 1064,213 |
| 1997 | 370 | 1056,475 |
| 1998 | 400 | - |
| 1999 | 400 | - |
| 2000 | 350 | - |
| 2001 | 330 | - |
| 2002 | 380 | 1103,451 |
| 2003 | 380 | 1103,461 |
| 2004 | 340 | 920,8 |
| 2005 | 280 | 598,859 |
| 2006 | 450 | 1456,478 |
| 2007 | 350 | 995,138 |
| 2008 | 440 | 1403,5 |
| 2009 | 400 | 1200,04 |
| 2010 | 460 | 1510,294 |
| 2011 | 480 | 1620,425 |
| 2012 | 400 | 1200,039 |
| 2013 | 450 | 1456,476 |

Fuente: INAMHI, Anuarios Hidrológicos (1991-2015)

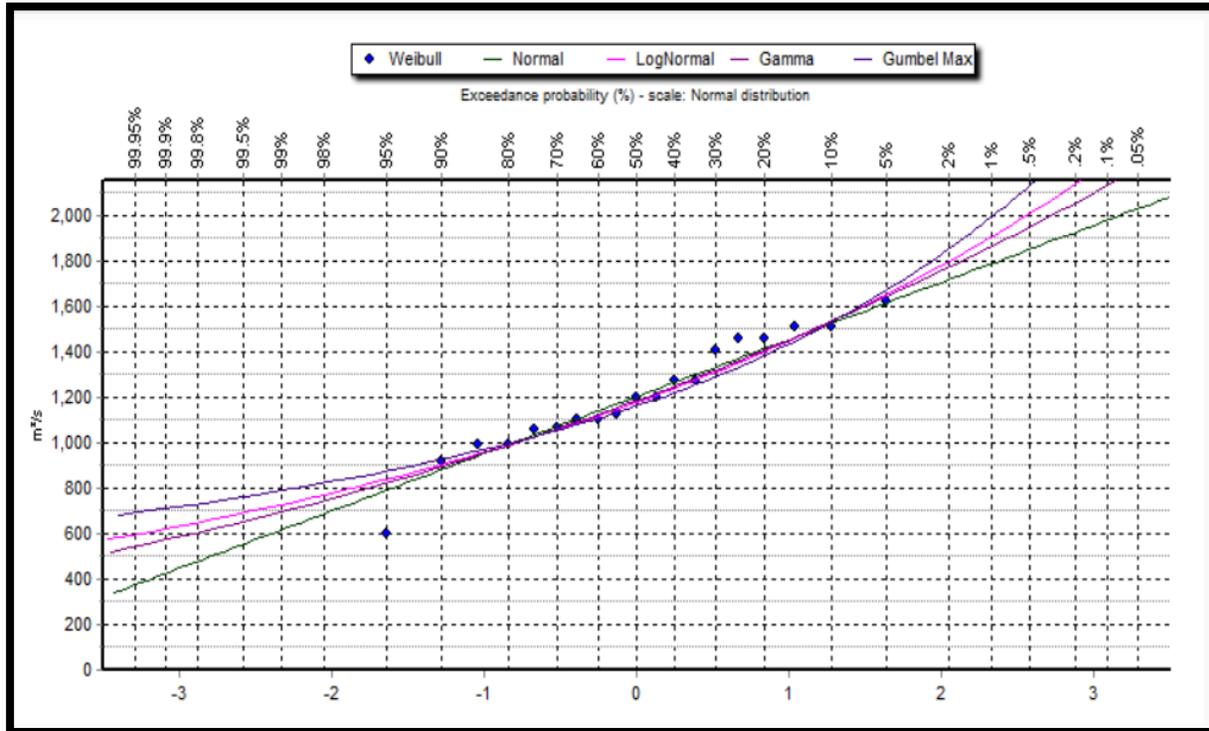
Los valores de caudales máximos para diferentes periodos de retorno se obtuvieron mediante el software Hidrognomon 4.

Tabla 5. Distribución de probabilidades más comunes en hidrología

| Kolmogorov-Smirnov test | a=1% | a=5% | a=10% | Attained a | DMax |
|-------------------------|--------|--------|--------|------------|------|
| EV1-Max (Gumbel) | ACCEPT | ACCEPT | ACCEPT | 90,13% | 0,12 |
| Normal | ACCEPT | ACCEPT | ACCEPT | 98,17% | 0,09 |
| LogNormal | ACCEPT | ACCEPT | ACCEPT | 96,14% | 0,10 |
| Exponential | ACCEPT | ACCEPT | ACCEPT | 79,91% | 0,13 |
| Pearson III | ACCEPT | ACCEPT | ACCEPT | 97,88% | 0,09 |

Fuente: Ramírez y Gordon (s/f)

Gráfico 1. Valores observados vs valores esperados



Fuente: elaboración propia

Análisis. En la tabla 5 se puede observar que la distribución Normal es la que más se ajusta en los valores observados con respecto a los valores esperados, al considerar el porcentaje y el delta máximo en la prueba de Kolmogorov-Smirnov; por lo tanto, los valores de caudales máximos para periodos de retorno de 50, 100 y 500 años son los obtenidos por la distribución de probabilidad Normal.

Tabla 6. Valores de caudales para diferentes TR

| Periodo de Retorno | Xt (m ³ /s) |
|--------------------|------------------------|
| 50 | 1720,13 |
| 100 | 1788,69 |
| 500 | 1927,47 |

Fuente: Ramírez y Gordon (s/f)

Los valores de caudales máximos para los diferentes periodos de retorno analizados son los considerados para el modelamiento hidráulico del río Blanco.

Preprocesamiento para el modelamiento hidráulico con el software HEC RAS

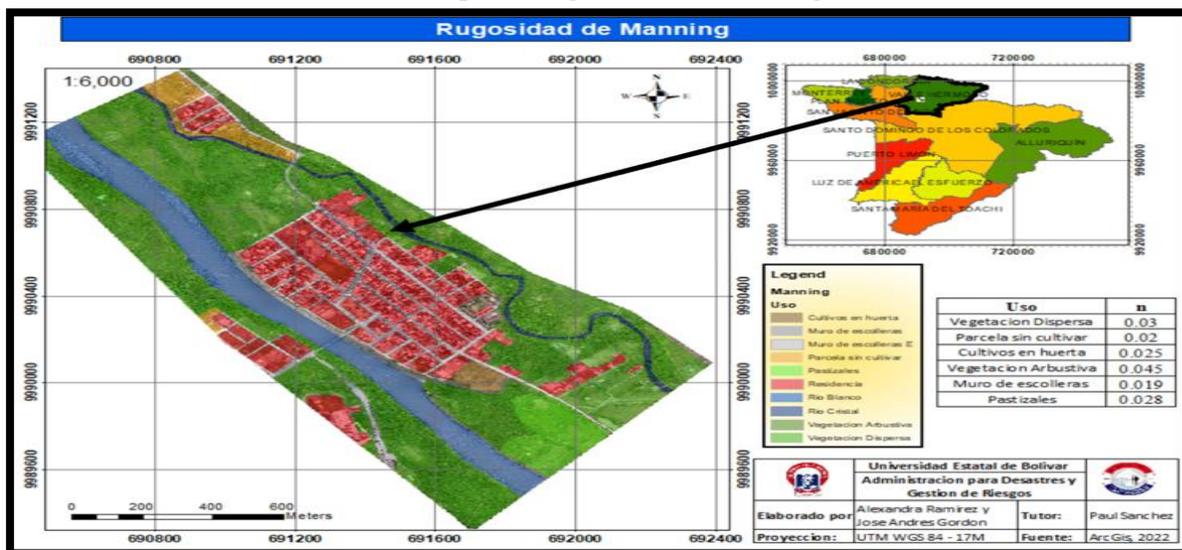
Modelo digital del terreno

El MDT resultante de la fotogrametría con drone y las correcciones respectivas en el software ArcGIS tiene una resolución espacial de 1,07 m por píxel en una superficie de 172.20 ha; a más de ello el ortomosaico tiene una resolución de 0,04 m por píxel.

Rugosidad de Manning

Con la ayuda de la ortofoto se procedió a crear un archivo en formato shp del uso de suelo que abarque el MDT, posteriormente, se asignó el valor n (Rugosidad de Manning) de acuerdo con la investigación de Pelegrín (2014), recopilados de los procedimientos de estudios de inundabilidad en el ámbito de Ordenamiento Territorial de Murcia, España.

Mapa 1. Rugosidad de Manning



Fuente: Ramírez y Gordon (s/f)

Mallas computacionales

Para el presente estudio se utilizó una malla de 25m por 25m en todo el contexto, un refinamiento de la misma en los 2 cauces naturales de 12,5m por 12,5m, así como también las estructuras de los puentes con celdas de 10m por 10m.

Convergencia del modelo

La convergencia del modelo está en función del espacio, el tiempo y la velocidad aplicando la fórmula del número de Courant; este último es una constante que varía de 1 a 3

$$C = \frac{V * \Delta T}{\Delta X}$$

Por lo tanto, el intervalo computacional para el modelamiento es de 2s

Procesamiento

Geometría, condiciones de contorno y plan de simulación

En esta sección se insertó el MDT y la capa de uso de suelo que contienen los valores de rugosidad; así como también, se elaboró el perímetro en el contexto de estudio para establecer el tamaño de malla de 25x25m en todo el territorio a excepción de los cauces y las estructuras hidráulicas (Puentes). En los dos ríos se hizo un refinamiento de 12,5x12,5m y en los puentes 10x10m; por consiguiente, se agregó las condiciones de entrada y de salida del flujo; seguido de la edición de los puentes.

En los datos de flujo no permanente se agregan los valores de caudales máximos para periodos de retorno de 50, 100 y 500 años, con su respectivo tiempo al pico y tiempo base; para cuencas pequeñas la duración de la lluvia es $d = t_c$, y para cuencas grandes $d = 2 \sqrt{t_c}$. (Ojeda, 2017),

En esta etapa se insertó el tiempo de simulación de los hidrogramas y el número intervalo computacional para correr el modelo, además de crear una carpeta donde se guarden los resultados de tirantes, velocidades y espejo de agua.

Validación y calibración del modelamiento hidráulico

Río Cristal

El río Cristal carece de una estación hidrológica, por lo que se utilizaron datos históricos de la estación meteorológica M0025 (La Concordia). En 2015, una inundación causada por el río Cristal resultó en daños a la población. Se registraron precipitaciones máximas de 140 mm en 24 horas, y la intensidad se calcula dividiendo la precipitación total por 24 horas. El caudal se determina mediante el método racional modificado, como se resume en una tabla.

| P 24h | A (km ²) | C | I (mm/h) | K | Q Máx. (m ³ /s) |
|-------|----------------------|------|----------|-------|----------------------------|
| 140 | 29,08 | 0,43 | 31,96 | 1,079 | 113,07 |

Fuente: INAMHI, Registro Historico de Precipitaciones Max 24h (2015)

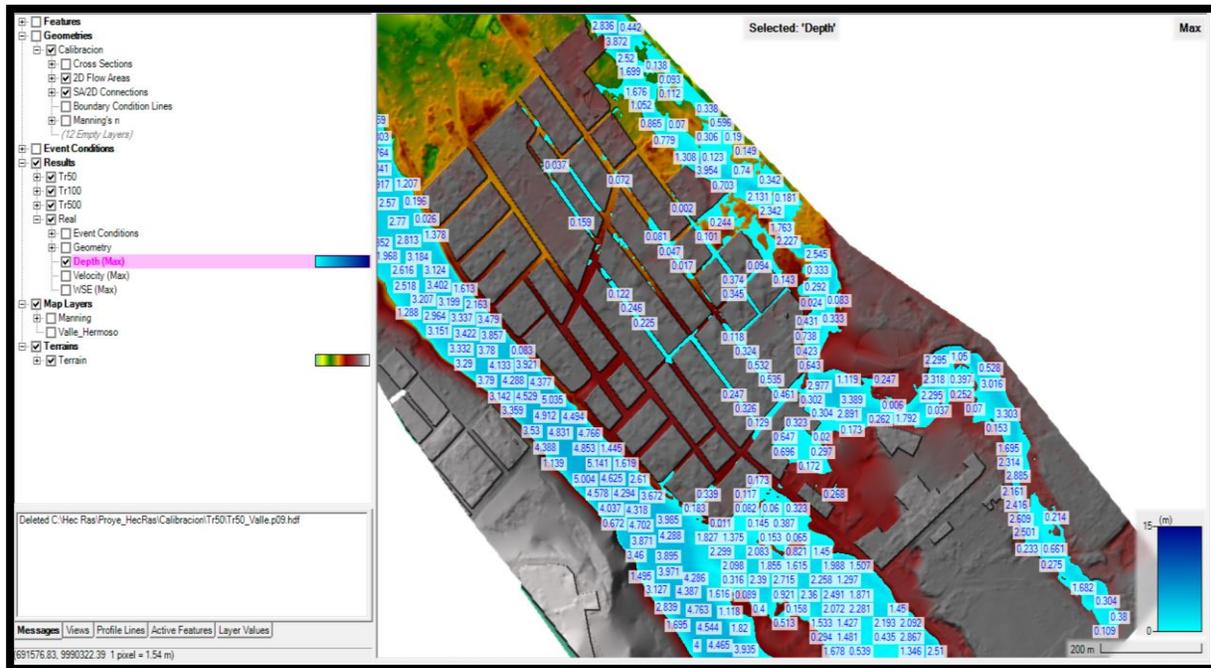
Río Blanco

La calibración del modelo se llevó a cabo con el objetivo de obtener resultados que se acerquen lo más posible a la realidad. Para lograrlo, se simularon los caudales pico registrados en la estación hidrológica Blanco DJ Toachi, durante el período del 26 al 28 de abril de 2011

| Fecha | Caudal (m ³ /s) |
|------------|----------------------------|
| 26/04/2011 | 583,708 |
| 27/04/2011 | 1620,425 |
| 28/04/2011 | 834,813 |

Fuente: INAMHI, Anuarios Hidrologicos (2011)

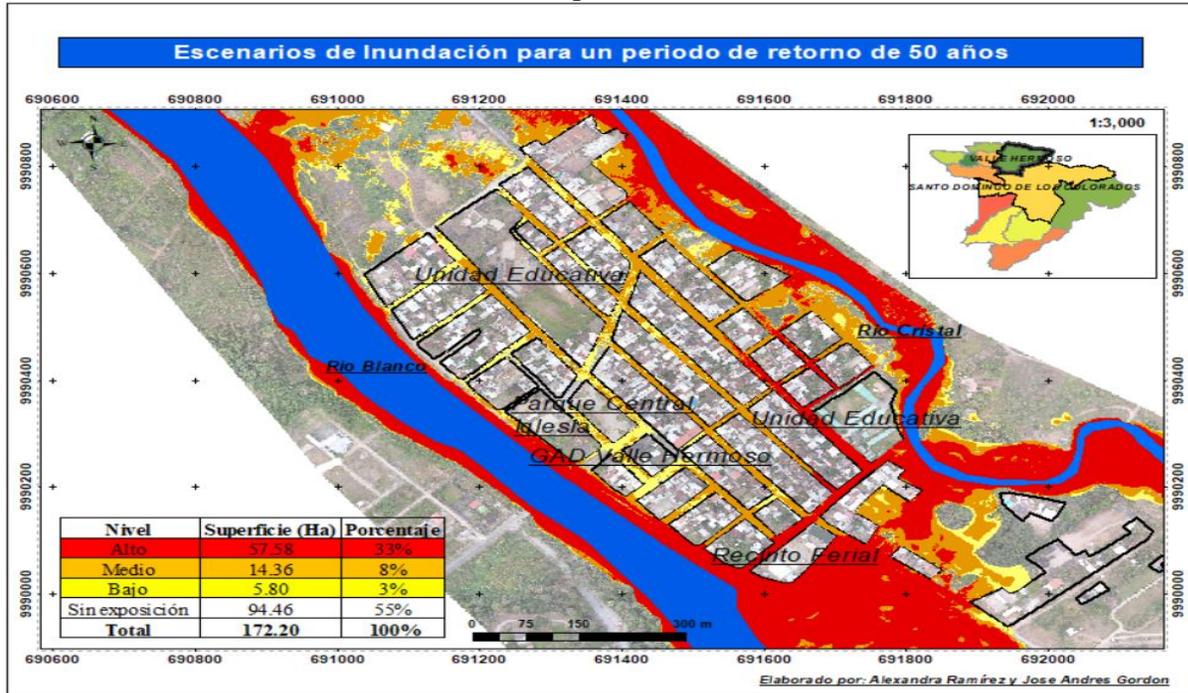
Ilustración 1. Niveles de agua registrado en la cabecera parroquial por antecedentes históricos



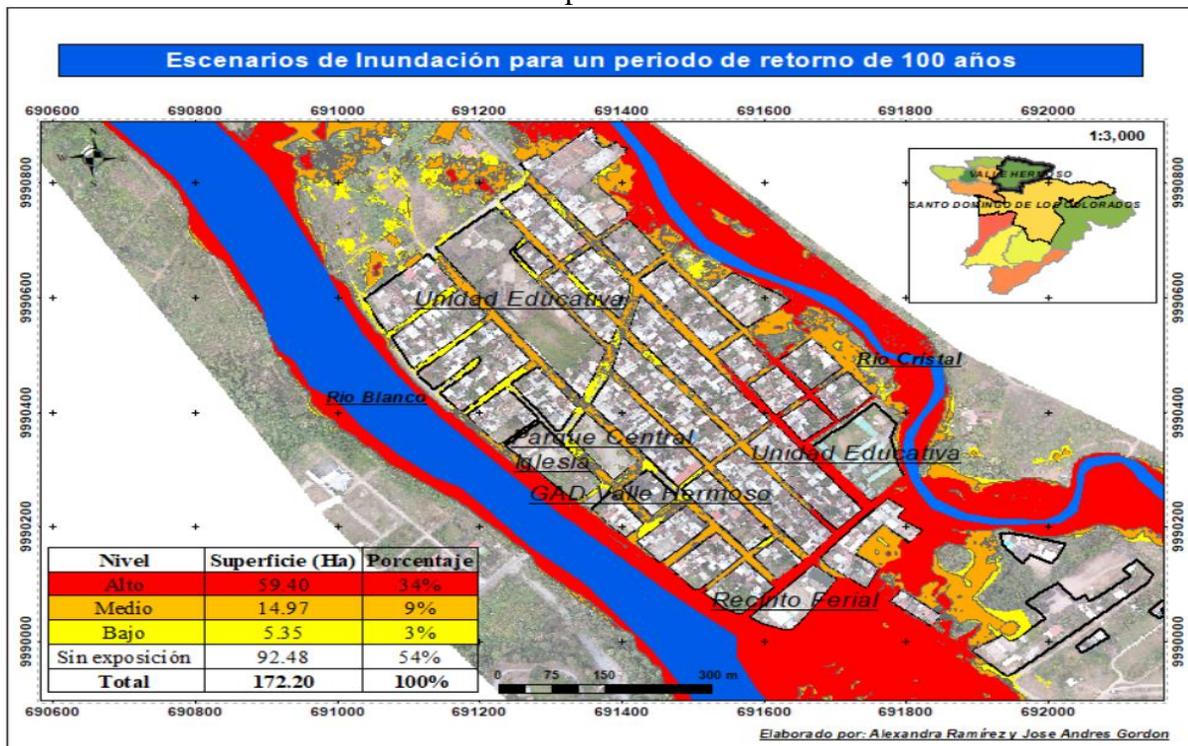
Fuente: elaboración propia

Escenarios para diferentes periodos de retorno

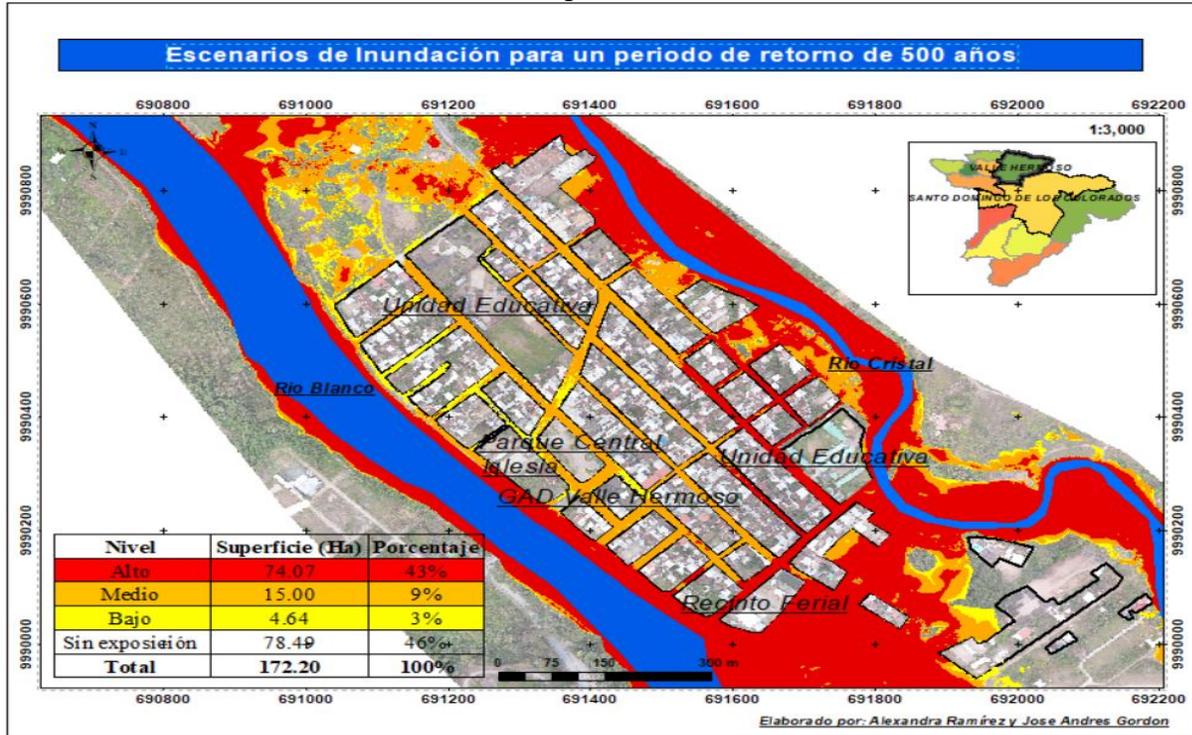
Mapa 2. TR 50



Mapa 3. TR 100



Mapa 4. TR 500



Fuente: Ramírez y Gordon (s/f)

Tabla 7. Resumen de inundaciones en la cabecera parroquial de Valle Hermoso para diferentes TR

| Nivel | Descripción | TR 50 | TR 100 | TR 500 |
|----------------|---|-------|--------|--------|
| Alto | Peligro alto para las personas, daños graves en las infraestructuras. Calado * velocidad $\geq 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ | 33% | 34% | 43% |
| Medio | Peligro medio para las personas, afectaciones a las viviendas, vehículos y personas por objetos que son arrastrados. Calado * velocidad = $0,081 - 0,49 \text{ m}^2/\text{s}$ | 8% | 9% | 9% |
| Bajo | Presencia de leves afectaciones en medio de la población con poca importancia. Calado * velocidad $V. \text{ min} - 0,080 \text{ m}^2/\text{s}$ | 3% | 3% | 3% |
| Sin exposición | Sin amenaza o exposición de personas e infraestructura a inundaciones. | 55% | 54% | 46% |

Fuente: Ramírez y Gordon (s/f)

En la presente tabla se puede observar los resultados obtenidos producto del modelamiento hidráulico bidimensional en el software Hec Ras, partiendo en primera instancia de la calibración del modelo de los eventos registrados por la estación Hidrológica H0138, en el año 2011, y los datos registrados en la estación meteorológica M0025, para el año 2015. Consecuentemente,

como resultados de los modelamientos para TR analizados se puede identificar las áreas que serán las más afectadas en épocas de lluvia, siendo la Unidad Educativa San Pedro de Valle Hermoso, la iglesia, el GAD parroquial, el parque central y el recinto ferial los espacios públicos cuyo peligro de inundación es alto.

Conclusiones

La aplicación de métodos hidrológicos fue adecuada para calcular los caudales máximos con períodos de retorno de 50, 100 y 500 años en la microcuenca del río Cristal. Estos cálculos se realizaron utilizando el método racional modificado de Témez. En el caso del río Blanco, se realizó un análisis de los diferentes métodos probabilísticos para estimar los caudales máximos, siendo los resultados del método de distribución normal los que más se ajustan con respecto a los valores observados y esperados de los datos de caudales registrados en la estación hidrológica H0138, desde 1990 al 2015.

El uso del software HEC-RAS permitió llevar a cabo el modelamiento hidráulico bidimensional tanto para el río Blanco como para el río Cristal. Esto facilitó la identificación de las áreas propensas a inundaciones en la cabecera parroquial de Valle Hermoso, lo que se basó en una topografía detallada, así como en factores como el coeficiente de rugosidad de Manning de los cauces, la geometría, las condiciones hidrodinámicas internas y externas. También se diseñó un plan de simulación que incluyó la obtención de resultados de velocidades y niveles de agua, los cuales se categorizaron en función de los 4 niveles de amenaza identificados.

Las poblaciones situadas en las proximidades del río Cristal, en particular la Unidad Educativa San Pedro de Valle Hermoso, han experimentado las mayores afectaciones por eventos históricos, y continuarán enfrentando riesgos para diferentes períodos de retorno. Esto se debe a que las proyecciones para 50, 100 y 500 años indican un aumento constante en el nivel de amenaza. En cuanto a las áreas cercanas al río Blanco, si bien la implementación de muros de escolleras ha reducido el impacto de los desbordamientos, esto no garantiza que estén exentas de peligro. Por lo tanto, es crucial que las autoridades realicen tareas de mantenimiento, dado que este cauce es uno de los afluentes más significativos de la Demarcación Hidrográfica Esmeraldas.

Referencias

- Bolívar, G. (2020). *Modelamiento hidrológico e hidráulico bidimensional del río Marañón sector Puente Tingo Chico. Carretera Huánuco-Conococha*. [tesis de titulación. Universidad Nacional Agraria La Molina]
- Camargo, C. (2016). *modelación hidrológico-hidráulica de eventos de inundación en el río Bogotá (sector Tocanzipa-Chia) usando Hec-Ras*. Grupo Visión Colombia Hídrica. Universidad Militar Nueva Granada.
- GAD Parroquial de Valle Hermoso. (2015). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la parroquia de Valle Hermoso. Cuencas Hidrográficas. GAD parroquial de Valle Hermoso, Santo Domingo*.

- INAMHI. (1991 - 2015). *Anuarios Hidrológicos. Información Generada por las 35 estaciones Hidrológicas automáticas*. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, Quito.
- INAMHI. (2011). *Anuarios Hidrológicos. Registro Histórico de la estación H138*. INAMHI, Quito.
- INAMHI. (2015). *Anuarios Hidrológicos. Subcuenca Blanco DJ Toachi*.
- INAMHI. (2015). *Determinación de ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación. Intensidad, Duración y Frecuencia de la estación M0025 La Concordia*. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, Quito - Ecuador.
- INAMHI. (2015). *Registro Histórico de Precipitaciones Max 24h. Dato Histórico de Precipitaciones Max 24 de la estación M0025*. INAMHI, Quito.
- Lluén, E. (2017). *Aplicación de la nueva herramienta Hec-Ras 5.0 para cálculos bidimensionales del flujo de agua en ríos*. [tesis de maestría. Escola de Camins UPC Barcelonatech]
- Mejía, J. (2021). *Modelamiento Hidráulico 2D con HEC RAS v6.1*. Número de Counrat. CERSA.
- Ojeda, C. (2017). *Determinación experimental del balance hídrico y análisis de la relación precipitación escorrentía de la microcuenca del río Blanco. Cálculo del método número de curva de la microcuenca del río Blanco DJ Toachi*. Universidad Politécnica Salesiana sede Quito.
- Paucar, A. (2016). *Modelo para la articulación de la gestión del riesgo en el proceso de ordenamiento territorial de la ciudad de Guaranda / Ecuador. Metodología para la evaluación de la amenaza de inundación*. Universidad de Valencia, Guaranda.
- Pelegrín, M. (2014). *Estudio hidrológico e hidráulico para la autorización de movimientos de tierra e instalación de invernaderos en zona de Policía de la Rambla Villalba. Rugosidades de Manning para los usos de suelo*. Universidad Miguel Hernández de Elche.
- Pérez, M. (2019). *Frente de Pareto de la calibración en régimen impermanente de un modelo hidráulico del río Yanuncay, de la ciudad de Cuenca*. [tesis de titulación. Universidad del Azuay]
- Sánchez, F. (2012). *Hidrología Superficial: Relación Precipitación-Escorrentia. Hidrogramas Sintéticos*. Universidad de Salamanca.



Soto, L. (2020). *Modelamiento hidráulico y diseño de defensas ribereñas del río Amojú, localidad El Parral – Jaén - Cajamarca*. [tesis de titulación. Universidad Nacional de Cajamarca, Jaén - Cajamarca].