

Atenuadores de Escorrentía para la Quebrada Cañitas, Parroquia Charapotó, Manabí, Utilizando Herramientas SIG.

Fidel Castro Solórzano¹

fidelcastro@uta.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-3858-9239>

Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica,
Universidad Técnica de Ambato, Ambato,
Ecuador

RESUMEN

En esta investigación se desarrolló un plan de manejo sostenible de la quebrada “Cañitas”, utilizando obras de bioingeniería y un enfoque sostenible de síntesis y análisis para evaluar las medidas de susceptibilidad de inundación. Así, se identificaron los lugares óptimos donde colocar estas obras, y se interceptaron datos geográficos sobre pendiente, movimiento de masa, pluviosidad, zonas protegidas, litología, cobertura vegetal y permeabilidad del suelo, empleando aplicaciones de Sistemas Información Geográfica, así como una simulación hidrológica mediante el *software Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System (HEC-HMS)*, para analizar el comportamiento entre la precipitación y la escorrentía, determinando la morfometría de la quebrada y estimando los caudales máximos con periodos de retorno de 25, 50, 100 y 500 años. Los resultados indican que esta quebrada está compuesta por tres sub quebradas, una unión y un río principal, con una duración de tormenta de 202 minutos; además, se consideró la implementación de obras de bioingeniería como terrazas, forestación, reforestación con especies nativas y control de cárcavas en lugares con baja permeabilidad y alto potencial hídrico, identificando que la medida que mejor reduce los caudales pico en los hidrogramas son la forestación, disminuyendo los caudales según los periodos de retorno en un 19,2% para 25 años, un 17,4% para 50 años, un 14,9% para 100 años y un 11,6% para 500 años.

Palabras Claves: *Cuencas, morfométricas, escorrentía, inundaciones, drenaje, modelo digital del terreno*

¹ Autor Principal

Runoff attenuators for the Cañitas ravine, Charapotó parish, Manabí, using GIS tools.

ABSTRACT

In this research study, a sustainable management plan was developed for the “Cañitas” Creek, using bioengineering works and a sustainable synthesis and analysis approach to evaluate flood susceptibility measures. Thus, the optimal locations where to place these works were identified, and geographic data on slope, mass movement, rainfall, protected areas, lithology, vegetation cover and soil permeability were intercepted, using Geographic Information Systems applications, as well as a hydrological simulation using Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) software, to analyze the behavior between precipitation and runoff, determining the morphometry of the stream and estimating the maximum flows with return periods of 25, 50, 100 and 500 years. The results indicate that this stream is composed of three sub streams, a junction and a main river, with a storm duration of 202 minutes; In addition, the implementation of bioengineering works such as terraces, afforestation, reforestation with native species and gully control was considered in places with low permeability and high water potential, identifying that the measure that best reduces the peak flows in the hydrographs is afforestation, reducing the flows according to the return periods by 19.2% for 25 years, 17.4% for 50 years, 14.9% for 100 years and 11.6% for 500 years.

Keywords: *Watersheds, morphometric, runoff, floods, drainage, digital terrain model*

Artículo recibido 05 junio 2023

Aceptado para publicación: 05 julio 2023

INTRODUCCIÓN

Sin lugar a duda es necesario estudiar los recursos naturales para poder garantizar un manejo sostenible de los mismos. En este orden, se han efectuado varias investigaciones en torno a la falta de agua tanto para el consumo humano, como para riego de cultivos en América Latina, evidenciándose entre otras, a la deforestación y a la contaminación como las principales causas entorno a la carencia de este recurso (Gómez, 2004).

Cuando hay episodios de lluvias intensas o frecuentes, el agua que cae llega hasta la superficie terrestre, de esta forma, se origina la infiltración y posterior a ella la saturación del sustrato de suelo, dando lugar a la escorrentía superficial que es la lámina de agua que circula sobre el área de una cuenca de drenaje o elevación de agua -en milímetros- extendida y escurrida (Bateman, 2007); que depende de factores como: «la intensidad y la duración de la precipitación, tipo de suelo, cobertura vegetal, pendiente del terreno, longitud de drenaje, entre otros». El conocimiento de la cantidad de escorrentía superficial en una cuenca es esencial para que pueda ser incluida en la simulación de inundaciones, estimar los caudales máximos para el diseño de obras hidráulicas, y desarrollar cálculos para el transporte de sedimentos en los ríos.

Por otra parte, la provincia de Manabí-Ecuador posee una gama de variados climas, donde se observan en determinados años lluvias en extremadamente intensas, y en otros, largos periodos de prorrogada sequía; necesarios de mencionar para analizar sus efectos entorno a las inundaciones que tienen lugar en zonas con bajos niveles topográficos, propensos a inundarse durante lluvias agudas en espacios reducidos de tiempo (Cevallos *et al.* 2020); que están influenciados en ciertas épocas, por el denominado fenómeno climatológico “El Niño”, el cual ha conllevado a lamentables decesos humanos y a pérdidas materiales de gran magnitud (Rossel *et al.* 1998).

Se evidencia además en esta zona del Ecuador, un manejo inadecuado de las inundaciones, debido a que no se consideran medidas preventivas, y las correctivas no remedian las pérdidas del medio ambiente y de los moradores asentados en las zonas bajas de las cuencas hidrográficas afectadas, siendo ineludible implementar medidas de mitigación de escorrentía para evitar inundaciones en los

poblados vulnerables (Giler *et al.* 2020). Sin embargo, depender de las obras de defensa estructural convencional resulta insostenible, debido al costo que representan, así como al mayor riesgo de inundación por los cambios en el uso del suelo, aumentando la magnitud y frecuencia de las avenidas máximas (Dixon *et al.* 2016).

Existe un asentamiento poblacional en un sector de la provincia de Manabí perteneciente a la parroquia rural Charapotó del cantón Sucre, llamado Cañitas, donde se descargan aguas durante la temporada invernal producto de la escorrentía superficial causada por las lluvias intensas, desde una quebrada con el mismo nombre, causando desbordamientos e inundación. La población del sector mediante sus representantes parroquiales ha solicitado atención a este inconveniente, puesto que tal condición afecta la propiedad privada que con esfuerzo han alcanzado sus habitantes. De igual manera, la red vial estatal que une las poblaciones de Bahía de Caráquez con Portoviejo (capital provincial) se ve seriamente afectada por los referidos desbordamientos.

La finalidad de este proyecto radica en satisfacer las necesidades de la población en cuanto a mejorar la calidad de vida y optimizar/amortiguar la crecida del agua que escurre. La investigación propuesta responderá a uno de los objetivos estratégicos establecidos en el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la parroquia, que es el mejorar la calidad de vida de la población. Adicionalmente, promover medidas de mitigación basadas en las bondades de la propia naturaleza para reducir las inundaciones en la zona, garantizarán un bienestar humano, económico y social.

DESARROLLO

Características de la Zona

La zona de estudio fue la quebrada Cañitas, perteneciente al cantón Sucre de la provincia Manabí.

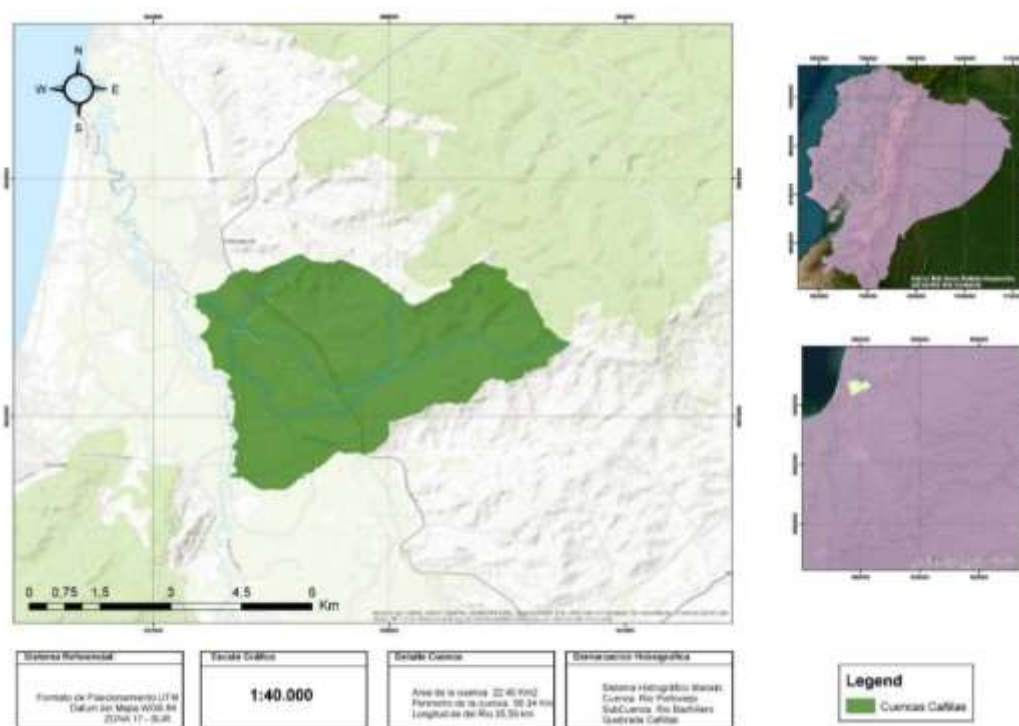
Figura 1

Ortofoto de la población “Cañitas” – Charapotó.



Figura 2

Localización de la quebrada Cañitas.



Ubicación Geográfica

Datum: WGS 1984 UTM zona 17 S.

Coordenada Este (X): 559800.

Coordenada Sur (Y): 9904900.

Condiciones Climatológicas

Las condiciones climatológicas nacen de la interacción entre factores meteorológicos, astronómicos y geográficos, vinculados con los procesos ecológicos, socio productivos y económicos del mundo (Aguirres *et al.* 2015); donde se considera «la insolación, la temperatura del aire, la presión atmosférica, la velocidad del viento, la precipitación y la humedad».

En el desarrollo de la investigación, los datos de precipitación fueron esenciales para conocer el caudal que se puede acumular y escurrir por la quebrada Cañitas, optándose por trabajar con datos de precipitaciones máximas en 24 horas desde el año 1994 hasta el año 2013, obtenidos desde el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología [INAMHI], mediante la estación meteorológica M0005 – Portoviejo, cercana al lugar de estudio.

Vinculando los datos de intensidad de lluvia con los de precipitaciones máximas en 24 horas, fue posible conocer la intensidad que generó el máximo evento de precipitación.

Tabla 1

Precipitaciones máximas en 24 horas desde el año 1994 hasta el 2013.

| Año | Precipitación (mm) Máxima 24 horas |
|------|---------------------------------------|
| 1994 | 66,5 |
| 1995 | 60,1 |
| 1996 | 40,8 |
| 1997 | 131,1 |
| 1998 | 86,7 |
| 1999 | 69,4 |
| 2000 | 41,3 |
| 2001 | 147,9 |
| 2002 | 50,8 |
| 2003 | 38,4 |
| 2004 | 57,9 |
| 2005 | 79,7 |
| 2006 | 56,7 |
| 2007 | 0 |
| 2008 | 53,3 |
| 2009 | 0 |
| 2010 | 0 |
| 2011 | 0 |
| 2012 | 0 |
| 2013 | 107,6 |

Fuente: INAMHI, 2023.

Información empleada en la Construcción del Modelo

Los servidores que ofrecen Modelos de Elevación Digital (DEM) mediante sus GEO PORTALES en el Ecuador son el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAGAP) y el Instituto Geográfico Militar (IGM).

Tabla 2

Características de los archivos DEM empleados.

| Insumo | Institución | Resolución/Escala | Año |
|--|--|-------------------|------|
| DEM Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) | SIGTIERRRAS | 10x10 m | 2016 |
| Mapa de Textura de Suelos del Ecuador | Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGAP) | 1:60 000 | 2020 |
| Mapa de Cobertura y uso de la tierra en el Ecuador continental | Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGAP) | 1:60 000 | 2020 |
| Cartografía Base | Instituto Geográfico Militar (IGM) | 1:60 0000 | 2020 |

Métodos empleados

Para establecer los lugares óptimos donde situar los atenuadores de escorrentía, se efectuó un cruce de mapas de la quebrada Cañitas, con el apoyo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), para posteriormente ejecutar una simulación hidrológica en el software HEC-HMS mediante un modelo semi distribuido.

Parámetros morfométricos

La quebrada del río Cañitas pertenece a la cuenca hidrográfica del Río Portoviejo, donde se determinaron sus parámetros morfométricos mediante el software HEC-HMS, considerando un umbral de 20 km² desde el punto de aforo.

Área de la Quebrada.

Es la superficie que delimita la divisoria del agua, siendo medida sobre la proyección horizontal en kilómetros al cuadrado (km²) (Cardona, 2018).

Perímetro de la Quebrada.

Es la longitud que recorre la divisoria de agua, siendo medido sobre la proyección horizontal en kilómetros (km) (Cardona, 2018).

Longitud del Cauce.

Es la distancia que hay entre la desembocadura de la quebrada y el tramo más distante desde la divisoria de agua, generalmente se mide en kilómetros (km) (Cardona, 2018).

Desnivel Altitudinal.

Es la diferencia entre la cota inferior y superior de la quebrada, expresada en metros (m) (Cardona, 2018).

Pendiente Media.

Señala la rugosidad del suelo en porcentaje y es una variable de comparación con otras cuencas, se puede expresar en metros sobre metros (m/m); para su obtención se utilizó un modelo de elevación Digital (DEM) (Cardona, 2018).

Atenuadores de Escorrentía.

Los atenuadores de escorrentía son dispositivos basados en la naturaleza, siendo conocidos también como “ingeniería blanda” o RAFs por sus siglas en inglés (Giler *et al.* 2020). Según señalan Wilkinson *et al.* (2010), para mitigar el fenómeno de lluvias intensas en una cuenca hidrográfica, emplear atenuadores de escorrentía resulta viable porque incrementan el tiempo de concentración, reduciendo las inundaciones repentinas en las zonas bajas de la cuenca.

Tipos de Atenuadores de Escorrentía.

Existen varios tipos de atenuadores de escorrentía, los cuales son empleados según la realidad del lugar donde serán implementados, en la presente investigación se trabajó con los atenuadores de escorrentías propuestos por Román *et al.* (2020), los cuales son:

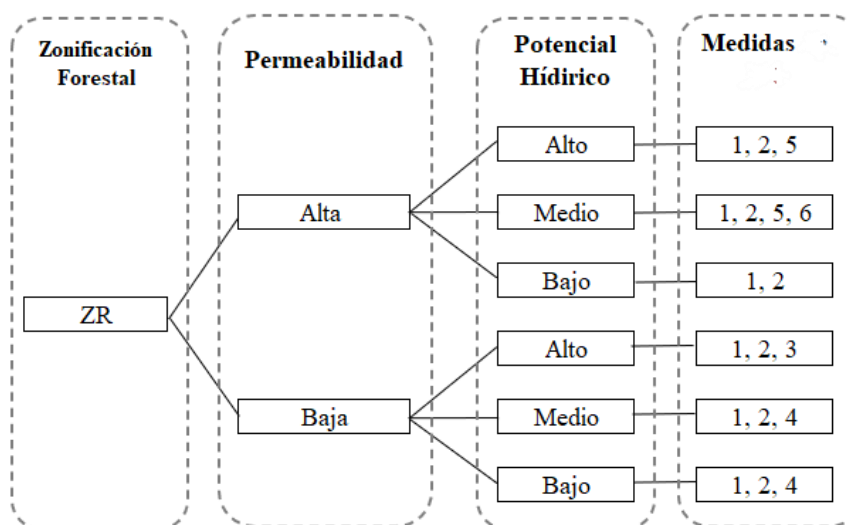
1. Reforestación con especies nativas, consiste en sembrar especímenes nativos del lugar en las zonas inferiores del bosque para fortalecerlo.
2. Forestación, consiste en sembrar árboles nativos o introducidos en zonas degradadas.
3. Control de Cárcavas, son socavaciones naturales en zonas de pendiente intervenidas por el hombre mediante lampazos de suelo, sacos con tierra, matojos de paja, etc.
4. Terrazas, son terraplenes elaborados de forma perpendicular a la pendiente del terreno.
5. Zanj de Infiltración, son excavaciones en forma de canales efectuados sobre el suelo que le permiten al agua percolar por gravedad.
6. Qochas para cosecha de agua, son reservorios efectuados en las depresiones naturales del suelo, utilizando piedras o terrones.

Identificación de los Atenuadores de Escorrentía a Emplear.

Mediante el árbol de decisión propuesto por Román *et al.* (2020) (ver figura 3), se logró identificar las medidas de atenuación de escorrentía para la quebrada Cañitas, considerando la permeabilidad y el potencial hídrico del lugar.

Figura 3

Identificación de atenuadores de Escorrentía



Factor de Escorrentía.

El factor de escorrentía (C) es la representación de la fracción de agua llovida que genera escorrentía superficial cuando el suelo está saturado, su valor es dependiente de la cobertura, tipo y pendiente de suelo (Ibáñez *et al.* 2011).

Tabla 3

Coefficientes de escorrentía.

| Cobertura del suelo | Tipo de suelo | Pendiente (%) | | | | |
|---------------------------|---------------|---------------|---------|--------|-------|-------|
| | | > 50 | 20 – 50 | 5 – 20 | 1 – 5 | 0 – 1 |
| Sin vegetación | Impermeable | 0,80 | 0,75 | 0,70 | 0,65 | 0,60 |
| | Semipermeable | 0,70 | 0,65 | 0,60 | 0,55 | 0,50 |
| | Permeable | 0,50 | 0,45 | 0,40 | 0,35 | 0,30 |
| Cultivos | Impermeable | 0,70 | 0,65 | 0,60 | 0,55 | 0,50 |
| | Semipermeable | 0,60 | 0,55 | 0,50 | 0,45 | 0,40 |
| | Permeable | 0,40 | 0,35 | 0,30 | 0,25 | 0,20 |
| Pastos, vegetación ligera | Impermeable | 0,65 | 0,60 | 0,55 | 0,50 | 0,45 |
| | Semipermeable | 0,55 | 0,50 | 0,40 | 0,40 | 0,35 |
| | Permeable | 0,35 | 0,30 | 0,25 | 0,20 | 0,15 |
| Hierba | Impermeable | 0,60 | 0,55 | 0,50 | 0,45 | 0,40 |
| | Semipermeable | 0,50 | 0,45 | 0,40 | 0,35 | 0,30 |
| | Permeable | 0,30 | 0,25 | 0,20 | 0,15 | 0,10 |
| Bosque, vegetación densa | Impermeable | 0,55 | 0,50 | 0,45 | 0,40 | 0,35 |
| | Semipermeable | 0,45 | 0,40 | 0,35 | 0,30 | 0,25 |
| | Permeable | 0,25 | 0,20 | 0,15 | 0,10 | 0,05 |

Fuente: Ibáñez et al. 2011.

Número de Ecurrimiento.

Esta metodología estima la escorrentía potencial mediante las características físicas de la quebrada considerando: «la densidad, tipo y tratamiento de la cobertura del suelo y su grupo hidrológico», para estimarlo se empleó la siguiente fórmula empírica (Díaz y Mercado, 2017):

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

Donde:

S = Potencial de máxima retención (adimensional)

CN = Número de curvas adimensional

Según Espinales *et al.* 2021, el grupo hidrológico del suelo está catalogado en cuatro grupos (ver tabla 4).

Tabla 4

Grupos hidrológicos del suelo (SCS).

| Grupo hidrológico del suelo | Infiltración cuando están muy húmedos | Características | Textura |
|------------------------------------|--|--|--|
| A | Rápida | Alta capacidad de infiltración > 76 mm/h | Arenosa; Arenosa-limosa; Franca |
| B | Moderada | Capacidad de infiltración 76-38 mm/h | Franco-arcillosa-arenosa Franco-limosa |
| C | Lenta | Capacidad de infiltración 36-13 mm/h | Franco-arcillosa; Franco-arcillosa-limosa; Arcillo-arenosa |
| D | Muy Lenta | Capacidad de infiltración < 13 mm/h | Arcillosa |

Fuente: Espinales et al. 2021.

Se muestra en la siguiente tabla el Número de Curvas para las zonas urbanas publicadas por los organismos Natural Resources Conservation Service (NRCS), y el Servicio de Concentración del Suelo (SCS).

Tabla 5

Números de Curvas para zonas urbanas

| Descripción del Uso | | | Grupo Hidrológico del Suelo | | | |
|--|---------------------------|-----------------------|-----------------------------|----|----|----|
| Uso del Suelo | Promedio área impermeable | Condición Hidrológica | A | B | C | D |
| Áreas urbanas completamente desarrolladas | | Pobre | 68 | 79 | 86 | 89 |
| | | Media | 49 | 69 | 79 | 84 |
| | | Buena | 39 | 61 | 74 | 80 |
| Áreas Impermeables | | | | | | |
| Aparcamientos, azoteas, carreteras | | | 98 | 98 | 98 | 98 |
| Calles y Carreteras | | | | | | |
| Pavimentadas; cunetas y red de saneamiento | | | 98 | 98 | 98 | 98 |
| Pavimentadas; cunetas abiertas | | | 83 | 89 | 92 | 93 |
| Grava | | | 76 | 85 | 89 | 91 |
| Sucias | | | 72 | 82 | 87 | 89 |
| Zonas ajardinadas xerofitas | | | | | | |
| Zonas naturales (solo permeables) | | | 63 | 77 | 85 | 88 |
| Zonas ajardinadas (incluidas zonas impermeables) | | | 96 | 96 | 96 | 96 |
| Zonas Urbanas | | | | | | |
| Centros comerciales y de negocios | 85% | | 89 | 92 | 94 | 95 |
| Industrial | 72% | | 81 | 88 | 91 | 93 |
| Zonas residenciales | | | | | | |
| 0.05ha o menos (2 casas) | 65% | | 77 | 85 | 90 | 92 |
| 0.10 ha | 38% | | 61 | 75 | 83 | 87 |
| 0.13 ha | 30% | | 57 | 72 | 81 | 86 |
| 0.20 ha | 25% | | 54 | 70 | 80 | 85 |
| 0.40 ha | 30% | | 51 | 68 | 79 | 84 |
| 0.81 ha | 12% | | 46 | 65 | 77 | 82 |
| Áreas Urbanas en desarrollo | | | | | | |
| Explanaciones (zonas permeables, sin vegetación) | | | 77 | 86 | 91 | 94 |

Fuente: United States Department of Agriculture (USDA), 1986.

Respuesta Lluvia Escorrentía.

En la modelación lluvia-escorrentía se calculó el gasto generado mediante las precipitaciones suscitadas en la quebrada Cañitas, fragmentando el agua llovida de la precipitación efectiva que genera flujo superficial. Se analizó la tormenta de diseño a fin de estimar los caudales probables, considerando el comportamiento hidrológico, mediante los hidrogramas de diseño con periodos de retorno de 25, 50, 100 y 500 años. En el análisis lluvia-escorrentía se utilizó el software HEC-HMS para estimar el hidrograma unitario del SCS, considerando el agua precipitada y los parámetros morfométricos de la quebrada.

Uso de Suelo Modificado.

Mediante las medidas de atenuación de escorrentía propuestas, se generan cambios en ciertas áreas con respecto al uso del suelo, por lo que resulta necesario generar una selección por cruce de atributos entre los lugares de aporte hídrico y los lugares de recuperación con el software HEC-HMS (Román et al. 2020).

Modelación de Escenarios.

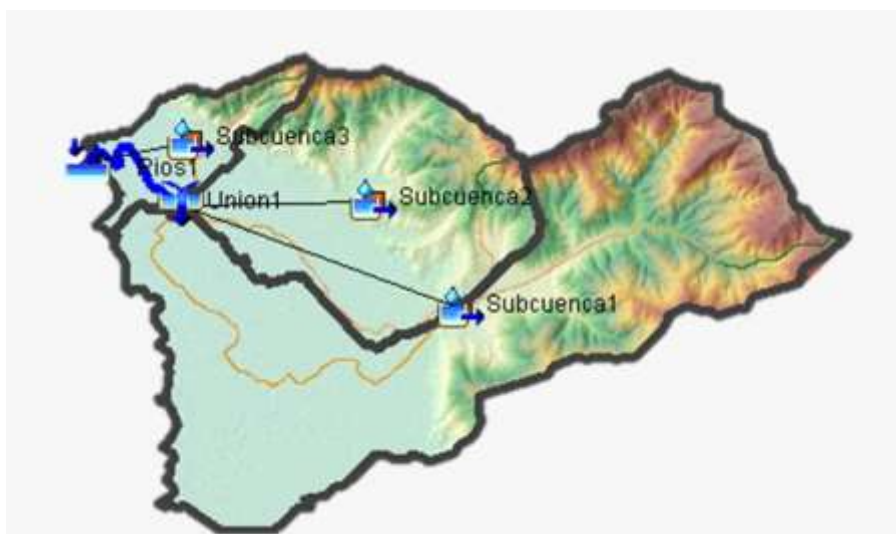
Se analizaron en el software HEC-HMS cinco escenarios de modelación hidrológica para la quebrada Cañitas, una con las condiciones naturales de CN, y las otras cuatro con los valores modificados de CN considerando las medidas de atenuación de escorrentía propuestas por separado (Román *et al.* 2020).

RESULTADOS

Se delimitó la quebrada Cañitas, obteniendo 3 subquebradas, 1 unión y 1 curso de agua.

Figura 4

Quebrada Cañitas delimitada en HEC-HMS



Se calcularon los parámetros morfométricos de la quebrada (ver tabla 6) y del curso de agua donde nace el tránsito de avenidas (ver tabla 7).

Tabla 6

Parámetros morfométricos de la quebrada Cañitas.

| Subquebradas Nº | Área (km ²) | Perímetro (km) | Longitud del curso de agua (km) | Pendiente del curso de agua (m/m) |
|--------------------|----------------------------|-------------------|---------------------------------------|---|
| 1 | 14,41 | 32,99 | 10,88 | 0,1867 |
| 2 | 6,75 | 14,58 | 6,22 | 0,2002 |
| 3 | 1,80 | 10,54 | 4,01 | 0,1737 |

Tabla 7

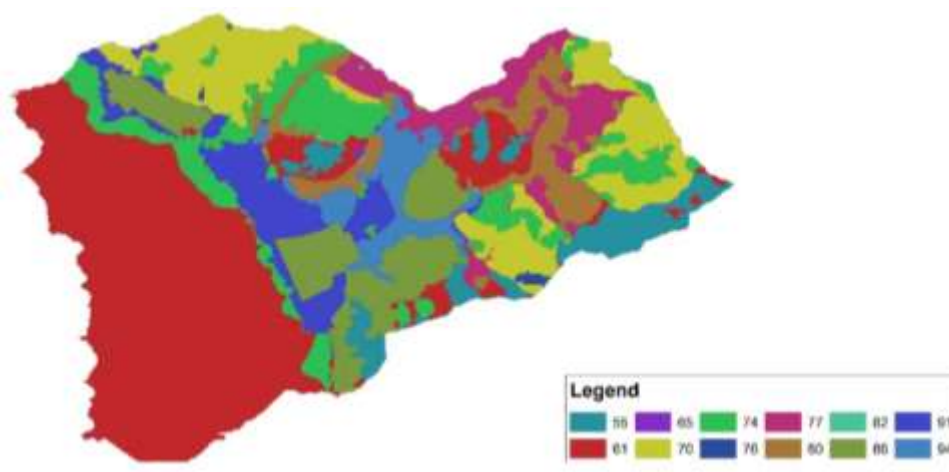
Parámetros del curso de agua.

| Curso de agua | Longitud (km) | Pendiente (m/m) |
|------------------|---------------|-----------------|
| 1 | 1,65 | 0,00182 |

Para localizar los lugares óptimos donde ubicar los atenuadores de escorrentía, se emplearon los mapas de pendiente y de los grupos hidrológicos, recopilados del mapa textura del MAGAP, debido a que existe una relación entre la textura del suelo y los grupos hidrológicos. Se interceptaron los mapas de uso de suelo, grupos hidrológicos y pendientes, para obtener el mapa del número de curva (CN) (ver figura 5).

Figura 5

Mapa de Número de Curva (CN).



Para convertir la lluvia a escorrentía se utilizó el Hidrograma Unitario del Servicio de Conservación del Suelo (SCS), otorgándole un número de curva a cada sub quebrada (tabla 8).

Tabla 8

Número de curva para cada sub quebrada.

| Sub quebrada | Número de Curva (CN) |
|--------------|-------------------------|
| 1 | 68,26 |
| 2 | 76,75 |
| 3 | 70,92 |

El tiempo de concentración en la quebrada Cañitas fue de 202 minutos, considerando que es idéntica a la duración hipotética de la tormenta, se trabajó con una duración de 202 minutos para la modelación hidrológica.

Se usaron los datos de precipitación máxima en 24 horas tomados desde la estación meteorológica Portoviejo con rangos entre los 38,4 mm y los 147,9 mm, generando tormentas con periodos de retorno de 25,50,100 y 500 años.

Teniendo los datos base de entrada: «número de curva, tiempo de retardo, precipitación y tránsito» para cada sub quebrada, se generó mediante el software HEC-HMS una modelación hidrológica para cada periodo de retorno, obteniendo los siguientes valores de caudales: 59,5 m³/seg para un periodo de retorno de 25 años, 72,2 m³/seg para un periodo de retorno de 50 años, 121,2 m³/seg para un periodo de retorno de 100 años y 244,6 m³/seg para un periodo de retorno de 500 años (ver tabla 9).

Tabla 9

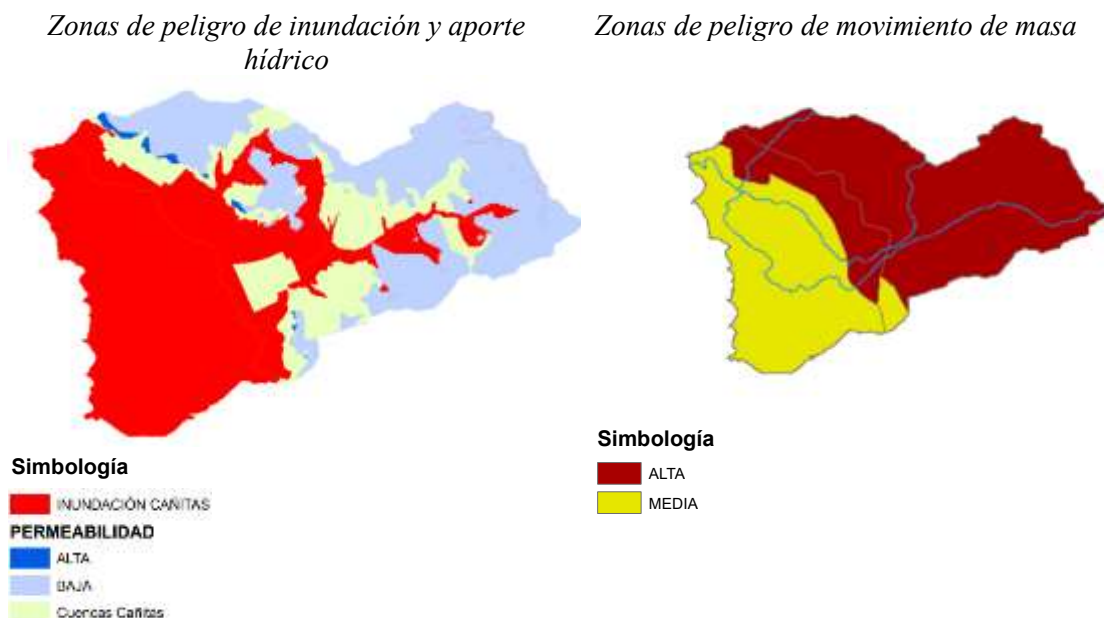
Caudales máximos para la sub quebraras Cañitas para cada periodo de retorno.

| Periodo de Retorno (años) | Caudal (m3/s) |
|----------------------------------|----------------------|
| 25 | 59,5 |
| 50 | 75,2 |
| 100 | 121,2 |
| 500 | 244,6 |

Mediante las lluvias intensas y las pendientes del lugar se localizaron las zonas expuestas a inundación, considerando los «mapas de movimiento de masa y la posibilidad de manifestaciones de peligro en la zona de talud alto» como se visualiza en la figura 6.

Figura 6

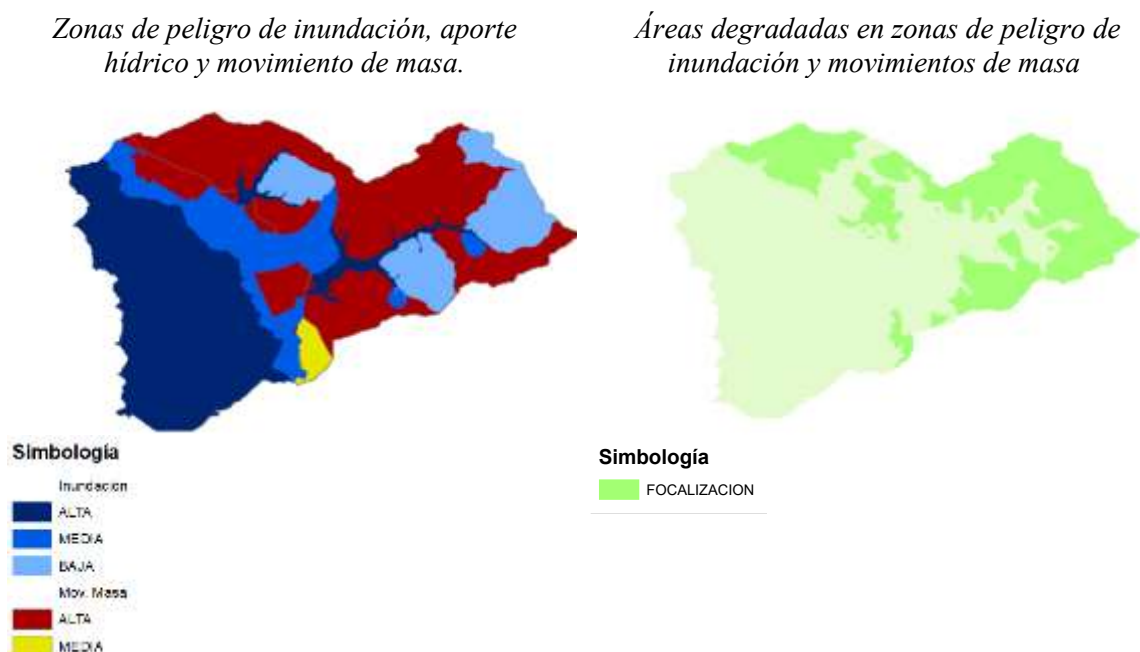
Zonas de peligro de inundación, aporte hídrico y movimiento de masa.



Considerando una intercepción entre los «mapas de peligro de inundación y movimiento de masa, se obtuvo el mapa de infraestructuras expuesta a peligros de inundación y movimientos de masa, al combinarlos con los peligros de movimiento de masa e inundación con las áreas degradadas, se obtuvo un mapa donde se identifican las áreas que presentan degradación en correlación con las zonas de peligro (ver figura 7), mismos que se utilizarán para estudiar alternativas mediante proyectos de inversión».

Figura 7

Zonas de peligro de inundación, aporte hídrico, movimiento de masa y áreas degradadas.

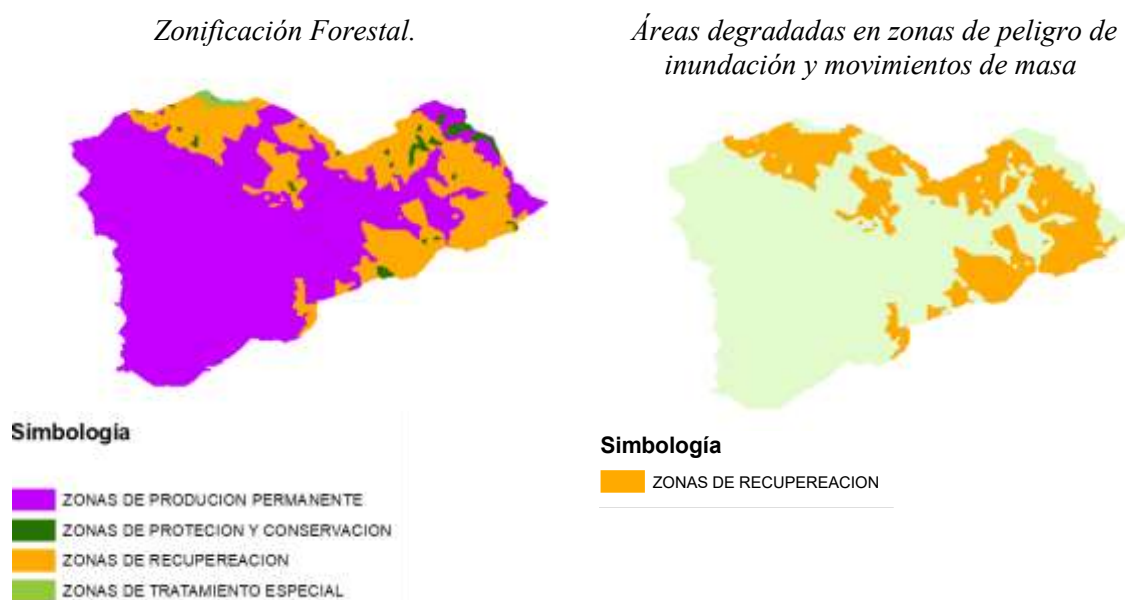


Se ejecutó una zonificación forestal para localizar las medidas que pertenezcan a las características naturales del área en estudio, considerando los tipos de ecosistema con respecto a la presencia de bosques.

Se interceptaron los mapas de «cobertura, pendientes y áreas protegidas», para conseguir un mapa de zonificación forestal. Nos concentramos en las zonas de recuperación, ya que dan la posibilidad de reducir los riesgos mediante la intervención de sus ecosistemas con medidas de infraestructura basadas en la naturaleza, validadas mediante una intersección de mapas con áreas degradadas en zonas de peligro de inundación (ver figura 8).

Figura 8

Zonificación forestal y de recuperación que coincide con áreas degradadas en zonas de peligro.



En búsqueda de identificar lugares donde la infraestructura natural tenga una mayor infiltración del agua, se añadió la información hidrogeológica de la zona en estudio, clasificándola según el nivel de permeabilidad de su roca madre.

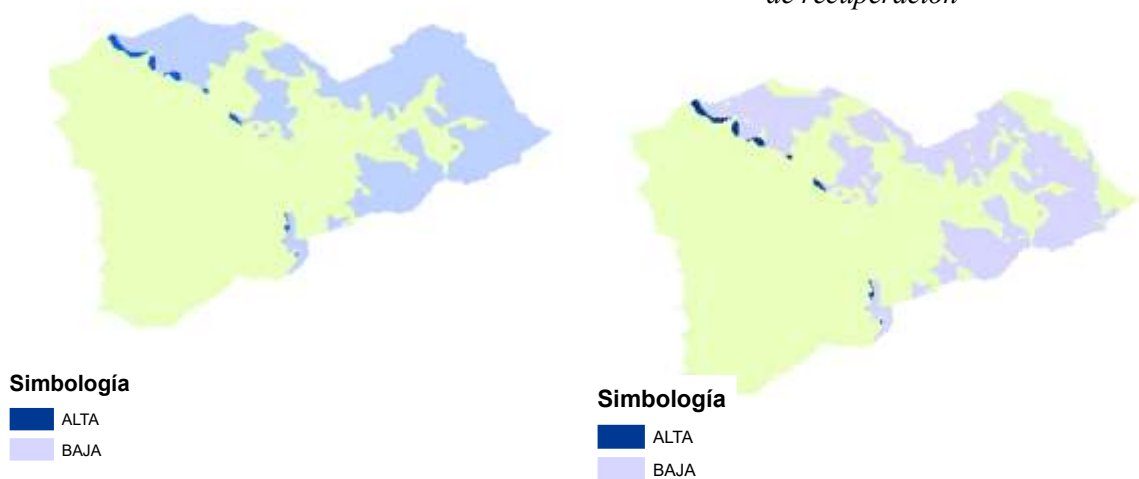
Los lugares con permeabilidad baja requieren una mayor intervención mediante medidas que se acoplen a la zona para disminuir riesgos, como el control de la erosión. Se identificaron zonas de mayor aporte hídrico en la quebrada, considerando «el nivel de pendiente y pluviosidad», para promover medidas que mejoren la capacidad de infiltración y el control de la erosión. Se ubicaron atenuadores de escorrentía donde existe una baja permeabilidad, ya que no se evidenciará infiltración y la escorrentía incrementará, considerando zonas con potenciales hídricos altos, medios y bajos (ver figura 9).

Figura 9

Permeabilidad en zonas de recuperación y aportes hídricos.

Permeabilidad en Zonas de Recuperación.

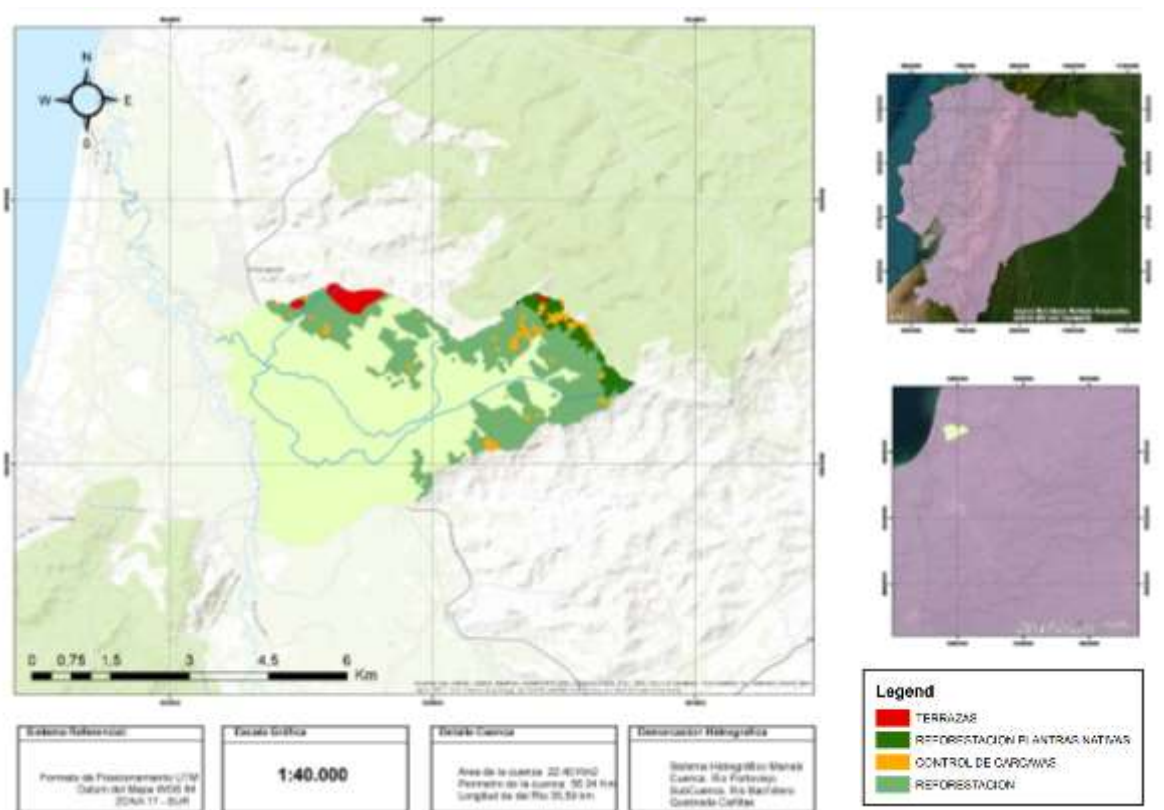
Aporte hídrico para sub quebrada en la zona de recuperación



Los tipos de atenuadores a utilizar son reforestación con especies nativas (1), forestación (2), control de cárcavas (3) y terrazas de infiltración (4) (ver figura 10).

Figura 10

Ubicación espacial de los atenuadores de escorrentía en la quebrada Cañitas.



Se procederá ahora a modificar el mapa de uso del suelo. Se lo hará en función de la ubicación de los atenuadores de escorrentía que se han descrito, efectuando una selección por “cruce de atributos”, recalculando el número de curva CN, pero bajo las nuevas condiciones (ver. Figura 11)

Figura 11

Mapa CN normal vs recalculado para la quebrada Cañitas.

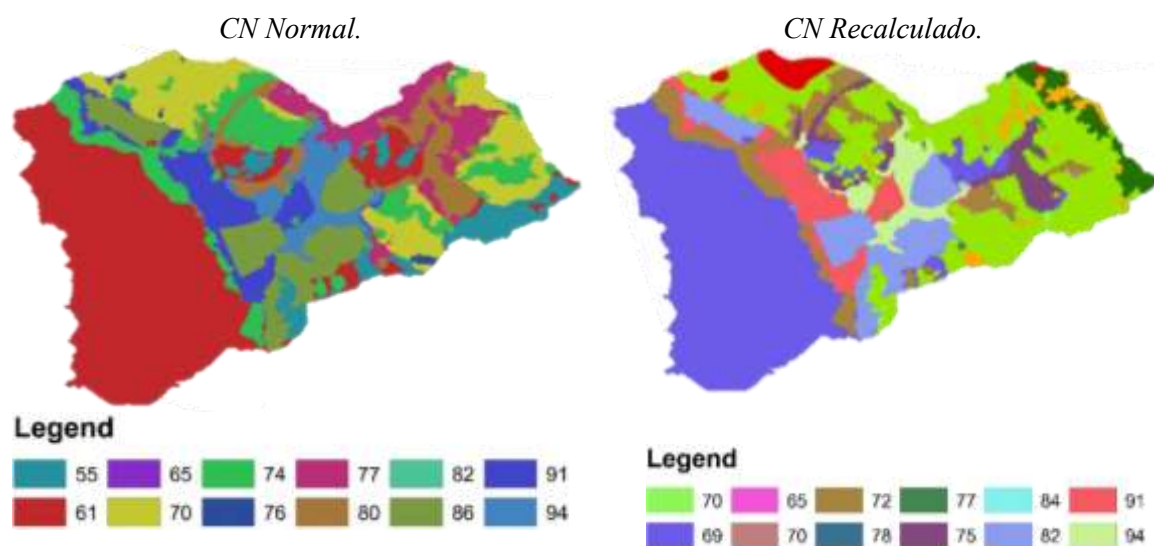


Tabla 10

Comparación entre Número de Curva actuales (CN) vs los recalculados.

| Sub quebrada | Número de Curva actual (CN) | Número de Curva recalculado (CN) |
|--------------|-----------------------------|----------------------------------|
| 1 | 68,26 | 66,21 |
| 2 | 76,75 | 74,75 |
| 3 | 70,92 | 69,00 |

Considerando el nuevo número de curva, se generaron cuatro escenarios adicionales de modelación hidrológica en HEC-HMS con una duración de 202 minutos y con periodos de retorno de 25,50,100 y 500 años (ver tabla 11).

Tabla 11

Caudales máximos para la quebrada Cañitas y sus medidas de atenuación.

| Periodo de Retorno (años) | Caudal actual (m³/s) | Reforestación con especies nativas (m³/s) | Forestación (m³/s) | Control de cárcavas (m³/s) | Terrazas de infiltración (m³/s) |
|----------------------------------|--|---|--------------------------------------|--|---|
| 25 | 59,5 | 53,9 | 48,1 | 57,1 | 56,0 |
| 50 | 75,2 | 69,2 | 62,1 | 73,0 | 71,7 |
| 100 | 121,2 | 112,3 | 103,1 | 118,0 | 116,2 |
| 500 | 244,6 | 230,8 | 216,3 | 240,6 | 238,4 |

DISCUSIÓN

Se estimaron los datos morfométricos de la quebrada Cañitas mediante una simulación hidrológica considerando un umbral de 20 km² desde el punto de aforo, obteniendo 3 sub quebradas con las siguientes características: la sub quebrada 1 posee un área de 14,41 km², un perímetro de 32,99 km, una pendiente media de 0,1867 m/m y un número de curva de 68,26; la sub quebrada 2 posee un área de 6,75 km², un perímetro de 14,58 km, una pendiente media de 0,2002 m/m y un número de curva de 76,75; y la sub quebrada 3 posee un área de 1,80 km², un perímetro de 10,54 km, una pendiente media de 0,1737 m/m y un número de curva de 70,92.

Resultados que concuerdan en ciertos ordenes de magnitud con la investigación efectuada por Caicedo *et al.* (2021), quienes mencionan que la quebrada Cañitas posee un área total de 17,49 km², un perímetro de 19,05 km, una longitud del cauce principal de 8,14 km, una pendiente media de 0,0418 m/m y un numero de curva ponderado de 76,76; donde la discrepancia en los valores obtenidos se da por la escala de trabajo empleada, y las fuentes de obtención de información base, acrecentando la incertidumbre sobre la caracterización.

Con una duración de la tormenta de 202 minutos se estiman los siguientes caudales máximos para cada periodo de retorno: 59,5 m³/s en 25 años, 75,2 m³/s en 50 años, 121,2 m³/s en 100 años y 244,6 m³/s en 500 años. Resultados que varían con los obtenidos por Caicedo *et al.* (2021),

mencionando que el tiempo de concentración en la quebrada es de 69,58 minutos, y que para un periodo de retorno de 100 años se obtuvo un caudal de 191,2 m³/s.

Para atenuar la escorrentía se seleccionaron las siguientes medidas basadas en la naturaleza: reforestación con especies nativas, forestación, control de cárcavas y terrazas de infiltración, en zonas donde la permeabilidad es baja porque no existirá infiltración y la escorrentía incrementará, ubicados en zonas con potenciales hídricos altos y bajos, concordando con lo indicado por Giler *et al.* (2020), quienes señalan que los atenuadores de escorrentía o bioingeniería son una opción para mitigar las inundaciones, ya que presentan bajos costos de ejecución y otorgan un alto potencial de protección ante las inundaciones.

Se efectuó un recálculo del número de curva CN, considerando las medidas de atenuación descritas anteriormente, obteniendo valores para la sub quebrada 1 de 66,21, para la sub quebrada 2 de 74,75 y para la sub quebrada 3 de 69,00; estimando que la duración de la tormenta inicial no será influenciada por las medidas propuestas, se conservó el tiempo de concentración de 202 minutos, y se determinaron los caudales máximos para cada periodo de retorno, obteniendo los siguientes valores: mediante reforestación con especies nativas 53,9 m³/s para 25 años, 69,2 m³/s para 50 años, 112,3 m³/s para 100 años y 230,8 m³/s para 500 años, mediante la forestación 48,1 m³/s para 25 años, 62,1 m³/s para 50 años, 103,1 m³/s para 100 años y 216,3 m³/s para 500 años, mediante el control de cárcavas 57,1 m³/s para 25 años, 73,0 m³/s para 50 años, 118,0 m³/s para 100 años y 240,6 m³/s para 500 años y mediante terrazas de infiltración 56,0 m³/s para 25 años, 71,7 m³/s para 50 años, 116,2 m³/s para 100 años y 238,4 m³/s para 500 años.

Según menciona Gómez (2021), el método del Número de Curva del SCS se puede emplear en pequeñas cuencas con poca información disponible, debido a que otorgan resultados admisibles de caudales máximos, lo cual concuerda con lo descrito por Duque *et al.* (2019), quienes mencionan que es un método aplicable en cuencas menores a 250 km² con limitada información. Al modificarse la cobertura vegetal en áreas degradadas se disminuye la escorrentía superficial, reteniendo el agua

lluvia e incrementando la infiltración, lo cual reduce los caudales punta por la distribución eficiente del agua sobre la cuenca (Vega, 2022).

CONCLUSIONES

Se efectuó de manera inicial una modelación hidrológica en el software HEC-HMS, consiguiendo caudales según el periodo de retorno establecido de 59,5 m³/s para 25 años, 75,2 m³/s para 50 años, 121,2 m³/s para 100 años y 244,6 m³/s para 500 años.

Mediante la inserción de mapas de permeabilidad en zonas de recuperación con los aportes hídricos, se localizaron las zonas donde la escorrentía aumenta y la permeabilidad disminuye, proponiendo la reforestación con especies nativas, la forestación, el control de cárcavas y las terrazas de infiltración como medios para atenuar la escorrentía.

Se efectuó una nueva modelación hidrológica en el software HEC-HMS considerando los atenuadores de escorrentía propuestos, donde se identificó que la medida que mejor reduce los caudales pico en los hidrogramas de la zona en análisis es la forestación, disminuyendo los caudales según los periodos de retorno en un 19,2% para 25 años, un 17,4% para 50 años, un 14,9% para 100 años y un 11,6% para 500 años.

BIBLIOGRAFÍA

Aguirre, N., Ojeda, T., Eguiguren, P., y Mendoza, Z. (2015). *Cambio climático y Biodiversidad:*

Estudio de caso de los páramos del Parque Nacional Podocarpus, Ecuador. Obtenido de

Programa de biodiversidad y Servicios Ecosistémicos:

<https://www.researchgate.net/profile/Jaime->

Santin/publication/300102061_Diversidad_de_briofitos_de_los_Paramos_de_Cajanuma_de

l_Parque_Nacional_Podocarpus/links/5709390d08ae8883a1fa50dd/Diversidad-de-briofitos-

de-los-Paramos-de-Cajanuma-del-Parque-Nacional

Amancha, E., y Montúfar, C. (2015). *Determinación de la permeabilidad de los suelos basados en la*

metodología del infiltrómetro de mini disco en la zona de Yanahurco, Napo. Obtenido de

Universidad Central del Ecuador: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/6758>

- Bateman, A. (2007). *Hidrología Básica y aplicada, Escorrentía* . Obtenido de Universidad Politécnica de Cartagena: <https://www.upct.es/~minaees/hidrologia.pdf>
- Caballero, A. (2009). *Exploración de aguas subterráneas en el Arco de Panamá*. Obtenido de Universitat de Barcelona: https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/288042/04.ALBERTO_CABALLERO_4de13.pdf;jsessionid=FF35788810CC289CA1BFA80AB3875159?sequence=4
- Cardona, B. (2018). *Conceptos Básicos de Morfometría de cuencas hidrográficas*. Obtenido de Universidad San Carlos de Guatemala: <https://core.ac.uk/reader/35294551>
- Caicedo, M., Cabrera, E., Zambrano, X., y Rodríguez, M. (marzo de 2021). *Estudio de características morfológicas de la cuenca “Cañitas” y su relación con el riesgo de inundaciones repentinas*. Obtenido de ResearchGate: 10.46377/dilemas.v8i.2605
- Cevallos, A., Giler, A., Menéndez, R., y Reyna, L. (2020). Estimación de la erosividad en la provincia de Manabí con el método CORINE. Obtenido de Revista Dilemas Contemporáneos, educación, política y valores: <https://doi.org/10.46377/dilemas.v35i1.2260>
- Chúa, R. (2017). *Desarrollo y calibración de un sistema informático para el análisis de tormentas, máximas avenidas y generación de lluvia escorrentía*. Obtenidos de Método racional deductivo: <https://hdl.handle.net/20.500.12996/2947>
- Cunge, J. A. (1969). *On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method)*. Journal of Hydraulic Research, 7(2), 205-230. <https://doi.org/10.1080/00221686909500264>
- Dixon, J., Sear, A., Odoni, A., Sykes, T., y Lane, N. (17 de marzo de 2016). The effects of river restoration on catchment scale flood risk and flood hydrology. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41, 997-1008. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/esp.3919>
- Dalmasso, A (2010). *Revegetación de áreas degradadas con especies nativas*. Obtenido de Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica. Sociedad Argentina de Botánica, 149–171: http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851-23722010000100011

- Díaz, A., y Mercado, T. (Marzo de 2017). *Determinación del número de curva en la subcuenca de Betancí (Córdoba, Colombia) mediante teledetección y SIG*. Obtenido de: <https://www.redalyc.org/journal/852/85252030011/html/>
- Duque, P., Patiño, D, y López (2019). *Evaluación del Sistema de Modelamiento Hidrológico HEC-HMS para la Simulación Hidrológica de una Microcuenca Andina Tropical*. Obtenido de CIT Información Tecnológica: <https://doi.org/10.4067/s0718-07642019000600351>
- Espinales, F, Alulema, R, y Caicedo, M (2021). *Determinación del Número de Curva (CN) de la cuenca del Río Portoviejo*. Obtenido de Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores: <https://doi.org/10.46377/dilemas.v8i.2600>
- Fattorelli, S., y Fernández, P. (2011). *Diseño Hidrológico, Argentina*. Obtenido de: <https://tysmagazine.com/libro-gratuito-diseno-hidrologico/>
- Giler, A., Donoso, S., Arteaga, R., y Zaldumbide, D. (2020). *Manejo sostenible de inundaciones, cuencas y riberas en la provincia de Manabí*. Obtenidos de la Técnica. Revista de las Agrociencias, 23, 55-72: http://dx.doi.org/10.33936/la_tecnica.v0i23.1442
- Gómez, C. (2004). Manual de Manejo de Cuencas . En W. Vision, *Introducción* (pág. 9). El Salvador : Visión Mundial El Salvador.
- Gómez, J. (2021). *Modelación de un Sistema para el Control de Inundaciones, en la Planicie Aluvial del Río Lodana, Manabí-Ecuador*. Obtenido de dominio de las ciencias: <https://doi.org/10.23857/dc.v7i4.2090>
- Ibáñez, S., Moreno, H., y Gisbert, J. (2011). *Método para la determinación del coeficiente de escorrentía C*. Obtenido de Universidad Politécnica de Valencia: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10781/Coeficiente%20de%20escorrent%C3%ADa.pdf>
- Instituto Geofísico Militar [IGM]. (2023). *Geoportales IGM*. Obtenidos de: <https://www.geoportaligm.gob.ec/portal/>

- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología [INAMHI]. (2023). *Biblioteca- Inamhi. Publicaciones metereológicos.*
- Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca [MAGAP]. (2015). *Protocolo Metodológico para la elaboración del mapa de cobertura y uso de la tierra en Ecuador Continental 2013 - 2014, escala 1:100.000*
- Montero, J. (1 de octubre de 2017). *Clasificación de movimiento en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia.* Obtenido de Libros del Servicio Geológico Colombiano: <https://doi.org/10.32685/9789585978218>
- Pizarro, R., Abarca, A., Farias, C., y Jordán, C. (2003). *Construcción de Curvas IDF.* Obtenido de Ajuste de los datos con una Función de Distribución de Probabilidad: <https://www.fao.org/3/XII/0397-B3.htm>
- Román, F., Estévez, G., Aste, N., y Moles, A. (abril de 2020). *Herramienta de Identificación Rápida de Oportunidades para la Infraestructura Natural en la Gestión del Riesgo de Desastres.* Lima, Perú: Forest Trends Association.
- Rossel, F., Cadier, E., y Gomez, G. (1996). *Las inundaciones en la zona costera ecuatoriana: causas; obras de protección existentes y previstas.* Obtenido de: Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines.
- USGS . (2023). Obtenido de Explorador de la tierra: <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Vega Macias, I. P. (2022). *Estudio de los beneficios hidrológicos en función de las prácticas de reforestación y forestación de áreas degradadas en zona de recarga de la subcuenca del Río Teaone en Esmeraldas, Ecuador.* [Tesis de maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza]. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/11894>
- Wilkinson, M., Welton, P., y Quinn, P. (16 de septiembre de 2010). *Runoff management during the September 2008 floods in the Belford catchment, Northumberland.* Obtenido de <https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2010.01078.x>