



UNIVERSIDAD DEL AZUAY

Facultad de Ciencia y Tecnología

Escuela de Ingeniería Civil

**Diseño hidrológico para el embalse “Tres Piedras”, ubicado en el cantón San Fernando
de la provincia del Azuay.**

Proyecto de tesis previo a la obtención del título de:

Ingeniero Civil y Gerente en Construcciones

Autores:

Xavier Esteban Román Ávila

Luis Eduardo Román Sanmartín

Director:

PhD. Carlos Javier Fernández de Córdova Webster

Cuenca, Ecuador

2025

Resumen

La respuesta hidrológica a los eventos de precipitación en el sector de Tres Piedras, en el cantón de San Fernando, así como la cuenca que cubre al menos 138 hectáreas, es desconocida. Se determinará el caudal que se genera en el sitio seleccionado, comparando con el estudio de información secundaria de la cuenca de interés y con datos de cuencas con similares ecosistemas. Se ha instalado un sistema de monitoreo para determinar las variables de precipitación, temperatura y caudal. Estos datos cuantificarán eficazmente el comportamiento hidrológico del sitio. Sobre la base de estos resultados, se elaborará el diseño final, que complementará los estudios anteriores realizados en el sector con el objetivo de construir la presa en el punto de interés.

Palabras Clave: Hidrología, diseño hidrológico, embalse, precipitación.

Abstract

The hydrological response to precipitation events in Tres Piedras in the canton of San Fernando, as well as the basin covering at least 138 hectares, is unknown. The aim of this thesis is to determine the flow that enters the selected site. A monitoring system has been installed to determine variables of precipitation, temperature, and flow. These data will effectively quantify the site's hydrological behavior. Based on these results, the final design will be developed, which will complement the previous studies carried out in the sector with the aim of constructing the dam at the point of interest. Since previously data from nearby stations would have been taken into account, errors in this thesis will be corrected.

Keywords: Hydrology, hydrological design, level curve, dam, precipitation, flow.

Índice de Contenido

Resumen	ii
Abstract	ii
Índice de Contenido	iii
Índice Imágenes	iv
Índice Tablas	vi
Introducción	1
Antecedentes	3
Problema	4
Objetivos	5
Justificación	6
Capítulo 1	7
Marco Teórico y Estado del Arte	7
Capítulo 2	28
Metodología	28
Capítulo 3	53
Resultados y discusión	53
Conclusiones	99
Recomendaciones	101
Referencias	102

Índice Imágenes

Figura 1 Ubicación general de Azuay en Sudamérica y Ecuador.	10
Figura 2 Cobertura por rangos de precipitación anual.	11
Figura 3 Isotermas.	12
Figura 4 Tipos de Suelo.	14
Figura 5 Ecosistema de la cuenca.	16
Figura 6 Cuenca Hidrográfica.	17
Figura 7 Altimetría.	18
Figura 8 Geología.	18
Figura 9 Edafología.	19
Figura 10 Geomorfología.	20
Figura 11 Pluviógrafo.	21
Figura 12 Groundwater Data Logger con cable conexión PC.	21
Figura 13 Ubicación de los sensores instalados por la Prefectura del Azuay en Tres Piedras.	22
Figura 14 Sensor instalado dentro el lecho del afluente.	23
Figura 15 Gráfica de precipitación registrada.	24
Figura 16 Base del pluviógrafo.	24
Figura 17 Caudalímetro.	25
Figura 18 Sección de afluente.	26
Figura 19 El aforador correntómetro electromagnético – inductivo en ejecución en dos diferentes posiciones y secciones del cauce.	26
Figura 20 Dirección de ubicación del sensor del correntómetro con respecto a la dirección del caudal de agua a medir.	27
Figura 21 Gráfica de curva de doble masa.	29
Figura 22 Cuencas en las que se aprecia a que responde el Rf con respecto a su forma.	40

Figura 23 Referencia de una curva de descarga.	46
Figura 24 Sección Aforada.	47
Figura 25 Hietogramas referenciales.	49
Figura 26 Ecuación de la Curva de Doble Masa de la estación Tres Piedras y Zhurucay.	53
Figura 27 Estaciones Pluviométricas del Azuay.	54
Figura 28 Estaciones Pluviométricas de Pedernales y San Fernando y cuenca de Tres Piedras.	55
Figura 29 Ubicación de la estación de Zhurucay en el sur del Ecuador.	57
Figura 30 Curvas IDF-Estación In-Situ formula sin ajuste.	60
Figura 31 Curvas IDF-Estación Tres Piedras formula sin ajuste.	62
Figura 32 Hietograma de diseño para un periodo de retorno de 2 años.	65
Figura 33 Hietograma de diseño para un periodo de retorno de 3 años.	67
Figura 34 Hietograma de diseño para un periodo de retorno de 5 años.	68
Figura 35 Hietograma de diseño para un periodo de retorno de 50 años.	70
Figura 36 Hietograma de diseño para un periodo de retorno de 100 años.	72
Figura 37 Ecuación de la Curva de Descarga.	79
Figura 38 Niveles de Caudal de 365 días.	80
Figura 39 Niveles de alturas diarios máximas registradas por un año.	81
Figura 40 Caudal mensual.	82
Figura 41 Promedio mensual de caudales en un año.	83
Figura 42 Nivel 1 de agua máxima registrado en aproximadamente 30 min.	85
Figura 43 Nivel 2 de agua máxima registrado en aproximadamente 30 min.	86
Figura 44 Diferentes Evapotranspiraciones	88

Índice Tablas

Tabla 1 Información climática de San Fernando	9
Tabla 2 Cobertura por rangos de precipitación.	11
Tabla 3 Cobertura por rango de temperatura.	13
Tabla 4 Cobertura por número de meses secos.	14
Tabla 5 Cobertura por tipo de suelos.	15
Tabla 6 Ubicación de la Cuenca.	17
Tabla 7 Parámetros Cuenca Tres Piedras.	38
Tabla 8 Explicación de Rangos.	40
Tabla 9 Relación de elongación.	41
Tabla 10 Índice de compacidad (Kc).	42
Tabla 11 Densidad de Drenaje (Dd).	43
Tabla 12 Pendiente Media (S%).	43
Tabla 13 Tiempo de concentración por sus respectivos métodos.	44
Tabla 14 Coeficiente de Escorrentía.	51
Tabla 15 Coeficiente de escorrentía.	52
Tabla 16 Precipitación media de estaciones cercanas vs precipitación in situ.	56
Tabla 17 Localización geográfica de las estaciones Pedernales y San Fernando.	57
Tabla 18 Constantes determinada para cada estación del método ajustado.	58
Tabla 19 Intensidades máximas de la forma general.	59
Tabla 20 Intensidades máxima de la forma ajustada.	61
Tabla 21 Intensidades 24 horas para diferente periodo de retorno.	62
Tabla 22 Intensidades máximas para respectivo año de retorno.	64
Tabla 23 Precipitaciones Para un Periodo de Retorno de 2 años.	65
Tabla 24 Precipitaciones Para un Periodo de Retorno de 3 años.	66

Tabla 25 Precipitaciones Para un Periodo de Retorno de 5 años.	68
Tabla 26 Precipitaciones Para un Periodo de Retorno de 50 años.	69
Tabla 27 Precipitaciones Para un Periodo de Retorno de 100 años.	71
Tabla 28 Intensidades.	73
Tabla 29 Promedio mensual de precipitación de cada estación.	75
Tabla 30 Precipitaciones de Diseño.	76
Tabla 31 Caudales de diseño para con su respectivo año de retorno.	77
Tabla 32 Aforamientos con sus respectivos niveles.	78
Tabla 33 Régimen de caudales medios mensuales.	84
Tabla 34 Registro de precipitación.	85
Tabla 35 Almacenamiento mensual y total anual disponible.	89
Tabla 36 CE mensual.	91
Tabla 37 Almacenamiento de los meses más lluviosos.	93
Tabla 38 Volumen mensual disponible para almacenar.	94
Tabla 39 Volumen mensual y de los meses más lluviosos disponible para almacenar.	95
Tabla 40 Volumen mensual y de los meses más lluviosos disponible para almacenar luego del caudal hidrológico.	97

Introducción

El diseño hidrológico de embalses es una disciplina técnica y vital en la gestión de los recursos hídricos, desempeñando un papel crucial en la provisión de agua, control de inundaciones, generación de energía y conservación del medio ambiente. La construcción y operación de embalses requieren una comprensión profunda de los procesos hidrológicos, climáticos, geotécnicos y ambientales, así como la aplicación de técnicas de ingeniería avanzada. Esta tesis se centra en el diseño hidrológico de embalses, destacando la importancia de la recolección de datos de pluviometría y caudal, el modelado hidrológico y la selección de ubicaciones adecuadas.

El diseño hidrológico de un embalse comienza con la recopilación y el análisis de datos históricos de pluviometría. La pluviometría es esencial para comprender los patrones de precipitación en una región específica, lo que permite estimar las aportaciones de agua al embalse a lo largo del tiempo. La calidad y la cantidad de datos pluviométricos son fundamentales para la precisión de los cálculos hidrológicos. Estos datos también son cruciales para la preparación y adaptación a eventos climáticos extremos, que pueden variar significativamente en intensidad y frecuencia.

Además de la pluviometría, se deben considerar los datos de caudal de los ríos y afluentes que alimentan el embalse. El análisis de datos de caudal histórico proporciona información valiosa para dimensionar la infraestructura del embalse y determinar su capacidad de almacenamiento. Los datos de caudal son esenciales para calcular los caudales máximos y mínimos que el embalse debe gestionar, lo que influye directamente en el diseño de las estructuras de control y desagüe.

Una vez que se han recopilado y analizado estos datos, se utilizarán métodos estadísticos para estimar los caudales de diseño embalse. Esto permitirá determinar los

niveles óptimos de almacenamiento y la capacidad de desagüe requerida, lo cual es crucial para garantizar el suministro de agua y prevenir inundaciones o sequías.

La selección del sitio del embalse es un paso crítico en el diseño hidrológico. La topografía, la geología, la capacidad de inundación y la infraestructura existente son factores que deben evaluarse cuidadosamente. La elección de una ubicación inadecuada puede tener consecuencias graves, como la erosión de la presa o la interrupción de los ecosistemas acuáticos circundantes.

Antecedentes

Se pretende la construcción de un embalse para almacenar agua destinada al riego en el sector conocido como Tres Piedras. Para ello, se ha procedido a delimitar la cuenca de aporte al embalse y a recopilar información hidrometeorológica cercana a la zona de estudio, con el fin de determinar los caudales. Con esta información, junto con la demanda de agua para riego, se estimará la capacidad mínima requerida del embalse.

En la actualidad, se han implementado equipos de monitoreo de precipitación y caudal con el objetivo de fortalecer el estudio y obtener información precisa sobre la hidrología local y la disponibilidad de agua para el embalse.

Problema

Las sequías e inundaciones han generado cuantiosas pérdidas económicas, principalmente en la agricultura y la ganadería. La disponibilidad de recursos hídricos no es suficiente para satisfacer las demandas de agua en ciertas épocas del año, mientras que en otras se presenta una sobredemanda. En el sector de Tres Piedras, la carencia de infraestructura para el almacenamiento de agua limita la capacidad de abastecer los sistemas de riego. La inexistencia de un embalse complica la gestión eficaz de las precipitaciones, afectando negativamente a la comunidad.

Se ha determinado la necesidad de recolectar datos de precipitación mediante un pluviógrafo y sensores de presión que permitan conocer los niveles de agua, los cuales serán transformados en caudales in situ mediante una curva de descarga. La escasez de datos específicos, junto con la ausencia de asesoramiento técnico, representa un problema significativo para los habitantes de la zona, impactando negativamente las condiciones medioambientales y el desarrollo socioeconómico de toda la región.

Objetivos

Objetivo general

Obtener los caudales de diseño para un embalse mediante la determinación de la disponibilidad hídrica con un sistema de monitoreo lluvia-caudal.

Objetivos específicos

- Monitorear y mantener el pluviógrafo y los niveles de agua, realizando aforos y generando la curva de descarga correspondiente.
- Evaluar y comparar la información histórica secundaria con los registros obtenidos in situ, para su aplicación en el dimensionamiento del embalse.
- Estudiar el funcionamiento de la cuenca hidrográfica, considerando la cuantificación de los principales componentes del ciclo hidrológico (precipitación y escorrentía).
- Estimar los caudales máximos y mínimos en los puntos de interés de la cuenca de drenaje.

Justificación

Ante la necesidad de gestionar adecuadamente los recursos hídricos considerando la variabilidad climática, la gestión de información meteorológica se vuelve un elemento fundamental para el desarrollo del diseño hidrológico de un embalse.

Para la presente investigación, la instalación de equipos en la cuenca de estudio resulta esencial para comprender el comportamiento de las precipitaciones y sus patrones temporales. A partir de estos registros, se busca generar las curvas de intensidad, duración y frecuencia (IDF), así como analizar la variabilidad de los caudales en la cuenca de aporte mediante las curvas de descarga.

Estos eventos serán descritos de forma analítica y comparados con la información secundaria y con los datos de estaciones cercanas, con el fin de obtener un diseño más confiable. Disponer de información hidrometeorológica precisa en el cantón también permitirá mejorar el diseño de infraestructuras hidráulicas destinadas al riego, abastecimiento de agua potable y otros usos.

Capítulo 1

Marco Teórico y Estado del Arte

Actualmente, ante la necesidad de desarrollar estudios hidrológicos basados en información confiable, se han implementado instrumentos pluviométricos y sensores, lo que ha permitido obtener datos adecuados para un análisis y evaluación detallada. Esto contribuye a optimizar la capacidad de captación y retención de agua durante las épocas de estiaje, así como a prevenir inundaciones, minimizando los problemas asociados con las crecidas en zonas urbanas. Los estudios hidrológicos se han enfocado principalmente en la recolección continua de información meteorológica durante el mayor tiempo posible en la zona señalada (Básame, Almeida, Ramón, Zeas y Álvarez, 1998).

La falta de información de precipitación medida in situ ha constituido uno de los principales obstáculos a lo largo del tiempo, especialmente en lo relacionado con el diseño y la planificación de obras civiles. En ausencia de registros locales sobre la intensidad, duración y frecuencia de las lluvias, se ha recurrido a información proveniente de estaciones cercanas con el objetivo de estimar eventos máximos de precipitación. Sin embargo, esta práctica ha derivado en estudios basados en datos secundarios con un nivel limitado de confiabilidad para la cuenca del sector Tres Piedras (Calle, 2015).

Para gestionar de manera eficiente los recursos hídricos de la cuenca en estudio, resulta fundamental la implementación de equipos tecnológicos que permitan la obtención confiable de información hidrológica, tanto de precipitaciones como de caudales en el punto de cierre de la cuenca. Esto facilitará la comparación con estudios hidrológicos previos que se fundamentan en información secundaria. Mediante métodos estadísticos, se logró extender los registros existentes hasta obtener una distribución homogénea equivalente a diez años de precipitaciones, proceso conocido como completado o relleno de datos. La estación pluviográfica del Observatorio Ecohidrológico de Zhurucay, perteneciente al Departamento

de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca, cuenta con registros diarios desde el año 2012. Esta información resulta crucial para completar los diez años de datos requeridos para la presente investigación, utilizando las técnicas estadísticas correspondientes. Adicionalmente, mediante la recopilación de información de niveles durante un año en el punto de cierre de la cuenca y la aplicación de la curva de descarga determinada, se obtuvo un registro estimado de caudales.

La curva Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) permite estimar eventos máximos de precipitación para diferentes duraciones y frecuencias de ocurrencia. Estas curvas se representan como una familia de curvas asintóticas, cada una correspondiente a un período de retorno específico, y posibilitan caracterizar la intensidad de la lluvia en función de su magnitud, duración y frecuencia en la zona de estudio (INAMHI, 2015).

Dada la complejidad del diseño de estructuras hidráulicas, el control de inundaciones, la gestión de reservas de agua, así como los costos de construcción y operación, es fundamental contar con un análisis integral de la intensidad, duración y frecuencia de las precipitaciones. Este debe sustentarse en métodos estadísticos que garanticen la confiabilidad de la información. En este contexto, se establecen patrones de lluvia mediante una metodología práctica propuesta por Calle (2015). A partir de la información obtenida en tiempo real y la elaboración de hietogramas de diseño (Anthony L. O., 2023), se determinaron los caudales de diseño con el fin de compararlos con los caudales registrados en el punto de cierre de la cuenca de interés.

Finalmente, se efectuará una comparación entre el presente estudio y un estudio hidrológico previo basado en información secundaria.

Descripción General de la Cuenca

La descripción de una cuenca hidrográfica se determina a partir de diversas observaciones relacionadas tanto con su estructura superficial como con sus características hidrológicas.

Aspectos Generales del cantón San Fernando

El cantón San Fernando se encuentra ubicado en la provincia del Azuay, al sur del Ecuador, y posee una extensión territorial de 140,51 km² (GAD Municipal del Cantón San Fernando, 2022). En la Tabla 1 se presentan los principales parámetros climáticos característicos del cantón y en la Figura 1 su ubicación en América.

Tabla 1

Información climática de San Fernando

	<i>Descripción</i>
Precipitación	Promedio: 750mm anuales
Temperatura	Promedio: 12°C en la cabecera cantonal, 7°C en partes altas, 20°C en la zona baja.
Pisos climáticos	Predominante clima ecuatorial de Alta Montaña, seguido de clima Ecuatorial Mesotérmico Semihúmedo.
Humedad	Humedad

Nota. (Gobierno Autónomo Descentralizado del Cantón San Fernando 2019 - 2023, 2019).

Figura 1

Ubicación general de Azuay en Sudamérica y Ecuador.



Nota. Prefectura del Azuay, 2012.

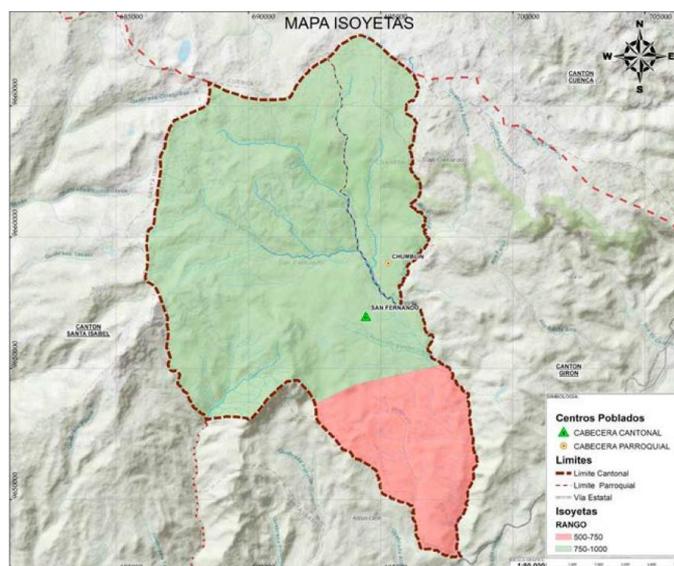
Precipitación.

El cantón San Fernando se encuentra influenciado por dos rangos promedio de precipitación anual: en la zona alta, las precipitaciones varían entre 750 y 1000 mm, mientras que en la zona baja oscilan entre 500 y 750 mm (GAD Municipal del Cantón San Fernando,

(2022). En la Figura 1 se presenta el mapa de isoyetas, en el cual se observa la distribución de las precipitaciones anuales en las diferentes áreas del cantón.

Figura 2

Cobertura por rangos de precipitación anual.



Nota. Elaboración SENPLADES 2011.

En la Tabla 2 se indican los rangos de cobertura de precipitación.

Tabla 2

Cobertura por rangos de precipitación.

<i>Precipitación</i>	<i>Área (Ha)</i>	<i>Porcentaje</i>
500-750	2537,99	17,92%
750-1000	11622,06	82,08%
Total	14160,05	100%

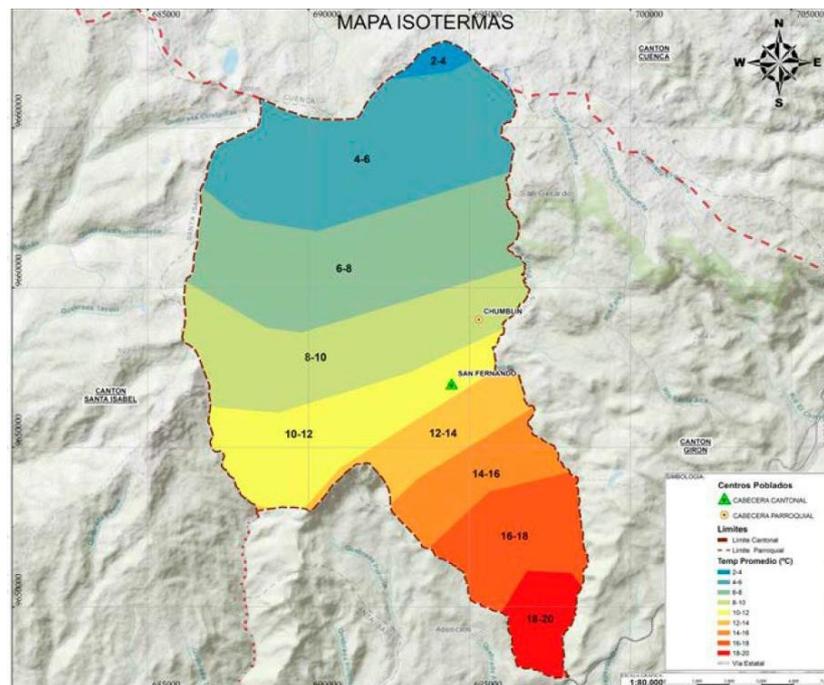
Nota. (Gobierno Autónomo Descentralizado del Cantón San Fernando 2019 - 2023, 2019).

Temperatura. El cantón se encuentra influenciado por rangos de temperatura que varían desde los 2 °C en las zonas más altas hasta los 20 °C. En la mayor parte del territorio, la temperatura se mantiene en un rango de 6 °C a 12 °C (GAD Municipal del Cantón San

Fernando, 2022). En la Figura 2 se ilustra el mapa de isotermas, mostrando la distribución de la temperatura en las diferentes zonas del cantón.

Figura 3

Isotermas.



Nota. Elaboración SENPLADES 2011.

Para facilitar la interpretación del mapa de isotermas, en la Tabla 3 se presentan de manera numérica el área y el porcentaje correspondiente a cada rango de temperatura según su cobertura territorial.

Tabla 3*Cobertura por rango de temperatura.*

<i>Rango</i>	<i>Área (Ha)</i>	<i>Porcentaje (%)</i>
2-4	136,98	1,29%
4-6	3147,63	29,74%
6-8	3022,38	28,56%
8-10	2416,23	22,83%
10-12	1859,13	17,57%
12-14	874,68	8,27%
14-16	913,45	8,63%
16-18	1239,28	11,71%
18-20	550,28	5,20%
<i>Total</i>	<i>14160,05</i>	<i>100,00%</i>

Nota. (Gobierno Autónomo Descentralizado del Cantón San Fernando 2019 - 2023, 2019).

Sequía

En la parte alta del cantón, se registra un promedio de 4 a 6 meses secos al año, mientras que en la zona baja dicho promedio oscila entre 7 y 8 meses secos. En la Tabla 4 se muestra la distribución del territorio según el número de meses secos anuales.

Tabla 4

Cobertura por número de meses secos.

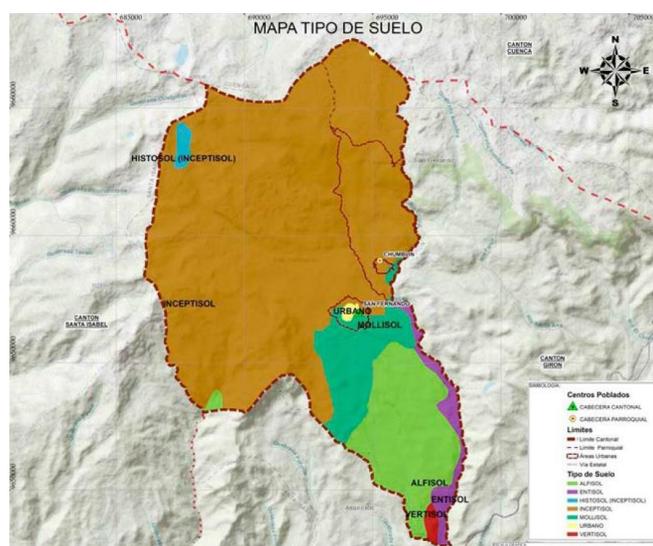
<i>Meses Secos</i>	<i>Área (Ha)</i>	<i>Porcentaje</i>
3	1530,81	10,81%
4	4517,89	31,91%
5	4208,93	29,72%
6	2433,08	17,18%
7	1042,04	7,36%
8	427,31	3,02%
Total	14160,05	100,00%

Nota. (Gobierno Autónomo Descentralizado del Cantón San Fernando 2019 - 2023, 2019).

Suelo. El tipo de suelo es crucial para determinar su capacidad de filtración y retención de agua. En el cuadro siguiente se presenta la estructura del suelo del cantón San Fernando.

Figura 4

Tipos de Suelo.



Nota. Elaboración SENPLADES 2011.

En la Tabla 5 se presenta de manera numérica el tipo de suelo existente en el cantón San Fernando, así como su área y cobertura correspondiente.

Tabla 5

Cobertura por tipo de suelos.

<i>Orden</i>	<i>Área (Ha)</i>	<i>Cobertura (%)</i>
Alfisol	1918,45	13,55%
Entisol	384,02	2,71%
Histosol (inceptisol)	96,13	0,68%
Inceptisol	10541,30	74,44%
Mollisol	1111,59	7,85%
No aplicable	41,14	0,29%
Vertisol	67,43	0,48%
Total	14160,05	100,00%

Nota. (Gobierno Autónomo Descentralizado del Cantón San Fernando 2019 - 2023, 2019).

Aspectos Técnicos Generales de la Cuenca

La cuenca de estudio Tres Piedras se ubica en la vertiente occidental del Ecuador y pertenece al límite hidrográfico del río Jubones, ubicado en el cantón San Fernando, provincia del Azuay. El río Jubones desemboca en el Océano Pacífico. La cuenca se encuentra relativamente conservada, por lo que es necesario que las autoridades controlen el avance de la frontera agrícola.

La cuenca de estudio está situada en la zona altoandina del Ecuador, cubierta por extensas áreas de páramos, humedales y pajonales, como se ilustra en la Figura 5. Se encuentra a una altitud superior a los 3600 msnm, lo cual, junto con la exposición de la cuenca, condiciona las temperaturas mínimas, que pueden descender por debajo de 0 °C, y las

máximas, que alcanzan hasta 20 °C. La cuenca posee una superficie de 1,38 km² (GAD Provincial del Azuay, 2022).

La precipitación anual varía entre 800 y 2000 mm, siendo la mayoría de los aguaceros de larga duración, pero de baja intensidad (GAD Cantón San Fernando, 2022). La humedad relativa supera el 80 % (GAD Provincial del Azuay, 2022). La vegetación natural se mantiene Relativamente conservada, predominando el matorral y un tapiz herbáceo periódicamente saturado de agua, característico de los páramos andinos.

Figura 5

Ecosistema de la cuenca.



Nota. Tres Piedras (Fotografía), Elaboración Propia, 2022.

Ubicación de la cuenca de estudio

En la Tabla 6 se presenta la ubicación del pluviógrafo en coordenadas UTM. Este se encuentra ubicado al final de la cuenca baja, en el sector Tres Piedras. Ubicada al final de la cuenca baja Sector Tres Piedras.

Tabla 6

Ubicación de la Cuenca.

<i>Punto</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>
Tres Piedras	687160,50	965541,29	3639

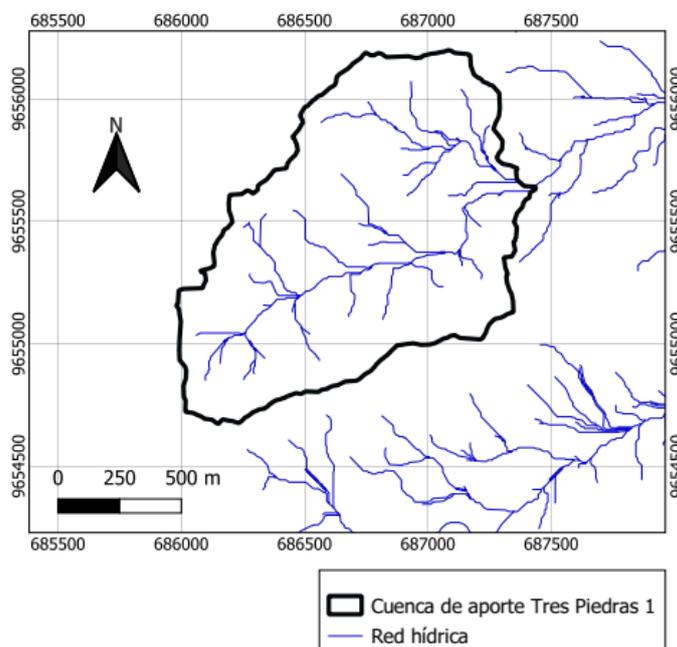
Nota. Prefectura del Azuay, 2022.

1.1.1. Geomorfología

En la Figura 6 se identifica la cuenca hidrográfica de Tres Piedras, además, el cauce principal y los cauces secundarios.

Figura 6

Cuenca Hidrográfica.



Nota. GAD Provincial del Azuay, 2022.

En la Figura 7 se distingue la altimetría del sitio de embalse.

Figura 7

Altimetría.



Nota. Google Earth, 2022.

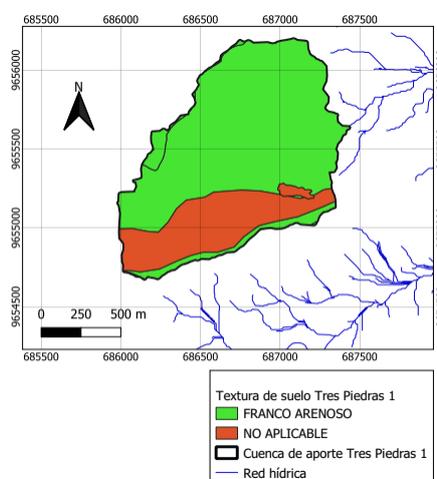
En la Figura 8 se identifica la topografía y vegetación de la cuenca.

Geología

De acuerdo con la geología del área, la textura del suelo corresponde a franco arenoso, como se muestra en la Figura 8.

Figura 8

Geología.



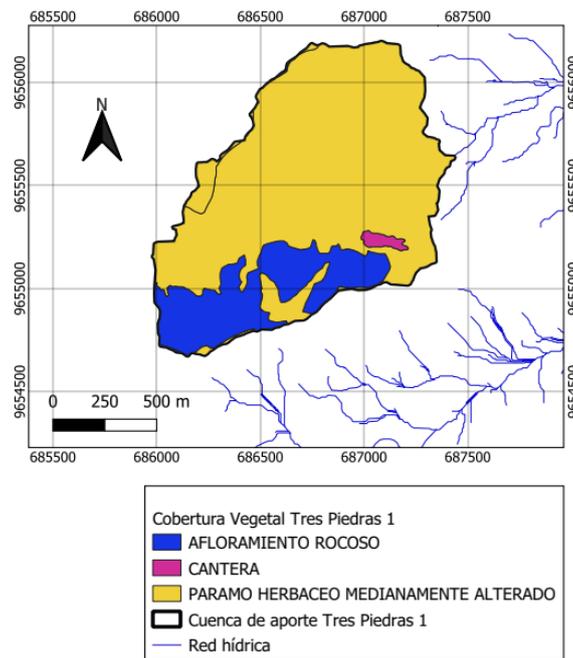
Nota. GAD Provincial del Azuay, 2022.

Edafología.

La cuenca presenta diversas composiciones y estructuras de suelo, y gran parte de su superficie está cubierta por páramo herbáceo. En la Figura 9 se ilustra la composición y estructura del suelo de la cuenca de estudio.

Figura 9

Edafología.



Nota. GAD Provincial del Azuay, 2022.

Geomorfología

La geomorfología permite realizar un análisis más profundo de la cuenca de estudio, ubicada en el sector Tres Piedras. Este estudio se centra en determinar su estructura física, incluyendo la forma, el relieve, la climatología y los aspectos fluviales. En la Figura 10 se ilustra la forma de la cuenca de estudio.

Figura 10

Geomorfología.



Nota. Google Earth, 2022.

Ecosistema

La cuenca se encuentra aproximadamente a 3000 metros sobre el nivel del mar, lo que favorece la presencia de páramo y pajonal. La altitud y la exposición son factores determinantes de los valores de temperatura y precipitación. La temperatura máxima rara vez supera los 20 °C, mientras que la mínima se mantiene por debajo de 0 °C. Los valores medios anuales, aunque variables, se sitúan generalmente entre 4 y 8 °C.

Las precipitaciones anuales oscilan entre 800 y 2000 mm, predominando lluvias de larga duración, pero de baja intensidad. La humedad relativa supera consistentemente el 80%. La vegetación natural se distribuye en estratos: en la capa más baja predomina el matorral, mientras que en la parte superior se desarrolla una densa capa herbácea, frecuentemente saturada de agua (GAD Provincial del Azuay, 2022).

Monitoreo y disponibilidad de datos

La estación pluviométrica es un sistema diseñado para monitorear información climatológica en tiempo real. Para su óptimo funcionamiento, se debe instalar en una zona

libre de obstáculos que puedan impedir la caída normal del agua. Además, es importante evitar la exposición directa al viento, ya que las corrientes de aire en la boca del pluviógrafo pueden interferir con la medición de la precipitación.

La cuenca de estudio fue instrumentada con un sistema de monitoreo lluvia-caudal. Se instaló un pluviógrafo marca Davis, con sensibilidad de 0,2 mm, y un sensor de presión Heron Instruments para la obtención de caudales, como se muestra en la Figura 11 y 12 respectivamente.

Figura 11

Pluviógrafo.



Nota. Tres Piedras (Fotografía), Elaboración Propia, 2022.

Figura 12

Groundwater Data Logger con cable conexión PC.



Nota. Web Heron Instruments, 2023.

Las dos estaciones de medición se encuentran en el sitio de emplazamiento de la represa en el punto de cierre de la cuenca como se indica en la Figura 13.

Figura 13

Ubicación de los sensores instalados por la Prefectura del Azuay en Tres Piedras.



Nota. Google Earth, 2022.

Sensor de presión

Para asegurar el correcto funcionamiento del sensor de presión Heron Instruments, este se ubicó en un lugar estratégico: un sector encañonado con estratos casi verticales. La información registrada por el sensor es fundamental para determinar el caudal del arroyo en un período determinado, a partir de la altura del agua medida.

El sensor se instaló sobre una base tubular de acero con orificios y se fijó al talud del arroyo mediante pernos anticorrosivos, como se muestra en la Figura 14.

Figura 14

Sensor instalado dentro el lecho del afluente.



Nota. Tres Piedras (Fotografía), Elaboración Propia, 2022.

Pluviógrafo

La instalación del pluviógrafo Davis se realizó en la parte baja de la cuenca, en un sitio libre de influencias que puedan alterar la medición de las precipitaciones. Se ubicó a una altura prudencial sobre la superficie terrestre. De él se descargaron los datos de precipitación como se ilustra en la Figura 15.

Figura 15

Gráfica de precipitación registrada.



Nota. Tres Piedras (Fotografía), Elaboración Propia, 2022.

El pluviógrafo cuenta con una base volumétrica como medidor de precipitación. Como se muestra en la Figura 16, cuando se llena, registra automáticamente la información en tiempo real y permite su almacenamiento para análisis a largo plazo.

Figura 16

Base del pluviógrafo.



Nota. Tres Piedras (Fotografía), Elaboración Propia, 2022.

Aforamiento

Antes de realizar el diseño hidrológico de la cuenca de estudio, fue necesario recopilar información de manera presencial. La medición de la velocidad del arroyo constituye un dato clave para el desarrollo del modelo matemático planteado. Se procedió a aforar la velocidad en diferentes puntos, considerando las variaciones en la altura del cauce y los caudales, lo cual es esencial para la elaboración de la curva de descarga, que se detallará más adelante.

La determinación de la velocidad del arroyo es fundamental para calcular la disponibilidad hídrica de la cuenca. Para esta medición se utilizó un caudalímetro electromagnético modelo 801 Valeport, como se muestra en la Figura 17.

Figura 17

Caudalímetro.



Nota. Web Valeport, 2022.

Método de Aforamiento Sección-velocidad.

Este método permite determinar los caudales superficiales de agua. Consiste en medir la velocidad en varios puntos de la sección transversal del canal. Posteriormente, se calcula el área de la sección mediante mediciones de las alturas en posiciones equidistantes a lo largo del río. Con los datos obtenidos, se aplica la ecuación de continuidad (1) para determinar el caudal.

$$Q = A * V \quad (1)$$

Donde:

Q: Caudal del río (m^3/s)

A: Área (m^2)

V: Velocidad m/s^2

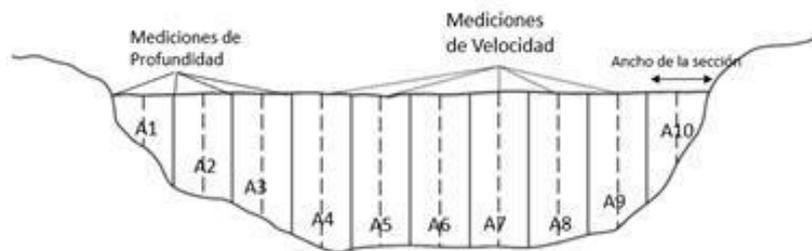
Determinación del área de sección

Para determinar el área de la sección, se divide principalmente el ancho del río en partes iguales. En cada posición a lo largo del ancho de la sección se mide el nivel de agua.

En la Figura 18 se ilustra el método empleado para determinar la sección del cauce. El área se calcula como la suma total del producto de la anchura de cada subsección por el nivel de agua correspondiente (Alvarado, 2017).

Figura 18

Sección de afluente.



Nota. Web Consejo de Áreas Protegidas de Guatemala, 2022.

Mediante el método de aforamiento establecido, las velocidades se miden a diferentes profundidades del cauce. Para ello, se realizaron visitas de campo, como se muestra en la Figura 19. Finalmente, se promedian las velocidades obtenidas para determinar un valor representativo en la sección estudiada.

Figura 19

El aforador correntómetro electromagnético – inductivo en ejecución en dos diferentes posiciones y secciones del cauce.



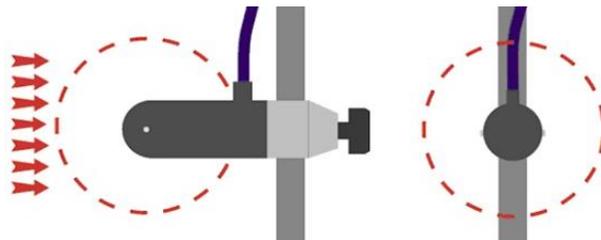
Nota. Tres Piedras (Fotografía), Elaboración Propia, 2024.

El correntómetro cuenta con su sección sensor de toma de datos ajustada a la varilla electromagnética y su computadora integrada. El sensor irá debajo de la corriente de agua, la varilla electromagnética estará perpendicular durante el proceso de toma de datos.

En la Figura 20 se ilustra el sentido de uso del sensor.

Figura 20

Dirección de ubicación del sensor del correntómetro con respecto a la dirección del caudal de agua a medir.



Nota. Adaptado de Geomor Technik (Fotografía), geomor.com.pl, 2025.

Luego de que la computadora cumpla su tiempo de cálculo de 30 segundos, nos indicará un valor en la pantalla del computador correspondiente a la velocidad tomada.

Capítulo 2

Metodología

En este capítulo se describe la cuenca de estudio, incluyendo sus características físicas, topográficas, ecológicas e hidrológicas, así como el análisis y tratamiento de información pluviométrica y de niveles, con el objetivo de obtener un registro de caudales recopilado de la estación in situ.

El estudio inicia con la recopilación de información en campo. Mediante métodos estadísticos, se completan los datos para generar una serie de registro de al menos 10 años. A partir de esta información, se determinarán las intensidades máximas para 24 horas en distintos periodos de retorno: 2, 3, 5, 50 y 100 años.

Posteriormente, se elaborarán las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) a partir de las intensidades máximas registradas. La construcción de la curva de descarga se realizó utilizando el método del molinete, determinando la sección y la velocidad del cauce.

Para finalizar el capítulo, se aplicará el método racional para el cálculo de caudales en la cuenca y la determinación del coeficiente de esorrentía mediante sus parámetros característicos.

Curvas de doble masa

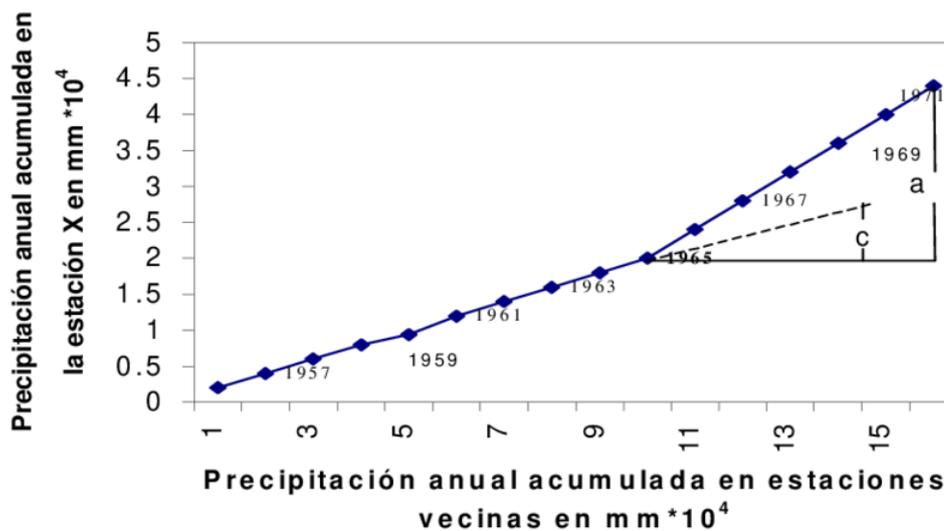
En algunos registros de estaciones pluviométricas se presentan datos faltantes, un problema frecuente debido a diversos factores durante determinados periodos de tiempo. Para solventar esta situación, se aplican métodos estadísticos que permiten completar los valores con alta exactitud.

El método de curva de doble masa consiste en construir una curva doble acumulativa, en la cual se relaciona el total acumulado de precipitación de un lugar específico con la media acumulada de los totales de todas las estaciones de la región. Este método permite evaluar la homogeneidad climática de los datos, considerando que la serie es homogénea desde la

perspectiva estadística y no necesariamente desde la climatología como se aprecia en la Figura 21.

Figura 21

Gráfica de curva de doble masa.



Nota. Adaptado de Research Gate (Fotografía), researchgate.net, 2025.

Cuando se observa un cambio de pendiente en la estación pluviométrica analizada, se indica que la curva de doble masa no es homogénea. Mientras la pendiente se mantenga constante, la curva puede considerarse homogénea en los datos de precipitación.

Para corregir la curva y lograr homogeneidad, se calcula un factor de ajuste mediante la relación:

$$Fa = A/B \tag{2}$$

La corrección elimina los datos inconsistentes y permite graficar nuevamente la curva de doble masa, repitiendo el proceso de forma iterativa hasta obtener un coeficiente de determinación $R^2 \geq 0,9$. Esto proporciona mayor confianza en la serie de datos. La corrección elimina los datos erróneos y vuelve a graficar la curva de doble masa repitiendo el

proceso a corregirse de una manera de iteración hasta tener un coeficiente R^2 mayor o igual a 0,9. Obtendremos mayor confianza en los datos por determinar.

Una vez corregidos los datos de la curva de doble masa, se realiza una correlación lineal, la cual debe ser mayor a 0,7 para confirmar la relación entre las series.

Cumpliendo este criterio, se obtiene la ecuación que permite estimar los datos faltantes con alta confiabilidad (Richard, 1996).

El coeficiente de correlación lineal mide la relación lineal entre dos variables en un análisis de correlación, es decir, verifica cómo se relacionan linealmente. Su símbolo es r y su ecuación es:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

El coeficiente de correlación es un valor sin unidad y mantiene un rango de valor entre -1 a 1.

$r \approx 0$ Tiene débil relación lineal.

$r > 0$ Ambas variables tiende a aumentar juntas.

$r < 0$ La una variable aumenta y la otra disminuye.

Estadísticamente, se considera una buena correlación si el valor de r es mayor a 0,6 (Maya & Martín, 1999).

Precipitación media

La precipitación media corresponde al promedio de los datos de precipitación obtenidos de los pluviógrafo cercanos a la cuenca de estudio, con el objetivo de compararlos con la información registrada in situ.

Para calcular la precipitación media, se utilizó la información de dos estaciones cercanas a la cuenca mediante el método IDW (Inverse Distance Weighting o ponderación por distancia inversa). Este método estima la precipitación media considerando un coeficiente

de ponderación para cada punto de datos, calculado como la inversa de la distancia entre ese punto y los demás puntos de la región.

$$z_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{z_i}{d_i^p} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^p} \right)} \quad (4)$$

Curvas intensidad duración y frecuencia (IDF)

Las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) son de suma importancia para el diseño de infraestructuras hidráulicas y la gestión de recursos hídricos. Estas curvas se caracterizan por representar la intensidad de lluvia en función del tiempo y de su periodo de retorno.

Además, las curvas IDF se pueden definir como gráficos que concentran las características de las tormentas de una región en relación con sus tres variables principales: magnitud, duración y frecuencia (Campos, 1998).

Actualmente, existen diversos métodos que consideran las variables de los eventos de precipitación con el propósito de determinar ecuaciones que modelen las intensidades máximas en función de una duración específica y del periodo de retorno de interés. Estos métodos permiten identificar el comportamiento de las intensidades y sus parámetros asociados, la mayoría de los cuales se han desarrollado de manera empírica, con el fin de representar los datos tanto de forma gráfica como analítica.

Ecuación de intensidad en función de la intensidad diaria

En este método, la intensidad máxima de lluvia se calcula a partir de su duración y de las intensidades máximas registradas en 24 horas, generadas estadísticamente para diferentes periodos de retorno a partir de la información disponible en las estaciones pluviométricas.

Las curvas IDF se representan de la siguiente forma:

$$I_{TR} = \frac{A * I_{dTR}}{t_B} \quad (5)$$

Donde:

I_{TR} : Intensidad máxima de lluvia para una duración t y un período de retorno TR expresada en (mm/h).

I_{dTR} : Intensidad máxima de lluvia para 24 horas y el mismo período de retorno expresada en (mm/h).

A: Constante empírica de ajuste determinada para cada estación.

B: Exponente que indica cómo disminuye la intensidad al aumentar la duración.

t : Duración del evento de lluvia expresado en (min).

TR : Período de retorno o frecuencia estadística del evento de lluvia expresado en (años).

Para facilitar el cálculo de los parámetros, se aplican las propiedades del logaritmo a la ecuación (5):

$$\log I_{TR} - \log I_{dTR} = \log A - B \log t \quad (6)$$

Esta transformación convierte la ecuación en una forma lineal, permitiendo aplicar regresión lineal para estimar los valores de A y B.

La ecuación lineal tiene la forma de:

$$Y = a_0 + a_1 X_1 \quad (7)$$

Donde:

$$y = \frac{I_{TR}}{I_{dTR}}, \quad X_1 = \log t \quad (8)$$

y los coeficientes se definen como:

$$a_0 = \log A, \quad a_1 = -B \quad (9)$$

Desarrollo de las Curvas IDF

Para el desarrollo de las curvas IDF, es fundamental contar con una gran cantidad de información pluviométrica de una sola estación. Esto permite estimar la intensidad de lluvia para diferentes duraciones y un periodo de retorno establecido mediante métodos estadísticos (Núñez, 2008).

El promedio se conoce como media aritmética, y se calcula como la suma de los valores de la precipitación máxima anual dividida entre el número de años de información disponibles.

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \quad (10)$$

Donde:

A: la media Aritmética.

N: Números de valores.

a_i : Valores de conjunto de datos.

La desviación estándar es el valor para determinar la variabilidad de la información de precipitación adquirida con respecto a su media.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (11)$$

De acuerdo con la distribución del valor extremo (Chow, 1953), para este valor de tipo I se obtuvo la siguiente conclusión:

$$K_T = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left\{ 0,5772 + \ln \left[\ln \frac{\tau}{\tau - 1} \right] \right\} \quad (12)$$

Donde:

K_T : Distribución del valor extremo.

Π : 3,1415.

T: Periodo de retorno.

Las precipitaciones PP de un evento de lluvias se expresan como la media \bar{x} más una desviación estándar σ y el valor por el factor de frecuencia KT (Chow, Maidment, & Mays, 1994, p. 402)

$$PP = \bar{x} + \sigma * K_T \quad (13)$$

\bar{x} : Media poblacional.

σ : Desviación estándar.

K_T : Distribución de valores Extremos.

Las precipitaciones según su duración se calculan para obtener valores correspondientes a diferentes intervalos de tiempo mediante la siguiente fórmula (Sherman, 1931):

$$P = P_{24} * \left[\frac{d}{1440} \right]^{0,25} \quad (14)$$

Donde:

P: Precipitación máxima en cierta duración.

P_{24} : Precipitación máxima en 24 horas(mm).

D: Duración.

Para determinar la intensidad para 24 horas, y diferente periodo de retorno TR (I_{TR}) utilizamos la siguiente expresión.

Para determinar las intensidades de lluvia correspondientes a cada duración, se utiliza la siguiente expresión.

$$I_{dTR} = \frac{PP}{24} \quad (15)$$

Para determinar las intensidades de lluvia según cada duración, se emplea la siguiente expresión:

$$I_{TR} = \frac{P * 60}{d} \quad (16)$$

Las curvas IDF reajustada

Determinar

$$I_{TR} = A(t + C)^B I_{dTR} \quad (17)$$

Donde:

I_{TR} : intensidad de lluvia expresada en (mm/h).

I_{dTR} : Intensidad máxima para 24 horas, y diferentes TR (períodos de retorno).

A, B y C son constantes determinadas para cada estación

t: Es la duración del evento de lluvia en min

Determinar las Constantes A, B Y C

Dividimos I_{dTR} a ambos lados de la ecuación (17)

$$I_{TR} = A(t + C)^B I_{dTR} \quad (18)$$

Aplicando el logaritmo en ambos lados de la ecuación (17), se mantiene la propiedad de la igualdad, lo que permite linealizar la relación para su análisis o ajuste estadístico.

$$\frac{\log \frac{I_{TR}}{I_{dTR}}}{\log A + B \log(t + C)} \quad (19)$$

Reemplazando las variables a la ecuación lineal

$$Y = a_0 + a_1 x_1 \quad (20)$$

$$y = \frac{I_{TR}}{I_{dTR}}, \quad x_1 = \log(t + C) \quad (21)$$

Considerando:

$$a_0 = \log A, \quad a_1 = B \quad (22)$$

La ecuación (20) están determinadas líneas rectas, con una pendiente de la recta a_1 , ordenada al origen a_0 . Si se dibuja esta línea recta con los valores de i , d y $IdTR$. En ocasiones al graficar estas ecuaciones muestra una ligera curva, la manera de rectificar es sumándole un constante c a la duración en la ecuación. Principalmente si los datos se agrupan determina una línea recta, el valor de la constante c puede tomar el valor de $c = 0$ como se muestra en la ecuación (4). (Aparicio, 1992, p.169).

El procedimiento que se utiliza en el presente estudio hidrológico en primera instancia es hallar una ecuación lineal utilizando la ecuación (17) que se define con un valor $C \neq 0$, definido como un parámetro de ajuste a la duración.

En determinar el coeficiente B y C de la ecuación (17), el parámetro C , se determina mediante un procedimiento de ensayo y error con el cual se logra un ajuste óptimo de las series, a un modelo de regresión potencial, en donde la mayor aproximación de dicha constante se refleja en un coeficiente de determinación, cercano a 1 al parámetro B . Esto conlleva el importante beneficio de que la constante tiende a 1,0. Así, la nueva ecuación, para relacionar las variables IDF, queda como se presenta a continuación. (Muñoz B., JE y Zamudio H., E., 2018).

Coefficiente de correlación lineal

$$a_1 = \frac{n\sum xy - \sum x \sum y}{n\sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (23)$$

$$a_0 = \frac{\sum y - a_1 \sum x}{n} \quad (24)$$

Donde:

a_1 y a_0 : incógnitas.

n: números de datos.

X , y : Son variable de los logaritmos de las intensidades de lluvias sobre Intensidad máxima para 24 horas, y diferentes TR y su duración de forma respectiva.

Después de realizar los cálculos correspondientes, se obtuvieron los valores de los coeficientes a_1 y a_0 . A partir de estos, se procede a deducir los parámetros A y B de la ecuación (4), así como los parámetros A, B y C de la ecuación (17).

Con la información de intensidades de lluvia obtenidas para diferentes duraciones, se procederá a diseñar esquemáticamente las curvas IDF, relacionando cada duración con los periodos de retorno de interés: 2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Parámetros Morfométricos

La morfometría describe la forma, tamaño, relieve, topografía y longitudes de los afluentes de la cuenca. Esta, a su vez, está relacionada con la capacidad de recolección hídrica, basándose en la respuesta ante eventos climáticos.

La caracterización morfométrica de una cuenca se considera una de las primeras etapas en el estudio hidrológico, previa al análisis de la hidrología superficial y subterránea (FAREM-Estelí, 2021).

Parámetros de Forma y tamaño. En el siguiente cuadro indica la información adquirida en el estudio hidrológico Tres Piedras con información secundaria.

En la tabla 7 se indican los parámetros de la Cuenca de estudio.

Tabla 7*Parámetros Cuenca Tres Piedras.*

<i>Parámetro</i>	<i>Tres Piedras</i>	<i>Unidad</i>
Área	138,18	ha
Área	1,38	Km ²
Cota mínima	3632,48	m
Cota máxima	3929,0p	m
Pendiente media Cuenca	18,43	-
Longitud cauce principal	1,59	km
Altura de desnivel máximo H	296,52	m
Pendiente media cauce	18,63	-
Perímetro	5,31	Km
<i>P media anual</i>	<i>1004,00</i>	<i>mm</i>

*Nota. GAD Provincial del Azuay, 2022.***Razón de elongación**

$$Re = 1,128 \frac{\sqrt{A}}{L_c} \quad (25)$$

Donde:

A: Área de la cuenca Km².

Lc: Longitud del cauce.

Coefficiente de compacidad

$$C_c = \frac{(0,282)(P)}{\sqrt{A}} \quad (26)$$

Donde:

P: Perímetro

A: Área de la cuenca Km^2 .

Parámetros de forma y tamaño en la cuenca

La cuenca de estudio Tres Piedras se encuentra en el cantón San Fernando, en la provincia del Azuay, y cuenta con un área total de 1,38 km^2 y un perímetro de 5,31 km, respectivamente. La información fue recaudada del estudio hidrológico Tres Piedras, utilizando información secundaria previamente mencionada.

El coeficiente de elongación calculado para la cuenca es de 0,83. Como este factor es menor a 1, se determina que la cuenca es alargada (Jardí, 1985).

El índice de Gravelius, o índice de compacidad, calculado mediante la fórmula 25, arroja un valor de 1,38. Este índice indica que la cuenca tiene una forma ovalada a oblonga, con una concentración de agua relativamente lenta.

La forma alargada de la cuenca y las pequeñas longitudes de sus cauces están relacionadas con la pendiente del terreno. Por lo general, la cuenca, en términos ambientales, presenta bajas probabilidades de inundaciones (FAREM-Estelí, 2021).

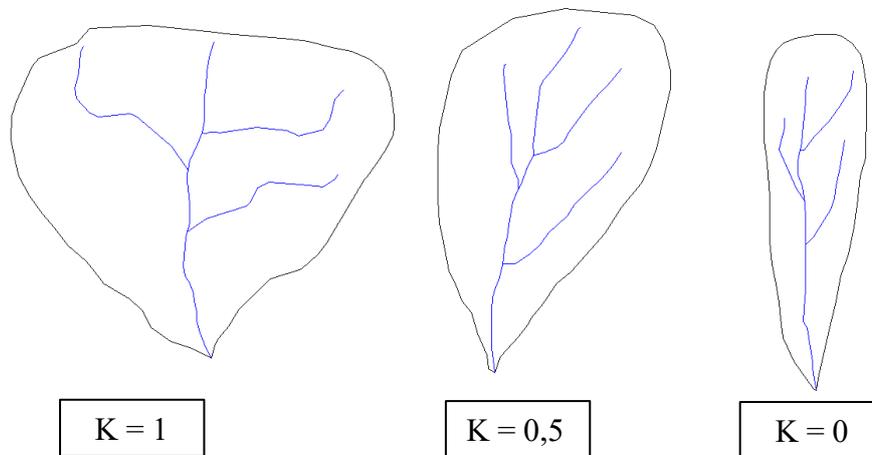
La cuenca de estudio posee una cota mínima de 3632,48 msnm y una cota máxima de 3929 msnm, con un desnivel de 296 m, y una pendiente media de 18,43%. La distancia del cauce principal es de 1,58 km, con una pendiente promedio del cauce de 18,63% (Tabla 8).

Coficiente de forma (Rf)

Ésta evalúa si la forma de la cuenca es alargada o circular, resultando 0,55, en la Figura 22 se ejemplifican las formas de las cuencas.

Figura 22

Cuencas en las que se aprecia a que responde el Rf con respecto a su forma.



Nota. Elaboración propia a partir de datos tomados de Horton, R. E.(1932).

$$R_f = \frac{A}{L^2} \quad (27)$$

Tabla 8

Explicación de Rangos.

<i>Parámetro</i>	<i>Rango típico</i>	<i>Interpretación principal</i>
Coeficiente de Forma (Rf)	Rf > 0,8	Cuenca circular, alta respuesta, posible riesgo de crecidas rápidas
	0,5 ≤ Rf ≤ 0,8	Cuenca semi-alargada, respuesta moderada
	Rf < 0,5	Cuenca alargada, menor riesgo, tiempo de concentración mayor

Nota. Elaboración propia a partir de datos tomados de Horton, R. E.(1932).

Un Rf de 0,55 nos indica que la forma de la cuenca es semi - alargada marcando una tendencia a una respuesta hidrológica intermedia porque el escurrimiento superficial no se concentra rápidamente y se disminuye el riesgo de inundación.

Relación de elongación

Con este parámetro evaluamos la relación del diámetro de una circunferencia con igual área, con la longitud de un cauce, resultando 0,834. En la Tabla 9 se ejemplifican los rangos de los parámetros.

$$Re = \frac{2\sqrt{\frac{A}{\pi}}}{L} \quad (28)$$

Tabla 9

Relación de elongación.

<i>Parámetro</i>	<i>Rango típico</i>	<i>Interpretación principal</i>
Rel. de Elongación (Re)	$Re \approx 1,0$	Forma casi circular, escurrimiento concentrado
	$0,6 \leq Re \leq 0,8$	Forma intermedia, respuesta moderada
	$Re < 0,5$	Muy alargada, escurrimiento dilatado

Nota. Elaboración propia a partir de datos tomados de Horton, R. E.(1932).

La cuenca es relativamente alargada por su valor acercado al 1 que indicaría una forma circular. El escurrimiento es algo retardado, esto beneficia en el control del caudal.

Índice de compacidad (Kc)

El perímetro de la cuenca es comparado con la de un círculo de un área igual, resultando 1,28. En la Tabla 10 se ejemplifican los rangos de los parámetros.

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad (29)$$

Tabla 10*Índice de compacidad (Kc).*

<i>Parámetro</i>	<i>Rango típico</i>	<i>Interpretación principal</i>
Índice de Compacidad (Kc)	$Kc \approx 1,0$	Forma circular, eficiente
	$1,0 \leq Kc \leq 1,5$	Forma compacta, adecuada eficiencia en escurrimientos
	$Kc > 1,5$	Cuenca irregular o muy alargada

Nota. Elaboración propia a partir de datos tomados de Horton, R. E.(1932).

Los valores cercanos a 1 indican una cuenca más eficiente en cuanto su respuesta a la conducción del agua. Esto indica que es moderadamente compacta y con una forma no completamente óptima para un escurrimiento rápido de agua.

Densidad de Drenaje (Dd)

Éste es un parámetro que indica la relación que existe entre la longitud total de los cauces de agua dentro de la cuenca de estudio y la superficie total de la misma. Ésta es una medida que ayuda a comprender cómo se drenará el agua en el sitio de estudio, resultando 1,15 km/km². En la Tabla 11 se ejemplifican los rangos de los parámetros.

$$D_d = \frac{L_{total}}{A} \quad (30)$$

Tabla 11*Densidad de Drenaje (Dd).*

<i>Parámetro</i>	<i>Rango típico</i>	<i>Interpretación principal</i>
Densidad de Drenaje (Dd)	$Dd < 0,5$	Baja densidad, alta infiltración, escurrimiento lento
	$0,5 \leq Dd \leq 1,5$	Moderada densidad, equilibrio entre escurrimiento e infiltración
	$Dd > 1,5$	Alta densidad, escurrimiento concentrado, riesgo de erosión

Nota. Elaboración propia a partir de datos tomados de Horton, R. E.(1932).

Este factor nos indica una densidad de drenaje moderada porque no puede escurrirse rápidamente. Puede reflejar el equilibrio entre infiltración y escorrentía superficial.

Pendiente Media de la Cuenca (S%)

La pendiente media de la cuenca es 18,63%. (Prefectura del Azuay, 2022)

En la Tabla 12 se indican los rangos de típicos de pendientes.

Tabla 12*Pendiente Media (S%).*

<i>Parámetro</i>	<i>Rango típico</i>	<i>Interpretación principal</i>
Pendiente Media (S%)	$S < 5\%$	Topografía plana, escurrimiento lento
	$5\% \leq S \leq 15\%$	Pendiente moderada, escurrimiento regular
	$S > 15\%$	Terreno accidentado, escurrimiento rápido y erosivo

Nota. Elaboración propia a partir de datos tomados de Horton, R. E.(1932).

La pendiente media que tiene la cuenca ayuda a que se más eficiente la velocidad del escurrimiento en las condiciones que la misma se presenta, aumentando la energía del flujo superficial. Además, implica mayor potencial erosivo y de transporte de sedimentos.

Tiempos de concentración

Conceptualmente, el tiempo de concentración se define como el tiempo que demora la gota de agua más lejana en salir de la cuenca. Cuando ocurre una precipitación con una duración igual al tiempo de concentración, se produce un caudal máximo. El tiempo de concentración (T_c) es un parámetro que refleja la distribución temporal del hidrograma de caudal y permite identificar valores característicos, como el caudal máximo, necesario para el diseño de obras hidráulicas. La precisión del diseño es sensible a la exactitud con que se determina este parámetro. En la Tabla 13 se evidencia diferentes Tiempos de concentración, se calculó su promedio con 26,65.

Tabla 13

Tiempo de concentración por sus respectivos métodos.

<i>Método</i>	<i>T_c (min)</i>
Pasini	19,5
Témez	35,26
Vendura	20,67
Bransby	31,16
<i>Promedio</i>	<i>26,65</i>

Nota. GAD Provincial del Azuay, 2022.

Curva de descarga de caudales

Las curvas de descarga son fundamentales para comprender y gestionar los recursos hídricos de una región. Proporcionan información valiosa para el diseño de infraestructuras hidráulicas, la evaluación de la disponibilidad de agua, la prevención de inundaciones y otros aspectos relacionados con la gestión del agua (AQUAFLOW / Hidrometría y Monitorización, 2024).

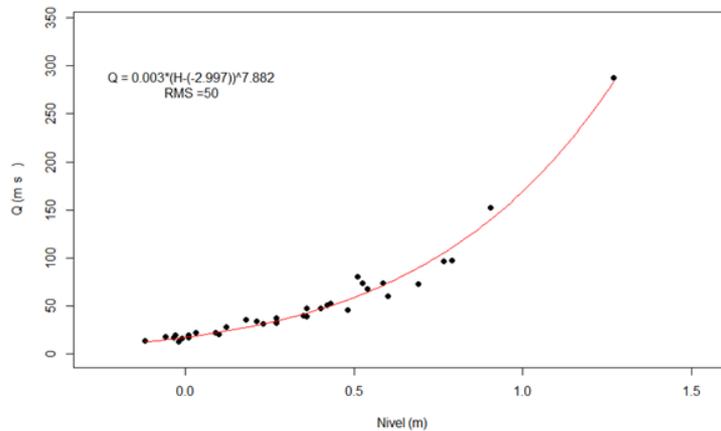
La curva de descarga es esencial para el presente estudio hidrológico, ya que permite determinar los valores de caudal, es decir, la cantidad de agua que circula por una fuente hidrológica mediante un registro de niveles (Alvarado, 2017).

Esta curva representa la relación entre el caudal de un río o canal y la altura del agua en una sección determinada. Es decir, indica la cantidad de agua que pasa por un punto en función de la altura del agua en dicho punto.

Para el diseño de estas curvas, es necesario recopilar información en un punto estratégico que facilite su obtención. La calidad y precisión de la curva dependen directamente de estos datos. Un desarrollo óptimo de la curva requiere la disponibilidad de varios aforos. En la Figura 23 se observa la relación entre la altura y el caudal en una sección determinada del cauce del río, como ejemplo de una curva de descarga obtenida a partir de varios aforos.

Figura 23

Referencia de una curva de descarga.



Nota: Curva de retención hídrica. Fuente: Bardales, 2018.

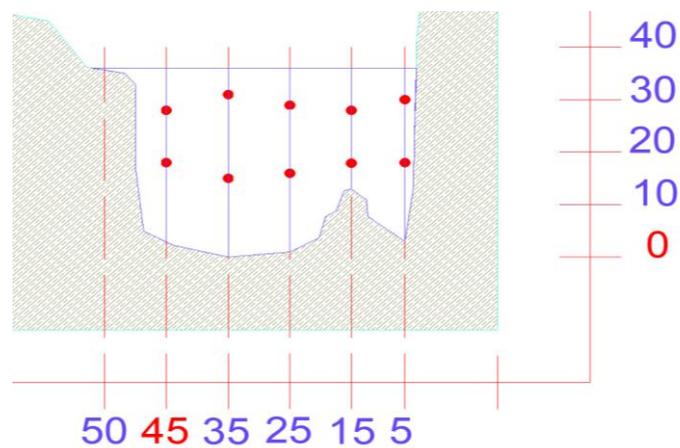
Para la selección del punto de aforamiento, se eligió un sitio donde las irregularidades y la rugosidad del lecho fueran mínimas. Este se ubicó en la parte final de la cuenca de estudio.

En el aforamiento, la sección transversal del arroyo se dividió en cinco partes perpendiculares, separadas por 10 cm entre sí, como se muestra en la Figura 24. Con el caudalímetro electromagnético, se determinaron las velocidades a alturas de 10 cm, 20 cm y 30 cm desde el espejo de agua del arroyo.

En la Figura 24 se observa el dimensionamiento de la sección aforada en el punto de cierre del estudio, siguiendo el procedimiento previamente descrito en la Figura 18.

Figura 24

Sección Aforada.



Nota. Tres Piedras (Fotografía), Elaboración Propia, 2022.

Obtención de caudales de diseño

Los embalses se construyen con el objetivo de regular los periodos de exceso y déficit de caudal. El dimensionamiento de un embalse depende de múltiples factores, como la variación del caudal, la demanda requerida y la eficiencia del embalse para satisfacer dicha demanda.

La capacidad requerida del embalse debe ajustarse considerando el almacenamiento remanente y las pérdidas por infiltración. Para determinar esta capacidad, existen varios métodos; en el presente estudio se empleará el método racional. Este método permite calcular el caudal de diseño, a partir del cual se determina la demanda, y posteriormente se utiliza esta información para estimar el volumen requerido del embalse.

Caudales Máximos

Para garantizar el correcto funcionamiento de las obras de captación ante eventuales crecidas, se ha determinado el caudal máximo en los puntos de captación de las fuentes mencionadas.

El método empleado para la determinación de estos caudales es el “Método Racional”, que se basa en la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{CIA}{K} \quad (31)$$

En donde:

Q = Caudal en m³/s.

I = Intensidad considerada (mm/h)

A = Área de la cuenca en m².

C = Coeficiente de escorrentía superficial.

K = 360, factor de corrección para unidades (m³/s)

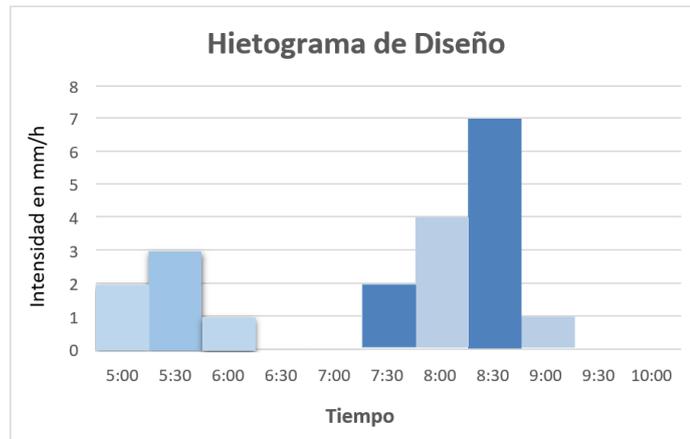
Hietogramas de diseño

Es posible que, para un determinado periodo de retorno y una duración específica, el valor de intensidad obtenido no sea suficiente. Por ello, es necesario conocer la evolución de la precipitación a lo largo de la duración considerada. Un hietograma refleja la distribución de las precipitaciones ocurridas durante el evento, identificando los periodos de mayor intensidad para un periodo de retorno determinado.

Los hietogramas de diseño son modelos simplificados que representan cómo se distribuye la intensidad de la precipitación durante un evento de diseño. Estos se centran en la tasa de precipitación en (mm/h), como se observa en la Figura 25 (Anthony D. L., 2023).

Figura 25

Hietogramas referenciales.



Nota. Hietograma (Fotografía), Elaboración Propia, 2022.

Periodo de diseño

Un periodo de diseño es el lapso durante el cual una infraestructura hidráulica puede funcionar, considerando su vida útil y la demanda hídrica.

La selección del periodo de diseño puede ser compleja, dado que los indicadores de cambio climático sugieren escenarios extremos, lo que implica que las obras podrían requerir mayores inversiones económicas para periodos de retorno elevados.

De acuerdo con la guía metodológica y considerando un riesgo admisible de falla del 26 % y una vida útil de 30 años para la obra, se determina un periodo de retorno de 100 años, para el cual se calculará el caudal máximo necesario para el desarrollo del proyecto en el presente estudio hidrológico.

Coefficiente de escorrentía (C)

El coeficiente de escorrentía representa la fracción del agua de lluvia que efectivamente genera escorrentía superficial una vez que el suelo ha alcanzado su capacidad máxima de saturación. Su valor depende de las características específicas del terreno que determinan la infiltración del agua. Cuando el terreno presenta condiciones variables que

afectan la infiltración —como relieve, vegetación y tipo de suelo—, cada coeficiente de escurrimiento específico debe ponderarse para obtener un valor único representativo de toda el área de la cuenca.

El coeficiente de esorrentía varía según las condiciones de la cuenca: aumenta en suelos más impermeables y disminuye en suelos más permeables. Asimismo, la presencia de vegetación densa reduce el valor del coeficiente, debido a la capacidad de almacenamiento hídrico en la zona radicular y a la mayor evapotranspiración. Para los cálculos del presente estudio se emplearán los valores recomendados en las Tablas 14 y 15.

Tabla 14

Coefficiente de Escorrentía.

Tipo de superficie	Periodo de retorno (años)						
	2	5	10	25	50	100	500
Zonas urbanas							
Asfalto	0,73	0,77	0,81	0,86	0,90	0,95	1,00
Cemento, tejados	0,75	0,80	0,83	0,88	0,92	0,97	1,00
Zonas verdes (céspedes, parques, etc.)							
<i>Condición pobre (cobertura vegetal inferior al 50% de la superficie)</i>							
Pendiente baja (0-2%)	0,32	0,34	0,37	0,40	0,44	0,47	0,58
Pendiente media (2-7%)	0,37	0,40	0,43	0,46	0,49	0,53	0,61
Pendiente alta (> 7%)	0,40	0,43	0,45	0,49	0,52	0,55	0,62
<i>Condición media (cobertura vegetal entre el 50% y el 75% del área)</i>							
Pendiente baja (0-2%)	0,25	0,28	0,30	0,34	0,37	0,41	0,53
Pendiente media (2-7%)	0,33	0,36	0,38	0,42	0,45	0,49	0,58
Pendiente alta (> 7%)	0,37	0,40	0,42	0,46	0,49	0,53	0,60
<i>Condición buena (cobertura vegetal superior al 75%)</i>							
Pendiente baja (0-2%)	0,21	0,23	0,25	0,29	0,32	0,36	0,49
Pendiente media (2-7%)	0,29	0,32	0,35	0,39	0,42	0,46	0,56
Pendiente alta (> 7%)	0,34	0,37	0,40	0,44	0,47	0,51	0,58
Zonas rurales							
Campos de cultivo							
Pendiente baja (0-2%)	0,31	0,34	0,36	0,40	0,43	0,47	0,57
Pendiente media (2-7%)	0,35	0,38	0,41	0,44	0,48	0,51	0,60
Pendiente alta (> 7%)	0,39	0,42	0,44	0,48	0,51	0,54	0,61
Pastizales, prados, dehesas							
Pendiente baja (0-2%)	0,25	0,28	0,30	0,34	0,37	0,41	0,53
Pendiente media (2-7%)	0,33	0,36	0,38	0,42	0,45	0,49	0,58
Pendiente alta (> 7%)	0,37	0,40	0,42	0,46	0,49	0,53	0,60
Bosques, montes arbolados							
Pendiente baja (0-2%)	0,22	0,25	0,28	0,31	0,35	0,39	0,48
Pendiente media (2-7%)	0,31	0,34	0,36	0,40	0,43	0,47	0,56
Pendiente alta (> 7%)	0,35	0,39	0,41	0,45	0,48	0,52	0,58
Nota: Los valores de esta tabla son los utilizados en la ciudad de Austin (Texas, USA) para determinar caudales punta por el método racional en su término municipal.							

Nota: Tablas y coeficientes hidrológicos utilizados en el examen 1.

Fuente: Universidad Nacional Autónoma de Honduras (s. f.).

Tabla 15*Coefficiente de escorrentía.*

Vegetación	Pendiente (%)	Textura del suelo		
		<i>Arenosa</i>	<i>Arcillosa y limosa</i>	<i>Arcilla</i>
<i>Bosques</i>	<i>0-5</i>	<i>0,10</i>	<i>0,30</i>	<i>0,40</i>
	<i>5-10</i>	<i>0,25</i>	<i>0,35</i>	<i>0,50</i>
	<i>10-30</i>	<i>0,30</i>	<i>0,50</i>	<i>0,60</i>
<i>Pastizales</i>	<i>0-5</i>	<i>0,10</i>	<i>0,30</i>	<i>0,40</i>
	<i>5-10</i>	<i>0,16</i>	<i>0,36</i>	<i>0,55</i>
	<i>10-30</i>	<i>0,22</i>	<i>0,42</i>	<i>0,60</i>
<i>Terrenos de cultivo</i>	<i>0-5</i>	<i>0,30</i>	<i>0,50</i>	<i>0,60</i>
	<i>5-10</i>	<i>0,40</i>	<i>0,60</i>	<i>0,70</i>
	<i>10-30</i>	<i>0,52</i>	<i>0,72</i>	<i>0,82</i>

Nota: Tabla reproducida de Velasco-Molina, H. (1991). Las zonas áridas y semiáridas: Sus características y manejo.

En la cuenca de estudio, el uso de suelo es predominantemente de vegetación arbustiva, distribuyéndose en varias áreas dentro de la cuenca. Esta información se puede observar en la Figura 8.

Por otra parte, la textura del suelo en la cuenca comprende principalmente suelos arcillo-arenosos y francos limosos, como se muestra en la Figura 9.

Capítulo 3

Resultados y discusión

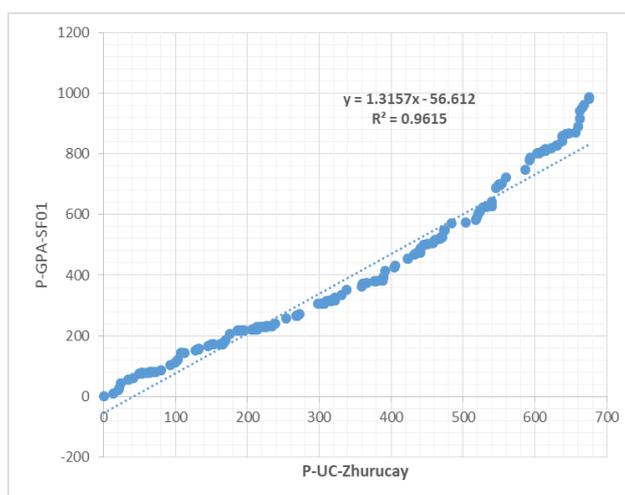
Curva de doble masa

A partir de un año de datos obtenidos con el pluviógrafo instalado in situ y de la información de la estación cercana del Observatorio Ecohidrológico Zhurucay, perteneciente al Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca (P-UC-Zhurucay), se procedió a estimar diez años de información pluviométrica para la cuenca de estudio. Esto se realizó mediante el método de la curva de doble masa y la ecuación obtenida de la regresión lineal.

En la Figura 27 se muestra la corrección de la curva de doble masa: en las ordenadas se representan los datos de la estación in situ con información inconsistente, mientras que en las abscisas se grafica la precipitación anual acumulada de la estación cercana, en este caso Zhurucay.

Figura 26

Ecuación de la Curva de Doble Masa de la estación Tres Piedras y Zhurucay.



Nota. Gráfica (Fotografía), Elaboración Propia, 2022.

Comparación de las curvas IDF de in situ vs precipitación de estaciones cercanas

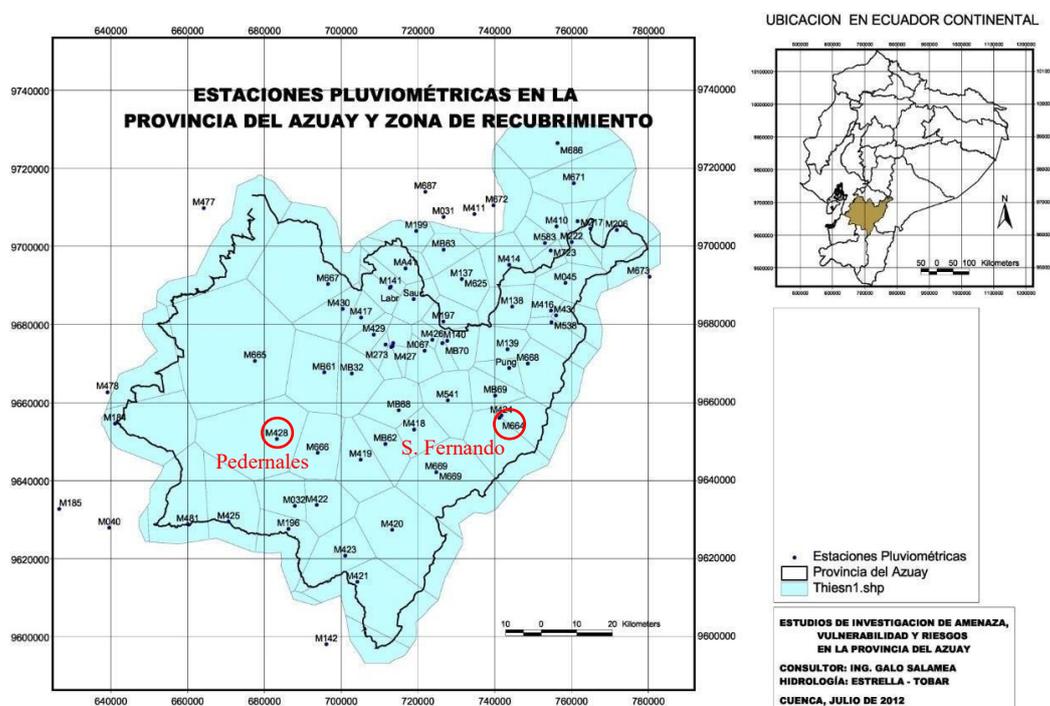
En este apartado se realizará una comparación entre las precipitaciones obtenidas en el presente estudio in situ y la información secundaria proporcionada por la Prefectura del Azuay. Asimismo, se presentarán las curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF) de diseño y los hietogramas de diseño correspondientes. Finalmente, se compararán las precipitaciones registradas en la cuenca de estudio con las de ecosistemas similares, empleando datos de estaciones cercanas.

Estaciones cercanas

La zona de estudio se ubica en la Figura 28, que presenta el mapa de la provincia del Azuay, incluyendo los polígonos de Thiessen correspondientes a las estaciones pluviométricas disponibles.

Figura 27

Estaciones Pluviométricas del Azuay.



Nota. Estudio sobre amenaza, vulnerabilidad y riesgos en la provincia del Azuay, elaborado por Estrella y Tobar (2012).

Las estaciones Pedernales y San Fernando Inecel son las más cercanas a la cuenca de estudio, como se observa en la Figura 28. Con la información obtenida de estas estaciones se elaboró un estudio basado en datos secundarios para la presente cuenca.

Figura 28

Estaciones Pluviométricas de Pedernales y San Fernando y cuenca de Tres Piedras.



Nota. GAD Provincial del Azuay, 2022.

Las cuencas analizadas presentan un régimen bimodal, caracterizado por dos periodos de lluvias intensas a lo largo del año, correspondientes a los meses de febrero a abril y de octubre a diciembre. La precipitación media se determinó mediante el método de ponderación por distancia inversa (IDW), considerando las estaciones meteorológicas más cercanas.

En la Tabla 16 se muestran las precipitaciones medias mensuales de dichas estaciones, la media ponderada obtenida del estudio de información secundaria realizado por la Prefectura del Azuay y la precipitación media registrada in situ.

Además, se utilizó la base de datos pluviométricos mensuales del estudio sobre amenaza, vulnerabilidad y riesgos en la provincia del Azuay, elaborado por Estrella y Tobar

(2012), que recopila información de diversas estaciones ubicadas dentro de la provincia. Para este análisis se emplearon los registros de las estaciones más cercanas y de la estación in situ.

Tabla 16

Precipitación media de estaciones cercanas vs precipitación in situ.

	<i>Ene</i>	<i>Feb</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>May</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Sep</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dic</i>
Pedernales	89,76	126,62	153,29	130,26	80,6	50,8	32,6	30,05	45,74	66,49	68,07	87,29
San Fernando	165,23	207,8	265,79	202,27	105,6	47,21	23,29	22,46	47,17	73,05	90,15	135,96
P. media	97,31	134,74	164,54	137,46	83,1	50,44	31,66	29,29	45,88	67,14	70,28	92,16
Tres Piedras	117,43	156,39	194,54	156,66	89,77	49,48	29,18	27,27	46,26	68,89	76,17	105,14

Nota. Tabla comparativa, Elaboración Propia, 2022.

En la Tabla 17 se muestra las constantes de la ecuación para cada estación.

Tabla 17

Localización geográfica de las estaciones Pedernales y San Fernando.

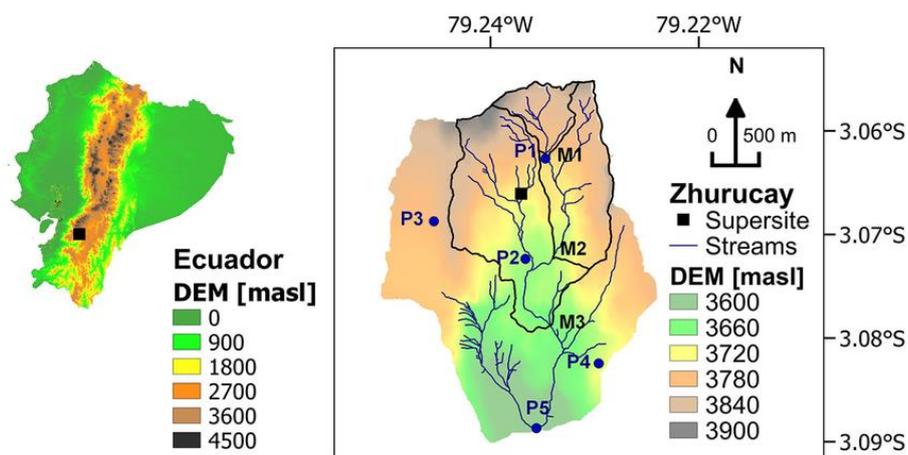
<i>Estación</i>	<i>Código</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>
Pedernales-Azuay	M0428	682403,73	9656413,55	3370
San Fernando	M0664	702988,05	9649621,5	2750
Tres Piedras		687369,34	9655658,02	3639

Nota. Tabla comparativa, Elaboración Propia, 2022.

Por otro lado, la estación del Observatorio Ecohidrológico de Zhurucay se encuentra a 32km de la ciudad de Cuenca, está situado en el páramo húmedo, (condiciones similares a las de Tres Piedras) con un comportamiento similar en cuanto a precipitación, altitud y temperatura. Carrillo-Rojas, G., et al. (2019) Con la data de esta estación, recreamos la curva de Doble Masa con respecto a Tres Piedras como se indica en la Figura 29.

Figura 29

Ubicación de la estación de Zhurucay en el sur del Ecuador.



Nota. Las tres microcuencas dentro del Observatorio Zhurucay están numeradas de M1 a M3, y cinco pluviógrafos están numerados de P1 a P5. Carrillo-Rojas, G., et al. (2019).

En la Tabla 18 se presentan las constantes correspondientes a cada una de las estaciones cercanas a la cuenca de estudio, así como las constantes determinadas para la estación in situ.

Tabla 18

Constantes determinada para cada estación del método ajustado.

<i>Estación</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
Pedernales	823,53	-0,92225844	11,08
San Fernando	829,91	-0,92331242	10,97
<i>Tres Piedras</i>	<i>665,375</i>	<i>-0,999999979</i>	<i>5,29</i>

Nota. Tabla comparativa, Elaboración Propia, 2022.

Una vez determinados los parámetros A, B y C, se representó la ecuación de intensidad utilizando el método de reajuste aplicado a la estación Tres Piedras.

$$I_{TR} = 665[376(t + 5,297)^{-0,999999979}]I_{dTR} \quad (32)$$

En la siguiente ecuación se muestra la ecuación de la curva IDF de la forma general:

$$I_{TR} = \frac{233,75 * I_{dTR}}{0,75} \quad (33)$$

Las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) constituyen una herramienta fundamental para estimar caudales máximos de precipitación y para el diseño de obras hidráulicas. Con las ecuaciones determinadas a partir de la estación en la cuenca de estudio, e procedió a elaborar las curvas IDF. La construcción de estas curvas se realizó mediante la ecuación (4) y la ecuación (16), como se observa en las Figuras 30 y 31.

En la Figura 30 se presentan las curvas IDF siguiendo la forma general propuesta por Aparicio, mientras que en la Figura 31 se muestran las curvas IDF reajustadas según la misma metodología de Aparicio.

En la Tabla 19 se indican las intensidades máximas para cada duración en determinado periodo de diseño.

Tabla 19

Intensidades máximas de la forma general.

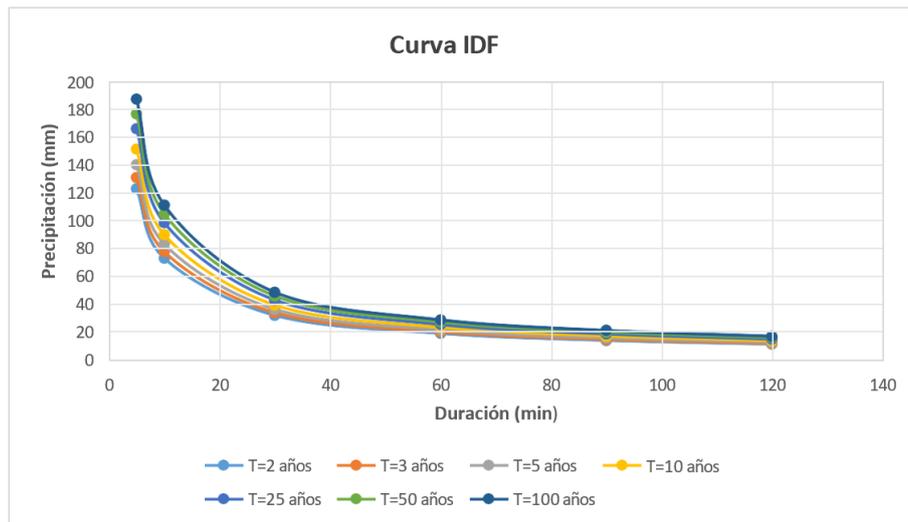
Tr(años)	<i>I (mm/h)</i>					
	5	10	30	60	90	120
2	123,376	73,360	32,182	19,136	14,118	11,378
3	131,535	78,211	34,311	20,401	15,052	12,131
5	140,623	83,615	36,681	21,811	16,092	12,969
10	152,042	90,405	39,660	23,582	17,398	14,022
25	166,470	98,984	43,423	25,820	19,049	15,352
50	177,173	105,348	46,215	27,480	20,274	16,340
100	187,798	111,665	48,987	29,128	21,490	17,319

Nota. Tabla comparativa, Elaboración Propia, 2024.

Las Curvas IDF-Estación in situ formula sin ajuste en la Figura 30, desarrollado mediante las formula no ajustada, $C = 0$.

Figura 30

Curvas IDF-Estación In-Situ formula sin ajuste.



Nota. Gráfica comparativa, Elaboración Propia, 2024.

En la Tabla 20 se indican las intensidades máximas para cada duración en determinado periodo de diseño.

Tabla 20*Intensidades máxima de la forma ajustada.*

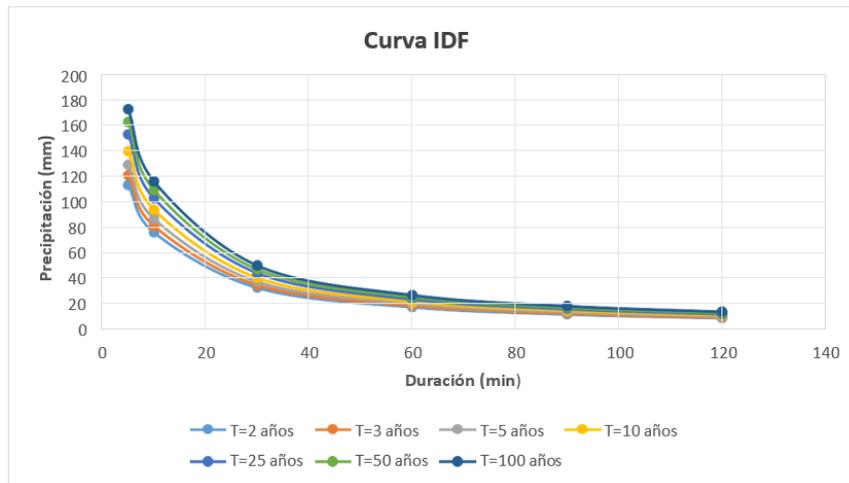
<i>Tr (años)</i>	<i>5</i>	<i>10</i>	<i>30</i>	<i>60</i>	<i>90</i>	<i>120</i>
<i>2</i>	<i>123,376</i>	<i>73,360</i>	<i>32,182</i>	<i>19,136</i>	<i>14,118</i>	<i>11,378</i>
<i>3</i>	<i>131,535</i>	<i>78,211</i>	<i>34,311</i>	<i>20,401</i>	<i>15,052</i>	<i>12,131</i>
<i>5</i>	<i>140,623</i>	<i>83,615</i>	<i>36,681</i>	<i>21,811</i>	<i>16,092</i>	<i>12,969</i>
<i>10</i>	<i>152,042</i>	<i>90,405</i>	<i>39,660</i>	<i>23,582</i>	<i>17,398</i>	<i>14,022</i>
<i>25</i>	<i>166,470</i>	<i>98,984</i>	<i>43,423</i>	<i>25,820</i>	<i>19,049</i>	<i>15,352</i>
<i>50</i>	<i>177,173</i>	<i>105,348</i>	<i>46,215</i>	<i>27,480</i>	<i>20,274</i>	<i>16,340</i>
<i>100</i>	<i>187,798</i>	<i>111,665</i>	<i>48,987</i>	<i>29,128</i>	<i>21,490</i>	<i>17,319</i>

Nota. Tabla comparativa, Elaboración Propia, 2024.

En la Figura 31 se indican las Curvas IDF-Estación Tres Piedras formula ajustada, desarrollado mediante la formula $C \neq 0$.

Figura 31

Curvas IDF-Estación Tres Piedras formula sin ajuste.



Nota. Gráfica comparativa, Elaboración Propia, 2024.

En la Tabla 21 se presentan los valores de intensidad interpolados correspondientes a los tiempos de concentración calculados, considerando los diferentes periodos de retorno.

Tabla 21

Intensidades 24 horas para diferente periodo de retorno.

<i>Intensidad en 24 horas para diferentes TR</i>							
Estación	TR en años						
	2	3	5	10	25	50	100
Pedernales	1,25	1,32	1,41	1,52	1,68	1,8	1,94
San Fernando	2,22	2,46	2,68	2,91	3,13	3,27	3,39
Tres Piedras	1,76	1,88	2,01	2,17	2,38	2,53	2,69

Nota. Tabla comparativa, Elaboración Propia, 2024.

Precipitación y hietogramas de diseño

Para la elaboración de los hietogramas se utilizan las ecuaciones de intensidad de las estaciones cercanas a la cuenca de estudio, junto con la ecuación obtenida in situ en el presente estudio, considerando una influencia del 90% de la estación Pedernales-Azuay y del 10% de la estación San Fernando Inecel.

Las Ecuaciones IDF se presentan a continuación.

Tres Piedras:

$$I_{TR} = 665,38 \times (t + 5,296)^{(-0,999999979)} \times I_{dTR} \quad (34)$$

Pedernales-Azuay

$$I_{TR} = 823,53 \times (t + 11,08)^{(-0,92225844)} \times I_{dTR} \quad (35)$$

San Fernando Inecel:

$$I_{TR} = 829,91 \times (t + 10,97)^{(-0,92331242)} \times I_{dTR} \quad (36)$$

Con estas ecuaciones se obtienen las intensidades de lluvia correspondientes a diferentes duraciones y periodos de retorno (TR). A partir de estas precipitaciones, se desarrolla su distribución temporal. Mediante la Ecuación (34) y las intensidades máximas para 24 horas, presentadas en la Tabla 21, es posible construir las curvas IDF. En la Tabla 22 se muestran las precipitaciones con sus respectivas duraciones para cada periodo de retorno determinado determinadas por la Ecuación (32).

Tabla 22*Intensidades máximas para respectivo año de retorno.*

T	Intensidad mm/h				
	5	10	20	30	60
(años)					
2	123,38	73,36	43,62	32,18	19,14
3	131,54	78,21	46,50	34,31	20,40
5	140,62	83,61	49,72	36,68	21,81
10	152,04	90,40	53,75	39,66	23,58
25	166,47	98,98	58,86	43,42	25,82
50	177,17	105,35	62,64	46,22	27,48
100	187,80	111,67	66,40	48,99	29,13

Nota. Tabla comparativa, Elaboración Propia, 2024.

Los hietogramas se elaboraron mediante el método de los bloques alternos, representando la intensidad de precipitación en función de los intervalos de tiempo y considerando el tiempo de concentración de 26,65 s.

En la Tabla 23 se muestra las precipitaciones mediante las intensidades de lluvia para diferentes duraciones y 2 años de retorno. Además se observa una diferencia de 1,01 mm, atribuida a la variabilidad de la información registrada en cada estación (Tabla 16). Se identifica que las lluvias registradas in situ presentan una alta intensidad, pero de corta duración, en comparación con las registradas

Tabla 23

Precipitaciones Para un Periodo de Retorno de 2 años.

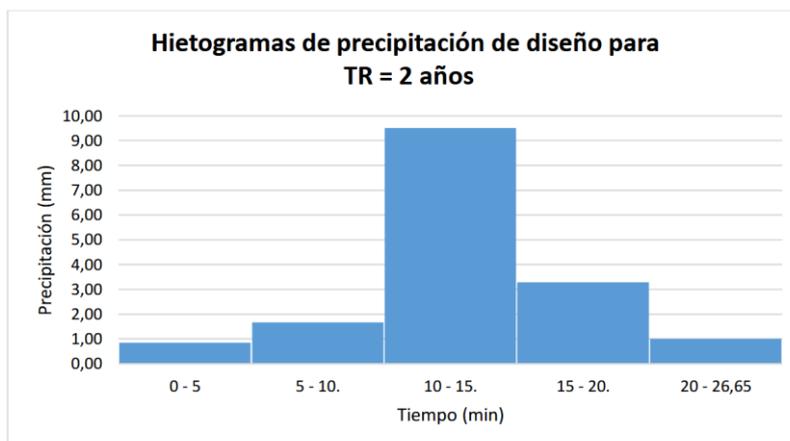
	<i>Tres Piedras</i>	<i>Pedernales-Azuay</i>
Duración (minutos)	Precipitación (mm)	Precipitación (mm)
5	0,85	1,78
10	1,67	2,59
15	9,50	7,15
20	3,29	3,99
26,65	1,01	1,84
Total	16,33	17,34

Nota. Tabla comparativa, Elaboración Propia, 2024.

El Hietograma (Figura 32) de diseño para un periodo de retorno de 2 años con el tiempo de concentración $T_c = 26,65$ min.

Figura 32

Hietograma de diseño para un periodo de retorno de 2 años.



Nota. Gráfica comparativa, Elaboración Propia, 2024.

En la Tabla 24 se muestra las precipitaciones mediante las intensidades de lluvia para diferentes duraciones y 3 años de retorno. Además se observa una diferencia de 1,07 mm, atribuida a la variabilidad de la información registrada en cada estación. Se identifica que las lluvias registradas in situ presentan una alta intensidad, pero de corta duración, en comparación con las registradas en la estación de Pedernales.

Tabla 24

Precipitaciones Para un Periodo de Retorno de 3 años.

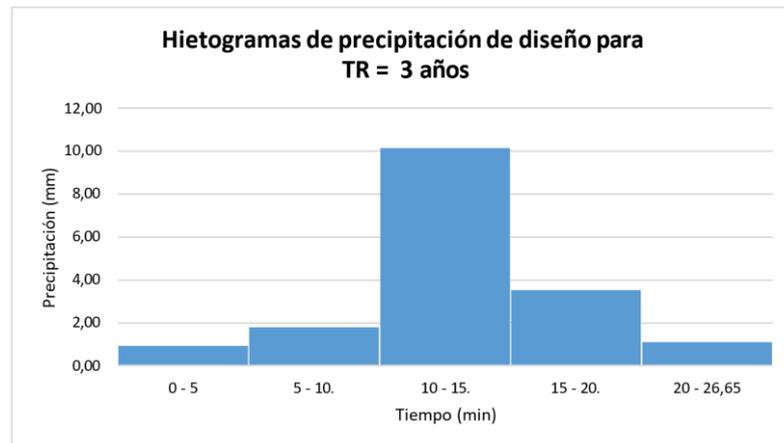
	<i>Tres Piedras</i>	<i>Pedernales-Azuay</i>
Duración (minutos)	Precipitación (mm)	Precipitación (mm)
5	0,91	1,89
10	1,78	2,75
15	10,12	7,61
20	3,51	4,24
26,65	1,08	1,96
Total	17,39	18,46

Nota. Tabla comparativa, Elaboración Propia, 2024.

El Hietograma (Figura 33) de diseño para un periodo de retorno de 3 años con el tiempo de concentración $T_c = 26,65$ min.

Figura 33

Hietograma de diseño para un periodo de retorno de 3 años.



Nota. Gráfica comparativa, Elaboración Propia, 2024.

En la Tabla 25 se muestra las precipitaciones mediante las intensidades de lluvia para diferentes duraciones y 5 años de retorno. Se observa una diferencia de 1,19 mm, atribuida a la variabilidad de la información registrada en cada estación. Se identifica que las lluvias registradas in situ presentan una alta intensidad, pero de corta duración, en comparación con las registradas en la estación de Pedernales.

Tabla 25

Precipitaciones Para un Periodo de Retorno de 5 años.

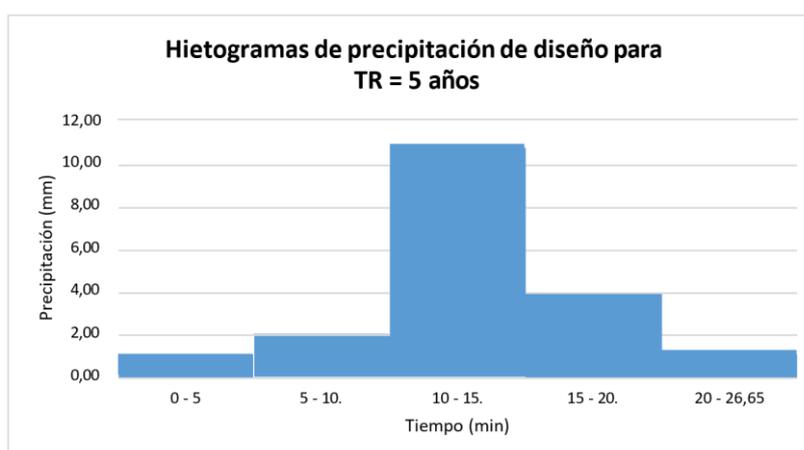
	<i>Tres Piedras</i>	<i>Pedernales-Azuay</i>
Duración (minutos)	Precipitación (mm)	Precipitación (mm)
5	0,97	2,03
10	1,90	2,95
15	10,82	8,16
20	3,75	4,55
26,65	1,15	2,10
Total	18,59	19,78

Nota. Tabla comparativa, Elaboración Propia, 2024.

En la Figura 34 se muestra las precipitaciones mediante las intensidades de lluvia para diferentes duraciones y 5 años de retorno.

Figura 34

Hietograma de diseño para un periodo de retorno de 5 años.



Nota. Gráfica comparativa, Elaboración Propia, 2024.

En la Tabla 26 se muestra las precipitaciones mediante las intensidades de lluvia para diferentes duraciones y 50 años de retorno. Además se observa una diferencia de 3,98 mm, atribuida a la variabilidad de la información registrada en cada estación. Se identifica que las lluvias registradas in situ presentan una alta intensidad, pero de corta duración, en comparación con las registradas en la estación de Pedernales.

Tabla 26

Precipitaciones Para un Periodo de Retorno de 50 años.

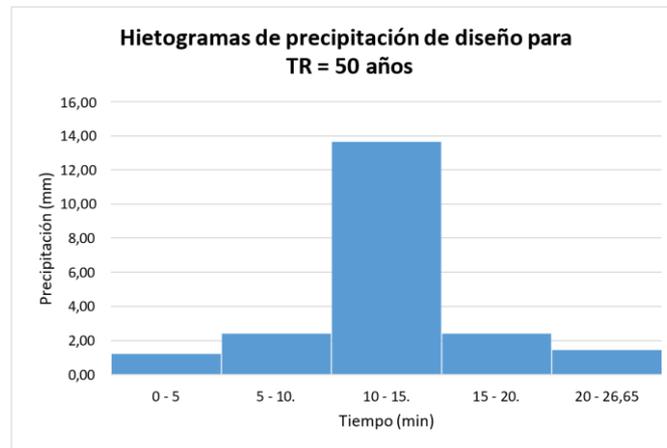
	<i>Tres Piedras</i>	<i>Pedernales-Azuay</i>
Duración (minutos)	Precipitación (mm)	Precipitación (mm)
5	1,22	2,57
10	2,39	3,74
15	13,62	10,33
20	2,39	5,76
26,65	1,45	2,66
Total	21,08	25,06

Nota. Tabla comparativa, Elaboración Propia, 2024.

El Hietograma (Figura 35) de diseño para un periodo de retorno de 50 años con el tiempo de concentración $T_c = 26,65$ min.

Figura 35

Hietograma de diseño para un periodo de retorno de 50 años.



Nota. Gráfica comparativa, Elaboración Propia, 2024.

En la Tabla 27 se muestra las precipitaciones mediante las intensidades de lluvia para diferentes duraciones y 100 años de retorno. Además se observa una diferencia de 1,94 mm, atribuida a la variabilidad de la información registrada en cada estación. Se identifica que las lluvias registradas in situ presentan una alta intensidad, pero de corta duración, en comparación con las registradas en la estación de Pedernales.

Tabla 27

Precipitaciones Para un Periodo de Retorno de 100 años.

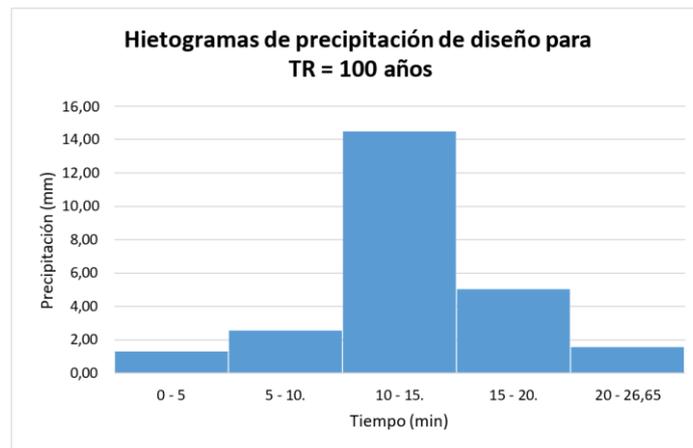
	<i>Tres Piedras</i>	<i>Pedernales-Azuay</i>
Duración (minutos)	Precipitación (mm)	Precipitación (mm)
5	1,30	2,75
10	2,54	4,01
15	14,49	11,06
20	5,02	6,17
26,65	1,54	2,85
Total	24,89	26,83

Nota. Tabla comparativa, Elaboración Propia, 2024.

El Hietograma (Figura 36) de diseño para un periodo de retorno de 100 años con el tiempo de concentración $T_c = 26,65$ min.

Figura 36

Hietograma de diseño para un periodo de retorno de 100 años.



Nota. Gráfica comparativa, Elaboración Propia, 2024.

Intensidades de pluviógrafos localizados en ecosistemas similares

En el siguiente esquema se realiza una comparación de las intensidades máximas registradas por diferentes estaciones meteorológicas. Posteriormente, se incorpora la estación CHALUD, que presenta un ecosistema similar al de la cuenca de estudio, junto con las estaciones consideradas en el análisis de información secundaria. Esta comparación permite verificar la fiabilidad de los datos obtenidos in situ (Rojas, 2023, p. 63).

En la Tabla 28 se indican Intensidades para diferentes periodos de retorno con su duración de Chanlud vs Tres Piedras, Pedernales y San Fernando.

Tabla 28

Intensidades.

TR (años)	Duración (min)	Chanlud	Tres Piedras	Pedernales Azuay	San Fernando Inecel
		Intensidad Max. (mm/h)	Intensidad Max. (mm/h)	Intensidad Max. (mm/h)	Intensida d Max. (mm/h)
5	5	54,95	140,62	92,88	90,62
5	10	45,73	83,61	72,36	70,47
5	20	38,54	49,72	50,58	49,16
5	30	26,49	36,68	39,11	37,97
5	40	24,98	29,56	31,99	31,04
5	50	21,72	25,01	27,13	26,30
5	60	17,8	21,81	23,59	22,86
5	120	10,23	12,97	13,41	12,98
10	5	58,84	152,04	100,13	97,69
10	10	49,25	90,40	78,00	75,97
10	20	42,27	53,75	54,53	53,00
10	30	28,61	39,66	42,16	40,93
10	40	27,85	31,96	34,48	33,46
10	50	25,18	27,04	29,24	28,36
10	60	19,61	23,58	25,43	24,65

10	120	11,22	14,02	14,46	14,00
20	5	62,57	163,00	110,67	107,97
20	10	52,63	96,92	86,21	83,96
20	20	45,85	57,63	60,27	58,58
20	30	30,64	42,52	46,60	45,24
20	40	30,6	34,27	38,11	36,98
20	50	26,54	28,99	32,32	31,34

Nota. Tabla comparativa, Elaboración Propia, 2024.

En la Tabla 29 se presenta el promedio de precipitaciones de diferentes estaciones pluviométricas con ecosistemas similares, en comparación con la precipitación promedio de la cuenca de estudio. Las estaciones consideradas son las siguientes:

- Chanlud, ubicada al norte de la parroquia Checa, cantón Cuenca, con una elevación de 3845 msnm (Rojas, 2023).
- El Labrador, situada entre el límite de las parroquias Chiquintad y Checa, con una elevación de 3426 msnm (Saquisilí, 2019).
- Piscícola Chirimachay, ubicada en la parroquia Sayausí, cantón Cuenca, con una elevación de 3350 msnm (Iván, 2014).
- Estación Surucucho, ubicada en la parroquia Sayausí, cantón Cuenca, con una elevación de 3060 msnm (Picón & Estrella, 2022).

Tabla 29*Promedio mensual de precipitación de cada estación.*

	<i>Ene</i>	<i>Feb</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>May</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Sep</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dic</i>	<i>Acumulado</i>
Tres Piedras	117,43	156,39	132,61	156,66	89,77	49,48	29,18	27,27	46,26	68,89	76,17	105,14	1055,26
Chanlud	120,0	125,0	100,0	160,0	140,0	125,0	125,0	95,0	95,0	120,0	120,0	115,0	1440,00
Chirimachay	405,3	974,1	741	895,9	542	409	293	239	265	272	272	527	5836,33
Labrador	100,0	115,0	135,0	145,0	120,0	100	95,0	70,0	80,0	105,0	100,0	95,0	1260,00
Surucucho	284,8	449,9	494,3	411,3	228	55,5	21,7	33,4	47,9	136	178	231,7	2572,36

Nota. Tabla comparativa, Elaboración Propia, 2024.

Comparación de caudales de diseño con respecto a los caudales máximos registrados

Caudales de diseño

Con el período de diseño de 100 años determinado previamente, se procede a calcular el caudal de diseño utilizando el método racional.

Precipitación

En la Tabla 30 se presentan las intensidades obtenidas a partir de los hietogramas de diseño para una duración equivalente al tiempo de concentración, calculado con un valor de 26,5 minutos, junto con las intensidades obtenidas del estudio con información secundaria.

Tabla 30*Precipitaciones de Diseño.*

	<i>Intensidad para el área de aporte</i>				
Periodo de retorno (años)	5	10	25	50	100
Tres Piedras (mm/s)	1,01	1,08	1,15	1,45	1,54
Estudio secundario (mm/s)	1,84	1,96	2,10	2,66	2,85

Nota. Tabla comparativa, Elaboración Propia, 2024.

Coefficiente de escorrentía

Este coeficiente adimensional permite determinar la fracción de lluvia que se convierte en escorrentía superficial una vez que el suelo está saturado. Mediante las Tablas 14 y 15 se puede estimar el coeficiente de escorrentía.

En este sentido, se han seleccionado los siguientes valores de coeficiente de escorrentía (C):

i) Para zonas verdes con buenas condiciones y un periodo de retorno de 100 años, se adopta un valor $C = 0,58$.

ii) Para pastizales con pendientes del 10–30% y textura arcillosa-limosa, se adopta un valor $C = 0,42$.

Para el cálculo se ha considerado un valor promedio, obteniéndose $C = 0,5$.

El periodo de retorno se define según el grado de seguridad requerido en función del tipo de obra. En el caso de sistemas de riego, un periodo de retorno de 100 años es suficiente para garantizar la estabilidad de las obras de captación. Además se observa los caudales de diseño con información in situ, obtenidos mediante las precipitaciones de la Tabla 30 por el

método racional. Se presenta los caudales determinados con información secundaria de cada estación.

En la Tabla 31 se indica el caudal máximo diseñado para un periodo de retorno de 100 años, utilizando información de un año in situ en la cuenca de estudio Tres Piedras, ubicada en el cantón San Fernando, es de 0,295 m³/s.

Tabla 31

Caudales de diseño para con su respectivo año de retorno.

<i>Periodo de retorno (años)</i>	<i>5</i>	<i>10</i>	<i>25</i>	<i>50</i>	<i>100</i>
Tres Piedras Q (m³/s)	0,194	0,206	0,221	0,278	0,295
Pedernales Q (m³/s)	0,289	0,306	0,328	0,412	0,441
San Fernando Q(m³)	0,200	0,212	0,226	0,284	0,304

Nota. Tabla comparativa, Elaboración Propia, 2024.

Disponibilidad hídrica para el embalse Tres Piedras

En este punto se determinará la curva de descarga de la cuenca de estudio, construida a partir de once aforamientos realizados. Se presentarán los niveles medios y máximos registrados mediante el sensor de presión instalado in situ, con los cuales se calcularán los caudales medios diarios y los caudales máximos.

Asimismo, se realizará un análisis del tiempo de concentración determinado, basado en la observación de los niveles registrados y el tiempo medido en la estación, con el objetivo de evaluar la respuesta hidrológica de la cuenca ante eventos de precipitación.

Curva de descarga

La cantidad de aforos realizados es fundamental para lograr una calibración precisa de la curva de nivel. En la Tabla 32 se presentan los diferentes aforamientos efectuados, indicando las distintas alturas o niveles de agua y sus respectivos caudales correspondientes.

Tabla 32

Aforamientos con sus respectivos niveles.

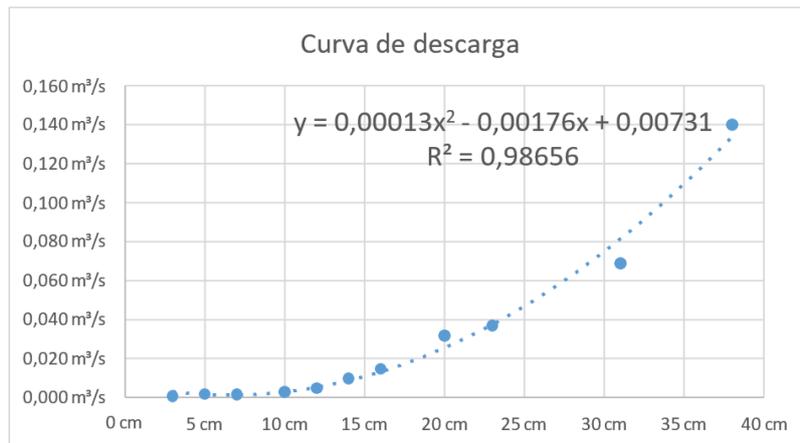
<i>Número de aforos</i>	<i>Q (m³/s)</i>	<i>Nivel (m)</i>
1	0,001	0,3
2	0,002	0,5
3	0,002	0,7
4	0,003	0,10
5	0,005	0,12
6	0,010	0,14
7	0,015	0,16
8	0,032	0,20
9	0,037	0,23
10	0,069	0,31
11	0,140	0,38

Nota. Tabla comparativa, Elaboración Propia, 2024

A partir de los datos recopilados en la Tabla 32, se utilizó una hoja electrónica en Excel para determinar la curva de descarga de la cuenca de estudio. El resultado obtenido se presenta en la Figura 37.

Figura 37

Ecuación de la Curva de Descarga.



Nota. Gráfica comparativa, Elaboración Propia, 2024.

Comparación de caudales de diseño con respecto a los caudales máximos registrados.

Con la información de un año de registro obtenida por el pluviógrafo marca Davis y mediante los procedimientos matemáticos correspondientes, se procedió a calcular los caudales generados por las intensidades de lluvia en la cuenca de estudio. De esta manera, se determinaron los caudales registrados en la cuenca de aporte, cumpliendo con los objetivos del presente estudio.

Recopilación de alturas registrada por el medidor de presiones Hero Instruments.

Con los registros de niveles de altura del agua obtenidos del instrumento mostrado en la Figura 19, se procedió a extraer la información recopilada durante un periodo de un año, como se ilustra en la Figura 38.

Figura 38

Niveles de Caudal de 365 días.



Nota. Gráfica comparativa, Elaboración Propia, 2024.

Obtener un registro de caudales máximos es fundamental para los objetivos del presente estudio. Para ello, se contará con los registros de alturas máximas obtenidas mediante el sensor de presión Heron Instruments, como se muestra en la Figura 39.

Figura 39

Niveles de alturas diarios máximas registradas por un año.



Nota. Gráfica comparativa, Elaboración Propia, 2024.

Caudales promedio diario registrados

Con los niveles de agua registrados en el afluente hídrico de la cuenca de estudio (Figura 34), mediante el medidor de presiones Heron Instruments, se calcularon los promedios de los niveles de agua registrados cada 15 minutos para obtener un nivel promedio diario. Posteriormente, utilizando la Curva de Descarga (Figura 36), se determinó el caudal promedio diario.

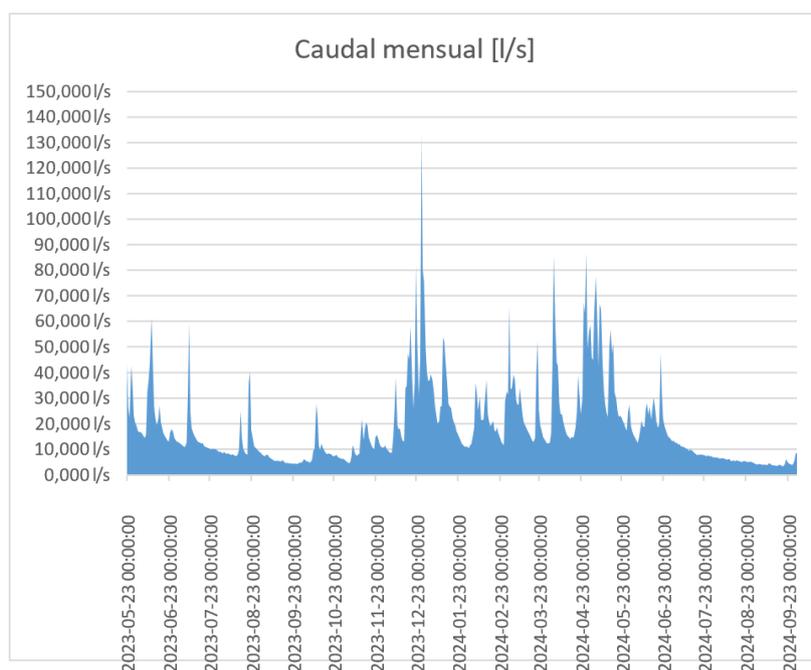
En la Figura 39 se indica el registro de promedios diarios de caudales en la cuenca de estudio, se presenta un caudal máximo diario de 0,133 l/s, un caudal mínimo diario de 0,0034 l/s y un caudal promedio de 19,766 l/s.

Caudales máximos instantáneos

Mediante el registro de los niveles de agua obtenidos cada 15 minutos por el medidor de presión, se utilizó el nivel máximo diario (Figura 36) junto con la curva de descarga (Figura 36) para determinar los caudales máximos diarios, además Registro de caudales máximos instantáneos. Se presenta un caudal máximo de los caudales máximos diarios de 222,57 l/s. y un caudal mínimo del máximo diario de 16,82 l/s, los cuales se presentan en la Figura 40.

Figura 40

Caudal mensual.



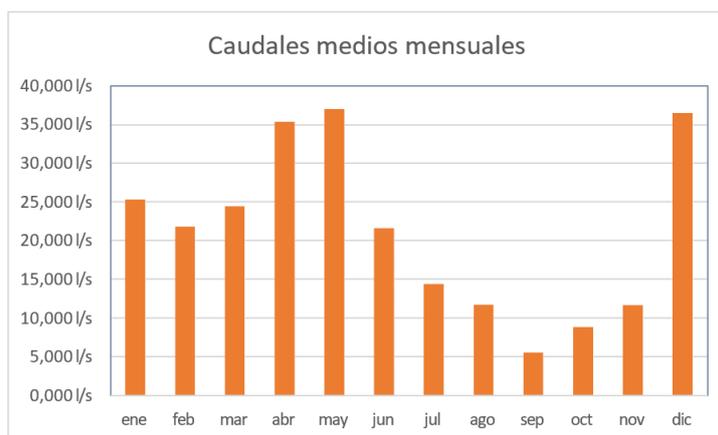
Nota. Gráfica comparativa, Elaboración Propia, 2024.

Régimen de caudales medios mensuales

En la Figura 41 se presenta el promedio mensual de caudales registrados durante un año de recopilación de información.

Figura 41

Promedio mensual de caudales en un año.



Nota. Gráfica comparativa, Elaboración Propia, 2024.

En la Tabla 33 se indica numéricamente los caudales promedios mensuales de las diferentes estaciones.

Tabla 33*Régimen de caudales medios mensuales.*

<i>Régimen Caudales Tres Piedras (l/s)</i>												
Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Tres Piedras	49,13	39,57	47,44	66,33	71,72	40,60	27,99	22,81	10,46	16,65	21,98	70,73
Pedernales	25,75	44,81	56	56,76	39,11	23,81	12,35	7,30	5,74	5,49	10,28	19,48
San Fernando	17,97	30,26	37,66	37,59	25,78	15,83	8,49	5,37	4,74	5,01	7,99	14,02

Nota. Tabla comparativa, Elaboración Propia, 2024.

Comparación del tiempo de concentración determinado con el tiempo de concentración registrado por los niveles de agua.

En este punto se verifica el tiempo de concentración obtenido ($T_c = 26,65$ min) con los valores registrados mediante los niveles del afluente. El tiempo de concentración representa el lapso que tarda la gota de agua más alejada en salir de la cuenca.

El medidor de presiones Heron Instruments registró información cada 15 minutos, lo que permite aproximar el tiempo de concentración a partir de los datos obtenidos. En la Figura 42 se observa que el nivel máximo, correspondiente a la intensidad máxima registrada durante el año, se alcanza aproximadamente a los 30 minutos.

Figura 42

Nivel 1 de agua máxima registrado en aproximadamente 30 min.



Nota. Gráfica comparativa, Elaboración Propia, 2024.

Para realizar esta comparación, es fundamental considerar dos aspectos principales. Primero, que la precipitación ocurra sobre el área total de la cuenca; y segundo, que dicha precipitación sea aproximadamente constante durante su duración y que esta duración sea mayor que el tiempo de concentración. En la Tabla 34 se presenta un tiempo de precipitación de una hora.

Tabla 34

Registro de precipitación.

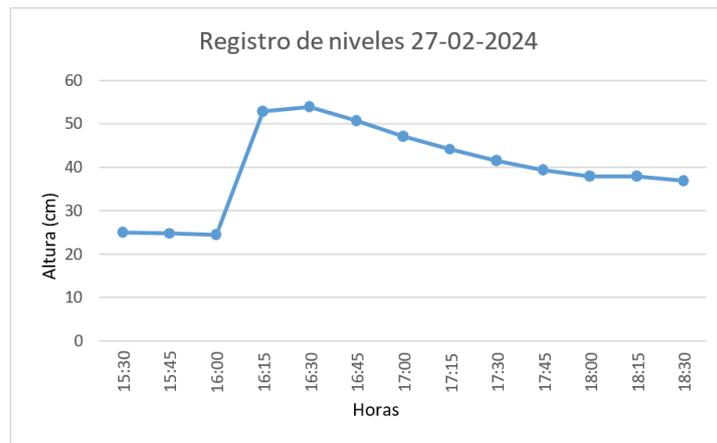
<i>Formato 24 horas</i>		<i>Hora de registro</i>	<i>Precipitación (mm)</i>
Fechas	prc mm/hr	16:10	1
27/2/2024 12:00	0,8	16:20	2,4
27/2/2024 13:00	4,6	16:30	2,6
27/2/2024 14:00	0,2	16:40	3,8
27/2/2024 16:00	14,4	16:50	2
27/2/2024 17:00	2,6	17:00	2,6

Nota. Tabla comparativa, Elaboración Propia, 2024.

En la Figura 43 se ilustra el aumento de los niveles en un tiempo aproximado de 30 minutos, con una precipitación constante en toda la cuenca de estudio. Por lo tanto, se puede estimar que su tiempo de concentración tiende a 30 minutos registrados, valor que se aproxima a los 26,65 minutos determinados mediante las fórmulas.

Figura 43

Nivel 2 de agua máxima registrado en aproximadamente 30 min.



Nota. Gráfica comparativa, Elaboración Propia, 2024.

Disponibilidad de almacenamiento ($P - E_{To} - Q$)

El cálculo de la disponibilidad de agua para su almacenamiento en un sistema hidráulico se basa en diferentes métodos, como el Balance Hídrico Simplificado, Penman-Monteith, Curvas de Retención de Agua y la Simulación de Modelos Hidrológicos. En el presente estudio se aplicó el método de Thornthwaite, el cual utiliza las variables de precipitación, evapotranspiración y caudal. Este método es particularmente útil porque permite estimar la evapotranspiración potencial y determinar la disponibilidad real y final del recurso hídrico.

Los datos considerados corresponden al periodo comprendido entre los años 2023 y 2024, reportando un total acumulado anual de 501,09 mm, lo que representa un dinamismo significativo del recurso hídrico disponible para su captación y regulación.

Se utilizó la siguiente fórmula expresada en (mm):

$$\text{Disponibilidad} = P - ET_o - Q \quad (37)$$

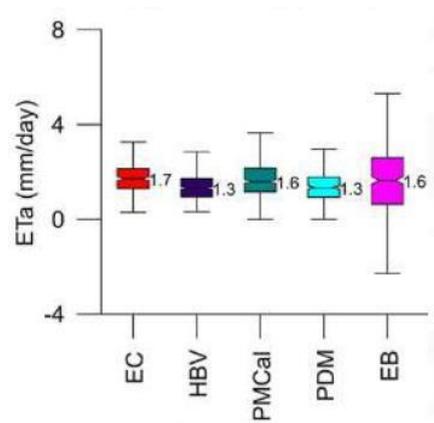
Los valores de evapotranspiración en ecosistemas de páramo alto andino varían entre 1,3 mm/día y 1,7 mm/día, según los registros de la estación meteorológica Zhurucay. En dicha estación se obtuvo un promedio de evapotranspiración actual (Eta) comprendido entre 1,5 mm/día y 1,7 mm/día (Ochoa-Sánchez et al., 2019). En el presente estudio se consideró una evapotranspiración potencial (Eto) de 1,7 mm/día, debido a las condiciones climáticas actuales influenciadas por el cambio climático, las cuales se evidenciaron en campo con periodos de estiaje característicos del Fenómeno de El Niño. Además, esta elección se justifica por la similitud entre el ecosistema de la cuenca de estudio y el ecosistema de Zhurucay.

Los métodos empleados por Ochoa-Sánchez et al. (2019) para la estimación de la evapotranspiración corresponden a Eddy-Covariance (EC), Lisímetros Volumétricos (Lys), Balance de Agua (WB), Balance de Energía (EB), la ecuación calibrada de Penman-Monteith (PMCal) y los modelos hidrológicos de distribución de probabilidad (PDM) y Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning (HBV-light).

En la Figura 44 se visualiza la evapotranspiración real diaria medida por el método Eddy- Covariance (EC) y estimada por los modelos HBV-light y PDM. (Ochoa-Sánchez et al., 2019)

Figura 44

Diferentes Evapotranspiraciones



Nota. Tomado de Ochoa-Sánchez et al. (2019).

En la fórmula de Thornthwaite, el resultado se expresa como una lámina de agua en milímetros (mm), la cual representa la altura de agua disponible sobre una superficie de un metro cuadrado (1 m²). Este valor indica la cantidad de agua equivalente que puede almacenarse, infiltrarse o evaporarse en dicha superficie, constituyendo una medida directa del balance hídrico en términos de profundidad de agua.

En la Tabla 35 se indican el almacenamiento mensual y total anual.

Tabla 35

Almacenamiento mensual y total anual disponible.

<i>Mes</i>	<i>Caudal (Q)</i>
May-23	15,67 mm
Jun-23	40,60 mm
Jul-23	27,99 mm
Ago-23	22,81 mm
Sep-23	10,46 mm
Oct-23	16,65 mm
Nov-23	21,98 mm
Dic-23	70,13 mm
Ene-24	49,13 mm
Feb-24	39,57 mm
Mar-24	47,44 mm
Abr-24	66,33 mm
May-24	71,72 mm

Nota. Tabla comparativa, Elaboración Propia, 2024.

Volúmenes disponibles para el diseño del embalse

Para transformar el caudal de metros cúbicos por segundo (m^3/s) a milímetros (mm) se procedió de la siguiente manera:

$$V = Q \cdot t \quad (38)$$

El volumen [m³] es igual a caudal (m³/s) * tiempo (s) * 1 000.

$$P = \left(\frac{V}{A}\right) * 1000 \quad (39)$$

La precipitación (mm) es igual al volumen (m³) dividido para el área (m²) y ello multiplicado por 1 000 porque la fórmula divide (m³/ m²) y ello entrega (m) por ende se transforma en (mm).

$$Lámina \sim [mm] = \frac{Q \sim \left[\frac{m^3}{s}\right] * t \sim [s]}{A \sim [m^2]} * 1000 \quad (40)$$

La fórmula de obtención al final considerará 86 400 segundos de un periodo de 24 horas y 1 380 000 m² del área de la cuenca.

Análisis de eventos lluviosos y determinación de CE Coeficiente de Escorrentía

El coeficiente de escorrentía se calculó con la siguiente fórmula:

$$CE = Q / Pcr \quad (41)$$

En la Tabla 36 se determinó el CE de todos los meses investigados.

Tabla 36*CE mensual.*

<i>Mes</i>	<i>Caudal (Q)</i>	<i>Pcr</i>	<i>CE</i>
May-23	15,67 mm	22,20 mm	0,71
Jun-23	40,60 mm	88,80 mm	0,46
Jul-23	27,99 mm	112,40 mm	0,25
Ago-23	22,81 mm	106,00 mm	0,22
Sep-23	10,46 mm	82,85 mm	0,13
Oct-23	16,65 mm	89,60 mm	0,19
Nov-23	21,98 mm	91,25 mm	0,24
Dic-23	70,73 mm	93,70 mm	0,75
Ene-24	49,13 mm	71,00 mm	0,69
Feb-24	39,57 mm	153,40 mm	0,26
Mar-24	47,44 mm	135,60 mm	0,35
Abr-24	66,33 mm	278,20 mm	0,24
May-24	71,72 mm	215,80 mm	0,33

Nota. Tabla comparativa, Elaboración Propia, 2024.

Los coeficientes de escorrentía (CE) obtenidos varían entre 0,22 y 0,75, evidenciando una marcada variabilidad en la respuesta hidrológica del terreno frente a los eventos de precipitación. Este rango se encuentra directamente influenciado por factores físicos como la

pendiente, la textura del suelo, el uso y cobertura del suelo, así como por la presencia de cuerpos de agua, especialmente humedales.

Durante los meses más lluviosos, los CE oscilaron entre 0,24 y 0,35, lo que indica que entre el 24% y el 35% de la precipitación mensual se transformó en escorrentía superficial. Este comportamiento confirma la existencia de cuatro humedales dentro del área de estudio, uno de los cuales corresponde al sitio previsto para la construcción del reservorio de almacenamiento.

El incremento de los CE se asocia con la saturación progresiva de los suelos en las épocas lluviosas y con la función de retención natural ejercida por los humedales presentes in situ. Este aspecto resulta relevante para la planificación del uso del suelo, la conservación de la cuenca y la gestión de captaciones hídricas.

Asimismo, se identificó que el mes de diciembre presentó la mayor precipitación registrada, mientras que los meses comprendidos entre febrero y mayo concentraron los mayores aportes al almacenamiento hídrico, constituyendo el periodo de mayor interés para el aprovechamiento del recurso.

En la Tabla 37 se indican el almacenamiento de los meses más lluviosos, generando un total de 225,07 mm.

Tabla 37*Almacenamiento de los meses más lluviosos.*

<i>Meses más lluviosos</i>	
Feb-24	39,57 mm
Mar-24	47,44 mm
Abr-24	66,33 mm
May-24	71,72 mm
Total	225,07 mm

Nota. Tabla comparativa, Elaboración Propia, 2024.

Este valor corresponde al 44,91% del total anual almacenado, lo que evidencia que casi la mitad del recurso hídrico disponible se concentra en un tercio del año. Este comportamiento hidrológico resalta la necesidad de aprovechar el pico de aportes comprendido entre los meses de febrero y mayo como base para el diseño hidráulico de las obras de captación y almacenamiento.

Se observa una marcada estacionalidad en la precipitación, por lo que resulta esencial implementar un sistema eficiente de almacenamiento, regulación y distribución del agua, acompañado de una planificación territorial y de gestión hídrica adecuada, que garantice la disponibilidad del recurso durante los meses de menor precipitación.

El caudal promedio resultante de los registros obtenidos se presenta en la Tabla 38:

Tabla 38

Volumen mensual disponible para almacenar.

Caudal Promedio mensual del periodo	0,019 m ³ /s
Caudal Promedio mensual de los meses más lluviosos	0,029 m ³ /s

Nota. Tabla comparativa, Elaboración Propia, 2024.

Volumen disponible

Para determinar el volumen promedio de agua que se podrá almacenar en el reservorio a partir del total obtenido del caudal:

$$Volumen (m^3) = Caudal (mm) * \text{Área} (m^2) \quad (42)$$

En la Tabla 39 se indican los volúmenes calculados de los meses más lluviosos.

Tabla 39*Volumen mensual y de los meses más lluviosos disponible para almacenar.*

<i>Fecha</i>	<i>Caudal (Q)</i>	<i>Caudal (Q)</i>	<i>Volumen</i>
May-23	15,67 mm	0,0278 m ³ /s	21 624,60 m ³
Jun-23	40,60 mm	0,0216 m ³ /s	56 028,00 m ³
Jul-23	27,99 mm	0,0144 m ³ /s	38 626,20 m ³
Ago-23	22,81 mm	0,0118 m ³ /s	31 477,80 m ³
Sep-23	10,46 mm	0,0056 m ³ /s	14 434,80 m ³
Oct-23	16,65 mm	0,0089 m ³ /s	22 977,00 m ³
Nov-23	21,98 mm	0,0117 m ³ /s	30 332,40 m ³
Dic-23	70,73 mm	0,0364 m ³ /s	97 607,40 m ³
Ene-24	49,13 mm	0,0253 m ³ /s	67 799,40 m ³
Feb-24	39,57 mm	0,0218 m ³ /s	54 606,60 m³
Mar-24	47,44 mm	0,0244 m ³ /s	65 467,20 m³
Abr-24	66,33 mm	0,0353 m ³ /s	91 535,40 m³
May-24	71,72 mm	0,0370 m ³ /s	98 973,60 m³
Total			691 490,40 m³

Nota. Tabla comparativa, Elaboración Propia, 2024.

El volumen total anual de agua que puede almacenarse asciende a 691 490,40 m³, mientras que el volumen correspondiente a los meses más lluviosos alcanza 310 582,80 m³. Sin embargo, estos valores representan el rendimiento hídrico total de la microcuenca, por lo

que es necesario considerar el caudal ecológico, entendido como el flujo mínimo indispensable para mantener el equilibrio de los ecosistemas acuáticos y ribereños.

En el contexto andino, y específicamente en Ecuador, la normativa ambiental establece que el caudal ecológico debe reservar entre el 30% y el 35% del caudal total disponible, con el fin de preservar las funciones ecológicas del sistema hídrico.

De acuerdo con este criterio, el caudal ecológico equivalente al 35% corresponde a 449 468,76 m³ anuales, y a 201 878,82 m³ durante los meses más lluviosos, garantizando así la sostenibilidad ambiental y la funcionalidad natural del río. En la Tabla 40 se pueden visualizar los demás datos calculados.

Tabla 40

Volumen mensual y de los meses más lluviosos disponible para almacenar luego del caudal hidrológico.

<i>Fecha</i>	<i>Caudal (Q)</i>	<i>Volumen</i>
May-23	0,0181 m ³ /s	14 055,99 m ³
Jun-23	0,0141 m ³ /s	36 418,20 m ³
Jul-23	0,0181 m ³ /s	25 107,03 m ³
Ago-23	0,0141 m ³ /s	20 460,57 m ³
Sep-23	0,0094 m ³ /s	9 382,62 m ³
Oct-23	0,0076 m ³ /s	14 935,05 m ³
Nov-23	0,0036 m ³ /s	19 716,06 m ³
Dic-23	0,0058 m ³ /s	63 444,81 m ³
Ene-24	0,0076 m ³ /s	44 069,61 m ³
Feb-24	0,0237 m ³ /s	35 494,29 m³
Mar-24	0,0165 m ³ /s	42 553,68 m³
Abr-24	0,0142 m ³ /s	59 498,01 m³
May-24	0,0159 m ³ /s	64 332,84 m³
TOTAL		449 468,76 m³

Nota. Tabla comparativa, Elaboración Propia, 2024.

Por lo tanto, en el presente estudio se recomienda que los diseños estructurales e hidráulicos se realicen para un reservorio con una capacidad de almacenamiento de 200 000 m³. Este valor se establece considerando el periodo de mayor precipitación y garantizando la

preservación del caudal ecológico de la microcuenca, el cual abastece los sistemas de riego y de agua potable ubicados en cotas más bajas.

Conclusiones

En el presente estudio de la cuenca Tres Piedras del cantón San Fernando se gestionó información de la estación pluviométrica del Observatorio Ecohidrológico de Zhurucay, del Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca. Esta información fue procesada, analizada y complementada con datos obtenidos durante un año de registros de precipitación in situ, para la reconstrucción de la serie temporal mediante la curva de doble masa, obteniéndose un coeficiente de determinación R^2 de 0,9615 en la regresión lineal.

Con el método de Aparicio se diseñaron las curvas IDF para la estación in situ, basadas en 10 años de registros, permitiendo modelar la intensidad, duración y frecuencia de las precipitaciones. Estas curvas presentan un valor de ajuste R^2 superior a 0,9, lo que asegura la fiabilidad en la estimación y pronóstico de lluvias máximas.

Se elaboraron curvas IDF para periodos de retorno de 2, 3, 5, 25 y 100 años, con las cuales se determinaron los caudales de diseño de la cuenca mediante el método empírico racional. Se realizó un monitoreo y extracción periódica de información de los equipos instalados en la cuenca, con una frecuencia trimestral. A partir de once aforos se construyó la curva de descarga, alcanzando un coeficiente de determinación $R^2 = 0,98656$, garantizando alta confiabilidad en la estimación de los caudales in situ.

Se compararon los registros de precipitación de las estaciones cercanas ubicadas en Pedernales y San Fernando, evidenciando variaciones significativas: 148 mm promedio anual en Pedernales, 214 mm en San Fernando y 172 mm en la estación in situ. Estas diferencias se explican por la distancia y ubicación relativa de las estaciones, observándose que la estación más próxima refleja valores más cercanos a los registrados en el sitio de estudio. Esto resalta

la importancia de contar con información local y representativa para una adecuada caracterización hidrológica.

Los coeficientes de escorrentía variaron mensualmente entre 0,22 y 0,75. Durante los meses más lluviosos, se situaron entre 0,24 y 0,35, indicando que entre el 24 % y el 35 % de la precipitación mensual se convirtió en escorrentía superficial. Este periodo, equivalente a un tercio del año, aporta aproximadamente el 44,91 % del volumen anual de almacenamiento del embalse, evidenciando una marcada estacionalidad en la precipitación y reforzando la necesidad de un diseño adecuado de almacenamiento, regulación y distribución hídrica, así como de una planificación integral de la gestión regional del recurso.

Finalmente, se estimó un caudal mínimo de 5,6 L/s en septiembre de 2023 y un caudal máximo de 37 L/s en mayo de 2024. Con base en estos valores, la disponibilidad total de volumen es de 691 490,40 m³, de los cuales se debe garantizar un caudal ecológico equivalente a 449 468,76 m³. En consecuencia, la capacidad útil de almacenamiento del embalse se estima en 200 000 m³.

Recomendaciones

1. Extensión del período de monitoreo:

La principal limitación del estudio es el uso de solo un año de datos, lo cual es insuficiente para caracterizar adecuadamente la variabilidad hidrológica y estimar eventos extremos.

2. Mejoramiento metodológico:

El método racional mostró subestimaciones comparado con los datos observados, por lo que se recomienda implementar modelos más sofisticados como HEC-HMS.

3. Consideraciones de diseño:

La capacidad propuesta de 200,000 m³ debería incrementarse considerando sedimentación, variabilidad climática y pérdidas operacionales.

4. Aspectos ambientales:

El caudal ecológico del 35% requiere validación específica mediante estudios de ecosistemas locales.

Referencias

- Alvarado, E. (2017). *Manual de medición de caudales*. Instituto Privado de Investigación sobre Cambios Climáticos. <https://icc.org.gt/wp-content/uploads/2023/03/064.pdf>
- American Society of Civil Engineers. (2008). *Design of urban stormwater systems*. ASCE.
- Aparicio, F. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*. LIMUSA, S.A. de C.V.
- AQUAFLOW / Hidrometría y Monitorización. (2024, 21 de febrero). Curvas de descarga y sus factores condicionantes. LinkedIn. <https://www.linkedin.com/pulse/curvas-de-descarga-y-sus-factores-condicionantes-aquaflow-agioe/>
- Araujo, E. P., & Rodríguez, J. R. (2006). Hydrological modeling of urban areas. *Journal of Hydrology*, 328(3–4), 419–429. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.12.009>
- Bardales, W. (2018). Estimación de parámetros de la curva de retención hídrica [Fotografía]. <https://walterbardalesrecursoshidricos.blogspot.com/2018/07/estimar-parametros-de-la-curva-de.html>
- Basame, P., Almeida, E., Ramón, P., Zeas, R., & Alvarez, R. (1998). Avance en la prevención de desastres naturales en la cuenca del río Paute. *Revista de Geografía*, 10, 23–34.
- Calle, U. (2015). *Análisis espacio-temporal de precipitaciones e intensidades: Obtención de histogramas de diseño en la cuenca del río Paute* [Tesis de grado, Universidad de Cuenca].
- Carrillo-Rojas, G., Silva, B., Córdova, M., Céleri, R., & Bendix, J. (2019). Actual evapotranspiration in the high Andean grasslands: A comparison of measurement and estimation methods. *Water*, 11(3), 473. <https://doi.org/10.3390/w11030473>
- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). (2010). *Manual de drenaje superficial*. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, Gobierno de España. <https://www.cedex.es>
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada*. NOMOS S.A.

- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1998). *Applied hydrology*. McGraw-Hill.
- Comas Navarro, S. A., & Espino Ventura, S. A. (2018). *Diseño de un embalse desde el punto de vista hidrológico en la cuenca del río Boba, República Dominicana, utilizando el software ArcGIS 10.3* [Tesis de grado, Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña].
<https://repositorio.unphu.edu.do/handle/123456789/598>
- Corporación Andina de Fomento (CAF) & Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2014). *Guía para la gestión de drenaje urbano en América Latina*. CAF/BID.
- Costa, J., Spicer, K. R., Cheng, R. T., Haeni, F. P., Melcher, N. B., Thurman, E. M., Plant, W. J., & Keller, W. C. (2000). Measuring stream discharge by non-contact methods: A proof-of-concept experiment. *Geophysical Research Letters*, 27(4), 553–556.
<https://doi.org/10.1029/1999GL006087>
- FAREM-Estelí. (2021). Parámetros morfométricos de la unidad hidrológica 69. *Revista Científica de FAREM-Estelí*, 1(38), 230–244.
<https://doi.org/10.5377/farem.v0i38.11954>
- Ferro, V. (2019). Flood management in urban watersheds: A modeling approach. *Water Resources Research*, 55(6), 5042–5058. <https://doi.org/10.1029/2019WR024905>
- GAD Cantón San Fernando. (2022). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del cantón San Fernando*. San Fernando.
- GAD Municipal del Cantón San Fernando. (2023). *Actualización del PDOT Cantonal de San Fernando 2023–2027: Tomo I y II*. <https://sanfernando.gob.ec/>
- GAD Provincial del Azuay. (2022). *Estudio hidrológico Tres Piedras*. Gobierno Provincial del Azuay.
- Geomor Technik. (2025). *Equipos de medición topográfica y geotécnica* [Fotografía].
<https://www.geomor.com.pl>

- Gobierno Provincial del Azuay. (2022). *PDOT Azuay alineado al PND 2021–2025*.
https://www.azuay.gob.ec/wp-content/uploads/2022/02/PDOT-AZUAY-ALINEADO-PND-2021-2025_compressed.pdf
- Heron Instruments. (2023). *Groundwater data logger: Long-term water level and temperature readings*. <https://heroninstruments.com/products/groundwater-data-loggers/absolute-data-logger-models/absolute-data-logger-direct-read-model/>
- Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Transactions, American Geophysical Union*, 13(1), 350–361. <https://doi.org/10.1029/TR013i001p00350>
- INAMHI. (2015). *Determinación de ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación*. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2014). *Normas técnicas ecuatorianas para el diseño hidráulico y sanitario*. INEN.
- Ivan, O. A. (2014). *Estimación de precipitación espacial mediante correlación con variables secundarias y la ayuda de tecnologías de información geográfica* [Tesis de maestría, Universidad de Cuenca].
- Kohli, R. K. (2017). *Reservoir sizing* [Material del curso]. ePathshala, National Mission on Education through ICT.
http://epgp.inflibnet.ac.in/epgpdata/uploads/epgp_content/S000014ER/P000275/M025231/ET/1511763704module_23_etext.pdf
- Le Coz, J., Camenen, B., Peyrard, X., & Dramais, G. (2012). Uncertainty in open-channel discharges measured with the velocity–area method. *Flow Measurement and Instrumentation*, 26, 18–29. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2012.05.001>
- Martínez, J., & Álvarez, D. (2023). Climate-driven hydrological extremes in the Andean Highlands: Implications for small reservoir design. *Journal of Hydrology and Climate Change*, 17(2), 145–162. <https://doi.org/10.1016/j.hydrochange.2023.145>

- Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE). (2020). *Normativa para la gestión integral del agua en Ecuador*. <https://www.ambiente.gob.ec>
- Pérez-Sánchez, A. E., & García, A. M. (2014). Modelling urban drainage systems. *Urban Water Journal*, *11*(3), 183–196. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2013.780512>
- Picón, L., & Estrella, J. (2022). *Comparación de variación climática desde 1983 al 2013 y su influencia en el sector agropecuario de las provincias Azuay, Cañar y Morona Santiago* [Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana].
- Pizarro, R., & Abarza, A. (2001). Análisis comparativo de las curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) en seis estaciones pluviográficas (VII región del Maule, Chile). *Revista Virtual UNESCO*.
<http://www.unesco.org/uy/phi/biblioteca/handle/123456789/500>
- Rojas, P. M. (2023). *Curvas de intensidad-duración-frecuencia para la ciudad de Cuenca* [Tesis de maestría, Universidad del Azuay].
- Saquisilí, S. (2019). *Desarrollo de un modelo estocástico y datos de reanálisis para la subcuenca del río Machángara* [Tesis de maestría, Universidad del Azuay].
- Serrano, J. L., & González, M. J. (2011). Tecnologías de control de inundaciones urbanas. *Ingeniería Hidráulica*, *24*(4), 321–329. <https://www.inghidraulica.com>
- Smith, J., & Jones, M. (2005). Hydrological modeling in flood-prone regions. *Journal of Hydrology*, *315*(1–4), 235–246. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.03.021>
- Teixeira, M. L., Costa, L. J., & Pinho, M. M. (2012). Water retention in urban areas: A case study on stormwater management. *Water Resources Management*, *26*(12), 3523–3537. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0049-9>
- United States Department of Agriculture (USDA). (1986). *Urban hydrology for small watersheds (Technical Release 55)*. Soil Conservation Service.

Universidad Nacional Autónoma de Honduras. (s. f.). *Hidrología: Tablas y coeficientes para*

examen 1. Studocu. <https://www.studocu.com/latam/document/universidad-nacional-autonoma-de-honduras/hidrologia-1/hidrologia-tablas-y-coeficientes-para-examen-1/138350332>

Valeport. (2025). *Instrumentos de medición hidrológica y oceanográfica* [Fotografía].

<https://www.valeport.co.uk>

Vásquez, A. R. (2016). *Estudio de la cuenca hidrográfica del río Guayas para la implementación de un sistema de almacenamiento de agua* [Tesis de maestría, Universidad de Cuenca]. <http://dspace.uazuay.edu.ec/>

Velasco-Molina, H. (1991). *Las zonas áridas y semiáridas: Sus características y manejo*. Limusa.

Vélez, M. (2000). *Hidrología para ingenieros*. Universidad Nacional de Colombia.

Recuperado de https://www.researchgate.net/figure/FIGURA-66-Curva-de-doble-masa_fig12_338778972

Vivanco, E. F. (2017). *Diseño de la capacidad de un embalse de agua con fines de riego, en la cuenca de la quebrada La Cucula*.

<https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/19819/1/Edwin%20Fabricio%20Vivanco%20Encalada.pdf>