



**Análisis de riesgo de crecidas en la cuenca del río Guare, Valle de San José,
Santander**

Cesar Mauricio Aguilar Ariza

Código: 10481821864

Angie Vivian Nova Torres

Código: 10481729990

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Civil

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

Bogotá, Colombia

2023

**Análisis de riesgo de crecidas en la cuenca del río Guare, Valle de San José,
Santander**

**Cesar Mauricio Aguilar Ariza
Angie Vivian Nova Torres**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Civil

Director (a):

PhD, Doctor, Ingeniero, Edison Osorio Bustamante

Ingeniera Alexandra Morales Rey

Codirector (a):

Ing. Civil. MSc. Wilmar Jair Gómez Ríos

Línea de Investigación:

Hidrotecnia y ambiente

Grupo de Investigación:

GRESIA

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Civil

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

Bogotá, Colombia

2023

ANÁLISIS DE RIESGO DE CRECIDAS EN LA CUENCA DEL RÍO GUARE, VALLE DE SAN JOSÉ, SANTANDER

RISK ANALYSIS TO FLASH FLOODS IN

GUARE'S RIVER BASIN, VALLE DE SAN JOSÉ, SANTANDER

Aguilar Ariza , Cesar Mauricio¹; Nova Torres , Angie Vivian²; Osorio Bustamante,
Edison³; Morales , Alexandra⁴; Gómez Ríos, Wilmar Jair⁵;

¹ Universidad Antonio Nariño, Colombia, caguilar48@uan.edu.co

² Universidad Antonio Nariño, Colombia, annova16@uan.edu.co

³ Universidad Antonio Nariño, Colombia, e.osorio@uan.edu.co

⁴ Universidad Antonio Nariño, Colombia, alemorales@uan.edu.co

⁵ Universidad Antonio Nariño, Colombia, wgomez85@uan.edu.co

Resumen: Este estudio busca establecer el nivel de riesgo a eventos de crecidas, para esto se utilizó información de tipo topográfica obtenida de la misión ALOS PALSAR de la NASA, información hidrometeorológica del IDEAM y datos cartográficos del IGAC, los cuales fueron procesados en el sistema de información geográfica de uso libre QGIS y en hojas de cálculo de Microsoft Excel. Después de su respectivo procesamiento, se calcularon índices morfométricos e hidrológicos, que fueron comparados con resultados obtenidos por investigadores de diferentes partes del mundo quienes realizaron investigaciones similares, basándose en la experiencia de estos, se generó un análisis de los resultados obtenidos en función de la posibilidad de presentarse una descarga instantánea de agua dentro de la subcuenca y sus respectivos tiempos de concentración y de retraso. Posteriormente, aplicando la metodología de evaluación multicriterio para establecer un nivel de riesgo en función del análisis obtenido, concluyendo que la subcuenca del río Guare tiene una forma alargada con una densidad de drenajes que permite la suficiente interacción de los escurrimientos con el suelo facilitando las abstracciones y disminuyendo el riesgo a eventos extremos relacionados con crecidas. Obteniendo un nivel de riesgo bajo, un tiempo de concentración en la subcuenca de 2.32 horas con un tiempo de retraso de 1.39 horas.

Palabras claves: Crecidas, Evaluación de riesgo, Morfometría, Régimen Hidrológico, Sistemas de información geográfica, Tiempo de Concentración

Abstract: This study seeks to establish the level of risk to flood events, for this topographic information obtained from the NASA ALOS PALSAR mission, IDEAM hydrometeorological information and IGAC cartographic data were used, which were processed in the free-use geographic information in QGIS and in Microsoft Excel spreadsheets. After their respective processing, morphometric and hydrological indices were calculated, which were compared with results obtained by researchers from different parts of the world who carried out similar investigations, based on their experience, an analysis of the results obtained

was generated based on the possibility of presenting an instantaneous discharge of water within the sub-basin and their respective concentration and delay times. Subsequently, applying the multi-criteria evaluation methodology to establish a risk level based on the analysis obtained, concluding that the Guare river sub-basin has an elongated shape with a drainage density that allows sufficient interaction of runoff with the soil, facilitating abstractions. and reducing the risk of extreme events related to floods. Obtaining a low risk level, a concentration time in the sub-basin of 2.32 hours with a delay time of 1.39 hours.

Key words: Concentration time, Flash Floods, Geographic Information Systems, Hydrological regime, Morphometry, Risk Evaluation,

INTRODUCCIÓN

En la naturaleza suceden diferentes tipos de fenómenos que se presentan de forma natural y regular de acuerdo con ciertos periodos de retorno, en el caso de la climatología e hidrología, la intensidad de las lluvias genera incrementos considerables en los cauces de las distintas cuencas hidrográficas, haciendo que en algunos casos el volumen de agua descargada se evacue de forma súbita generando afectaciones a las poblaciones dentro del área de influencia de los cauces (Gutiérrez Lozano et al., 2011)

En este documento, se estudia la subcuenca del río Guare, ubicado en la República de Colombia, en el departamento de Santander entre los municipios de Coromoro, Charalá, Mogotes, Ocamonte, San Joaquín y Valle de San José, la zona de estudio hace parte de los principales afluentes del río Fonce, una de las fuentes hídricas de la provincia Guanentina y afluente del río Sogamoso.

Utilizando información obtenida de las bases de datos oficiales como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), además de la obtenida de recursos de uso libre como la misión ALOS PALSAR de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) y con su debido procesamiento en el software de licencia libre Quantum GIS (QGIS), se caracterizó la morfología y el régimen hidrológico de la Subcuenca del río Guare.

Posteriormente, mediante la aplicación de los conceptos teóricos y comparando con los resultados de investigaciones antecedentes que evaluaron fenómenos similares, se establecieron índices de tipo morfométrico e hidrológico y con estos analizar la susceptibilidad o riesgo a

crecidas en el área de estudio, por último, usando la metodología de evaluación multicriterio, se generó una evaluación del riesgo a crecidas en función de las variables analizadas.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Según los reportes presentados en el Atlas de mortalidad y pérdidas económicas de eventos climáticos extremos (World Meteorological Organization, 2019), comparando un periodo de tiempo de 1970 a 2019, la mitad de todos los desastres a nivel mundial fueron ocasionados por eventos relacionados con el clima, dentro de los cuales resaltan las inundaciones, tormentas, temperaturas extremas, incendios forestales entre otros, en términos económicos, los desastres naturales han ocasionado pérdidas totales por un valor equivalente alrededor de los 4.5 Trillones de dólares a nivel mundial y un total aproximado de 3.6 millones de muertes en todo el mundo.

En Colombia, de acuerdo con (Departamento de Planeación Nacional Colombia, 2015), entre 2006 y 2014 se reportaron 21594 emergencias generadas por eventos naturales, de las cuales aproximadamente el 68% fueron por sucesos hidrometeorológicos, generando un total de 3.181 muertos y de 12'298.849 afectados. En el caso de Santander, para el mismo periodo de tiempo, hubo un total de 1.982 viviendas destruidas y 575 vías afectadas.

Teniendo en cuenta lo anterior, es de suma importancia hacer estudios que permitan identificar posibles riesgos que se han generado por diferentes factores ambientales, uno de ellos los cauces naturales, los cuales son sensibles a variaciones climáticas, fisiográficas y de uso del suelo, y de esta forma poder ayudar a dirigir acciones de prevención del riesgo a las autoridades municipales, departamentales y nacionales encargadas de este tema.

MARCO DE REFERENCIAS

Marco Conceptual

De acuerdo con (Díaz Delgado et al., 2005), una cuenca hidrográfica es una zona geográfica en donde la precipitación hace todos los aportes de agua, formando así las diferentes corrientes naturales, cuyos excedentes se unen en un solo punto conocido como “la Exutoria”. Dicha exutoria cuenta con un flujo durante el año, el cual depende de las diferentes condiciones climáticas de la cuenca y sus alrededores, además del uso del suelo.

Además de lo anterior, y según (Henríquez Opazo, 2013), en las cantidades de agua superficial dentro de la cuenca intervienen también, procesos del ciclo hidrológico como la evaporación, infiltración, evapotranspiración, entre otros.

Figura 1

Ciclo Natural del agua



Fuente: (USGS, 2019)

Según la (NOAA, 2023) y (Hernández-Uribe et al., 2016), las crecidas son excesos en los flujos de agua que en ocasiones logran llegar a zonas del terreno que normalmente se encuentran secas, este tipo de sucesos suelen suceder durante lluvias en las cuales su intensidad supera la

velocidad de infiltración del suelo y pueden ser muy peligrosas, porque combinan el poder destructivo de una inundación con una gran velocidad.

En el caso de zonas urbanizadas, en donde se han construido caminos y carreteras que impermeabilizan el suelo, se suele tener un mayor riesgo de crecidas, debido a que el cambio en el uso del suelo disminuye la capacidad de infiltración del suelo, haciendo que sean muchos más los excesos de agua que se transportan de forma superficial, aumentando los caudales de los cauces, convirtiéndose en un riesgo para las poblaciones y estructuras aledañas.

(Esper Angillieri, 2008) las inundaciones espontáneas, son riesgos de tipo geológico de peligro extremo debido a su naturaleza abrupta, se caracterizan generalmente, porque son eventos de corta duración, una corta extensión, picos y velocidades de flujos muy altas, que pueden generar grandes pérdidas a la propiedad y que ocurren por tormentas de altas intensidades, pendientes altas en las zonas de captación, una pobreza en la cubierta vegetal, que facilita el incremento de la velocidad de flujo y que pueden hacerse mucho peor, cuando los índices de infiltración son bajos, sobre todo por cambios en el uso de suelo, aumentando la cantidad de área impermeable.

La (EPA, 2023) y (Saborío, 2009), describen la evaluación de riesgo como la caracterización y magnitud de los riesgos a la salud humana de varias poblaciones ante cualquier situación extrema, dicha evaluación, se hace de acuerdo con un procedimiento específico el cual inicia con la recolección de información y de mediciones que permitan caracterizar la naturaleza y extensión del riesgo y basándose en los resultados, evaluar la frecuencia y magnitud de la exposición que podría ocurrir tanto para las poblaciones como para el entorno.

Las evaluaciones de riesgo deben estar basadas en un conocimiento base que debe ser complementado con información del evento estudiado y la posibilidad de ocurrencia influenciado por otros factores que se encuentren en la zona de estudio, y así, poder cuantificar la relación entre la magnitud del evento y la frecuencia con la que podría ocurrir.

Además, deben tener una visión integral que busque que se promuevan acciones de desarrollo en planes de manejo, protección o prevención de las zonas que se encuentren más expuestas ante el riesgo estudiado.

(Meraj et al., 2015) y (El-Rawy et al., 2023), establecen las evaluaciones de riesgo en cuencas hidrográficas de tipo cualitativo, como una alternativa que se basa en la evaluación de las características del terreno, la hidrología superficial y la caracterización. Lo anterior permitiendo establecer un comportamiento hidrológico superficial, como uno de los principales impulsores de las inundaciones. La respuesta hidrológica rápida o tardía, hace que una cuenca sea más o menos vulnerable a las inundaciones.

Es en función precisamente de las características como la geomorfología, topografía, uso de la tierra, cobertura, geología y tipo de suelo de la cuenca, que se obtienen ciertos parámetros como el orden de las corrientes, densidad de drenaje, frecuencia de corrientes, relación de elongación entre otros que juegan un papel trascendental en la respuesta de la cuenca a eventos de lluvia.

(Youssef et al., 2011) estiman que la mayoría de las inundaciones son causadas por tormentas convectivas o frontales, en las que la mayoría de las lluvias caen en un corto periodo de tiempo, la intensidad y la duración de la precipitación, son los factores que más influyen en los riesgos de inundación, sin embargo, otros de los factores que se pueden relacionar con la severidad de las inundaciones repentinas, son las características de las lluvias, las pérdidas por evaporación e infiltración, la red y orden del drenaje de la cuenca y sus características tanto ambientales como de las actividades antrópicas que se realicen.

(Adnan et al., 2019), clasifican los métodos de clasificación geomorfológica de las cuencas hidrográficas en dos tipos, las medidas lineales y los números adimensionales. Al hacer un uso combinado de estos dos tipos de parámetros, se puede realizar una evaluación de inundaciones potenciales y sus afectaciones a las actividades desarrolladas dentro de las cuencas hidrográficas.

En el caso de los parámetros topográficos como la pendiente, elevación, relieve, y el coeficiente de rugosidad pueden influir de mayor o menor forma en la ocurrencia de inundaciones, en el caso de la pendiente por ejemplo, una mayor pendiente ocasiona una evacuación más rápida de los flujos de agua superficial, facilitando las inundaciones en las partes bajas de las cuencas, haciendo que se descargue mucha más agua en menores tiempos, además

de proporcionar una mayor velocidad a los flujos de agua y con esto mucha mayor energía, incrementando el riesgo a desastres.

En cuanto a los índices de escorrentía, como por ejemplo la densidad de drenajes y la longitud de estos, también influye en la forma en la que se pueda presentar o no una inundación dentro de la cuenca, por ejemplo, una longitud de drenajes más larga genera un mayor volumen de escorrentía, y una cuenca con una densidad de drenaje baja, se refiere a una cuenca en donde existen pocas corrientes de agua en relación con su área total, haciendo esto que se facilite más la infiltración.

Marco Teórico

En cuanto a la morfometría de las cuencas, (Ion, 1985) explica que es el estudio que se encarga de determinar las variables que caracterizan el comportamiento de los flujos de agua dentro de la cuenca hidrográfica, dependiendo de las propiedades de la forma como lo son el área, perímetro, longitud, ancho, entre otras, de la zona en donde confluyen, cada uno de los afluentes de un cauce denominado cauce principal.

Ecuación 1

Factor de Forma

$$F = \frac{A}{L^2}$$

En donde:

A: Área de la Cuenca

L: Longitud del máximo recorrido

Fuente: (Ortíz Vera, 2004)

En la Ecuación 1 se presenta el método utilizado para determinar el factor de forma de la cuenca del río Guare, dicho índice busca determinar qué tan cuadrada o alargada puede ser la cuenca, según lo presentado por (Cardona, 2016) cuando se obtienen factores de forma con valores bajos,

hay menos probabilidades de presentarse crecientes comparado a cuencas con la misma extensión, pero con factores de forma mayores.

Ecuación 2

Índice de Compacidad

$$K_c = 0.28PA^{1/5}$$

En donde:

P: Perímetro de la Cuenca

A: Área de la Cuenca

Fuente: (Ortíz Vera, 2004)

Otro de los índices que se utilizaron en este estudio fue el coeficiente de compacidad, el cual fue determinado mediante la implementación de la Ecuación 2, el cual, al tomar el valor de 1, se traduce como si la cuenca tuviera una forma circular perfecta, y en caso de obtener valores diferentes a este, se establece que la forma de la cuenca puede variar entre rectangular, alargada o muy alargada de acuerdo con la clasificación presentada por (Ortíz Vera, 2004).

Ecuación 3

Pendiente del Cauce Principal Método de Kirpich

$$S_0 = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{l_i}{S_i}\right)^{1/2}}$$

En donde:

S_0 : Pendiente del Cauce Principal

l_i : Longitud de cada tramo de pendiente S_i

n: número de tramos de similar pendiente

Fuente: (Ortíz Vera, 2004)

Por otra parte, al existir diferentes métodos para estimar la pendiente media del cauce principal, y teniendo en cuenta que la metodología más empleada es la de Kirpich, se usó esta misma, la cual se describe en la Ecuación 3.

Otro de los índices morfométricos más comunes en los estudios de cuencas hidrográficas es la razón circular de Miller, en la cual, como se observa en la Ecuación 4, se hace una comparación del área de la cuenca con el área de un círculo hipotético el cual tiene una circunferencia igual al perímetro de la cuenca (Ibisate González De Matauco, 2004).

Ecuación 4

Cálculo de la Relación de Confluencias

$$\text{Razón Circular de Miller} = 12.566 * \frac{A}{P^2}$$

En donde:

A: Área de la Cuenca

P: Perímetro de la cuenca

Fuente: (Ortíz Vera, 2004)

En la Ecuación 6 se explican las variables que fueron utilizadas y el cálculo aplicado para establecer la relación de confluencias de la cuenca.

En cuanto a los índices del drenaje de las cuencas, los principales y más utilizados son aquellos que permiten establecer la capacidad de conducción hídrica que tiene la zona de estudio, más importante de ellos es la densidad de drenajes, en la cual, de acuerdo con (Campo et al., 2012), este coeficiente establece la cantidad de corrientes presentes por unidad de área y se calcula con la ecuación 7.

Ecuación 7

Cálculo de la densidad de drenajes

$$\text{Densidad drenajes: } \frac{\text{número de drenajes}}{A}$$

En donde:

A: Área de la Cuenca

Fuente: (Campo et al., 2012)

Otro índice relacionado con las corrientes de la cuenca es la longitud sinusoidal, en la cual como se observa en la ecuación 8, se hace una comparación entre la longitud del cauce principal y la longitud axial de la zona de estudio con esto se puede determinar que tan sinuoso es el cauce, parámetro que está relacionado con la cantidad de energía de velocidad que puede tener el flujo de agua, además de la velocidad con la que este puede evacuar los caudales generados por las precipitaciones (Campo et al., 2012).

Ecuación 8

Cálculo de la Longitud Sinusoidal

$$L_s = \frac{LCP}{LVR}$$

En donde:

L_s : Longitud Sinusoidal

LCP: Longitud del Cauce Principal

LVR: Longitud Valle del Río

Fuente: (Campo et al., 2012)

(Kaufmann de ALMEIDA et al., 2014) establecen la importancia del tiempo de concentración al momento de realizar análisis de tipo hidrológico en cuencas, ya que uno de sus principales usos es para poder realizar la estimación de las descargas máximas generadas por los

eventos de precipitación, y así poder determinar el comportamiento de la cuenca, ayudando a prevenir y minimizar los posibles riesgos que se generarían durante algún tipo de desastre natural o evento extremo.

De acuerdo con varios autores citados por (Kaufmann de ALMEIDA et al., 2014), se puede decir que el tiempo de concentración es el lapso que se demora una gota de agua en recorrer la cuenca desde el punto más alejado de la parte alta, hasta la desembocadura de esta.

También, existen diferentes métodos empíricos para poder estimar este tiempo de concentración, variando según los diferentes autores en función de variables como la pendiente, longitud del cauce principal, área de la cuenca, intensidad de lluvia, densidad de drenajes, entre otros.

En cuanto al método de análisis multicriterio, (Žižović et al., 2019) explican que es una metodología utilizada en diferentes campos de la ciencia para la evaluación y toma de decisiones, en campos de la estadística, ciencias de la administración, ciencias computacionales e incluso en planeación ambiental.

Esta metodología busca descomponer el problema estudiado en diferentes componentes que pueden ser evaluados de forma individual, y a los cuales se les asigna un porcentaje de la ponderación total del problema, al finalizar la evaluación de cada uno de los factores propuestos, se hace una sumatoria de los resultados parciales obtenidos de cada uno de estos, y de esta forma se logra obtener un valor total sobre el problema.

(Al-Saady et al., 2016), estableció que la teledetección y los sistemas de información geográfica son herramientas con la capacidad de revelar datos morfométricos en ausencia de mediciones in Situ. Además de esto, dichas herramientas, permiten realizar comparaciones entre diferentes litologías, relieves y otras variables. Los SIG, también han aportado a mejorar el conocimiento sobre el almacenamiento y flujo de agua subterránea.

Uno de los elementos que es usado en este tipo de software son los modelos de elevación digital (DEM) por sus siglas en inglés, del cual se hacen estimaciones basados en el método de cuadrícula y con esto se obtienen diferentes parámetros morfométricos, como la delimitación de

los límites de la cuenca, áreas de subcuencas, extracción de la red de drenaje y la evaluación de este. También parámetros topográficos, como el gradiente de la pendiente, el área de la captación específica entre otros.

ESTADO DEL ARTE

Utilizando la base de datos institucional (SCOPUS, 2023), se realizó la búsqueda de artículos que contengan las palabras Cuenca, Riesgo y Morfometría e igualmente, se buscaron las mismas palabras en inglés siendo Basin, Risk, Morphometry, obteniendo dentro de los resultados más relevantes y que aportan a la metodología a utilizar los que se presentan a continuación

(Gaspari et al., 2011) realizaron un estudio en donde determinaron la vulnerabilidad ambiental en cuencas hidrográficas serranas utilizando sistemas de información geográfica. Para esto, empezaron por zonificar la vulnerabilidad en la cuenca alta del río Sauce Grande en Argentina.

Para esto, mediante el procesamiento geoespacial, se identificaron factores condicionantes y activadores, para los primeros, se tuvieron en cuenta la pendiente, textura del suelo, cobertura vegetal, uso de suelo y densidad de drenaje y como factores activadores, se tomaron la erosión producida por la precipitación, teniendo en cuenta la intensidad, duración y frecuencia de una tormenta (Gaspari et al., 2011).

En el caso de la densidad de drenajes, se realizó un índice de compacidad a través del SIG, tomando como base la red de drenaje y el área de una circunferencia de radio de 5 km, mediante ese proceso, se asigna a la celda ubicada en el centro de la circunferencia, un valor que resulta de dividir la longitud total de los drenajes y el área (Gaspari et al., 2011).

En cuanto a la erosividad de la precipitación, se calculó mediante el índice de Fournier Modificado (IFM), calculando también la magnitud y variación temporal. Para dicho índice

tuvieron en cuenta los años en los cuales las estaciones meteorológicas de la zona de estudio tenían datos disponibles, analizando 8 estaciones (Gaspari et al., 2011).

Mediante la asignación de factores condicionantes a los que se les asignó un código de valor para las diversas categorías de carácter cualitativo, y su posterior combinación, se estableció una zonificación en donde se reúnen diferentes áreas con rangos de susceptibilidad ambiental (Gaspari et al., 2011).

También se pudo identificar en este estudio, zonas con susceptibilidad ambiental moderada, pero que debido a la influencia del clima se convirtieron en zonas más vulnerables a diferentes riesgos de degradación ambiental (Gaspari et al., 2011).

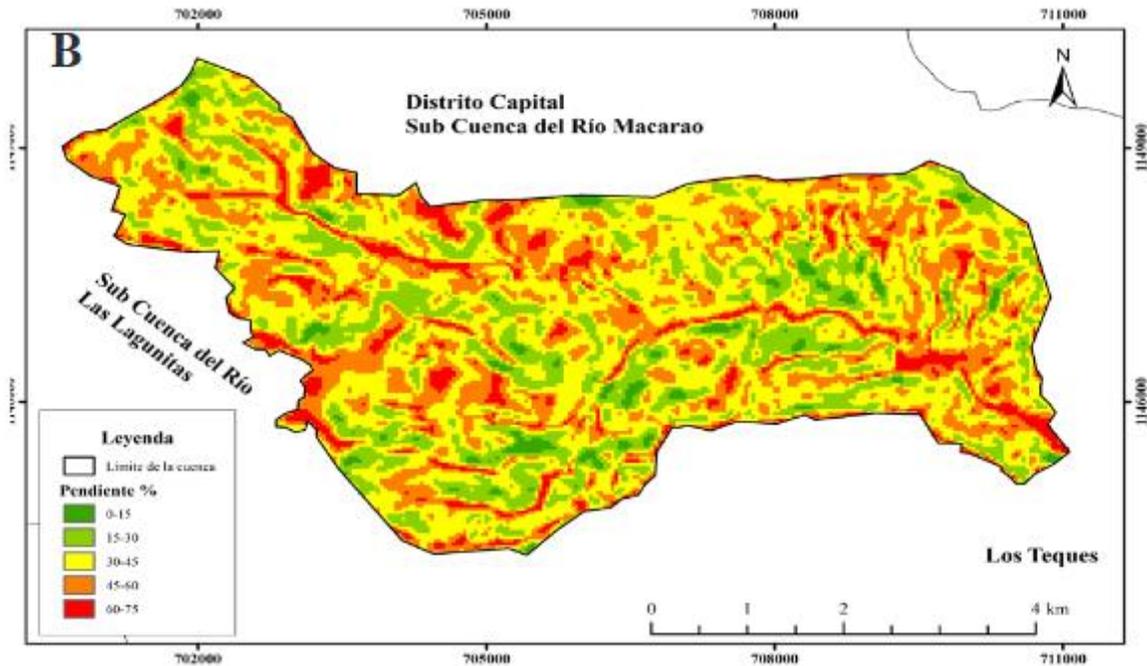
(Coromoto Marín et al., 2017) caracterizaron la cuenca alta del río San Pedro en el municipio de Guaicaipuro y determinaron el grado de vulnerabilidad por inundación y deslizamiento, para esto, dividieron en dos áreas la cuenca, una que fue determinada como A (la cual estaba ligeramente intervenida) y B (Fuertemente intervenida).

Para estimar la vulnerabilidad se tomaron en cuenta la pendiente, distancia de las comunidades al río, intensidad en el uso de la tierra y elevación. El procesamiento de toda la información se realizó con el paquete computacional gvSIG versión 1.12., con la información de las curvas de nivel se realizó la interpolación de elevaciones para generar el DEM, el cual fue clasificado en 5 rangos de elevación.

Para el mapa de pendientes, utilizaron el método de ajuste de polinomio de grado 2, generando así 5 rangos de pendientes tal y como se observa en la figura 2, los intervalos de las variaciones de nivel en porcentaje fueron de 0-15, 15-30, 30-45, 45-60 y > 60, la hidrografía de la cuenca se generó con la acumulación de flujos, después de tener los vectores de los diferentes cauces se generaron buffers alrededor de ellos con 5 rangos diferentes los cuales eran, 0-5m, 25-50m, 50-75m, 75-100m y >100m, y así identificar las cercanías de las viviendas y cultivos a las fuentes hídricas (Coromoto Marín et al., 2017).

Figura 2

Distribución de pendientes de la Subcuenca del Río Macarao



Fuente: (Coromoto Marín et al., 2017)

Finalizando el estudio, se encontró que el 33.75% del área de la cuenca presenta una vulnerabilidad media a inundaciones. El 31.91% una vulnerabilidad baja y 26.866% muy baja, en la clasificación de vulnerabilidad alta, solo se encontraba el 6.12% del área total de la cuenca (Coromoto Marín et al., 2017).

En este último rango es en donde se ubican la gran mayoría de las comunidades, en donde se desarrollan también bastantes actividades agrícolas, haciendo que las posibles pérdidas materiales y humanas sean mayores en el caso de inundaciones (Coromoto Marín et al., 2017).

(Gardiol et al., 2021) tomaron como área de estudio la cuenca del arroyo las turbias, para determinar el riesgo asociado a fenómenos hídricos, y para esto, utilizaron la metodología de Análisis Evaluativo Multicriterio (AEM), en la cual se genera una jerarquía de alternativas y proyectos, incorporando varios parámetros sin necesidad de convertirlos en temas monetarios.

Además de esto, trabajaron con un cuadro de puntuación, en donde se incorporaron dimensiones de tipo político – institucional, socio – económica y ambiental, para esto evaluaron en total 19 variables, seleccionadas de acuerdo con la disponibilidad de información y la forma en que dicha variable incidía en alguna de las dimensiones seleccionadas. En el caso de la dimensión ambiental, por ejemplo, seleccionaron como variables, la densidad de drenaje, pendientes topográficas, suelo con exceso de agua y densidad vial.

Dentro de los resultados que obtuvieron, en el caso de los factores ambientales, se asignaron puntajes de acuerdo con el efecto que tiene dicha variable en respuesta a una inundación, por ejemplo, en el caso de las pendientes, aquellas que presentaban una variación de nivel considerable en una longitud corta, tenían un nivel de riesgo mayor ya que en zonas con este tipo de desnivel, se retrasarían mucho más en evacuar el agua, comparada con sitios con pendientes altas.

En general, determinaron que en los aspectos de menor vulnerabilidad se diferencian en el caso de la cuenca media la pendiente, la cuenca inferior una mayor densidad de drenaje y la cuenca alta una mayor densidad vial y a su vez menor porcentaje de suelos con exceso de agua.

Caso contrario para los factores que generan una mayor vulnerabilidad, la cuenca superior tiene una pendiente más baja, la cuenca media tiene muy poca densidad vial y de drenaje, y la cuenca baja, tiene gran cantidad de suelos con exceso de agua.

A cada una de las 3 dimensiones evaluadas se les dio un porcentaje del 33% este valor se dividió por la cantidad de variables evaluadas para obtener el peso de cada variable. Al multiplicar esos pesos por la matriz normalizada (0-1) se obtuvo la matriz multicriterio que categorizaba la vulnerabilidad.

Finalizando lograron concluir, que, al momento de evaluar la vulnerabilidad total de la cuenca, de acuerdo con las 3 dimensiones seleccionadas, no se encontraron variaciones en ninguno de los 3 sectores de la cuenca, sin embargo, la cuenca inferior mostraba algunas condiciones que, de acuerdo con la influencia de otros factores, aumentarían la vulnerabilidad.

(Leon Caviedes & Oliveros Martínez, 2020) utilizaron un modelo conceptual con el que identificaban la exposición, fragilidad y capacidad de adaptación y respuesta de la cuenca del río Tunjuelo para establecer la vulnerabilidad ante la amenaza de inundaciones de la zona. De esta forma, evaluaron las variables de los aspectos físicos, ambientales, económicos y sociales de la zona de estudio.

Dentro de los factores ambientales, se analizaron los datos de las estaciones hidrométricas de Cantarrana, Avenida Boyacá y Puente Bosa, que contaban con datos desde 1958 a 1980, 1989 a 2016 y 1991 a 2016 respectivamente, además de esto, se procesaron y analizaron datos de 8 estaciones meteorológicas del IDEAM ubicadas dentro del área de estudio, identificando un comportamiento de precipitaciones correspondiente al tipo bimodal, siendo las temporadas de Abril a Mayo y Octubre a Noviembre en las que se presentaban la mayor cantidad de precipitaciones.

Utilizando el mapa de amenazas por inundaciones de Bogotá, generado por el Instituto Distrital de Gestión del Riesgo y Cambio Climático, del cual se hizo un recorte correspondiente a la zona de estudio y se calcularon las áreas de la cuenca que se encontraban dentro de los diferentes tipos de amenazas, obteniendo que el 36.54% se encontraba en amenaza baja, 33.57% en amenaza media y un 27.87% con amenaza de inundación alta.

Al momento de evaluar la vulnerabilidad global, asignando un porcentaje similar a los diferentes componentes evaluados y dividir dicho valor en la cantidad de variables evaluadas en cada uno de ellos, se obtuvo que la vulnerabilidad global fue de 3.06 correspondientes a una clasificación de tipo Medio – Alto, siendo la vulnerabilidad por exposición la que obtuvo un mayor puntaje dentro de la escala utilizada.

Aplicando un análisis de tipo estadístico enfocado en las características geomorfológicas de las cuencas ubicadas en Makkah Al – Mukaramah en Arabia Saudita, (Niyazi et al., 2020), evaluaron las diferentes variaciones en las cuencas relacionándolas con la posible respuesta hidrológica y cinemática, enfocándose en la posibilidad de que existiesen algunas variables morfométricas con una mayor predominancia sobre la respuesta hidrológica comparadas a otras.

De acuerdo con el análisis que realizaron, lograron determinar que las variables morfológicas e hidrológicas presentaban una variación en los patrones de distribución de probabilidades, haciendo que la relación entre estos sea baja, evidenciado en que la variable que tuvo una mayor relación con la respuesta hidrológica fue la intensidad y duración de las lluvias, la cual no depende de la morfología de las cuencas hidrográficas.

Finalizando dicho estudio, también presentan una evaluación de riesgo potencial a inundaciones e identifican las posibles cuencas de recarga en la zona de estudio.

Ante la ausencia de conocimiento de la caracterización morfométrica de la cuenca del Río Grande en Brasil, (Guidolini et al., 2020), realizaron el cálculo de diferentes variables relacionadas con la forma de la zona de estudio, incluyendo también, análisis de las características del relieve y el drenaje.

Para este estudio realizaron el procesamiento de la información base obtenida de un modelo digital de elevaciones (DEM), el cual fue procesado en un sistema de información geográfica SIG, encontrando que el cauce principal de la cuenca corresponde a un orden según la clasificación de Horton de tipo 5, con un patrón de drenaje de tipo dendrítico, además identificaron un alto nivel de sinuosidad del cauce principal y un relieve ondulado.

En cuanto al tipo de suelo, la cuenca estudiada tenía un suelo permeable, mal drenado y con una capacidad baja para poder mantener y/o generar vías de drenaje.

En el caso de (Nasir et al., 2020), realizaron modelos para establecer el riesgo a inundaciones en cuencas de la zona alta montañosa en el Himalaya al norte de Pakistán, para esto, utilizaron el software Arcgis junto con el complemento SWAT (Soil and Water Assessment Tool), tomando como base un modelo digital de elevaciones (DEM).

Después de realizar el procesamiento del DEM hasta obtener la delimitación de la cuenca y su respectiva red de drenaje, utilizaron alrededor de 15 parámetros de forma, para modelar las crecidas de las 17 subcuencas que conforman la cuenca principal, de esta forma identificaron que dos de las 17 subcuencas, tenían una susceptibilidad alta a inundaciones repentinas, de otra forma, 5 de las cuencas restantes presentaban una susceptibilidad moderada.

Con estos modelos, también evaluaron dos métodos diferentes para identificar la susceptibilidad a crecidas, estos fueron el MRA y el El- Shamy, siendo el primero mucho más preciso que el segundo.

(Karmokar & De, 2020), evaluaron el riesgo a crecidas en las cuencas de los distritos Jalpaiguri y Darjeeling dentro ubicadas en el Himalaya, dicha evaluación fue realizada con el propósito de apoyar a la planificación de medidas de mitigación ante las inundaciones instantáneas, para esto analizaron la topografía, morfología y climatología de la zona de estudio, teniendo también en cuenta aspectos del suelo como su uso y tipo.

La información base la obtuvieron de las plataformas Landsata 8 OLI/TIRS y del satélite Sentinel 2A, realizaron un análisis de las imágenes satelitales y un posterior procesamiento, para obtener la red de drenaje, el mapa geológico, pluviométrico, y de uso del suelo. Después, usando sistemas de información geográfica, determinaron diferentes parámetros morfométricos como la relación de bifurcación, densidad de drenajes, radio de textura, relieve de la cuenca, pendiente media y número de curva.

Posteriormente, realizaron el cálculo del tiempo pico, tiempo de concentración y caudales picos, con esto pudieron inferir la respuesta hidrológica de las cuencas de estudio y generar un mapa de susceptibilidad a crecidas, dando una mayor preponderancia a los índices de tipo hidrográfico, encontrando que un 63% de las cuencas estudiadas presentaban un riesgo alto ante eventos de descarga de caudales de forma espontánea.

(Arango et al., 2021), analizaron la susceptibilidad a flujos torrenciales mediante aplicaciones de tipo estadístico de los parámetros morfométricos en cuencas de tipo montañoso ubicadas en la zona norte de la cordillera de los Andes ubicada en Colombia.

Las herramientas estadísticas utilizadas, buscaban encontrar una relación entre los parámetros morfométricos y la susceptibilidad a la torrencialidad, para este estudio analizaron 31 cuencas de la república de Colombia, en las cuales se tenía registro de afectaciones por este tipo de eventos extremos. Los parámetros morfométricos analizados fueron la red de drenaje, la geometría de la cuenca, textura del drenaje y las características del relieve.

Mediante el uso de Machine Learning realizaron el análisis, encontrando que los parámetros con mayor relación con la susceptibilidad a la problemática estudiada son el relieve y la textura del drenaje.

OBJETIVOS

GENERAL

Determinar el nivel de riesgo a crecidas que puede presentar la cuenca del río Guare en el municipio del Valle de San José de acuerdo con sus índices Morfométricos.

ESPECÍFICOS

- Analizar los componentes de límite de cuenca y cauce principal de la cuenca del río Guare
- Establecer los índices morfométricos (Coeficiente de compacidad, Índice de Forma, Razón Circular de Miller, Razón de Elongación de Schum,) e hidrológicos (Densidad de Drenaje, Extensión promedio de escorrentía, Densidad de Corrientes, Longitud Sinusoidal) de la cuenca de estudio
- Analizar el riesgo a crecidas que se pueden presentar dentro del área de estudio tomando como base los índices determinados

METODOLOGÍA

La población de este proyecto serían las 29 subcuencas que hacen conforman la cuenca del Río Fonce, el cual es uno de los más importantes ríos del departamento de Santander, uniéndose con el río Suárez para desembocar al río Sogamoso, y este último al río Magdalena. para este caso, la muestra consiste en la cuenca del río Guare, ubicada entre los municipios de Mogotes. Valle de San José, Coromoro y Charalá

Como objetos de observación, se estudiaron los parámetros morfométricos, topográficos e hidrológicos de la cuenca del río Guare, y respecto a la descripción de las variables que se tendrán en cuenta, como dependiente, el riesgo a crecidas de la cuenca, como independientes estarían el área, Perímetro, Densidad de drenaje, Orden del cauce principal, pendiente, precipitación, Tiempo de Concentración y caudal.

De acuerdo con el (DANE, 2018), la población rural del municipio corresponde aproximadamente al 65% de los 10165 habitantes del municipio, no existe un censo en el que se pueda establecer la cantidad de personas que se encuentran dentro de la zona de la cuenca del río Guare, sin embargo, al ubicarse el área de estudio en su mayoría dentro de este municipio, se estima que gran parte de los habitantes del lugar sean procedentes del mismo, por otra parte, de acuerdo con (Alcaldía Municipal de Mogotes, 2023), la principal actividad económica de la población rural se dedica a la siembra de caña de azúcar, café, frijol y fique, además de actividades de ganadería vacuna, fabricación de panela y explotación de materiales de arrastre para la construcción.

RECOLECTAR DATOS O INFORMACIÓN

La información necesaria para este estudio fue recolectada de las fuentes de información oficiales de Colombia, como lo son el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estadística Ambiental (IDEAM, 2023) y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2023).

Para el caso de la información hidrometeorológica, se obtuvieron los datos de los caudales de la estación conocida en la base de datos del IDEAM como “Puente Arco” identificada con el número 24027060, los datos obtenidos fue la de los caudales máximos, mínimos y medios con una periodicidad diaria desde el año 1992 hasta 2022.

De igual manera, se descargó la información pluviométrica para el mismo periodo de tiempo de las estaciones meteorológicas de la base de datos del IDEAM, de las estaciones correspondientes a los municipios de Valle de San José (24020140), Charalá (24020260), San

Joaquín (24030200) y Mogotes (240255505), así mismo, los datos encontrados son del día pluviométrico en un periodo de 30 años.

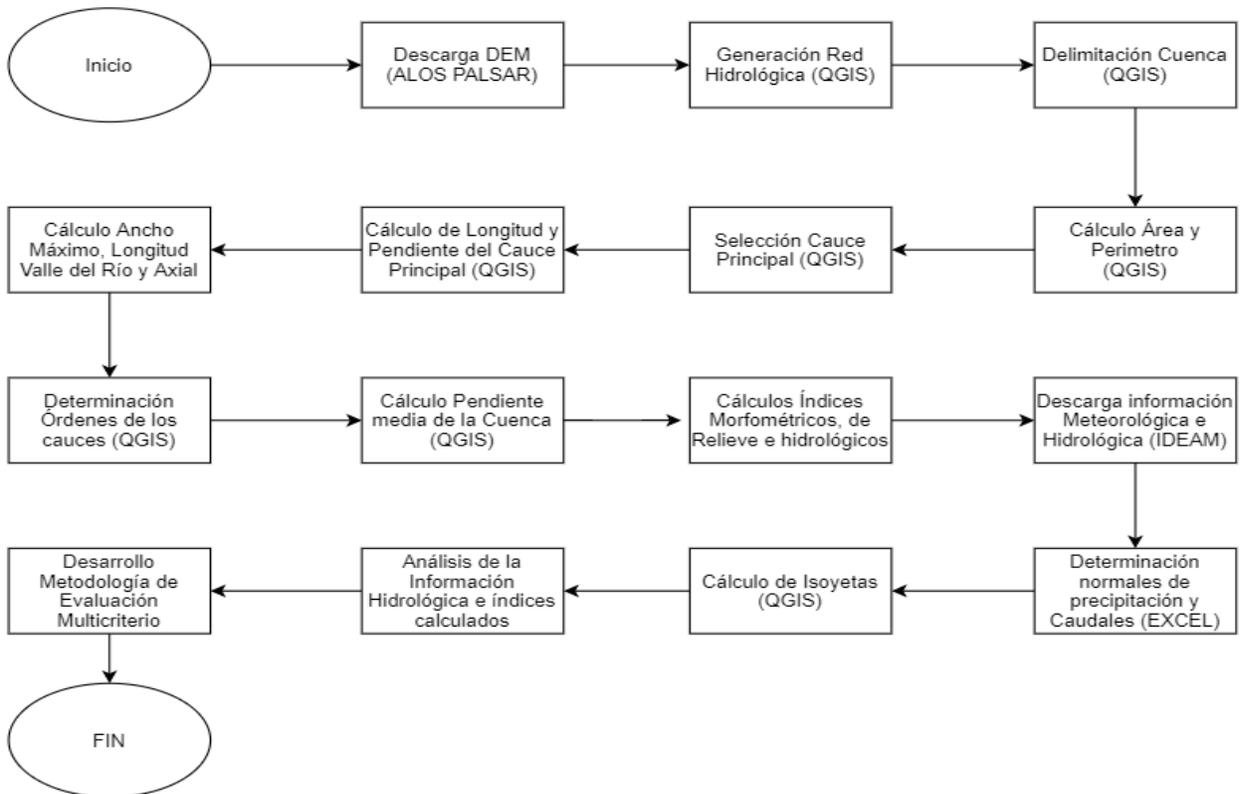
En cuanto a la información cartográfica, inicialmente se descargaron las planchas del IGAC desde el sitio web Colombia en mapas, sin embargo, por la ausencia de información de la zona de estudio, se descargaron modelos de elevación digital (DEM) por sus siglas en inglés, de la plataforma (ALOS PALSAR, 2023), obteniendo imágenes con una resolución de 15m, las cuales fueron sometidas a un procesamiento digital en un sistema de información geográfica al igual que lo realizó (Ahmed et al., 2022), en este estudio el paquete computacional usado es Quantum GIS (QGIS, 2023).

PROCESAMIENTO DE DATOS O INFORMACIÓN

Todo el procesamiento de la información correspondiente a delimitación de la cuenca, identificación del cauce principal, determinación de los órdenes de Horton de los cauces entre otros se realizaron con el software QGIS y en hojas de (Microsoft Excel, 2023), tal y como se muestra el procedimiento general en la Figura 3.

Figura 3

Procedimiento General



Fuente: Elaboración Propia

Inicialmente, al modelo digital de elevación se le hizo un ajuste de eliminación de sumideros, los cuales son pixeles que por inconvenientes al momento de registrar elevaciones la plataforma satelital puede quedar sin información, para esto dentro de la herramienta SAGA Next Gen, se utilizó el complemento “fill sinx Wang & Liu” del paquete Terreno – Hidrología.

Después de tener el nuevo DEM, se hizo un recorte a la zona de interés con la herramienta clip ráster del menú extraction raster, esto se realizó con el objetivo de disminuir los tiempos de espera al reducir el área de los procesos que realizaba el software.

Continuando con el procedimiento, y según la metodología utilizada por (Harinath & Raghu, 2013), en el DEM sin sumideros, se utilizó el complemento “Channel Network & Basins” del paquete Terrain – Channels de la herramienta SAGA Next Gen. En este caso, para los límites del “threshold”, se hicieron varias pruebas con diferentes valores en este apartado,

determinando que el mejor resultado se obtenía con un valor de cinco (5), ya que, con valores menores, se generaba una red de drenaje muy específica, llegando incluso a ser excesiva.

En cuanto al límite de la cuenca obtenido mediante el proceso anterior, se hizo una modificación ya que debido a la ubicación de la estación Puente Arco, la desembocadura establecida por el software era diferente a la de este estudio, por tal razón, se hizo una disminución del área de la delimitación, eliminando un afluente de los que generó el procesamiento del SIG. Esto con el objetivo de analizar solamente la cuenca cuyos afluentes son medidos por la estación hidrométrica del IDEAM.

El cauce principal fue generado basándose en la red de drenaje creada con el procesamiento anteriormente mencionado, uniendo los segmentos de los flujos que conformaban el canal con la mayor longitud. Para medir la longitud de la red de drenaje y el cauce principal, se abrió la tabla de atributos del archivo Shape de la red de drenaje, y mediante la calculadora de campos se utilizó el comando “\$length” del conjunto de geometría y este valor se dividió por 1000, para obtener el resultado en kilómetros.

Para el cálculo del área de la cuenca, de acuerdo con el procedimiento realizado por (Harsha et al., 2020), en la tabla de atributos del shape “límite Cuenca” se habilitó la edición y posteriormente se ingresó a la calculadora de campos, en donde se usó la expresión “\$area” de la sección geometría dividiendo este valor en 1'000.000 para obtener los resultados en kilómetros, de igual manera se usó el comando “perimeter” del mismo conjunto de herramientas y se dividió en 1000 para obtener el perímetro de la cuenca en kilómetros.

Los valores de área, perímetro, longitud del cauce principal, orden de los cauces y longitud de cada uno de ellos fueron introducidos a una hoja de Excel en donde se hicieron los cálculos de todos los índices morfométricos.

Para determinar la pendiente media de la cuenca, basándose en el procedimiento realizado por (Vera Rodríguez & Albarracín Calderón, 2017), se utilizó el DEM sin sumideros y en el menú Ráster, con la opción análisis, se usó la herramienta “Slope” generando un procesamiento de las elevaciones de la cuenca y generando un nuevo archivo ráster con información de las pendientes, posteriormente, se utilizó la herramienta “Zonal Statistics” para

que mediante el cálculo de las pendientes ponderadas se determinara la pendiente media de la cuenca.

De la información meteorológica e hidrometeorológica, utilizando Microsoft Excel se buscaron los caudales y precipitaciones promedios interanuales y mensuales, tanto de los caudales medios diarios, como de los máximos y mínimos diarios, de igual forma se determinaron los caudales máximos de todos los caudales máximos e igualmente con los mínimos. Los resultados se resumieron en tablas de Excel y gráficas de línea tanto mensual como anual, para establecer los comportamientos de estas variables de forma independiente y buscando identificar la influencia de la precipitación en los caudales

Para el análisis de riesgo a crecidas se utilizó la metodología de Análisis Evaluativo Multicriterio (AEM) se procedió a seguir el procedimiento sugerido por (Rogers et al., 2000), en el cual primero se deben identificar los principales parámetros a evaluar en el estudio realizado, y posteriormente a cada uno de estos desglosarlos en sus diferentes componentes.

Inicialmente, y de acuerdo con (Noriega et al., 2011), los parámetros tendrán un valor porcentual asignado por los investigadores, dependiendo de la relevancia que tenga cada uno de estos respecto al fenómeno evaluado y en comparación con los demás parámetros. Después de esto, a cada uno de los componentes de cada parámetro evaluado, se les asigna un puntaje establecido también por el usuario, el cual será sumado obteniendo el puntaje total del parámetro.

Con el puntaje de cada parámetro, a cada uno de estos se les aplica el porcentaje asignado en cuanto a relevancia con respecto al fenómeno evaluado y al sumar dichos resultados se obtiene el valor final de la evaluación. Posteriormente, para establecer un rango de clasificación, se establecen los puntajes máximos y mínimos que pueden ser obtenidos en la evaluación, y el rango entre estos dos valores será dividido en el número de intervalos que se desea aplicar en la clasificación.

De esta forma se obtienen resultados basados en la relevancia de ciertos aspectos con respecto al tema de interés, permitiendo también generar una jerarquización entre los elementos evaluados entre sí.

RESULTADOS

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Inicialmente, se hizo la delimitación de la cuenca del río Guare, realizando el procedimiento establecido en QGIS y descrito en la sección de metodología, utilizando el modelo digital de elevaciones obtenido de la plataforma ALOS PALSAR, estableciendo de esta forma, que los límites de la cuenca a estudiar son los mostrados en la Figura 4.

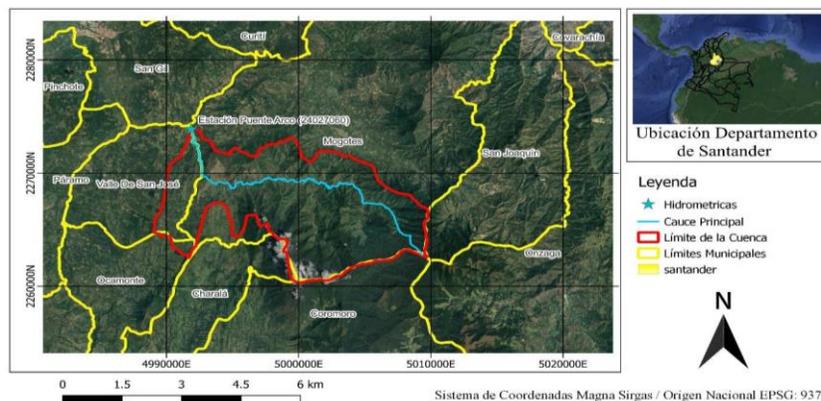
Es importante establecer que de acuerdo con los límites de la cuenca, esta se encuentra dentro de 6 municipios del departamento de Santander, sin embargo, la mayor parte del área de la misma se encuentra dentro del municipio de Mogotes en un 86%, un 10.8% del área de la cuenca está dentro del Valle de San José, incluyendo su desembocadura y el punto de estudio, en donde se encuentra ubicada la estación hidrometeorológica del IDEAM, conocida como Puente Arco.

En menor proporción, un 1.3% de la cuenca está dentro de la Jurisdicción de Ocamonte, 0.6%, 0.4% y 0.04 dentro de los límites de los municipios de Coromoro, Charalá y San Joaquín respectivamente.

Figura 4

Ubicación de la subcuenca Río Guare

Ubicación Cuenca del Río Guare



Fuente: Elaboración Propia

Dentro de las principales características geométricas se determinaron el área, perímetro y Longitud del cauce principal, las cuales se pueden observar en la Tabla 1, en donde se obtuvo un área de 159.3 Km^2 , la cual, de acuerdo con la clasificación propuesta por (Ortíz Vera, 2004), se puede definir que la zona de estudio pertenece es una subcuenca, de la cual, se pueden esperar ordenes de cauces de entre 4 y 5.

Tabla 1

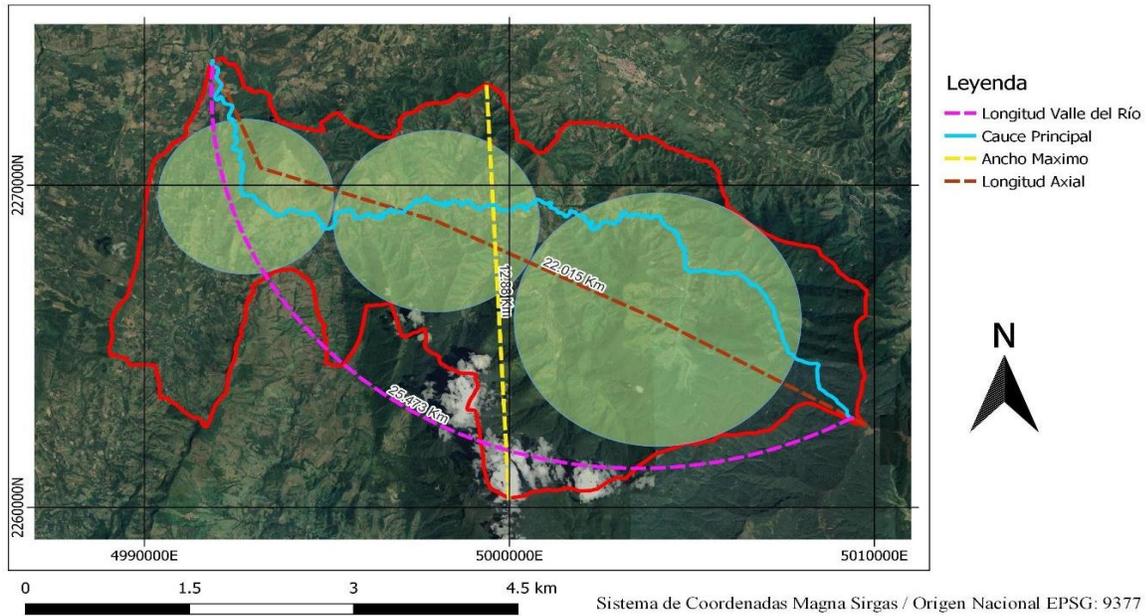
Características geométricas de la Subcuenca Río Guare

Parámetro	Valor
área (Km^2)	159.30
Perímetro (Km)	76.00
Longitud Cauce Principal (Km)	31.76

Además de la medición de las características anteriores, se realizó la determinación de lo que serían la Longitud Axial, Longitud Valle del Río y Ancho Máximo de la cuenca las cuales se muestran en la Figura 5, en este caso, debido a la forma de la cuenca y respecto a la ubicación del nacimiento y la desembocadura, para la longitud axial, se tuvo que usar el método en el cual se dibujan círculos dentro del área de la cuenca y la línea axial debe pasar por sus epicentros, hasta llegar de un extremo a otro de la cuenca.

Figura 5

Longitudes Axial, Valle del río y Ancho Máximo Subcuenca Río Guare



Fuente: Elaboración Propia

Al realizar la respectiva medición de cada una de las dimensiones establecidas en la cuenca, se obtuvieron los valores mostrados en la Tabla 2, valores con los cuales se pudo iniciar a determinar algunos de los índices morfométricos más utilizados para la caracterización de las cuencas hidrográficas.

Tabla 2

Valores de Longitudes Axial, Valle del Río y Ancho Máximo Subcuenca Río Guare

Parámetro	Valor
Ancho Máximo (km)	12.88
Longitud Axial (km)	22.02
Longitud Valle del Río (Km)	25.473646

Inicialmente, se procedió a calcular el ancho promedio de la cuenca, para lo cual se utilizó la relación entre el área y la Longitud del cauce principal, obteniendo un valor de 5.02 km

para toda la cuenca, posteriormente, se calcularon el índice de compacidad, índice de forma, razón circular de Miller y razón de elongación de Schum, los cuales permiten establecer un tipo de clasificación de la cuenca en función del área, ancho, perímetro y longitud del cauce principal. Los resultados obtenidos, se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3

Índices Morfométricos Subcuenca Río Guare

Índice	Valor	Clasificación
Ancho Promedio (Km)	5.02	
Coefficiente de Compacidad	1.70	Oval Oblonga a Rectangular Oblonga
Índice de Forma	0.16	
Razón Circular de Miller	0.35	Alargada o Rectangular
Razón de Elongación de Schum	0.45	Alargada y estrecha

Con los resultados de los índices morfométricos, se establece que el ancho promedio de la cuenca es de 5.02 Km, que de acuerdo al índice de forma de 0.16, la cuenca tiene una tendencia a ser más alargada que ancha, lo cual se confirma con la razón circular de Miller y la razón de elongación de Schum, las cuales, de acuerdo con los resultados obtenidos clasifican la cuenca como una de tipo alargada, en cuanto al coeficiente de compacidad la cuenca se podría clasificar como oval oblonga a rectangular oblonga.

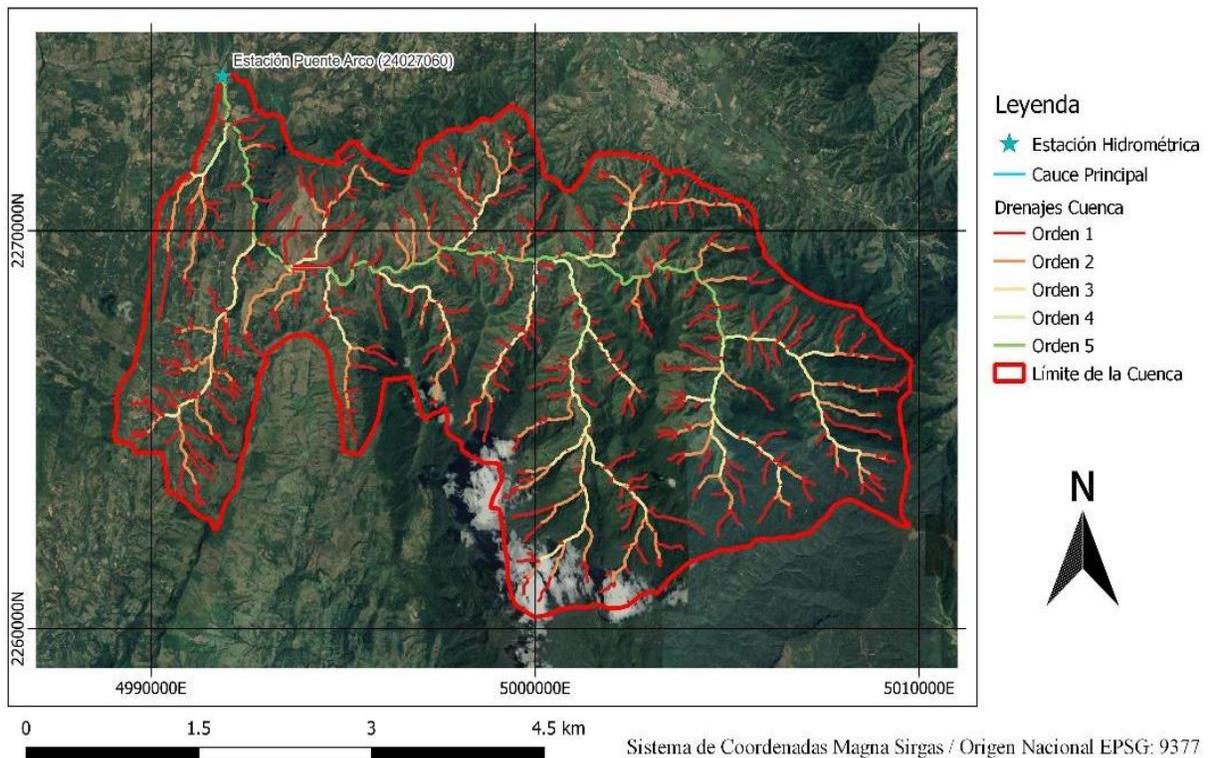
De acuerdo con los valores de los índices de forma calculados y su respectiva clasificación como una cuenca alargada, se puede establecer de acuerdo con lo discutido por (Hamad, 2020), que los tiempos de concentración de la cuenca serán entre moderados y largos, también, comparando los documentos citados por (Duan et al., 2022), el tiempo de concentración esperado según la forma de la subcuenca, se puede relacionar con un bajo riesgo ya que estos disminuyen la posibilidad de presentarse crecidas súbitas en el cauce principal, debido a que el agua deberá recorrer una distancia longitudinal bastante larga, lo cual hará que el tiempo entre la generación del caudal pico y su llegada a la desembocadura de la cuenca sea extenso.

Según el análisis realizado por (Singh et al., 2021), la forma de la cuenca permite suponer un posible resultado de los tiempos de concentración, y con estos una potencial respuesta de los escurrimientos generados por lluvias intensas dentro de las zonas de estudio, con esto, se reafirma lo establecido por (Ghasemlounia & Utlu, 2021), y al aplicarlo a la subcuenca del río Guare, se confirma un posible tiempo de concentración que con respecto al riesgo de crecidas favorezca las condiciones de riesgo bajo.

En cuanto a los índices hidrológicos, se procedió a hacer la clasificación de los cauces, con el método de Horton, obteniendo como resultado la figura 6., identificando que el cauce principal de la subcuenca es de orden 5, lo cual coincide con lo esperado de acuerdo con la clasificación de la subcuenca según (Ortíz Vera, 2004).

Figura 6

Clasificación del orden de los cauces de la Subcuenca Río Guare



Fuente: Elaboración Propia

Además de esto, se hizo el conteo y medición de cada uno de los cauces de acuerdo con su orden para poder presentar la Tabla 4, información con la cual se establecieron otro tipo de índices que permiten definir el comportamiento del escurrimiento dentro de la subcuenca.

Para conocer la bifurcación de la red de drenaje, se hizo la Figura 7, en la cual se graficó el logaritmo de la cantidad de corrientes por cada uno de los órdenes (Log Ni), para obtener una ecuación de la recta y con la pendiente de esta poder determinar cuántas corrientes se deben pasar en promedio para aumentar el orden de estas.

Tabla 4

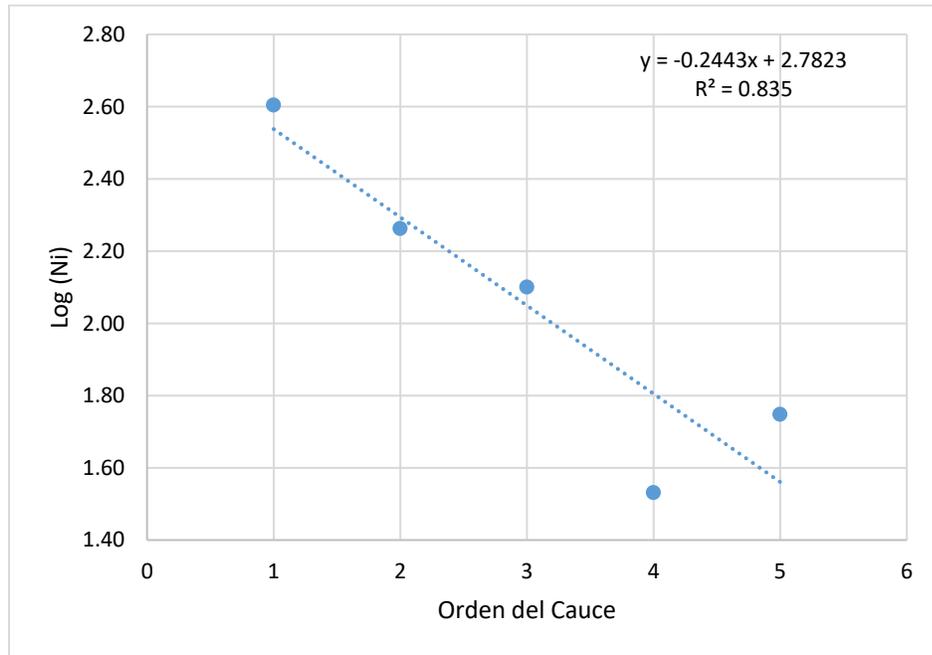
Datos Orden de la Red Hidrográfica Subcuenca Río Guare

Orden	Cantidad	Longitud (Km)
1	402	173.45
2	183	75.62
3	126	44.96
4	34	11.90
5	56	21.924
Total	801	327.84

Obteniendo como resultado que, en promedio, se deben recorrer 1.76 corrientes para aumentar el orden de estas, lo cual, de acuerdo con (Yang et al., 2022), cuando la relación de bifurcación obtiene resultados cercanos a 2, como en este caso, el comportamiento del hidrograma de escurrimientos presentará picos poco importantes, lo cual, se traduce en una baja posibilidad de crecidas durante eventos de precipitación.

Figura 7

Relación de bifurcación Subcuenca Río Guare



Fuente: Elaboración Propia

Otro de los índices relacionados con el escurrimiento es la relación de longitud, en la cual, se determina la distancia que debe recorrer en promedio un cauce para poder aumentar su orden, para esto, se generó la Figura 8, la cual se realizó en esta ocasión, con el logaritmo de la longitud de los cauces por cada uno de sus órdenes, paso seguido, al igual que con la relación de bifurcación, se calculó la relación de longitud, obteniendo como resultado un valor de 1.82, lo cual indica que en promedio, los cauces cambian de orden cada 1.82 Km.

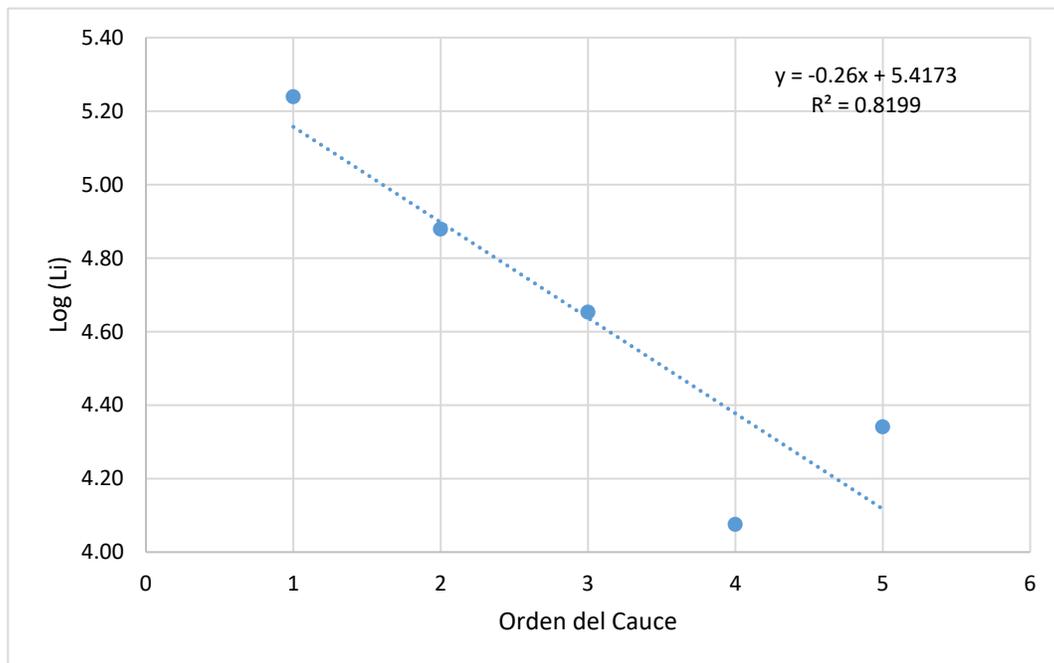
Con el resultado que se obtuvo, y basándose en lo expuesto por (Campo et al., 2012), las relaciones de longitud con valores menores a 3, establecen que hay una mayor energía concentrada de forma brusca en los cauces, lo cual permite inferir que, combinando la relación de longitud y bifurcación, la subcuenca del río guare tendría pequeños picos de caudal en su hidrograma en los cuales se concentraría una gran energía de flujo.

Es importante resaltar también, que de acuerdo con (Rawat et al., 2021), la cantidad de bifurcaciones también influye en la cantidad de partículas transportadas por procesos erosivos, las cuales, al confluir en el cauce principal, aumentan la concentración de sedimentos, que en las partes bajas de la cuenca terminan por depositarse al tener una disminución de velocidad de ocasionada por la disminución de la pendiente en la zona de la desembocadura.

Lo anterior contribuye a que se modifiquen aspectos de la geometría del cauce y con esto la capacidad que este tiene para permitir el flujo de agua, además de generar variaciones en la velocidad del fluido, la suma de estos dos factores puede generar en el peor de los casos una susceptibilidad mayor a desbordamientos del cauce.

Figura 8

Relación de Longitud Subcuenca Río Guare



Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 5, se presenta un resumen de los índices calculados correspondientes a los cauces, en el caso de la densidad de drenaje, se encontró que por cada kilómetro cuadrado de la cuenca existen 2.06 Km de cauces, equivalentes de acuerdo con la densidad de corrientes a 5.03

corrientes por cada kilómetro cuadrado, por último, se establece que la longitud sinusoidal del cauce principal es de 1.25, lo cual lo clasifica como tipo recto.

Tabla 5

Índices del drenaje de la Subcuenca Río Guare

Índice	Valor
Densidad Drenaje	2.06
Extensión Promedio de Escorrentía	121.48
Densidad de corrientes	5.03
Longitud Sinosoidal	1.25
Relación de Bifurcación	1.76
Relación de Longitud	1.82

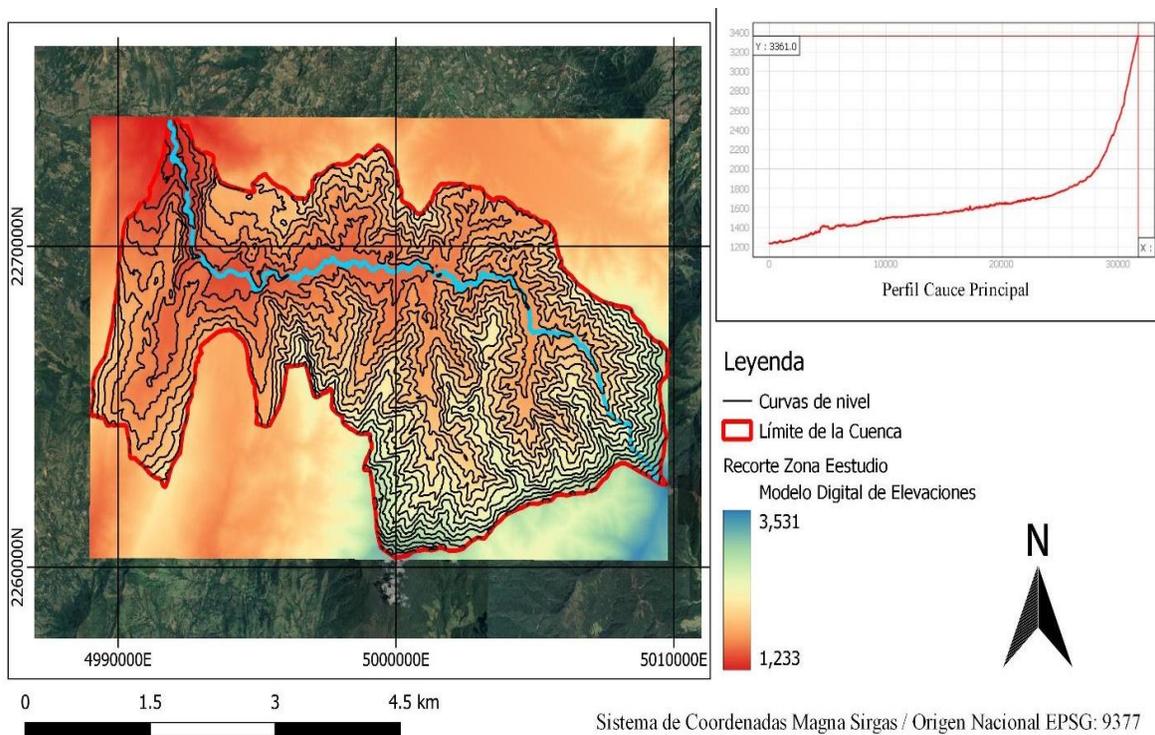
De acuerdo con (Tariq et al., 2022), un valor de densidad de drenajes mayor hace que la cuenca hidrográfica sea más propensa a presentar eventos de crecidas en su cauce, esto ocasionado porque el agua de la escorrentía superficial puede encontrar de una forma más fácil un cauce en el cual fluir de forma rápida, y como describen (Domínguez-Pérez & Mercado-Fernández, 2020), esto ocasiona un proceso de disminución de la cantidad de agua superficial que puede ser absorbida por las abstracciones propias de la cuenca, dentro de las cuales se encuentran la infiltración y evaporación. Para el caso de la subcuenca del río Guare, se considera que la densidad de drenaje es baja, permitiendo que el agua de escorrentía tenga una interacción con el suelo que favorezca la infiltración, haciendo que las posibilidades a crecidas sean menores.

En cuanto a los aspectos del relieve, la distribución de elevaciones se puede observar en la Figura 9, identificando que el punto de aforo o desembocadura de la cuenca se encuentra en una elevación de 1233 m.s.n.m., y la parte más alta tiene una elevación de 3531 m.s.n.m., además de esto, se observa una distribución entre curvas de nivel bastante simétrica en donde se permite definir la parte alta de la cuenca y continua, permitiendo estimar que en dicha zona se encuentran las mayores variaciones de pendientes, caso contrario a las partes media y baja, en donde el espacio entre curvas de nivel es mucho mayor, mostrando que la pendiente tendría una disminución considerable y se vuelve más uniforme en estas secciones de la cuenca.

En cuanto al perfil de elevaciones del cauce principal, se observa una marcada acentuación en la zona cercana al nacimiento del mismo, pero después, la elevación del terreno disminuye considerablemente, permitiendo identificar también que de acuerdo con la clasificación propuesta por (Buffington & Montgomery, 2013), el cauce principal es un cauce que se encuentra en una etapa de transición entre juventud y madurez, esto debido a que en su parte alta, presenta pendientes superiores al 10%, pero se identifican, la formación de pequeños meandros en las partes bajas, que aún no se acentúan sus curvas, pero que con el paso del tiempo, los procesos de erosión y profundización del cauce harán que se formen de una forma más marcada.

Figura 9

Topografía de la cuenca y Perfil del Cauce Principal Subcuenca Río Guare



Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 6, se encuentra el resumen de los índices de relieves, en este caso los más relevantes son tanto la pendiente media de la cuenca, la cual se determinó utilizando el método de compensación de áreas, obteniendo un valor de 46.63%, lo cual se considera de acuerdo con

la clasificación de (Ortíz Vera, 2004), como un relieve fuerte, la cual ocasiona que predominen los procesos de erosión en la subcuenca, generando que haya un mayor transporte de sedimentos de las partes altas hacia la parte baja, en donde se depositarán y en un futuro empezarían a modificar la geometría del cauce.

Tabla 6

Resumen Componentes Topográficos Subcuenca Río Guare

Índice	Valor
Elevación menor (m.s.n.m.)	1233.00
Elevación Mayor (m.s.n.m.)	3531.00
Elevación Media Cuenca (compensación de Áreas) (m.s.n.m.)	1966.63
Altura de la Cuenca (m)	2298.00
Altura Media de la Cuenca (m)	733.63
Pendiente media de la cueca (compensación de áreas) (%)	46.63
Pendiente del Cauce Principal (Taylor&Schwartz) (%)	17.6

En cuanto a la pendiente del cauce principal, calculada por el método de Taylor & Schwartz, se estima que el río Guare tiene una pendiente media de 17.6%, que comparada con la pendiente media de la subcuenca es considerablemente menor, usando la misma clasificación de (Ortíz Vera, 2004), se definiría como un cauce accidentado, sin embargo, el trabajo realizado por (Dung et al., 2020), establece que la influencia de la pendiente del cauce principal en las crecidas es la del incremento en el volumen de escurrimiento y la velocidad con la que este fluye.

De lo anterior y según los resultados presentados por (Paola gracia rojas et al., 2018), se obtiene que, para cauces con pendientes altas, el volumen de escurrimientos será mucho mayor y con más velocidad que en aquellos en los que la pendiente es más baja, por tal motivo, para la zona de estudio del Río Guare, se podría considerar un riesgo moderado a las crecidas de acuerdo con la pendiente del cauce principal tal u como lo describe (Quesada-Román, 2017).

Para el cálculo del tiempo de concentración, se usaron los métodos de Kirpich, Témez, California Culverts Practice y Giandotti, teniendo en cuenta que en cada uno de estos modelos se utilizan diferentes variables como la pendiente, área, altura media de la cuenca, longitud del cauce principal entre otras, se decidió hacer el cálculo con cada una de estas.

En los resultados obtenidos que se muestran en la Tabla 7, con el método de Témez se obtiene un tiempo de concentración bastante diferente a los demás métodos, en los cuales, aunque el de Kirpich muestra una diferencia esta no se aleja tanto a los otros dos métodos, por tal motivo, para establecer el tiempo de concentración de la subcuenca, se decidió generar un promedio entre esos 3 resultados, obteniendo así un resultado final de 2.32 horas.

Tabla 7

Resumen Cálculos Tiempo de Concentración Subcuenca Río Guare

Formula	TC (horas)	Tc (Minutos)
Kirpich	1.51	90.898
Témez	5.56	333.525
California Culverts Practice	2.69	161.557
Giandotti	2.77	165.947
Promedio (Kirpich, C.C.P, Giandotti)	2.32	139.468
Lag Time (tiempo de retraso)	1.39	83.681

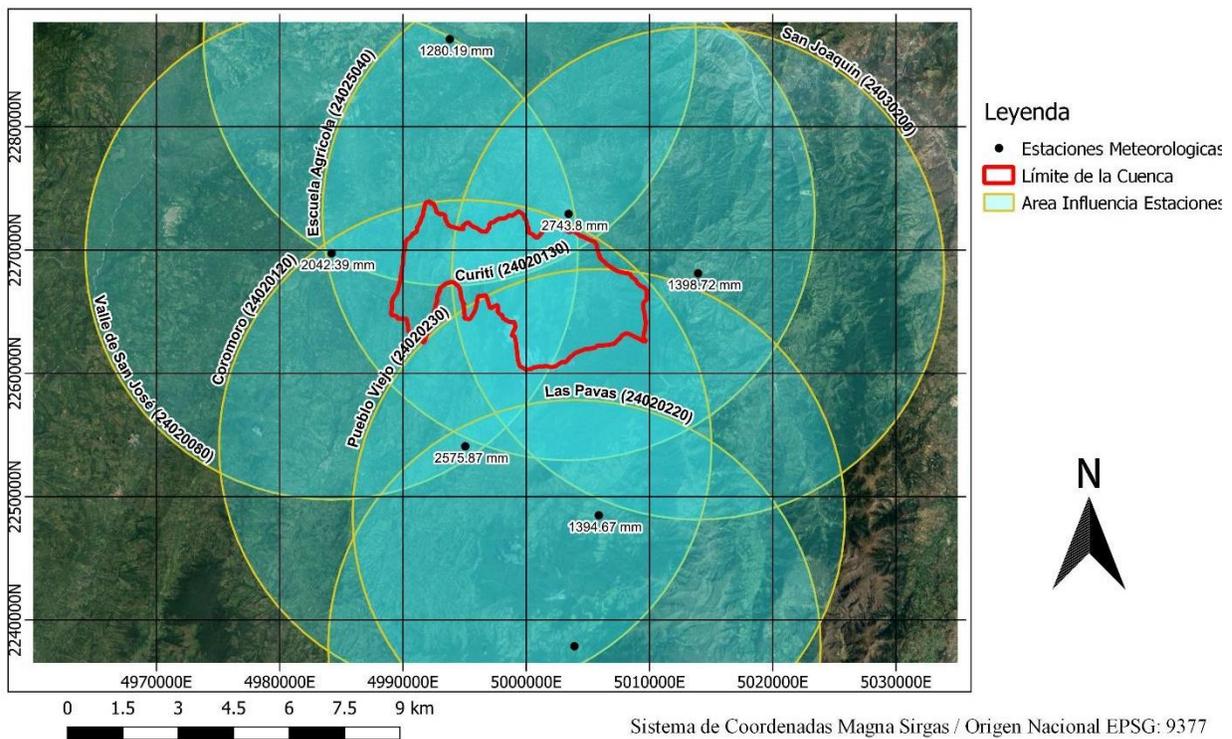
En cuanto al riesgo a crecidas basándose en el tiempo de concentración de la cuenca y de acuerdo con lo expuesto por (Kuksina & Golosov, 2020), los tiempos de concentración cortos hacen más propensas a las cuencas hidrográficas a los aumentos súbitos de caudal, y dicho fenómeno se suele presentar en cuencas de ríos pequeños, con áreas menores a 1000 Km^2 , sin embargo también es importante tener en cuenta que hay un tiempo de retraso en el cual el pico del pluviograma se ve en el tránsito del caudal en el río, en este caso, para la subcuenca del río Guare corresponde a un tiempo de 1.39 horas, haciendo que el riesgo a presentar este tipo de eventos sea de tipo moderado por tiempos de concentración y de retraso relativamente cortos.

Para determinar el comportamiento de la precipitación y los caudales en la subcuenca, utilizando la información obtenida del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), en un periodo de 30 años, de 1992 a 2022 con un intervalo de medición diario.

La subcuenca del río Guare se encuentra dentro del radio de influencia de 6 estaciones meteorológicas, como se puede observar en la Figura 10.

Figura 10

Estaciones Meteorológicas y Área de Influencia (20 km)



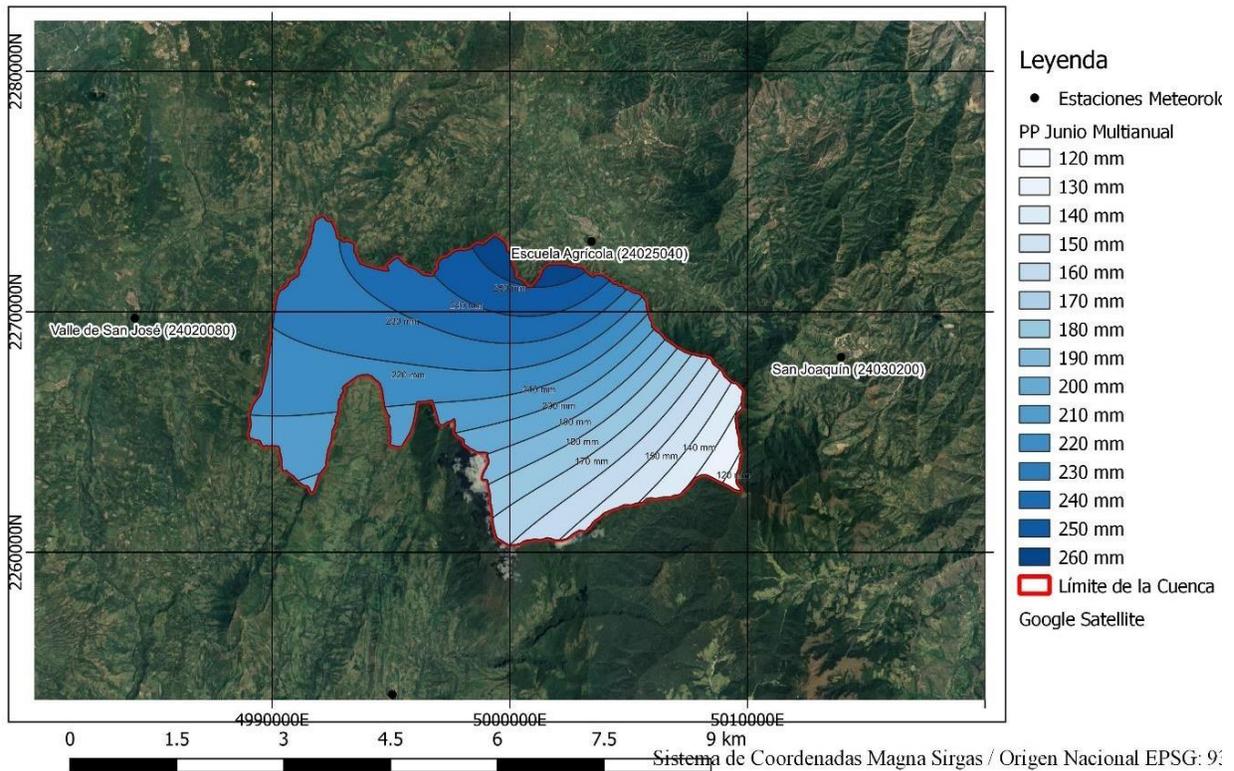
Fuente: Elaboración Propia

Durante el procesamiento de la información de precipitaciones diarias en el periodo mencionado, se evidenció una variación considerable entre los valores de lluvias medias interanuales, por tal motivo, se decidió estimar la precipitación de la cuenca utilizando el método de isoyetas el cual fue también utilizado en el estudio realizado por (Cruz Torrez & Cheng Lugo, 2019), las cuales se hicieron para establecer las precipitaciones acumuladas mensuales como se

muestra en la Figura 11, con la cual se puede obtener una mejor distribución dentro de la subcuenca de las lluvias registradas por las estaciones meteorológicas, este procedimiento se realizó con los valores de precipitación mensual interanual de las 6 estaciones meteorológicas, obteniendo las respectivas isoyetas para cada mes.

Figura 11

Isoyetas Subcuenca Río Guare mes de junio

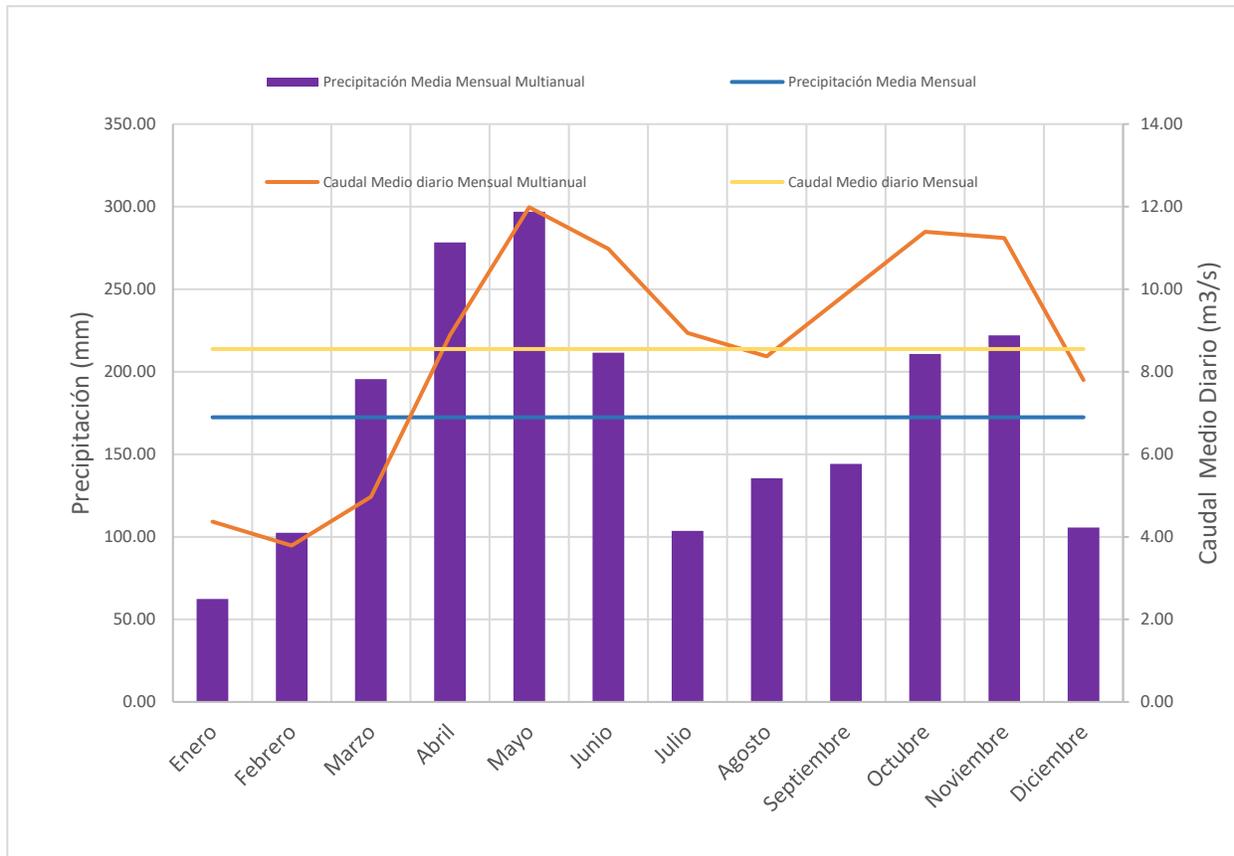


Fuente: Elaboración Propia

Al terminar de hacer el procesamiento de las isoyetas se calculó la precipitación media de la subcuenca para cada mes, y con estos la precipitación media interanual, en cuanto al comportamiento de los caudales, para el mismo periodo de tiempo de las precipitaciones y en el mismo intervalo de mediciones, se obtuvieron los datos de caudales medios diarios de la estación hidrométrica “Puente Arco” con código del IDEAM 24027060, estos datos se promediaron de forma mensual interanual para obtener en conjunto con la precipitación la Figura 12.

Figura 12

Comportamiento de la precipitación y caudal medio multianuales Cuenca Río Guare



Fuente: Elaboración Propia

Se puede establecer que, durante el año, existen dos temporadas en las que la precipitación presenta un aumento considerable con respecto a los demás meses, la primera siendo en los meses de abril, mayo y junio, y la segunda en octubre y noviembre, de todo el año, mayo es el mes con mayor cantidad de precipitación con un valor estimado de 296.92 mm, seguido por abril con 278.30 mm, de lo cual se infiere que la temporada más fuerte de lluvias es la del primer semestre del año.

También, de acuerdo con la Tabla 8, se establece que la precipitación media interanual de la subcuenca del Río Guare es de 2068.88 mm/año, y que el caudal medio diario es de aproximadamente 8.55 m³/s.

Tabla 8*Precipitación Media Mensual Multianual Subcuenca Río Guare*

Mes	Precipitación Media (mm)	Caudal Medio diario Mensual (m3/s)
Enero	62.41	4.37
Febrero	102.45	3.79
Marzo	195.53	4.97
Abril	278.30	8.89
Mayo	296.92	11.99
Junio	211.54	10.98
Julio	103.59	8.94
Agosto	135.55	8.37
Septiembre	144.17	9.88
Octubre	210.78	11.39
Noviembre	222.03	11.24
Diciembre	105.62	7.80
Total, Anual	2068.88	8.55

Teniendo en cuenta el régimen de lluvias y caudales dentro de la subcuenca, y de acuerdo con (Basara, 2001), cuando la humedad del suelo es alta, los poros del terreno se encuentran saturados de agua y esto hace que la capacidad de infiltración disminuya, haciendo que se genere un mayor volumen de escorrentía durante una precipitación, por tal motivo se puede establecer que el mes de mayo es en el que mayor riesgo de crecidas hay, debido a que las precipitaciones del mes de abril han saturado el suelo sumado a las continuas lluvias que se generan dentro del mismo mes de mayo, haciendo que se genere una mayor cantidad de agua superficial, lo cual se evidencia con el caudal medio diario, el cual para el mismo mes, corresponde al mayor de todos los meses.

Para la evaluación de riesgo a crecidas utilizando la metodología de análisis valorativo multicriterio, lo primero que se hizo fue determinar los parámetros que se iban a tener en cuenta

para la evaluación del riesgo, en este caso se hizo la evaluación en función de la morfometría, el drenaje, Relieve y el tiempo de concentración los cuales fueron calculados y analizados durante el desarrollo del proyecto.

En el caso de cuanto será la relevancia que tendrá cada parámetro, se decidió dar un 25% a cada uno, para completar un 100% ya que, según la bibliografía consultada, cada uno de estos índices intervienen de una u otra forma en la posibilidad de crecidas.

Cada parámetro está compuesto por diferentes componentes, los cuales fueron calculados u obtenidos mediante el análisis de la subcuenca, la sumatoria del puntaje que se dio a cada uno de estos es el valor total del componente, el cual será multiplicado por su porcentaje de relevancia, para obtener el nivel de riesgo de dicho parámetro.

Para calificar el nivel de riesgo de cada componente se asume una calificación de números enteros del 1 al 3, siendo 1 un riesgo bajo, 2 Moderado y 3 Riesgo Alto, este Rango de valores se tomó de dicha forma para evitar que se genere algún tipo de desviación a la hora de ingresar valores decimales, lo cual se vería afectado por la subjetividad.

Tabla 9

Composición de la evaluación de Riesgo a crecidas por parámetro

Parámetro	Componentes	Fracción	Puntaje Mínimo	Puntaje Máximo	Fracción Puntaje Mínimo	Fracción Puntaje Máximo
Morfometría	4	0.25	4	12	1	3
Drenaje	3	0.25	3	9	0.75	2.25
Relieve	2	0.25	2	6	0.5	1.5
Tiempo de Concentración	1	0.25	1	3	0.25	0.75
		Total	10	30	2.5	7.5

En la Tabla 9, se muestra el cálculo de los puntajes máximos y mínimos que se podrían obtener aplicando este método de evaluación, siendo el mínimo posible 2.5, en el cual todos los

componentes tuvieran el valor de 1 correspondiente a un riesgo a crecidas bajo, caso contrario, el valor máximo posible sería de 7.5 caso en el cual, todos los componentes tienen un valor de 3 lo cual denota un alto riesgo a crecidas.

Posteriormente se hizo el cálculo de los intervalos del resultado final, siendo la diferencia entre el valor máximo y mínimo posible igual a 5, se dividió en 3 para establecer niveles de riesgo bajo, moderado y alto, tomando como referencia los rangos con los cuales (Smith et al., 2005) evaluaron la vulnerabilidad ante amenazas naturales, obteniendo un valor de 1.67, valor que fue tomado como el rango entre intervalos tal y como se observa en la Tabla 10.

Tabla 10

Intervalos de Clasificación de Riesgo

Intervalo	Clasificación de Riesgo
2.5 a 4.17	Bajo
4.17 a 5.84	Moderado
5.64 a 7.5	Alto

Habiendo establecido el método de evaluación y la clasificación de riesgo de acuerdo con la metodología aplicada, se procedió a generar la evaluación basada en los resultados obtenidos de los índices morfométricos, hidrológicos, de relieve y tiempo de concentración y el efecto que estos tienen en la presencia o no de crecidas según la bibliografía consultada en el documento y descrita en los puntos anteriores de este documento, de tal forma se muestra en la Tabla 11 el resultado de la evaluación del riesgo.

Tabla 11*Evaluación del riesgo a crecidas de acuerdo con los índices evaluados*

Parámetro	Componente	Puntaje
morfometría (0.25)	Coeficiente de Compacidad	1
	índice de Forma	1
	Razón Circular de Miller	1
	Razón de elongación	1
Drenaje (0.25)	Densidad de Drenaje	1
	Longitud Sinusoidal	3
	Relación de Longitud	1
Relieve (0.25)	Pendiente Media Cuenca	3
	Pendiente del cauce	2
Tiempo de Concentración (0.25)	Tiempo de Concentración	2
	Puntaje de Riesgo	4
	Clasificación del Riesgo	Bajo

Después de realizar la evaluación se encontró que el riesgo a crecidas en la subcuenca es bajo, sin embargo, se encuentra en un valor muy cercano a obtener un riesgo moderado, los componentes que incrementan este puntaje son la longitud sinusoidal y la pendiente media de la cuenca, las cuales tal y como se explicó en su respectiva sección facilitan los picos de caudales y las altas velocidades de escurrimiento.

Complementando el resultado del riesgo a crecidas basado en los índices evaluados, se tiene que, según el régimen hidrológico de la cuenca, la temporada correspondiente a los meses de abril, mayo y junio son en las cuales se tiene un mayor riesgo a la presencia de crecidas, por la frecuencia y cantidad de lluvias que se presentan en la zona de estudio.

CONCLUSIONES

De acuerdo con el primer objetivo específico, se hizo la respectiva delimitación de la cuenca hidrográfica e identificación del cauce principal, el procedimiento se realizó mediante el uso del Sistema de Información Geográfica QGIS y el procesamiento del modelo digital de elevaciones, obteniendo una cuenca con una extensión de 159.3 Km^2 la cual se clasifica como una subcuenca y un cauce principal con una longitud de 31.76 Km, además de tener una longitud axial de 22.02 Km y longitud del valle del río de 25.47 Km., también se verificó que el límite de la cuenca se encuentre en la zona de los parteaguas físicos del terreno.

En cuanto al segundo objetivo específico, se calcularon los índices morfométricos con los cuales se puede establecer que la zona de estudio corresponde a una subcuenca de forma alargada tendiendo a una forma rectangular, con un coeficiente de compacidad de 1.7, un índice de forma de 0.16 lo cual quiere decir que la cuenca es más larga que ancha. En cuanto a los índices relacionados al drenaje, la densidad de drenaje es de 2.06, lo cual permite concluir que tanto por su forma como por su drenaje, los flujos de agua superficial en la cuenca tienen un tiempo considerable para que sean abstraídos por el suelo y de esta forma disminuir el volumen de agua que llega al cauce principal.

Mediante la determinación de la pendiente media tanto de la subcuenca como del cauce principal, se obtuvieron resultados de 46.63% y 17.6% respectivamente, con lo cual se concluye que en general el área de estudio tiene un relieve accidentado, en el cual las velocidades de flujo superficial que se generen tendrían velocidad y van a encontrar mucho más rápido cauces a los cuales confluir ingresando a la red de drenaje de forma rápida, por otro lado, en cuanto al cauce principal, este tiene una pendiente moderada, en donde las velocidades de flujo son mucho menores comparadas a las de las laderas del terreno.

Se estableció que el tiempo de concentración de la subcuenca, con un valor de 2.32 horas y un tiempo de retraso de 1.39 horas el primero, siendo un valor esperado de acuerdo con la forma de la cuenca que al ser alargada tendría un tiempo de concentración largo a su vez con la densidad de drenaje se confirma que el tiempo que el agua de la precipitación está retenido en la cuenca es moderado y que además el tiempo de retraso en el que se evidencia el pico de precipitación como un pico de caudal es alrededor de 1 hora menos que el tiempo de

concentración, permitiendo inferir que la cuenca tendría una respuesta favorable en cuanto a disminución de riesgo de crecidas.

La precipitación media interanual de la subcuenca es de 2068 mm con un caudal diario medio interanual de $8.55 \text{ m}^3/\text{s}$ y el régimen hidrológico de la zona de estudio presenta un comportamiento bimodal, en el cual se presentan dos temporadas de incremento de lluvias, y otras dos en las cuales disminuyen considerablemente respecto a las anteriores, de dichas épocas de lluvia, la del primer semestre del año es la que presenta la mayor cantidad de precipitación, siendo mayo el mes más lluvioso con un promedio de 296.2 mm y Enero el mes más seco con 62.41 mm.

Por último, en cuanto al nivel de riesgo a crecidas de la cuenca para responder al tercer objetivo específico y al objetivo general de este proyecto, basándose en los índices morfométricos, de relieve, drenaje y el tiempo de concentración, se determinó que la subcuenca tiene un riesgo a crecidas bajo, debido a la distancia de recorrido de los flujos superficiales, y la densidad de drenaje que permiten que los escurrimientos tengan un mayor contacto con el terreno y disminuya el volumen de precipitación que escurre al cauce principal, y que el periodo de tiempo en el que se corre un mayor riesgo a crecidas es el de los meses de abril, mayo y junio, en los cuales hay lluvias más constantes y con mayor volumen de agua, por tal motivo, el suelo se encuentra con altos niveles de saturación favoreciendo la escorrentía superficial.

CONTRIBUCIONES Y RECOMENDACIONES

Este proyecto hizo la caracterización morfométrica de la subcuenca del río Guare. Estableciendo diferentes índices morfométricos que facilitan futuros estudios de la respuesta que puede tener esta cuenca ante algún tipo de evento extremo de tipo hidrometeorológico.

Además de esto, se tiene una evaluación del riesgo que existe a posibles crecidas en el área de estudio, permitiendo que los tomadores de decisiones tengan una base para realizar una clasificación de cuencas en las cuales es necesario intervenir en temas de gestión de riesgo,

implementando medidas de prevención, control y mitigación en aquellas que tengan un mayor nivel de riesgo en comparación a la subcuenca del río Guare.

La caracterización del régimen hidrológico se convierte en un antecedente que puede ser utilizado como referencia para futuros estudios enfocados al aprovechamiento del río Guare ya sea para fines de potabilización y suministro de agua a poblaciones cercanas, aprovechamiento para obras de tipo hidroeléctrico a pequeña escala u obras de almacenamiento de agua.

En cuanto a las recomendaciones, se sugiere realizar un análisis del riesgo en función al tipo y uso de suelo, ya que es un factor que por cuestión de ausencia de información e imposibilidad por falta de tiempo para generarla no se pudo evaluar y que ayudaría a complementar el estudio, además de recomendar generar modelos hidrológicos con la información de este proyecto y otra complementaria para poder corroborar los resultados de la respuesta hidrológica y el comportamiento de la cuenca en diferentes tipos de escenarios.

También es necesario evaluar la vulnerabilidad de las poblaciones aledañas a la fuente hídrica, para esto se deben realizar visitas de inspección al lugar, recorriendo la totalidad de la cuenca, además de solicitar información a los diferentes municipios dentro de los cuales se encuentra la cuenca, para conocer las medidas que tienen contemplados en sus planes de gestión de riesgo ante eventos extremos de tipo hidrológico.

Por último, observando los resultados del apartado de relieve, sería relevante realizar estudios de estabilidad de suelos y riesgos de erosión en masa, ya que, debido a la topografía accidentada de la zona y la frecuencia de lluvias, se podría tener algún tipo de riesgo ante este tipo de sucesos.

REFERENCIAS

Adnan, M. S. G., Dewan, A., Zannat, K. E., & Abdullah, A. Y. M. (2019). The use of watershed geomorphic data in flash flood susceptibility zoning: a case study of the Karnaphuli and Sangu river basins of Bangladesh. *Natural Hazards*, 99(1), 425–448. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03749-3>

- Ahmed, A., Alrajhi, A., Alquwaizany, A., Al Maliki, A., & Hewa, G. (2022). Flood Susceptibility Mapping Using Watershed Geomorphic Data in the Onkaparinga Basin, South Australia. *Sustainability (Switzerland)*, 14(23). <https://doi.org/10.3390/su142316270>
- ALOS PALSAR. (2023). *Digital Elevation Model*. <https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar/>
- Al-Saady, Y. I., Al-Suhail, Q. A., Al-Tawash, B. S., & Othman, A. A. (2016). Drainage network extraction and morphometric analysis using remote sensing and GIS mapping techniques (Lesser Zab River Basin, Iraq and Iran). *Environmental Earth Sciences*, 75(18). <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6038-y>
- Arango, M. I., Aristizábal, E., & Gómez, F. (2021). Morphometrical analysis of torrential flows-prone catchments in tropical and mountainous terrain of the Colombian Andes by machine learning techniques. *Natural Hazards*, 105(1), 983–1012. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04346-5>
- Basara, J. B. (2001). *SOIL MOISTURE OBSERVATIONS FOR FLASH FLOOD RESEARCH AND PREDICTION*. https://doi.org/10.1007/978-94-010-0918-8_22
- Buffington, J. M., & Montgomery, D. R. (2013). Geomorphic Classification of Rivers. In *Treatise on Geomorphology* (Vol. 9, pp. 730–767). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00263-3>
- Campo, A. M., Aldalur, N. B., & Fernández, S. N. (2012). Fluvial morphometry applied to an urban watershed in Ingeniero White, República Argentina. *Investigaciones Geográficas*, 77, 7–17. <https://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n77/n77a2.pdf>
- Coromoto Marín, H., Bravo Medina, C. A., & Manjarrez Fuentes, N. N. (2017). Análisis de vulnerabilidad ambiental de la cuenca alta del río San Pedro, estado Miranda, Venezuela. *Ciencia y Tecnología*, 10(2), 1–8. <https://doi.org/10.18779/cyt.v10i2.160>
- Cruz Torrez, H. E., & Cheng Lugo, L. N. (2019). *Análisis de riesgo hidrográfico por crecidas en la desembocadura de la quebrada Cay* [Universidad de Ibagué].

<https://repositorio.unibague.edu.co/server/api/core/bitstreams/f49e37bb-ecb6-4235-b1e7-d2237c161f46/content>

Departamento de Planeación Nacional Colombia. (2015). *Cifras de desastres naturales entre 2006 y 2014*. <https://www.dnp.gov.co/Paginas/3-181-muertos,-21-594-emergencias-y-12,3-millones-de-afectados-las-cifras-de-los-desastres-naturales-entre-2006-y-2014-.aspx>

Díaz Delgado, C., Esteller Alberich, M. V., & López-Vera, F. (2005). *Recursos hídricos conceptos básicos y estudios de caso en Iberoamérica*. Piriguazú.
<http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/rh01/rh01.pdf>

Domínguez-Pérez, F., & Mercado-Fernández, T. (2020). Potential infiltration and morphometry in the arroyo grande basin, sucre Colombia. *Revista Facultad de Ingenieria*, 96, 21–31.
<https://doi.org/10.17533/udea.redin.20191043>

Duan, L., Liu, C., Xu, H., Pan, H., Liu, H., Yan, X., Liu, T., Yang, Z., Liu, G., Dai, X., Zhang, D., Fu, X., Liu, X., & Lu, H. (2022). Susceptibility Assessment of Flash Floods: A Bibliometrics Analysis and Review. *Remote Sensing*, 14(21). <https://doi.org/10.3390/rs14215432>

Dung, N. B., Minh, D. T., Ahmad, A., & Long, N. Q. (2020). The role of relative slope length in flood hazard mapping using ahp and gis (Case study: Lam river basin, Vietnam). *Geography, Environment, Sustainability*, 13(2), 115–123. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2020-48>

El-Rawy, M., Elsadek, W. M., & De Smedt, F. (2023). Flood hazard assessment and mitigation using a multi-criteria approach in the Sinai Peninsula, Egypt. *Natural Hazards*, 115(1), 215–236.
<https://doi.org/10.1007/s11069-022-05551-0>

EPA. (2023). *Risk Assesment*. <https://www.epa.gov/risk/about-risk-assessment>

Esper Angillieri, M. Y. (2008). Morphometric analysis of Colangüil river basin and flash flood hazard, San Juan, Argentina. *Environmental Geology*, 55(1), 107–111.
<https://doi.org/10.1007/s00254-007-0969-2>

- Gardiol, M., Morresi, M. del V., Grand, L., Cardoso, M., & Finelli, N. (2021). Analisis de vulnerabilidad rio turbio. *REDER*, 5(1), 70–86.
<https://www.revistareder.com/ojs/index.php/reder/article/view/62/73>
- Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaria, A. M., Delgado, M. I., Senisterra, G. E., & Denegri, G. A. (2011). Vulnerabilidad ambiental en cuencas hidrográficas serranas mediante SIG. *Multequina*, 20(1), 3–13. <http://www.scielo.org.ar/pdf/multeq/v20n1/v20n1a01.pdf>
- Ghasemlounia, R., & Utlu, M. (2021). Flood prioritization of basins based on geomorphometric properties using principal component analysis, morphometric analysis and Redvan's priority methods: A case study of Harşit River basin. *Journal of Hydrology*, 603.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127061>
- Guidolini, J. F., Ometto, J. P. H. B., Nery, T. D., Arcoverde, G. F. B., & Giarolla, A. (2020). Hydro-geomorphological characterization of the Rio Grande Basin, Brazil, using geospatial approach. *Sustainable Water Resources Management*, 6(5). <https://doi.org/10.1007/s40899-020-00454-z>
- Hamad, R. (2020). Multiple Morphometric Characterization and Analysis of Malakan Valley Drainage Basin Using GIS and Remote Sensing. *American Journal of Water Resources*, 8(1), 38–47. <https://doi.org/10.12691/ajwr-8-1-5>
- Harinath, V., & Raghu, V. (2013). Morphometric Analysis using Arc GIS Techniques A Case Study of Dharuvagu, South Eastern Part of Kurnool District, Andhra Pradesh, India. In *International Journal of Science and Research* (Vol. 2, Issue 1). <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2>
- Harsha, J., Ravikumar, A. S., & Shivakumar, B. L. (2020). Evaluation of morphometric parameters and hypsometric curve of Arkavathy river basin using RS and GIS techniques. *Applied Water Science*, 10(3). <https://doi.org/10.1007/s13201-020-1164-9>
- Henríquez Opazo, Osvaldo. (2013). *Guía análisis y zonificación de cuencas hidrográficas para el ordenamiento territorial*. Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo, Gobierno de Chile.

- Hernández-Uribe, R. E., Barrios-Piña, H., Ramírez, A. I., & para correspondencia Resumen
Hernández-Uribe, A. (2016). *Análisis de riesgo por inundación: metodología y aplicación a la cuenca Atemajac*. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v8n3/2007-2422-tca-8-03-00005.pdf>
- IDEAM. (2023). *Información Meteorológica e Hidrológica*.
<http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- IGAC. (2023). *Información Cartográfica*. <https://www.colombiaenmapas.gov.co/>
- Ion, Z. (1985). *Morphometry of Drainage Basins*. <https://www.researchgate.net/publication/38982899>
- Karmokar, S., & De, M. (2020). Flash flood risk assessment for drainage basins in the Himalayan foreland of Jalpaiguri and Darjeeling Districts, West Bengal. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(4), 2263–2289. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00807-9>
- Kaufmann de ALMEIDA, I., Kaufmann ALMEIDA, A., Alexandre Ayach ANACHE, J., Luiz STEFFEN, J., & Alves Sobrinho, T. (2014). *ESTIMATION OF TIME OF CONCENTRATION OF OVERLAND FLOW IN WATERSHEDS: A REVIEW* (Vol. 4).
https://www.revistageociencias.com.br/geociencias-arquivos/33/volume33_4_files/33-4-artigo-9.pdf
- Kuksina, L., & Golosov, V. (2020). Flash floods: Formation, study and distribution. *E3S Web of Conferences*, 163. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016302005>
- Leon Caviades, D. F., & Oliveros Martínez, E. L. (2020). *Análisis De Vulnerabilidad Ante Amenazas De Inundación En El Sector Canteras De La Cuenca Del Río Tunjuelo* [Universidad Santo Tomás].
<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/23593/2020diegoleon.pdf?sequence=5&isAllowed=y>
- Meraj, G., Romshoo, S. A., Yousuf, A. R., Altaf, S., & Altaf, F. (2015). Assessing the influence of watershed characteristics on the flood vulnerability of Jhelum basin in Kashmir Himalaya. *Natural Hazards*, 77(1), 153–175. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1605-1>

Microsoft Excel. (2023). *Microsoft Excel*. https://www.microsoft.com/es-mx/microsoft-365/p/excel/CFQ7TTC0HR4R?activetab=pivot:overviewtab&ef_id=_k_CjwKCAjwuqiiBhBtEiwATgvixGFtXYlBgCDhmJ7G5HEq8I3gVwbt39JCDhM33fKOpYUAQOICl6WRUxoCmMMQAvD_BwE_k_&OCID=AIDcmm409lj8ne_SEM__k_CjwKCAjwuqiiBhBtEiwATgvixGFtXYlBgCDhmJ7G5HEq8I3gVwbt39JCDhM33fKOpYUAQOICl6WRUxoCmMMQAvD_BwE_k_&gclid=CjwKCAjwuqiiBhBtEiwATgvixGFtXYlBgCDhmJ7G5HEq8I3gVwbt39JCDhM33fKOpYUAQOICl6WRUxoCmMMQAvD_BwE

Nasir, M. J., Iqbal, J., & Ahmad, W. (2020). Flash flood risk modeling of swat river sub-watershed: a comparative analysis of morphometric ranking approach and El-Shamy approach. *Arab J Geosci*, 13. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06064-5>/Published

Niyazi, B., Khan, A. A., Masoud, M., Elfeki, A., & Basahi, J. (2020). Variability of the geomorphometric characteristics of Makkah Al-Mukaramah basins in Saudi Arabia and the impact on the hydrologic response. *Journal of African Earth Sciences*, 168. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103842>

NOAA. (2023). *Severe Weather 101 Flood Basics*. <https://www.nssl.noaa.gov/education/svrwx101/floods/>

Noriega, O. de J., Gutiérrez Rojas, Y., & Rodríguez Barrios, J. (2011). Análisis de la vulnerabilidad y el riesgo a inundaciones en la cuenca baja del río Gaira, en el Distrito de Santa Marta. *Prospect*, 9(2), 93–102. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4208390.pdf>

Ortíz Vera, O. (2004). Evaluación Hidrológica. *HIDRORED*. <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-privada-del-norte/ingenieria/56666555-hidrologia-cuencas/6912289>

Paola gracia rojas, J., Angélica Cardozo Cerquera, maría, Cristina Correa ochoa, isabel, Johanna rincón espitia, A., Alberto trujillo velez, emiro, & Catalina Albarracín bustos, blanca. (2018). *Análisis De Vulnerabilidad Y Riesgo De La Quebrada Grande De San Antonio Del Tequendama-Cundinamarca*. 9(2). <https://doi.org/10.22490/21456453.2349>

QGIS. (2023). *Quantum GIS*. <https://www.qgis.org/es/site/>

Quesada-Román, A. (2017). Fluvial Geomorphology and Floods in the Upper General River Basin, Costa Rica. *Anuario Do Instituto de Geociencias*, 40(2), 278–288.

https://doi.org/10.11137/2017_2_278_288

Rawat, A., Bisht, M. P. S., Sundriyal, Y. P., Banerjee, S., & Singh, V. (2021). Assessment of soil erosion, flood risk and groundwater potential of Dhanari watershed using remote sensing and geographic information system, district Uttarkashi, Uttarakhand, India. *Applied Water Science*, 11(7). <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01450-0>

Rogers, M., Bruen, M., & Maystre, LY. (2000). MULTI-CRITERIA EVALUATION METHODS. In *ELECTRE and Decision Support*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-5057-7_2

Saborío, J. B. (2009). *Revista Geográfica de América Central N° 43-25 Revista Geográfica de América Central. N° 43 II Semestre*. www.catie.ac.cr/cambioglobal

SCOPUS. (2023). *Basin, Morphometric, Risk Evaluation*. <https://www.scopus.com/home.uri>

Singh, W. R., Barman, S., & Tirkey, G. (2021). Morphometric analysis and watershed prioritization in relation to soil erosion in Dudhnai Watershed. *Applied Water Science*, 11(9).

<https://doi.org/10.1007/s13201-021-01483-5>

Smith, R. A., Vélez, J. I., Caballero, H., Castiblanco, C., Ramírez, C., Arango, A., Rave, C. C., Álvarez, A., Botero, V., & Escobar, D. (2005). *EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD ANTE AMENAZAS NATURALES EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS*.

Tariq, A., Yan, J., Ghaffar, B., Qin, S., Mousa, B. G., Sharifi, A., Huq, M. E., & Aslam, M. (2022). Flash Flood Susceptibility Assessment and Zonation by Integrating Analytic Hierarchy Process and Frequency Ratio Model with Diverse Spatial Data. *Water (Switzerland)*, 14(19).

<https://doi.org/10.3390/w14193069>

Vera Rodríguez, J. M., & Albarracín Calderón, A. P. (2017). Metodología para el análisis de vulnerabilidad ante amenazas de inundación, remoción en masa y flujos torrenciales en cuencas

hidrográficas. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 27(2), 109–136.
<https://doi.org/10.18359/rcin.2309>

World Meteorological Organization. (2019). *WMO atlas of mortality and economic losses from weather, climate and water extremes* (Issue WMO-No. 1267).
https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21930

Yang, Q., Wang, X., Sun, Y., Duan, W., & Xie, S. (2022). Numerical Investigation on a Flash Flood Disaster in Streams with Confluence and Bifurcation. *Water (Switzerland)*, 14(10).
<https://doi.org/10.3390/w14101646>

Youssef, A. M., Pradhan, B., & Hassan, A. M. (2011). Flash flood risk estimation along the St. Katherine road, southern Sinai, Egypt using GIS based morphometry and satellite imagery. *Environmental Earth Sciences*, 62(3), 611–623. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0551-1>

Žižović, M. M., Albijanić, M., Jovanović, V., & Žižović, M. (2019). A New Method of Multi-Criteria Analysis for Evaluation and Decision Making by Dominant Criterion. *Informatica (Netherlands)*, 30(4), 819–832. <https://doi.org/10.15388/Informatica.2019.231>