

**Análisis de zonas de asentamiento informal susceptibles a inundaciones sobre la
margen derecha del río Guatapurí, al noreste de la comuna 1 de la ciudad de
Valledupar, Cesar**

Ian Valentín Perez Mora

Propuesta de trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Especialista en
Sistemas de Información Geográfica

Director (a):

Ingeniera Ambiental. M.Sc., Ana María Giraldo Patiño

Transformación Digital

Grupo de Investigación y Desarrollo en Informática y Telecomunicaciones

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Manizales, 2024

Resumen

Este estudio tiene como objetivo principal analizar las zonas de asentamiento informal que son susceptibles a inundaciones, debido a que se ubican sobre la margen derecha del río Guatapurí en la ciudad de Valledupar. Esta desordenada expansión se ha venido presentando hace más de 30 años y las autoridades locales han hecho caso omiso al riesgo que esto representa. Para llevar a cabo este análisis se utilizaron insumos como: el modelo digital de elevación (DEM), datos hidrometeorológicos de estaciones activas del IDEAM cercanas a la zona de influencia del estudio, datos históricos de eventos de inundación tomados de la base de datos del DesIventar, así como de medios locales (periódicos), imágenes satelitales tomadas de PlanetScope de los últimos 9 años y el alistamiento del software Qgis para la generación del mapa temático que involucra la delimitación y clasificación por niveles de la susceptibilidad a inundaciones en área de estudio, lo que permitirá un monitoreo continuo de la parte en riesgo. Se obtendrá información actualizada que servirá para tomar cartas en el asunto, tanto para las autoridades locales del municipio, como para las personas que ahí establecen sus hogares y que de gran medida conscientes o inconscientemente colocan en riesgo su vida ante una creciente súbita del río Guatapurí.

Palabras clave: Inundación, PlanetScope, Datos hidrometeorológicos, Asentamientos informales.

Abstract

The main objective of this study is to analyze the informal settlement areas that are susceptible to flooding because they are located on the right bank of the Guatapurí River in the city of Valledupar. This disorderly expansion has been occurring for more than 30 years and the local authorities have ignored the risk that this represents. In order to carry out this analysis we used inputs such as: the digital elevation model (DEM), hydro-meteorological data from active IDEAM stations near the area of influence of the study, historical data of flood events taken from the DesIventar database, as well as from local media (newspapers), satellite images taken from Planet Scope from the last 9 years and the preparation of Qgis software for the generation of the thematic map that involves the delimitation and classification of flood susceptibility in the study area, which will allow continuous monitoring of the areas at risk. Updated information will be obtained that will serve to act in the matter both for the local authorities of the municipality and for the people who establish their homes there and who consciously or unconsciously place their lives at risk in the event of a sudden rise of the Guatapurí River.

Keywords: Flood, Planet Scope, Hydrometeorological data, Informal settlements.

Contenido

	Pág.
1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA PROBLEMÁTICA	9
1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	12
1.2 JUSTIFICACIÓN	13
2. OBJETIVOS.....	15
2.1 OBJETIVO GENERAL	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3. ANTECEDENTES.....	16
4. REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL.....	25
5. REFERENTE TEÓRICO	27
5.1 INUNDACIONES	27
5.2 ANÁLISIS MULTITEMPORAL.....	28
5.3 MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL (DEM)	29
5.4 GEOLOGÍA, GEOMORFOLOGÍA Y USO DEL SUELO	30
5.5 RESOLUCIÓN DE IMÁGENES	30
5.6 IMÁGENES PLANETSCOPE.....	31
5.7 MÉTODO DE JERARQUÍAS ANALÍTICAS DE SAATY	32
6. METODOLOGÍA.....	35
6.1 ENFOQUE METODOLÓGICO.....	35
6.2 TIPO DE ESTUDIO	35

6.3	PROCEDIMIENTO	35
6.3.1	Fase 1. Adquirir los insumos necesarios para el estudio	37
6.3.2	Fase 2. Delimitar las zonas de asentamiento informal susceptible a inundaciones	42
6.3.3	Fase 3. Analizar las variables: pendiente, geomorfología, geología y uso del suelo, con el fin de generar del mapa de susceptibilidad a inundaciones para el área de estudio	42
7.	RESULTADOS	44
7.1	RESULTADOS FASE 1	44
7.1.1	Base de datos	44
7.1.2	Portales	51
7.2	RESULTADOS DE LA FASE 2	53
7.2.1	Delimitación de asentamientos informales que influyen en el crecimiento urbanístico .	53
7.3	RESULTADOS DE LA FASE 3	57
7.3.1	Pendiente	57
7.3.2	Geomorfología	58
7.3.3	Geología	60
7.3.4	Uso del Suelo	61
7.3.5	Análisis de Proceso Jerárquico (AHP)	61
7.3.6	Generación de mapa de susceptibilidad a inundaciones	68
8.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	71
9.	CONCLUSIONES	73
10.	RECOMENDACIONES	74
11.	REFERENCIAS	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 <i>Mapa multicriterio combinado de la amenaza por inundación en la ciudad de Valledupar.</i>	23
Figura 2 <i>Erosión provocada por Inundaciones en el barrio Pescadito de Valledupar.</i>	28
Figura 3 <i>Descripción de los sensores principales de planet labs para obtener imágenes satelitales.</i>	32
Figura 4 <i>Escala fundamental de comparación por pares (Saaty, 1980).</i>	33
Figura 5. <i>Matriz de pares nxn, ejemplo.</i>	34
Figura 6. <i>Forma de completar la matriz nxn.</i>	34
Figura 7. <i>Esquema de las fases implementadas.</i>	36
Figura 8 <i>Mapa de localización de la zona de estudio noreste de la comuna 1 en Valledupar, Cesar.</i>	37
Figura 9 <i>Procedimiento a seguir para poder descargar imágenes del satélite PlanetScope.</i>	39
Figura 10. <i>Registro de cuenta personal para obtener el modelo de elevación digital.</i>	40
Figura 11. <i>Geoportal ASF Data Search, filtrando ciertas características</i>	41
Figura 12. <i>Filtro para consultar sobre eventos de inundación en la ciudad de Valledupar.</i>	45
Figura 13 <i>Captura de eventos históricos de inundaciones en Valledupar.</i>	45
Figura 14 <i>Datos representativos de medios locales sobre eventos de inundación en Valledupar.</i>	47
Figura 15. <i>Ubicación espacial de las estaciones pluviométricas en el departamento del Cesar.</i>	49
Figura 16 <i>Interpolación de precipitación anual de 10 estaciones climatológicas con el método IDW.</i>	50

Figura 17. <i>Modelo de elevación digital a descargar.</i>	52
Figura 18. <i>DEM 12.5m de la zona de influencia del proyecto</i>	53
Figura 19. <i>Asentamientos informales al Noreste de la comuna 1 de Valledupar para el año 2016.</i>	54
Figura 20 <i>Imagen satelital del año 2020 del satélite PlanetScope.</i>	55
Figura 21 <i>Zona de asentamiento informal observada en imagen satelital de planetScope, año 2024.</i>	56
Figura 22 <i>Mapa de pendiente en la ciudad de Valledupar.</i>	58
Figura 23 <i>Mapa geomorfológico que muestra las geoformas presentes en Valledupar.</i>	59
Figura 24 <i>Mapa geológico de la ciudad de Valledupar.</i>	60
Figura 25 <i>Uso del suelo en la Comuna 1 de Valledupar.</i>	61
Figura 26 <i>Mapa de susceptibilidad a inundaciones que comprende parte de la comuna 2, 6 y toda la franja derecha de la comuna 1, margen derecha del río Guatapurí.</i>	69

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Eventos históricos de inundaciones en la comuna 1 de Valledupar.</i>	46
Tabla 2 <i>Estaciones pluviométricas principales del departamento del Cesar.</i>	48
Tabla 3. <i>Características principales de las imágenes seleccionadas.</i>	51
Tabla 4. <i>Resultados comparativos medidos en hectáreas de cada imagen satelital.</i>	57
Tabla 5 <i>Matriz de comparación de parámetros de la pendiente.</i>	62
Tabla 6 <i>Normalización de parámetros de la pendiente.</i>	63
Tabla 7 <i>Comparación de parámetros de las unidades geomorfológicas presentes en el área.</i> ..	64
Tabla 8 <i>Normalización de parámetros de las unidades geomorfológicas.</i>	64
Tabla 9 <i>Comparación de parámetros de unidades geológicas presentes en el área de estudio.</i>	65
Tabla 10 <i>Normalización de parámetros de las unidades geológicas.</i>	65
Tabla 11 <i>Comparación de parámetros de uso del suelo en el área de estudio.</i>	66
Tabla 12 <i>Normalización de parámetros de uso del suelo.</i>	66
Tabla 13 <i>Comparación entre variables descritas en el área de estudio.</i>	67
Tabla 14 <i>Normalización de variables descritas en el área de estudio.</i>	67

Índice de ecuaciones

(1)	68
-----------	----

1. Descripción del área problemática

El crecimiento poblacional viene acompañado por el déficit de vivienda, infraestructura y servicios básicos, lo que aumenta la exposición de los nuevos asentamientos a fenómenos externos. Esto sucede en países en vía de desarrollo con una clara tendencia a incrementarse.

Para Palma (2015) citado por García et al., (2020) las ciudades latinoamericanas han crecido hasta sobrepasar por mucho su capacidad para brindar a los ciudadanos un entorno productivo, que ayude a la gestión pública en servicios que cubran necesidades básicas.

Colombia no está exenta de esta problemática, en la mayoría de ciudades pertenecientes a la región caribe, el proceso de ocupación de áreas urbanas tiene importancia directa sobre la ocurrencia de riesgos naturales, de igual manera, los factores socioeconómicos y territoriales como la pobreza, modelos insostenibles de desarrollo, migraciones, ordenamiento territorial deficiente, falta de educación de la comunidad y baja capacidad institucional para la gestión del riesgo influyen en la ocupación de territorios susceptibles a inundación (Sedano, 2012).

Sobre la margen derecha del río Guatapurí de la ciudad de Valledupar, en los barrios Pescaito, Paraíso y 9 de Marzo (por nombrar los más afectados), comprendidos en el NE de la comuna 1, grupo de personas de escasos recursos, en ocasiones extranjeras del vecino país de Venezuela, que por falta de oportunidad de empleo, acceso a educación o vivienda digna, ven la necesidad de ocupar terrenos no aptos para vivir, construyendo sus hogares de manera informal sin tener en cuenta las eventualidades de índole natural como las inundaciones. Esto ha llamado la atención de diferentes sectores de la ciudad, pues la oficina de gestión del riesgo “informó que el histórico de emergencias del municipio para un periodo comprendido entre 1998 y 2012 refleja que los fenómenos que presentan mayor número de registros o con mayor recurrencia son las inundaciones, los vendavales y los deslizamientos, los cuales están asociados a fenómenos

hidrometeorológicos” (Mejía, 2014). Según los datos de la Unidad Nacional de Riesgo de Desastres (UNDRR, 2021), para el período 1974-2018, las inundaciones representaron el mayor porcentaje de los desastres naturales en esta ciudad (27%) seguidas por incendios forestales (21%), vendavales (16%), incendios (13%) y deslizamientos (6%). Esta indica que las principales causas de las inundaciones fueron: el desbordamiento de ríos (52%), lluvias (21%) y la variación en las condiciones atmosféricas (2%); el restante 25% corresponde a causas desconocidas y otras razones. En ese lapso, las inundaciones afectaron de forma indirecta a 41.237 personas, 696 de forma directa, 571 casas destruidas y 66 afectadas, y 21 pérdidas mortales.

Entidades públicas como Corpocesar, que, en su última visita en 2021 a la invasión del barrio “Pescaito” identificaron un núcleo de viviendas, algunas de ellas en proceso de construcción. El equipo técnico precisó que es importante resaltar que, aunque la ronda hídrica del río Guatapurí se encuentra en proceso de acotamiento de acuerdo con la norma que reglamenta su estudio, es claro que el sector recorrido pertenece a la ronda hídrica de este cuerpo de agua, dada la corta distancia, la conformación topográfica y cobertura vegetal (Corpocesar, 2021). De acuerdo con lo estipulado en el POT del municipio de Valledupar, para determinar la categorización del riesgo y establecer las medidas de mitigación correspondiente, se requiere desarrollar estudios detallados, adicional a ello, se indica que en esas zonas se prohíbe la construcción de viviendas y las existentes deben ser reubicadas; aspectos que están a cargo del municipio (Armenta, 2021).

(Forero, 2022) Sin embargo, aunque la problemática sea de conocimiento público, no se han ejecutado trabajos investigativos encaminados a realizar un análisis histórico de este fenómeno, identificando a su vez la problemática social en la población en las diferentes cuencas del río, aunque esta investigación solo se centrará en el análisis de las zonas de asentamiento informal más afectadas por inundaciones, las cuales se ubican en la parte NE de la comuna 1 de Valledupar, todo ello con la ayuda de diferentes insumos como imágenes satelitales de PlanetScope, modelo de elevación digital y demás variables que serán presentadas en la metodología propuesta.

1.1 Formulación del problema

El crecimiento poblacional ha hecho que los procesos de urbanización se hayan incrementado notablemente en los últimos años, acelerando los cambios en las coberturas al aumentar la demanda de suelo para la construcción de vivienda y transformar tierras con vocación agrícola o ganadera en zonas urbanizables (Pedraza, 2014).

Caso puntual de este crecimiento poblacional se ha estado presentando en el municipio de Valledupar, Cesar, desde los años 90, la instauración de viviendas al margen derecho del Río Guatapurí ha desencadenado un sin número de problemáticas socioambientales y de seguridad, que genera la necesidad de atender esta situación.

Con la ayuda de herramientas SIG como el software Qgis, se llevará a cabo la representación e interpretación de mapas temáticos que ayuden a visualizar las zonas susceptibles a inundaciones, que figuren como un riesgo para vivir. Esto conlleva a responder a la pregunta sobre ¿Qué zonas de la comuna 1 de Valledupar son susceptibles a inundaciones?

1.2 Justificación

El ordenamiento territorial es de los elementos más importantes en una población, ya que esto permite generar políticas y acciones dirigidas a la planificación, gestión y crecimiento organizado de un territorio.

Teniendo en cuenta las problemáticas para el monitoreo y control (por parte de los entes locales) de zonas de asentamiento informal sobre la margen derecha del río Guatapurí en el municipio de Valledupar, Cesar, se hace necesario captar la atención de las entidades municipales para que puedan darle celeridad a oportunidades inclusivas (dentro del plan de desarrollo municipal) para esas personas vulnerables, ya que no cuentan con recursos para adquirir una vivienda y han tenido que acomodarse en zonas no aptas para vivir, lo que ha conllevado a un sin número de problemáticas ambientales, de higiene y salud y de seguridad para los barrios contiguos a estos.

Con la información secundaria que reposa en bases de datos nacional del DesInventar (Tabla 2-3) y medios locales (Tabla 4) se deja en evidencia la recurrencia de inundaciones en el municipio de Valledupar y las zonas o barrios que afecta.

La ciudad no cuenta con una base de datos actualizada, por ende, el detalle de los sucesos se encuentra en los diarios y periódicos locales que permiten darle protagonismo a las personas desfavorecidas que claman por una mejor calidad de vida.

Con el objetivo de realizar un análisis del área inundable en las zonas de asentamiento informal sobre la margen derecha del río Guatapurí al NE de la comuna 1 de la ciudad de Valledupar, se ha optado por la utilización de imágenes satelitales tomadas de PlanetScope, satélite que proporciona diariamente imágenes de 3 a 4,7 metros de resolución espacial de toda la

Tierra (Planet Labs PBC, 2024). Este sería el primer proyecto en Valledupar que utiliza imágenes de PlanetScope, lo cual permita generar capas temáticas locales con mayor precisión y así asegurar una mejor visualización gráfica para el mapa de susceptibilidad a inundaciones.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Analizar zonas de asentamiento informal susceptibles a inundaciones sobre la margen derecha del río Guatapurí, al noreste de la comuna 1 de la ciudad de Valledupar, Cesar.

2.2 Objetivos específicos

- Recopilar información de las variables necesarias para el estudio, como el DEM, la pendiente, precipitación anual, eventos de inundación, geología, geomorfología y uso del suelo para su posterior análisis.
- Delimitar las zonas de asentamiento ilegal al noreste de la comuna 1 de Valledupar, por medio de comparación de imágenes satelitales PlanetScope de los años 2016, 2020 y 2024.
- Interpretar la influencia de las variables: pendiente, geomorfología, geología y uso del suelo, con el fin de generar el mapa de susceptibilidad a inundaciones para el área de estudio.

3. Antecedentes

En diferentes partes del mundo las inundaciones toman cierta ventaja por las características geomorfológicas del terreno. En las últimas décadas, se han realizado varios estudios sobre la cartografía de las aguas superficiales a escalas que van desde la local a la global, especialmente basados en imágenes ópticas de satélite.

Una investigación similar a la que se realiza en este documento fue hecha por Mishra et al (2020) que mediante los datos de un solo año (2018) de la constelación de Planet Labs (Butler, 2014; Planet, 2020) utilizó el producto de reflectancia superficial (SR) corregido atmosféricamente y ortorectificado (PS Analytic Ortho Scene Level 3B) e índices espectrales para la delimitación espaciotemporal de pequeños cuerpos de agua en la región semiárida africana del Sahel, de gran importancia para el abastecimiento de agua de esta región. Utilizando todas las fechas coincidentes (37) para PlanetScope y Landsat-8 con una cobertura de nubes < 80% sobre píxeles de colocación seleccionados al azar (N = 1000), se compararon las imágenes mediante el algoritmo de remuestreo del vecino más próximo medio, consideraron variables como la fracción de agua y la selección del umbral de la fracción de agua. Los resultados obtenidos mostraron la excelente capacidad de los productos PlanetScope para detectar los cuerpos hídricos de interés, logrando identificar el 95% de estos, en contraste con el 32% obtenido a partir de imágenes Landsat-8, demostrando las mejoras espaciales de estos nuevos sensores en comparación con las plataformas de observación tradicionales.

Las imágenes satelitales de la constelación PlanetScope fueron de gran ayuda para el análisis de la turbidez en aguas someras del suroeste de Puerto Rico, específicamente en la Bahía

de Guánica, antes y después del huracán Fiona, utilizando un algoritmo para evaluar parámetros de calidad del agua, como la clorofila-a, la turbidez y el coeficiente de atenuación de luz. Se utilizaron imágenes de alta resolución espacial y temporal de los satélites SuperDove de Planet para monitorear la turbidez en aguas costeras someras. Según Porras (2023) la metodología utilizada en este estudio involucra la adquisición de imágenes de satélite de alta resolución espacial de Planet Dove, procesamiento de imágenes utilizando software especializado, y validación de los resultados mediante mediciones in situ utilizando instrumentos como Solar Light, EXO, EUREKA y GER 1500. Estas mediciones se llevaron a cabo en diferentes estaciones y se compararon con los valores derivados de las imágenes procesadas. A pesar de que el Huracán Fiona tuvo repercusiones en la turbidez del agua de la zona afectada la capacidad de estos ecosistemas para recuperarse después de un evento extremo demuestra su capacidad de adaptación y regeneración (Porras, 2023).

La percepción del riesgo es un tema que compete a personas o comunidades que se ven afectadas por fenómenos de índole natural como las inundaciones, es por ello la importancia del entendimiento y valoración de la amenaza. Todo ello influenciado por creencias culturales y experiencias previas, como ocurre en Katmandú, Nepal, donde se hizo un estudio de Cómo perciben el riesgo de inundación los residentes de los asentamientos informales ribereños de esa ciudad. El objetivo fue investigar la forma en que se aprecia el riesgo de inundación, lo cual influye en su respuesta a los impactos de este evento y en sus medidas de adaptación. Sus respuestas e iniciativas para reducir el riesgo de inundación son importantes porque es menos probable que reciban apoyo del gobierno, ya que se les considera residentes ilegales (Dangol, 2024). El estudio revela que la percepción del riesgo de inundación entre los residentes de los

asentamientos informales está determinada por los impactos de las inundaciones, como las experiencias que ponen en peligro la vida, los daños materiales y los efectos sobre la salud y los medios de subsistencia, junto con la concientización de los residentes sobre la dinámica de las inundaciones y la comprensión de las vulnerabilidades debidas a sus condiciones socioeconómicas. Eran conscientes de la subida del nivel del río, del cambio en la corriente del río y de la forma en que fluye el agua de las inundaciones. Aunque la percepción del riesgo por parte de los residentes de asentamientos informales está poco estudiada, estos resultados contribuyen a enriquecer los conocimientos en este ámbito académico (Dangol, 2024).

En muchos estudios se ha indagado sobre la zonificación de áreas inundables, como el caso del municipio de La Virginia, Risaralda, donde se utilizó modelamiento espacial, DEM de ALOS PALSAR, recopilación de datos de eventos históricos de inundación de los años 1988, 2000, 2011 y 2012, empleo sistemas de información geográfica para representar la zonificación de áreas según la susceptibilidad a inundaciones, se incorporan metodologías de los SIG como los análisis multitemporales que consideren los datos históricos de inundaciones, los geoprocursos y modelaciones espaciales en el software ArcMap, para facilitar los cruces de las diferentes capas de información (Quintana, 2008). Para llevar a cabo el estudio, se recortaron imágenes del área de La Virginia, para los datos históricos de diferentes años, así como para un modelo de elevación digital (DEM) de ALOS PALSAR, con el propósito de identificar las zonas más bajas del municipio y así, poder fusionar todas las capas recortadas y determinar las zonas afectadas o aquellas donde se habían producido cambios significativos (Correa, 2024). se revisó la relación de los eventos pasados, con las pendientes del terreno y con los lugares de infraestructura existente (Imagen satelital de PlanetScope 2023) para asignar las categorías de las áreas con

riesgo de la siguiente manera: Riesgo Alto: Áreas con alta probabilidad a eventos de inundación y/o alta vulnerabilidad, las cuales requieren medidas preventivas y de mitigación prioritarias. Riesgo Medio: Áreas con probabilidad moderada a eventos de inundación y/o vulnerabilidad moderada. Necesita monitoreo constante y planes de contingencia. Riesgo Bajo: Áreas con baja probabilidad a eventos de inundación y/o baja vulnerabilidad. Los resultados evidenciaron que las áreas más vulnerables corresponden a las zonas cercanas a los cauces de los ríos y áreas bajas del municipio debido principalmente al aumento de las precipitaciones producidas por el cambio climático (Correa, 2024). Esto permitirá a las autoridades implementar estrategias de mitigación más efectivas y reducir la vulnerabilidad de las comunidades (Goodchild et al., 1996).

La utilización de las imágenes de satélite son diversas para cada área de estudio, sin embargo, hay quienes prefieren ciertas características técnicas específicas del satélite, por ejemplo para la determinación del espejo de agua del complejo cenagoso del Bajo Sinú (CCBS), en el departamento de Córdoba, Colombia, donde año tras año se genera una mancha de inundación, por ende, se resalta la conservación del espejo de agua para evitar o prevenir que se desarrollen actividades que vayan en contra de la preservación del mismo. En este estudio se seleccionaron las imágenes Sentinel-2 ya que en la época (2018) eran las de mayor resolución espacial, a las cuales, se les realizó corrección atmosférica, para que las coberturas en las bandas se pudieran diferenciar de forma visual y espectral más claramente. Para el área de influencia del CCBS se tiene que el río Sinú cuenta con un área de 624 hectáreas, las cuales se delimitan como espejo de agua a la hora de aplicar los índices NDWI y MNDWI en QGIS, es por ello que esta superficie se les resta a las áreas resultantes de los índices de agua, esto teniendo en cuenta que el río Sinú es un cauce permanente y que moviliza agua durante todo el año (Bravo, 2017).

Teniendo en cuenta que el software SIG QGIS arroja un ráster con valores entre 1 y -1 se hace necesario reclasificar estos índices de acuerdo con las coberturas de agua que se presentan en el entorno (Bravo, 2017). Clasificación tanto del índice NDWI como del MNDWI, según la categoría de 1,0 a 0,0 (espejo de agua), 0,0 a -0,25 (Agua con sedimentos y/o vegetación acuática), -0,25 a -0,50 (Agua con coberturas (pastos, cultivos, etc.) y -0,50 a -1,0 (No agua). Luego de llevar a cabo los diferentes procesamientos y análisis en los softwares SIG para la delimitación del espejo de agua, se obtuvieron como resultados de los índices de agua los datos de las áreas según el mes para el año 2017, siendo el mes de diciembre con mayor área de ocupación de agua (17.832,49). Finalmente, se determinó que el MNDWI es el índice de agua más idóneo para este tipo de estudios, esto teniendo en cuenta que utiliza bandas verdes y SWIR para mejorar las características de aguas abiertas como el caso del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú (Bravo, 2017).

Los periodos de fuertes lluvias se convierten en una gran problemática para las zonas de topografía plana, caso concreto, el brazo de Mompox (río Magdalena) que se ubica en una zona caracterizada por cotas bajas y su dinámica fluvial tiende a desbordar su cauce e inundar zonas aledañas en periodos de fuertes lluvias (Castro et al., 2023). Teniendo como objetivo principal la determinación de la dinámica fluvial del brazo de Mompox, en el corregimiento de Cantera (Bolívar, Colombia), se efectuó una geomorfología a detalle utilizando imágenes satelitales landsat correspondiente a los años 1960, 1969, 1977 en periodos húmedos, y 2009, 2014, 2017 en periodos secos; con esta información se generaron anaglifos por medio del programa informático Anamaker. Además, con el software ArcGIS se analizaron las imágenes mediante modelos de elevación digital (efecto 3D); en el procesamiento, se obtuvieron imágenes a escala 1:400. Se

vectorizaron los cambios presentes en el curso del río, en diferentes periodos de tiempo, logrando hacer una superposición de las diferentes coberturas en cada año, tomando una serie de puntos de referencia para percibir cualquier cambio en todos los parámetros evaluados, especialmente el cauce del río. Desde el año 1969 hasta el 2017 se apreció un desplazamiento en dirección noreste del brazo de Mompox y un aumento de sinuosidad en la parte Norte-Sur. La dinámica fluvial durante 49 años demuestra un cambio en factores geométricos y volumen de agua, debido a la tendencia del río a perder agua a través de los años (Castro et al., 2023).

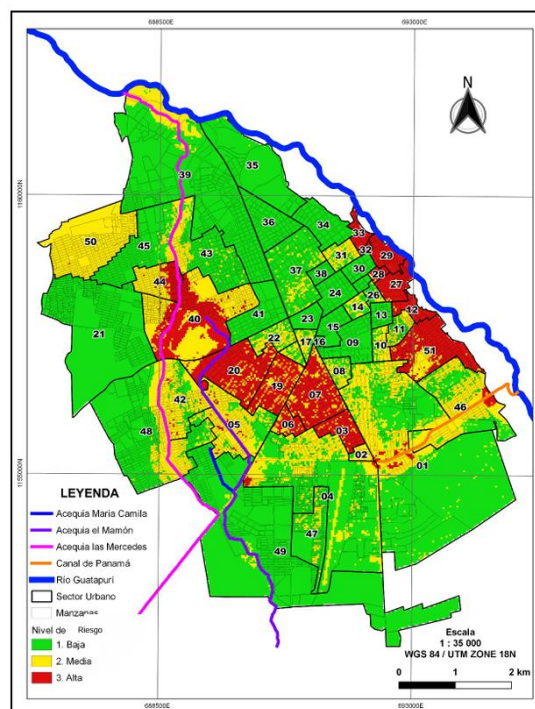
(Gómez, 2018) realizó un análisis geomático e hidrogeomorfológico del cuerpo La Taruca, en Mocoa, para el evento natural de avenida torrencial del 1 de abril de 2017 hasta 12 de agosto de 2018, con el fin de evaluar el estado de vulnerabilidad de la Quebrada (La Taruca), utilizando métodos de geomática aplicada, modelamiento, análisis y simulación de un evento de similares proporciones. La zona se caracteriza principalmente por presentar una gama de geoformas que van desde laderas altas de cordillera hasta planicies onduladas, sus pendientes en las zonas montañosas alcanzan hasta el 75%, las siguientes unidades de relieve manejan cambios abruptos de pendiente encontrando algunas entre el 3% y el 50 %. (Gómez, 2018), para el análisis se obtuvieron datos de levantamiento, topográfico y fotogramétrico y modelamiento de superficie de inundación, cabe aclarar que para la mitigación de riesgo se habían construido unos muros y diques de contención. Como resultado se obtuvo la modelación del caudal máximo de diseño de 362m³/s e identificando los cambios de pendiente abruptos encontrando probabilidad de represamiento y desbordamiento del cauce, identificando los puntos críticos para la construcción de estructuras de contención.

Por otra parte el complemento ideal para un buen análisis multitemporal para estimar, determinar y delimitar áreas inundables recurre en el uso de imágenes satelitales, según un

estudio realizado en la ciudad de Valledupar, muy similar a la investigación que se lleva a cabo en este documento, se implementó el uso de imágenes satelitales correspondientes al periodo comprendido entre 1983-2021 obtenidas de los satélites Landsat 4-5, Landsat 7 y Landsat 8 con el objetivo de realizar un análisis temporal que permitiera identificar eventos extremos con el potencial de generar inundaciones (Mejía, 2021). Como resultado, se obtuvo que los lugares de mayor riesgo se localizan en áreas altamente urbanizadas próximas a drenajes ubicados en zonas de baja elevación y pendiente donde la densidad poblacional es alta (Mejía, 2021), esto abre la vitrina para posteriores investigaciones que aumenten el conocimiento de la mano de las herramientas tecnológicas actuales, por ello en el proyecto que se está realizando se buscará tener una mejor resolución de las imágenes para obtener mejores resultados y ajustar mejor las salidas graficas que se quieren representar, ya que se contara con la descarga de imágenes del satélite PlanetScope y se hará en un lapso de tiempo más reducido pero con mayor información de datos. A raíz del análisis realizado el investigador determina que, (Mejía, 2021) el máximo riesgo se presenta en las zonas suroccidentales y orientales de la ciudad, donde la alta amenaza está relacionada con la proximidad a canales y cauces de drenajes, así como a bajas pendientes y elevación (i.e. llanuras de inundación ubicadas en las márgenes del río o las riberas de las acequias) expresado en el siguiente mapa.

Figura 1

Mapa multicriterio combinado de la amenaza por inundación en la ciudad de Valledupar.



Nota. *Fuente Tomada de Mejía., J. (2021).

Según la UNGRD (2012), en el año 2004, la Corporación Autónoma Regional (CORPOCESAR) y el IDEAM publicaron el mapa de amenaza por inundación para la zona. En este, se determinó que el área total inundable era aproximadamente 110 hectáreas distribuidas a lo largo y ancho de la ciudad. Para el año 2009, la Oficina Municipal para la Prevención y Atención de Desastres (OMPAD) desarrolló el Plan Local de Emergencias de Valledupar (PLEV), el cual fue actualizado en el año 2011 y enfocado en la amenaza por inundaciones (UNGRD, 2012). Finalmente, en el año 2012, la Alcaldía de Valledupar en comunión con la

Gobernación del Cesar, implementaron el Plan Municipal para la Gestión del Riesgo y Desastres (PMGRD).

Otra variable por considerar es el factor hidráulico, por ejemplo, la ciudad de Valledupar cuenta con acequias, (Gutiérrez, 2012 citado por Pérez, 2018) Afirma que las acequias cumplen con dos funciones, el riego del arbolado urbano y la evacuación del excedente del agua de lluvia. Estas extensiones de agua permiten drenar el fluido de forma natural a otras zonas de la ciudad, por eso la aplicación técnica, se basa en la determinación de las características hidráulicas y geométricas del canal por medio de un perfil hidráulico, a fin de observar las variaciones del flujo a lo largo de este cuerpo de agua, información que no solo ayudará a proponer posibles soluciones para salvaguardar la integridad de las edificaciones que yacen en las laderas de la acequia, sino, que se tendrá un producto grafico final con las zonas de posible inundación, por lo que la toma de decisiones para futuros planes de ordenamiento territorial y la aplicación estrategias que permitirán prevenir, disminuir y dar control de los aspectos identificados en el tramo de la acequia estudiado, que generan el deterioro de los factores ambientales. (Pérez, 2018)

La población a la que se dirige el estudio es la que se encuentra asentada alrededor de la acequia y que puede verse afectada por las inundaciones producto del desbordamiento del canal en épocas de invierno (Pérez, 2018).

Hoy en día el análisis de asentamientos informales en zonas de inundación toma mucho valor para el estudio de casos de gestión del riesgo de desastres y la planificación urbana, pues sirve como base para generar matrices de susceptibilidad y definir medidas de mitigación por parte de los entes municipales y gubernamentales.

4. Referente normativo y legal

Los estudios o instrumento de planificación y gestión del riesgo revisados que contienen información respecto a la amenaza en Valledupar corresponden a: la aprobación del segundo Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Valledupar; el POMCA del Río Guatapurí; y el Plan de gestión integral del riesgo de Valledupar, Acuerdo N° 011 de 2015 (CONCEJO MUNICIPAL DE VALLEDUPAR). “POR EL CUAL SE APRUEBA EL SEGUNDO PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL DEL MUNICIPIO DE VALLEDUPAR”. 5 de junio de 2015.

En Colombia se expidió el Decreto 1807 de 2014, compilado en el Decreto 1077 de 2015, por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto-ley 019 de 2012 y se basa en el principio de gradualidad, y dispone dos tipos de estudios, con escalas determinadas, para la incorporación de la gestión del riesgo en los POT, estos son:

- “Estudios básicos para la revisión o expedición de Planes de Ordenamiento Territorial (POT)” y en mismo contiene: a) La delimitación y zonificación de las áreas de amenaza; b) La delimitación y zonificación de las áreas con condición de amenaza en las que se requiere adelantar los estudio& detallados a que se refiere el siguiente artículo; c) La delimitación y zonificación de las áreas con condición de riesgo en las que se requiere adelantar los estudios detallados a que se refiere el siguiente artículo; y d) La determinación de las medidas de intervención, orientadas a establecer restricciones y condicionamientos mediante la determinación de normas urbanísticas, Decreto 1807 de 2014 (PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA) Por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto-ley 019 de 2012 en lo relativo a la

incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones. Artículo 3°. 19 de septiembre de 2014.

El POMCA contiene la información cartográfica donde realiza la zonificación de las amenazas de Inundación y Movimientos en masa sobre la cuenca del río Guatapurí, cubriendo una parte del suelo urbano de Valledupar y los centros poblados rurales de Sabana Crespo, Chemesquemena y Guatapurí.

A partir de la Resolución 0094 de 2023 (CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL CESAR - CORPOCESAR). “POR MEDIO DE LA CUAL SE ESTABLECE EL ACOTAMIENTO DE LA RONDA HÍDRICA DEL RIO GUATAPURÍ, Y SE TOMAN OTRAS DETERMINACIONES”. 10 de marzo de 2023. Esta resolución establece que la cuenca del río Guatapurí requiere de un mantenimiento y protección adecuada, la mayor cantidad de área posible para establecer la ronda hídrica, que vaya acorde al plan de ordenamiento territorial del municipio de Valledupar. Para ello se han realizado estudios técnicos que, en el artículo segundo de la resolución mencionada anteriormente, dictamina los elementos constituyentes en el artículo 206 de la ley 1450 de 2011: “la faja paralela a la línea de mareas máximas o a la del cauce permanente” y “el área de protección o conservación aferente”, con un área de 496 has y 2997 has, respectivamente.

5. Referente teórico

5.1 inundaciones

Las inundaciones son fenómenos hidrológicos recurrentes potencialmente destructivos, que hacen parte de la dinámica de evolución de una corriente. Se producen por lluvias persistentes y generalizadas que generan un aumento progresivo del nivel de las aguas contenidas dentro de un cauce superando la altura de las orillas naturales o artificiales, ocasionando un desbordamiento y dispersión de las aguas sobre las llanuras de inundación y zonas aledañas a los cursos de agua normalmente no sumergidas. (IDEAM, s.f.)

Inundaciones repentinas

Se producen por la presencia de grandes cantidades de agua en muy corto tiempo. Son frecuentes en ríos de zonas montañosas con bastante pendiente, y muchas veces se producen a causa de la siguiente secuencia de fenómenos:

1. Los fuertes aguaceros sobre los terrenos débiles o sin vegetación aceleran la formación de deslizamientos en las montañas cercanas al cauce de los ríos y quebradas. (UNGRD, s.f.)

2. Las rocas, vegetación, y demás materiales que han caído sobre el río forman un represamiento natural de las aguas. (UNGRD, s.f.)

3. El agua ejerce gran fuerza sobre el represamiento hasta que lo rompe arrastrándolo consigo. (UNGRD, s.f.)

Inundaciones lentas o en la llanura

Se producen sobre terrenos planos que desaguan muy lentamente, cercanos a las riberas de los ríos o donde las lluvias son frecuentes o torrenciales. Muchas de ellas son producto del

comportamiento normal de los ríos, es decir, de su régimen de aguas, ya que es habitual que en invierno aumente la cantidad de agua inundando los terrenos cercanos como playones o llanuras. (UNGRD, s.f.)

Inundaciones en ciudades

Las poblaciones que no cuentan con efectivos sistemas de alcantarillado o canales de desagües y aquellas cuya superficie es plana o algo cóncava (como un valle) pueden sufrir inundaciones como efecto directo de las lluvias, independientemente de las inundaciones producidas por desbordamiento de ríos y quebradas. (UNGRD, s.f.)

Figura 2

Erosión provocada por Inundaciones en el barrio Pescadito de Valledupar.



Nota. *Imagen tomada de Reyes, 2021. Fuente: Diario del Norte.

5.2 Análisis multitemporal

Un análisis multitemporal es una técnica utilizada en la interpretación de imágenes de satélite para estudiar cambios en la superficie terrestre a lo largo del tiempo. Se utilizan imágenes de diferentes fechas para comparar y analizar los cambios en la vegetación, la urbanización, la

degradación del suelo, entre otros aspectos. Los datos recolectados en estos análisis son utilizados para monitorear y manejar de manera efectiva los recursos naturales y para tomar decisiones en la planificación urbana y en la gestión ambiental (Ochoa, 2023), el autor menciona como uso de SIG, los siguientes programas como:

- ERDAS Imagine: Es un software de SIG (Sistemas de Información Geográfica) que permite la visualización y análisis de imágenes de satélite y de teledetección.
- ENVI: Es un software de procesamiento de imágenes de satélite que permite la visualización, análisis y extracción de información de imágenes multiespectrales.
- ArcGIS: Es un software de SIG de ESRI que permite la visualización, análisis y gestión de datos geográficos, incluyendo imágenes de satélite.
- QGIS: Es un software de SIG de código abierto que permite la visualización, análisis y gestión de datos geográficos, incluyendo imágenes de satélite.
- Google Earth Engine: Es una plataforma de código abierto que permite el procesamiento y análisis de imágenes de satélite a gran escala.

5.3 Modelo de elevación digital (DEM)

Es una representación cuantitativa de la superficie de la Tierra y la información espacial de los datos, convirtiéndose en una fuente importante de información sobre la elevación, la pendiente y el relieve del terreno para las investigaciones científicas y los investigadores (Jalal et al., 2020, citado por Castillo & Jaramillo, 2022).

Es un producto que se deriva, en este caso de estudio, de los datos del satélite ALOS (Advanced Land Observing Satellite), por medio del sensor PALSAR (Phased Array type L-

band Synthetic Aperture Radar), su utilidad a nivel mundial es valiosa, sobre todo para estudios topográficos y de detalle, debido a su alta resolución espacial y cobertura en la mayoría del mundo.

5.4 Geología, geomorfología y uso del suelo

El uso del suelo influye en gran medida en el análisis de susceptibilidad, pues el agua, factor que influye directamente, se infiltra en el terreno, genera acumulación o puede seguir desplazándose. El factor geológico es otro componente que contribuye a las inundaciones, ya que las características de las formaciones rocosas y la interacción de estas con el agua permite o no la fluidez o represamiento del agua. Por último, las formas en que se presenta el terreno inciden en el curso de un drenaje, si el terreno es plano, se tiende a acumular o represar agua en un punto (no hay fluidez) o si el terreno es montañoso el caudal aumenta y genera inundaciones más agresivas. Todos estos insumos fueron necesarios para la ponderación y normalización de variables, lo cual, permite la elaboración del mapa de susceptibilidad a inundaciones del área de estudio.

5.5 Resolución de imágenes

Establecen el nivel de detalle de los productos que el sistema genera, determinando este en las distintas magnitudes en las que el sistema opera. (Olaya 2014)

Resolución espacial

Indica la dimensión del objeto más pequeño que puede distinguirse en la imagen. En líneas generales es el equivalente al tamaño de píxel, es decir, a la dimensión real que un píxel

de la imagen tiene sobre el terreno. La resolución espacial está en función de la capacidad resolutoria del sensor y las características de la plataforma tales como la altura a la que se sitúa. Asimismo, la resolución espacial está relacionada con la superficie que cada imagen cubre sobre el terreno. El concepto de Campo Instantáneo de Visión indica el ángulo de visión que abarca el sensor, y se utiliza habitualmente en este sentido. El Campo Instantáneo de Visión en Tierra expresa esta misma idea, pero en unidades de longitud sobre el terreno, y es función del IFOV y la altura a la que se encuentre el sensor. (Olaya 2014).

5.6 Imágenes PlanetScope

Planet Labs, Inc. es una compañía de observación de la tierra a través de satélites privados los cuales almacenan y automatizan la información, dando acceso a un conjunto de datos completos y diarios capturados por sus diferentes sensores (Planet, 2022). Las imágenes PlanetScope son obtenidas a la fecha por aproximadamente 130 satélites llamados "Doves" capaces de recopilar datos de toda la superficie terrestre de manera diaria (200 millones de Km²/día) con una resolución espacial cercana a 3 metros por píxel (Planet, 2022).

Planet opera más de 200 satélites que, en conjunto, proporcionan un conjunto de datos sin precedentes de imágenes de observación de la Tierra. Con una combinación única de cobertura, frecuencia y resolución, Planet proporciona información geoespacial a la velocidad del cambio, ayudándole a obtener una comprensión más matizada de las cambiantes condiciones del terreno.

Posee tres opciones de precisión visual y potencia analítica, desglosados en la figura 3.

Figura 3

Descripción de los sensores principales de planet labs para obtener imágenes satelitales.

	PLANETSCOPE	RAPIDEYE	SKYSAT
Bands	8 (RGB, NIR)	5 (RGB, red edge, NIR)	5 (RGB, NIR, pan)
Products	Color enhanced Visual Analytic	Color enhanced Visual Analytic	Visual Panchromatic Pansharpened multispectral Analytic
Pixel Resampled	3 m	5 m	Visual, panchromatic, pansharpened multispectral: 0.5m
Radiometric Resolution	Visual: 8 bit Analytic: 16 bit		Visual: 8 bit Analytic, panchromatic, and pansharpened multispectral: 16 bit
Positional Accuracy	< 10 M RMSE		
File Format	GeoTIFF		

Nota. *Fuente: planet Labs, sección sensores.

5.7 Método de jerarquías analíticas de saaty

El método Analytic Hierarchy Process (AHP), propuesto por Thomas Saaty en 1980 es un método cuantitativo para la toma de decisiones multicriterio que permite generar escalas de prioridades basándose en juicios expertos manifestados a través de comparaciones por pares mediante una escala de preferencia. Esta escala permite incorporar en un modelo de decisión juicios sobre intangibles, representando la dominancia o preferencia de una alternativa frente a otra en relación con un atributo (Nantes, 2019).

El AHP utiliza una escala subyacente con valores de 1 a 9 para calificar las preferencias relativas de los dos elementos. Se presentan las calificaciones numéricas que se recomiendan para las preferencias verbales expresadas por el decisor (Saaty, 1990).

Figura 4

Escala fundamental de comparación por pares (Saaty, 1980).

VALOR	DEFINICIÓN	COMENTARIOS
1	Igual importancia	El criterio A es igual de importante que el criterio B
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente al criterio A sobre el B
5	Importancia grande	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente el criterio A sobre el B
7	Importancia muy grande	El criterio A es mucho más importante que el B
9	Importancia extrema	La mayor importancia del criterio A sobre el B está fuera de toda duda
2,4,6 y 8	Valores intermedios entre los anteriores, cuando es necesario matizar	

Nota. * Fuente: Saaty, T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*, McGraw-Hill.

Matriz de comparaciones pareadas

Consiste en una matriz cuadrada que contiene comparaciones pareadas de alternativas o criterios.

Sea \mathbf{A} una matriz $n \times n$, a_{ij} el elemento (i, j) de \mathbf{A} , para $i = 1, 2, \dots, n$, $y, j = 1, 2, \dots, n$.

Decimos que \mathbf{A} es una matriz de comparaciones pareadas de n alternativas, si a_{ij} es la medida de la preferencia de la alternativa en el renglón i cuando se le compara con la alternativa de la columna j . Cuando $i = j$, el valor de a_{ij} será igual a "1", pues está comparando la alternativa consigo misma (Toskano, s.f.).

Figura 5.

Matriz de pares nxn, ejemplo.

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

Además, se cumple que: $a_{ij} \cdot a_{ji} = 1$; es decir:

Figura 6.

Forma de completar la matriz nxn.

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & & 1 \end{pmatrix}$$

El AHP sustenta esto con los siguientes axiomas:

Axioma 1. Referido a la condición de juicios recíprocos: Si A es una matriz de comparaciones pareadas se cumple que $a_{ij} = 1/a_{ji}$.

Axioma 2. Referido a la condición de homogeneidad de los elementos.

Axioma 3. Referido a la condición de estructura jerárquica o estructura dependiente.

Axioma 4. Referido a la condición de expectativas de orden de rango: Las expectativas deben estar representadas en la estructura en términos de criterios y alternativas (Toskano, s.f.).

6. Metodología

Este trabajo investigativo parte de la problemática que genera el establecimiento de asentamientos informales en zonas no aptas para vivir, en la parte noreste de la Comuna 1 de Valledupar, ya que es una zona susceptible a inundaciones por el desbordamiento del río Guatapurí, debido a las altas precipitaciones en época invernal, por ende, la metodología a aplicar será el “Método de análisis jerárquico (AHP)”, que ayuda a tomar decisiones y resolver problemas complejos sintetizándolos en partes más simples, a partir de la comparación y organización por jerarquía, permitiendo elegir las variables prioritarias que influyen en la susceptibilidad a inundaciones.

6.1 Enfoque metodológico

El enfoque del estudio es mixto, donde se tienen datos cuantificables y cualitativos, pero el resultado constará de descripciones detalladas de las variables estudiadas.

6.2 Tipo de estudio

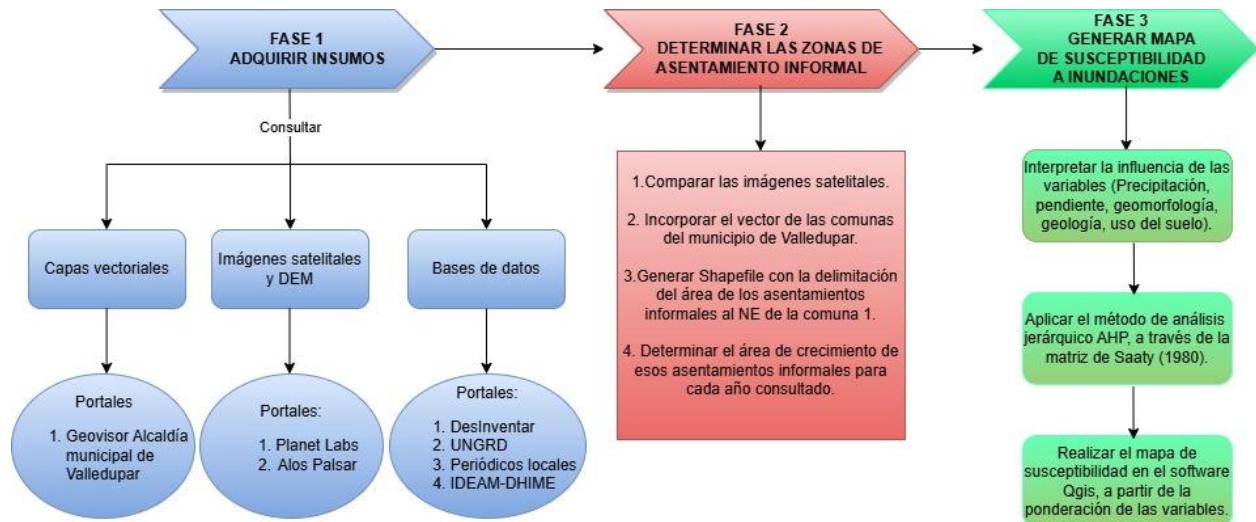
El carácter de este estudio es de tipo correlacional, ya que es necesario la utilización de dos o más variables que se relacionan entre sí, por medio de una matriz de comparación de variables.

6.3 Procedimiento

Esta investigación fue dividida en tres fases, tal como se muestra en la figura 7, donde se especifican las actividades necesarias para llevar a cabo el estudio.

Figura 7.

Esquema de las fases implementadas.



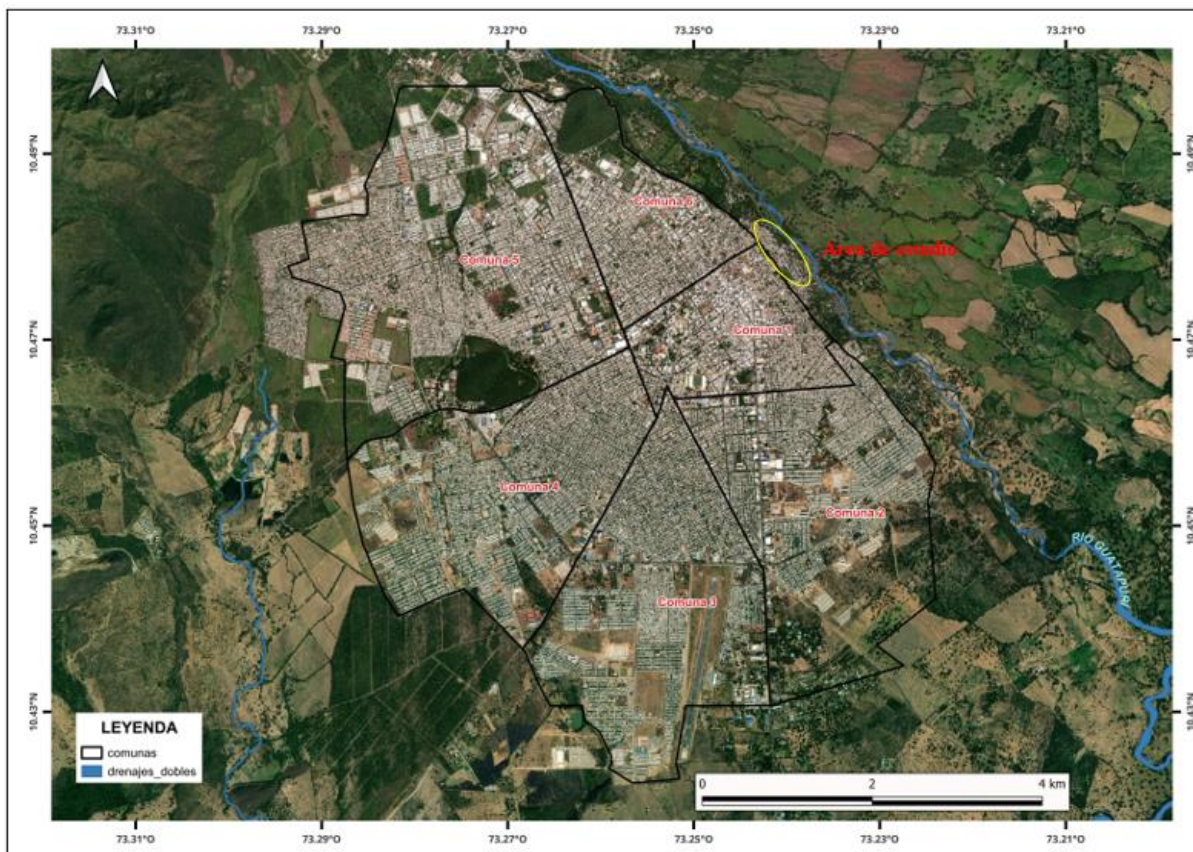
Nota*. Fuente propia.

Localización del área de estudio

Los asentamientos informales de la presente investigación se encuentran localizados al noreste de la Comuna 1 de Valledupar, abarcando la margen derecha del río Guatapurí, limita al occidente con la Sierra Nevada de Santa Marta, al este con la serranía del Perijá, al norte con el corregimiento de Guacoche y al sur con el centro de la ciudad.

Figura 8

Mapa de localización de la zona de estudio noreste de la comuna 1 en Valledupar, Cesar.



Nota*. Fuente propia. Realizado en el software Qgis.

6.3.1 Fase 1. Adquirir los insumos necesarios para el estudio

Búsqueda en bases de datos

En esta fase se ingresa a portales web de datos abiertos para revisar la información secundaria que fue tomada para el desarrollo del proyecto, a continuación, se mencionan las fuentes más relevantes:

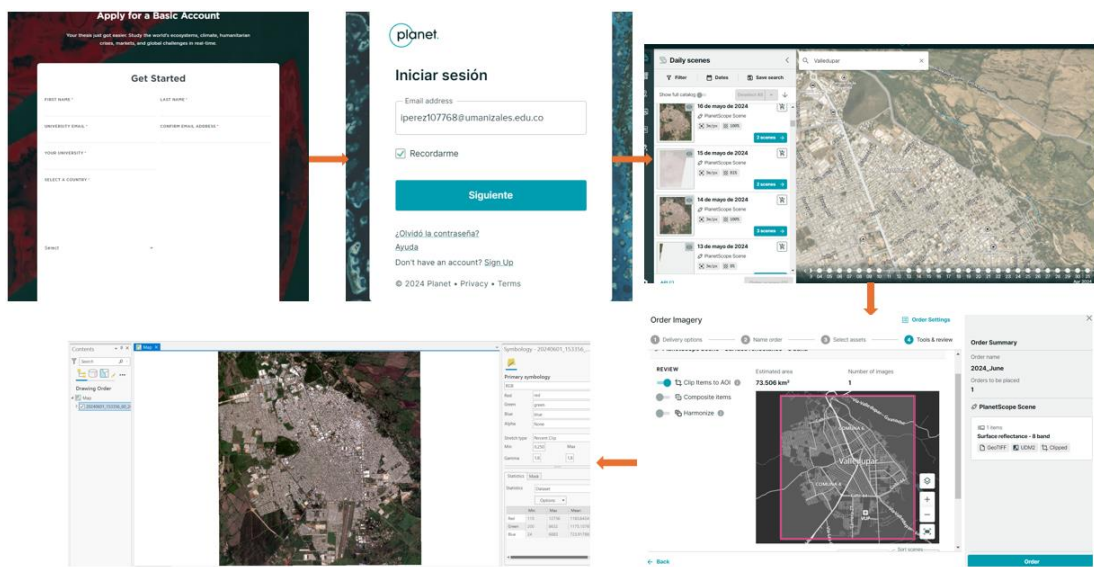
- Eventos históricos concernientes a inundaciones en Valledupar, tomados de las plataformas DesInventar Sendai y en la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD).
- Reportes de los desastres naturales ocurridos en el municipio de Valledupar a través de información periodística de medios locales como “El Pílon”, “El Heraldó” y “La Región”
- Datos en archivo excel de precipitación anual en milímetros obtenida del geoportal del IDEAM- DHIME. Estos datos al tener coordenadas se espacializan en el SIG Qgis y se aplica el método de interpolación IDW, para la estimación de valores de precipitación variable.

Descarga de imágenes satelitales y DEM

Se descargaron imágenes del satélite PlanetScope para los años 2016, 2020 y 2024, todas correspondientes al mes de mayo, con una resolución espacial de 4,7m/píxel, del portal Planet Labs. En la figura 13 se hace énfasis en el procedimiento a realizar para la obtención de las imágenes.

Figura 9

Procedimiento a seguir para poder descargar imágenes del satélite PlanetScope.

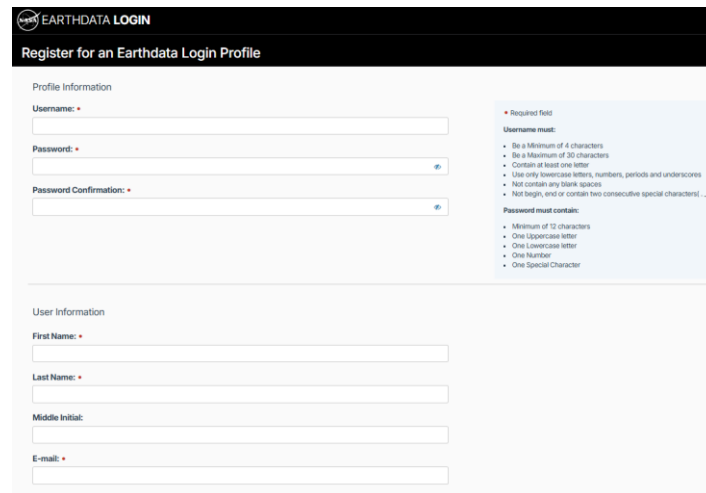


Nota. *Pasos realizados por autor.

Otro insumo corresponde al DEM de 12.5m obtenido de los productos del satélite ALOS de Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA), que adquirió imágenes radar entre 2006 y 2011 (Gis&Beers, 2018). Por medio del geoportal de ASF Data Search (Sistema de Universidad de Alaska), se llenan las casillas para realiza el registro y asignación de usuario y contraseña, como se muestra en la figura 14.

Figura 10.

Registro de cuenta personal para obtener el modelo de elevación digital.



The image shows a web form titled "EARTHDATA LOGIN" and "Register for an Earthdata Login Profile". The form is divided into two main sections: "Profile Information" and "User Information".

Profile Information:

- Username:** A required text input field.
- Password:** A required text input field with a strength indicator icon.
- Password Confirmation:** A required text input field with a strength indicator icon.

Required field:

- Username must:**
 - Be a Minimum of 4 characters
 - Be a Maximum of 30 characters
 - Contain at least one letter
 - Use only lowercase letters, numbers, periods and underscores
 - Not contain any blank spaces
 - Not begin, end, or contain two consecutive special characters (.,_)
- Password must contain:**
 - Minimum of 12 characters
 - One Uppercase letter
 - One Lowercase letter
 - One Number
 - One Special Character

User Information:

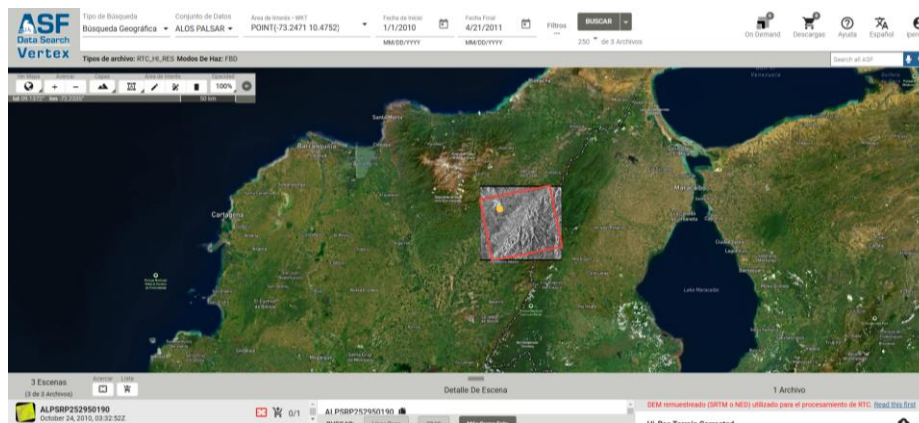
- First Name:** A required text input field.
- Last Name:** A required text input field.
- Middle Initial:** A text input field.
- E-mail:** A required text input field.

Nota. *Tomado de <https://search.asf.alaska.edu/Login>.

Automáticamente se remite al ASF data search con la cuenta anteriormente registrada, luego se procede a escoger la zona de interés con ciertas especificaciones de filtro, como resolución de la imagen alta y las fechas más recientes entre 2010 y 2011 (últimos dos años donde el satélite obtuvo imágenes de radar), como se muestra en la figura 11.

Figura 11.

Geoportal ASF Data Search, filtrando ciertas características.



A partir del DEM se obtiene la pendiente en el software Qgis de la siguiente manera:

- Ir al menú “Procesos” y seleccionar “Caja de herramientas de Procesamiento”. En la caja de herramientas, ir a Análisis de Terreno > Pendiente.
- En la ventana de la herramienta de Pendiente, selecciona tu capa DEM en el campo de Entrada. Se elige la unidad de salida en grados.
- Se especifica una ubicación y un nombre para guardar el archivo de salida, se ejecuta el proceso y el SIG calculará la pendiente para cada píxel en el DEM y creará una nueva capa tipo ráster con el valor de pendiente.

Para convertir la capa ráster de pendiente creada a vector, se sigue lo siguiente:

- Dirigirse a la “Caja de herramientas de Procesamiento” en QGIS y buscar la herramienta Poligonizar.
- Seleccionar la capa de entrada ráster (pendiente), especificar el nombre y ruta de guardado.
- Hacer clic en Ejecutar. Esto convertirá cada valor de pendiente en el ráster en un polígono vectorial, representando las zonas de distinta pendiente.

Descarga de capas vectoriales

Se obtienen archivos tipo shapefile de geometrías tipo polígono de la geología, geomorfología, uso del suelo, comunas, drenaje doble (río Guatapurí) extraídas directamente del geovisor de datos abiertos (idevup.gov.co) de la Alcaldía Municipal de Valledupar.

6.3.2 Fase 2. Delimitar las zonas de asentamiento informal susceptible a inundaciones

En esta fase, por medio del software QGIS, se realizó una comparación de las imágenes satelitales descargadas de Planet Labs para los años 2016, 2020 y 2024. Se digitalizaron tres capas poligonales que delimitan el área de ocupación informal al noreste de la comuna 1, teniendo como referencia la capa vectorial de los límites comunales del casco urbano de la ciudad de Valledupar, a su vez, se indicó el porcentaje de crecimiento cada 4 años, iniciando en el 2016.

Finalmente, se describen y caracterizan los insumos anteriormente obtenidos, con el fin de interpretar la influencia de este componente espacial a la susceptibilidad a inundaciones de los asentamientos informales al noreste de la comuna 1 de Valledupar.

6.3.3 Fase 3. Analizar las variables: pendiente, geomorfología, geología y uso del suelo, con el fin de generar del mapa de susceptibilidad a inundaciones para el área de estudio.

Una vez descargados y analizados los datos de las fases anteriores, se consideran cinco factores relevantes que son: La precipitación, la pendiente, la geomorfología, la geología y el uso del suelo.

Cada variable nombrada anteriormente presenta una probabilidad de ocurrencia de inundaciones, por ende, se realizó una interpretación de estas por separado, utilizando mapas donde se visualiza la influencia sobre los asentamientos informales al NE de la comuna 1 de Valledupar.

Con la información argumentada, se aplica el método de análisis jerárquico (AHP) de saaty (1980) para asignar la jerarquía a las variables y poder normalizarlas, para finalmente ponderarlas e introducirlas en el SIG para generar el mapa de susceptibilidad a inundaciones.

7. Resultados

7.1 Resultados fase 1

A continuación, se exponen los productos obtenidos de diferentes bases de datos, geovisores y páginas web mencionados en la fase 1.

7.1.1 Base de datos

Desinventar Sendai

Se realiza la verificación de catálogos de eventos reportados en el Sistema de Inventario de desastres, el cual es un software que permite la sistematización, organización, recolección y visualización de los desastres históricos y el análisis de estos desde un punto de vista espacial y temporal. Fue desarrollado en el año 1994 por La Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres LA RED, La Corporación Observatorio Sismológico del Suroccidente Colombiano (OSSO) y La Oficina de la Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR). (OSSO & LA RED,2009).

Dentro del portal de información del DesInventar se filtran las opciones referentes a eventos de inundación en la ciudad de Valledupar desde el año 2010 hasta 2017 (último reporte que tiene en la página) como se muestra en la figura 12.

Figura 12.

Filtro para consultar sobre eventos de inundación en la ciudad de Valledupar.

The screenshot shows the 'Definición de Consulta' (Search Definition) interface. The filters are set as follows:

- Región:** Colombia
- Departamento:** Cesar
- Municipio:** Valledupar
- Nivel 2:** (Empty)
- Causa:** FLOOD

The 'Tipo de Desastre' (Disaster Type) list includes: FLOOD, LANDSLIDE, FORESTFIRE, STRONGWIND, FIRE, SPATE, EARTHQUAKE, RAIN, DROUGHT, and STRUCTURE. The 'Causa' (Cause) list includes: Huracán, FLOOD, THERMALINVERSION, ENSO_GIRL, RAIN, LOCALIZATION, FOG, NEGLIGENCE, Ola de calor, and OTHER.

Con los filtros establecidos, se observa que se tienen datos solamente de Valledupar, donde tienen la lista los barrios o zonas afectadas por el fenómeno de inundación.

Figura 13

Captura de eventos históricos de inundaciones en Valledupar.

Serial	Evento	Departamento	Municipio	Fecha	Lugar	Muertos	Heridos	Desaparecidos	Viviendas Destruídas	Viviendas Afectadas	Damificados
UNGRD-2016-0303	FLOOD	Cesar	Valledupar	2016/10/09							70
UNGRD-2016-0162	FLOOD	Cesar	Valledupar	2016/04/27							2
UNGRD-2017-0193	FLOOD	Cesar	Valledupar	2017/05/05							35
UNGRD-2014-0283	FLOOD	Cesar	Valledupar	2014/10/05	BARRIOS ARIGUANÍ, TABLITAS, CHIMILA, LA MAGDALENA, PAZ DEL R						
UNGRD-2014-0131	FLOOD	Cesar	Valledupar	2014/05/21							31
UNGRD-02851	FLOOD	Cesar	Valledupar	2013/09/20							4
UNGRD-02842	FLOOD	Cesar	Valledupar	2013/09/19							
UNGRD-01872	FLOOD	Cesar	Valledupar	2013/06/01							6
UNGRD-01608	FLOOD	Cesar	Valledupar	2013/05/06					1		
UNGRD-2012-0320	FLOOD	Cesar	Valledupar	2012/10/30							
UNGRD-2012-0315	FLOOD	Cesar	Valledupar	2012/10/23							
UNGRD-2012-0314	FLOOD	Cesar	Valledupar	2012/10/22							3
UNGRD-2012-0075	FLOOD	Cesar	Valledupar	2012/03/20							
DGR-2011-02220	FLOOD	Cesar	Valledupar	2011/10/18	CESAR/VALLEDUPAR						
DGR-2011-02125	FLOOD	Cesar	Valledupar	2011/10/13	ZONA RURAL	1					
DGR-2011-01918	FLOOD	Cesar	Valledupar	2011/08/07	BARRIO 3 DE MARZO						4
DGR-2011-01782	FLOOD	Cesar	Valledupar	2011/08/22	CORREGIMIENTO DE MARIA ANGOLA						
DGR-2011-01747	FLOOD	Cesar	Valledupar	2011/08/15							50
DGR-2011-01742	FLOOD	Cesar	Valledupar	2011/08/13							35
DGR-2011-01738	FLOOD	Cesar	Valledupar	2011/08/11							66
DGR-2011-01739	FLOOD	Cesar	Valledupar	2011/08/11							10
DGR-2011-01692	FLOOD	Cesar	Valledupar	2011/06/25	BALNEARIO HURTADO	1					
DGR-2011-01432	FLOOD	Cesar	Valledupar	2011/06/17	BARRIOS: PESCADITO 9 DE MARZO VILLA CASTRO PARAISO LA CAN						10
DGR-2011-01239	FLOOD	Cesar	Valledupar	2011/05/25	SEQUIA LAS MERCEDES BARRIOS AMANECER DEL VALLE FRANCISCO J						830
DGR-2010-01291	FLOOD	Cesar	Valledupar	2010/10/20	CORREGIMIENTO BASILLO						60
DGR-2010-01208	FLOOD	Cesar	Valledupar	2010/10/04	VEREDA CAMPANTAL Y CORREGIMIENTO AGUA BLANCA, CASCO URB Y						14

Nota. * Plataforma online de datos nacionales del "DesInventar Sendai.

La figura anterior nos muestra la falta de información que se tiene en la base de datos, que en su mayoría no se sabe el lugar o sitio que fue perjudicado ante este evento. Se destaca el año 2011 como el de mayor reporte de eventos de inundación en la ciudad, afectando los barrios constituidos de manera informal a la margen derecha del río Guatapurí, como “9 de marzo” y “pescaito” afectando catorce viviendas cercanas a la comuna 1.

Sin embargo, de la plataforma no se obtiene información relevante para el proceso más que la descripción y la justificación de los eventos ocurridos en la zona.

Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres - UNGRD

La UNGRD cuenta con un inventario de reporte de emergencias presentadas en todo el territorio nacional, en la cual se encuentran los eventos de inundación ocurridos al noreste de la comuna 1 del municipio de Valledupar. En la siguiente tabla se muestra el evento, lugar y afectación sobre la vida humana.

Tabla 1

Eventos históricos de inundaciones en la comuna 1 de Valledupar.

ID	FECHA	EVENTO	LUGAR	MUERTOS	HERIDOS	FUENTE
1	1981/05/01	Avenida Torrencial	Barrio Pescadito (Valledupar)	-	-	UNDRR
2	2000/11/08	Inundación		-	-	UNDRR
3	2004/05/20	Inundación		-	-	UNDRR
4	2005/11/18	Inundación		-	-	UNDRR
5	2009/11/05	Inundación		-	-	UNDRR
6	2011/06/25	Inundación		1	-	UNDRR
7	2011/10/07	Inundación		-	-	UNDRR

8	2016/04/27	Inundación	-	-	UNDRR
	2017/08/05	Inundación	-	-	UNDRR


La representación de los datos no posee información suficiente para realizar un análisis estadístico, por ende, solo se utilizó de referencia.

Reportes periodísticos locales

Hace referencia a los eventos de inundación de mayor relevancia reportados en diferentes periódicos de la ciudad de Valledupar, ocurridos en los barrios informales de la parte noreste de la Comuna 1 del municipio, específicamente los nombrados “Paraíso 1”, “Paraiso2”, “9 de marzo” y “Pescaito”.

Figura 14

Datos representativos de medios locales sobre eventos de inundación en Valledupar.

FECHA	SINTESIS	EVIDENCIA
2014/04/01	CAUSA: posibles alteraciones de corriente AREA AFECTADA: comuna 1: barrios Pescaito, Paraíso, Nueve de Marzo, Once de Noviembre y Nueva Colombia Comuna 2: barrio Panamá Comuna 4: barrios La Victoria, Villa Taxi, 450 Años, y Galán AFECTACION: inundaciones	Fuente: Diario local “El Pilón”
2020/10/31	CAUSA: creciete del río Guatapuri AREA AFECTADA: barrio 9 de marzo AFECTACION: afectación en las estructuras de las casas COTA DE INUNDACION:	<p>Creciente del Guatapuri deja más de 20 familias afectadas en Valledupar</p>  <p>Fuente: https://www.elheraldo.co/cesar/creciete-del-guatapuri-deja-mas-de-20-familias-afectadas-en-valledupar-770062</p>
2022/01/22	CAUSA: crecida del río Guatapuri AREA AFECTADA: barrio 9 de marzo AFECTACION: hogares damnificados. COTA DE INUNDACION: no referida.	<p>Más de 20 familias afectadas en el barrio 9 de Marzo por crecida del río Guatapuri</p> <p>Fuente: https://www.laregional.net/mas-de-20-familias-afectadas-en-el-barrio-9-de-marzo-por-crecida-del-rio-guatapuri/</p>

Estos datos referentes dan más detalle a cerca de los eventos de inundación, específicamente en la comuna 1, haciendo referencia a los barrios pescaito y 9 de marzo, estas informaciones son tomadas de primera mano, donde el reportero del medio de comunicación realiza entrevistas directas y toma evidencia, para luego reportar la noticia, es decir, está en el lugar de los hechos y puede caracterizar mejor las afectaciones que sufren las personas.

IDEAM

Se tomó como registro las estaciones climatológicas del IDEAM dispersas en ciertos sectores del departamento del Cesar, de las cuales, 9 estaciones cuentan con información pluviométrica, suficientes para realizar el análisis de interpolación IDW, donde precipitación anual medida en milímetros.

En la Tabla 2 se muestran las estaciones seleccionadas para realizar el análisis climatológico.

Tabla 2

Estaciones pluviométricas principales del departamento del Cesar.

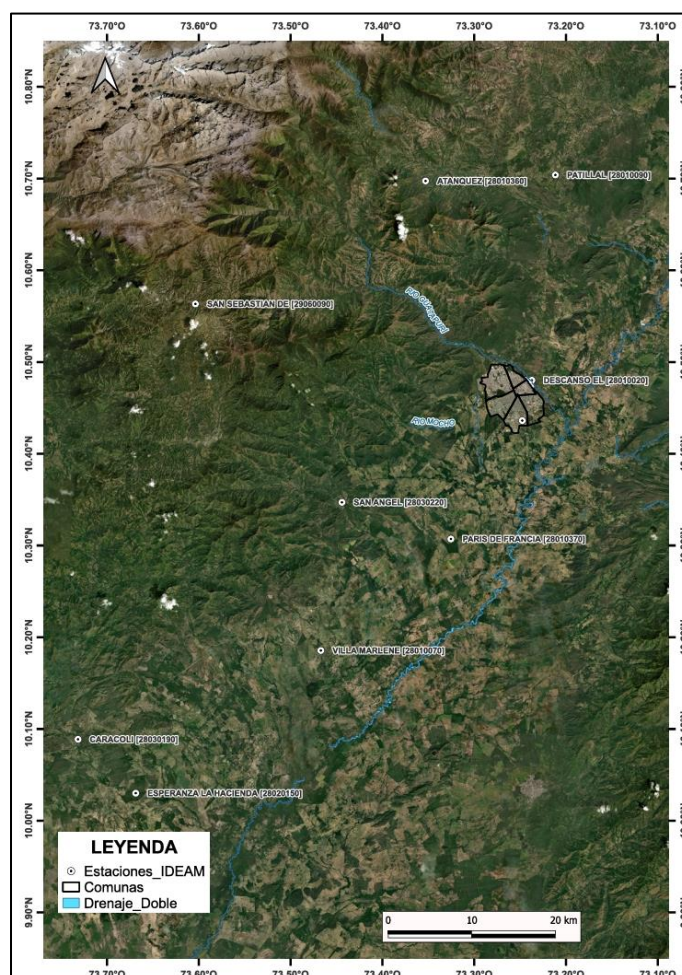
NOMBRE	CATEGORIA	Frecuencia	MUNICIPIO
AEROPUERTO ALFONSO LOPEZ [28025502]	Sinóptica Principal	Anual	Valledupar
SAN SEBASTIAN DE [29060090]	Pluviométrica	Anual	Pueblo Bello
ATANQUEZ [28010360]	Pluviométrica	Anual	Valledupar
DESCANSO EL [28010020]	Pluviométrica	Anual	Valledupar
PATILLAL [28010090]	Pluviométrica	Anual	Valledupar
CARACOLI [28030190]	Pluviométrica	Anual	Valledupar

ESPERANZA LA HACIENDA [28020150]	Pluviométrica	Anual	Valledupar
SAN ANGEL [28030220]	Pluviométrica	Anual	Valledupar
PARIS DE FRANCIA [28010370]	Pluviométrica	Anual	Valledupar
VILLA MARLENE [28010070]	Pluviométrica	Anual	Valledupar

A continuación, se presenta la distribución espacial de cada estación pluviométrica en el departamento del Cesar.

Figura 15.

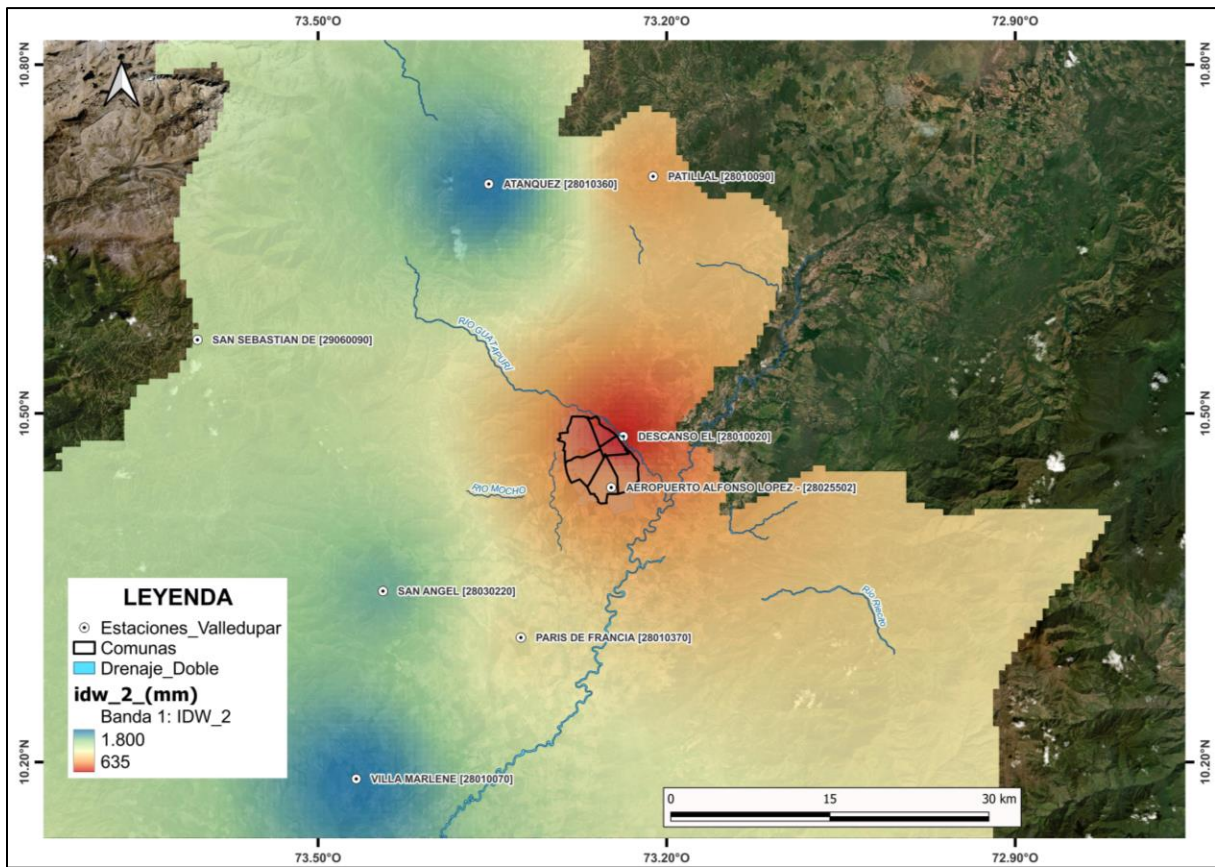
Ubicación espacial de las estaciones pluviométricas en el departamento del Cesar.



Se realiza la interpolación IDW en el software Qgis, de las estaciones donde se capta la precipitación anual medida en milímetros, para el departamento del Cesar

Figura 16

Interpolación de precipitación anual de 10 estaciones climatológicas con el método IDW.



El mapa anterior consta de precipitaciones en el rango de 635 a 1800 mm anuales promedio de precipitaciones en la mayoría de los municipios del departamento del Cesar, cabe resaltar, que la zona que presenta mayores precipitaciones corresponde al piedemonte oriental de

la Sierra Nevada de Santa Marta, por ende, indica partes altas, por lo general, sobre el nacimiento de los ríos.

7.1.2 Portales

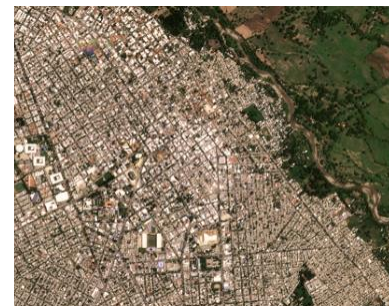
Planet Lab

En la siguiente tabla se tienen las características en común de las imágenes PlanetScope descargadas

Tabla 3.

Características principales de las imágenes seleccionadas.

	Imagen mayo 2016	Imagen mayo 2020	Imagen mayo 2024
Cobertura de nubes: 5%			
4 bandas multispectrales			
Azul (Blue)			
Verde (Green)			
Rojo (Red)			
Infrarrojo Cercano (NIR)			
Resolución			
4.7m/pixel			

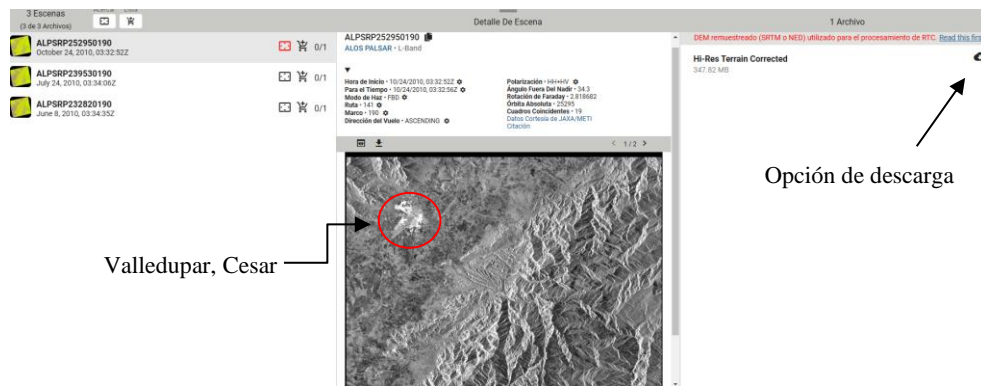


ALOS PALSAR – DEM

Se realizó la descarga del DEM de 12.5m de resolución espacial, como se muestra en la figura 17.

Figura 17.

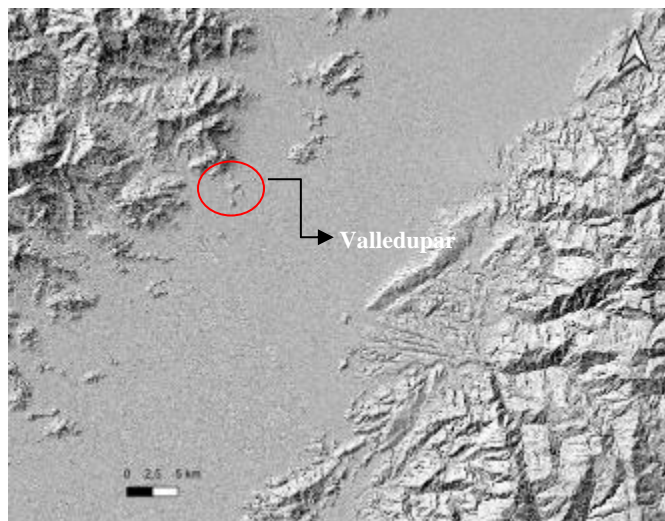
Modelo de elevación digital a descargar.



Como resultado se obtuvo un modelo de elevación que cubre en su totalidad la ciudad de Valledupar y las estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta (donde nace el río Guatapurí).

Figura 18.

DEM 12.5m de la zona de influencia del proyecto.



7.2 Resultados de la fase 2

Los resultados de esta fase corresponden a la estimación del crecimiento urbanístico, para delimitar zonas de mayor ocupación cercanas a la margen derecha del río Guatapurí.

7.2.1 Delimitación de asentamientos informales que influyen en el crecimiento urbanístico

Para comprender la dinámica y observar los cambios que se han dado al noreste de la comuna 1 de Valledupar fue necesario realizar un análisis multitemporal entre el año 2016, 2020 y 2024, estos cambios se cuantifican y se interpretan de manera cualitativa.

Año 2016

En la imagen satelital correspondiente al año 2016 se observa que fuera del área demarcada como comuna 1 (324 ha incluido el área informal por fuera del límite) y parte de la 6 hay una acumulación de infraestructuras, las cuales fueron delimitadas por el polígono de color Naranja (con algo de transparencia) ocupando un área de 19.71 ha, lo que lleva a inducir que el 6,08% del área tiene una ocupación no formalizada.

Figura 19.

Asentamientos informales al Noreste de la comuna 1 de Valledupar para el año 2016.

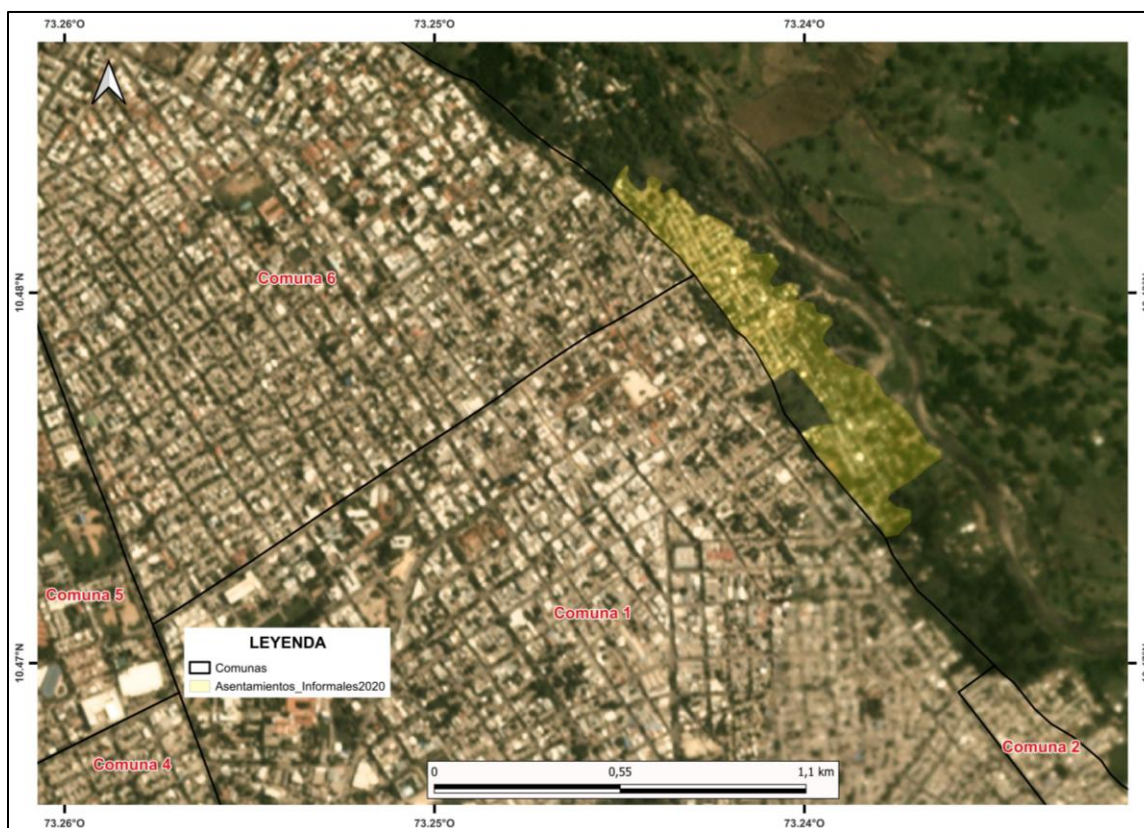


Año 2020

Para el 2020 la ocupación de terreno fuera del perímetro NE de la comuna 1 es de 25 ha, al menos un 7,6% de área es abarcada por el establecimiento informal de viviendas, lo que quiere decir que el crecimiento fue de un 1,52% con respecto a los 4 años anteriores.

Figura 20

Imagen satelital del año 2020 del satélite PlanetScope.



Año 2024

Para el 2024 se ha evidenciado una ocupación de asentamientos informales al NE de la comuna 1 de Valledupar de 33,7 ha, lo que equivale a un 10% de ocupación. Con respecto al

2020 el crecimiento fue de 2,4%, lo que quiere decir que en 4 años se ha acrecentado la informalidad a la margen derecha del río Guatapurí de la ciudad de Valledupar.

En la ciudad de Valledupar el crecimiento urbano no obedece a regulaciones por la autoridad municipal, esto ha transformado el paisaje y a su vez, ha generado situaciones de riesgo sobre la margen derecha del río Guatapurí.

Figura 21

Zona de asentamiento informal observada en imagen satelital de planetScope, año 2024.



Finalmente se obtiene para los años estudiados un crecimiento de población descritos en la presente tabla:

Tabla 4.

Resultados comparativos medidos en hectáreas de cada imagen satelital.

Año 2016 (ha)	Año2020 (ha)	Año 2024 (ha)
19.71	25	33.7

7.3 Resultados de la fase 3

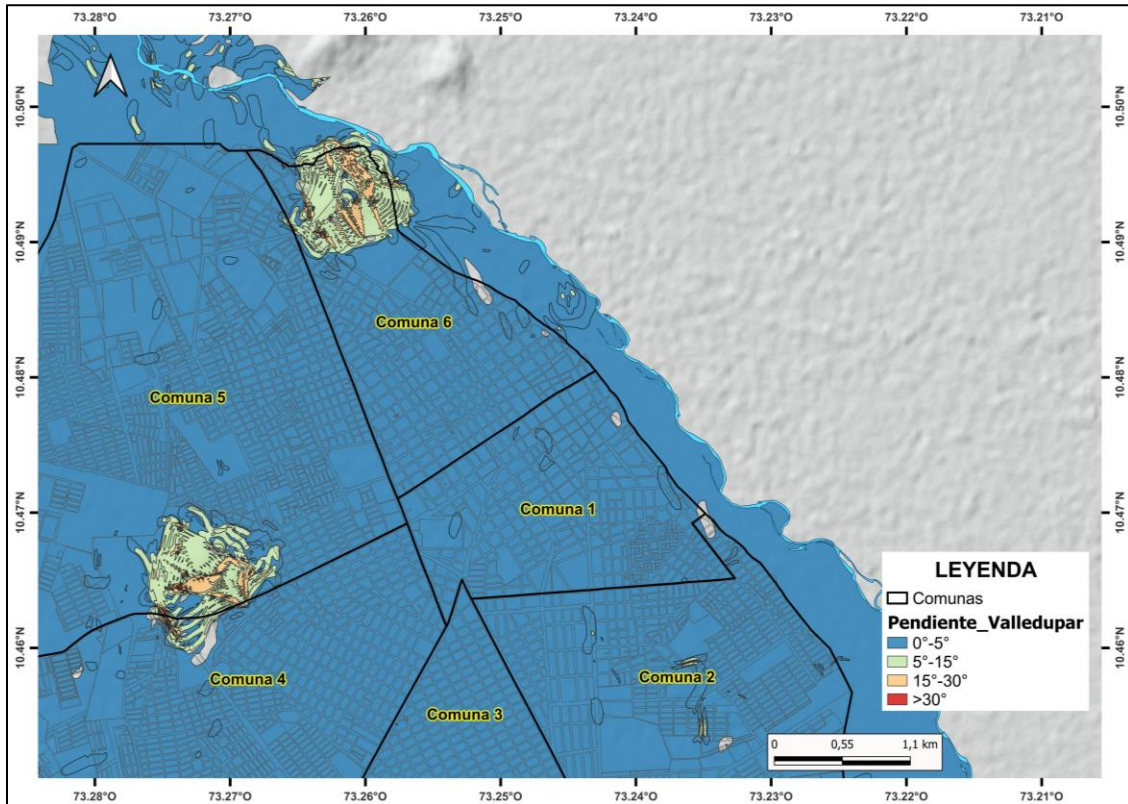
En este apartado, se analiza cada variable de forma detallada para evaluar su impacto en la comuna. Se aplica el método de Análisis Jerárquico de Procesos (AHP) y, mediante el uso del software QGIS, se genera el mapa de susceptibilidad a inundaciones.

7.3.1 Pendiente

Generada a partir del DEM de 12.5m, se establecieron parámetros medidos en grados, clasificando así el comportamiento de la pendiente según los colores.

Figura 22

Mapa de pendiente en la ciudad de Valledupar.



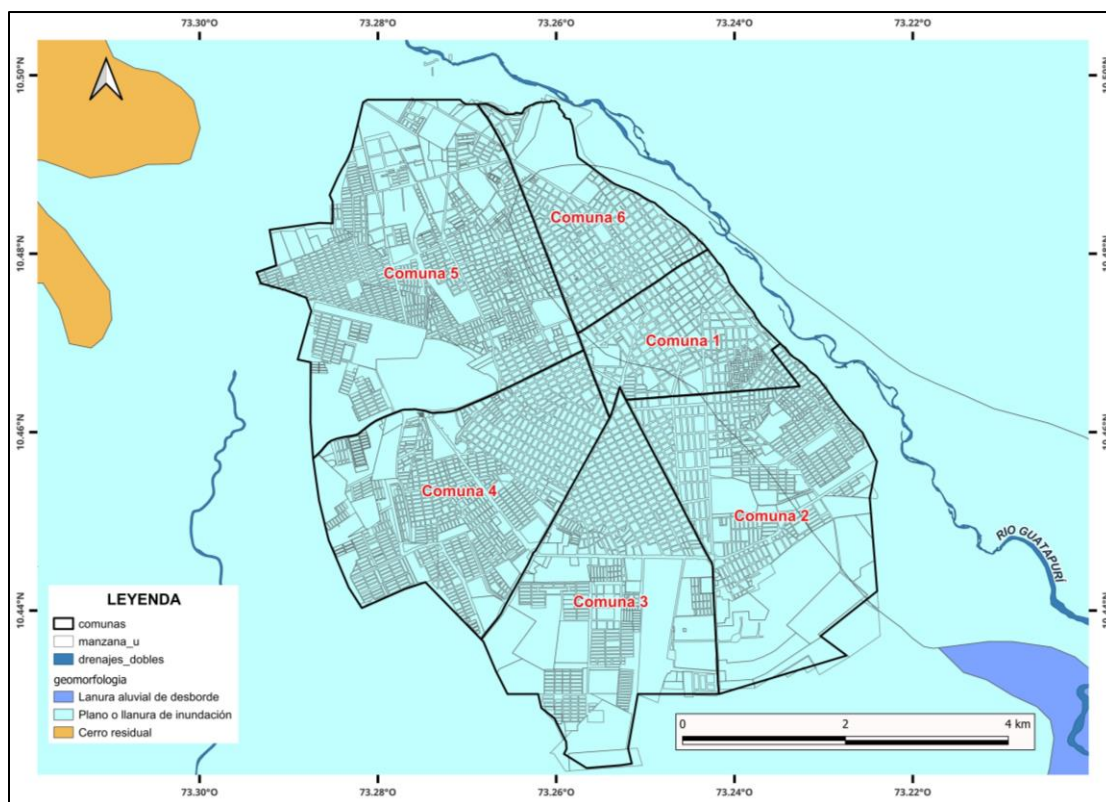
Se puede observar que la zona de estudio es relativamente plana, por lo que es inminente que el agua se acumule más fácilmente en la ribera del río (mayor susceptibilidad a inundaciones), ya que no hay terrenos inclinados que favorezcan el curso rápido de esta.

7.3.2 Geomorfología

Esta capa geográfica tomada de los insumos del geoportal de la alcaldía municipal, está mapeada a escala 1:100000, por lo tanto, las unidades geomorfológicas no están a detalle.

Figura 23

Mapa geomorfológico que muestra las geoformas presentes en Valledupar.



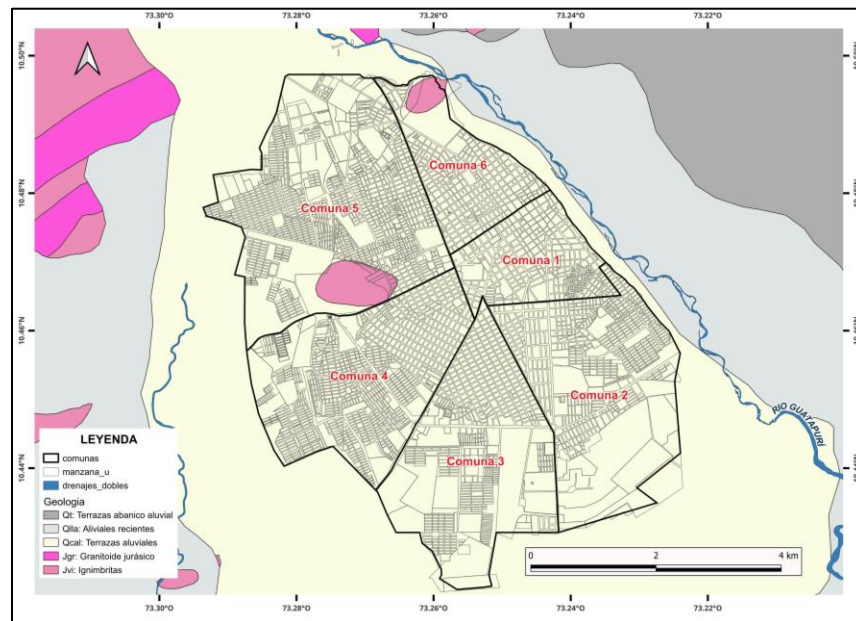
La figura muestra que la ciudad de Valledupar se encuentra sobre una llanura de inundación, ocupando parte del piedemonte oriental de la Sierra Nevada de Santa Marta. En esta zona se han formado abanicos aluviales cuyos sedimentos se depositan en las áreas bajas, como en el caso representado, lo que la hace susceptible a inundaciones periódicas debido a la proximidad al principal afluente de la ciudad y a la pendiente suave del terreno. En épocas de lluvias intensas, el río experimenta crecidas que provocan desbordamientos, afectando las zonas planas circundantes.

7.3.3 Geología

La capa geográfica de unidades geológicas se encuentra a escala 1:100000, no se tienen registros locales o a detalle en el municipio de Valledupar.

Figura 24

Mapa geológico de la ciudad de Valledupar.



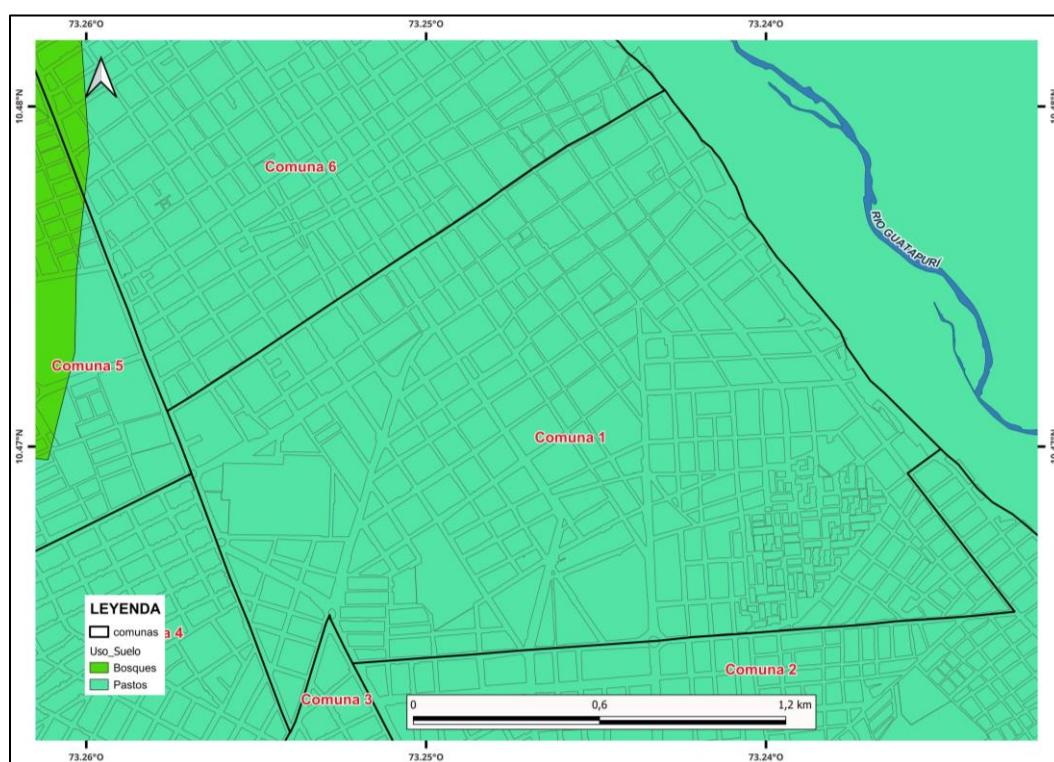
La geología es afín a la geomorfología, por ende, en la zona de estudio se tienen terrazas aluviales, formadas por la deposición de sedimentos que fueron arrastrados por el río en un tiempo geológico determinado, son un poco más elevados que la llanura de inundación, pero a medida que se han construido viviendas sobre estas terrazas, han dado lugar a disminuir la capacidad de infiltración del agua, lo que asevera el encharcamiento de agua en estas zonas.

7.3.4 Uso del Suelo

Al igual que las anteriores variables la escala de mapeo de uso del suelo es muy generalizada (1:100000).

Figura 25

Uso del suelo en la Comuna 1 de Valledupar.



Las áreas con suelos poco permeables, como arcillas o rocas sedimentarias densas, tienden a tener una mayor escorrentía superficial, lo que incrementa el riesgo de inundaciones.

7.3.5 Análisis de Proceso Jerárquico (AHP)

A continuación, siguiendo con la metodología se procede a realizar el análisis de proceso jerárquico (AHP), donde se llevará a cabo la comparación, normalización y ponderación de las

variables mencionadas anteriormente (la pendiente, la geomorfología, la geología y el uso del suelo).

Inicialmente, se toma como guía la matriz de saaty para cada una de las variables del estudio, con la idea de tener valores normalizados y pesos ponderados de las 4 variables a interceptar.

Sintetización de juicios

Paso 1. Sumar los valores en cada columna de la matriz de comparaciones pareadas.

Paso 2. Dividir cada elemento de tal matriz entre el total de su columna; a la matriz resultante se le denomina matriz de comparaciones pareadas normalizada.

Paso 3. Calcular el promedio de los elementos de cada región de las prioridades relativas de los elementos que se comparan.

Inicialmente se asignan valores a las variables según el nivel de importancia, en la celda donde se interceptan los campos con el mismo nombre (fila y columna) obtienen un valor de “1”.

Tabla 5

Matriz de comparación de parámetros de la pendiente.

Pendiente	0°-5°	5°-15°	15°-35°	>35°
Muy baja (0°-5°)	1	3	5	6
Baja (5°-15°)	1/3	1	3	5
Moderada (15°-35°)	1/5	1/3	1	3

Alta (>35°)	1/6	1/5	1/3	1
SUMA	1.69	4.53	9.33	15

Nota. * En adelante las demás tablas tendrán una configuración parecida, esto tanto para la normalización y ponderación de variables en este estudio.

Se procede a realizar la matriz de normalización de pares, donde se divide cada valor en las celdas por la suma total de cada columna. Para posteriormente obtener un valor promedio de los pesos ponderados de cada fila (esto se realiza para cada parámetro a analizar).

Para la pendiente se tienen valores categorizados entre muy baja, baja, moderada, alta y muy alta, que se evidencia en la tabla 4, donde se normalizan los parámetros de 0 a 1 según el nivel de priorización.

Tabla 6

Normalización de parámetros de la pendiente.

Pendiente	0°-5°	5°-15°	15°-35°	>35°	Valor Promedio
Muy baja (0°-5°)	0.59	0.66	0.53	0.4	0.545
Baja (5°-15°)	0.19	0.22	0.32	0.33	0.265
Moderada (15°-35°)	0.11	0.07	0.10	0.2	0.120
Alta (>35°)	0.09	0.04	0.03	0.06	0.05

Se comparan las diferentes unidades geomorfológicas evidenciadas en el área de influencia por medio del método AHP

Tabla 7

Comparación de parámetros de las unidades geomorfológicas presentes en el área.

Unidad Geomorfológica	Llanura aluvial de piedemonte	Llanura aluvial de desborde	Montañas denudativas
Llanura aluvial de piedemonte	1	3	5
Llanura aluvial de desborde	1/3	1	3
Montañas denudativas	1/5	1/3	1
SUMA	1.53	4.33	9

Se normaliza cada parámetro anteriormente comparado en la tabla 8.

Tabla 8

Normalización de parámetros de las unidades geomorfológicas.

Unidad Geomorfológica	Llanura aluvial de piedemonte	Llanura aluvial de desborde	Montañas denudativas	Valor promedio
Llanura aluvial de piedemonte	0.65	0.69	0.55	0.63
Llanura aluvial de desborde	0.21	0.23	0.33	0.25
Montañas denudativas	0.13	0.07	0.11	0.103

Se comparan las unidades geológicas presentes en el área de estudio, los 3 parámetros entre sí, dando importancia a las geoformas caracterizadas como terrazas y abanicos aluviales

Tabla 9

Comparación de parámetros de unidades geológicas presentes en el área de estudio.

Unidad Geológica	Terrazas, abanicos aluviales	Ignimbritas	Granitoide jurásico
Terrazas, abanicos aluviales	1	3	5
Ignimbritas	1/3	1	3
Granitoide jurásico	1/5	1/3	1
SUMA	1.53	4.33	9

Se prosigue a la normalización de las unidades geológicas dejando entrever en las filas el valor promedio de cada parámetro.

Tabla 10

Normalización de parámetros de las unidades geológicas.

Unidad Geológica	Terrazas, abanicos aluviales	Ignimbritas	Granitoide jurásico	Valor promedio
Terrazas, abanicos aluviales	0.65	0.69	0.55	0.63
Ignimbritas	0.21	0.23	0.33	0.25
Granitoide jurásico	0.13	0.07	0.11	0.103

Se procede a comparar las subunidades del uso del suelo colocando los pastos como el factor relevante en el nivel jerárquico de la variable.

Tabla 11*Comparación de parámetros de uso del suelo en el área de estudio.*

Uso del Suelo	Pastos	Bosques	Agricultura
Pastos	1	2	3
Bosques	1/2	1	2
Agricultura	1/3	1/2	1
SUMA	1.83	3.50	6

Se normalizan los valores de uso del suelo donde los pastos presentan el mayor promedio.

Tabla 12*Normalización de parámetros de uso del suelo.*

Uso del Suelo	Pastos	Bosques	Agricultura	Valor promedio
Pastos	0.54	0.57	0.50	0.53
Bosques	0.23	0.28	0.33	0.28
Agricultura	0.18	0.14	0.16	0.16

Realizada la matriz de comparación y normalización de cada parámetro de las variables de manera independiente, se procede a comparar y normalizar propiamente las variables analizadas en los resultados de la fase 3, para obtener los pesos relativos de cada criterio.

Tabla 13

Comparación entre variables descritas en el área de estudio.

	Pendiente	Geomorfología	Geología	Uso del Suelo
Pendiente	1	2	3	5
Geomorfología	1/2	1	2	3
Geología	1/3	1/2	1	2
Uso del Suelo	1/5	1/3	1/2	1
Suma	2.03	3.83	6.5	11

El orden jerárquico va relacionado con la importancia en terreno de la variable, en este caso la pendiente es la variable más relevante a tener en cuenta, seguido de la geomorfología y la geología y por último el uso del suelo.

Tabla 14

Normalización de variables descritas en el área de estudio.

	Pendiente	Geomorfología	Geología	Uso del Suelo	Promedio
Pendiente	0.49	0.52	0.46	0.45	0.48
Geomorfología	0.24	0.26	0.30	0.27	0.26
Geología	0.16	0.13	0.15	0.18	0.15
Uso del Suelo	0.09	0.08	0.07	0.09	0.08

7.3.6 Generación de mapa de susceptibilidad a inundaciones

Los anteriores resultados de pesos promediados y estandarizados servirán para generar datos realizando el algebra de mapas a través de la reclasificación de tablas vectoriales, siguiendo la ecuación correspondiente que se realiza en la “calculadora de valores” del software Qgis y es la siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Mapa final} = & (0.48 * \text{Pendiente ponderizada}) + (0.26 * \\ & \text{Geomorfología ponderizada}) + (0.15 * \text{Geología ponderizada}) + \\ & (0.08 * \text{Uso del suelo ponderizado}). \end{aligned} \quad (1)$$

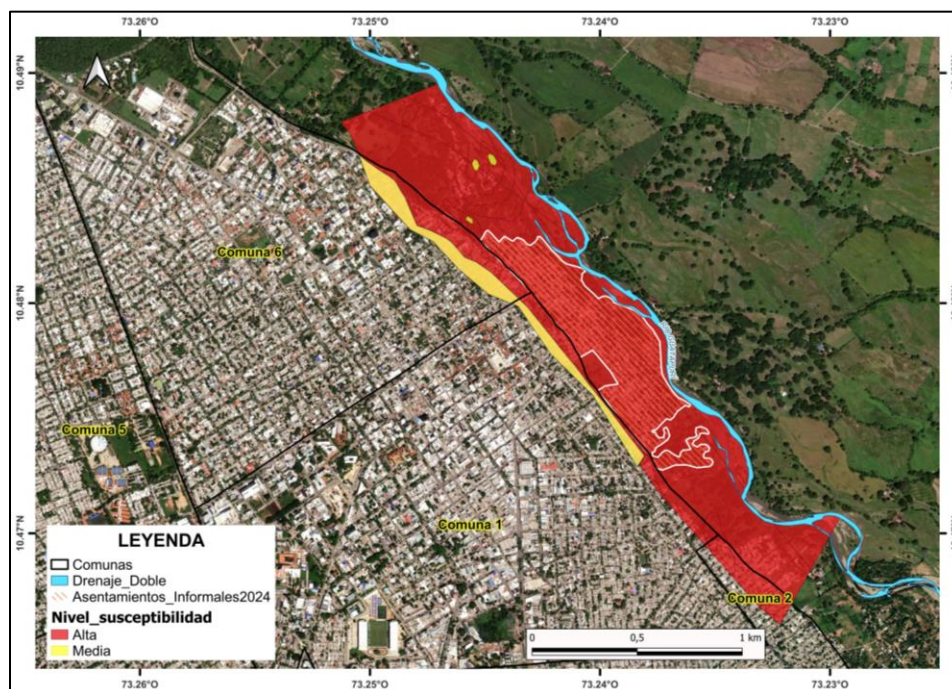
Se finaliza con la definición de rangos, según el nivel de susceptibilidad, segmentando en cuartiles los intervalos (0 a 1):

- 0 a 0.25 Susceptibilidad baja
- 0.25 a 0.50 Susceptibilidad media
- 0.50 a 0.75 Susceptibilidad alta
- 0.75 a 1 Susceptibilidad muy alta

A continuación, se genera el producto final correspondiente al mapa de susceptibilidad a inundaciones (figura 28), este se divide en zonas de distinta susceptibilidad (baja, media y alta) a partir de la ponderación de variables como pendiente, geomorfología, geología y uso del suelo. Cada una de estas variables influye en el comportamiento hídrico del área y su combinación permite identificar zonas más propensas a acumulaciones de agua o inundaciones repentinas.

Figura 26

Mapa de susceptibilidad a inundaciones que comprende parte de la comuna 2, 6 y toda la franja derecha de la comuna 1, margen derecha del río Guatapurí.



En lo siguiente se explica detalladamente las categorías ilustradas en el mapa

Zonas de Alta Susceptibilidad: Estas áreas con pendientes relativamente planas, principalmente cercanas al cauce del río Guatapurí, representan los sectores más expuestos a inundaciones, donde se facilita la acumulación de agua durante fuertes precipitaciones o crecientes, lo que aumenta el riesgo para los asentamientos cercanos. Este nivel de susceptibilidad sugiere la necesidad de medidas de reubicación o la implementación de infraestructura geotécnica que mitigue el impacto.

Zonas de Media Susceptibilidad: En esta categoría se incluyen áreas con pendientes no tan planas o características geomorfológicas que facilitan cierto flujo del cauce, aunque aún representan un riesgo considerable durante períodos de lluvia intensa. En estas zonas, los asentamientos informales enfrentan riesgos de inundación poco frecuentes, pero aún significativos, lo que sugiere la necesidad de monitoreo continuo o sistemas de alerta que permitan el rápido actuar ante la emergencia.

En color rojo se evidencia la parte más susceptible a inundaciones, correspondiente a zonas de vegetación espesa y a la ocupación en su totalidad de la zona asentada al noreste de la comuna 1 de Valledupar, por lo tanto, la alerta es constante.

Este mapa ofrece una herramienta visual e informativa que puede ser utilizada por los entes locales para identificar y priorizar zonas que necesitan atención urgente. Su valor radica en que facilita la toma de decisiones en planificación urbana y gestión de riesgos, orientando los esfuerzos de mitigación en áreas críticas como la descrita en este estudio. Además, permite concientizar a la comunidad sobre la exposición al riesgo, promoviendo una cultura de prevención y alerta.

8. Discusión de resultados

Al analizar la relación entre las variables pendiente, geomorfología, geología, uso del suelo, precipitación, se tiene que el casco urbano de Valledupar es susceptible a inundaciones por su ubicación geográfica, donde se muestra que el mayor torrencial de lluvias se da hacia las partes altas, correspondientes a las estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta, en la estación Atanquez, donde nace la cuenca del río Guatapurí, esto ocurre cuando los cauces fluviales transportan sedimentos y se depositan en lugares donde los cauces pierden energía, sumando a esto las condiciones de uso del suelo que corresponden a pastos donde es propicio la infiltración de agua, en este caso en las pendientes bajas donde se ubican las viviendas informales, a la margen derecha de río Guatapurí.

El uso del SIG revela que estos han sido fundamentales para la integración y análisis de múltiples variables espaciales utilizadas en este estudio (pendiente, geomorfología, geología, uso del suelo y precipitación), permitiendo una representación precisa de las áreas susceptibles a inundación en asentamientos informales al noreste de la comuna 1. Facilita el análisis de imágenes satelitales, como las obtenidas de PlanetScope, que proporcionan datos multitemporales y georreferenciados, vitales para monitorear el crecimiento urbanístico, condiciones del suelo (cambios en la vegetación) y la extensión de las áreas afectadas por inundaciones.

Este trabajo se compara con estudios previos, como el realizado en el municipio de La Virginia, Risaralda, que también utilizó SIG para modelar zonas inundables y aplicó metodologías multitemporales para identificar patrones de riesgo a partir de datos históricos. Al

igual que en dicho estudio, en este trabajo se realizaron geoprocesos y modelaciones espaciales que facilitaron el cruce de capas informativas en QGIS, optimizando la precisión de la zonificación de áreas de alta susceptibilidad a inundaciones.

A partir del método de Análisis Jerárquico (AHP), se pudo generar un mapa de susceptibilidad a inundaciones a través de un enfoque de priorización de criterios. Esto va en concordancia con prácticas actuales en estudios de inundación que buscan integrar herramientas analíticas avanzadas para la toma de decisiones sobre la gestión de riesgos.

En términos generales, la aplicación de SIG en este contexto no solo contribuye a la identificación de zonas de riesgo, sino que también respalda la planificación urbana para la toma de decisiones en términos de mitigación y adaptación al cambio climático, al ofrecer una plataforma confiable para monitorear y analizar cambios espaciales de manera continua y eficiente.

9. Conclusiones

Los insumos adquiridos proporcionaron la base para un análisis detallado de las zonas de asentamiento informal al noreste de la comuna 1 en la ciudad de Valledupar, ayudando a la comprensión de las condiciones de susceptibilidad a inundaciones en el área de estudio, la integración de estos datos permitió consolidar un conjunto de información geoespacial esencial.

La comparación multitemporal de imágenes satelitales PlanetScope de los años 2016, 2020 y 2024 permitió no solo identificar un aumento progresivo en la ocupación informal alrededor de la comuna 1, sino, también delimitar estas áreas. Este crecimiento desordenado resalta la urgencia de implementar políticas de reubicación y ordenamiento territorial adecuadas, dado que estas áreas se encuentran en zonas de alto riesgo por inundaciones.

Por otra parte, la aplicación del método de análisis jerárquico (AHP) permitió ponderar las variables relevantes, como la pendiente, geomorfología, geología y uso del suelo. Esto resultó en la generación de un mapa temático que delimita con precisión las áreas con alta susceptibilidad a inundaciones, proporcionando una herramienta fundamental para la planificación y mitigación del riesgo en la zona de estudio.

Como política fundamental se debe restringir todo tipo de construcciones en las zonas de alta susceptibilidad, ya que el uso del suelo no es apto para construcciones de vivienda, a su vez, viabilizar construcciones geotécnicas por parte de la alcaldía municipal, que puedan implementar contenciones y reduzca la susceptibilidad a inundaciones. Si estas no son óptimas, propender por la reubicación de las personas que están asentadas en la zona de mayor riesgo.

10. Recomendaciones

- Establecimiento de políticas estrictas por parte del ente municipal y gubernamental que prohíban todo tipo de construcciones en las zonas donde se evidencia alta susceptibilidad, ya que no es apto para vivir.
- Reactivar aquellas estaciones climatológicas del IDEAM que se tengan en el área de influencia, ya que la mayoría están fuera de funcionamiento, esto permitiría tener un control más detallado de precipitaciones sobre la zona.
- Brindar espacios de concientización y capacitación por parte de la secretaria de gestión del riesgo, a personas que se encuentran en las zonas de susceptibilidad alta para que puedan actuar de manera oportuna ante un evento de inundación.
- Implementar una base de datos robusta en la ciudad de Valledupar que pueda tener registros actualizados de eventos tanto de inundaciones como de otro factor natural que se presente en la ciudad.
- Establecer planes de mitigación, como la mejora del sistema de drenaje pluvial de la comuna 1 y propender por el monitoreo constante de las condiciones climáticas y el nivel de caudal del río Guatapurí.
- Para investigaciones futuras se recomienda generar modelos predictivos de inundaciones, por medio de herramientas SIG que permitan idealizar situaciones para la prevención del riesgo de desastres.

11. Referencias

Alfieri, L., Du, J., Huang, Z., Kimball, J., Luo, L., Wu, H., & Zhou, N. (2019). Evaluation of real-time global flood modeling with satellite surface inundation observations from SMAP. *Remote Sensing of Environment Journal*. Vol. 233. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111360>

Armenta, J. (18 de febrero de 2021). Corpocesar convoca a las autoridades competentes a buscar soluciones inmediatas que frenen las afectaciones ambientales que hoy se están causando al río Guatapurí. <https://www.corpocesar.gov.co/Boletin-05-18-02-2021.html>

Buelvas, C. A. (2022). Determinación del espejo de agua del Complejo Cenagoso Bajo Sinú y monitoreo de la mancha de inundación para el año 2017 mediante imágenes satelitales Sentinel 2. Tesis de Posgrado. Universidad de Manizales. <https://ridum.umanizales.edu.co/handle/20.500.12746/5950>

Castillo, M., & Gamarra, E. (2014). Análisis multitemporal de la línea de costa en la isla de Tierrabomba y proyección del mapa de inundación por aumento del nivel medio del mar. *Aquatic Sciences and Fisheries Abstracts (ASFA)*. Vol. 32. <https://doi.org/10.26640/22159045.270>

Castro, R., Jiménez, C., Lascarro, F., Manco, D., & Rojas, E. (2023). Análisis multitemporal y dinámicas fluviales del brazo de Mompox (río Magdalena), corregimiento de Cantera, Bolívar, Colombia. *Scielo Biblioteca Científica Electrónica En Línea*. Vol.28. <https://doi.org/10.14483/23448393.17838>

Congedo, L. (2018). Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.29474.02242/1>

Consejo Municipal de Gestión de Riesgo de Desastres (CMGRD). (2012).

Caracterización General de Escenarios de Riesgo. Alcaldía de Valledupar.

<https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/474>

Corporación Autónoma Regional del Cesar (CORPOCESAR). (18 de febrero de 2021).

Corpocesar convoca a las autoridades competentes a buscar soluciones inmediatas que frenen las afectaciones ambientales que hoy se están causando al río Guatapurí.

<https://www.corpocesar.gov.co/Boletin-05-18-02-2021.html>

Correa, C. (2024). ZONIFICACIÓN DE ÁREAS INUNDABLES EN EL MUNICIPIO DE LA VIRGINIA, RISARALDA MEDIANTE MODELACIÓN ESPACIAL.

<https://repository.unad.edu.co/handle/10596/62429>

Coviello, I., Faruolo, M., Lacava, T., Pergola, N., & Tramutoli, V. (2009). REAL TIME MONITORING OF FLOODED AREAS BY A MULTI-TEMPORAL ANALYSIS OF OPTICAL SATELLITE DATA. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 1-5. <https://doi.org/10.14483/23448393.17838>

Dangol, N. (2024). Shaping the perception of flood risk among residents of riverbank informal settlements in Kathmandu. International Journal of Disaster Risk Reduction, Volume 105. ISSN 2212-4209. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2024.104423>

EOS Data Analytics, Inc. (2024). Índice De Agua De Diferencia Normalizada (NDWI). Tomado de <https://eos.com/es/make-an->

[analysis/ndwi/#:~:text=El%20%C3%8Dndice%20de%20Agua%20de,%E2%80%9Cdestaquen%E2%80%9D%20en%20la%20imagen.](#)

Esri. (17 de enero de 2023). Introducción a las imágenes. Tomado de <https://learn.arcgis.com/es/projects/get-started-with-imagery/>

Forero, C. (2022). De las consecuencias de la expansión urbana en la reproducción de impactos socioambientales a las soluciones basadas en la naturaleza: estudio de caso en la cuenca del río Guatapurí, Municipio de Valledupar, Cesar, 1991-2021. Tesis de Maestría. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/59463>

Goodchild, M. F., Parks, B. O., & Steyaert, L. T. (Eds.). (1996). GIS and environmental modeling: progress and research issues. GIS World Books.

IDEAM. (s.f.). AMENAZAS INUNDACIÓN. Recuperado de: <http://ideam.gov.co/web/agua/amenazas-inundacion>.

Islam, KA., Kwan, C., Li, J., & Uddin, MS. (2020). Flood Detection Using Multi-Modal and Multi-Temporal Images: A Comparative Study. Remote Sensing Journal. Vol. 12. <https://doi.org/10.3390/rs12152455>

Mejía, J. F. (2021). Estimación del riesgo por inundación en la ciudad de Valledupar utilizando imágenes satelitales y sistemas de información geográfica. Título de Pregrado. Universidad del Norte. <https://manglar.uninorte.edu.co/handle/10584/11316#page=1>

Mejia, C. (01 de abril 2014). Inundaciones en Valledupar: riesgo latente <https://elpilon.com.co/inundaciones-en-valledupar-riesgo-latente/>

Mishra, V., S. Limaye, A., Muench, R. E., Cherrington, E. A., & Markert, K. N. (2020). Evaluating the performance of high-resolution satellite imagery in detecting ephemeral water bodies over West Africa, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 93.

NASA Landsat Science (S.f). Recuperado de <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-7/8/9>

Ochoa, F. (16 de enero de 2023). ¿Qué es un análisis multitemporal? Tomado de <https://acolita.com/que-es-un-analisis-multitemporal/>

Olaya, V. (2014). Sistemas de información geográfica. Recuperado de: https://www.icog.es/TyT/files/Libro_SIG.pdf

Pérez , J. (2017). Delimitación de áreas de inundación usando la herramienta HEC-RAS y su aplicativo SIG HEC-GEORAS en la Acequia las Mercedes, Valledupar. Tesis de Posgrado. Universidad de Manizales. <https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/handle/20.500.12746/4165>

Planet, L. P. (2022). PLANET. Obtenido de <https://www.planet.com/products/platform/>
Planet. (2022). Planet imagery product specifications. Obtenido de https://assets.planet.com/docs/Planet_Combined_Imagery_Product_Specs_letter_screen.pdf

Porras, H. (2023). Análisis de la turbidez en aguas someras del suroeste de Puerto Rico: monitoreo pre y post huracán Fiona mediante imágenes de la constelación satelital PlanetScope.

(203d. C.). Uprm. https://www.uprm.edu/gerslab/wp-content/uploads/sites/214/2023/07/porras_2023.pdf.

Quintana, S. (2008). Los SIG y ArcGis. LibroSIG: aprendiendo a manejar los SIG en la gestión ambiental. Madrid, España: LibroSIG.

Reyna, A., Moreira, D., Bonilla, A., Pisco, J., & Macías, C. (2020). Asentamientos humanos en zonas susceptibles a riesgos por inundación y deslizamiento de la ciudad de Portoviejo. Revista San Gregorio, (43), 109-123. <https://doi.org/10.36097/rsan.v1i43.1413>

Saaty, T. (1990). "How to make a Decision." European Journal of Operational Research, 48:9-26.

Sedano, R. (2012). Gestión Integrada del Riesgo de Inundaciones en Colombia. [Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Valencia]. RiuNet Repositorio UPV

Servicio Geológico Colombiano (SGC). (S.f). Recuperado de <https://www2.sgc.gov.co/atencionalciudadano/lists/glosario%20de%20terminos/allitems.aspx#>

Toskano, G. (s.f). El proceso de Análisis Jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores. Recuperado de https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/tesis/basic/toskano_hg/cap3.PDF

Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD). (2012). Plan Municipal para la Gestión del Riesgo - Valledupar. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/20468>

UNGRD. (s.f.). Sistema Nacional de Información para la Gestión del Riesgo de

Desastres: Inundaciones. Tomado de:

<https://www.gestiondelriesgo.gov.co/snigrd/pagina.aspx?id=144>.