



DOI: <https://doi.org/10.23857/dc.v9i1>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

*Análisis del riesgo de inundaciones en la ciudad de Portoviejo mediante la
implementación de ráster satelital*

*Analysis of flood risk in the city of Portoviejo through the implementation of
satellite raster data*

*Análise do risco de inundações na cidade de Portoviejo por meio da implementação
de raster satelital*

Alexis Armando Chávez Loor ^I
achavez5468@utm.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0009-5510-8426>

María José Murillo Mero ^{II}
mmurillo6447@utm.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0002-1113-4672>

Daniel Delgado ^{III}
daniel.delgado@utm.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-5251-8037>

Correspondencia: achavez5468@utm.edu.ec

***Recibido:** 10 de febrero de 2025 ***Aceptado:** 19 de marzo de 2025 *** Publicado:** 07 de abril de 2025

- I. Estudiante Departamento de Construcciones Civiles, Arquitectura, y Geología, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.
- II. Estudiante Departamento de Construcciones Civiles, Arquitectura y Geología, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.
- III. Docente Departamento de Construcciones Civiles, Arquitectura y Geología, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.

Resumen

Las inundaciones son el desbordamiento de agua que anegan terrenos habitualmente secos, originados por fenómenos naturales o actividades antropogénicas; representan uno de los eventos hidrometeorológicos más comunes y se produce cuando el caudal de agua supera la capacidad de los cauces fluviales, infraestructuras de drenaje o superficies naturales para retenerla. Uno de los principales problemas es la falta de mapeo preciso del riesgo de inundación en las ciudades, los mapas existentes suelen basarse en información generalizada o modelos macroclimáticos, como los proporcionados por instituciones nacionales (INAMHI), que no contemplan variables locales específicas entre las cuales están: la capacidad del drenaje urbano, cambios en el uso del suelo, impermeabilización por urbanización o topografía detallada. Por esta razón, el objetivo principal de la presente investigación es analizar los riesgos de inundaciones en la ciudad de Portoviejo mediante la implementación de Ráster Satelital. La metodología empleada consistió en el procesamiento de un archivo DEM mediante el software HEC-RAS, se llevaron a cabo simulaciones considerando dos escenarios posibles, teniendo en cuenta que las precipitaciones son el conjunto de agua que cae sobre la superficie terrestre en forma de lluvia siendo un factor clave en el comportamiento del ciclo del agua en las cuencas. Como referencia, se utilizaron los datos hidrometeorológicos del INAMHI y los resultados de una investigación previa sobre el río Portoviejo. Los resultados de las simulaciones permitieron identificar las zonas más vulnerables y propensas a riesgos de inundaciones, además factores como las precipitaciones intensas, el uso del suelo y la capacidad del sistema de drenaje pueden agravar este tipo de desastre natural. Tomando en consideración la problemática existente, el aporte que genera nuestra investigación será brindar información que permita mejorar la gestión del riesgo de inundaciones en áreas urbanas con mayor vulnerabilidad.

Palabras clave: Inundaciones; Vulnerabilidad; DEM; HEC-RAS; INAMHI.

Abstract

Floods are the overflow of water that inundates typically dry land, caused by natural phenomena or anthropogenic activities. They represent one of the most common hydrometeorological events and occur when water flow exceeds the capacity of river channels, drainage infrastructure, or natural surfaces to retain it. One of the main problems is the lack of accurate flood risk mapping in cities. Existing maps are often based on generalized information or macroclimatic models, such as those provided by national institutions (INAMHI), which do not consider specific local variables, including

urban drainage capacity, land-use changes, urban waterproofing, or detailed topography. For this reason, the main objective of this research is to analyze flood risks in the city of Portoviejo through the implementation of Satellite Raster. The methodology employed consisted of processing a DEM file using HEC-RAS software. Simulations were carried out considering two possible scenarios. Precipitation is the amount of water that falls on the Earth's surface in the form of rain, and is a key factor in the behavior of the water cycle in watersheds. Hydrometeorological data from INAMHI and the results of a previous study on the Portoviejo River were used as references. The simulation results allowed us to identify the most vulnerable areas prone to flood risk. Factors such as intense rainfall, land use, and drainage system capacity can exacerbate this type of natural disaster. Taking into account the current problems, our research will contribute to providing information that will improve flood risk management in the most vulnerable urban areas.

Keywords: Floods; Vulnerability; DEM; HEC-RAS; INAMHI.

Resumo

As inundações são o transbordamento de águas que inundam terrenos normalmente secos, provocados por fenômenos naturais ou atividades antropogénicas; Representam um dos eventos hidrometeorológicos mais comuns e ocorrem quando o caudal de água excede a capacidade dos canais dos rios, das infraestruturas de drenagem ou das superfícies naturais para o reter. Um dos principais problemas é a falta de um mapeamento preciso dos riscos de inundações nas cidades. Os mapas existentes baseiam-se frequentemente em informações generalizadas ou modelos macroclimáticos, como os fornecidos pelas instituições nacionais (INAMHI), que não consideram variáveis locais específicas, incluindo a capacidade de drenagem urbana, alterações no uso do solo, impermeabilização urbana ou topografia detalhada. Por este motivo, o principal objetivo desta investigação é analisar os riscos de inundação na cidade de Portoviejo através da implementação do Satellite Raster. A metodologia utilizada consistiu no processamento de um ficheiro DEM utilizando o software HEC-RAS. As simulações foram realizadas considerando dois cenários possíveis, tendo em conta que a precipitação é o conjunto de água que cai à superfície terrestre sob a forma de chuva, sendo um fator fundamental no comportamento do ciclo hidrológico nas bacias. Como referência, foram utilizados os dados hidrometeorológicos do INAMHI e os resultados de uma investigação anterior sobre o Rio Portoviejo. Os resultados da simulação permitiram identificar as áreas mais vulneráveis aos riscos de inundações. Fatores como chuvas intensas, uso do solo e capacidade do

Análisis del riesgo de inundaciones en la ciudad de Portoviejo mediante la implementación de ráster satelital

sistema de drenagem podem agravar este tipo de desastre natural. Considerando os problemas atuais, a nossa investigação contribuirá com informação que melhorará a gestão dos riscos de inundação nas áreas urbanas mais vulneráveis.

Palavras-chave: Inundações; Vulnerabilidade; DEM; HEC-RAS; INAMHI.

Introducción

A lo largo de la historia, la población mundial ha enfrentado diversas amenazas naturales y de origen humano que comprometen la integridad física, económica y social de las comunidades (Mejía, 2021). El riesgo se entiende como la probabilidad de que una amenaza se convierta en desastre, como resultado de un evento físico peligroso de origen natural o antrópico (CNCR, 2017).

Las amenazas son procesos naturales, socio-naturales o antropogénicos, pueden ocasionar cambios significativos en los sistemas con efectos adversos en personas, ecosistemas, infraestructura y servicios (Cardona, 2001; Gallopín, 2006). Existen diferentes tipos de amenazas entre las cuales se pueden destacar: Naturales (sismos, tsunamis, tormentas, fenómeno del pacífico niño y la niña, etc), Sociales (guerras, contaminación química y radiactiva, accidentes industriales y nucleares, etc) y Socio-naturales (inundaciones, deslizamientos, incendios forestales, etc) (Vera y Albarracín, 2016).

La vulnerabilidad, por su parte, comprende condiciones que hacen a una comunidad más propensa a sufrir impactos negativos, por ejemplo: infraestructura precaria, pobreza o degradación ambiental (Cardona, 2001; CNCR, 2017). Para que una zona o lugar de estudio se considere vulnerable tiene que cumplir con 3 condiciones: Exposición (fenómenos naturales, sociales o socio-naturales), Fragilidad (susceptibilidad a sufrir daño) y Resiliencia (capacidad de adaptación y respuesta) (Vera y Albarracín, 2016).

Las inundaciones originadas en los sistemas fluviales son un componente natural del ciclo hidrológico (Vallecilla et al., 2022). No obstante, se consideran el peligro natural más frecuente y costoso, afectando de manera recurrente a gran parte de los países del mundo. En las últimas décadas, su frecuencia ha aumentado a nivel global, lo que ha resultado en pérdidas económicas significativas y en constante crecimiento (Vojtek & Vojteková, 2016) alcanzando pérdidas globales anuales de 38000 millones de euros y más de 8000 millones de dólares en Estados Unidos. Las grandes inundaciones históricas incluyen las del valle del río Amarillo en China y las lluvias extremas en Australia durante el episodio de La Niña 2010-2011, causando miles de muertes y pérdidas millonarias (Kuleshov et al., 2020).

Casos destacados de inundaciones

Las inundaciones han causado un impacto devastador en varios países, dejando un saldo significativo de víctimas mortales en distintos momentos históricos. En abril de 1991, Bangladesh sufrió una de las tragedias más grandes, con 140000 muertes debido a una marea catastrófica. China ha enfrentado varias inundaciones mortales, incluyendo 3074 fallecidos en julio de 1991, 1410 en mayo-junio de 1994 y 2700 entre junio y agosto de 1996 hubo pérdidas por 26500 millones de dólares. Por su parte, Pakistán experimentó un desastre en octubre de 1992, con un saldo de 1500 personas fallecidas (Munich Re, 1997).

En los últimos 500 años se han registrado más de 2400 inundaciones significativas, destacando la catastrófica de 1962 en Catalunya, que dejó cerca de 1000 víctimas (Berga, 2006). Más recientemente, según la base de datos de desastres de la Universidad de Lovaine, entre 2010 y 2020 se documentaron 218 inundaciones de gran magnitud, mientras que en el período 1998-2009 se registraron más de 213 eventos similares en solo 10 años. Estas inundaciones han generado graves impactos económicos, materiales y sociales, incluyendo desplazamientos masivos y pérdidas humanas (López, Granda y Gómez, 2021).

En 2024, Perú, Colombia, Brasil y Ecuador reportaron inundaciones severas, afectando a miles de personas y dejando cientos de muertos, desplazados y daños materiales significativos (Teleamazonas, 2024; PRIMICIAS, 2024).

En la zona ecuatorial del continente americano se producen variaciones climáticas que no obedecen a los mismos procesos observados en las altas latitudes responsables de las estaciones, debido a que el clima de esta zona permanece relativamente estable durante todo el año (Leiva et al., 2001). Por tanto, el clima es afectado por ligeras variaciones que permiten identificar dos periodos climáticos conocidos como temporada seca y temporada de lluvias (Delgado et al., 2021; Delgado et al., 2022). Debido a la alteración de las condiciones climáticas, se presentan fenómenos como "El Niño", "La Niña" y "Neutro", estos fenómenos son complementarios y constituyen el ciclo de oscilación del sur; no obstante, la característica cíclica no puede ser reflejada con una periodicidad de ocurrencia fija debido a su alta variabilidad, lo cual complica la predicción de estos fenómenos y la preparación logística ante sus consecuencias (Philander et al., 1995).

Para reducir el impacto de las inundaciones, los gobiernos han implementado medidas estructurales como diques y represas, complementadas con modelos de estimación de pérdidas (Glas et al., 2017) estas acciones buscan prevenir desastres y proteger tanto a las comunidades como al entorno natural.

Análisis del riesgo de inundaciones en la ciudad de Portoviejo mediante la implementación de ráster satelital

A nivel local, es esencial implementar políticas sostenibles enfocadas en la reducción del riesgo y el desarrollo sostenible, especialmente en zonas vulnerables como Portoviejo, Ecuador.

Por este motivo, el objetivo principal de la presente investigación es analizar los riesgos de inundaciones en la ciudad de Portoviejo mediante la implementación de Ráster Satelital usando un modelo de elevación digital (DEM) del área de estudio con información geoespacial precisa. Además, se deben establecer parámetros hidráulicos, incluyendo geometría del cauce y condiciones de flujo, simulando inundaciones unidimensionales (1D) en el software HEC-RAS con la finalidad de: identificar áreas vulnerables, generar mapas de riesgo que faciliten la toma de decisiones en planificación urbana y gestión de emergencias, proponer estrategias de manejo sostenible de recursos hídricos en zonas propensas a anegaciones. La metodología empleada permite obtener datos detallados sobre niveles de agua y flujos en áreas específicas, adaptándose a diferentes complejidades de terreno y escenarios, al igual que, ayuda a predecir el impacto de futuros eventos climáticos extremos y sumado a esto, es un software de uso gratuito ampliamente utilizado con respaldo técnico continuo.

Características ambientales de la zona

El cantón Portoviejo está atravesado por dos ríos principales: el río Portoviejo, formado por la confluencia de los ríos Mineral y Pata de Pájaro, y el río Chico, que surge del río Chamotete y el estero Mancha Grande. La ciudad presenta un clima templado con una temperatura promedio anual de 24 °C, aunque en épocas cálidas puede alcanzar hasta 36 °C. La región cuenta con tres zonas climáticas: un clima tropical megatérmico semiárido en la costa, con altas temperaturas y baja humedad; un clima tropical megatérmico seco en el centro, con menor precipitación y mayor aridez; y un clima tropical megatérmico semihúmedo en el oeste, con niveles de humedad moderados y temperaturas elevadas (PORTOAGUAS EP, 2019).

Portoviejo está expuesto a riesgos como sismos, inundaciones, deslaves y tsunamis debido a su ubicación geográfica. Por ello, es esencial implementar medidas a corto, mediano y largo plazo que reduzcan estos riesgos, promoviendo un desarrollo sostenible respaldado por políticas efectivas (Giraldo y Anchundia, 2021).

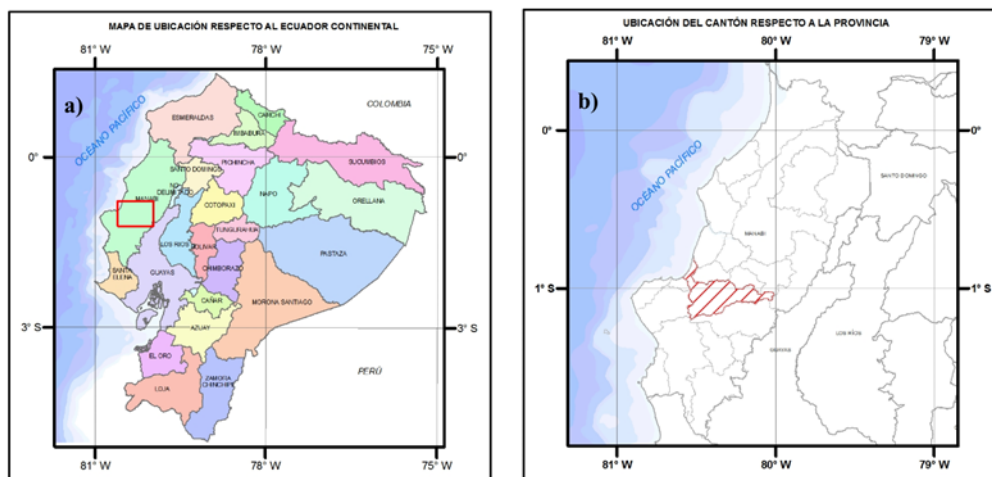


Fig. 1 a) Mapa de ubicación respecto del Ecuador Continental y b) Ubicación del Cantón con respecto a la Provincia tomado de la base de datos del Instituto Geográfico Militar (IGM).

Metodología

La presente investigación emplea una metodología mixta, combinando enfoques cualitativos y cuantitativos; es decir, el enfoque cualitativo será interpretativo y descriptivo, mientras que el enfoque cuantitativo será analítico. Para aquello, se usó información de investigaciones previas a la zona de estudio, al igual que la base de datos del INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología) y ALOS PALSAR (que pertenece al sistema de observación terrestre, donde ALOS también conocido como DAICHI fue diseñado para mejorar la cartografía, la observación detallada de la cobertura terrestre regional, el monitoreo de desastres y el análisis de recursos naturales. Mientras que PALSAR fue uno de los tres instrumentos a bordo del Satélite Avanzado de Observación Terrestre).

Para el modelado del río Portoviejo en la zona de estudio se utilizó el software HEC-RAS (versión 6.6), en cambio para la generación del modelo digital del terreno (DEM), se utilizó un archivo extraído de la base de datos ALOS PALSAR en formato .tif, que presenta una resolución espacial de 12.5 m x 12.5 m, el cual fue importado al software HEC-RAS mediante la extensión RAS Mapper para la creación de la geometría del terreno y del cauce del río. Posteriormente, se incorporaron los caudales del río, con valores de 6.02 m³/s y 98.72 m³/s. El primero de estos valores fue obtenido de literatura regional (Moreira y Vélez, 2024), mientras que el segundo proviene de la base de datos del INAMHI con un período de retorno de 24 años. Además, se aplicó un coeficiente de Manning de 0.05, valor referenciado en estudios previos para ríos ubicados en planicies.

Análisis del riesgo de inundaciones en la ciudad de Portoviejo mediante la implementación de ráster satelital

Los resultados obtenidos presentarán dos posibles escenarios de simulación de inundaciones, destacando las áreas más vulnerables frente a este fenómeno natural. Estas simulaciones considerarán factores como lluvias intensas, el desbordamiento del río y deficiencias en la infraestructura de drenaje, ofreciendo una visión clara de los posibles riesgos asociados y las zonas que podrían verse más afectadas.

Resultados y discusión

Análisis de inundaciones mediante el uso del software HEC-RAS

Las figuras a continuación representan un escenario de inundación, modelado con un caudal bajo de $6.02 \text{ m}^3/\text{s}$. Este escenario se encuentra subdividido en tres zonas principales, diseñadas para facilitar un análisis detallado de los resultados obtenidos. Lo cual permite identificar áreas críticas con mayor vulnerabilidad, donde se observa los sectores urbanos y rurales parcialmente sumergidos al igual que la vegetación. También superficies inundadas de forma discontinua en distintas ubicaciones debido al desbordamiento en los márgenes del río y a su relieve, lo que evidencia el impacto de este tipo de fenómeno natural indicando un aumento en la ocupación del flujo fuera del cauce principal.

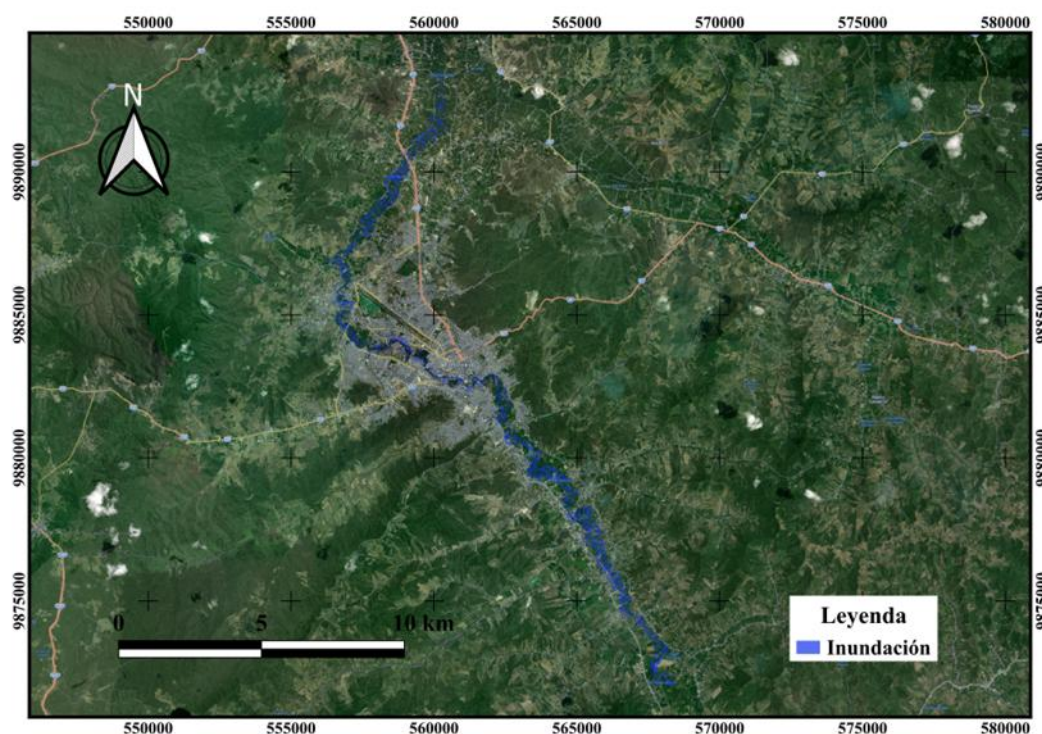


Fig. 2 Mapa de Inundación con caudal de $6,02 \text{ m}^3/\text{s}$

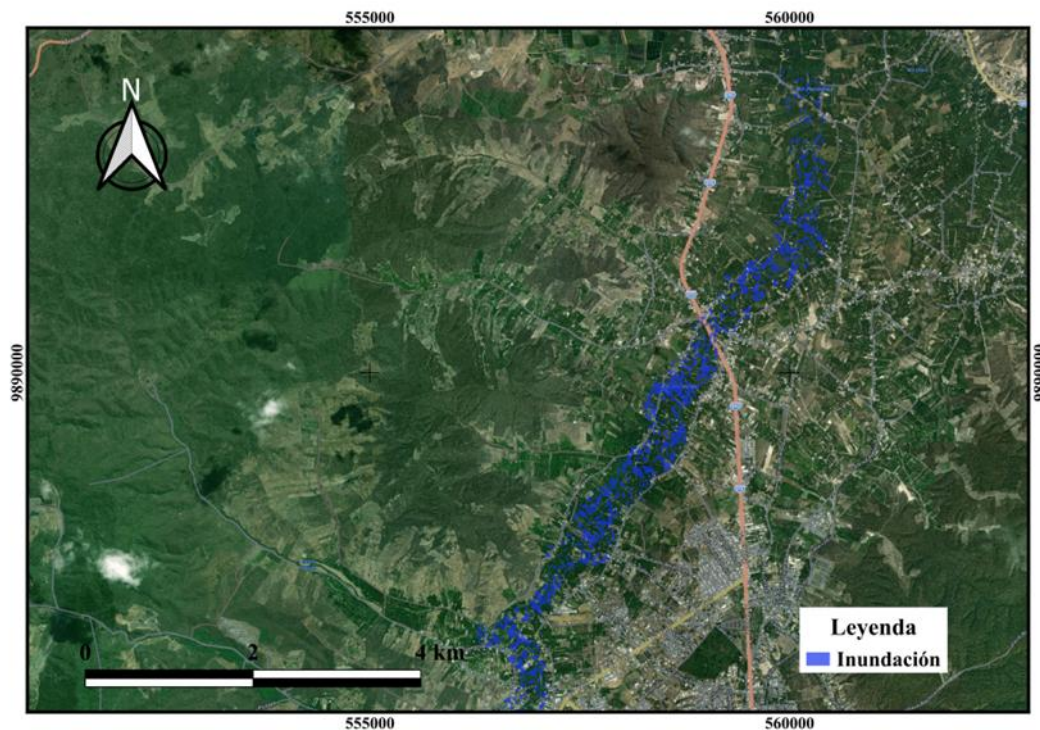


Fig. 3 Mapa de Inundación Zona 1

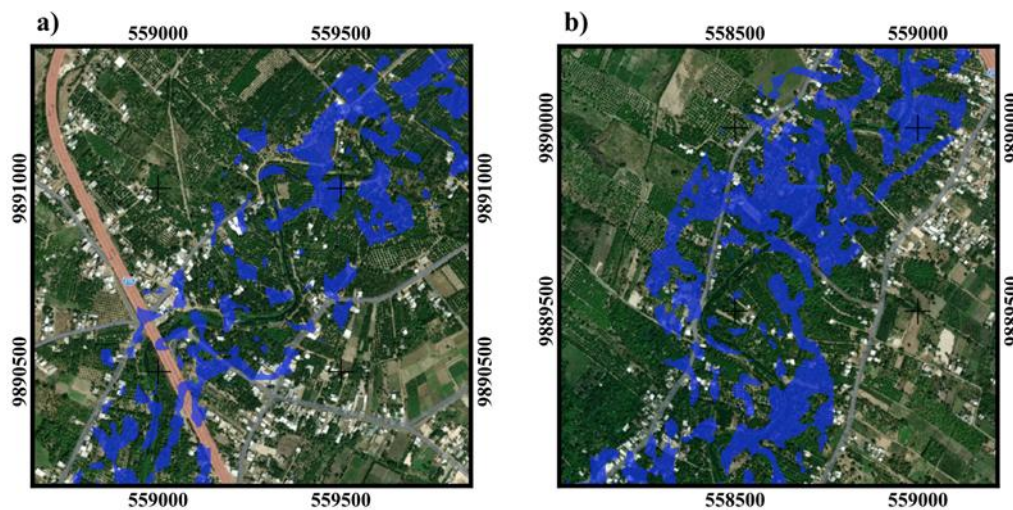


Fig. 4 a) Mejía y b) Higuerón Afuera

En la Figura 4 se presenta una mejor visualización de los sectores más vulnerables de la zona 1, específicamente en Mejía (Fig. 4^a) e Higuerón Afuera (Fig. 4^b), llegando a alcanzar un nivel de agua que va desde los 0 a 3 metros de elevación medidos a partir del fondo del río.

Análisis del riesgo de inundaciones en la ciudad de Portoviejo mediante la implementación de ráster satelital

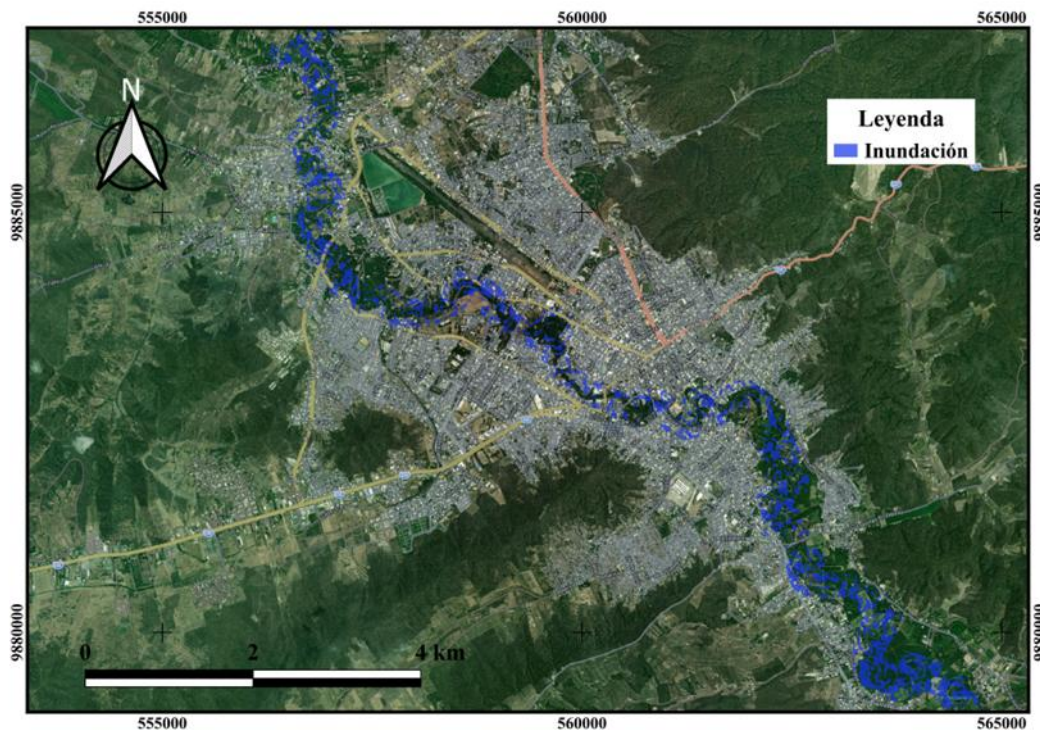


Fig. 5 Mapa de Inundación Zona 2

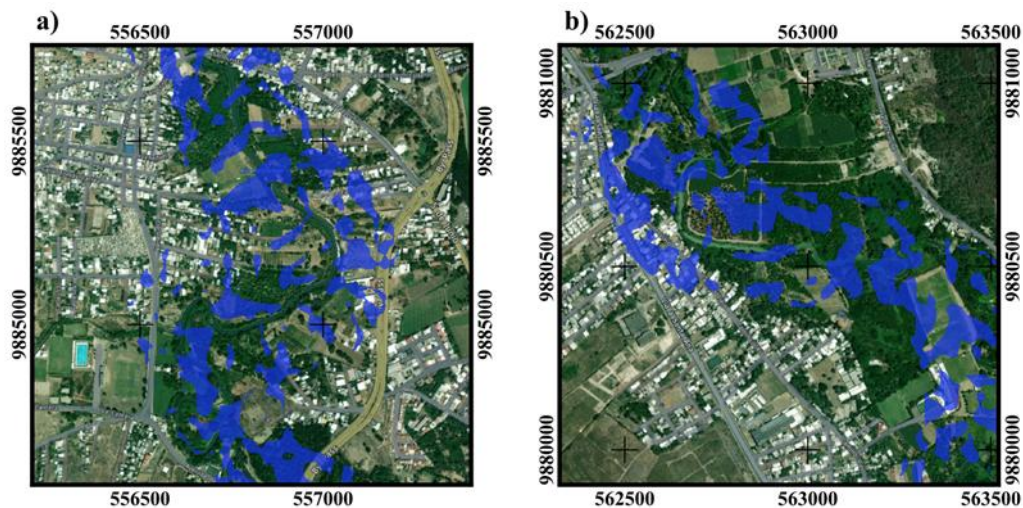


Fig. 6 a) “Milagro” de Picoazá y b) “El Limón” de Simón Bolívar

Por otra parte, la Figura 6 muestra una representación más detallada de la zona 2, específicamente en el sector “Milagro” de Picoazá (Fig. 6^a) y “El Limón” de Simón Bolívar (Fig. 6^b). Estos sectores presentan un nivel de agua que oscilan entre 0 a 2.70 metros y 0 a 3.50 metros respectivamente, medidos desde el lecho del río.

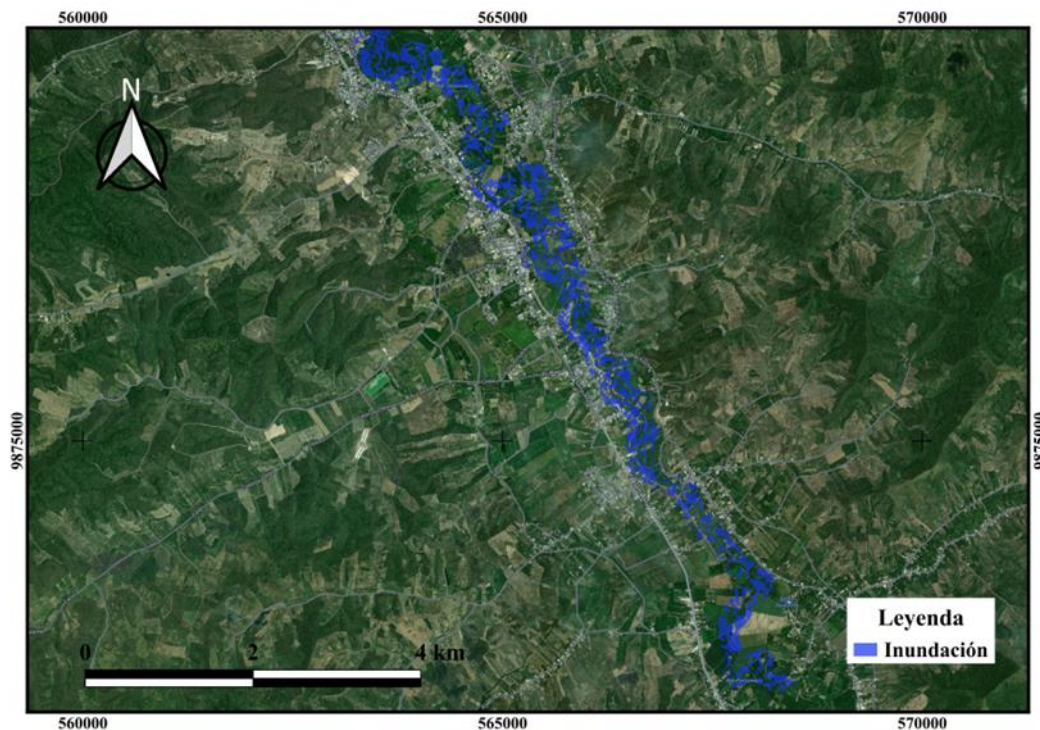


Fig. 7 Mapa de Inundación Zona 3

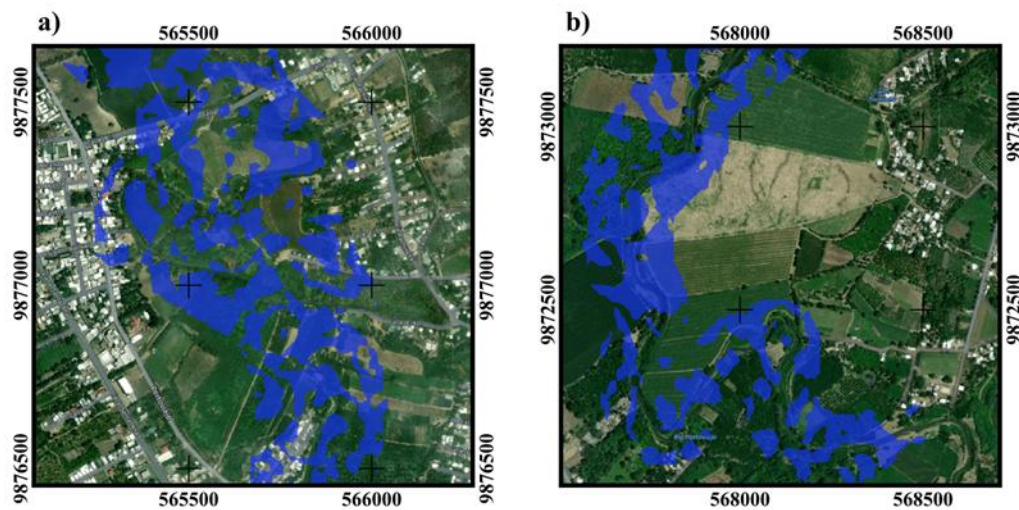


Fig. 8 a) Colón, El Cady y b) Pachinche Afuera

Finalmente, la Figura 8 demuestra de manera precisa sectores más susceptibles a inundaciones de la zona 3, específicamente en: Colón, El Cady (Fig. 8^a) y Pachinche Afuera (Fig. 8^b). Estas localidades pueden llegar a tener un nivel de agua que va desde los 0 a 3.50 metros de elevación medidos a partir del suelo del río.

Análisis del riesgo de inundaciones en la ciudad de Portoviejo mediante la implementación de ráster satelital

Tabla 1. Simulación con el caudal máximo de la base de datos del INAMHI para un periodo de Retorno de 24 años.

Año	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Caudal Máximo (m ³ /s)	72.15	88.02	52.27	79.54	98.72	78.66	42.96	45.91	85.69	75.76	54.44	63.87
Año	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Caudal Máximo (m ³ /s)	71.94	33.15	12.03	59.94	9.87	75.67	63.47	44.14	72.43	45.92	60.87	58.45

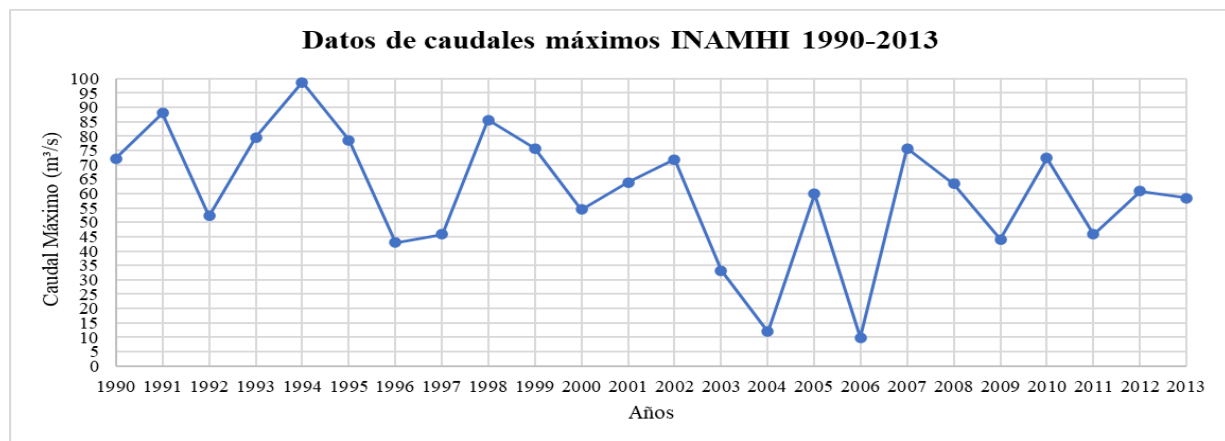


Fig. 9 Representación de los Datos de Caudales Máximos.

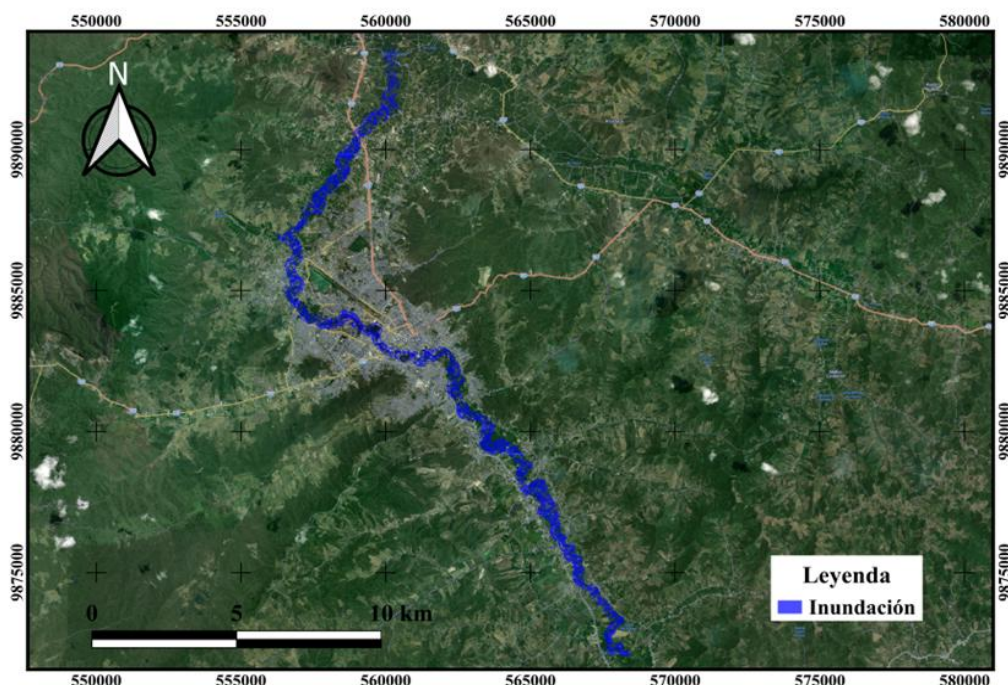


Fig. 10 Mapa de Inundación con caudal de 98,72 m³/s

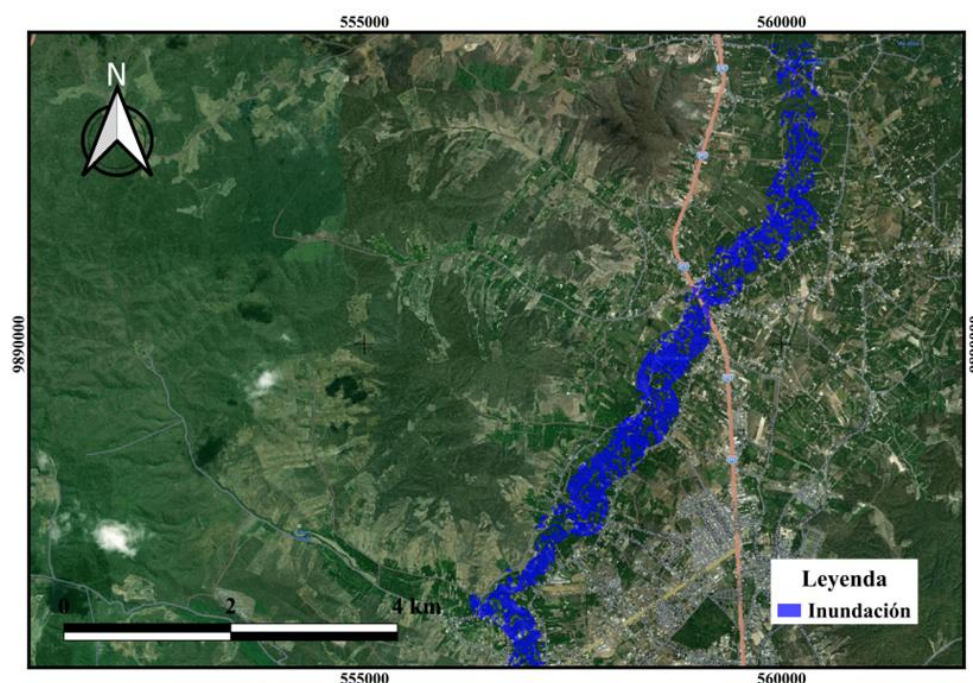


Fig. 11 Mapa de Inundación Zona 1

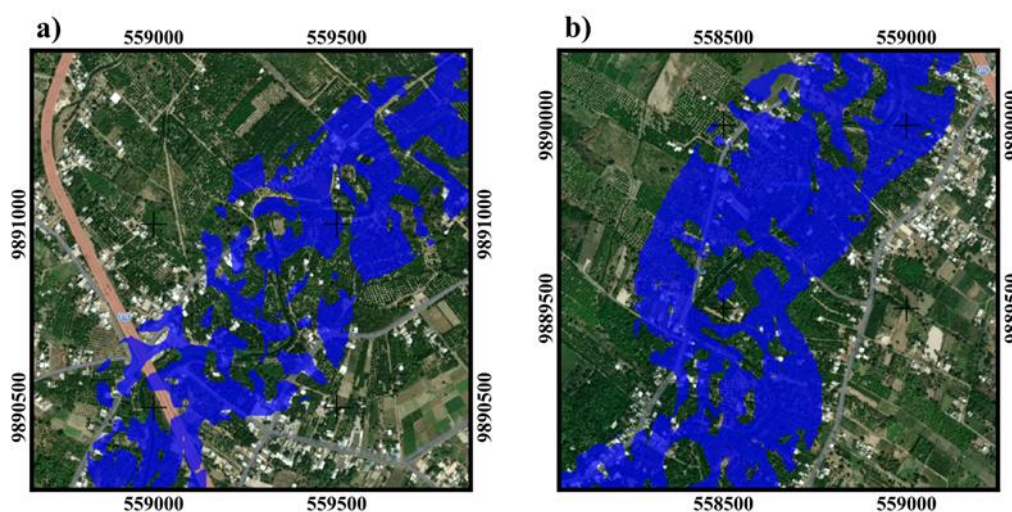


Fig. 12 a) Mejía y b) Higuerón Afuera

En la Figura 12 se ofrece una representación más detallada y clara de los sectores más vulnerables dentro de la zona 1, destacando particularmente las áreas de Mejía (Fig. 12^a) e Higuerón Afuera (Fig. 12^b) que en comparación con la (Fig. 4^a) y la (Fig. 4^b) se puede denotar que el área de inundación creció abarcando más terreno. Estos sectores se caracterizan por presentar niveles de agua que varían entre 0 a 4.10 metros en el caso de Mejía, y entre 0 a 4.30 metros en Higuerón

Análisis del riesgo de inundaciones en la ciudad de Portoviejo mediante la implementación de ráster satelital

Afuera, medidos desde el lecho del río. Estas variaciones reflejan la susceptibilidad de estas áreas frente a eventos de crecida, lo que las convierte en puntos críticos dentro de la zona de estudio.

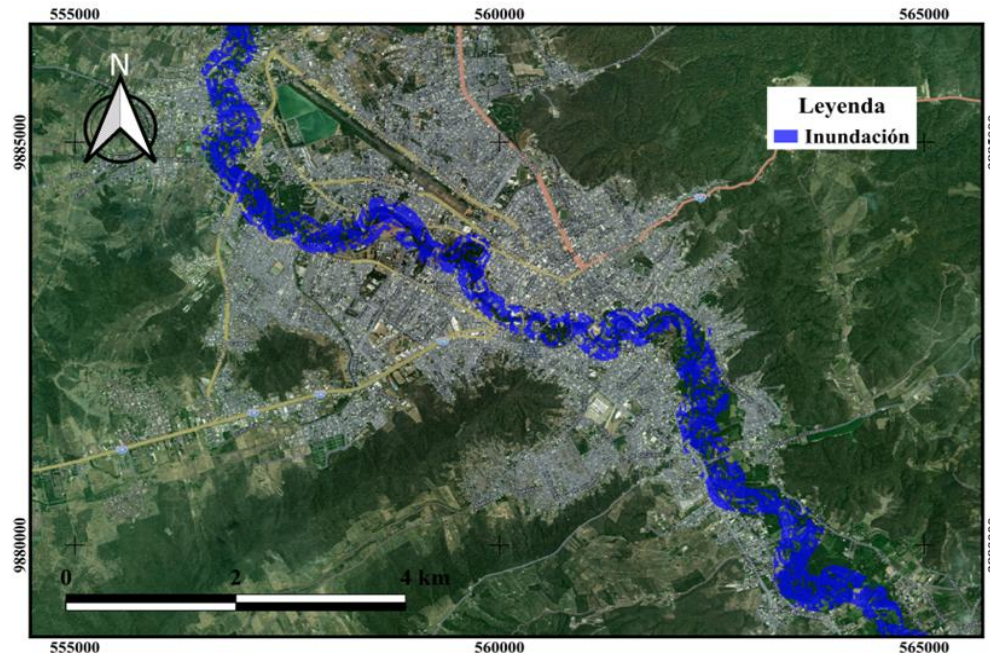


Fig. 13 Mapa de Inundación Zona 2

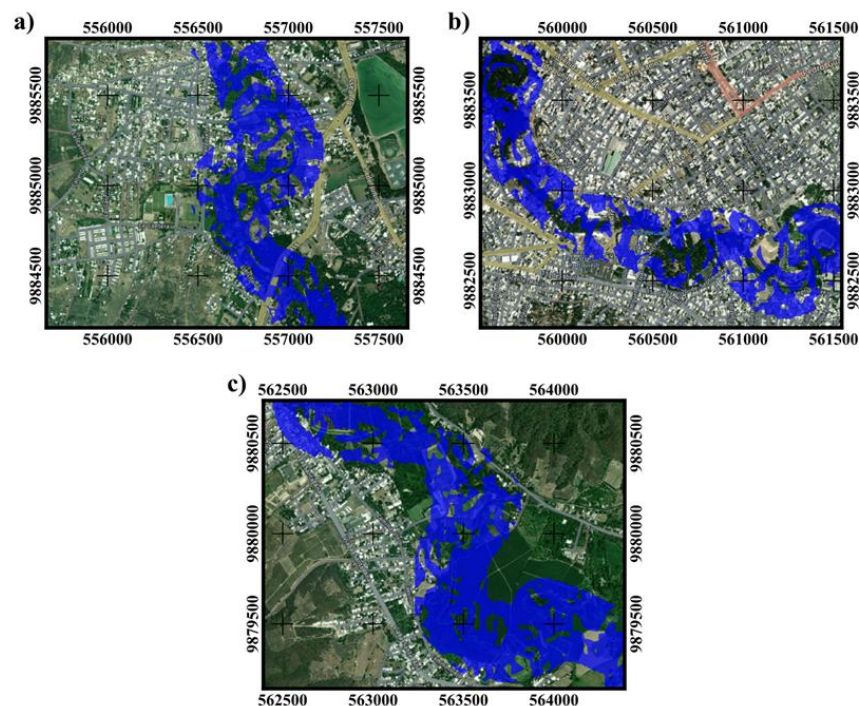


Fig. 14 a) “Milagro” de Picoazá, b) Centro de Portoviejo y c) “El Limón” de Simón Bolívar

Análisis del riesgo de inundaciones en la ciudad de Portoviejo mediante la implementación de ráster satelital

Asimismo, la Figura 14 ofrece una visualización más precisa de la zona 2, con un enfoque en los sectores de “Milagro” de Picoazá (Fig. 14^a), el Centro de Portoviejo (Fig. 14^b) y “El Limón” de Simón Bolívar (Fig. 14^c). Cabe destacar que en este caso se presenta el Centro de la Ciudad como otra de las zonas más inundables, pero que a diferencia de las demás su relieve posee mayor pendiente. En estas áreas, los niveles de agua varían entre 0 a 4.50 metros, 0 a 5.00 metros, y 0 a 5.20 metros, respectivamente, tomando como referencia el fondo del río. Esta información detallada es crucial para identificar las características hidrológicas de cada sector y evaluar su grado de vulnerabilidad ante posibles crecidas fluviales.

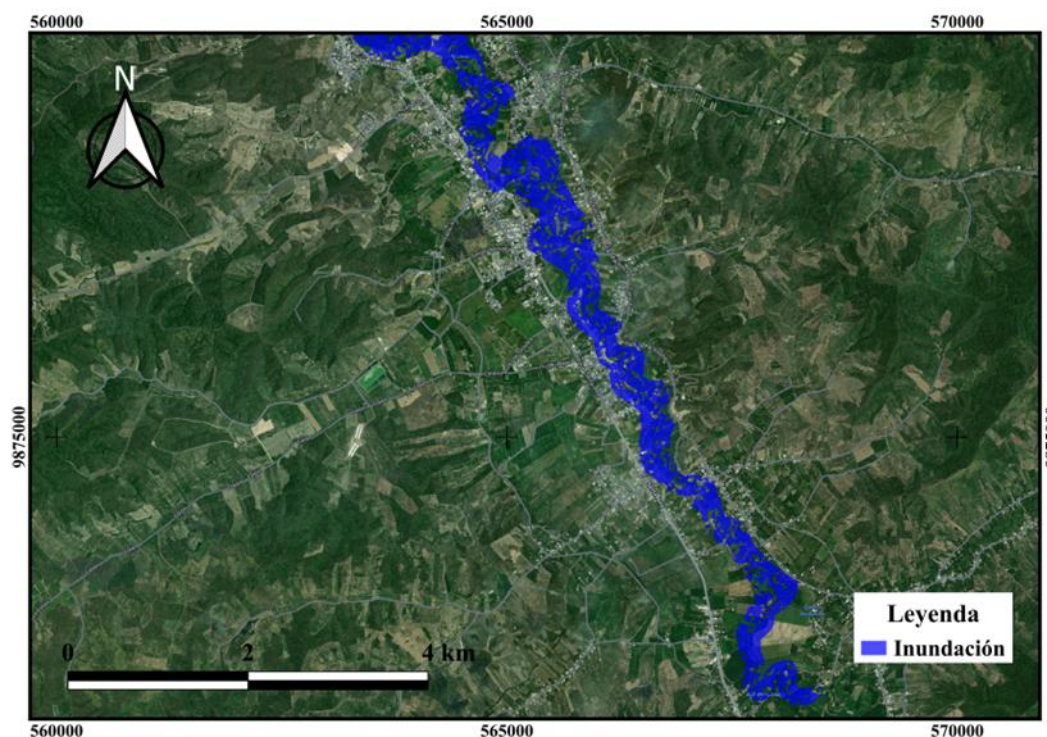


Fig. 15 Mapa de Inundación Zona 3

Análisis del riesgo de inundaciones en la ciudad de Portoviejo mediante la implementación de ráster satelital

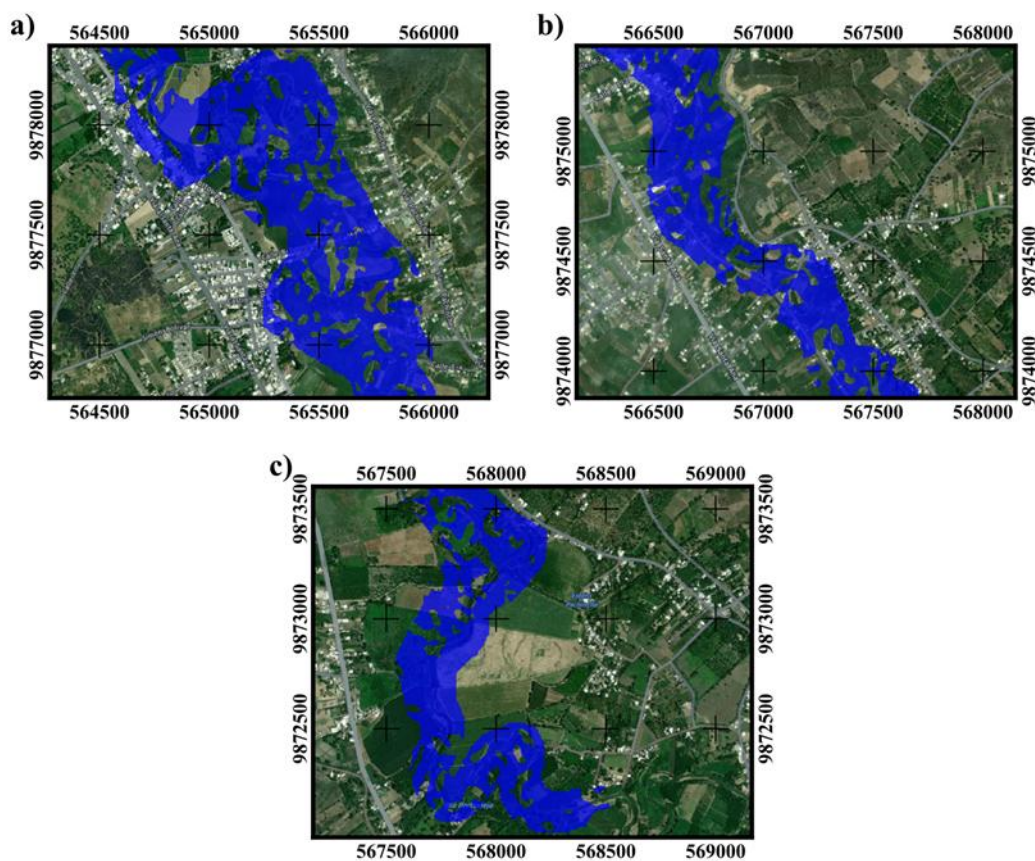


Fig. 16 a) Colón, El Cady b) San Pedro y c) Pachinche Afuera

Finalmente, la Figura 16 refleja sectores con mayor riesgo a inundaciones en la zona 3, los cuales son: Colón, El Cady (Fig. 16^a), San Pedro (Fig. 16^b) y Pachinche Afuera (Fig. 16^c). Estos sitios pueden experimentar niveles de agua que oscilan entre 0 a 5.25 metros, 0 a 5.40 metros, y 0 a 5.50 metros de altura, correspondientemente, con relación al nivel del cauce inferior del río.

Análisis del riesgo de inundaciones en la ciudad de Portoviejo mediante la implementación de ráster satelital

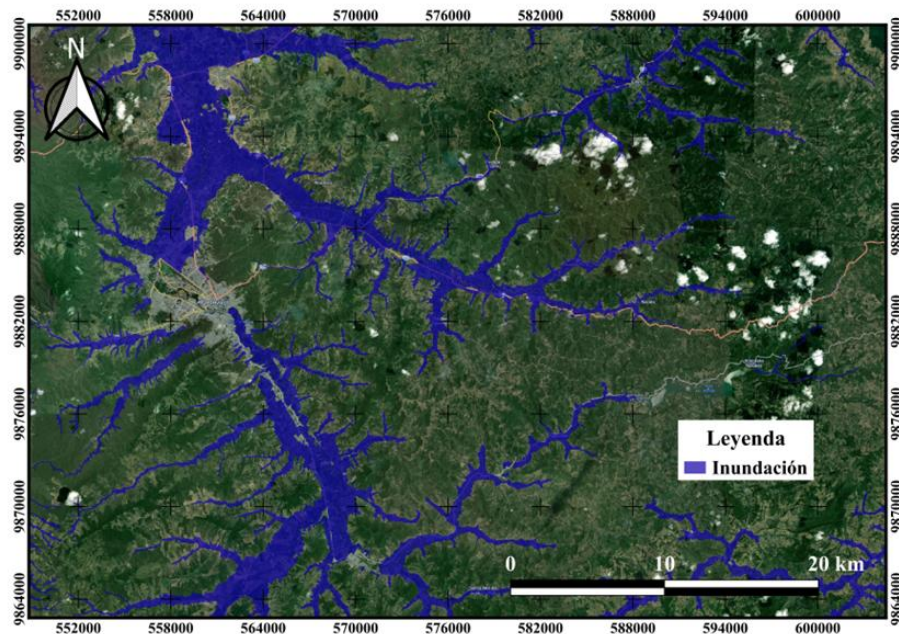


Fig. 17 Mapa de Inundación con datos vectoriales tomado de la base de datos del Sistema Nacional de Gestión y Riesgo (SNGR).

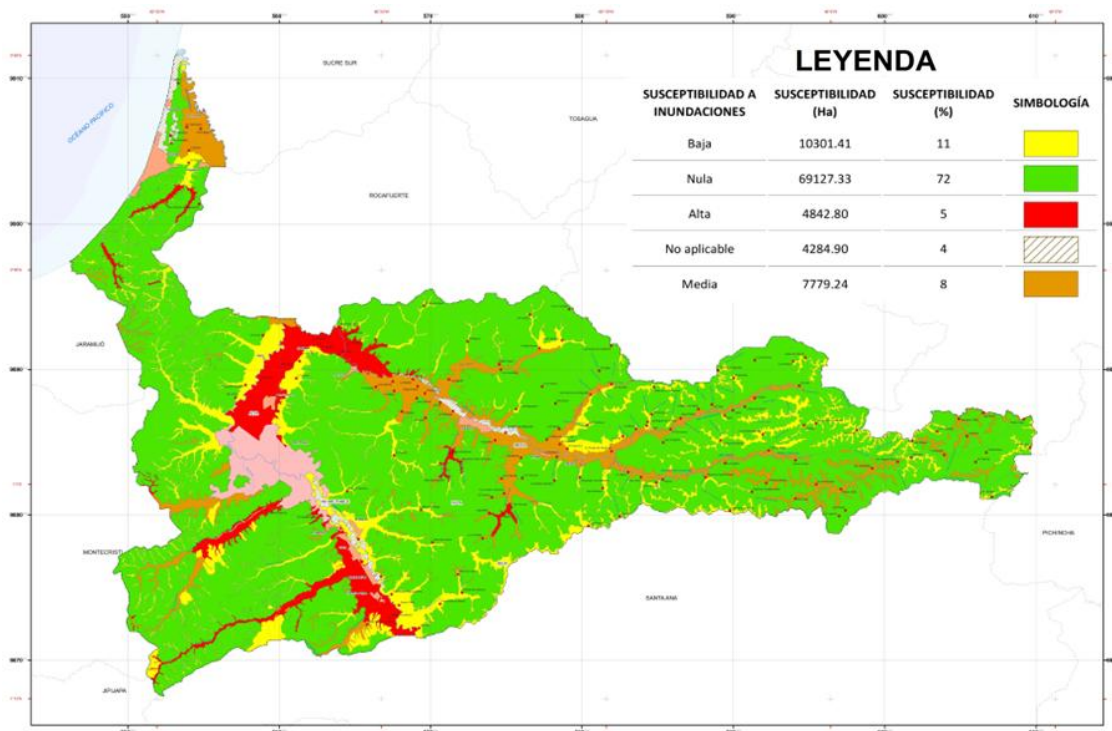


Fig. 18 Mapa de vulnerabilidad del Cantón Portoviejo tomado de la base de datos del Instituto Geográfico Militar (IGM).

Discusión

De acuerdo con los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas con el software HEC-RAS, los resultados muestran la distribución espacial de las áreas inundadas, la variabilidad de los niveles de agua en función de los distintos escenarios simulados y su relación con los datos previos proporcionados por el INAMHI. La comparación de los caudales de 6,02 m³/s y 98,72 m³/s en el contexto de la simulación de inundaciones permite evaluar de manera crítica el comportamiento hidrológico de diferentes escenarios de crecida y su impacto en áreas susceptibles; revela diferencias sustanciales en la extensión, profundidad, factores clave para la gestión del riesgo y la planificación de medidas de mitigación.

En el primer escenario, se observó un caudal de 6.02 m³/s, lo que resultó en un desbordamiento leve en las zonas bajas del río Portoviejo, con un impacto mínimo en las áreas urbanas cercanas. Este resultado es consistente con las predicciones de la investigación previa (Moreira y Vélez, 2024), que sugerían que un caudal bajo podría generar inundaciones de menor magnitud como se ve reflejado en el análisis de las diferentes zonas. Por otro lado, el escenario simulado con un caudal superior como lo es en este caso de 98.72 m³/s, se visualizó una notable expansión de las áreas inundadas, lo que pone en evidencia la alta vulnerabilidad de ciertas zonas, especialmente aquellas situadas cerca de los márgenes del río. A medida que el caudal incrementó, el agua alcanzó áreas previamente no afectadas en los escenarios de caudal bajo como, por ejemplo: En la zona 1, con un caudal de 6.02 m³/s, el nivel del agua alcanzó una altura de 3.00 metros, permaneciendo dentro de un rango manejable para las condiciones locales. Sin embargo, al incrementarse el caudal a 98.72 m³/s, se observó un aumento significativo en el nivel del agua, llegando a 4.30 metros.

Este incremento generó un impacto notable, afectando no solo terrenos agrícolas, que experimentaron anegamientos perjudiciales para su productividad, sino también en áreas urbanas. De la misma manera, en el primer escenario dentro de la zona 2, el nivel del agua oscila en un rango que varía entre los 2.70 metros como mínimo y los 3.50 metros como máximo. En cambio, en el segundo escenario se observa un aumento significativo en el nivel del agua, alcanzando valores que fluctúan entre 4.50 metros y 5.20 metros. Para el caso 3, bajo las condiciones de la primera simulación la altura del agua se eleva hasta un máximo de 3.50 metros, mostrando un comportamiento relativamente moderado en comparación con escenarios más extremos. Sin embargo, en la segunda simulación, se notó un incremento considerable con alturas que varían entre 5.25 metros y 5.50 metros.

Análisis del riesgo de inundaciones en la ciudad de Portoviejo mediante la implementación de ráster satelital

Desde el punto de vista de la dinámica del flujo, un caudal de $6,02 \text{ m}^3/\text{s}$ permite un análisis más detallado y específico de la interacción del agua con pequeñas infraestructuras, como puentes o alcantarillas. Las simulaciones pueden modelar con precisión cómo estas estructuras afectan la distribución del caudal, permitiendo identificar cuellos de botella o zonas con riesgo de desbordamiento. En cambio, con un caudal de $98,72 \text{ m}^3/\text{s}$, las simulaciones se enfocan más en la macro dinámica del río o del sistema hidráulico, priorizando la identificación de áreas críticas de inundación y la evaluación de la capacidad de los cauces naturales y artificiales para manejar volúmenes de agua excepcionalmente altos.

En términos de gestión del riesgo, las simulaciones con el caudal menor permiten una planificación preventiva y una respuesta gradual ante eventos de baja a media intensidad. En contraste, las simulaciones con el caudal mayor son fundamentales para escenarios de emergencia, donde las decisiones deben ser rápidas y las medidas de respuesta, como evacuaciones o activación de infraestructuras de contención, deben implementarse con celeridad.

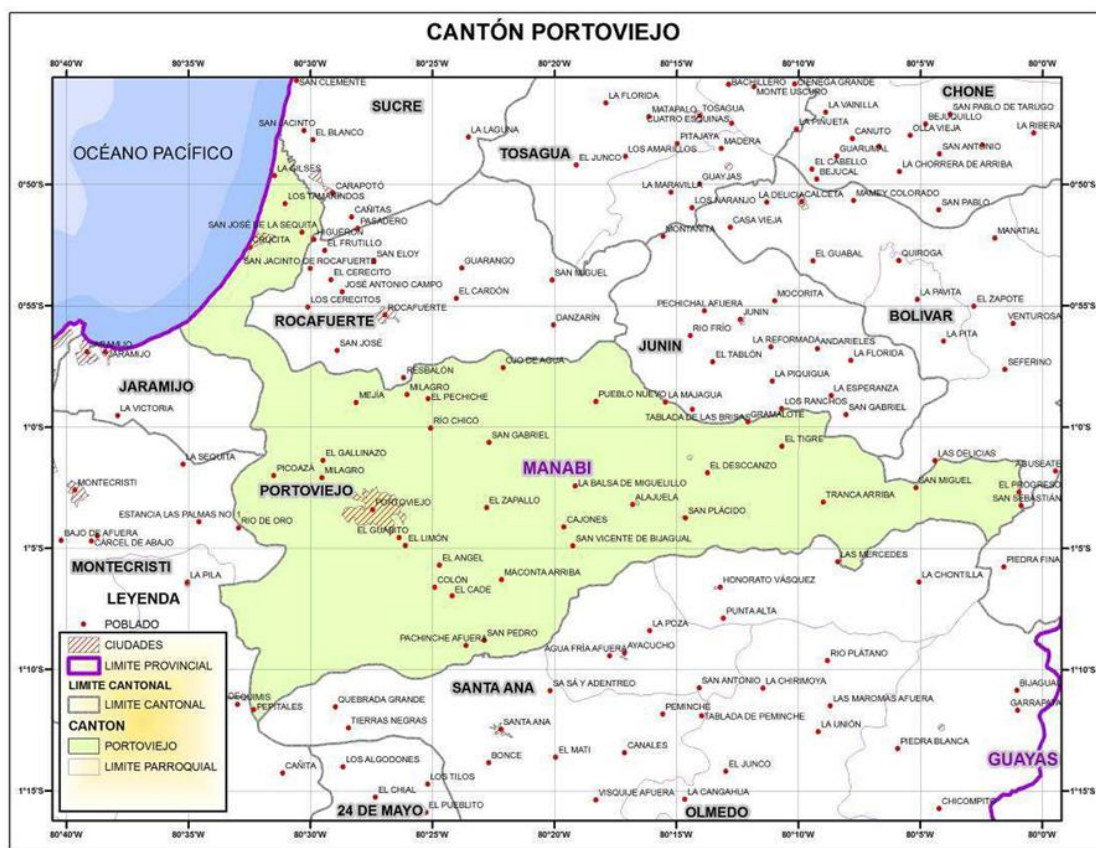


Fig. 19 Sectores del Cantón Portoviejo

Al comparar los dos mapas de inundaciones Fig. 17 y Fig.18, se observa una notable concordancia en los sectores afectados (Mejía, Higuerón Afuera, Colón, El Cady y Pachinche Afuera), destacando que las zonas bajas cercanas a los cauces principales presentan patrones recurrentes de anegamiento en ambos escenarios. Esta superposición sugiere una vulnerabilidad persistente en estas áreas, posiblemente atribuible a la topografía plana, la cercanía a cuerpos de agua y la limitada capacidad de drenaje. Asimismo, la coincidencia en los sectores inundados refuerza la necesidad de priorizar estrategias de mitigación en estas regiones específicas, como la implementación de infraestructuras de contención o la mejora de los sistemas de evacuación hidráulica. Además, este análisis comparativo subraya la importancia de adoptar un enfoque preventivo integral para reducir el impacto de futuras inundaciones en estas áreas críticas.

Recomendaciones

Para mitigar el impacto de las inundaciones en las zonas más vulnerables, como Mejía, Higuerón Afuera, Colón, El Cady y Pachinche Afuera, es fundamental la construcción de diques o muros de contención que ayuden a reducir el riesgo de desbordamientos. Además, el diseño y optimización de canales de alivio permitirá redirigir el exceso de agua durante períodos de alta crecida, minimizando los daños en áreas urbanas y agrícolas. Junto con estas infraestructuras, el desazolve y la limpieza periódica de cauces naturales y alcantarillas son medidas clave para evitar obstrucciones y mejorar el flujo del agua. Paralelamente, se debe establecer una regulación estricta que restrinja la construcción en zonas recurrentemente inundables, reduciendo la exposición al riesgo. Finalmente, es crucial desarrollar programas educativos sobre prevención y respuesta ante inundaciones, complementados con simulacros periódicos en coordinación con autoridades locales y organismos de gestión de riesgos, fomentando una cultura de resiliencia y preparación en las comunidades afectadas.

Conclusiones

Los resultados obtenidos mediante las simulaciones con el software HEC-RAS reflejan una clara relación entre los caudales simulados y las áreas afectadas por inundaciones en el río Portoviejo, destacando la variabilidad en los niveles de agua según los diferentes escenarios de caudal. En el escenario de caudal bajo ($6.02 \text{ m}^3/\text{s}$), se observará un impacto mínimo en las zonas urbanas cercanas

al río, corroborando las predicciones previas de inundaciones de baja magnitud. Sin embargo, al incrementarse el caudal a 98.72 m³/s, las áreas inundadas se expandieron considerablemente, afectando tanto terrenos agrícolas como áreas urbanas, con un aumento significativo en los niveles de agua que alcanzaron hasta 5.50 metros en algunas zonas. Este comportamiento resalta la alta vulnerabilidad de las zonas cercanas a los márgenes del río, especialmente aquellas en áreas bajas y con capacidad limitada de drenaje. La comparación de los mapas de inundación de ambos escenarios muestra una superposición de las áreas afectadas, lo que pone de manifiesto la persistente vulnerabilidad de sectores específicos, como Mejía, Higuerón Afuera, Colón, El Cady y Pachinche Afuera. Esta coincidencia subraya la necesidad urgente de implementar estrategias de mitigación en estas zonas, tales como la construcción de infraestructuras de contención y la mejora de los sistemas de evacuación hidráulica, con el fin de reducir el impacto de futuras inundaciones. Este análisis destaca la importancia de un enfoque preventivo e integral para la gestión del riesgo de inundaciones en las áreas más críticas, a fin de proteger tanto a las comunidades urbanas como a los terrenos agrícolas.

Referencias

1. BERGA, L. "Dams and floods". Dams in Spain. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos; Spanish National Committee on Large Dams (SPANCOLD), 2006. (Colección Ciencias, Humanidades e Ingeniería. n° 81).
2. Cardona, O. (2001). La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo. "Una crítica y una revisión necesaria para la gestión". Universidad de los Andes. <http://hdl.handle.net/20.500.11762/19852>
3. Comité Nacional para el Conocimiento del Riesgo (CNCR). (2017). Terminología sobre Gestión del Riesgo de Desastres y Fenómenos Amenazantes. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/20761>
4. Delgado, D., Sadaoui, M., Pacheco, H., Méndez, W., & Ludwig, W. (2021, May). Interrelations between soil erosion conditioning factors in basins of Ecuador: contributions to the spatial model construction. In International Conference on Water Energy Food and Sustainability (pp. 892-903). Cham: Springer International Publishing.

5. Delgado, D., Sadaoui, M., Ludwig, W., & Méndez, W. (2022). Spatio-temporal assessment of rainfall erosivity in Ecuador based on RUSLE using satellite-based high frequency GPM-IMERG precipitation data. *Catena*, 219, 106597.
6. Gallopín, G. C. (2006). Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. *Global environmental change*, 16(3), 293-303.
7. Giraldo, C. & Anchundia, A. (2021). Evaluación de zona urbana educativa ante amenazas de riesgo de inundación. *Río Portoviejo*. 6(2). doi: <https://doi.org/10.33936/riemat.v6i2.4289>
8. Glas, H., Jonckheere, M., Mandal, A., James-Williamson, S., de Maeyer, P. & Deruyter, G. (2017). A GIS-based tool for flood damage assessment and delineation of a methodology for future risk assessment: case study for Annotto Bay, Jamaica. *Natural Hazards*, 88,1867-1891, doi:10.1007/s11069-017-2920-5
9. Kuleshov, Y., Kubota, T., Tashima, T., Xie, P., Kurino, T., Hechler. P. & Alexander, L. (2020). Proyecto de Demostración de la OMM sobre la Vigilancia de Fenómenos Meteorológicos y Climáticos Extremos desde el Espacio para Asia Oriental y el Pacífico Occidental. Vol. 69 (1)
10. Leiva, Pablo., El medio ambiente en Colombia, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. IDEAM, Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia, (2001).
11. López, I., Granda, R. & Gómez, J. (2021). Las inundaciones en España y en Europa un problema que sube de nivel. N° 24, pp 805-831. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8536497>
12. Mejía, J. F. (2021). Estimación del riesgo por inundación en la ciudad de Valledupar utilizando imágenes satelitales y sistemas de información geográfica. Barranquilla, Colombia (p. 15-16). <http://hdl.handle.net/10584/11316>
13. Moreira, S. & Vélez, D. (2024). Determinación del coeficiente de rugosidad de Manning en un tramo del río Portoviejo, 9(3), 2024, <https://doi.org/10.23857/pc.v9i3.6890>.
14. Munich Re, 1997, Ueberschwemmung und Versicherung, Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, Munich.
15. Philander, S. G. H., El Niño and La Niña, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Princeton University, Princeton NJ 08542, *Journal of the Atmospheric sciences*, 42(23), 2652-2662, (1985).

16. PORTOAGUAS EP (2019). Estudios integrales de factibilidad y diseño definitivo de los sistemas de agua potable, alcantarillado sanitario y pluvial de las parroquias urbanas y rurales del cantón Portoviejo, provincia de Manabí, 21(2).
17. PRIMICIAS (2024). Ecuador registra más de 105.000 afectados por lluvias e inundaciones en un mes. Recuperado de: <https://www.primicias.ec/noticias/sociedad/fuertes-lluvias-balance-inundaciones-27febrero/>
18. Teleamazonas (2024). Inundaciones en el sur de Brasil dejan al menos 150 muertos y 620 000 desplazados. Recuperado de: <https://www.teleamazonas.com/inundaciones-brasil-muertos-desplazados-lula/>
19. Teleamazonas (2024). Miles de afectados por las inundaciones en Colombia y Perú. Recuperado de: <https://www.teleamazonas.com/miles-afectados-inundaciones-colombia-peru/>
20. Vallecilla-Ponce, A. S., Delgado-Gutiérrez, D. A., & Méndez-Mata, W. J. (2022). Retrospectiva de escenarios de inundaciones en la región costera de Ecuador: Una visión de sus impactos a escala local urbana. *Dominio de las Ciencias*, 8(2), 318-339
21. Vera, J. & Albarracín, A. (2016). Metodología para el análisis de vulnerabilidad ante amenazas de inundación, remoción en masa y flujos torrenciales en cuencas hidrográficas, 27(2), 2017, doi: <https://doi.org/10.18359/rcin.2309>
22. Vojtek, M. & Vojteková, J. (2016). Flood hazard and flood risk assessment at the local spatial scale: a case study. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(6), 1973-1992, doi:10.1080/19475705.2016.1166874