



Modelación y cartografía de inundaciones aplicando herramientas emergentes: ArcGIS Pro y GEE en el contexto de Mocoa, Putumayo

Rudy Maritza Moreno Rojas

Trabajo de grado presentado para optar al título de
Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Tutor

Juan Sebastián Grisales, Especialista (Esp) en Sistemas de Información Geográfica

Asesores de recursos académicos: Seleccione su asesor bibliográfico (A-Z), Claudia Marcela Cerón Rubio (asesora Centro de Escritura) y Elvia Lucía Sánchez García (asesora de integridad académica)

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual
Manizales, Caldas, Colombia

2025

Cita	(Moreno Rojas, R., 2025)
Referencia Estilo APA 7 (2020)	Moreno Rojas, R., (2025). <i>Modelación y cartografía de inundaciones aplicando herramientas emergentes: ArcGIS Pro y GEE en el contexto de Mocoa, Putumayo</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales. RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.



Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual, II

Seleccione grupo de investigación UManizales (A-Z)

Seleccione línea de investigación UManizales (A-Z).

Seleccione centro de investigación UManizales (A-Z).

Declaración de inteligencia artificial: el o los autores de este trabajo de grado declaran que han utilizado herramientas de inteligencia artificial (IA), tales como [mencionar herramientas utilizadas, por ejemplo, ChatGPT, Grammarly, Turnitin, Copilot, Gemini, entre otras], de manera ética y responsable, tal como se establece en el Acuerdo UManizales 002 (julio 26 de 2023) sobre propiedad intelectual e IA. Estas herramientas son empleadas como apoyo en la redacción, revisión gramatical y generación de ideas, pero en ningún caso sustituyen el análisis crítico, la argumentación académica ni la originalidad del trabajo. Asimismo, cualquier contenido generado con asistencia de IA está citado y referenciado adecuadamente, garantizando la integridad académica y el cumplimiento de los principios éticos de la investigación.

Biblioteca y Centro de Recursos: <https://biblioteca.umanizales.edu.co/>

Repositorio Institucional: <http://ridum.umanizales.edu.co/>

Universidad de Manizales: www.umanizales.edu.co

Revistas: <http://revistasum.umanizales.edu.co/>

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Manizales ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A mi familia, papá y hermana, a mi ángel en el cielo y a Blue.

Agradecimientos

Al profesor Juan Sebastián Grisales por valorar mi propuesta, por sus aportes y su paciencia.

Tabla de Contenido

Resumen..... 9

Abstract..... 10

1 Introducción..... 11

 1.1 Planteamiento del problema de investigación..... 13

 1.2 Antecedentes..... 15

 1.2.1 Antecedentes de ArcGIS en el campo de la modelación hidráulica e hidrológica. 15

 1.2.2 Antecedentes de GEE en el marco de la cartografía de inundaciones..... 18

 1.2.3. Área de estudio 20

2 Justificación..... 21

3 Objetivos..... 25

 3.1 Objetivo general..... 25

 3.2 Objetivos específicos 25

4 Hipótesis..... 25

5 Marco teórico..... 26

 5.1 Marco Conceptual..... 26

 5.1.1 Modelación de inundación en ArcGIS Pro 3.4..... 26

 5.1.2 Cartografía de inundaciones mediante datos SAR de Sentinel-1 en Google Earth Engine
..... 30

 5.2 Marco Normativo..... 33

6 Metodología..... 36

 6.1 Enfoque metodológico..... 36

 6.2 Recolección de información base y selección área de estudio 36

 6.3. Procesamiento y análisis espacial 36

6.3.1 Modelación de flujo en ArcGIS Pro	36
6.3.2 Detección de áreas inundadas en Google Earth Engine.....	43
6.3 Fases de desarrollo	47
7 Resultados	49
7.1 Recolección de información:	49
7.2 Resultados modelación de inundación con ArcGIS.....	50
7.2.1 Modelación de inundación.....	50
7.2.2 Comparación de resultados del escenario 1 con mapas existentes	54
7.3 Resultados GEE	62
7.4 Aplicativo en ArcGIS Experience Builder	64
8 Discusión.....	66
9 Conclusiones	68
10 Recomendaciones	70
6 Referencias.....	72
Anexos	80

Lista de tablas

Tabla 1. Conjunto de herramientas de hidrología en ArcGIS..... 16

Tabla 2. Referente normativo..... 33

Tabla 3. Información base y complementaria para la modelación de inundación con ArcGIS... 49

Tabla 4. Porcentaje de coincidencia entre las áreas de inundación de ArcGIS y del PBOT. 56

Tabla 5. Área de inundación de la modelación con ArcGIS sobrepuesta a las áreas de Usos de suelo del PBOT2000. 57

Tabla 6. Porcentaje de coincidencia entre las áreas de inundación de ArcGIS y usos del suelo del PBOT 58

Lista de figuras

Figura 1. Área de estudio..... 20

Figura 2. Tecnologías emergentes 22

Figura 3. Ruta para la implementación de tecnologías emergentes..... 23

Figura 4. Patrones de uso..... 24

Figura 5. Flujo de agua en una celda. 28

Figura 6. Mapa de alturas de un área de interés, para un tamaño de celda de 2m (con edificios).
..... 28

Figura 7. LOD de elevación del terreno más alta (izquierda) y resolución más baja (derecha).. 29

Figura 8. Profundidad del agua alineada con el terreno como una malla triangulada (izquierda) y una simbología de color (derecha). 30

Figura 9. Frecuencia de revisita y cobertura de la constelación de Sentinel-1 31

Figura 10. Capas incluidas en la modelación 37

Figura 11. Propiedades de configuración: cantidad de precipitación y capas ráster de referencia para la profundidad inicial del agua y las propiedades de infiltración 38

Figura 12. Definición del área de interés (AOI). 39

Figura 13. Otras configuraciones, tamaño de la celda, duración, precipitación y elementos adicionales..... 40

Figura 14. A) Dibujo de barrera, B) Barrera finalizada en la simulación..... 40

Figura 15. Visualización de la Simulación de flujo..... 41

Figura 16. Configuración para exportar resultados 42

Figura 17. Descripción general de todo el proceso de simulación de inundaciones en ArcGIS Pro
..... 43

Figura 18. Cargar área de estudio en GEE..... 44

Figura 19. Importar el área de estudio como geometría dentro del código. 44

Figura 20. Selección de la ventana temporal 45

Figura 21. Configuración de parámetros del sensor 45

Figura 22. Instrucciones de la metodología 46

Figura 23. Ejecutar el Script y visualizar resultados 46

Figura 24. Exportar resultados..... 47

Figura 25. Flujo de trabajo para el mapeo de la extensión de la inundación..... 47

Figura 26. Fases de la Metodología.....	48
Figura 27. Vista general 3d de los diferentes escenarios de modelación.	51
Figura 28. Detalle modelación de inundación para un tramo del Río Mocoa	52
Figura 29. Detalle modelación de inundación para un tramo del Río Sangoyaco.....	52
Figura 30. Detalle modelación de inundación para un tramo del Río Mulato.....	53
Figura 31. Área de inundación obtenida con la herramienta de simulación de flujo de ArcGIS para Mocoa.	54
Figura 32. Área de inundación de la modelación con ArcGIS sobrepuesta a las áreas de Hidrografía y Riesgos del PBOT2000.	55
Figura 33. Intersección entre el área de inundación de ArcGIS y el área de riesgo de inundación del PBOT.	56
Figura 34. Intersección entre el área de inundación de ArcGIS y usos del suelo del PBOT.....	58
Figura 35. Mapa de amenaza por inundación del perímetro de Mocoa - 2023	59
Figura 36. Amenaza por inundación 2023 vs. Área de inundación ArcGIS.	60
Figura 37. Viviendas afectadas en el área de inundación de ArcGIS.....	61
Figura 38. Familias afectadas por eventos naturales	61
Figura 39. Resultados GEE.....	62
Figura 40. Datos abiertos sobre asentamientos humanos en todo el mundo (GHSL.....	63
Figura 41. Visor Sentinel-1 Explorer.....	63
Figura 42. Comparativo entre las áreas de inundación de ArcGIS y GEE.....	64
Figura 43. Interfaz aplicativo ArcGIS Experience Builder.	65
Figura 44. Página de inicio aplicativo	80
Figura 45. StoryMap paso a paso modelación de flujo con ArcGIS	81
Figura 46. Ráster multidimensional en visor interactivo.....	82
Figura 47. Storymap paso a paso cartografía de inundaciones.....	82

Resumen

Dado que los eventos de inundación son cada vez más frecuentes e intensos en todo el mundo, el estudio de nuevas tecnologías es crucial para la toma de decisiones informadas, ya que permiten evaluar distintos escenarios mediante el ajuste de algunos parámetros de entrada, proporcionando soluciones accesibles y rápidas para usuarios SIG que se desempeñen en el contexto de la gestión del riesgo y el ordenamiento territorial.

El presente documento explora, describe y aplica el flujo de trabajo de dos herramientas emergentes para modelación y cartografía de inundaciones: ArcGIS Pro y Google Earth Engine (GEE), dando un enfoque dual y complementario de su uso en diferentes momentos de un evento de inundación: ArcGIS Pro previo al evento y GEE posterior a la ocurrencia del mismo. Considerando que, por un lado, realizar rápidamente modelos preliminares en áreas de interés genera insumos que podrían justificar la realización de estudios hidráulicos de detalle, lo que normalmente requieren mayor tiempo, recursos y personal especializado. Y, por otro lado, GEE permite desarrollar flujos de trabajo automatizados y replicables para la cartografía de inundaciones, generando insumos para la atención y recuperación del desastre; que en este caso, están basados en la metodología propuesta por Naciones Unidas y su enfoque de detección de cambios con imágenes Sentinel-1 (SAR).

Finalmente, para compartir los resultados con las partes interesadas en la gestión del riesgo por inundaciones se integran herramientas interactivas como Story Maps y Experience Builder en un aplicativo web.

Palabras clave: artículo de revisión, inundación, modelación, cartografía, riesgo, ArcGIS Pro, Google Earth Engine.

Abstract

As flood events are becoming more frequent and intense worldwide, the study of new technologies is crucial for informed decision making, because they allow the evaluation of different scenarios by adjusting some input parameters, providing accessible and fast solutions for GIS users working in the context of risk management and land use planning.

This paper explores, describes and applies the workflow of two emerging tools for flood modeling and mapping: ArcGIS Pro and Google Earth Engine (GEE), giving a dual and complementary approach to their use at different timeline of a flood event: pre-event ArcGIS Pro and post-event GEE. Considering that, on the one hand, quickly performing preliminary models in areas of interest generates inputs that could justify detailed hydraulic studies, which normally require more time, resources and specialized personnel. And, on the other hand, GEE allows the development of automated and replicable workflows for flood mapping, generating inputs for disaster response and recovery; which in this case, are based on the methodology proposed by the United Nations and its change detection approach with Sentinel-1 (SAR) imagery.

Finally, to share the results with different stakeholders, interactive tools such as Story Maps and Experience Builder are integrated into a web application.

Keywords: review article, flooding, modeling, cartography, risk, ArcGIS Pro, Google Earth Engine.

1 Introducción

El aumento en la frecuencia e intensidad de los eventos de inundación debido al cambio climático y el crecimiento de las áreas urbanizadas ha puesto de manifiesto la necesidad de contar con herramientas efectivas para la gestión del riesgo y la toma de decisiones informadas en zonas vulnerables impulsando la innovación tecnológica en el campo de la gestión del riesgo de desastres (*BID / Preparados y resilientes en las Américas*, s. f.). La ONU y el Banco mundial han reportado a Colombia como el tercer país de mayor riesgo climático en el mundo, siendo esta una problemática que se ha manifestado a lo largo de todo el territorio nacional, dejando millones de damnificados e innumerables pérdidas sociales y económicas (Sedano-Cruz & Carvajal-Escobar, s. f.) esto evidencia la urgencia de abordar la Gestión del Riesgo de desastres de forma integral, lo que a su vez implica el conocimiento, evaluación y difusión de tecnologías que permitan abordar esta problemática desde diferentes perspectivas y capacidades.

Una de las herramientas más recientes y accesibles en este campo es la nueva funcionalidad de modelación de inundaciones integrada en ArcGIS Pro, que fue lanzada en el año 2023. Esta herramienta permite simular inundaciones, proporcionando un enfoque rápido y aproximado para analizar el comportamiento del flujo de agua en escenarios tridimensionales. Aunque la herramienta no proporciona resultados de alta precisión, su capacidad para realizar simulaciones rápidas, la convierte en una excelente opción para el análisis preliminar de escenarios de inundación, lo cual puede servir de base para investigaciones futuras más detalladas y estudios hidráulicos específicos (Stängel, 2025). Su aplicación principal se contempla para el estudio de escenarios previos a la ocurrencia de posibles eventos de inundación.

De forma similar, Google Earth Engine ha cobrado gran popularidad como herramienta innovadora siendo una plataforma geoespacial en la nube que provee acceso gratuito a grandes volúmenes de imágenes de sensores remotos, así como la capacidad de procesamiento directamente en la web por lo que ha sido utilizada en numerosos estudios ambientales y de ordenamiento territorial. (Perez Cutillas, Pedro & Pérez-Navarro, Alberto & García, Carmelo & Zema, Demetrio & Álvarez, Jesús., 2023). Entre las principales ventajas de GEE se encuentran la rapidez de los análisis, ya que se ejecutan en muy corto tiempo para diferentes escalas de estudio,

otro de los aspectos más importantes es la replicabilidad de los scripts o flujos de trabajo creados por otros usuarios, que permiten su uso con el ajuste de algunos pocos parámetros. Este es el caso del flujo propuesto por Naciones Unidas, que dispone de un procedimiento para generar cartografía de inundaciones con imágenes Sentinel-1 bajo el ajuste de algunos parámetros de entrada (Thammaboribal et al., 2025a). Su aplicación principal se contempla para escenarios posteriores al evento de inundación pues requiere como insumo imágenes satelitales, es decir que el satélite ya haya pasado por la zona de interés.

La noche del 31 de marzo se presentó en Mocoa, Putumayo una precipitación en la que cayeron aproximadamente 130mm de lluvia, en un periodo de tiempo de 2 horas (11pm-1am), lo que provocó el desbordamiento de los ríos Mocoa, Mulato y Sangoyaco, así como varios deslizamientos, causando la muerte de al menos 332 personas, más de 300 heridos y más de 100 desaparecidos. Las cifras indican que al menos unas 17.500 personas de las 70.000 que viven en Mocoa se vieron afectadas (Rasolt, 2019).

Se elige Mocoa como área de estudio, ya que al ser una de las tragedias más grandes en Colombia por la magnitud de la afectación tanto de personas como de infraestructura, se cuenta con amplia disponibilidad de información tanto de estudios preliminares al evento como posteriores a este. En el presente trabajo se lleva a cabo la aplicación de las dos herramientas antes descritas, ya que, por un lado, se considera interesante generar una visualización 3D del evento sucedido con ArcGIS Pro y por otro, se hace una revisión preliminar para verificar la disponibilidad de imágenes satelitales para Mocoa, encontrando que el área de inundación fue capturada por el satélite Sentinel-1, puesto en órbita en el año 2014. Adicionalmente, esta zona ha sido históricamente vulnerable a inundaciones (Romo, 2015), lo que hace este un lugar ideal para la implementación de tecnologías de modelación y un ejemplo de los beneficios de la aplicación de los SIG para la generación de recursos valiosos que apoyen la toma de decisiones informadas en el campo de la gestión del riesgo de desastres.

Finalmente, este trabajo incluye la configuración y despliegue de un aplicativo web en la nube donde se integran herramientas como ArcGIS Story Maps y ArcGIS Experience Builder para compartir los pasos de ejecución de las herramientas y los resultados obtenidos, generando así un

insumo para las personas que estén interesadas en abordar y explorar estas nuevas tecnologías dentro de la gestión del riesgo de desastres.

1.1 Planteamiento del problema de investigación

El aumento de las inundaciones debido a eventos extremos de lluvia y el crecimiento urbano ha motivado el desarrollo de tecnologías para la generación de modelos de inundación que permitan la generación de alertas tempranas y la caracterización de posibles escenarios de riesgo. Aunque la modelación de estos flujos puede desarrollarse tanto en entornos urbanos como rurales, los mayores daños se asocian a zonas altamente pobladas que presentan exposición de infraestructura, comercio, industria, etc.; haciendo que el impacto sea más severo que en las áreas naturales (Yan, Y.; Zhang, N.; Zhang, H., 2023). Estas inundaciones no solo tienen efectos devastadores sobre la población y el medio ambiente, sino que también afectan de manera significativa la economía del país. Bajo este contexto, la gestión adecuada del riesgo de desastres y el ordenamiento territorial se han vuelto elementos clave en las políticas públicas, ya que permiten anticiparse y mitigar los efectos de estos desastres naturales.

De acuerdo con el Plan Nacional de Adaptación al cambio climático se deben incorporar las amenazas climáticas en la planificación y uso del territorio, así como fortalecer el capital social y ecosistémico para disminuir la exposición y vulnerabilidad, componentes claves del riesgo. Para lograrlo, es imprescindible articular los recursos humanos, tecnológicos y económicos, y mejorar aspectos como la calidad y disponibilidad de información y la comunicación entre los diferentes actores coordinando múltiples disciplinas y sectores (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, s. f.)

A pesar de que ya se cuenta con políticas nacionales lideradas por los entes reguladores más importantes como son el Departamento Nacional de Planeación (DNP), el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), la capacidad para predecir y gestionar de manera efectiva las inundaciones sigue siendo limitada debido a la falta de modelos predictivos precisos, información geoespacial detallada y

herramientas adecuadas para tomar decisiones informadas en el ámbito del ordenamiento territorial. Las políticas públicas y los instrumentos de gestión del riesgo de desastres en Colombia aún enfrentan serias dificultades, tales como la falta de datos precisos sobre las áreas vulnerables a inundaciones y la escasa integración de tecnologías de información geoespacial en la planificación territorial. (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, s. f.)

Es posible afirmar que hay muchos vacíos en la coordinación intersectorial, la coherencia entre políticas y la articulación entre múltiples actores para mitigar riesgos y crear resiliencia. Sin embargo, existen mecanismos que permiten avanzar en el cumplimiento de los objetivos de planificación para la reducción del riesgo de desastres mediante recursos que asignan grandes multilaterales como el BID, las Naciones Unidas, FINDETER, CAF, PNUD, WORLD BANK, entre otras, para países en desarrollo como Colombia, donde se han financiado y ejecutado proyectos enmarcados en la gestión del riesgo de desastres (Crespo & Puerta, 2016a). Estos aportes se presentan ya que está demostrado que los impactos del cambio climático afectan principalmente a los más pobres, como consecuencia de malas prácticas de asentamientos en zonas susceptibles a inundaciones y en zonas de laderas, siendo un factor común un alto índice de necesidades básicas insatisfechas (NBI) y una baja capacidad institucional (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, s. f.).

Aterrizando estas circunstancias al caso de Mocoa, se dijo en repetidas ocasiones que este fue un desastre anunciado y previsible, especulaciones que, casualmente, durante el desarrollo de este documento se confirmaron. En Julio del 2025, el Tribunal Administrativo de Cundinamarca condenó a varias entidades, entre ellas el Estado, la Unidad Nacional para la Gestión de Riesgo de Desastres (UNGRD), la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Sur de la Amazonia (Corpoamazonia), el departamento de Putumayo y el municipio de Mocoa, como responsables de los perjuicios ocasionados a cientos de víctimas de la avalancha y concluyó que hubo una falla en el cumplimiento de los deberes constitucionales y legales de entidades del orden nacional, departamental y municipal (Ayala, 2025). Demostrando que existe una problemática de gran envergadura que afecta a todo el territorio nacional y que por tanto merece la atención y estudio de metodologías que permitan generar insumos de valor para la toma de decisiones.

1.2 Antecedentes

Tradicionalmente, la definición de zonas inundables ha sido considerada como una labor de profesionales especialistas en modelación hidrológica e hidráulica, que requiere de múltiples insumos como por ejemplo, un modelo de elevación digital, ortofotos, fotos aéreas históricas, identificación de infraestructura expuesta, información de usos y coberturas del suelo, estudios hidrológicos que contengan los caudales máximos, entre otros. (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, s. f.). Por lo anterior, el nivel de detalle de los recursos generados depende directamente de la escala de trabajo, de la recolección de información secundaria y por supuesto, cuando se requiere, del levantamiento de información primaria, siendo una labor multidisciplinaria que requiere un tiempo considerable, que además varía dependiendo del tamaño del área de estudio y la disponibilidad de recursos de calidad.

El área de interés definida para este trabajo ha sido incluida en diferentes instrumentos de ordenamiento territorial como el Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT) del año 2004, modificado en el 2008 y en el Plan Municipal de Gestión del Riesgo (PMGRD) del 2013, donde se encuentra una zonificación general de las áreas de amenaza. Otro documento relevante es el Plan de Ordenación y Manejo del río Mulato (POMCA) realizado por la Corporación Ambiental para el Sur de la Amazonía (CORPOAMAZONIA) en el 2011, quienes en el mismo año ejecutaron un estudio general de amenazas para el Plan de Acción para la Prevención y Atención de Emergencias (PAPAEME). (Romo, 2015)

1.2.1 Antecedentes de ArcGIS en el campo de la modelación hidráulica e hidrológica.

Los profesionales de recursos hídricos han utilizado la tecnología SIG para visualizar, analizar y preparar información geográfica necesaria para los estudios hidráulicos e hidrológicos, generando así a través de los años la necesidad de desarrollar e incorporar herramientas que se integren con los softwares tradicionales de modelación hidráulica como HEC-HMS - Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System. (*Arc Hydro - Support for Hydrologic Modeling.Pdf*, 2020).

ESRI ha desarrollado un conjunto de herramientas de hidrología integrados en el software ArcGIS para procesos específicos que ayudan a modelar el movimiento del agua a través de una superficie. En la siguiente tabla se presentan las herramientas disponibles y una breve descripción de cada una:

Tabla 1. *Conjunto de herramientas de hidrología en ArcGIS*

HERRAMIENTA	DESCRIPCIÓN
CUENCA	Crea un ráster que delinea todas las cuencas de drenaje.
OBTENER FLUJO CONTINUO	Genera un ráster de flujo acumulado en cada celda a partir de un ráster de superficie de entrada sin necesidad de relleno previo de sumidero o depresión.
CALCULAR CURSO DE AGUA COMO LÍNEA	Genera entidades de línea de curso de agua a partir de un ráster de superficie de entrada sin necesidad de relleno previo de sumidero o depresión.
CALCULAR CURSO DE AGUA COMO RÁSTER	Genera un ráster de curso de agua a partir de un ráster de superficie de entrada sin necesidad de relleno previo de sumidero o depresión.
RELLENO	Rellena sumideros en un ráster de superficie para quitar pequeñas imperfecciones en los datos.
ACUMULACIÓN DE FLUJO	Crea un ráster de flujo acumulado en cada celda. Opcionalmente, puede aplicar un factor de peso.
DIRECCIÓN DEL FLUJO	Crea un ráster de dirección del flujo desde cada celda hasta su vecina o vecinas con pendiente descendente mediante los métodos D8, Dirección de flujo múltiple (MFD) o D-Infinity (DINF).
DISTANCIA DE FLUJO	Calcula, para cada celda, la componente horizontal o vertical en una distancia en pendiente descendente, siguiendo las rutas del flujo, hasta las celdas de un curso de agua hacia el que fluyen. En caso de varias rutas del flujo, se puede calcular la distancia de flujo mínima, media ponderada y máxima.
LONGITUD DE FLUJO	Calcula la distancia aguas arriba o aguas abajo o la distancia ponderada a lo largo de la ruta de flujo para cada celda.
SUMIDERO	Crea un ráster que identifica todos los sumideros o áreas de drenaje interno.
AJUSTE DE CORRIENTES	Alinea los puntos de fluidez a la celda de acumulación de flujo más alta dentro de una distancia específica.
CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO	Crea una tabla y un gráfico de elevaciones y capacidades de almacenamiento correspondientes para un ráster de superficie de entrada. La herramienta calcula el área de superficie y el volumen total de la región subyacente en una serie de incrementos de elevación.
VÍNCULO DE CURSO DE AGUA	Asigna valores únicos a secciones de una red lineal de ráster entre intersecciones.

CLASIFICACIÓN DE CURSOS DE AGUA	DE	Asigna un orden numérico a los segmentos de un ráster que representan las ramas de una red lineal.
DE CURSO DE AGUA A ENTIDAD	A	Convierte un ráster que representa una red lineal a entidades que representan la red lineal.
CUENCA HIDROGRÁFICA		Determina el área de contribución por sobre un conjunto de celdas de un ráster.

Nota: Fuente: (*Vista general del conjunto de herramientas de Hidrología—ArcGIS Pro | Documentación*, s. f.)

Como resultado del amplio uso de estas herramientas en el año 2002 ESRI desarrolló un modelo de datos llamado Arc Hydro que agrupó en un toolset un conjunto de 30 herramientas y flujos de trabajo que se ha expandido hasta incorporar al día de hoy más de 300 herramientas, cifra que continúa expandiéndose basada en la necesidad de implementación en procesos específicos propios de la modelación hidráulica e hidrológica (*Arc Hydro - Support for Hydrologic Modeling.Pdf*, 2020).

Arc Hydro fue desarrollado por líderes de la industria, el gobierno y la academia, por lo que su modelo de datos estandariza los procesos para que los resultados puedan ser usados consistente y eficientemente Adicional al conjunto de herramientas que agrupa Arc Hydro con los años se ha generado una amplia documentación técnica y científica que permite que cada vez más profesionales se involucren con el uso de estos recursos (*arc-hydro-resources.pdf*, s. f.), permitiendo incluso que las herramientas sean intervenidas y adaptadas mediante el uso de diferentes lenguajes de programación, consolidando así una interfaz de modelación hidráulica dentro del entorno SIG (*Arc Hydro GIS for Water Resources - Vista general*, s. f.) que también ha evolucionado en herramientas como QGIS, software libre que se integra con otras plataformas de modelación hidráulica como SWAT-MODFLOW, ampliando el espectro tanto de usuarios como de aplicaciones.(Park et al., 2019)

Actualmente se cuenta con herramientas ingenieriles basadas en modelos informáticos altamente detallados que simulan las características del flujo (profundidad, velocidad, etc.) entre ellos TELEMAC -2D, River 2D, HEC-HMS, HEC-RAS (de código abierto y gratuitos) y MIKE11 Y MIKE o IBER (comerciales que requieren una licencia de pago) (Copăcean et al., 2025), estas herramientas son usadas tradicionalmente por profesionales involucrados en temáticas asociadas

a los recursos hídricos que requieren conocimientos previos y datos de entrada con un alto nivel de detalle, incluso con información primaria tomada en campo por lo que solo pueden ser utilizadas por personal especializado. Por otro lado existen herramientas de simulación más rápida y aproximada, que pueden ser utilizadas por una gama más amplia de usuarios, y que permiten la obtención de respuestas en un menor periodo de tiempo para obtener una perspectiva inicial en la predicción de escenarios y el manejo de emergencias, siendo herramientas valiosas en temas de ordenamiento territorial y gestión del riesgo, entre ellas se encuentra la herramienta de Simulación de inundaciones de ArcGIS que fue lanzada en la versión 3.3 del software.

1.2.2 Antecedentes de GEE en el marco de la cartografía de inundaciones

Disponer de información precisa sobre la extensión y afectación de las inundaciones en tiempo real o casi real es fundamental para comprender y ejecutar la respuesta de emergencias relacionadas con inundaciones (Tazmul Islam & Meng, 2022a). Bajo dicho contexto, las tecnologías de sensores remotos y particularmente las imágenes satelitales han emergido como herramientas poderosas para la detección y monitoreo de inundaciones; y con ello, entidades como la Plataforma de las Naciones Unidas de información obtenida desde el espacio para la gestión de desastres y la respuesta de emergencia (ONU-SPIDER), se han enfocado en la promoción del uso de datos satelitales para la respuesta a desastres; proporcionando directrices y prácticas recomendadas, fomentando la colaboración entre agencias espaciales, gobiernos, organizaciones humanitarias y profesionales de la gestión del riesgo de desastres. (Thammaboribal et al., 2025a)

Para la cartografía de la extensión de las inundaciones los investigadores han utilizado principalmente información espectral de sensores ópticos como Landsat, SPOT, ASTER o MODIS o información de imágenes de radar de apertura sintética SAR como Sentinel-1. Debido a la alta correlación de la información espectral en los datos ópticos con el agua, así como a la disponibilidad de datos o resolución temporal, se prefieren los datos ópticos para cartografiar cuando las imágenes no presentan nubosidad. (Tazmul Islam & Meng, 2022b)

Algunos de los primeros estudios de cartografía de inundaciones se llevaron a cabo utilizando las bandas espectrales visibles y combinándolas con el índice de vegetación de diferencia normalizada a partir de imágenes ópticas (Barton & Bathols, 1989). Adicionalmente,

las capacidades de cartografía de inundaciones mejoraron con la creciente disponibilidad de imágenes ópticas de resolución espacial y temporal relativamente alta como (Landsat y MODIS), y varios índices espectrales basados en la identificación del agua como AWEI (Índices Automáticos de Extracción de Agua), MNDWI (Diferencia Normalizada Modificada), NDWI (Índice de Agua de Diferencia Normalizada), etc. propuestos por varios investigadores (Feyisa et al., 2014).

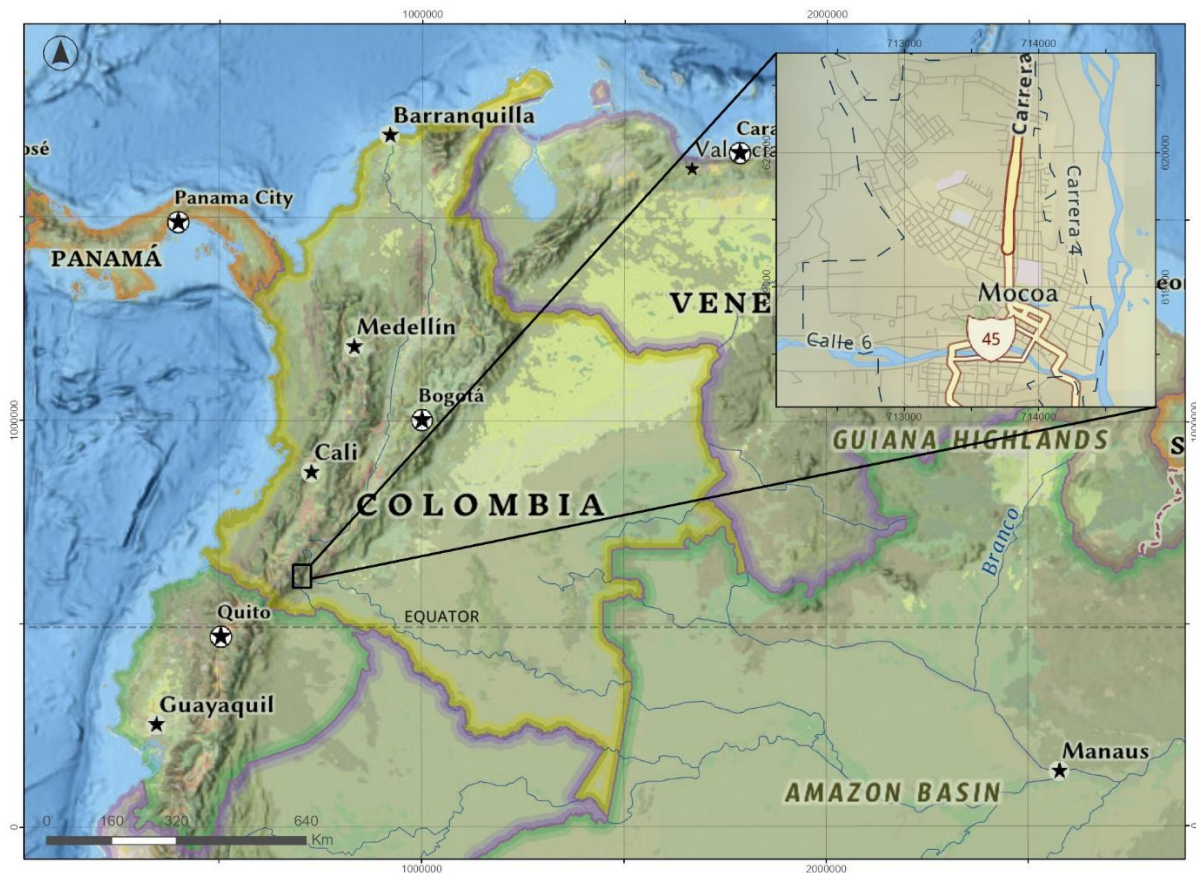
Sin embargo, uno de los principales desafíos de la cartografía de imágenes ópticas es la cobertura de nubes y como resultado se ve afectado el mapeo de las áreas inundadas en especial durante los desastres cuando hay malas condiciones climáticas. Otro problema común con el uso de la teledetección multiespectral tradicional es la dificultad para detectar inundaciones en masas forestales, ya que estas regiones no son visibles como píxeles de agua sino como píxeles de árboles (Tazmul Islam & Meng, 2022a). Es aquí donde las imágenes de radar cobran relevancia ya que son capaces de superar estas dificultades y pueden proporcionar una excelente calidad de imagen independientemente de las condiciones meteorológicas, tanto diurnas como nocturnas (Earth Science Data Systems, 2024).

Con las capacidades antes mencionadas, las imágenes SAR se han convertido en la única solución viable para cartografiar la extensión de las inundaciones en grandes áreas sin depender de las condiciones meteorológicas. Sumado a ello, el acceso libre a este tipo de imágenes desde portales de datos abiertos como el ASF DAAC de la NASA; el portal de descarga de Copernicus; el software SNAP, que incorpora un asistente para la descarga de imágenes Sentinel y la plataforma Google Earth Engine, han facilitado la adquisición de estos insumos. Cabe mencionar que hoy en día las imágenes Sentinel no solo están disponibles para descarga sino también para consulta directa en visores como el Sentinel-2 Land Cover Explorer del Living Atlas, donde con algunos parámetros de búsqueda sencillos es posible interactuar y visualizar el catálogo de imágenes, sin tener que descargarlas o procesarlas («Sentinel-2 Land Cover Explorer - Quickstart Guide», s. f.).

1.2.3. Área de estudio

Mocoa se presenta como un área de estudio prioritaria para la modelación de inundaciones debido a su alta vulnerabilidad frente a eventos hidrometeorológicos extremos, evidenciada en la tragedia del 31 de marzo de 2017, cuando una precipitación excepcional de aproximadamente 130 mm en pocas horas generó desbordamientos y flujos de lodo que ocasionaron graves pérdidas humanas, económicas y ambientales. Su localización en la confluencia de varios ríos y quebradas, sumada a las características topográficas, climáticas y de uso del suelo, la convierten en un entorno propenso a inundaciones y movimientos en masa. Modelar este territorio permite no solo comprender las dinámicas del agua en eventos extremos, sino también aportar insumos técnicos clave para la planificación territorial, la reducción del riesgo y el diseño de estrategias de adaptación al cambio climático.

Figura 1. Área de estudio



2 Justificación

En el marco del foro Understanding Risk 2018 (UR2018) donde participan diversas ONG, gobiernos, empresas de tecnología, instituciones académicas, ente otros actores, se destacó el papel del uso de tecnologías disruptivas en la gestión del riesgo de desastres acelerando mejoras en la forma en la que se recopila, analiza y comunica la información asociada a los riesgos. Dentro de estas tecnologías se mencionan los drones, imágenes satelitales, inteligencia artificial, machine learning e incluso las redes sociales (World Bank, 2018).

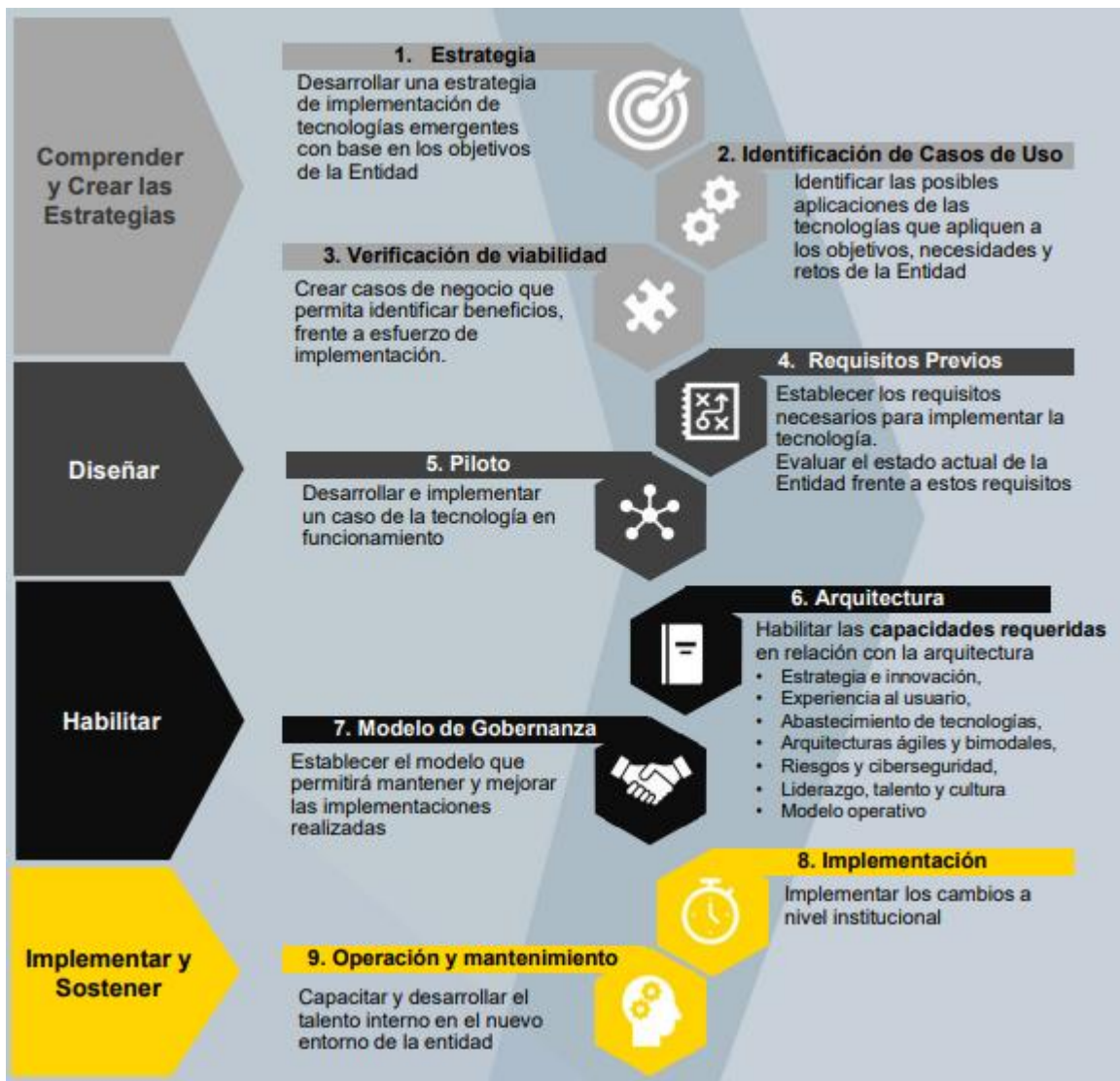
El Laboratorio de Innovación de la Facilidad Global para la Reducción y Recuperación de Desastres (GFDRR) en su reporte anual indica como prioridad la necesidad de inversión en tecnología de punta, trabajando activamente para mejorar la accesibilidad y calidad de los datos apoyando mecanismos de integración de tecnologías de vanguardia (The World Bank, 2024). Entendiendo que los países de bajos ingresos son los más afectados por los riesgos asociados al cambio climático es importante promover el conocimiento y exploración de herramientas que generen datos de valor para la toma de decisiones asociadas a la gestión del riesgo.

En Colombia, el Ministerio de Tecnologías (MinTIC) ha definido una guía con lineamientos generales para el uso de tecnologías emergentes, entendiendo que están en constante evolución e innovación y a partir de las cuáles se desarrollan nuevas soluciones que pueden trascender a diferentes industrias y aplicaciones (Ministerio de Tecnologías de la Información y Comunicaciones de Colombia, s. f.-a). Las herramientas a explorar en este trabajo se enmarcan en tecnologías emergentes, como se indica en la Figura 1, por un lado, la modelación de inundaciones con ArcGIS Pro incluye impresión 3D y gemelos digitales y por otro lado la cartografía de inundaciones en GEE utiliza deep learning, machine learning y analítica avanzada.

Bajo este contexto, se justifica la exploración de nuevas herramientas ya que cuando las tecnologías tradicionales no dan respuesta a necesidades específicas se requiere la implementación de mejoras mediante soluciones disruptivas e innovadoras que puedan ofrecer nuevas capacidades de modelación a un espectro más amplio de profesionales.

Se aclara que dentro de la ruta propuesta para la implementación de tecnologías emergentes por el MINTIC este trabajo podría enmarcarse en los pasos 2 y 3 de la Figura 3, correspondientes a la identificación de casos de uso y verificación de viabilidad.

Figura 3. Ruta para la implementación de tecnologías emergentes

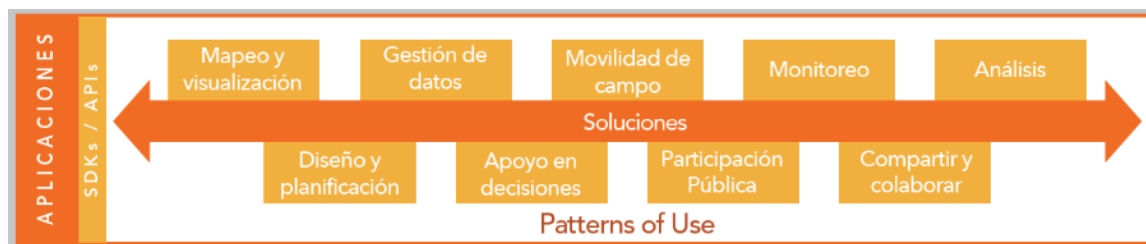


Nota. Fuente (Ministerio de Tecnologías de la Información y Comunicaciones de Colombia, s. f.-a)

Referente al área de estudio, se elige Mocoa como área de interés ya que allí se presentó una de las tragedias recientes más grandes de Colombia, como se indica en el informe de CEPEI “En la ciudad de Mocoa, entre la noche del viernes 31 de marzo y la madrugada del 1 de abril de 2017, se presentó una precipitación de 130 milímetros, equivalente al 30% de la precipitación mensual, lo que desencadenó la creciente del río Mocoa y sus dos afluentes Sangoyaco y Mulatos, las cuales se convirtieron en un avenida torrencial que impactó a 48 barrios rurales y urbanos del municipio, 5 totalmente destruidos.” (CEPEI, 2020)

Finalmente, se considera importante que los resultados de esta exploración de herramientas innovadoras sean de acceso público para impulsar su uso en temas relacionados con las problemáticas de gestión de riesgo aquí mencionadas. En este sentido, se justifica la creación de herramientas en la nube mediante la plataforma ArcGIS Online, que permite un análisis y visualización interactiva de mapas, datos y aplicaciones geoespaciales complementarias que se integran en un único portal web. Esta fase final del trabajo se enmarca en los patrones de uso de la plataforma ArcGIS que contempla no solo el análisis, diseño y planificación sino también la etapa de cierre que consiste en compartir y colaborar con todos los actores involucrados, como se indica en la Figura 4.

Figura 4. *Patrones de uso*



Nota. Fuente (ESRI, 2018)

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Realizar la modelación y cartografía de inundación para el evento de Mocoa, Putumayo mediante la aplicación de herramientas SIG emergentes: ArcGIS Pro y GEE.

3.2 Objetivos específicos

- Recolectar información secundaria del área de interés, esto incluye cartografía base, documentos técnicos, instrumentos de ordenamiento y mapas correspondientes (PDF, CAD, Shapefiles).
- Aplicar la herramienta de modelación de Flujos de Inundación de ArcGIS y evaluar dos escenarios de inundación, uno que replique el evento del desastre, otro con algunas barreras de protección en las zonas afectadas y comparar los resultados con cartografía existente relacionada con la amenaza, vulnerabilidad y riesgo por inundación
- Aplicar la metodología de cartografía de inundaciones propuesta por las Naciones Unidas para la Cartografía de inundaciones y evaluación de daños mediante datos SAR de Sentinel-1 en Google Earth Engine, con el fin de identificar ventajas y desventajas para su uso en la atención y recuperación de desastres para el área geográfica de Colombia.
- Documentar y Compartir los resultados y el paso a paso de la implementación de ArcGIS 3.3 y GEE mediante un aplicativo desarrollado en ArcGIS Experience Builder, que integre Story Maps y contenido multimedia, generando un insumo técnico sencillo, pero relevante sobre los procesos aquí desarrollados.

4 Hipótesis

La inundación ocurrida en Mocoa el 31 de marzo de 2017 puede ser modelada utilizando ArcGIS y cartografiada mediante imágenes Sentinel-1 en Google Earth Engine, lo que demuestra que la integración de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) contribuye significativamente a la gestión del riesgo de desastres, incluso por parte de profesionales sin formación especializada en hidrología e hidráulica.

5 Marco teórico

5.1 Marco Conceptual

5.1.1 Modelación de inundación en ArcGIS Pro 3.4

A pesar de los avances en las herramientas de modelación y cartografía de inundaciones, las capacidades de las herramientas e incluso los recursos computacionales siguen siendo un reto para los estudios de gran escala de análisis que tienen un tiempo de acción limitado y condiciones de datos escasos. En este contexto, los SIG han evolucionado para proporcionar un entorno práctico para la evaluación rápida y visual del comportamiento espacial y temporal de los flujos de inundación, permitiendo una estimación rápida de la extensión de la inundación, su profundidad y posibles daños asociados (Ozcelik & Gorokhovich, 2020).

La herramienta de simulación de inundaciones integrada en el software de ArcGIS ha sido creada con el objetivo de complementar, más no reemplazar las herramientas de ingeniería existentes, ya que, como se mencionó, está diseñada para facilitar una simulación rápida y exploración inicial de escenarios de inundación, pero no gestiona todas las condiciones y regímenes de flujo que se presentan en el mundo real. De hecho, simplifica algunos aspectos numéricos con un modelo basado en la física aproximada que busca un equilibrio entre precisión y velocidad para que los cálculos que este tipo de procesamiento requieren puedan realizarse en GPU del ordenador a una velocidad de fotogramas interactivos. Esta tecnología ha sido desarrollada por investigadores en el campo de los gráficos por computadora para su uso en aplicaciones de visualización y animación (ESRI, 2024).

Modelo de simulación de flujo

El movimiento del agua a través del terreno se describe mediante dos ecuaciones: una ecuación de continuidad y una ecuación de momento. La ecuación de continuidad se basa en el principio de conservación de la masa, es decir, que el agua no se crea ni se destruye durante el proceso de flujo; mientras que, la ecuación de momento describe la dinámica del flujo, es decir, el efecto de las fuerzas físicas en el movimiento del fluido. Ambas ecuaciones se integran a las unidades de procesamiento gráfico (GPU) y tienen similitudes con los requisitos de la animación

por computadora, las cuales utilizan paralelización masiva para resolver grandes conjuntos de ecuaciones simultaneas; para el caso de una simulación de un evento de inundación, se tiene una malla de celdas cuadradas que simulan la superficie del terreno y en cada una de las celdas se deben resolver las ecuaciones de continuidad y de momento, esto permite determinar el volumen de agua en cada celda y el flujo de agua entre las celdas (ESRI, 2024).

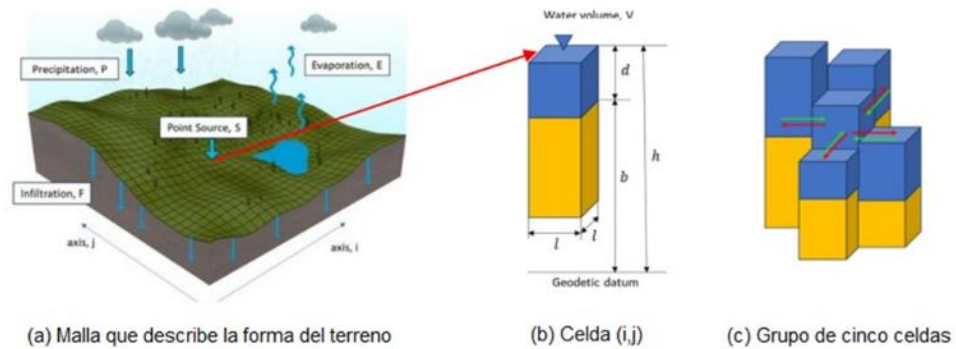
La solución de las ecuaciones de continuidad y momento para el flujo de agua sobre la superficie terrestre se logra mediante modelos de enrutamiento hidráulico. Dichos modelos pueden ser unidimensionales (1-D) o bidimensionales (2-D). Los modelos de enrutamiento hidráulico consideran la presión, la fricción, la gravedad y otras fuerzas, y su efecto sobre el movimiento del fluido en el espacio y el tiempo. Considerar completamente todos estos componentes es una tarea de gran complejidad e implica largos tiempos de cálculo. El modelo de simulación de flujo de ArcGIS es un modelo simplificado de enrutamiento hidráulico en 2D, diseñado para representar aproximadamente el flujo en áreas grandes e inundadas (ESRI, 2024).

Cálculo del volumen de agua

A continuación, se presenta el componente matemático, que avala las fórmulas utilizadas por la herramienta para simulación de inundaciones de ArcGIS Pro. Aclarando que las fórmulas aquí presentadas no se implementan directamente, sino que están implícitas en la simulación ejecutada.

Se tiene una malla cuadrangular que simula la forma del terreno, para esta malla, una celda típica del terreno se tiene que, la altura de la superficie terrestre sobre el datum geodésico es la elevación de la superficie terrestre, que, para este caso, la denominaremos se denomina “b”, el volumen de agua dentro de la celda en la superficie terrestre tiene una profundidad, denominada “d”, y la elevación de la superficie del agua en esta celda la denominaremos como “h”., como se muestra en la siguiente imagen:

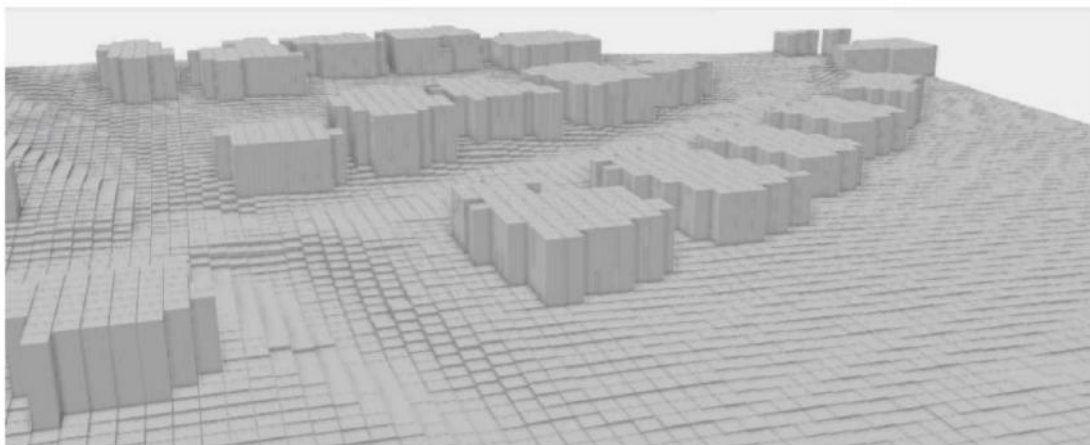
Figura 5. Flujo de agua en una celda.



Nota. Fuente (ESRI,2024)

De la gráfica, se puede deducir que la elevación de la superficie del agua es la suma de la elevación de la superficie terrestre y la profundidad del agua. La simulación de flujo se lleva a cabo durante un período de tiempo que se compone de pequeños intervalos de tiempo de duración, Δt . Al ejecutar la simulación en una vista 3D se genera un mapa de altura que muestrea el área de interés con una separación definida por el tamaño de celda. Por ejemplo, para un área de interés de 2 km x 2 km que utiliza la resolución (casi) máxima de 0,5 m, la escena se muestreará en aproximadamente 16 millones de ubicaciones con cuadrícula regular (es decir, 4096 x 4096) para crear la textura que contiene los valores de elevación. Todo lo renderizado en la escena, incluyendo la superficie del suelo y objetos vectoriales como edificios y elementos de barrera se capturarán en el mapa de altura. (ESRI, 2024)

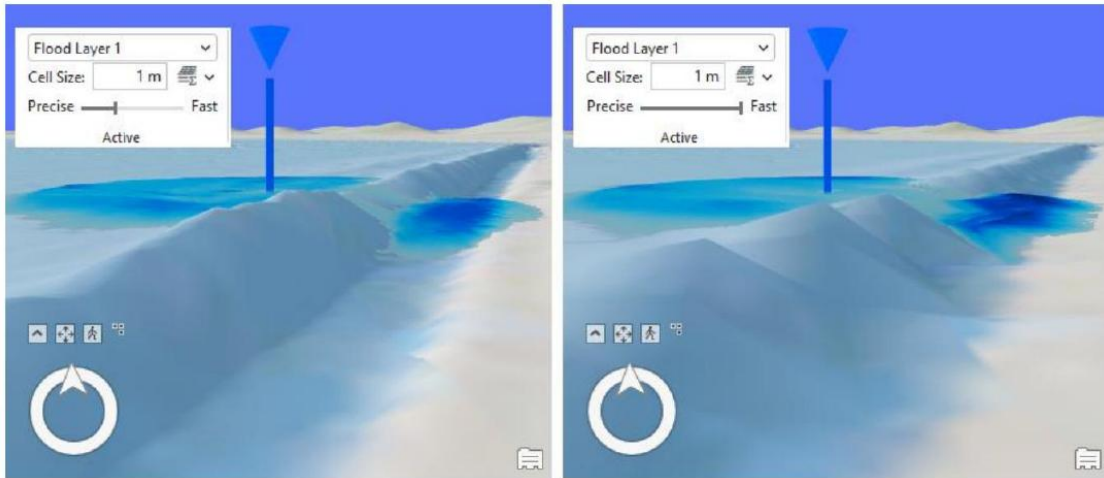
Figura 6. Mapa de alturas de un área de interés, para un tamaño de celda de 2m (con edificios).



Nota: Fuente (ESRI, 2024)

La malla de superficie de elevación del suelo se crea utilizando el nivel de detalle relativo (LOD) definido por el usuario.

Figura 7. LOD de elevación del terreno más alta (izquierda) y resolución más baja (derecha).



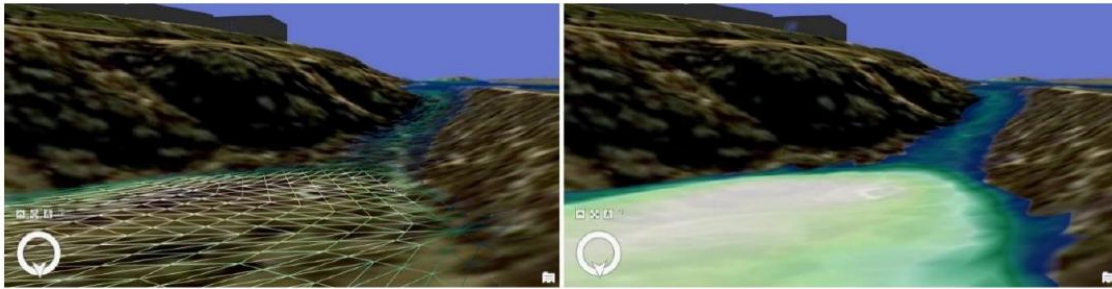
Nota: Fuente (ESRI, 2024)

Flujo simulado

Una vez calculado el mapa de altura del terreno, se puede ejecutar la simulación del flujo de agua. Hay dos fases. La primera consiste en la inicialización del agua sobre la superficie antes de calcular el flujo. La segunda consiste en múltiples iteraciones de cálculos a medida que se añade agua (lluvia y/o fuentes hídricas), se retira (infiltración y evaporación) y se desplaza por el terreno mediante cálculos matemáticos.

A medida que se ejecuta la simulación, se captura un caché del progreso del agua en pasos discretos., lo que permite una navegación rápida de regreso a un estado almacenado en caché. Para llegar a un momento intermedio (no almacenado en caché) en la simulación, esta debe ir al momento almacenado en caché anterior más cercano y luego ejecutar los cálculos desde allí. La profundidad del agua calculada se convierte en una malla con la misma resolución que la superficie de elevación utilizada para ejecutar el análisis y, posteriormente, se renderiza en la vista 3D. Al usar la misma resolución de textura, los valores de altura de los niveles de agua se alinearán con la elevación del terreno. El color del contenido mostrado se puede configurar para representar la profundidad o el caudal del agua, y la malla se puede renderizar utilizando bordes, relleno o una combinación de ambos.

Figura 8. Profundidad del agua alineada con el terreno como una malla triangulada (izquierda) y una simbología de color (derecha).



Nota: Fuente (ESRI, 2024)

5.1.2 Cartografía de inundaciones mediante datos SAR de Sentinel-1 en Google Earth Engine

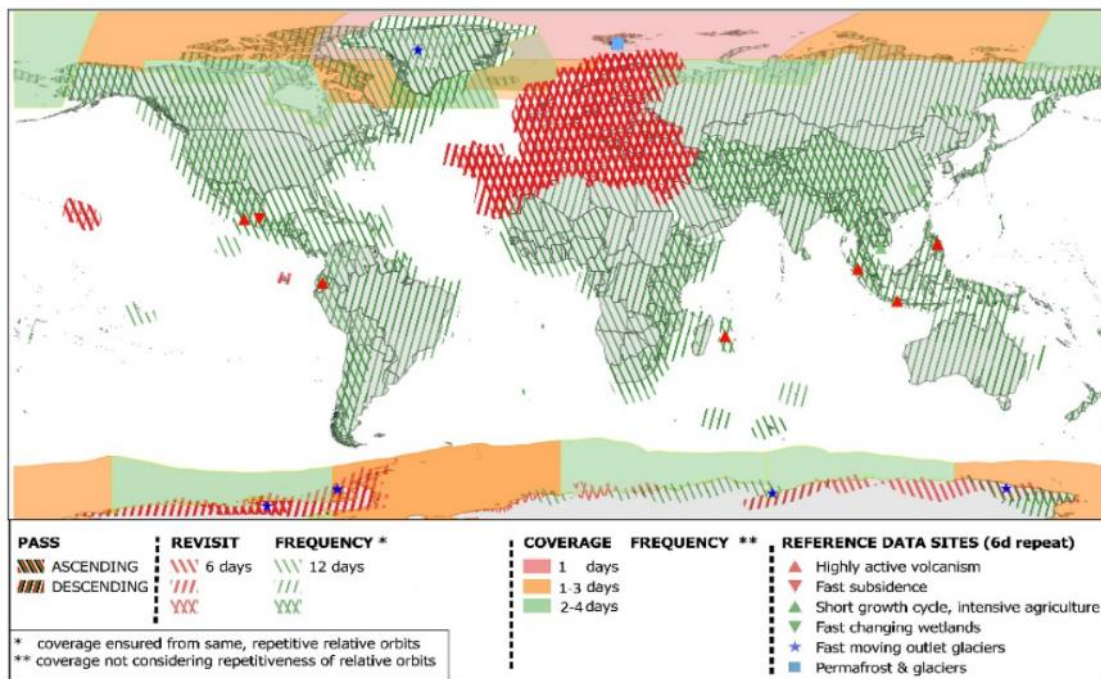
Hasta aquí se ha descrito la importancia de ArcGIS como herramienta de modelación previa a una inundación, pero también existen herramientas muy útiles para la evaluación de los daños una vez el desastre ha ocurrido. Es por ello que en el presente trabajo se aborda de manera complementaria el uso de Google Earth Engine, mediante la aplicación del procedimiento propuesto por las Naciones Unidas “*Step-by-Step: Recommended Practice: Flood Mapping and Damage Assessment Using Sentinel-1 SAR Data in Google Earth Engine*” que tiene como objetivo la generación rápida de información preliminar, incluyendo el mapeo de la extensión de la inundación y la cuantificación de daños. Esta metodología está basada en la detección de cambios de imágenes Sentinel-1 (SAR). (Thammaboribal et al., 2025a)

Imágenes satelitales Sentinel-1

Como ya se mencionó, las imágenes de los satélites Sentinel-1 (1A y 1B) se encuentran a libre disposición del público, gracias al programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA). Estos satélites se lanzaron en 2014 (1A) y 2016 (1B) respectivamente y siguen operativos en la actualidad. Cuentan con una resolución espacial de 10 m y con resolución temporal de 6 días para Europa y 12 días para el resto del mundo. Esta frecuencia de captura de las imágenes ha permitido una vigilancia continua de los cambios de la superficie terrestre, por lo que en una situación de emergencia, como una inundación, donde la rapidez es crucial, las imágenes de Sentinel-1 se convierten en un recurso de alto valor y utilidad para la cartografía de inundaciones en tiempo real o casi real. (Tazmul Islam & Meng, 2022a)

Aunque se cuenta con disponibilidad de imágenes de todo el mundo, para el uso de las imágenes Sentinel es importante tener en cuenta algunos parámetros del sensor, como la polarización y dirección, ya que esto puede afectar la disponibilidad y calidad de imágenes en el área de estudio.

Figura 9. Frecuencia de revisita y cobertura de la constelación de Sentinel-1



Nota. Fuente (Paso a Paso: Mapeo Rápido de Inundaciones y sus Impactos Utilizando Datos SAR de Sentinel-1 y Google Earth Engine | UN-SPIDER Knowledge Portal, s. f.)

Google Earth Engine

Google Earth Engine es una potente plataforma basada en la nube que proporcionan acceso a un amplio archivo de datos geoespaciales, incluidas imágenes satelitales, datos medioambientales y mapas topográficos. Se usa ampliamente para análisis ambientales, incluyendo la cartografía de inundaciones, su ventaja principal radica en la velocidad de cálculo, ya que el procesamiento se ejecuta en los servidores de Google, aprovechando potentes recursos computacionales y algoritmos geoespaciales avanzados, lo que la hace ideal para procesar grandes volúmenes de datos satelitales de forma muy eficiente.(Thammaboribal et al., 2025a) Esta plataforma brinda una variedad de conjuntos de datos actualizados constantemente a los que se puede acceder directamente dentro del editor de código. No se requiere la descarga de imágenes sin procesar y es posible generar salidas gráficas y exportar los resultados obtenidos.

Sin necesidad de descargar datos grandes y complejos, el procedimiento propuesto por UN-SPIDER comprende todo el análisis sin ocupar espacio en el disco duro ni capacidad de procesamiento del dispositivo del usuario final. Introduciendo el código proporcionado y simplemente delimitando la región de interés, así como las fechas de antes y después, esta metodología produce en segundos lo que un usuario de SIG puede tardar horas en completar. (*Recommended Practice: Flood Mapping and Damage Assessment using Sentinel-1 SAR data in Google Earth Engine | Space4Water Portal*, s. f.).

Además de cartografiar la extensión de las inundaciones, Google Earth también permite evaluar los daños integrando otros conjuntos de datos espaciales, como mapas de densidad de población, datos sobre infraestructuras e información sobre el uso del suelo.(Thammaboribal et al., 2025a). En general, Google Earth Engine desempeña un papel fundamental en la cartografía moderna de inundaciones y la gestión de desastres. Sus sólidas herramientas analíticas, su amplio repositorio de datos y su plataforma basada en la nube lo convierten en una herramienta indispensable para el seguimiento de las inundaciones, la evaluación de los daños y la información de los procesos de toma de decisiones en tiempo real (Hamidi et al., 2023)

5.2 Marco Normativo

A continuación, se presentan la normatividad más relevante relacionada con gestión del riesgo de desastres por inundaciones en Colombia, desde una escala de orden Nacional, normatividad internacional y finalmente la normatividad local para el área de estudio.

Tabla 2. *Referente normativo*

NORMATIVA	RESUMEN	RELEVANCIA
<p>Constitución Política de Colombia de 1991. Artículo 79 sobre el derecho a un ambiente sano. (Colombia. Presidencia de la república, 1991)</p>	<p>La Constitución de 1991 establece las bases fundamentales del ordenamiento jurídico colombiano, incluyendo la protección del medio ambiente y la gestión del riesgo de desastres. El artículo 79 garantiza el derecho a un ambiente sano y promueve la conservación de los recursos naturales.</p>	<p>La Constitución establece el marco general para la protección del medio ambiente y la gestión de riesgos, principios clave para la modelación de flujos de inundación, que deben cumplir con los estándares constitucionales de sostenibilidad y seguridad para las poblaciones.</p>
<p>Ley 99 de 1993 - Ley General Ambiental - Norma de rango superior. Artículo 1, sobre la política ambiental nacional (Colombia. Congreso de la República, 1993)</p>	<p>La Ley 99 de 1993 establece el marco normativo para la gestión ambiental en Colombia, creando el Ministerio de Ambiente y Vivienda y estableciendo principios para la protección de los recursos naturales y la sostenibilidad. Esta ley también regula la prevención y mitigación de desastres naturales.</p>	<p>La ley establece principios clave para la gestión de riesgos y la planificación del uso del suelo, lo cual es fundamental para la modelación de flujos de inundación y la prevención de desastres naturales en áreas vulnerables como Mocoa, Putumayo.</p>
<p>Ley 1523 de 2012 - Gestión del Riesgo de Desastres - Norma de rango superior (Colombia. Congreso de la República, 2012)</p>	<p>La Ley 1523 de 2012 establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD), y define las directrices para la identificación, evaluación, reducción y monitoreo de los riesgos asociados a desastres naturales. También establece la política nacional para la gestión del riesgo.</p>	<p>La modelación de flujos de inundación en Mocoa está directamente relacionada con los componentes de identificación y evaluación de riesgos de esta ley, que establece la base para la toma de decisiones frente a desastres naturales como las inundaciones.</p>
<p>Decreto 1807 de 2014 - Sistema Nacional para la Gestión del</p>	<p>Este decreto regula la implementación del Sistema</p>	<p>La modelación de flujos de inundación y el uso de herramientas</p>

<p>Riesgo de Desastres (SNGRD) - Norma administrativa. (Colombia. Presidencia de la República, 2014)</p>	<p>Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD) y establece las condiciones para el manejo de la información relacionada con los riesgos de desastres. Además, promueve la planeación y gestión del riesgo en todos los niveles de gobierno.</p>	<p>como ArcGIS y Google Earth Engine son componentes clave para la gestión del riesgo en el marco del SNGRD, y este decreto regula cómo deben usarse esas herramientas para la toma de decisiones informadas.</p>
<p>Resolución 1477 de 2015 - Directrices para la elaboración de mapas de amenaza por inundación - Norma administrativa.</p>	<p>La Resolución 1477 de 2015 Establece las directrices para la elaboración de mapas de amenaza por inundación en Colombia, incluyendo la metodología para estimar la extensión, profundidad y velocidad de las inundaciones.</p>	<p>Los mapas de amenaza por inundación son fundamentales para la modelación y validación de los flujos de inundación en Mocoa, Putumayo. Esta resolución regula cómo deben elaborarse estos mapas, lo que facilita el análisis y la comparación con los resultados obtenidos con herramientas como ArcGIS y Google Earth Engine.</p>
<p>Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático PNACC- Norma administrativa. (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, s. f.) (Política Nacional de Cambio Climático, s. f.)</p>	<p>Esta resolución establece las políticas y directrices para la adaptación al cambio climático en Colombia. Busca reducir los riesgos climáticos y aumentar la resiliencia de los territorios y poblaciones vulnerables, promoviendo acciones concretas en diferentes sectores.</p>	<p>La modelación de inundaciones y el uso de herramientas geoespaciales como ArcGIS y Google Earth Engine están alineados con los objetivos de adaptación al cambio climático establecidos por esta resolución.</p>
<p>Plan Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres – Una estrategia de desarrollo 2015-2025 - Norma administrativa. (UNGRD, s. f.)</p>	<p>Este plan establece las estrategias y acciones prioritarias para la gestión de riesgos de desastres en Colombia. Se enfoca en la reducción de riesgos, la preparación ante desastres naturales y la creación de capacidades para la respuesta efectiva ante emergencias.</p>	<p>La implementación de metodologías como la cartografía de inundaciones y la modelación de flujos de inundación son herramientas clave para la ejecución de este plan, proporcionando datos que mejoran la capacidad de respuesta ante desastres en áreas como Mocoa.</p>

<p>Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030 - Norma internacional.</p> <p>(United Nations, s. f.)</p>	<p>Colombia es parte de varios acuerdos internacionales relacionados con la gestión de desastres y la adaptación al cambio climático, como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (EIRD) de la ONU.</p>	<p>La investigación se alinea con las directrices internacionales sobre la cartografía de inundaciones y la gestión del riesgo, especialmente con las metodologías propuestas por la ONU para la reducción de riesgos y la resiliencia ante desastres naturales.</p>
<p>Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT) de Mocoa, Putumayo.</p> <p>(Municipio de Mocoa, 2023)</p>	<p>Cada municipio en Colombia debe contar con un Plan de Ordenamiento Territorial (POT), o PBOT en este caso, que establece la planificación del uso del suelo y las políticas relacionadas con la gestión ambiental y de riesgos.</p>	<p>El PBOT de Mocoa, Putumayo, tiene en cuenta los riesgos por inundación, y la modelación de flujos de inundación es fundamental para actualizar este instrumento que debió ser actualizado en 2012. Sin embargo, debido a diversos factores incluyendo la avalancha del 2017, su revisión y ajuste se ha retrasado. Actualmente el municipio está en proceso de formulación de un nuevo PBOT para el periodo 2024-2036.</p>
<p>Plan de Ordenación y manejo POMCA del Río Mocoa.</p> <p>(POMCA del río Mocoa, escenario actual y tendencial al año 2032, s. f.)</p>	<p>Mocoa se encuentra ubicada dentro de la cuenca del Río Mocoa, por lo tanto, CORPOAMAZONÍA es el ente ambiental encargado de la regulación y seguimiento de dicha cuenca.</p>	<p>El POMCA incluye información ambiental relevante como unidades geológicas, clima e hidrología, amenazas por inundaciones, movimientos en masa y avenidas torrenciales, entre otros.</p>

6 Metodología

6.1 Enfoque metodológico

El presente trabajo adopta un enfoque metodológico aplicado y exploratorio orientado al modelamiento de la inundación ocurrida en Mocoa el 31 de marzo de 2017. Se emplean herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), específicamente ArcGIS y Google Earth Engine (GEE), con el objetivo de generar una representación espacial del evento, mapear su extensión y evaluar la utilidad de estos recursos para profesionales SIG, que cuenten o no con formación especializada en temas de hidrología e hidráulica, dada la facilidad y rapidez de su aplicación y generación de resultados.

6.2 Recolección de información base y selección área de estudio

Como punto de partida se requiere la recolección de información base, esto incluye información cartográfica y bibliografía de diferentes fuentes, lo que requiere un trabajo de consulta en portales de datos abiertos de entidades como el IGAC, IDEAM, Alcaldía, Corporación Autónoma Regional, Colombia en mapas, Colombia OT, Colombia en mapas, Artículos académicos y en general cualquier tipo de información que permita contextualizar el área de estudio definida.

6.3. Procesamiento y análisis espacial

6.3.1 Modelación de flujo en ArcGIS Pro

1. **Trabajo preliminar:** La modelación de flujo de ArcGIS se ejecuta con todos los elementos cargados en la escena 3D, el modelo digital de elevación y la capa de edificios se incluyen como insumo base en el software, sin embargo, es posible cargar fuentes propias de información, por ejemplo, un DEM de alta resolución, elementos como construcciones, puentes, árboles, etc. Este enfoque permite evaluar diferentes escenarios solo con apagar y encender las capas que queremos incluir en el análisis. Es importante tener claro que los elementos que se incluyen afectan el comportamiento del flujo. (ESRI, 2024)

Figura 10. *Capas incluidas en la modelación*

- 2. Configuración del escenario:** Un escenario de simulación de inundación se ejecuta dentro de un área de interés (AOI), esta delimitación, más el parámetro de la cantidad de precipitación, expresada en milímetros (mm), son los únicos parámetros requeridos para ejecutar una simulación. Existen otros elementos de configuración opcionales, como fuentes de agua, barreras, canales, evaporación e infiltración, que pueden utilizarse en diversas combinaciones. (ESRI, 2024)

Figura 11. *Propiedades de configuración: cantidad de precipitación y capas ráster de referencia para la profundidad inicial del agua y las propiedades de infiltración*

Configure Simulation ✕

Flood Layers Sin Barreras

Duration:

▼ **Rainfall Rate** ↓ →

Start Time	Duration	Rate	Units/hr
00:00:00	03:00:00	130	mm ▼
03:00:00	(Split)		
(Append)			

Rainfall rate transition time (minutes)

▼ **Participating Layers**

Layers

▼ **Starting Water Level**

Water Depth Raster

▼ **Infiltration Rasters**

Infiltration Rate (units/hr)

Maximum Infiltration

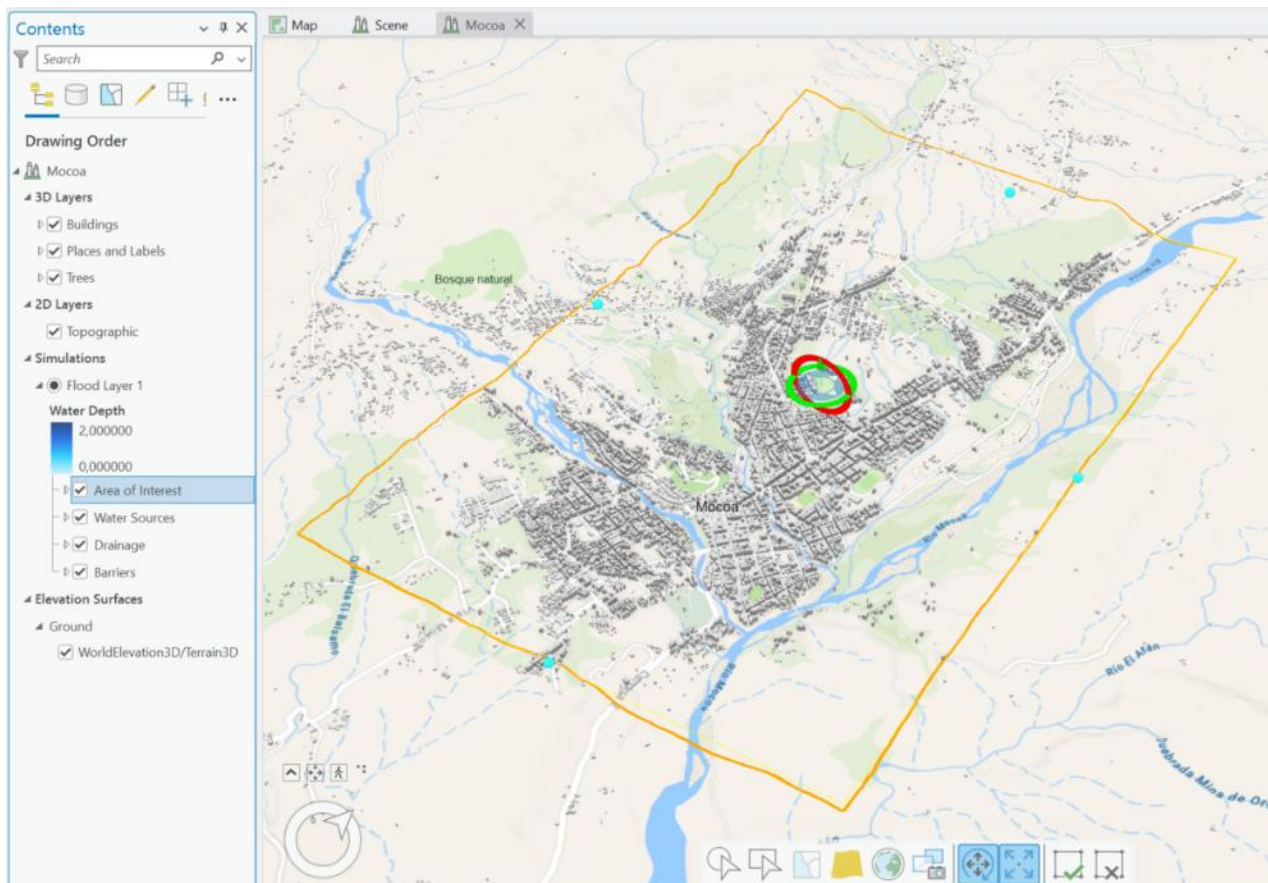
▼ **Dimensions**

Length: 4161,59 m
 Width: 5116,56 m
 Rotation: 90,258
 Cell Size: 1,249 m
 Resolution: 3331 x 4096

Contain water within the area of interest.

El AOI (Área de Interés) deseada se puede definir manualmente o mediante una entidad seleccionada y se puede editar para mover o redimensionar o rotar, según sea necesario. La resolución máxima del Análisis es 4000x4000 pixeles, que equivale a unos 14km², aproximadamente.,

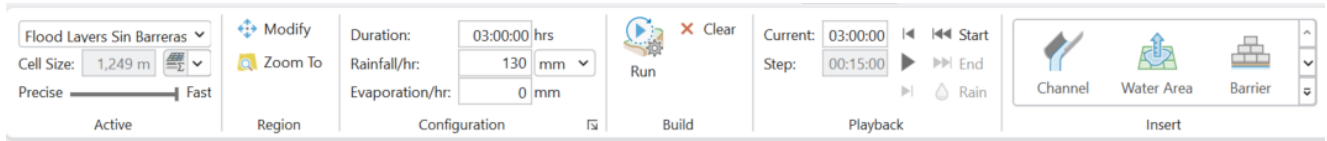
Figura 12. Definición del área de interés (AOI).



Cuando se crea el AOI se habilitan un conjunto de opciones de configuración que permiten definir el tamaño de la celda (resolución espacial), donde el tamaño máximo permitido es de 3.5m, aunque esta se configura automáticamente de acuerdo con el tamaño de la AOI para maximizar los recursos computacionales, para las simulaciones aquí desarrolladas no se modifica.(ESRI, 2024)

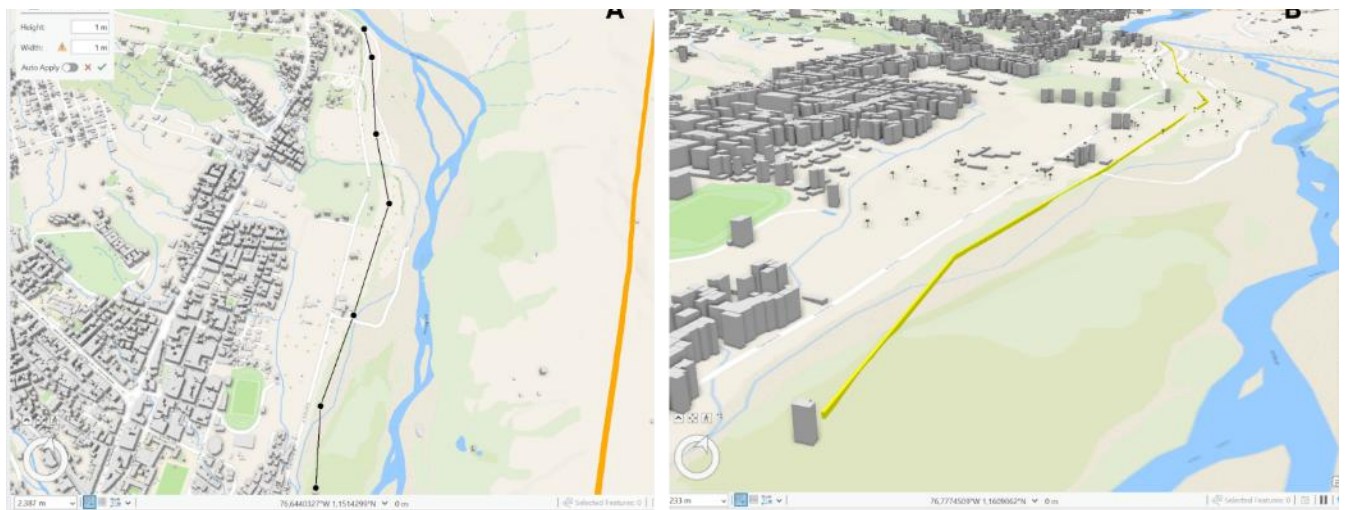
Aquí también se define la duración y tasa de precipitación, tomando como referencia los datos presentados en el informe de CEPEI, donde se indica que “En la ciudad de Mocoa, entre la noche del viernes 31 de marzo y la madrugada del 1 de abril de 2017, se presentó una precipitación de 130 milímetros, equivalente al 30% de la precipitación mensual, lo que desencadenó la creciente del río Mocoa y sus dos afluentes Sangoyaco y Mulato”(CEPEI, 2020). Es decir que, para la simulación del escenario correspondiente a la inundación, se asigna una precipitación de 130mm con una duración de 3 horas, entre las 10pm y la 1am.

Figura 13. Otras configuraciones, tamaño de la celda, duración, precipitación y elementos adicionales



En este punto también se pueden incluir elementos como canales, fuentes de agua y barreras, que para el escenario inicial no se agregan, pero basta con volver a la configuración y agregarlos para generar un nuevo escenario con diferentes características. Esto hace que sea una herramienta muy versátil que permite evaluar múltiples escenarios con pequeños ajustes y en tiempos muy cortos que por supuesto dependen del área de estudio y de las características del hardware donde ese ejecute. (ESRI, 2024)

Figura 14. A) Dibujo de barrera, B) Barrera finalizada en la simulación.

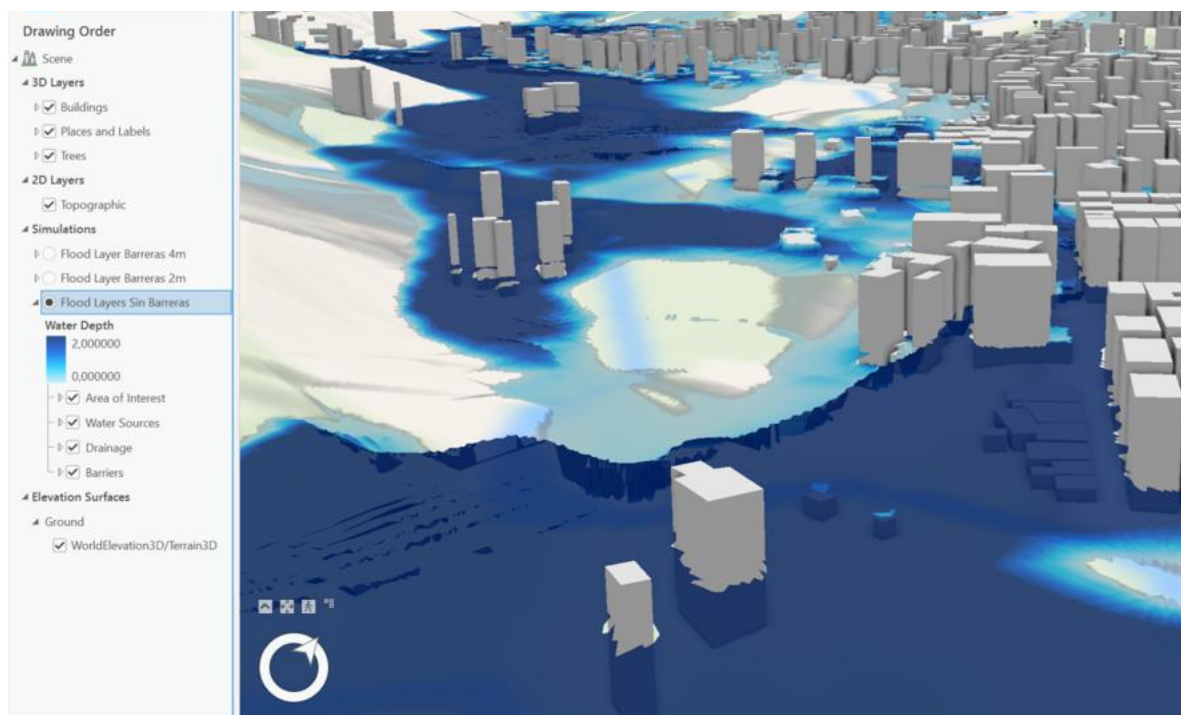


3. Extracción de alturas del mapa: Al ejecutar la simulación, se genera un mapa de elevación, es decir, una malla texturizada que almacena los valores de altura del terreno, es decir, del DEM. Esta malla se utilizará para proporcionar los valores de elevación de la GPU al ejecutar el análisis. (ESRI, 2024)

3. Simulación de flujo: En este paso el software asigna los valores de inicialización del agua sobre la superficie y posterior a ello se generan las iteraciones que permiten

simular el flujo a medida que se añade agua, ya sea mediante lluvia o fuentes de agua previamente definidas. Estas iteraciones se ejecutan por cada paso del tiempo hasta completar la duración total y se almacena en la memoria caché lo que permite una navegación e interacción rápida con los resultados, convirtiéndose en un mapa interactivo de inundación en 3D. Basta con volver a la configuración, ajustar algunos parámetros y visualizar un nuevo escenario, el mapa 3d además soporta varias simulaciones lo que permite comparar escenarios. (ESRI, 2024)

Figura 15. Visualización de la Simulación de flujo



- 4. Exportar resultados:** Una vez se han generado los escenarios de inundación, se exportan los resultados como datos SIG para otros flujos de trabajo, como la creación de mapas, generación de gráficos e informes o para el intercambio de resultados. Los formatos de exportación incluyen el formato multidimensional ráster (CRF) o el formato TIFF. El uso del formato CRF permite la generación de servicios que pueden ser incluidos en mapas web y por tanto en aplicaciones interactivas para compartir los resultados con las partes interesadas. Además del formato también se eligen las variables a exportar: profundidad, elevación absoluta o velocidad del agua, así como los pasos de tiempo de interés.(ESRI, 2024)

Figura 16. Configuración para exportar resultados

Export Simulation Flood Layers Sin Barreras

File

Name Prefix
Flood Layers Sin Barreras

Location
C:\Users\rudy.moreno\OneDrive - IDOM Cons

Vertical Units
Meter

Format
CRF

Start Time
20/07/2025 8:00:00 p. m.

Water Levels

Choose the flood simulation analysis results to export

<input checked="" type="checkbox"/> Include	Flood Simulation Values
<input checked="" type="checkbox"/>	Water Depth
<input checked="" type="checkbox"/>	Water Absolute Height
<input checked="" type="checkbox"/>	Water Velocity

Set the interval of the export

Using the layer's cache interval

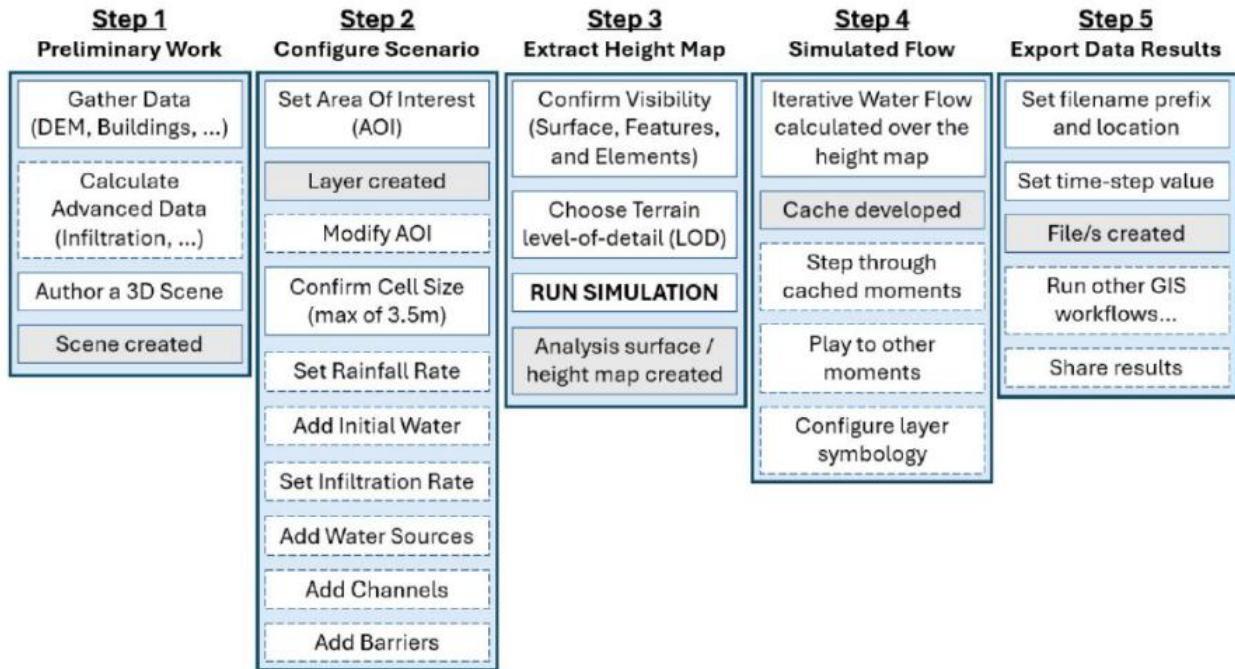
Number of iterations
10

Time step
0,5 Hours

Include the simulation initial state

En la siguiente figura se resumen el proceso de simulación aquí descrito.

Figura 17. Descripción general de todo el proceso de simulación de inundaciones en ArcGIS Pro



Nota. Fuente (ESRI, 2024)

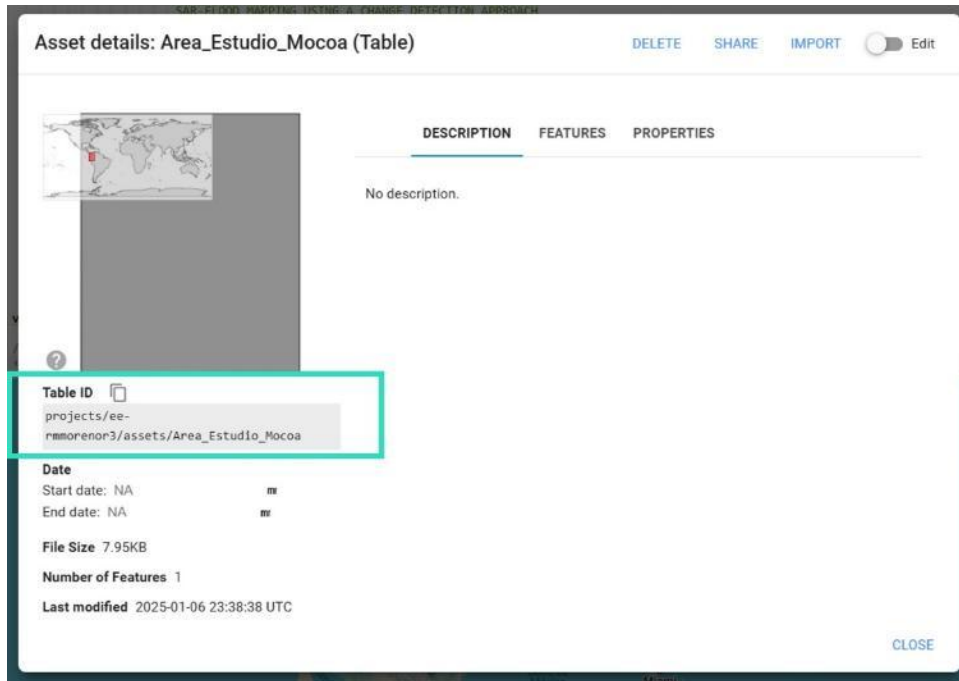
6.3.2 Detección de áreas inundadas en Google Earth Engine

La segunda parte del trabajo de grado corresponde a la aplicación del procedimiento de las Naciones Unidas “*Step-by-Step: Recommended Practice: Flood Mapping and Damage Assessment Using Sentinel-1 SAR Data in Google Earth Engine*” que tiene como objetivo la generación de un mapa de extensión de la inundación para la evaluación de las zonas afectadas, con enfoque de detección de cambios en los datos Sentinel-1 (SAR).

Este código ya se encuentra estructurado de tal manera que las únicas variables que se deben modificar son el área de estudio, el periodo de tiempo de interés para las imágenes de radar y por último los parámetros específicos de las imágenes como el tipo de polarización y la dirección, estas variables hacen referencia a la forma en la que el satélite captura la información.

- 1. Selección del área de estudio:** Cargar el área de estudio, esta se puede dibujar directamente en la herramienta o se puede cargar como un shapefile en formato ZIP.

Figura 18. Cargar área de estudio en GEE



Una vez ha sido cargada el área de estudio dentro de los Assets en GEE esta se importa al Script en el editor de código

Figura 19. Importar el área de estudio como geometría dentro del código.

```

change_Mocoa
Get Link Save
9
10 .....
11
12 .....
13 ..... RUN A DEMO (optional) .....
14
15 If you would like to run an example of mapping a flood extent you can use the predefined
16 geometry below as well as the other predefined parameter settings. The code will take you
17 to Beira, Mosambique where a cyclone caused a large coastal flooding in March 2019,
18 affecting more than 200.000 people.
19
20 --> Remove the comment-symbol (//) below so Earth Engine recognizes the polygon.*/
21
22 var geometry = ee.FeatureCollection('projects/ee-rmmorenor3/assets/Area_Estudio_Mocoa');
23
24 /* Now hit Run to start the demo!
25 Do not forget to delete/outcomment this geometry before creating a new one!
26 .....
27
    
```

2. Selección del marco de tiempo y parámetros del sensor: Además del área de interés se debe definir el rango de tiempo para las imágenes satelitales, antes y después del evento. En este caso se toma como rango de tiempo un año antes del 31 de Marzo del 2017 para las imágenes previas al evento (2016) y un año después (2018) para las imágenes posteriores al evento.

Figura 22. Instrucciones de la metodología

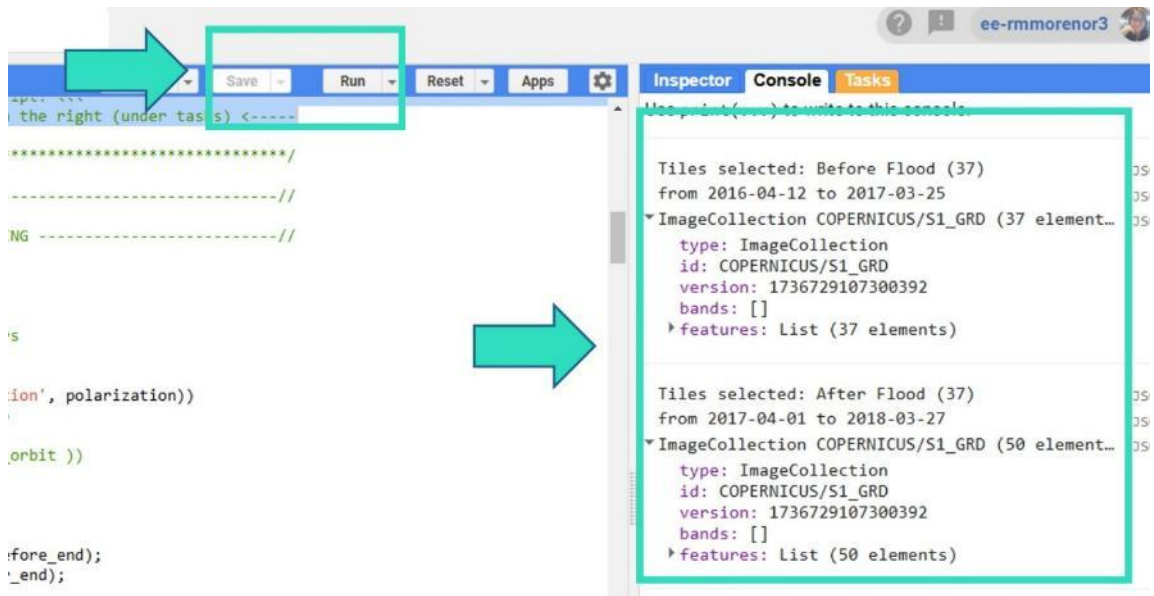
```

/*****
---->>> DO NOT EDIT THE SCRIPT PAST THIS POINT! (unless you know what you are doing) <<<---
----->>> now hit the 'RUN' at the top of the script! <<<-----
-----> The final flood product will be ready for download on the right (under tasks) <-----
*****/

```

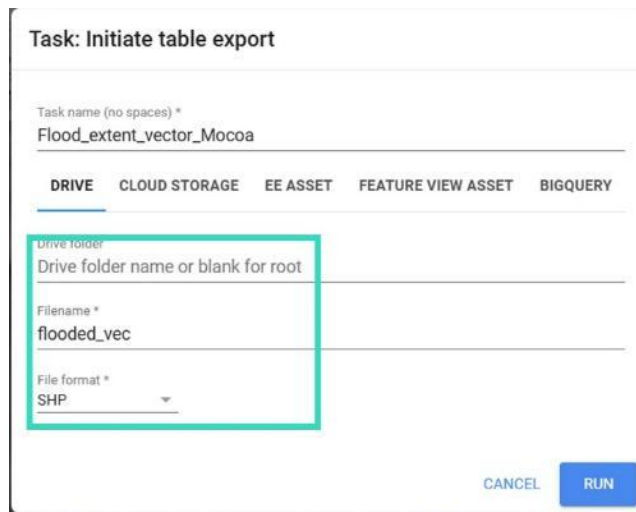
3. Ejecución del Script: Guardar los cambios y ejecutar el código. En el panel de la consola del costado derecho se indica la cantidad de imágenes encontradas para el rango de tiempo establecido.

Figura 23. Ejecutar el Script y visualizar resultados



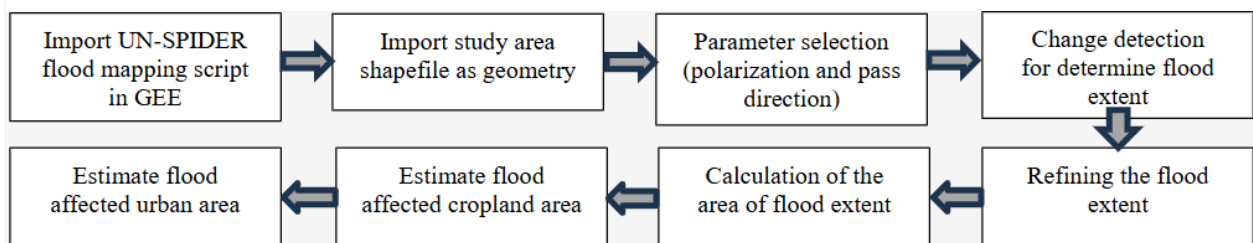
4. Exportar producto: El resultado del análisis de detección de cambios se exporta en formato GeoTIFF o en formato shapefile y se almacena directamente en la cuenta de Google utilizada para GEE.

Figura 24. *Exportar resultados*



El flujo de trabajo para este segundo procedimiento consiste de manera general en los pasos indicados en la siguiente figura.

Figura 25. *Flujo de trabajo para el mapeo de la extensión de la inundación.*

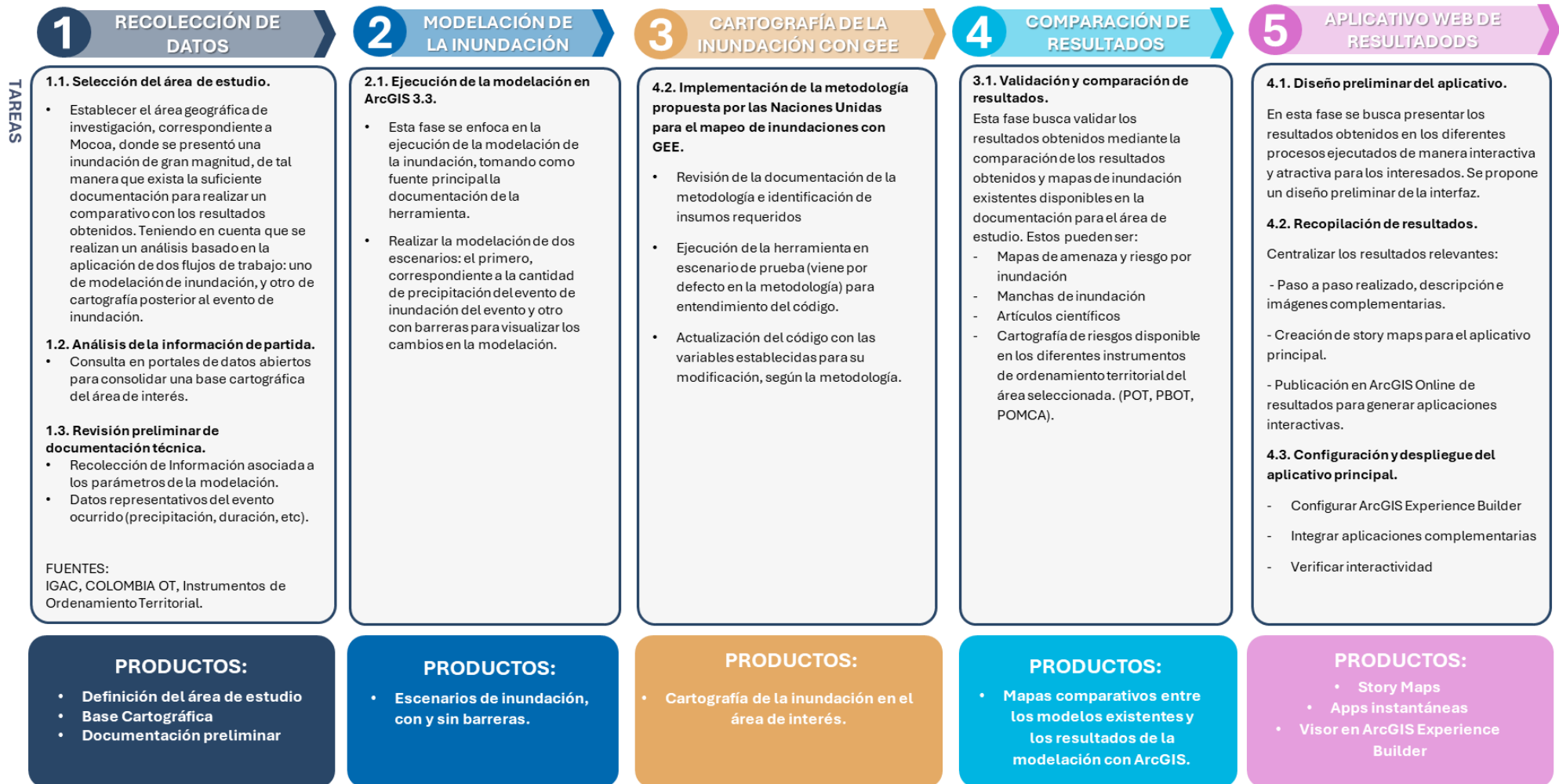


Nota. Fuente (Thammaboribal et al., 2025a)

6.3 Fases de desarrollo

A continuación se presentan las fases de desarrollo propuestas para este trabajo, una descripción de las tareas y/o actividades de cada fase y el producto correspondiente:

Figura 26. Fases de la Metodología



7 Resultados

7.1 Recolección de información:

Como punto de partida se hace la recolección de información base, esto incluye información cartográfica y bibliografía de diferentes fuentes, en la siguiente tabla se presenta el resumen de esta información indicando entidad, fuente, año, link web y descripción.

8

Tabla 3. Información base y complementaria para la modelación de inundación con ArcGIS

Entidad	Fuente	Año	Web
Base de datos vectorial básica. Departamento de Putumayo. Cabecera Municipal de Mocoa. Escala 1:1.000. Año 2021	Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, Colombia en mapas	2021	https://cutt.ly/nrzwDeaE
Ortoimagen. Departamento de Putumayo. Cabecera Municipal de Mocoa. Resolución 10 cm. Año 2021	Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, Colombia en mapas	2021	https://cutt.ly/xrzwDU4D
Modelo Digital de Terreno. Departamento de Putumayo. Cabecera Municipal de Mocoa. Resolución 1 m. Año 2021	Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, Colombia en mapas	2021	https://cutt.ly/5rzwFto0
Clasificación del suelo según POT	Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, Colombia en mapas	2023	https://cutt.ly/RrzwFGkB
PBOT Mocoa	Colombia OT		https://cutt.ly/MrzwF2wW
Caracterización territorial. Municipio de Mocoa, Putumayo	Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, Colombia en mapas	2020	https://cutt.ly/erzwGOiR
Geovisor Mocoa Antes y después	Corpoamazonía		https://www.geospaatial.com.co/mocoa/
Plan de Ordenamiento Territorial (2023-2036)	Alcaldía de Mocoa	(2023-2036)	https://cutt.ly/ErzwHr0z
Estudio de amenaza por inundación y avenida torrencial para identificar medidas de mitigación en la zona urbana de la ciudad de Mocoa	Universidad Nacional de Colombia	2024	https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/86325

Reconstruyendo Mocoa a través de los datos	Cepei		https://cutt.ly/lrzwHvdA
Análisis del desastre ocurrido en Mocoa (Colombia)	Universidad Javeriana		https://cutt.ly/lrzwHUBQ
Metodología para la microzonificación de riesgos frente a amenazas naturales: caso de estudio deslizamientos e inundaciones municipio de Mocoa departamento del Putumayo	Universidad Católica	2014	https://cutt.ly/lrzwKg30
Flood Simulation Workflow	Story Map - Esri	2024	https://cutt.ly/drzwKmtw
Flood Simulation	Documentación Esri		https://cutt.ly/6rzwKYwS

7.2 Resultados modelación de inundación con ArcGIS

7.2.1 Modelación de inundación

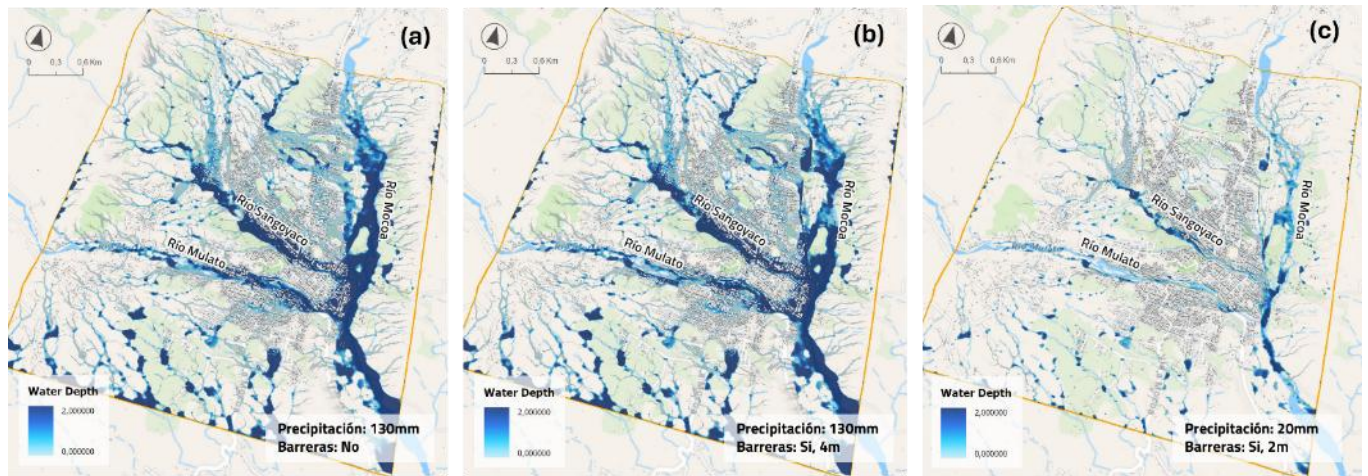
Como se mencionó en apartados anteriores ArcGIS permite una rápida modelación de diferentes escenarios con el ajuste de algunos parámetros de entrada. Se realizaron diferentes configuraciones para obtener resultados de 3 escenarios representativos, que se indican a continuación:

- a) *Precipitación de 130mm en un periodo de 3 horas.* Representa las características del evento ocurrido la noche del 31 de marzo (CEPEI, 2020).
- b) *Precipitación de 130mm con barreras de 4m de altura, en un periodo de 3 horas.* Representa la versatilidad para incluir barreras en diferentes puntos, modificando su trazado y dimensiones para visualizar los cambios en el comportamiento del flujo.
- c) *Precipitación de 20mm con barreras de 2m.* Representa un escenario de lluvia típico, según los datos registrados por las estaciones meteorológicas, las precipitaciones se encuentran principalmente en el rango de 0 a 35mm. (*Análisis del desastre ocurrido en Mocoa (Colombia)**, s. f.)

Se recopila y presenta una serie de mapas en 3D desde diferentes ángulos para los 3 escenarios propuestos, lo que permite realizar análisis visuales de las manchas de inundación obtenidas, evidenciando que la precipitación que corresponde al escenario de la inundación genera una

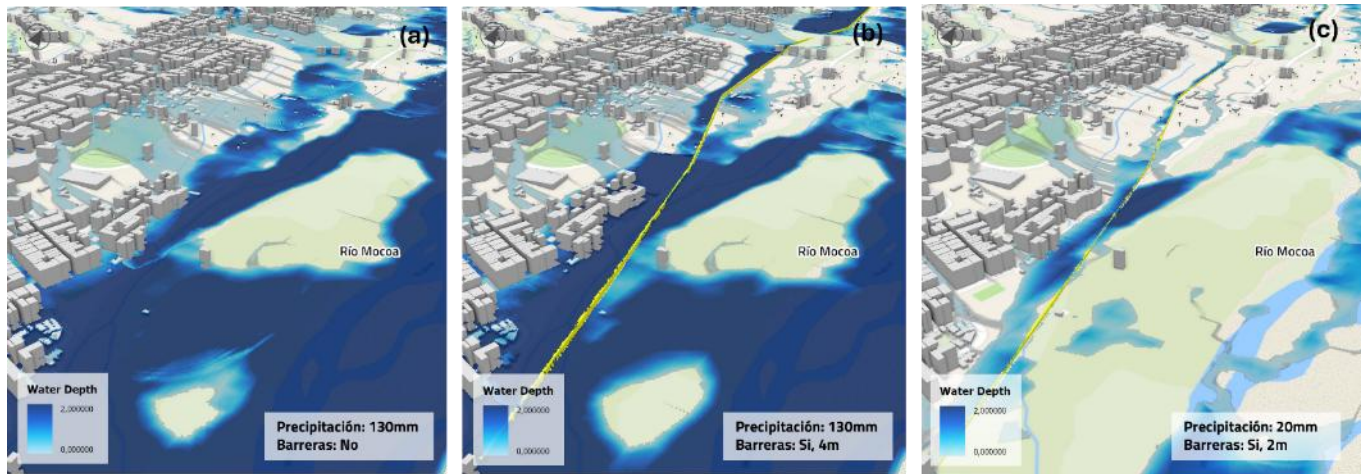
mancha considerablemente grande (a), comparada con el escenario típico de lluvia (c), y también que el escenario con barreras no modifica significativamente el flujo (b), pues su magnitud es tal que posiblemente ninguna infraestructura hubiese tenido la capacidad de contener un flujo de estas características.

Figura 27. Vista general 3d de los diferentes escenarios de modelación.



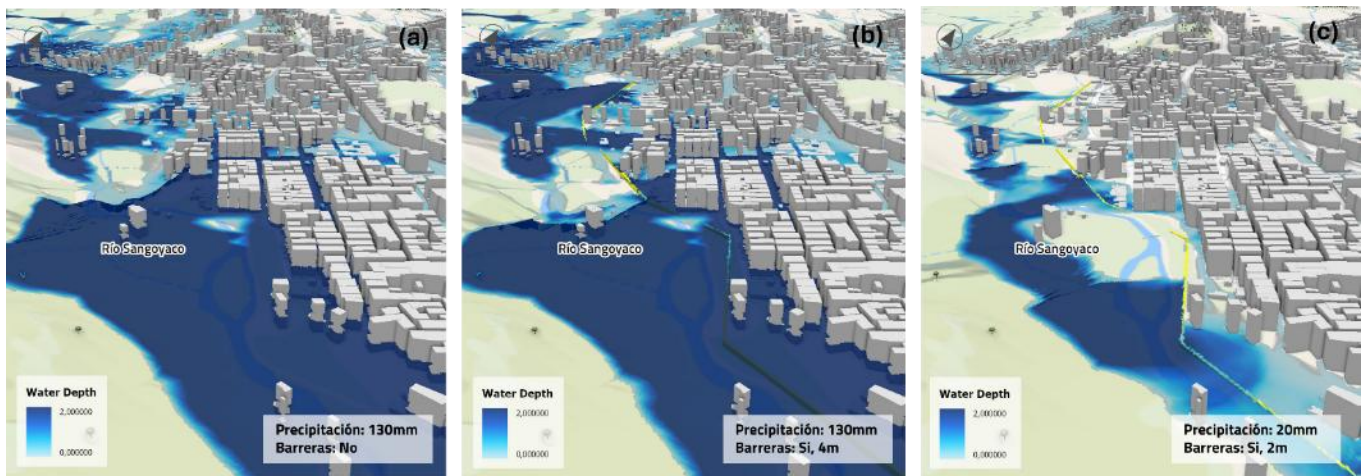
En el río Mocoa ubicado al costado occidental del casco urbano se observa que el flujo alcanza las viviendas (a), sin embargo, esto no se puede controlar completamente mediante barreras físicas ya que hacia el costado izquierdo del muro se empieza a acumular el agua que viene de la ladera hacia el río, generando concentraciones de agua que no tienen salida al río (b), en el escenario recurrente de precipitación las barreras de menores dimensiones también generan acumulación del flujo de la ladera, pero en menor magnitud.

Figura 28. *Detalle modelación de inundación para un tramo del Río Mocoa*



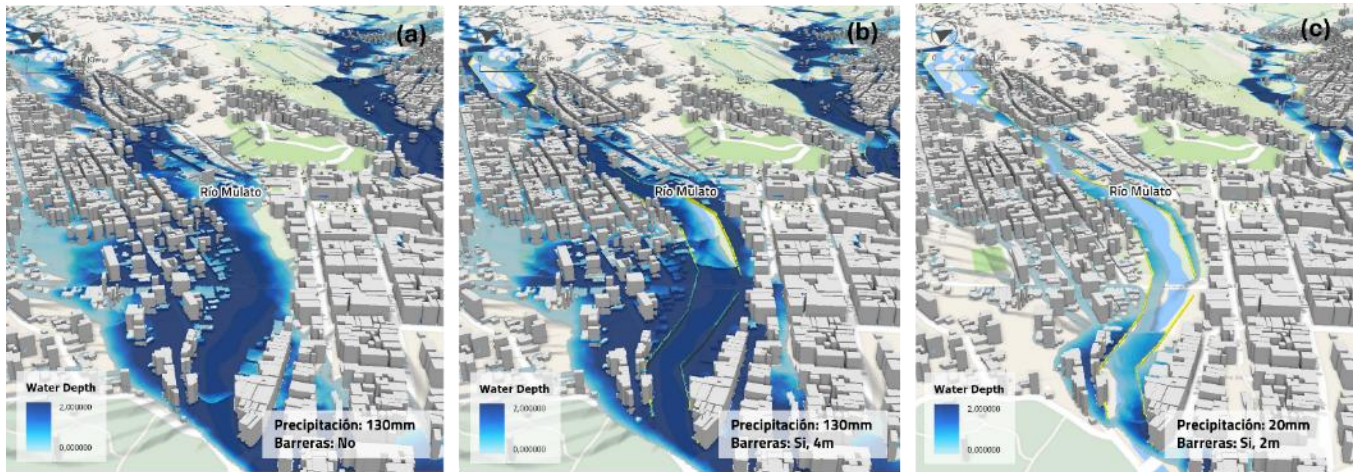
En el Río Sangoyaco se observa que el volumen de agua alcanza las viviendas con profundidades de 2m (a), a pesar de que se simula un escenario con barreras de 4m esta tampoco contiene el flujo (b)., pero en el escenario de menor magnitud una barrera de 2m redirecciona el flujo protegiendo las viviendas de este sector (c).

Figura 29. *Detalle modelación de inundación para un tramo del Río Sangoyaco*



En el costado occidental del río mulato se observa la mayor afectación de viviendas (a), para el escenario con barreras se ubicaron de tal manera que se creara una especie de canal de drenaje que funciona parcialmente aguas arriba, pero en la parte ubicada aguas abajo igual se aprecia afectación (b), por otro lado, el escenario típico de lluvia con un muro de contención de 2m presenta un mejor desempeño en el redireccionamiento del flujo.

Figura 30. *Detalle modelación de inundación para un tramo del Río Mulato*



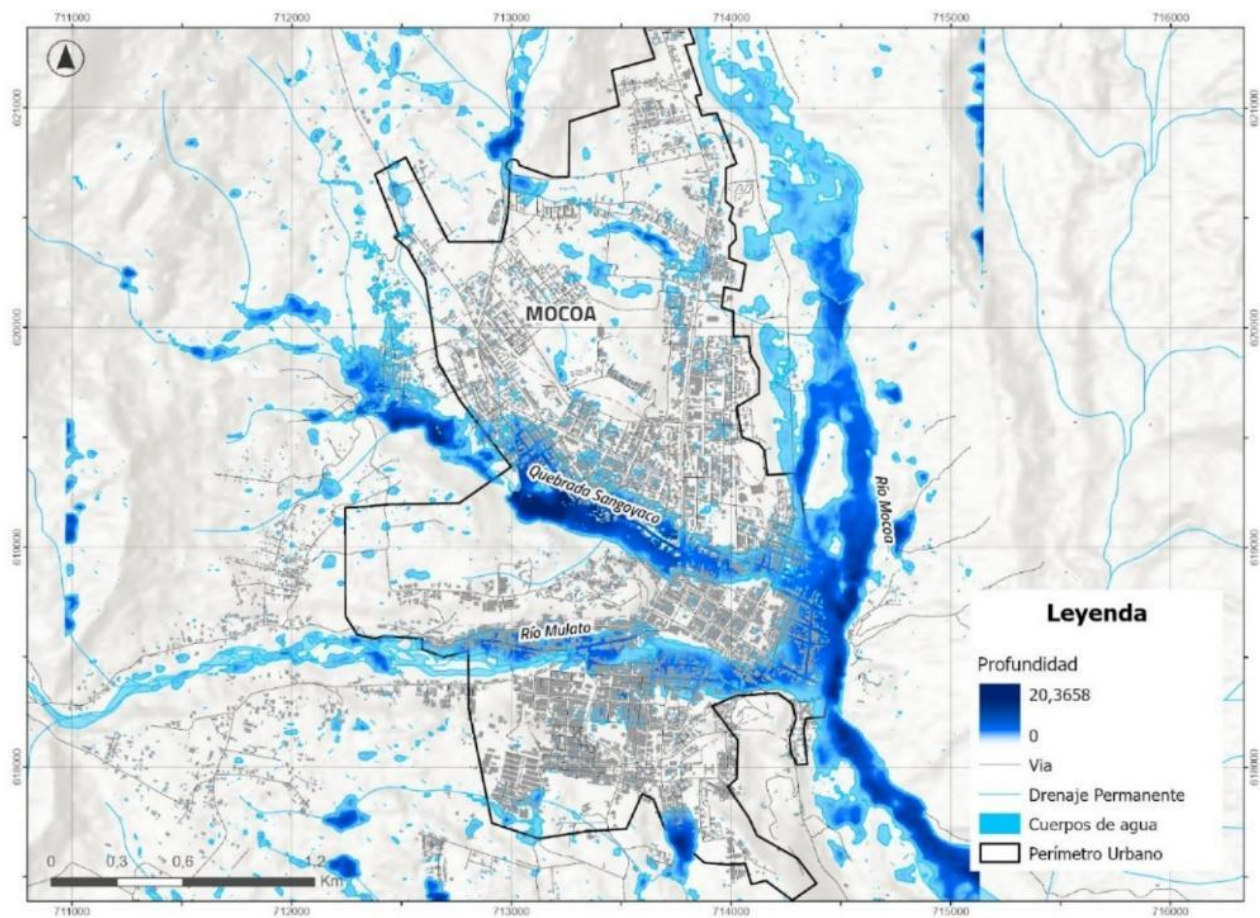
El tiempo aproximado de modelación para cada uno de estos escenarios fue de aproximadamente 40 minutos en un computador con procesador Intel core i7 y 16 GB de memoria RAM. Es decir que, con una dedicación de aproximadamente 3 horas se obtuvieron resultados que permiten evaluar el posible comportamiento del flujo probando diferentes valores de precipitación y diferentes dimensiones (ancho y alto) de las barreras de protección.

Se resalta la facilidad de implementación de la herramienta para cualquier profesional SIG, ya que no requiere ningún insumo de entrada para la ejecución de una modelación preliminar, pero además permite incluir información de detalle (DEM, infiltración, evaporación, etc.) cuando se cuente con ella, así como el ajuste de la resolución del tamaño de celda para que el análisis sea más preciso, esto por supuesto implicará mayor tiempo de cómputo. En ambos caminos se generan insumos de valor como los presentados aquí mediante cartografía 3D que permite una inmersión y entendimiento más clara de la topografía y los elementos involucrados, facilitando el dimensionamiento de eventos de inundación y la identificación de puntos críticos que requieran la priorización de intervenciones por parte de las instituciones oficiales.

7.2.2 Comparación de resultados del escenario 1 con mapas existentes

Se presenta la mancha de inundación obtenida para el escenario de inundación (a), en un mapa 2D, que permite comparar su magnitud con áreas de inundación previamente identificadas en diferentes instrumentos de ordenamiento territorial de Mocoa.

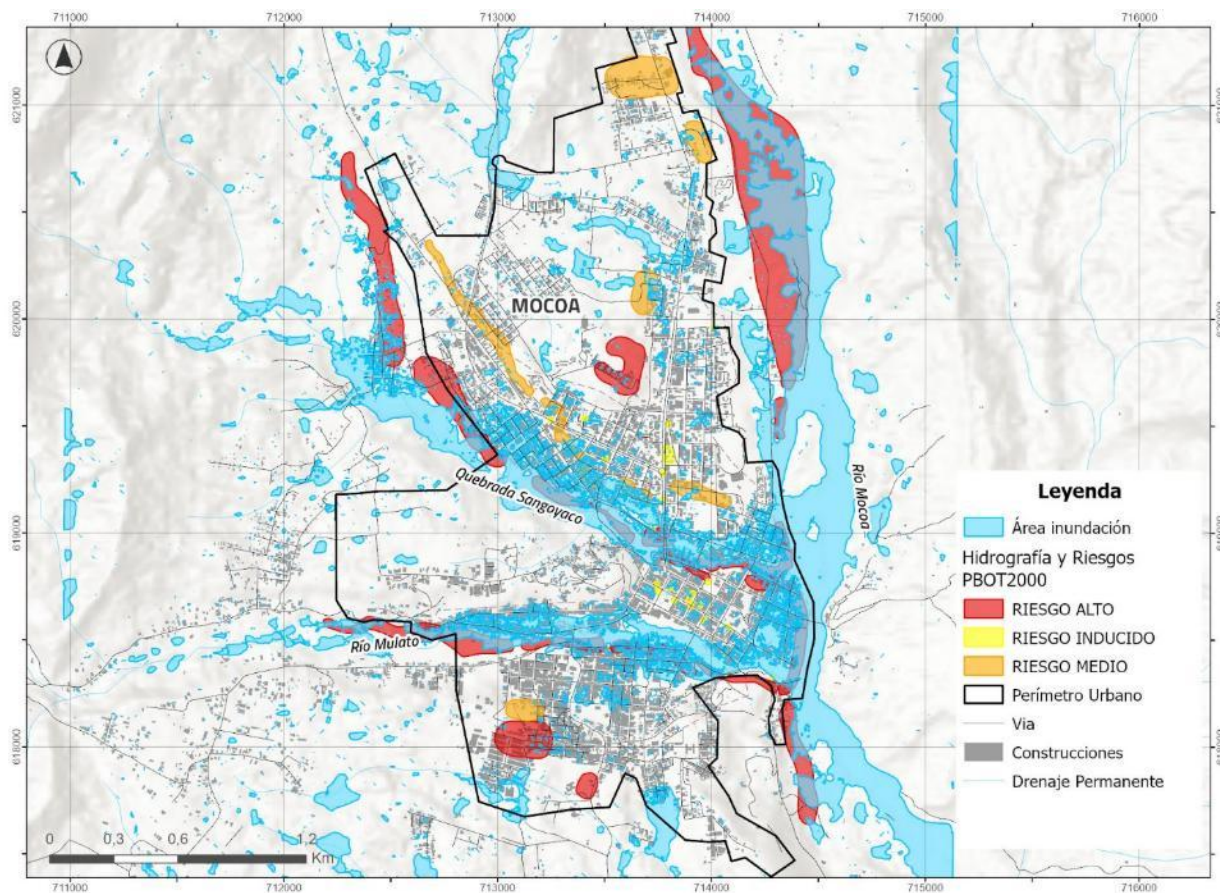
Figura 31. Área de inundación obtenida con la herramienta de simulación de flujo de ArcGIS para Mocoa.



7.2.2.1. Área inundación de ArcGIS vs. Riesgo PBOT2000.

En el PBOT del año 2000 se generó un mapa que contiene las áreas de riesgo asociadas a la Hidrografía y Riesgos de Mocoa, categorizando el riesgo en alto, medio y bajo. Con la superposición del área de inundación obtenida en ArcGIS sobre dicha clasificación, se observa una coincidencia marcada en las áreas de proximidad a los ríos Mocoa, Sangoyaco y Mulato.

Figura 32. Área de inundación de la modelación con ArcGIS sobrepuesta a las áreas de Hidrografía y Riesgos del PBOT2000.



Aprovechando la disponibilidad en formato digital de la cartografía del PBOT2000 se cuantifica el área coincidente entre el área de inundación obtenida con ArcGIS y las áreas de Hidrografía y Riesgos del PBOT. Encontrando una equivalencia del 40,4% para el riesgo alto, del 10,3% para el riesgo inducido y del 6,2 para el riesgo medio.

Teniendo en cuenta que el recurso del PBOT es del año 2000 y que al día de hoy han pasado 25 años de evolución tanto en la modelación de inundaciones como en la cartografía de riesgos, se considera que el 40% de coincidencia para el riesgo alto es un número significativo que valida el aporte de los resultados generados mediante la modelación de flujo de inundación en ArcGIS.

Figura 33. Intersección entre el área de inundación de ArcGIS y el área de riesgo de inundación del PBOT.

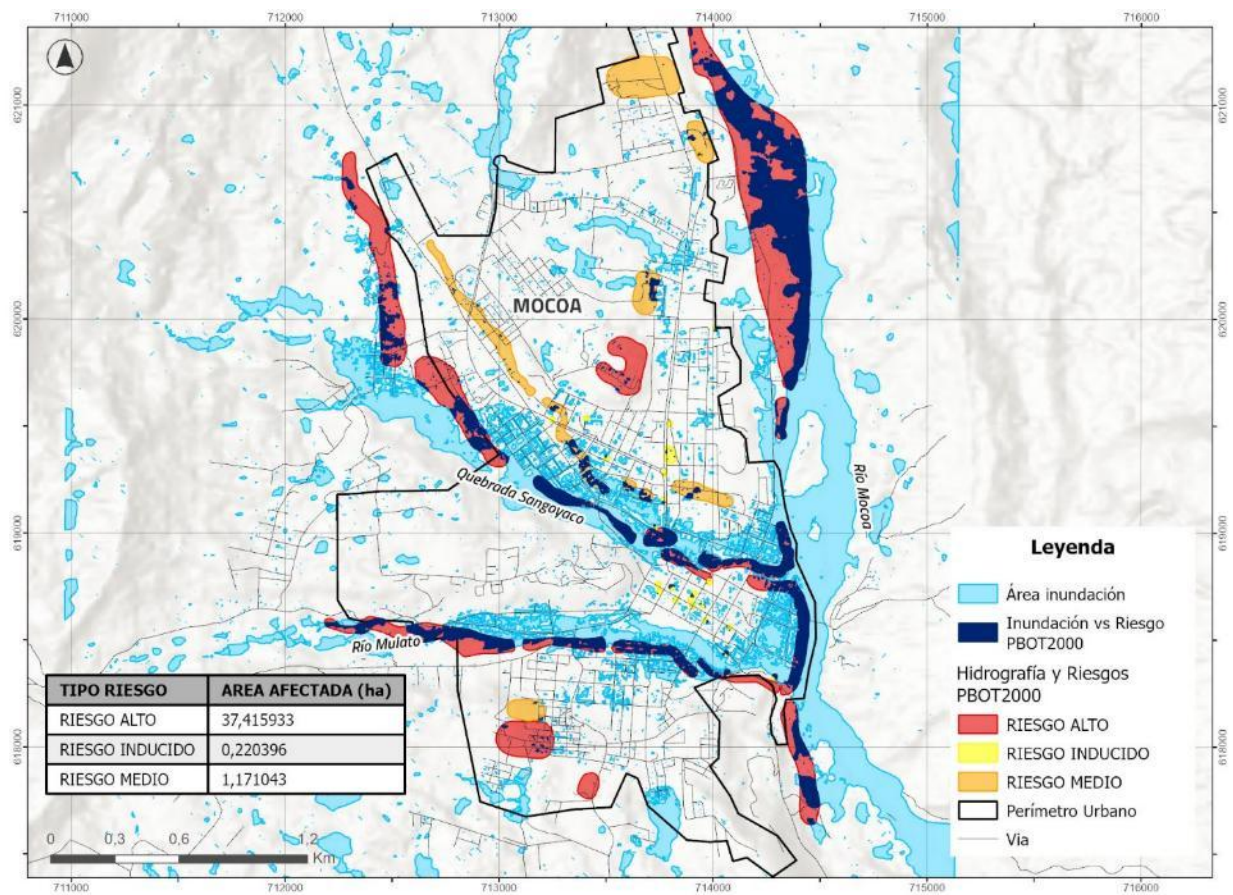


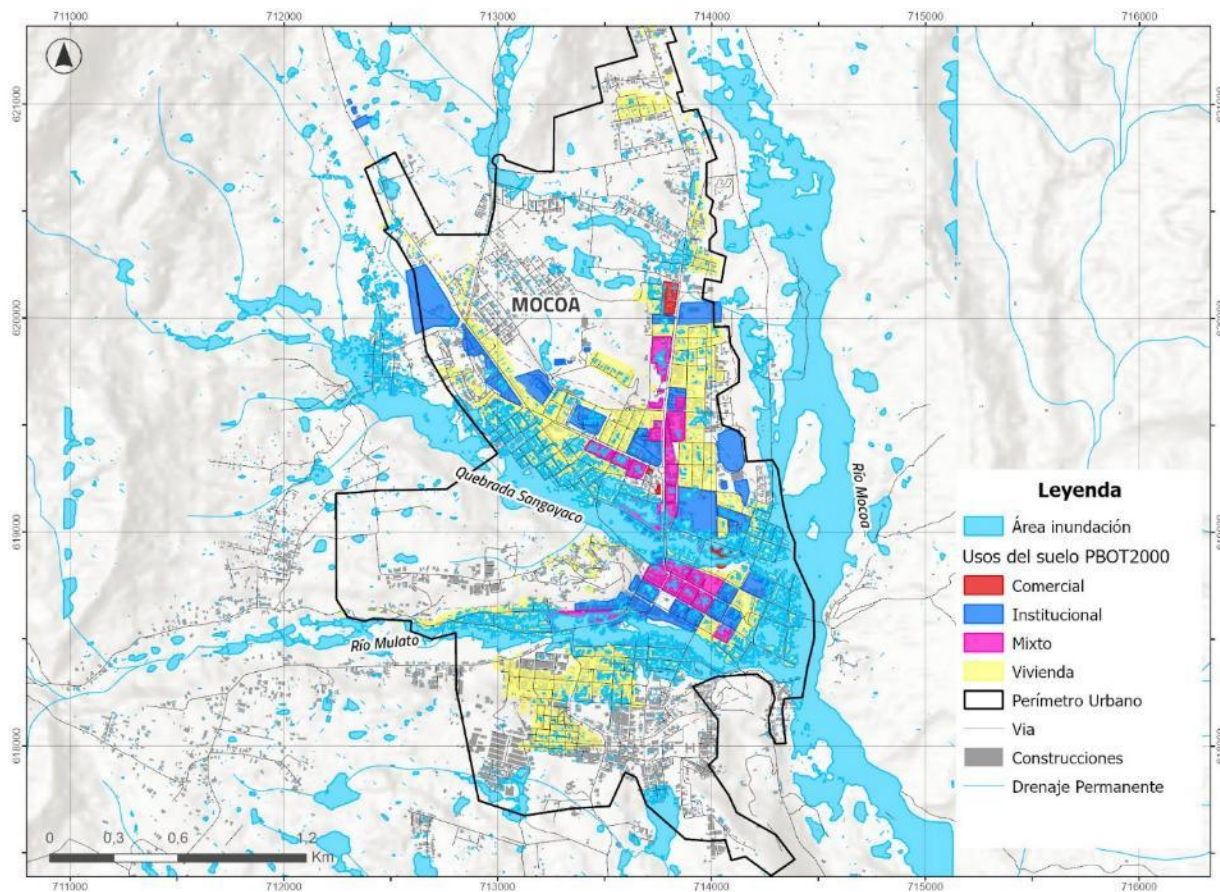
Tabla 4. Porcentaje de coincidencia entre las áreas de inundación de ArcGIS y del PBOT.

TIPO RIESGO	AREA TOTAL (HA)	AREA AFECTADA (HA)	PORCENTAJE (%)
RIESGO ALTO	92,5	37,4	40,4
RIESGO INDUCIDO	2,1	0,2	10,3
RIESGO MEDIO	18,9	1,2	6,2

7.2.2.2. Área inundación de ArcGIS vs. Usos del suelo PBOT2000.

La sobreposición de una mancha de inundación con los usos del suelo permite verificar o anticipar la posible afectación a tipos de estructura específicos, dimensionando de forma preliminar los daños asociados a un evento de inundación.

Tabla 5. Área de inundación de la modelación con ArcGIS sobrepuesta a las áreas de Usos de suelo del PBOT2000.



En esta comparación se encuentra que, el porcentaje de afectación más alto corresponde al uso comercial con un 36,6%, seguido de la afectación a los usos de vivienda con un 23,3% y el uso mixto con un 21,3% y finalmente un 13,1% de uso institucional.

Figura 34. Intersección entre el área de inundación de ArcGIS y usos del suelo del PBOT.

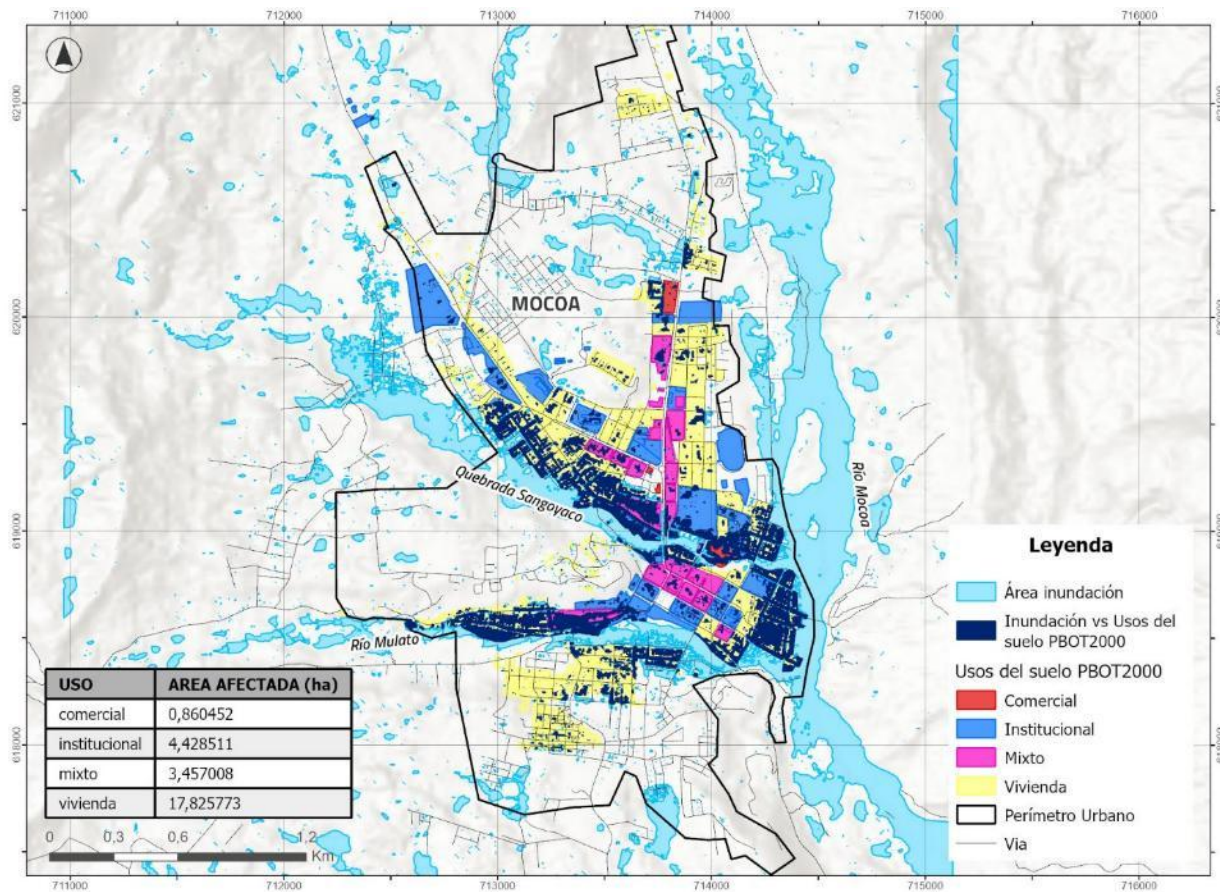


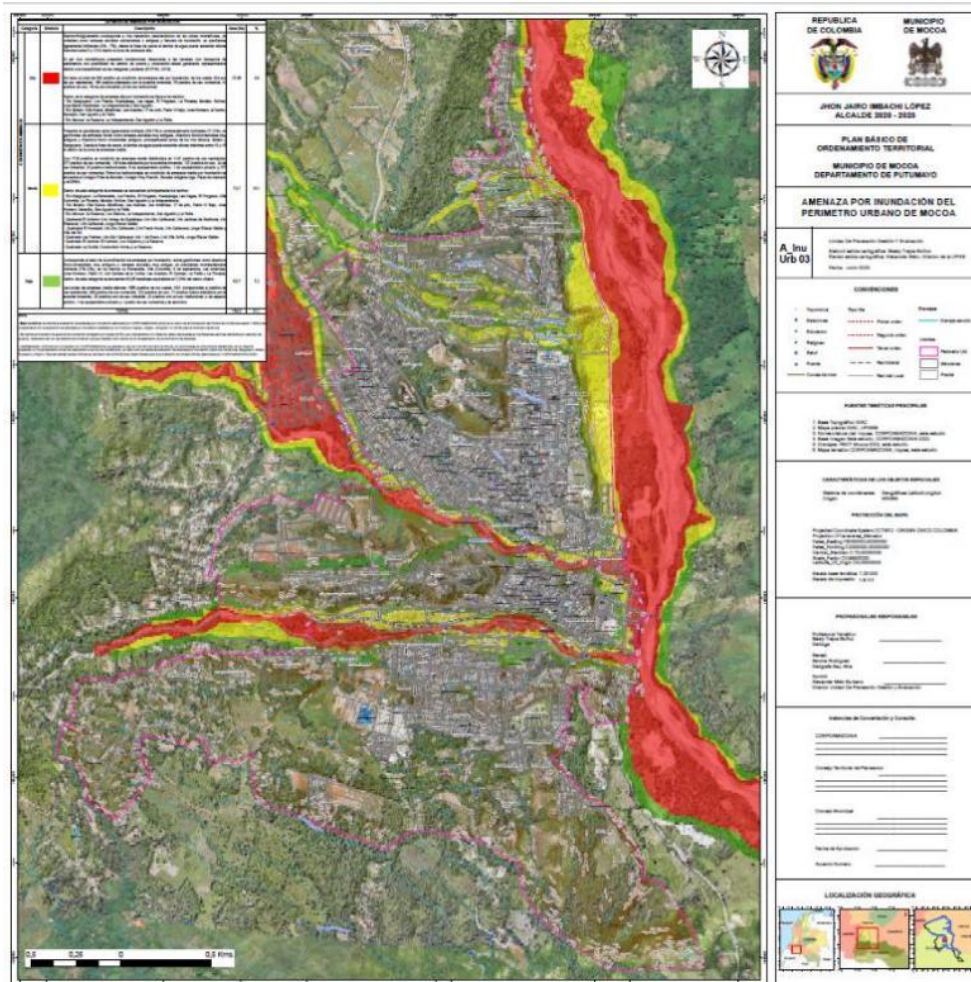
Tabla 6. Porcentaje de coincidencia entre las áreas de inundación de ArcGIS y usos del suelo del PBOT

TIPO USO	AREA TOTAL (HA)	AREA AFECTADA (HA)	PORCENTAJE (%)
COMERCIAL	2,4	0,9	36,3
INSTITUCIONAL	33,9	4,4	13,1
MIXTO	16,2	3,5	21,3
VIVIENDA	76,4	17,8	23,3

7.2.2.3. Área inundación de ArcGIS vs. Riesgo PBOT2000.

Dado que se cuenta con un mapa de Amenaza por Inundación del Perímetro Urbano de Mocoa que hace parte del Plan Básico de Ordenamiento Territorial del año 2023, se realiza la comparación entre los resultados de la simulación vs. la amenaza de inundación generada por este estudio detallado y actualizado, donde se representa en color rojo la amenaza Alta, en color amarillo la amenaza Media y en color verde la amenaza Baja.

Figura 35. Mapa de amenaza por inundación del perímetro de Mocoa - 2023

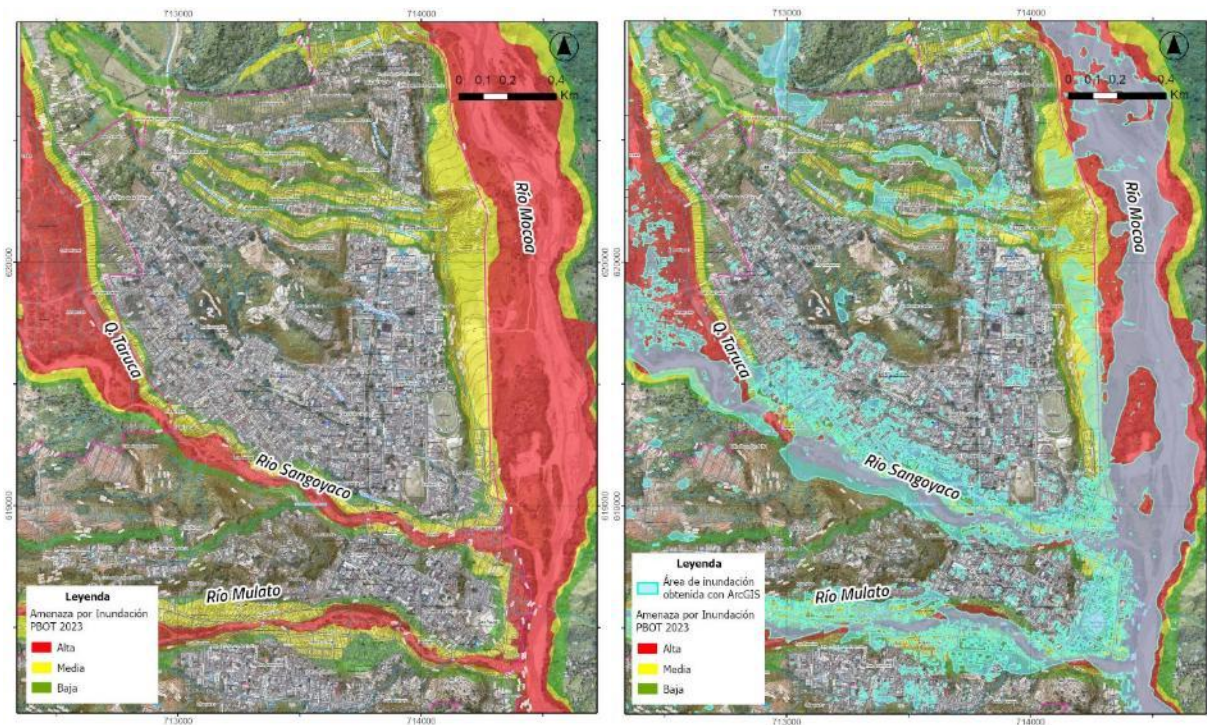


Nota: Fuente (Municipio de Mocoa, 2023)

En este caso no se dispone de la cartografía en formato digital por lo que el análisis es únicamente visual con la superposición de la mancha de inundación de ArcGIS en el mapa, donde se puede apreciar que cubre en un 70%-80% aproximadamente el área de amenaza alta, tanto en los ríos

Mocoa, Sangoyaco y Mulato, como en las quebradas intermedias: Q.El Arrimon, Q. El Huemedal y Q. Las Palmas.

Figura 36. Amenaza por inundación 2023 vs. Área de inundación ArcGIS.



Es posible concluir bajo esta serie de análisis comparativos que la modelación de inundación con ArcGIS es significativamente precisa y genera resultados de muy alto valor en poco tiempo y con pocos recursos. Se hace necesario que los profesionales SIG que estén involucrados en la gestión del riesgo conozcan estos flujos de trabajo, su alcance y limitaciones.

7.2.2.4. Cálculo afectación de viviendas

Finalmente, utilizando la capa de Construcciones se hace un cálculo del número de construcciones afectadas bajo el escenario de estudio, que corresponde a 3769 construcciones, de un total de 4267 construcciones dentro del perímetro urbano. Este es un número bajo, comparado con el número indicado por la UNGRD, que ha consolidado una cifra de casi 8.000 construcciones afectadas entre los años 1998 y 2021, como se indica en la *Figura 38*. (Municipio de Mocoa, 2023)

Figura 37. Viviendas afectadas en el área de inundación de ArcGIS

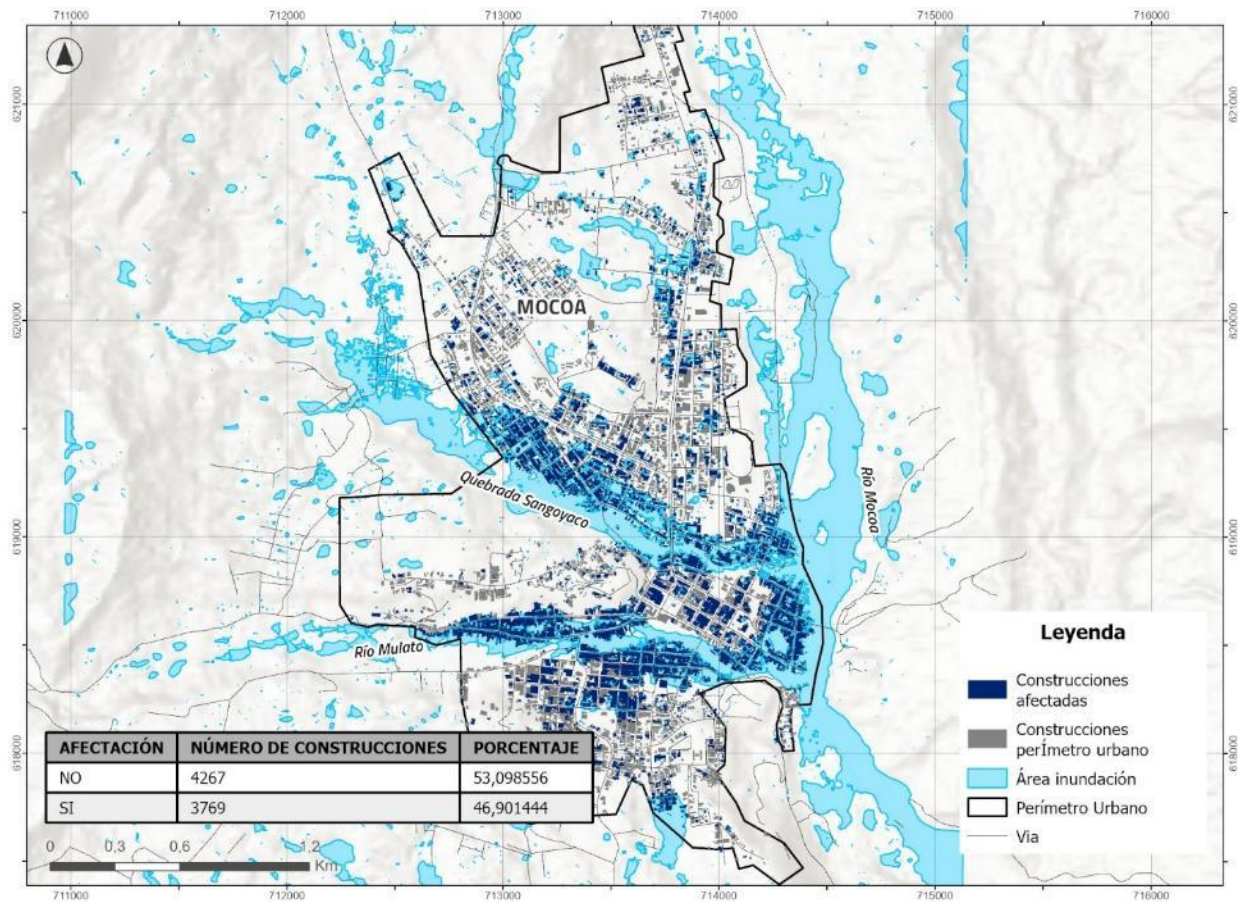


Figura 38. Familias afectadas por eventos naturales



Nota: Fuente (Municipio de Mocoa, 2023)

7.3 Resultados GEE

En el panel de resultados de GEE se indica que la extensión aproximada del flujo es de 80ha, sin embargo, no se presenta información del número de personas afectadas o el área urbana afectada. Esto se puede deber a que las fuentes de información utilizadas en la metodología propuesta por UN-SPIDER no se cuenta con información en el área geográfica de Colombia o con la suficiente resolución espacial, como se observa en la *Figura 40*, que corresponde a la fuente GHSL-Global Human Settlement Layer para Mocoa.

Figura 39. Resultados GEE

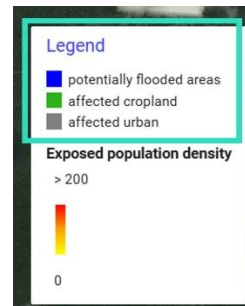
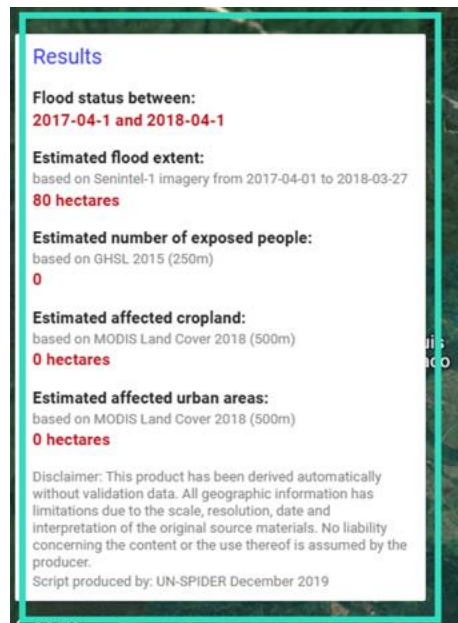
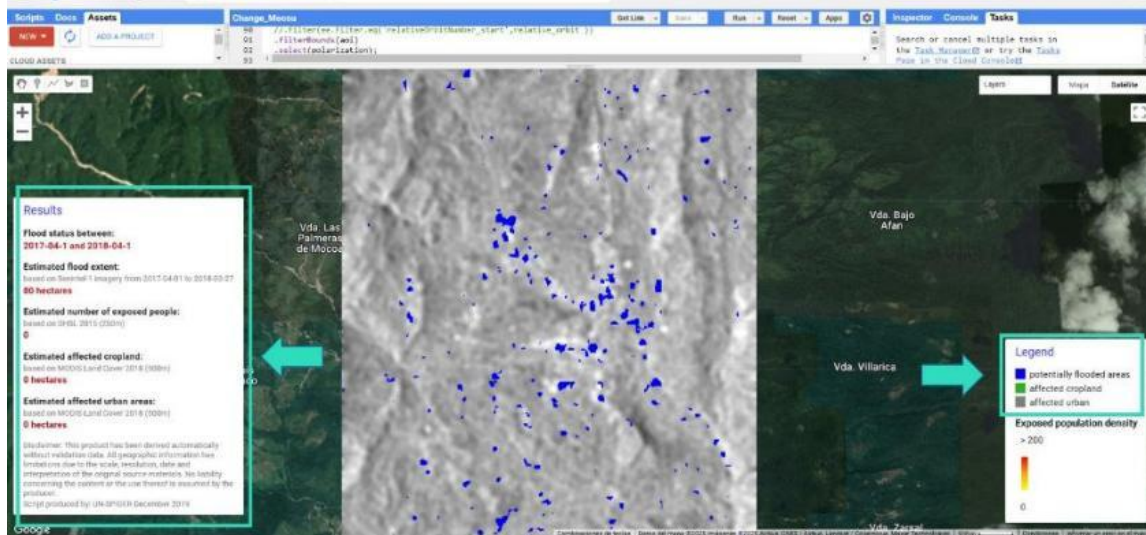
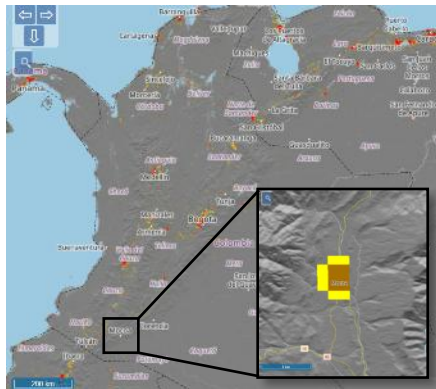


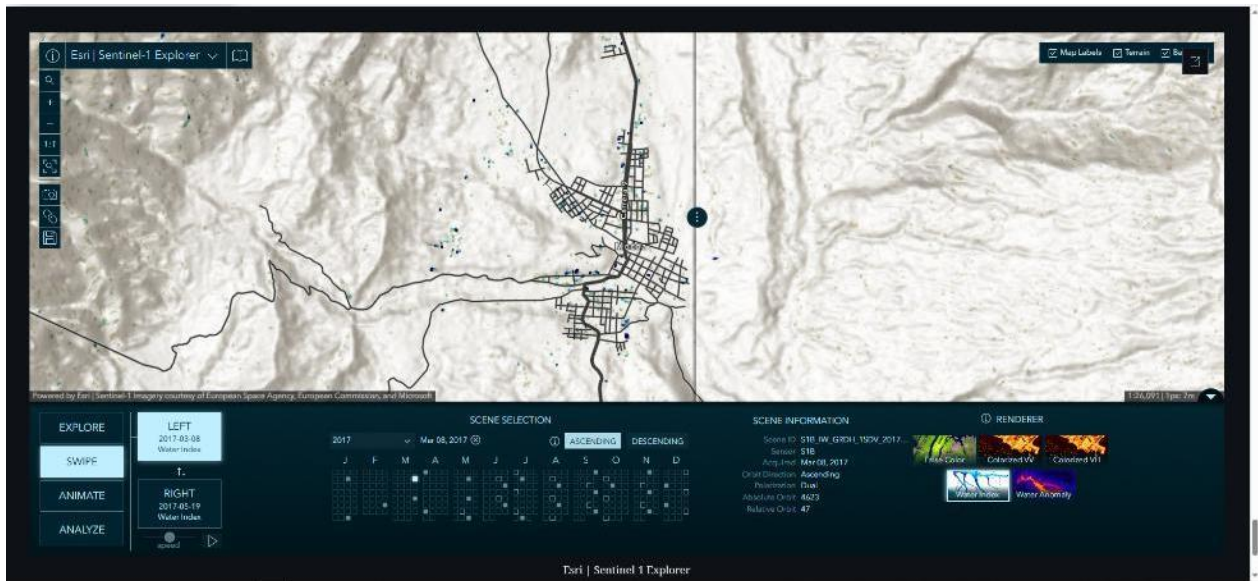
Figura 40. Datos abiertos sobre asentamientos humanos en todo el mundo (GHSL)



Nota: Fuente (Global Human Settlement - Visualisation - European Commission, s. f.)

Haciendo uso de la herramienta de Esri Sentinel-1 Explorer, se verifica mediante varias comparaciones de imágenes satelitales y ventanas temporales que las manchas obtenidas con la visualización del Índice de agua son similares a las obtenidas en GEE. (Anexo 1).

Figura 41. Visor Sentinel-1 Explorer

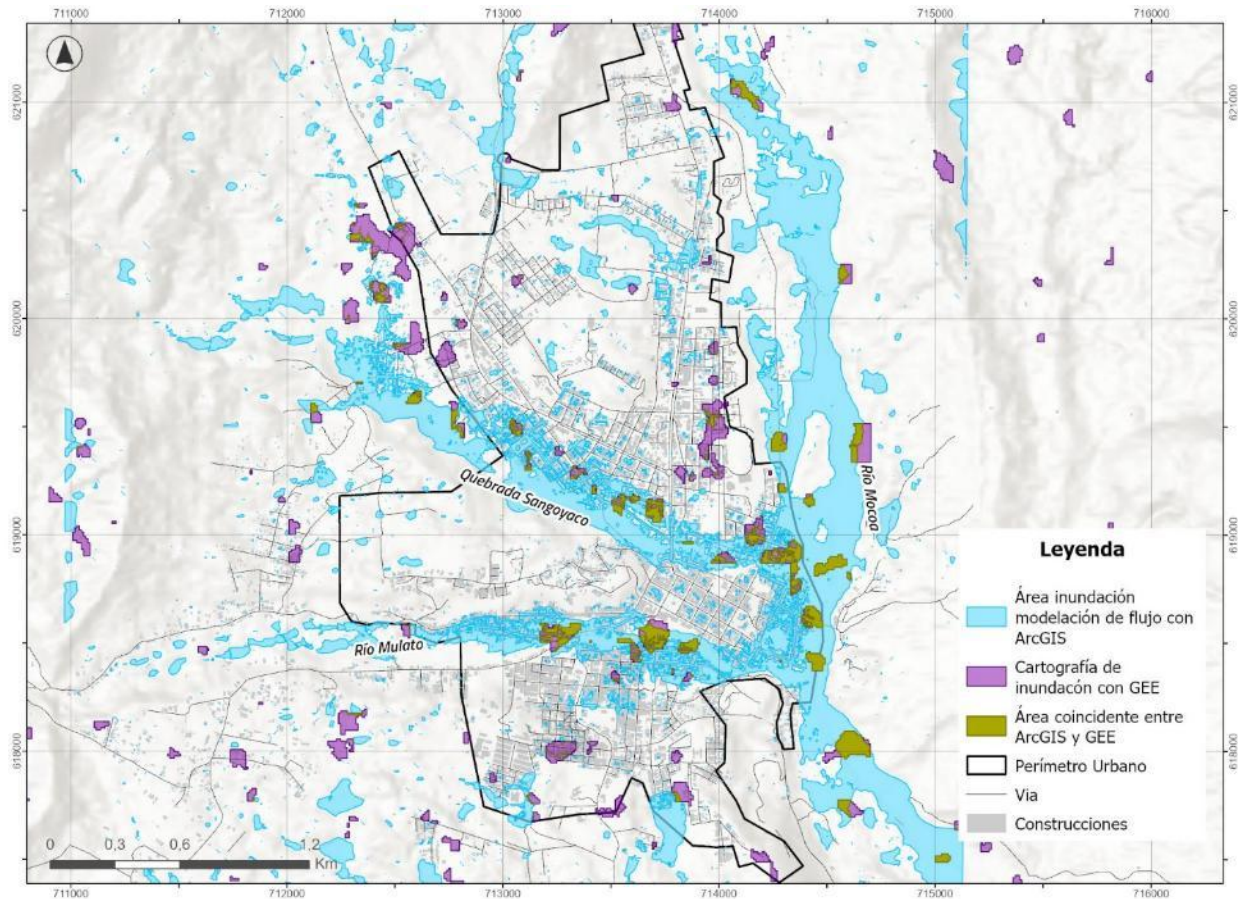


Nota. Fuente Link del visor con el swipe: <https://tinyurl.com/bddpbuch>

Se realiza un mapa comparativo entre las manchas de inundación de ArcGIS y GEE, donde se evidencia que la metodología de las Naciones Unidas si bien funciona para otras

áreas geográficas y otro tipo de inundaciones, en este caso aplicado a Mocoa no es representativa, ya que no logra mapear las zonas afectadas con exactitud aceptable, a pesar de que, si coinciden algunas áreas, así como la ubicación espacial de las mismas, relacionándose directamente a los cuerpos de agua.

Figura 42. Comparativo entre las áreas de inundación de ArcGIS y GEE.



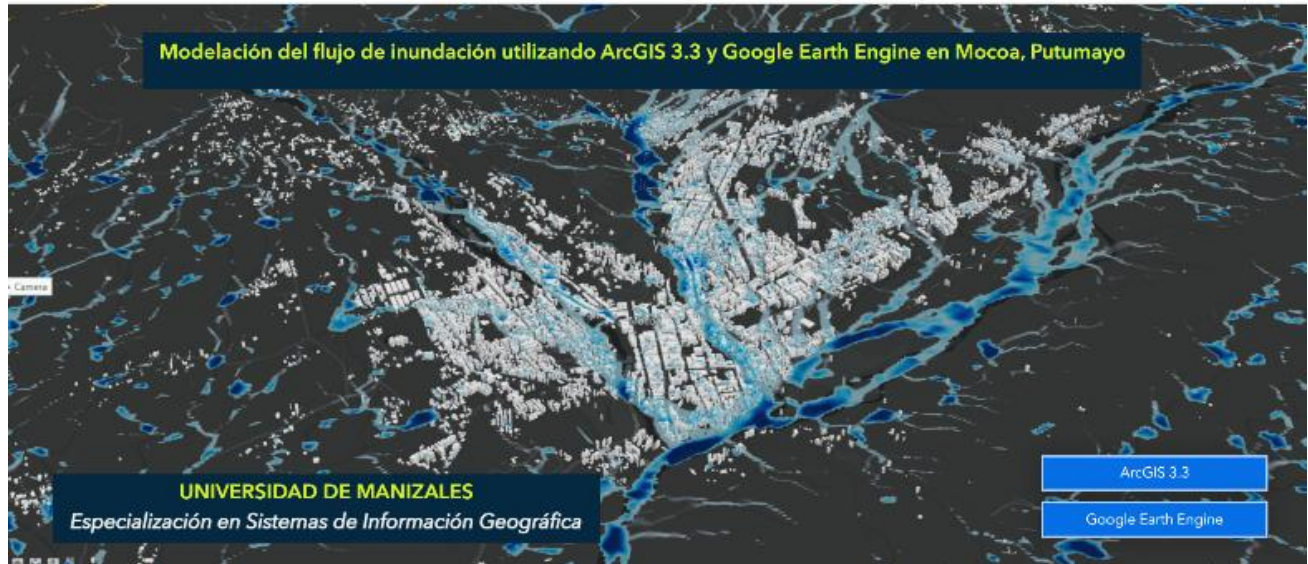
Otro factor a tener en cuenta son las características propias de la imagen, y al tipo de flujo presentado en Mocoa, ya que siendo una avenida torrencial la masa de agua presentaba también alto contenido de piedra y roca, por lo cual puede que no se detecte como agua propiamente, es decir, el índice espectral de este tipo de flujo probablemente es diferente al de una inundación lenta que en su mayoría contenga agua y no otro tipo de elementos.

7.4 Aplicativo en ArcGIS Experience Builder

Con el objetivo de presentar un paso a paso detallado e interactivo de los procesos aquí realizados se construye un aplicativo en ArcGIS Experience Builder, que centraliza varios Story Maps y estos

a su vez, contienen visores generados en Aplicaciones Instantáneas, datos ráster multitemporales, mapas interactivos y contenido multimedia como imágenes en formato JPG, convirtiéndose en un recurso para comunicar, centralizar y resumir información. En los anexos se encuentra el paso a paso para su navegación.

Figura 43. *Interfaz aplicativo ArcGIS Experience Builder.*



Enlace al aplicativo: <https://tinyurl.com/6utct2f7>

8 Discusión

Los resultados obtenidos en la modelación de flujo aplicando ArcGIS para el escenario del evento ocurrido en Mocoa el 31 de marzo del 2017, un evento considerablemente extremo fueron bastante acertados, como se demostró mediante el análisis y comparaciones realizadas con diferentes insumos de estudios anteriores. El área de inundación obtenida con ArcGIS es significativamente precisa y genera resultados de muy alto valor en poco tiempo y con pocos recursos.

A pesar de las ventajas que ofrece ArcGIS, la implementación de esta herramienta enfrenta varios desafíos en Colombia. Uno de los principales problemas es la calidad y disponibilidad de datos geoespaciales detallados y actualizados, especialmente en zonas rurales o en áreas con escaso monitoreo ambiental. Además, la capacitación de los profesionales en el uso de SIG sigue siendo insuficiente, lo que limita el potencial de estas herramientas en la práctica. Se hace necesario que los profesionales SIG que estén involucrados en la gestión del riesgo, en la planificación urbana, e incluso aquellos profesionales especializados en temáticas de hidrología e hidráulica conozcan estos flujos de trabajo, su alcance y limitaciones.

Existe una gran oportunidad para superar estos desafíos mediante la colaboración entre instituciones académicas, gubernamentales y privadas. La mejora en la calidad de los datos y la formación de capacidades en SIG pueden potenciar la efectividad de los modelos de inundación y su integración en las políticas públicas de gestión del riesgo de desastres y ordenamiento territorial.

En cuanto a GEE, aunque la metodología de UN-SPIDER ofrece una alternativa rápida y reproducible para la cartografía de inundaciones, la interpretación de imágenes satelitales se ve limitada por condiciones atmosféricas (cobertura de nubes) y resolución espectral, especialmente si no se cuenta con imágenes radar (Sentinel-1) sin interferencia. Además, esta metodología está basada en datos abiertos de cobertura global que no necesariamente cuentan con la mejor resolución temporal y espacial en América Latina, como se demostró con el área de inundación obtenida.

Los resultados del presente trabajo tienen aplicaciones directas en la planificación territorial y gestión del riesgo de desastres. Los mapas de áreas susceptibles a inundación pueden servir como base en etapas preliminares o de prefactibilidad de estudios técnicos para actualizar los planes de

ordenamiento territorial (POT) u otros instrumentos, en actividades como el diseño de zonas de protección ambiental, o para generar estrategias y priorizar recursos en el reasentamiento de comunidades vulnerables, cuando el riesgo es tan alto como lo era y sigue siendo en Mocoa.

Además, la integración de herramientas como ArcGIS y GEE demuestra que es posible implementar enfoques replicables y accesibles que combinan datos globales y análisis locales, facilitando el monitoreo de amenazas hidrometeorológicas en tiempo casi real, lo cual es de gran utilidad para las autoridades locales y organismos de protección civil.

Los resultados obtenidos en la modelación con ArcGIS son consistentes con investigaciones previas sobre la tragedia de Mocoa, donde se ha señalado la confluencia de múltiples quebradas, el desarrollo urbano en zonas inundables y la intensidad de la precipitación como factores clave. Aunque para el área de estudio seleccionada la aplicación del procedimiento UN-SPIDER no fue muy acertado, esta es una metodología que ha sido validada en otros eventos (como inundaciones en Mozambique o India), por lo que no se debe descartar su utilidad en otro tipo de inundaciones en la región en áreas como Chocó y Magdalena, entre otras.

9 Conclusiones

- La herramienta de simulación de inundaciones de ArcGIS está diseñada para que los usuarios SIG obtengan vistas preliminares de las diferentes condiciones de inundación soportadas por la herramienta en múltiples escenarios, es una herramienta sencilla pero potente que ofrecen grandes capacidades para su uso en aplicaciones como el geodiseño mediante la exploración rápida de alternativas de mitigación (canales, barreras), la identificación preliminar de zonas vulnerables y un insumo que permita tomar acciones en torno al ordenamiento territorial. Esta herramienta no pretende sustituir las herramientas y modelos de ingeniería y no debe usarse para reemplazar los estudios hidráulicos de detalle.
- Se requiere un hardware de características competentes para ejecutar la simulación de flujo en ArcGIS, en especial si el área de estudio es lo suficientemente grande, como lo es Mocoa. Estas modelaciones se llevaron a cabo en un computador con un procesador Intel core i7, con 16 GB de RAM y un sistema operativo de 64 bits, presentando un rendimiento aceptable que fue mejorando a lo largo de la ejecución de las modelaciones, así como de las diferentes actualizaciones que ha tenido ArcGIS, durante el desarrollo y finalización de este trabajo.
- GEE es una herramienta muy potente para los usuarios SIG, sin importar el nivel de conocimiento que tengan sobre programación pues existen muchos scripts y documentación que facilitan la replicabilidad de los procesos, modificando tan solo unas pocas variables dentro del código. Queda en manos del profesional SIG decidir si los resultados son representativos o no, o si se requieren análisis espaciales y procesamientos complementarios.
- La metodología de GEE propuesta por Naciones Unidas para la cartografía de inundaciones es un valioso recurso para la identificación de la magnitud de un desastre, pero varía ampliamente dependiendo del área de estudio, de las fechas del evento y la disponibilidad de información que se evalúa en la metodología que incluye datos de población, edificios y uso del suelo, así como de la disponibilidad y calidad de imágenes de radar. Si bien esta metodología ha presentado resultados documentados en Australia, Bangladesh, Canadá, Camboya, India, Mozambique, Sri Lanka y Tailandia con una precisión del 82%. (IAGUA (2021), en Colombia la ausencia de este tipo de información o su falta de disponibilidad en datos abiertos globales limita la aplicabilidad directa

de la metodología, con resultados precarios, al menos para el caso evaluado que corresponde a la avenida torrencial presentada en Mocoa, en el año 2017.

10 Recomendaciones

- Se recomienda que la simulación de flujo de ArcGIS sea aplicada en áreas no mayores a 2km x 1.5km, esto permite menores tiempos de cómputo y menor capacidad de hardware, lo que a su vez se ve reflejado en un mejor desempeño de la modelación.
- La herramienta de modelación de inundación únicamente debe ser usada de manera preliminar, en ningún caso puede reemplazar un modelo de inundación detallada con software especializado, en estudios de detalle se deben utilizar modelos hidrodinámicos 2D (como HEC-RAS o Iber) para representar de manera más precisa la dinámica del flujo superficial y los tiempos de respuesta de la cuenca
- Sería ideal contar con variables como la profundidad inicial del agua, permeabilidad del suelo, tasa de evaporación y posibles fuentes de agua adicionales a la precipitación, pues son elementos que sumados a la modelación básica hacen que se asemeje más al comportamiento del flujo en la vida real.
- Según la recopilación de información de ONU-SPIDER relacionada con datos y productos satelitales existen más de 250 fuentes de datos relacionadas con la reducción del riesgo de desastre y la respuesta de emergencia basada en el espacio, es decir que, existen actualmente una amplia gama de herramientas y datos abiertos que ofrecen la capacidad de mapeo de inundaciones históricas y algunas incluso casi que en tiempo real. Se recomienda a los profesionales interesados en esta temática o que ejercen estas tareas en su día a día, explorar y conocer las capacidades y limitantes de dichas herramientas.
- GEE es una herramienta muy potente para los usuarios SIG, sin importar el nivel de conocimiento que tengan sobre programación pues existen muchos scripts y documentación que facilitan la replicabilidad de los procesos, modificando tan solo unas pocas variables dentro del código. Queda en manos del profesional SIG decidir si los resultados son representativos o no, o si se requieren análisis espaciales y procesamientos complementarios.

- Se recomienda explorar otras metodologías o scripts dentro de GEE que permitan obtener un mapeo rápido de una inundación a partir de imágenes satelitales, teniendo en cuenta que en Colombia la atención de desastres y la asistencia humanitaria ha sido en muchos casos, inapropiada, desigual, escasa, ineficaz y lenta (Sedano-Cruz & Carvajal-Escobar, s. f.) probablemente por la ausencia de recursos que permitan dimensionar y cuantificar la magnitud de las inundaciones para priorizar, gestionar y movilizar recursos.
- Se considera necesario seguir los lineamientos de implementación de nuevas tecnologías propuesto por MINTIC (Ministerio de Tecnologías de la Información y Comunicaciones de Colombia, s. f.-b), en caso de que entidades públicas como alcaldías, corporaciones autónomas regionales e incluso entidades privadas deseen abordar el uso de estas herramientas dentro de sus metodologías de investigación para responder a los retos de su día a día.

6 Referencias

- Al-Rawas, G., Nikoo, M. R., Al-Wardy, M., & Etri, T. (2024). A Critical Review of Emerging Technologies for Flash Flood Prediction: Examining Artificial Intelligence, Machine Learning, Internet of Things, Cloud Computing, and Robotics Techniques. *Water*, 16(14), Article 14. <https://doi.org/10.3390/w16142069>
- Análisis del desastre ocurrido en Mocoa (Colombia)**. (s. f.). Recuperado 21 de julio de 2025, de [https://revistas.javeriana.edu.co/files-articulos/AyD/24-47\(2020-II\)/151570420003/](https://revistas.javeriana.edu.co/files-articulos/AyD/24-47(2020-II)/151570420003/)
- Arc Hydro GIS for Water Resources—Vista general*. (s. f.). Recuperado 12 de julio de 2025, de <https://idomcol.maps.arcgis.com/home/item.html?id=d0a28a160d624749817cc39108049632>
- Arc Hydro—Support for Hydrologic Modeling.pdf*. (2020, julio 15). Esri Community. <https://community.esri.com/t5/water-resources-documents/arc-hydro-support-for-hydrologic-modeling-pdf/ta-p/904518>
- Arc-hydro-resources.pdf*. (s. f.). Recuperado 12 de julio de 2025, de <https://www.esri.com/content/dam/esrisites/en-us/media/manuals/arc-hydro-resources.pdf>
- Ayala, F. S. (2025, julio 2). *Condenan al Estado colombiano por omisión en avalancha de Mocoa de 2017; indemnizarán a las víctimas*. *El Tiempo*. <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/condenan-al-estado-colombiano-por-omision-en-avalancha-de-mocoa-de-2017-indemnizaran-a-las-victimas-3468475>
- Bagheri, A., & Liu, G.-J. (2025). Climate change and urban flooding: Assessing remote sensing data and flood modeling techniques: a comprehensive review. *Environmental Reviews*, 33, 1-14. <https://doi.org/10.1139/er-2024-0065>

- Barton, I. J., & Bathols, J. M. (1989). Monitoring floods with AVHRR. *Remote Sensing of Environment*, 30(1), 89-94. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(89\)90050-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90050-3)
- Belay, H., Melesse, A. M., Tegegne, G., & Kassaye, S. M. (2025). Flood Inundation Mapping Using the Google Earth Engine and HEC-RAS Under Land Use/Land Cover and Climate Changes in the Gumara Watershed, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Remote Sensing*, 17(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/rs17071283>
- Bender, J., Finkenzeller, D., & Oel, P. (s. f.). *HW3D: A tool for interactive real-time 3D visualization in GIS supported flood modelling*.
- BID | Preparados y resilientes en las Américas. (s. f.). <https://cutt.ly/5rzmzfzS>
- CEPEI. (2020). *Reconstruyendo Mocoa a través de los datos*. <https://tinyurl.com/mr2jnxw8>
- Colombia. Congreso de la República. (1993). *Ley 99 de 1993*. <https://cutt.ly/orzmv18P>
- Colombia. Congreso de la República. (2012). *Ley 1523 del 24 de abril del 2012*. <https://cutt.ly/jrzmVEX0>
- Colombia. Presidencia de la república. (1991). *Constitución Política 1 de 1991 Asamblea Nacional Constituyente*. <https://cutt.ly/5rzmzCR4>
- Colombia. Presidencia de la República. (2014). *Decreto 1807 de 2014*. <https://cutt.ly/urzmm82v>
- Common flood simulation workflows ArcGIS Pro*. (s. f.). <https://cutt.ly/ErzmmPQX>
- Copăcean, L., Man, E. T., Cojocariu, L. L., Popescu, C. A., Vilceanu, C.-B., Beilicci, R., Crețan, A., Herbei, M. V., Cuzic, O. Ș., & Herban, S. (2025). GIS-Based Flood Assessment Using Hydraulic Modeling and Open Source Data: An Example of Application. *Applied Sciences*, 15(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/app15052520>
- Crespo, A. R. V., & Puerta, J. M. (2016a). Evaluación de la Iniciativa Ciudades Emergentes y Sostenibles del BID. *IDB Publications*. <https://doi.org/10.18235/0010668>

- Crespo, A. R. V., & Puerta, J. M. (2016b). Evaluación de la Iniciativa Ciudades Emergentes y Sostenibles del BID. *IDB Publications*. <https://doi.org/10.18235/0010668>
- Dritsas, E., & Trigka, M. (2025). Remote Sensing and Geospatial Analysis in the Big Data Era: A Survey. *Remote Sensing*, 17(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/rs17030550>
- Earth Science Data Systems, N. (2024, octubre 18). *Sentinel-1 | NASA Earthdata* [Platform]. Earth Science Data Systems, NASA. <https://www.earthdata.nasa.gov/data/platforms/space-based-platforms/sentinel-1>
- ESRI. (2018). *Arquitectura de la plataforma ArcGIS: Mejores prácticas*. <https://tinyurl.com/nhr3arsh>
- ESRI. (2024). *Flood Simulation in ArcGIS Pro 3.4*. <https://tinyurl.com/bdfe8bpd>
- Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S. R. (2014). Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 23-35. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>
- Global Human Settlement—Visualisation—European Commission*. (s. f.). Recuperado 22 de julio de 2025, de <https://human-settlement.emergency.copernicus.eu/visualisation.php>
- Hamidi, M. E., Peter, B., Muñoz, D., Mofstakhari Rostamkhani, H., & Hamid, M. (2023). Fast Flood Extent Monitoring with SAR Change Detection Using Google Earth Engine. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, PP, 1-1. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2023.3240097>
- iAgua, redaccion. (2024, noviembre 27). *La digitalización para la gestión de inundaciones en Latinoamérica* [Text]. iAgua; iAgua. <https://cutt.ly/JrzmxLvp>
- Isma'il, M., & Ndanusa, Z. (2023). *Geospatial Data Mining for Flood Risk Management*.

- Kumar, V., Sharma, K. V., Caloiero, T., Mehta, D. J., & Singh, K. (2023). Comprehensive Overview of Flood Modeling Approaches: A Review of Recent Advances. *Hydrology*, 10(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/hydrology10070141>
- Mehmood, H., Conway, C., & Perera, D. (2021). Mapping of Flood Areas Using Landsat with Google Earth Engine Cloud Platform. *Atmosphere*, 12, 16. <https://doi.org/10.3390/atmos12070866>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). *Política Nacional de Cambio Climático*. <https://tinyurl.com/yufd2j4f>
- Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. (s. f.). *Plan Nacional de Adaptación al cambio climático (PNACC)*. <https://tinyurl.com/4289nk4j>
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, G. de E. (s. f.). *Guía Metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. <https://cutt.ly/ZrzmxWkd>
- Ministerio de Tecnologías de la Información y Comunicaciones de Colombia. (s. f.-a). *Guía con lineamientos generales para el uso de tecnologías emergentes*. <https://tinyurl.com/5cmz76bk>
- Ministerio de Tecnologías de la Información y Comunicaciones de Colombia. (s. f.-b). *Guía con lineamientos generales para el uso de tecnologías emergentes*. <https://tinyurl.com/5cmz76bk>
- Molina, A. M., López, L. F., & Villegas, G. I. (2005). LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) EN LA PLANIFICACIÓN MUNICIPAL. *Revista EIA*, 4, 21-31. <https://cutt.ly/krzmvGKX>
- Municipio de Mocoa. (2023). *Plan Básico de Ordenamiento Territorial de Mocoa 2024-2036*. <https://cutt.ly/Yrzmj3T>

- Nghia, B., Pal, I., Chollacoop, N., & Mukhopadhyay, A. (2022). Applying Google earth engine for flood mapping and monitoring in the downstream provinces of Mekong river. *Progress in Disaster Science*, 14, 100235. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2022.100235>
- Observatorio Regional de Planificación para el Desarrollo. (s. f.). *La planificación para el desarrollo y la gestión del riesgo de desastres*. <https://cutt.ly/crzmcqz0>
- Ozcelik, C., & Gorokhovich, Y. (2020). An Overland Flood Model for Geographical Information Systems. *Water*, 12(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/w12092397>
- Park, S., Nielsen, A., Bailey, R. T., Trolle, D., & Bieger, K. (2019). A QGIS-based graphical user interface for application and evaluation of SWAT-MODFLOW models. *Environmental Modelling & Software*, 111, 493-497. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.10.017>
- Paso a Paso: Mapeo Rápido de Inundaciones y sus Impactos Utilizando Datos SAR de Sentinel-1 y Google Earth Engine | UN-SPIDER Knowledge Portal*. (s. f.). Recuperado 20 de julio de 2025, de <https://www.un-spider.org/es/advisory-support/recommended-practices/recommended-practice-google-earth-engine-flood-mapping/step-by-step>
- Perez Cutillas, Pedro & Pérez-Navarro, Alberto & García, Carmelo & Zema, Demetrio & Álvarez, Jesús. (2023). What is going on within google earth engine? A systematic review and meta-analysis. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100907>
- Política Nacional de Cambio Climático*. (s. f.). Recuperado 11 de mayo de 2025, de <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/01/9.-Politica-Nacional-de-Cambio-Climatico.pdf>
- POMCA del río Mocoa, escenario actual y tendencial al año 2032*. (s. f.). <https://tinyurl.com/36p539ks>

- Rasolt, D. H. (2019, mayo 26). Flash Floods and Landslides: The Case of a Preventable Disaster in Mocoa, Colombia. *Unbounded World*. <https://unboundedworld.com/flash-floods-and-landslides-the-case-of-a-preventable-disaster-in-mocoa-colombia/>
- Romo, S. P. (2015). *Estimación del riesgo por inundación en la ribera del río Mulato (Mocoa-Colombia)*. https://issuu.com/unigis_latina/docs/merged__11_
- Sedano-Cruz, K., & Carvajal-Escobar, Y. (s. f.). *Variabilidad climática, cambio climático y gestión integrada del riesgo de inundaciones en Colombia*.
- Sentinel-2 Land Cover Explorer—Quickstart guide. (s. f.). *ArcGIS Blog*. Recuperado 15 de julio de 2025, de <https://www.esri.com/arcgis-blog/products/arcgis-living-atlas/imagery/global-land-cover-revealed>
- Stängel, M. (2025, febrero 20). *Flood Simulation Workflow in ArcGIS*. ArcGIS StoryMaps. <https://cutt.ly/8rzmxj2F>
- Sy, H., Luu, C., Duy Quynh, B., Ha, H., & Nguyen, Q. (2023). Urban flood risk assessment using Sentinel-1 on the google earth engine: A case study in Thai Nguyen city, Vietnam. *Remote Sensing Applications Society and Environment*, 31. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100987>
- Tazmul Islam, M., & Meng, Q. (2022a). An exploratory study of Sentinel-1 SAR for rapid urban flood mapping on Google Earth Engine. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 113, 103002. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103002>
- Tazmul Islam, M., & Meng, Q. (2022b). An exploratory study of Sentinel-1 SAR for rapid urban flood mapping on Google Earth Engine. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 113, 103002. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103002>
- Thammaboribal, P., Tripathi, N. K., Lipiloet, S., & Mandadi, R. (2025a). Flood Mapping and Damage Assessment Using UN-SPIDER Recommended Practices in Google Earth Engine:

- A Case Study of the 2024 Chiang Rai Flood, Thailand. *International Journal of Geoinformatics*, 21(3), Article 3. <https://doi.org/10.52939/ijg.v21i3.4039>
- Thammaboribal, P., Tripathi, N. K., Lipiloet, S., & Mandadi, R. (2025b). Flood Mapping and Damage Assessment Using UN-SPIDER Recommended Practices in Google Earth Engine: A Case Study of the 2024 Chiang Rai Flood, Thailand. *International Journal of Geoinformatics*, 21(3), Article 3. <https://doi.org/10.52939/ijg.v21i3.4039>
- The Role of Google Earth Engine in Flood Disaster Management: A Review of Capabilities and Challenges. (2025). *ResearchGate*. <https://doi.org/10.9734/air/2025/v26i21314>
- The World Bank. (2024). *Annual Report 2024 | GFDRR*. <https://www.gfdr.org/en/ar/annual-report-2024>
- Ullah, I., Kovacs, G., & Lenner, T. (2023). *Urban Flood Resilience Analysis Using GIS-Based AHP and Modified S-FRESI Approach: A Case Study of Gyor City, Hungary*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3434090/v1>
- UNGRD. (s. f.). *Plan Nacional Gestión Riesgo de Desastres*. <https://tinyurl.com/mvvyrz8w>
- United Nations. (s. f.). *Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030*.
- UN-SPIDER. (s. f.). *Aplicación de datos del mes: Resumen de mapas web para el monitoreo de inundaciones | UN-SPIDER Knowledge Portal*. <https://www.un-spider.org/es/enlaces-y-recursos/fuentes-de-datos/daotm-mapas-web-inundaciones>
- Vista general del conjunto de herramientas de Hidrología—ArcGIS Pro | Documentación*. (s. f.). Recuperado 12 de julio de 2025, de <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/3.3/tool-reference/spatial-analyst/an-overview-of-the-hydrology-tools.htm>
- Why Flood Risk Management is One of Today's Biggest Emerging Challenges*. (s. f.). <https://tinyurl.com/5fytf6pm>

World Bank. (2018). Las tecnologías disruptivas ayudan a mejorar la prevención de riesgos. *World Bank*. <https://cutt.ly/ZrzmcfB>

Yan, Y.; Zhang, N.; Zhang,H. (2023). *Applications of Advanced Technologies in the Development of Urban Flood Models*. *Water*. <https://www.mdpi.com/2073-4441/15/4/622>

Anexos

- **Anexo 1:**

Visor Sentinel con swipe: <https://tinyurl.com/bddpbuch>

- **Anexo 2:**

Aplicativo en ArcGIS Experience Builder:

Enlace de acceso : <https://tinyurl.com/6utct2f7>

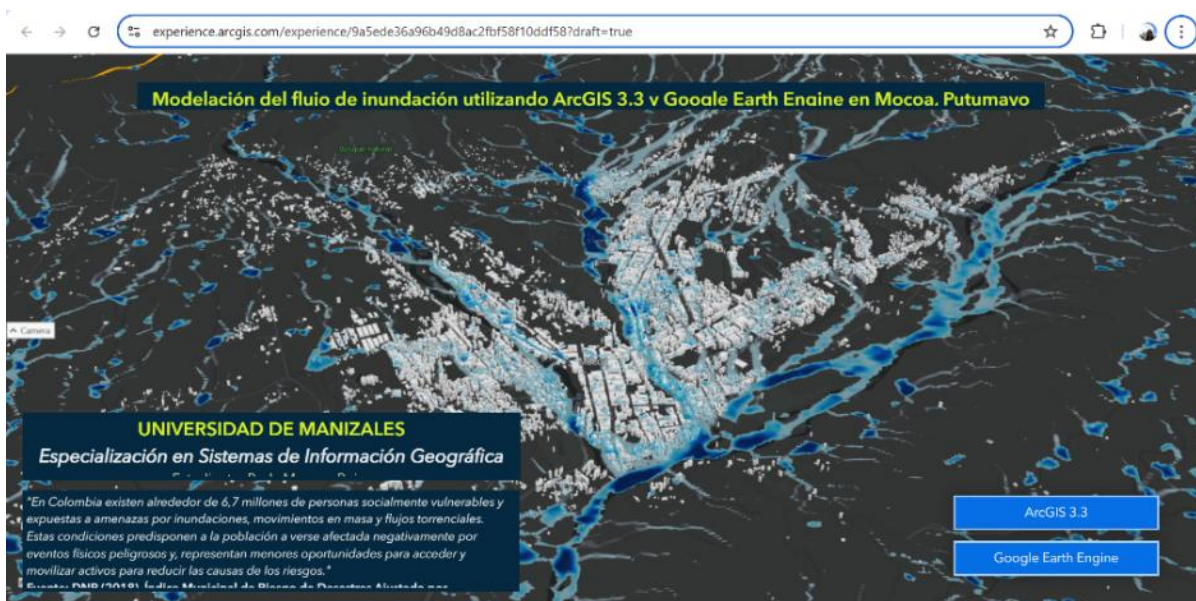
- **Anexo 3:**

Descripción de la interfaz de aplicativo en ArcGIS Experience Builder:

Con el objetivo de presentar un paso a paso detallado, interactivo y atractivo de los procesos aquí realizados se construye un aplicativo en ArcGIS Experience Builder, que centraliza varios Story Maps y estos a su vez, contienen visores generados en Aplicaciones Instantáneas, datos ráster multitemporales, mapas interactivos y contenido multimedia como imágenes en formato JPG, convirtiéndose en un recurso para comunicar, centralizar y resumir información.

- 1- Página de inicio: En la parte inferior derecha se encuentran los botones que dirigen a los dos componentes principales del presente trabajo: Modelación de inundación en ArcGIS 3.3. y Cartografía de inundación en GEE.

Figura 44. *Página de inicio aplicativo*



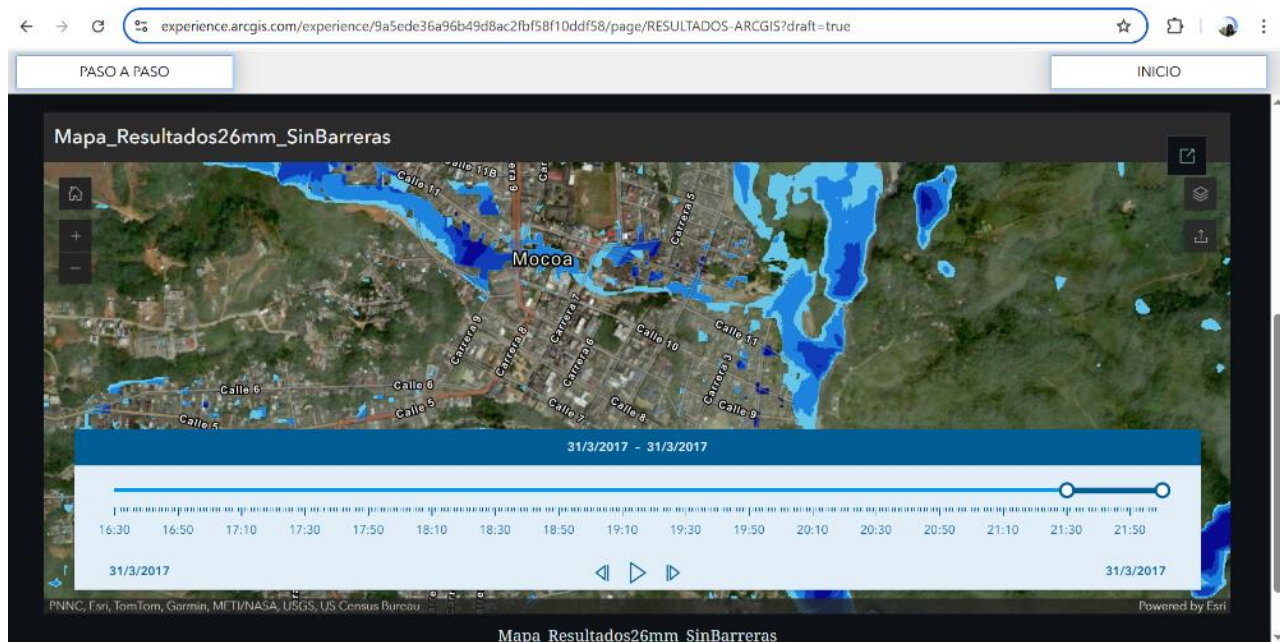
2. En la página de modelación de ArcGIS 3.3 se encuentra un Story Map con el paso a paso desarrollado y botones de navegación que permiten volver a la página inicial (arriba-izquierda) o a la página de resultados (arriba-derecha).

Figura 45. *StoryMap paso a paso modelación de flujo con ArcGIS*



3. En la página de resultados de ArcGIS 3.3 se encuentran los resultados de la modelación en un visor interactivo que contiene el ráster multidimensional de la mancha de inundación y permite hacer zoom in o zoom out en las zonas de interés. Desplazando la barra temporal se podrá apreciar el ráster generado para ese periodo de tiempo, así como consultar la evolución de la modelación de inicio a fin.

Figura 46. *Ráster multidimensional en visor interactivo*



4. Desde la página de inicio se puede acceder al componente de cartografía de GEE, donde se encuentra el paso a paso de la metodología y el resultado obtenido.

Figura 47. *Storymap paso a paso cartografía de inundaciones*

