

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

EVALUACIÓN DE RELACIONES ENTRE EXTENSIÓN DE INUNDACIÓN E
IMPACTOS EN CULTIVOS EN LA CUENCA DEL RÍO AGUÁN EN HONDURAS,
UTILIZANDO DATOS DE TECNOLOGÍA RADAR DE APERTURA SINTÉTICA
(SAR)

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado de
Geografía para optar al grado y título de Maestría Académica Gestión Integrada del
Recurso Hídrico para Latinoamérica y El Caribe

JORGE ESTEBAN MASÍS AGUILAR

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2023

DEDICATORIA

A las segundas oportunidades y el aprender por cuenta propia.
A todas aquellas personas que confiaron en esta investigación, que me ayudaron también a llevarla a cabo. Ustedes saben quiénes son.

AGRADECIMIENTOS

A Mila y Piti, por estar conmigo desde las primeras clases en línea. A Cinthya por brindarme su confianza a través del tiempo.

A mi Familia, por alegrarse siempre con cada logro, y su apoyo incondicional.

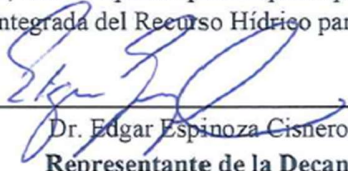
A mi Equipo Asesor, la directora María José, quien con su acertada orientación y conocimiento guio por buen rumbo el camino de mi investigación. Los asesores Adolfo y Christian, quienes son increíbles profesionales. Todos dedicaron su valioso tiempo en apoyarme durante mi proceso de investigación.

A las personas colegas de la Universidad Autónoma de Honduras, por su valiosísima colaboración. Especialmente Saúl, quien me extendió una mano amiga en todo momento.

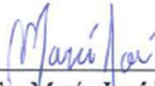
A todas aquellas personas que habitan en el Valle del Aguán, con quienes siempre sentí un intenso vínculo profesional y ético, por entregar un trabajo honesto y laborioso.

HOJA DE APROBACIÓN

Esta tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Posgrado en Geografía de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Académica en Gestión Integrada del Recurso Hídrico para América Latina y el Caribe.



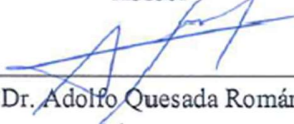
Dr. Edgar Espinoza Cisneros
**Representante de la Decana
Sistema de Estudios de Posgrado**



M.Sc. María José Molina Montero
Directora de Tesis



Dr. Christian Birkel Dostal
Asesor



Dr. Adolfo Quesada Román
Asesor



M. Sc. Guillermo Artavia Rodríguez
**Representante del Director del
Programa de Posgrado**



Jorge Esteban Masís Aguilar
Sustentante

RESUMEN

Este estudio tuvo como objetivo establecer una metodología sencilla y eficaz para analizar la extensión de inundaciones en cuencas afectadas por desastres naturales, utilizando principalmente datos obtenidos a través de teledetección, en particular, imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR). La investigación buscó evaluar los posibles impactos en cultivos a través de la relación de estos datos post evento con índices de vegetación. Los resultados generados representan un recurso valioso para respaldar la toma de decisiones en agricultura y la gestión integral de riesgos a nivel local y regional.

La metodología propuesta para la detección de cambios se basó en el aprovechamiento de datos disponibles y herramientas en línea, como Google Earth Engine. Se utilizaron tanto imágenes SAR como imágenes ópticas de alta y mediana resolución espacial. Además, se llevó a cabo una validación en campo en la cuenca del Río Aguán en Honduras.

El primer capítulo introduce la investigación, abordando aspectos generales como el problema, la justificación, el área de estudio, los objetivos, el marco teórico y la metodología. En el segundo capítulo, se presentan los resultados del cálculo de la extensión de inundación causada por los huracanes Eta e Iota en la cuenca del Río Aguán, el análisis de la eficacia de la evaluación de áreas inundadas, los impactos en los cultivos y el potencial de aplicación a nivel local y regional.

Las conclusiones destacan la validación de la eficacia de la metodología basada en imágenes SAR y Google Earth Engine para la detección de inundaciones. Durante los huracanes Eta e Iota, se identificaron un total de 11,327 hectáreas inundadas en la cuenca del río Aguán, incluyendo 7,479 hectáreas de áreas agrícolas. Sin embargo, se observa que el análisis de inundaciones con el índice MNDWI se vio limitado debido a la falta de datos completos en la cuenca en fechas específicas, lo que subraya la importancia de la tecnología SAR y la complementariedad de las fuentes de teledetección. El índice de vegetación NDVI también proporcionó información valiosa sobre la salud de la vegetación en áreas inundadas.

Esta investigación ofrece una herramienta con un alto potencial operativo, con aplicaciones significativas en agricultura y gestión de riesgos. Además, resalta la capacidad de compartir y escalar esta aplicación a través de Google Earth Engine para beneficio de la comunidad local y regional.

ABSTRACT

This study aimed to establish a simple and effective methodology for analyzing the extent of flooding in watersheds affected by disasters, primarily using data obtained through remote sensing, particularly Synthetic Aperture Radar (SAR) images. The research sought to assess potential impacts on crops by relating post-event data to vegetation indices. The generated results represent a valuable resource to support decision-making in agriculture and comprehensive disaster risk management at the local and regional levels.

The proposed change detection methodology leveraged available data and online tools, such as Google Earth Engine, utilizing both SAR and optical images with high and medium spatial resolution. Additionally, field validation was conducted in the Aguán River basin in Honduras.

The first chapter introduces the research, covering general aspects such as the problem, justification, study area, objectives, theoretical framework, and methodology. In the second chapter, the results of the calculation of the extent of flooding caused by hurricanes Eta and Iota in the Aguán River basin are presented, along with an analysis of the effectiveness of assessing flooded areas, the impacts on crops, and the potential for local and regional applications.

The conclusions highlight the validation of the effectiveness of the methodology based on SAR images and Google Earth Engine for flood detection. During hurricanes Eta and Iota, a total of 11 327 hectares of land were identified as flooded in the Aguán River basin, including 7 479 hectares of agricultural areas. However, it is noted that the analysis of floods using the MNDWI index was limited due to incomplete data in the basin on specific dates, emphasizing the importance of SAR technology and the complementarity of remote sensing sources. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) also provided valuable information regarding the health of vegetation in flooded areas.

This research offers a tool with high operational potential, with significant applications in agriculture and risk management. Additionally, it underscores the capacity to share and scale this application through Google Earth Engine for the benefit of the local and regional community.

LISTA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
HOJA DE APROBACIÓN	iv
RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE CONTENIDOS	vii
LISTA DE TABLAS	ix
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE ABREVIATURAS	xii
CAPÍTULO I. ASPECTOS GENERALES	1
Introducción	1
Problema de investigación	3
Justificación	5
Área de estudio	8
Descripción topográfica	9
Precipitación.....	10
Coberturas y usos de suelo	13
Históricos de inundaciones.....	14
Afectación según reportes en prensa.....	16
Objetivo General.....	17
Objetivos Específicos	17
Marco Teórico.....	17
Componentes del riesgo	17
Estrategia de reducción de riesgo a desastres.....	19
Cálculo de extensión de inundación con SAR	22
Aprovechamiento de datos provenientes de sensores pasivos	37
Manipulación y análisis de datos de teledetección en plataforma en línea	41
Metodología.....	43
Datos.....	43
Estimación de extensión de inundación mediante detección de cambios con SAR.....	46

Estimación de extensión de inundación a partir de MNDWI con umbral automático	
Otsu	50
Trabajo de campo para obtención de referencia para el evento de inundación en sitio	52
Análisis de impactos en cultivos	56
Evaluación del uso potencial en gestión de riesgo	56
CAPÍTULO 2. RESULTADOS GENERALES	58
Cálculo de extensión de inundación causada por los huracanes Eta e Iota en la cuenca del río Aguán	58
Extensión estimada a partir de datos SAR	58
Extensión estimada a partir de datos de sensores ópticos	59
Efectividad de la evaluación de área inundada e impactos en cultivos	61
Evaluación cuantitativa del cálculo de inundación	61
Evaluación cualitativa del cálculo de inundación	62
Impactos en cultivos a partir de NDVI	68
Uso potencial de parte de interesados a nivel local y regional	77
Usos potenciales en gestión de riesgo a desastres	77
CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES	81
Conclusiones	81
Recomendaciones	83
ANEXOS	85
Anexo Figura.1. Clasificación climática para la cuenca Aguán.	85
Anexo Figura.2. Valores de pendiente.....	86
Anexo Tabla.1. Detalles de las imágenes Sentinel 1 seleccionadas para la detección de inundación, escena Ex Ante.....	87
Anexo Tabla.2. Detalles de las imágenes Sentinel 1 seleccionadas para la detección de inundación, escena Ex Post.....	88
Anexo Tabla.3. Detalles de las imágenes Sentinel 2 seleccionadas para el cálculo de MNDWI y para cálculo de NDVI.....	89
Anexo Tabla.4. Matriz de evaluación de precisión SAR y Puntos de Campo.	91
Anexo Tabla.5. Matriz de evaluación de precisión SAR y MNDWI.	94
BIBLIOGRAFÍA	96

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Bases de datos utilizadas en el estudio	43
Tabla 2.1. Resultados de análisis cuantitativo de validación.	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Cuenca y departamentos	9
Figura 1.2. Topografía y red hídrica.....	10
Figura 1.3. Promedio anual de precipitación Aguán (1981-2021).	11
Figura 1.4. Series de tiempo de precipitación mensual acumulada, en mm, período 2000-2020 a partir de datos CHIRPS.....	12
Figura 1.5. Precipitación mensual promedio para toda la Cuenca Aguán, en el año 2020. .	13
Figura 1.6. Fotografía detalle coberturas en zona montañosa, cuenca media, 2023.	13
Figura 1.7. Cobertura Forestal (GSFH, 2018).	14
Figura 1.8. Inundaciones Históricas (Proyecto Mitigar).	15
Figura 1.9. Esquema de los tres tipos principales de dispersión considerados para los datos SAR (Flores et al., 2019, p. 28).	23
Figura 1.10. Penetración de la señal SAR por la longitud de onda del sensor λ (Flores et al., 2019, p. 26).	24
Figura 1.11. Ejemplo conceptual para las polarizaciones VV y HH (Podest y McCartney, 2019).	26
Figura 1.12. Esquema conceptual de la dependencia de la rugosidad de la superficie con la longitud de onda del sensor λ : lisa, intermedia y rugosa.	27
Figura 1.13. Comparativa visual de la aplicación del filtro Lee refinado.	31
Figura 1.14. Histograma de valores en la capa de diferencia entre las escenas ex ante y ex post.	35
Figura 1.15. Diagrama de flujo cálculo de extensión de área inundada a partir de SAR en GEE.	47
Figura 1.16. Diagrama de flujo cálculo de extensión de área inundada a partir de imágenes Sentinel 2 en GEE.	50
Figura 1.17. Histograma de MNDWI.	51
Figura 1.18. Ubicación de los puntos usados en la validación.	54
Figura 2.1. Área de detección de inundación, según coberturas.	58
Figura 2.2. Comparativa área inundada para Valle del Aguán, con datos SAR.....	59
Figura 2.3. Cálculo de inundación con MNDWI.....	60
Figura 2.4. Imagen compilada de Sentinel 2 para el análisis con MNDWI.	61
Figura 2.5. Secciones de análisis cualitativo.	63
Figura 2.6. Detalle sección A, sector por el comisariato.	64
Figura 2.7. Detalle sección A, sector por Nombre de Jesús.	65
Figura 2.8. Sección B, sector suroeste de Olanchito.	66
Figura 2.9. Sección C, norte de Sabá.....	66
Figura 2.10. Sección D, sector Cooperativa la Perla del Norte.	67
Figura 2.11. Sección E, sector Lérida, cercano a Tocoa.	68
Figura 2.12. Visualización de área disponible para análisis, a partir de datos Sentinel 2. ...	68
Figura 2.13. Distribución de valores NDVI ex Ante.	69
Figura 2.14. Distribución de valores NDVI ex Post.....	70
Figura 2.15. Diferencia del NDVI para los datos de Aguán.....	71

Figura 2.16. Detalle diferencia de NDVI entre escenas ex ante y ex post.	72
Figura 2.17. Detalle diferencia de NDVI entre escenas ex ante y ex post.	73
Figura 2.18. Distribución de valores de diferencia de NDVI.	74
Figura 2.19. Comparación con el histórico de NDVI para los datos de Aguán, entre 2019 y 2020.	75
Figura 2.20. Distribución de valores de diferencia de NDVI entre 2019-2020.....	76
Figura 2.21. Respuesta del NDVI para cada cobertura agrícola, luego de Eta e Iota.	77
Figura 2.22. Presentación híbrida sede UNAH-Aguán y Zoom, 2023.....	78
Figura 2.23. Aplicación en GEE Apps.	79
Figura 2.24. Ejemplo adicional de visualización de los datos.....	80

LISTA DE ABREVIATURAS

API: interfaz de programación de aplicaciones
ARSET: Programa de capacitación en teledetección aplicada
CEPAL: Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CEPREDENAC: Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres en América Central y República Dominicana
CHIRPS: Grupo de datos de Estaciones de Amenazas Climáticas y Precipitaciones Infrarrojas
COPECO: Comisión Permanente de Contingencias
DNCC: Dirección Nacional de Cambio Climático
EEApps: Earth Engine Apps
FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
GEE: Google Earth Engine
GIRH: Gestión Integrada del Recurso Hídrico
GRDH: Rango de terreno detectado Alta resolución
GSFH: GeoPortal SINAP Honduras
ICF: Instituto de Conservación Forestal de Honduras
IPCC: Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático
IW: Banda ancha interferométrica
JRC: Centro Común de Investigación
MNDWI: Índice de Agua Normalizado Modificado
NASA: Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio
NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
NDWI: Índice de Diferencia de Agua Normalizado
NIR: Infrarrojo Cercano
ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible
PCGIR: Política Centroamericana de Gestión Integral del Riesgo
PIB: Producto Interno Bruto
RRD: Reducción de Riesgo de Desastres
SAR: Radar de Apertura Sintética
SERNA: Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente
SICA: Sistema de la Integración Centroamericana
SIG: Sistema de Información Geográfica
SNAP: Plataforma de Aplicación de Sentinel
SRTM: Misión de topografía de radar del transbordador
SWIR: infrarrojo medio
UCR: Universidad de Costa Rica
UI: interfaz de usuario
UN: Naciones Unidas
UN-SPIDER: Información basada en el espacio para la gestión de desastres y la respuesta a emergencias, Naciones Unidas

UNAH: Universidad Nacional Autónoma de Honduras

UNDRR: Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres

UNISAT: Centro Satelital de las Naciones Unidas

UNITAR: Instituto de las Naciones Unidas para la Formación Profesional y la Investigación

UNOOSA: Oficina de las Naciones Unidas para los Asuntos del Espacio Ultraterrestre

CAPÍTULO I. ASPECTOS GENERALES

Introducción

El incremento de la ocurrencia e impactos de los eventos climáticos extremos se encuentran asociados con la variabilidad climática actual, proyecciones de escenarios a futuro apoyan esta teoría y los ubican como el riesgo con la mayor probabilidad de presentarse, considerados efectos del Cambio Climático (Allen, 2015; IPCC, 2021; World Economic Forum, 2021). Se calcula que las inundaciones representan cerca de la mitad de los desastres vinculados a eventos climatológicos extremos, como los ciclones tropicales y lluvias extraordinarias, convirtiéndose a su vez en las principales amenazas naturales en Latinoamérica y el Caribe, con pérdidas para la región cuantificadas en aproximadamente 26 billones de dólares americanos (Moreno Rodríguez et al., 2020). Asimismo, el contexto mundial presenta que las inundaciones suman cerca del 40% de los daños registrados por desastres, siendo las personas que trabajan en el sector agrícolas quienes deben afrontar especialmente los impactos de estas situaciones adversas (Pathak, 2021). Resulta ciertamente importante el estudio y la propuesta de metodologías para analizar de manera pronta y eficiente estos eventos, así como sus posibles relaciones con las áreas cultivadas.

La temporada de huracanes del año 2020 se posicionó como la más activa en la historia y la quinta consecutiva por sobre la actividad promedio (CEPAL, 2021). Centroamérica resultó severamente afectada por esta situación, debido a que los huracanes Eta e Iota, ocurridos en un período sumamente corto de tiempo al comienzo de la segunda temporada de plantación, perturbaron los medios de subsistencia de alrededor de 727 315 familias, principalmente en Nicaragua, Guatemala y Honduras (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2021). Estos procesos hidrometeorológicos han tenido indudables efectos en la producción agrícola a nivel local, particularmente en departamentos rurales cerca de la costa

Atlántica en Honduras y los efectos económicos combinados de Eta e Iota ascendieron a más de 2 121 millones de dólares americanos¹ para este país (esto incluye daños, pérdidas y costos adicionales desde el comienzo de los eventos hasta la recuperación y reconstrucción total) (CEPAL, 2021). La producción de cultivos como el frijol, banano y café principalmente, además de plantaciones de arroz, plátano y caña de azúcar, componentes esenciales de la seguridad alimentaria en el istmo centroamericano, se vieron impactados negativamente por estos huracanes (CEPAL, 2021).

(Wrachien et al., 2011), destacan que es imperante buscar un abordaje integral en gestión de riesgo a desastres, aún más tomando en cuenta que la posibilidad de tener eventos de inundación en ciertas zonas nunca puede ser eliminada por completo, lo que requiere de mitigación de sus impactos por medio de acciones apropiadas. Es por esto que el presente trabajo se centra especialmente en explorar una metodología técnicamente innovadora y accesible, tanto desde el punto de vista económico y de implementación, que permita cuantificar eficazmente extensión de áreas inundadas luego de eventos inundación reportados y así poder obtener información pronta sobre relaciones entre estos cálculos y posibles zonas cultivadas afectadas. Se buscará que las herramientas y procedimientos generados a partir de la investigación se incluyan en la Gestión de Riesgo local, a una escala de cuenca hidrográfica, con posibilidad de replicarse regionalmente.

Uno de los potenciales beneficios consecuencia del fortalecimiento de la Gestión de Riesgo, es la reducción de la diferencia de vulnerabilidad relacionada al Cambio Climático del sector productivo agrícola en comparación con otros sectores productivos, al apoyar la generación de capacidades técnicas para su implementación en las estrategias de planeamiento de

¹ Costos aproximados basados en CEPAL, 2021; Tipo de Cambio del Banco Central de Honduras (24.552 lempiras), noviembre 2020. Representando un 8.45% de su PIB para el 2019, (Banco Mundial, 2019).

atención de desastres (Thomas et al., 2019). El trabajo científico, como parte de la siguiente propuesta metodológica, representa un avance para la región hacia la exploración y posible utilización de datos con teledetección a partir de recursos de acceso libre (Sevillano Rodríguez et al., 2020). Específicamente, el manejo de imágenes SAR brinda varias ventajas en la detección remota de áreas cultivadas inundadas, ya que no se ven afectadas por condiciones climatológicas como la nubosidad y permiten la obtención continua de información, independientemente de la presencia de luz solar, siendo ambas posibles características presentes en fechas de análisis de eventos de inundación asociados a precipitación (Espinoza Cisneros et al., 2020).

Problema de investigación

Si bien aproximadamente 8.3 millones de personas fueron afectadas por los huracanes Eta e Iota en 2020 en Centroamérica, hubo un impacto alto en los departamentos rurales cerca de la costa Atlántica hondureña, zonas identificadas con altos niveles de pobreza extrema (CEPAL, 2021; FAO, 2021). Dentro de las evaluaciones realizadas para pérdidas relacionadas a reducción de superficie cultivada y activos agropecuarios en Honduras se tiene: cultivos de frijol (43%), banano (13%) y café (10%) principalmente (CEPAL, 2021). Estas mismas evaluaciones destacan que la vulnerabilidad de este país, en cuanto a desastres de origen climatológico, continúa siendo muy alta y la Red Iberoamericana de Oficinas de Cambio Climático destaca que Honduras es parte de los países con mayor población expuesta a inundaciones (Moreno Rodríguez et al., 2020).

Aun cuando se denota que ha habido un avance en procesos de identificación de riesgos y preparación para la respuesta ante emergencias, el rezago se asocia al enfoque reactivo de la estrategia de gestión de riesgo, el limitado entendimiento de las amenazas, temas

presupuestarios y al abordaje del tema en silos, en general todos indicadores de la necesidad de un cambio hacia el abordaje preventivo (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL] y Secretaría de Energía, Recursos Naturales, Ambiente y Minas - Honduras [MiAmbiente+], 2016). Acciones como el fomento de la prevención e inversión en medidas estructurales de reducción de riesgo, deben incluir un enfoque holístico, transversal y multinivel que promueva sinergias sociales e institucionales, que a su vez considere vínculos entre el cambio climático y la gestión del riesgo.

(Monge, 2019), menciona el reto regional de personas tomadoras de decisiones y creadoras de políticas que no se muestran familiarizadas con las posibilidades y beneficios de la tecnología espacial (donde destacan las aplicaciones de procedimientos con base en productos satelitales). En cuanto a estos datos de teledetección, (Singha et al., 2020), ponderan que su utilización puede incrementar la resiliencia ante eventos climatológicos extremos al proveer a las agencias gubernamentales y de atención de desastres con datos iniciales de extensión de área inundada de forma remota, ahorrando así recursos económicos y profesionales.

(Singha et al., 2020), anotan que el mapeo de inundaciones con uso de SAR ha estado limitado a áreas de estudio relativamente pequeñas, debido al intensivo procesamiento de datos y (Long et al., 2014), resaltan la necesidad de expandir el desarrollo y uso de técnicas que apliquen tecnología SAR para detección de inundación a cuencas en latitudes donde los eventos de inundación se presentan más frecuentemente, en comparación con la mayoría de investigación que se ha llevado a cabo en zonas templadas. Se presenta ciertamente una oportunidad para aumentar y promover el uso de estas metodologías en América Latina y el Caribe, trabajos como el análisis preliminar de afectación debido a un evento de inundación

en Guatemala (UNITAR - UNOSAT, 2020), investigación en Costa Rica en relación al huracán Otto por (Quesada-Román y Villalobos-Chacón, 2020), y la identificación propuesta por (Sevillano Rodriguez et al., 2020), entre otros, dan una indicación que la tendencia será de dirigir más esfuerzos para aumentar las capacidades y aplicación en la región.

A partir del contexto presentado anteriormente, surge la siguiente pregunta de investigación, ¿de qué forma puede una metodología que use imágenes SAR en el análisis de extensión de área inundada y zonas cultivadas, contribuir en la mejora de la resiliencia en las poblaciones afectadas por eventos climatológicos extremos?

Justificación

Partiendo del hecho que los eventos climatológicos extremos se han posicionado por su probabilidad e impactos en los primeros lugares de riesgos a nivel mundial, la pertinencia de la formulación de metodologías para análisis de eventos de inundación que continúan ocurriendo en Centroamérica se relaciona tanto a la amenaza que representan, como a una necesidad de avanzar el trabajo científico hacia esquemas operacionales en Gestión de Riesgos (World Economic Forum, 2021). Estas aproximaciones fortalecen la resiliencia y la capacidad adaptativa ante las amenazas climáticas, ya sea con sistemas de alerta temprana y análisis después de los eventos o promoción de cooperación sur-sur, norte-sur y triangular para intercambio de conocimientos y desarrollo (United Nations Office for Outer Space Affairs [UNOOSA], 2018).

La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, ambos de las Naciones Unidas, cuentan con puntos acerca de la necesidad de trabajar determinadamente en terminar la hambruna mediante sistemas de producción sostenible que incluyan adaptación al cambio climático como parte de sus estrategias y que el conocimiento generado a partir de

investigación realice aportes hacia la toma de decisiones informada, para reducción de riesgo a desastres (United Nations, 2015). El programa de observación de la Tierra “Copérnico”, de la Agencia Espacial Europea, colabora directa e indirectamente con el cumplimiento de los anteriores objetivos globales, ya sea mediante el monitoreo del progreso o bien activamente contribuyendo a su alcance (UNOOSA, 2018). Uno de los aspectos claves que contribuyen a un buen desempeño para los ODS, es la conformación de alianzas globales para el desarrollo, operación y utilización de infraestructura, datos, información y servicios asociados a la observación de la Tierra, en reducción de brechas técnicas existentes entre países, en torno a sistemas y capacidades para el uso de estas tecnologías.

La estrategia delineada por la PCGIR-2010 promueve la prevención y reducción del riesgo a desastres a través del aumento de la resiliencia de los países de la Región Centroamericana, sea con medidas estructurales o no estructurales (Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres Naturales Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres Naturales en América Central (CEPREDENAC) en América Central [CEPREDENAC], 2017). Esta política impulsa la inversión en resiliencia, considerando que los Estados de Centroamérica tienen alta vulnerabilidad ante diversas amenazas y realza el valor de la transdisciplinariedad como parte de esfuerzos coordinados vinculantes entre actores de Recurso Hídrico, Ambiente, Cambio Climático y Gestión de Riesgo de Desastres. En la medida que se caracteriza de mejor manera el alcance de los impactos por desastres de origen natural en las diferentes zonas y sectores, así podrá ser más eficiente la inversión y definición de prioridades en el diseño de metodologías y políticas basadas en evidencia.

Cabe resaltar también, que dentro de la Visión País 2010-2030 Honduras ha establecido objetivos y metas para un incremento de la productividad nacional e incluye creación de

oportunidades de empleo por medio de la explotación sostenible de los recursos naturales y reducción de la vulnerabilidad ambiental (Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente [MI AMBIENTE+] y Dirección Nacional de Cambio Climático [DNCC], 2019). Tanto la mitigación como la adaptación al Cambio Climático son ejes transversales de estos lineamientos, resaltando la selección de la región de Aguán como parte de las zonas piloto para planeamiento en temas de adaptación, reforzando así la conveniencia de proyectos para la adaptación al cambio climático en esta cuenca.

En relación al mapeo de áreas inundadas con el uso de imágenes SAR, las características propias de la emisión de microondas del sensor activo presente en las plataformas con tecnología de radar, permiten que se pueda detectar información del sitio de estudio aún en condiciones climatológicas adversas (nubosidad, por ejemplo) e independientemente del momento del paso del satélite por el área de captura de la información (sea de día o de noche) (Flores et al., 2019, p. 68). Lo anterior refuerza la idoneidad de la tecnología radar, debido a su uso independientemente de continuidad (tanto día como noche) y condiciones climáticas presentes al momento de la detección (Clement et al., 2018; Espinoza Cisneros et al., 2020; Tsyganskaya et al., 2018a).

Además, (Manavalan, 2017; Yu et al., 2013), también resalta que con SAR se puede obtener información crítica para grandes extensiones de terreno y en zonas difíciles de alcanzar con trabajo en campo, mediante métodos tradicionales. A la vez, menciona algo que otros autores también han señalado y que se explora más adelante en el presente trabajo, que es precisamente la comparación entre las imágenes provenientes de sensores pasivos y cómo estos si presentan pérdidas de información en áreas con cobertura de nubes al momento de

detección o por no tener capacidad de visión nocturna. Lo cual resalta la importancia de crear soluciones mixtas entre tecnología óptica y radar.

Las evaluaciones iniciales rápidas de inundación se pretenden aplicar en las etapas preliminares luego de la ocurrencia de los eventos y formar parte de las actividades para la recuperación, al proveer información valiosa y pronta acerca del evento, e incluirse en creación de mapas y otros recursos visuales de consulta y acompañamiento. Adicionalmente, diferentes tipos de análisis de inundación tendrían uso en otros pasos de los programas de reducción de riesgo a desastres, como la recuperación temprana, incluso varios meses después a forma de insumos para análisis más a profundidad y diseño de sistemas de alerta temprana (Rahman et al., 2021).

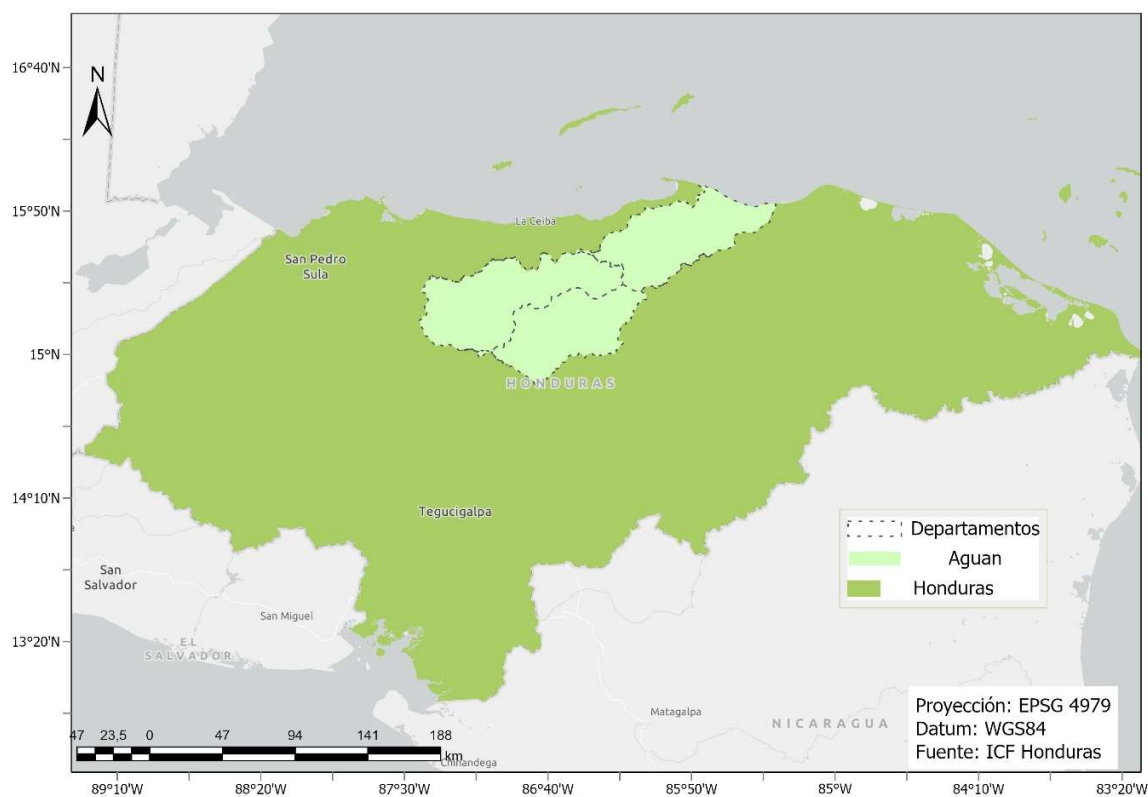
Área de estudio

La Cuenca del Río Aguán se ubica en la región Atlántica norte de Honduras, entre los 15°25' y 16°00' latitud norte y los 85°25' y 87°00' longitud oeste, con un área total estimada de 11 005 km² y aproximadamente 653 256 habitantes, ha sido caracterizada como altamente vulnerable a inundaciones y deslizamientos, resaltando las llanuras de inundación en zonas de menor elevación (SECRETARIA DE RECURSOS NATURALES Y AMBIENTE [SERNA], 2005). La Base de Datos de Eventos de Emergencia² reporta 19 inundaciones históricas entre 1900-2022 y la base de datos DesInventar³ de las Naciones Unidas registra 566 reportes de inundación entre 1915-2015, la mayoría de estos eventos corresponden a los departamentos de Colón y Yoro en la cuenca baja, mostrados en la figura 1.1.

² <https://www.emdat.be/>

³ <https://www.desinventar.net/>

Figura 1.1. Cuenca y departamentos



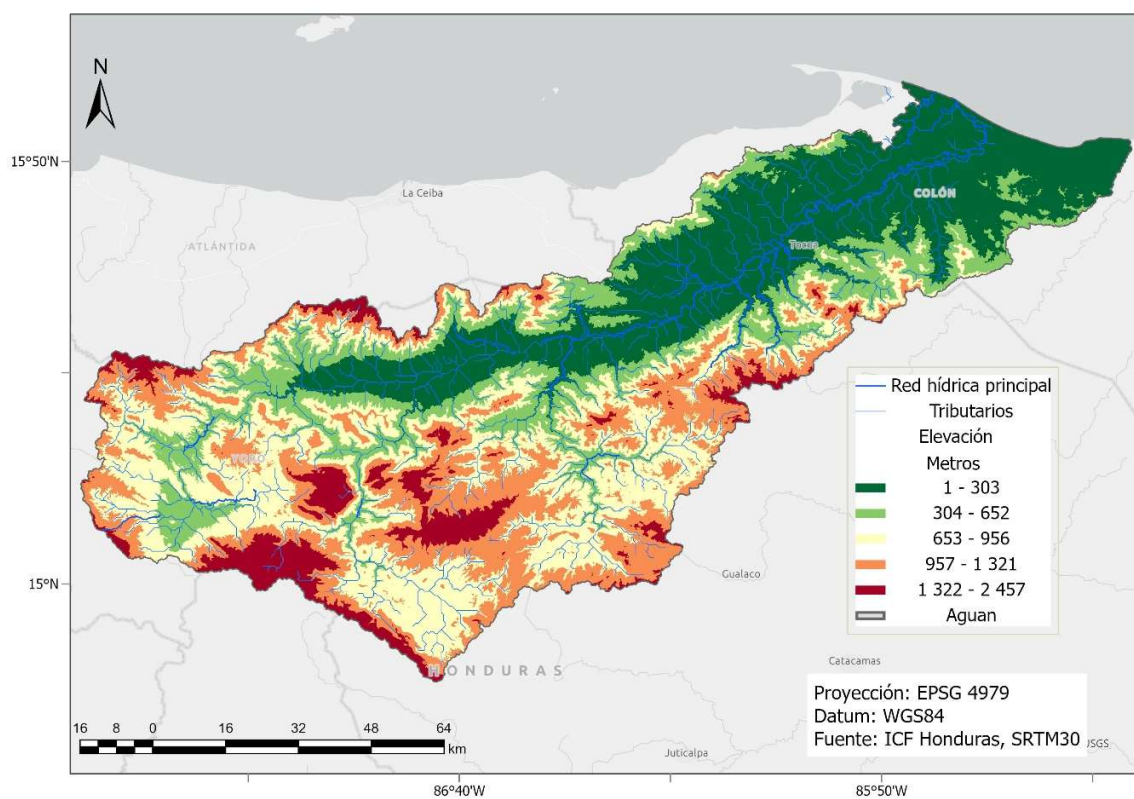
En el anexo figura 1, se muestra la clasificación climática de Köppen-Geiger (Beck et al., 2018), basada en promedios mensuales y anuales de precipitación y temperatura, donde se categoriza la mayoría del área de la cuenca en Climas Tropicales (Af, Am, Aw), presentando también algunas secciones, principalmente alrededor de elevaciones sobre 1 300 msnm, dentro de Climas Templados (Csb, Cwa, Cwb, Sfa, Cfb).

Descripción topográfica

De acuerdo con (SERNA, 2005), topográficamente en la cuenca destacan la cordillera Nombre de Dios en el norte y las montañas de Botaderos y Sierra La Esperanza al sur. La figura 1.2. muestra el análisis de elevación para la cuenca, junto con la red hídrica principal y la red de afluentes, cuya desembocadura se ubica en la costa Caribe. Este análisis de elevación permite identificar por medio de los valores de altura, las llanuras de inundación

en la cuenca media y baja. Asimismo, el anexo figura 2. muestra un mapa con los datos correspondientes a las pendientes para el sitio de estudio, este parámetro es importante para referencia, puesto que luego en la metodología se utiliza para dejar fuera de los cálculos de inundación a aquellas zonas con pendientes más altas que un determinado valor e igualmente, la mayoría de valores bajos de pendiente se encuentran en el área de baja elevación.

Figura 1.2. Topografía y red hídrica.



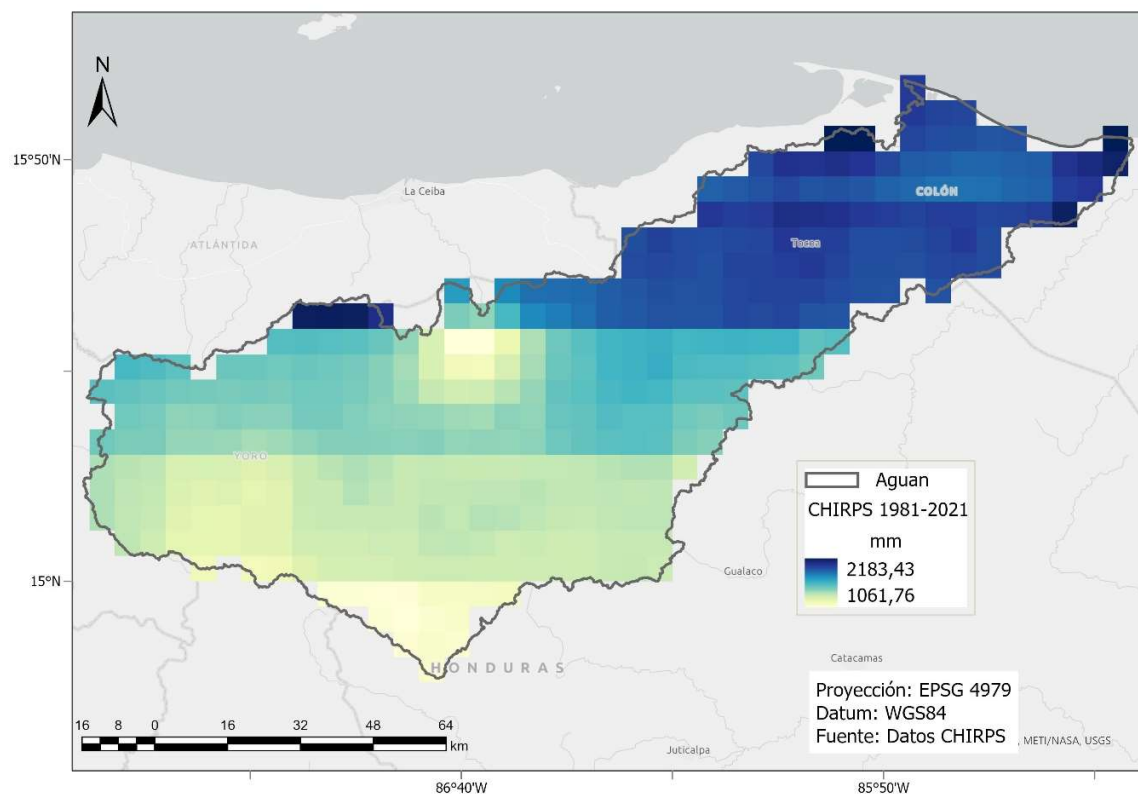
Precipitación

Al no contar con estaciones meteorológicas dentro de la cuenca, se presenta a continuación una caracterización simple de la precipitación en Aguán, con base en datos de precipitación disponibles en la base de datos del Grupo de datos de Estaciones de Amenazas Climáticas y Precipitaciones Infrarrojas (CHIRPS por sus siglas en inglés) (Funk et al., 2015). La selección de esta base de datos, sobre otros productos globales, es primeramente por su

disponibilidad dentro de la plataforma Google Earth Engine, y también por ser considerado un producto que registra efectivamente los extremos de precipitación en los trópicos (Gupta et al., 2020).

A continuación, se presenta la distribución geoespacial de los valores promedios de precipitación anual para la cuenca (figura 1.3.). En la visualización, se puede constatar que ciertas zonas en la parte media y baja de la cuenca, las cuales presentan los valores más altos de precipitación promedio en la serie de tiempo analizada, que abarca desde 1981 al 2021, de acuerdo con código de GEE de Ujaval Gandhi, (Ghandi, 2020), y datos de precipitación CHIRPS (Funk et al., 2015).

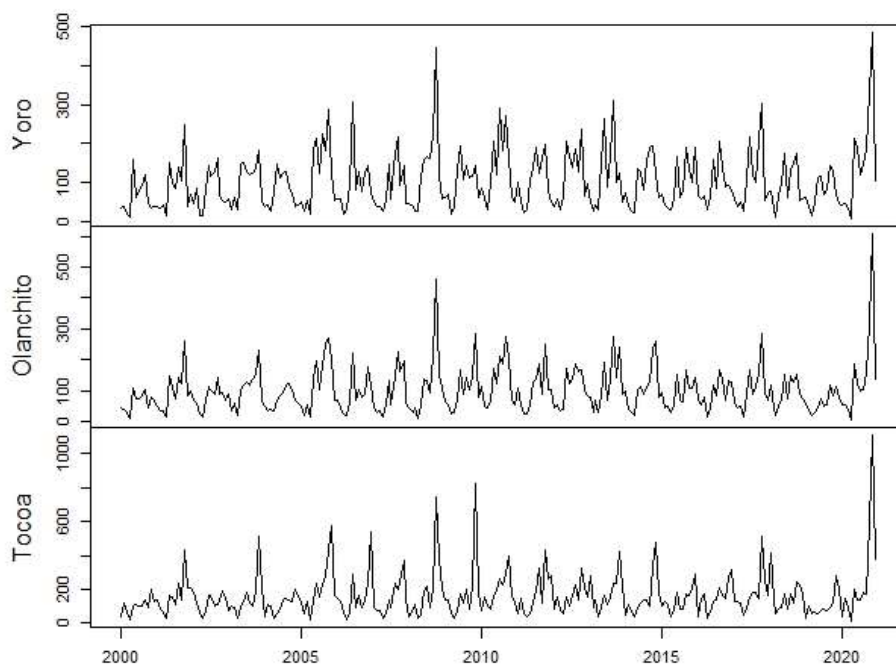
Figura 1.3. Promedio anual de precipitación Aguán (1981-2021).



La figura 1.4. muestra las series de tiempo de precipitación mensual acumulada en tres locaciones ubicadas en la cuenca alta, media y baja, respectivamente, entre el 2000 y el 2020.

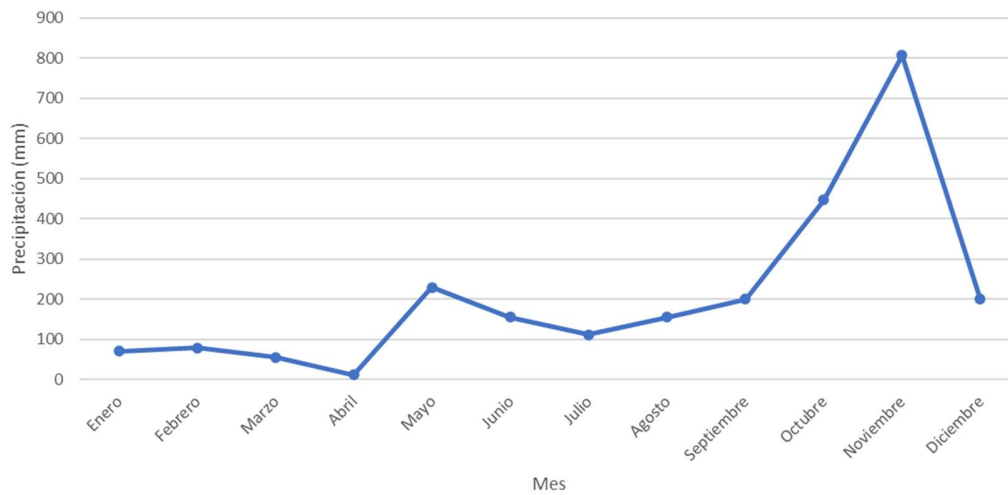
Estas series de tiempo de CHIRPS ilustran un marcado incremento en los valores de precipitación para los tres puntos de referencia dentro de la cuenca a finales del 2020, cuando los huracanes afectaron Honduras, claramente superiores a los números históricos para el resto del período analizado. El punto en Tocoa, con una elevación de 43 msnm, presenta los valores más altos reportados de precipitación cerca de los meses finales del 2020, con valores por encima de los 1 000 mm.

Figura 1.4. Series de tiempo de precipitación mensual acumulada, en mm, período 2000-2020 a partir de datos CHIRPS.



El análisis de la precipitación acumulada mensual, a nivel de la cuenca y específicamente para los meses del 2020 (figura 1.5.), muestra un registro de valores altos correspondientes a finales del mes de octubre y mediados de noviembre, fechas en las que se presentaron los huracanes Eta e Iota.

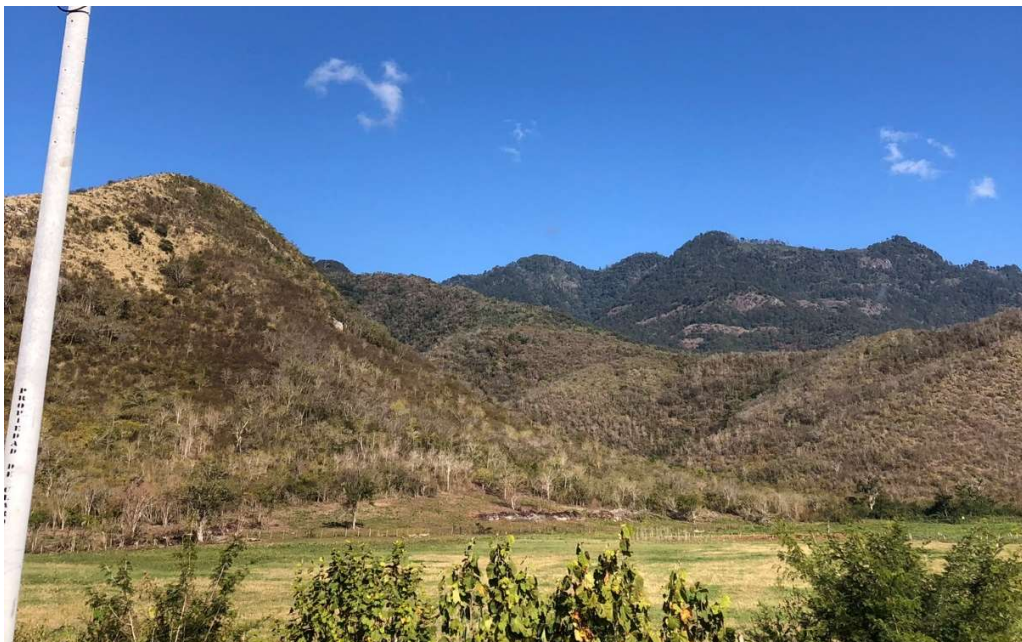
Figura 1.5. Precipitación mensual promedio para toda la Cuenca Aguán, en el año 2020.



Coberturas y usos de suelo

Anteriormente ya se ha hecho mención a la susceptibilidad a erosión en la parte alta y media de la cuenca (SERNA, 2005), lo cual se puede observar con un ejemplo en la figura 1.6., donde se aprecia parte de la montaña en las cuales la cobertura boscosa ha disminuido debido a actividades de ganadería principalmente.

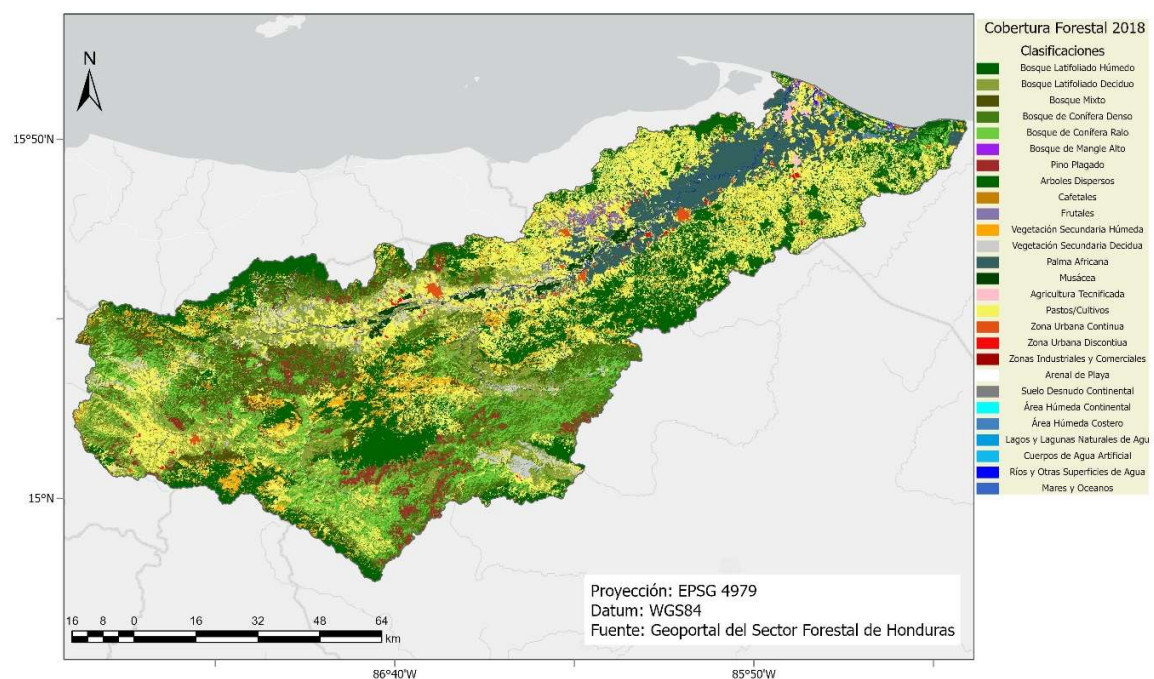
Figura 1.6. Fotografía detalle coberturas en zona montañosa, cuenca media, 2023.



En el Geoportal del Sector Forestal de Honduras⁴ se obtiene la clasificación nacional para el 2018 (figura 1.7.). Esta clasificación brinda el detalle en torno a cultivos que se manejan en la cuenca de Aguán, entre los que destacan la Palma Africana en los sectores medio-bajo de la misma y musáceas cubriendo gran extensión del territorio de la cuenca.

Se puede apreciar, además, el desarrollo tanto a nivel de vivienda como de cultivos, en la cercanía a la red hídrica principal. Esto concuerda con impresiones obtenidas en visitas de campo, en las cuales varios habitantes mencionaron la fertilidad de las zonas ubicadas en la vega del río.

Figura 1.7. Cobertura Forestal (GSFH, 2018).



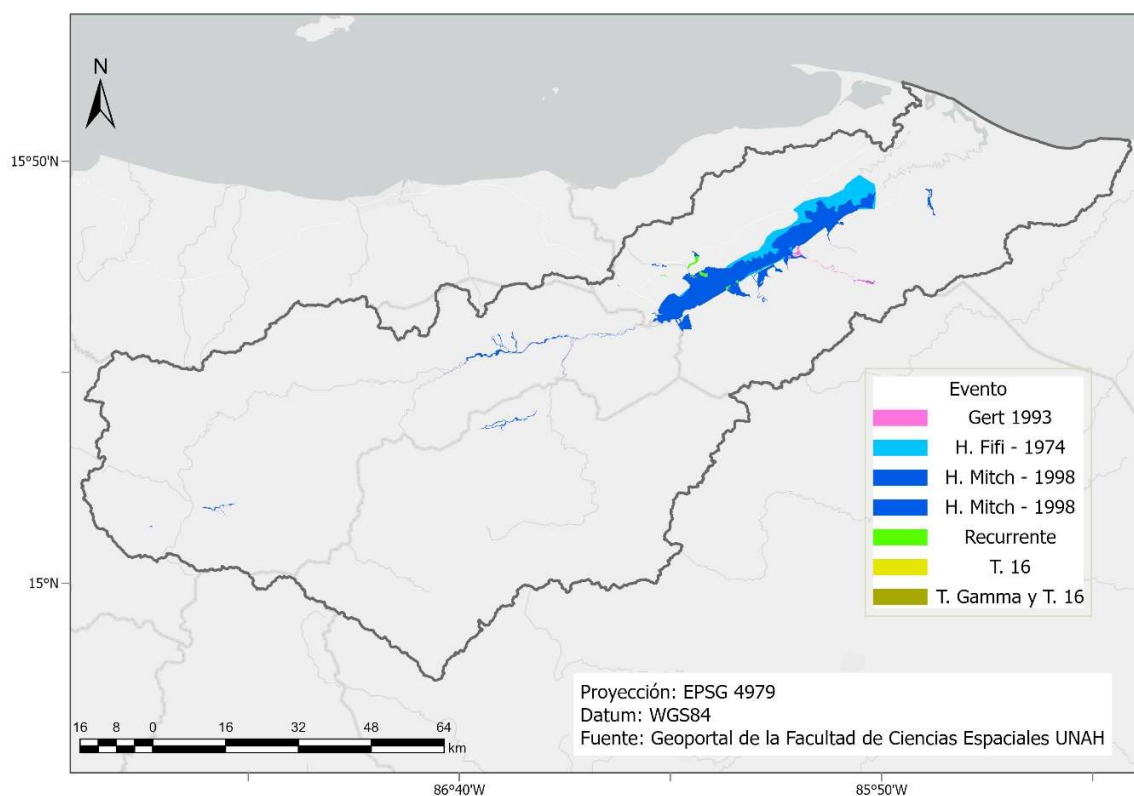
Históricos de inundaciones

Dentro del proyecto Mitigar, liderado por la institución COPECO se generó información acerca de inundaciones históricas para todo Honduras, estos datos se encuentran disponibles

⁴ <http://geoportal.icf.gob.hn/geoportal/main>

en la plataforma de acceso libre Geoportal de la Facultad de Ciencias Espaciales de la Universidad Autónoma de Honduras⁵. En la figura 1.8. se presentan los resultados, específicamente para la cuenca de Aguán, donde se puede comprobar que las zonas de baja elevación y pendiente, principalmente en la zona media y baja de la cuenca es donde más se han presentado eventos históricamente. Se muestran los eventos de los huracanes Fifi, Gert y Mitch, de 1974, 1993 y 1998 respectivamente, además de inundaciones asociadas a los eventos específicos Tormenta Gamma y Tormenta 16. Así como eventos recurrentes que no están relacionados con ningún tipo de formación hidro climática en particular, sino más bien lluvias estacionales.

Figura 1.8. Inundaciones Históricas (Proyecto Mitigar).



⁵ <https://geoportalouot.unah.edu.hn/>

Afectación según reportes en prensa

Es pertinente detallar cómo los medios de prensa reportaron la afectación en cultivos, dado que brinda referencia acerca de la magnitud de los eventos en el sector agrícola. Se tiene por tanto, que luego de Eta se habló de daños en más de 29 000 ha de cultivos totales, el frijol (4 755 ha) y el arroz (1 400 ha) los principales afectados a escala de país y se menciona el departamento de Olancho como uno de los afectados (La Prensa, 2020) (Teleprensa, 2020). (El Pulso, 2020), agregó que Eta específicamente también dañó cultivos de maíz, en ese momento calculados en 880 ha y se anotó 35 000 ha de banano afectado por estar sumergido en agua, además de agregar que los cultivos reciben estrés adicional por plagas y enfermedades asociadas a las condiciones de humedad.

(Diario La Tribuna, 2020), también comprobó afectaciones en varios cultivos, detalló que la empresa Standard Fruit Company perdió 2 000 ha de banano y cómo las autoridades monitorearon zonas en Colón para saber si el río afectaba también arroz o plantaciones de árboles frutales de naranja. Un coordinador de la Unidad de Agronegocios de la Secretaría de Agricultura y Ganadería en Honduras, reportó al diario digital Hondudiarario que las pérdidas de frijol en el país luego de Eta e Iota ascendieron a alrededor de 40 000 ha (Hondudiarario, 2020).

El mismo diario (La Prensa, 2021), dos meses luego de Eta e Iota, publicó una nota en la cual se especifica que más de 18 000 ha de palma aceitera se perdieron en Honduras por estos eventos. Aguán forma parte de las zonas en la costa Atlántica que presentan desarrollo de este cultivo en el país y se resalta que las inundaciones, manteniendo condiciones de agua que cubrió los cultivos, ocasionó que estos se pudrieran y por tanto no lograran recuperarse, y solamente un 20% se pudo recuperar.

Objetivo General

Desarrollar una metodología para estimar la extensión espacial de inundaciones a partir de imágenes radar de apertura sintética (SAR) para utilizarse en análisis de posibles relaciones con impactos en cultivos.

Objetivos Específicos

- Calcular la extensión de inundación causada por los huracanes Eta e Iota en la cuenca del río Aguán en Honduras del año 2020.
- Analizar la efectividad de la metodología a partir de imágenes SAR obtenidas de productos satelitales de acceso libre en la evaluación de área inundada e impactos en cultivos.
- Evaluar el uso potencial por parte de interesados a nivel regional o local.

Marco Teórico

Componentes del riesgo

Analizar el riesgo requiere el entendimiento de la interacción de sus principales factores, dentro de los cuales se habla comúnmente de la amenaza, la exposición y la vulnerabilidad, mismos que se consideran dinámicos (Allen, 2015). La Red Iberoamericana de Oficinas de Cambio Climático los desarrolla de la siguiente manera: la amenaza es el potencial de que ocurran eventos, sean naturales o directamente inducidos por el ser humano, donde se presenten impactos en la salud humana, daños o pérdidas en propiedades, infraestructura, medios de subsistencia, provisión de servicios, ecosistemas y recursos ambientales. Por otra parte, la exposición se relaciona con la presencia de personas, medios de subsistencia, especies o ecosistemas, funciones ambientales, servicios y recursos, infraestructura o bienes económicos, sociales o culturales en entornos en los cuales se puedan ver afectados de

manera negativa. Y por último, la vulnerabilidad es una medida de predisposición a ser afectado negativamente por eventos, se puede incluso determinar grados de sensibilidad o susceptibilidad al daño y capacidades para sobrellevar un impacto y adaptarse (Moreno Rodríguez et al., 2020).

(Pathak, 2021), ejemplifica que, si se presentan cambios en la frecuencia e intensidad de las precipitaciones, en ciertas regiones esto representa aumentos en niveles de agua que fluye en ríos y cambios así en la exposición específica de un lugar. Respecto a riesgo de inundaciones específicamente, autores como (Sene, 2008), simplifican su abordaje al expresarlos mediante la combinación de dos factores principales, como son la probabilidad (comúnmente conocida como amenaza) y la consecuencia (impacto de los eventos). Sin embargo, esto deja por fuera elementos necesarios para trabajar de manera preventiva, como lo es la resiliencia.

La conceptualización de resiliencia se ha visto relacionada más al ámbito de la gestión y la gobernanza, donde (Baird et al., 2021), resaltan los conceptos de persistencia, como la habilidad de cambio de un sistema a la vez que se absorben perturbaciones y manteniendo la misma identidad o funciones, la adaptabilidad, siendo el grado de ajuste de las acciones de los actores para influenciar resiliencia y luego la capacidad de transformación, como una capacidad de convertirse en otro tipo de sistema cuando el sistema actual ya no es alcanzable. (Rentschler, 2013), hace eco de una conceptualización comúnmente relacionada a este elemento, al decir que se puede construir resiliencia, algo que se puede encontrar en otras publicaciones y planes.

Similarmente a la adaptación al cambio climático, la resiliencia es un proceso que depende del contexto y ubicación específicos, su fomento en las comunidades contribuye al bienestar de la población, aumento en la seguridad de bienes, ecosistema y servicios en el presente y

futuro, por medio de la promoción de la integración de esta visión en la planificación, diseño de políticas, toma de decisiones y sinergias entre desarrollo y reducción de riesgo a desastres (Allen, 2015).

Estrategia de reducción de riesgo a desastres

La gestión integrada del recurso hídrico (GIRH) y la reducción de riesgo a desastres, tienen similitudes dado que ambas impulsan un abordaje interdisciplinario y alianzas políticas, técnicas, público-privadas (Agarwal, 2000). Las políticas en GIRH a escala regional y nacional, se pueden convertir en plataformas para la generación de sinergias muy útiles entre estos dos procesos de gestión y así adecuarlos a las realidades locales (Allouche, 2016). A grandes rasgos, la estrategia de reducción del riesgo de desastres plantea el reto del cambio social que significa, pasar de la atención de los desastres a enfocarse en la prevención mediante la gestión de los riesgos, con la consecuente reducción de las posibles pérdidas relacionadas a estos eventos (United Nations Office for Disaster Risk Reduction [UNDRR], 2019).

El Marco Sendai enfatiza que para reducir el riesgo se deben evitar decisiones que crean precisamente riesgo, trabajar en reducir el riesgo existente y crear resiliencia, esto último fuertemente ligado al desarrollo sostenible (UNDRR, 2019). Asimismo, apoyar el fortalecimiento de la resiliencia puede realizarse desde varios ángulos, para la actual investigación se busca que desarrollando una metodología fiable que permita aportar datos para el accionar a nivel de cuenca en cuanto a eventos de inundación, se pueda robustecer igualmente la acción preventiva en torno a desastres, al ser una referencia luego para la caracterización de otros componentes del riesgo local como la amenaza y la exposición al riesgo de inundaciones.

En Honduras se han realizado análisis de la gestión integral del riesgo a desastres, considerando las dimensiones social, económica, ambiental y político-institucional, así como la labor en adopción de instrumentos y mecanismos internacionales y regionales que permitan fortalecer las instituciones nacionales responsables de promover y coordinar la reducción del riesgo (Comisión Permanente de Contingencias [COPECO], 2013). Estos estudios resaltan que el fortalecimiento de la resiliencia comunitaria, entendida como la capacidad de asimilación y recuperación después del evento, genera mayor capacidad para atender los desastres que afectan negativamente a la población.

Políticas en reducción de riesgo a desastres

Para el contexto asociado a la gestión de riesgo a desastres, en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible (Río +20) del 2012 se realizaron observaciones clave acerca de la seguridad alimentaria, enfatizando que los impactos de eventos climatológicos extremos presentan una oportunidad para su análisis, cuantificación y reducción, ya que son disruptivos en la cadena de suministros de alimentos (Beer, 2018). Luego, en el 2015 las Naciones Unidas publican el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030 (RRD), un instrumento para atenuar posibles pérdidas en vidas, medios de subsistencia y salud provenientes de eventos extremos (United Nations, 2015). En 2017, el Sistema de la Integración Centroamericana (SICA) en conjunto con la Coordinación para la Prevención de los Desastres Naturales en América Central (CEPREDENAC) formulan y promulgan la Política Centroamericana de Gestión Integral de Riesgo de Desastres (PCGIR), con énfasis en orientar las acciones de gestión integral de riesgo de desastres en la región y a nivel nacional para cada país. El Plan Regional de Reducción de Riesgo de Desastres, brinda indicadores y acciones para usarse en los países miembros de la región centroamericana (CEPREDENAC, 2017).

Antecedentes tecnología satelital y RRD en la región

Dentro del alcance de las tecnologías de teledetección en su aplicación a nivel regional, destaca el esfuerzo de cooperación interinstitucional entre varias universidades centroamericanas para trabajar en la reducción de riesgo de desastres mediante el lanzamiento de un satélite CubeSat en la misión espacial llamada Proyecto Morazán, para fortalecer la alerta temprana a inundaciones y deslizamientos, es ciertamente un precedente en el marco de la incursión centroamericana en el ámbito espacial (Monge, 2019). El Instituto de las Naciones Unidas para Formación Profesional e Investigaciones (UNITAR, por sus siglas en inglés), elaboró un análisis preliminar de población afectada por una inundación de Noviembre del 2020, a partir de imágenes SAR de Sentinel-1 para los departamentos guatemaltecos de Alta Verapaz, Izabal y Zacapa, se analizó una área de 15 000 km² de la cual se detectaron 170 km² inundados, afectando aproximadamente a 17 500 personas según referencia de datos poblacionales de Worldpop (UNITAR - UNOSAT, 2020).

(Quesada-Román y Villalobos-Chacón, 2020), utilizaron imágenes SAR en el análisis de inundaciones ocasionadas por el huracán Otto en el norte de Costa Rica, ocurridas en el 2016. El uso de estas imágenes sirvió de apoyo para identificar la extensión de áreas inundadas en los poblados afectados y relacionarlas con áreas de diferentes categorías de riesgo predefinido. Asimismo, en Honduras, el Observatorio Universitario de Ordenamiento Territorial ha gestionado y hecho público un geoportal donde se mapean las áreas afectadas por las tormentas Eta y Iota a partir de imágenes Sentinel-1. Para Eta se realizó solamente para el Valle de Sulá, mientras que para Iota se generó para todo el país.

Desde el programa SERVIR de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA), se ha publicado un repositorio⁶ con mapas que presentan análisis realizados para los huracanes Eta e Iota. Igualmente, el proyecto HYDRAFloods, que inicialmente se trabajó para países asiáticos, trabaja actualmente en su implementación para Latinoamérica y el Caribe. Este proyecto usa datos de la misión Copérnico mediante una aplicación en lenguaje de programación Python, vinculada a Google Earth Engine en el procesamiento de imágenes satelitales para obtener mapas de extensión de agua superficial.

Cálculo de extensión de inundación con SAR

En un sentido simplificado, se va a entender que una inundación es la cobertura temporal con agua, de terreno que normalmente no está cubierto por agua (Anusha y Bharathi, 2020). Esta conceptualización es clave, puesto que con SAR se van a analizar coberturas y extraer elementos de las imágenes satelitales analizadas, tales como áreas cubiertas por agua abierta presentes en los datos detectados por el sensor de radar, las cuales no están inundadas antes ni después del evento. No siempre van a coincidir, las fechas del paso de los satélites de radar con los momentos en los cuales los sitios analizados presentan agua abierta, sin embargo, en algunos eventos de inundación las condiciones se mantienen por varios días, lo que aumenta las posibilidades de detección por estos.

Principios de radar de apertura sintética (SAR)

Un radar de apertura sintética es un radar de imágenes, instalado en una plataforma en movimiento, similar a un radar tradicional emite pulsos de onda electromagnéticos, la antena registra los ecos de retrodispersión que regresan a esta. Los tiempos consecutivos de transmisión y recepción corresponden a diferentes posiciones del satélite, debido que el

⁶ Productos NASA para Eta e Iota:

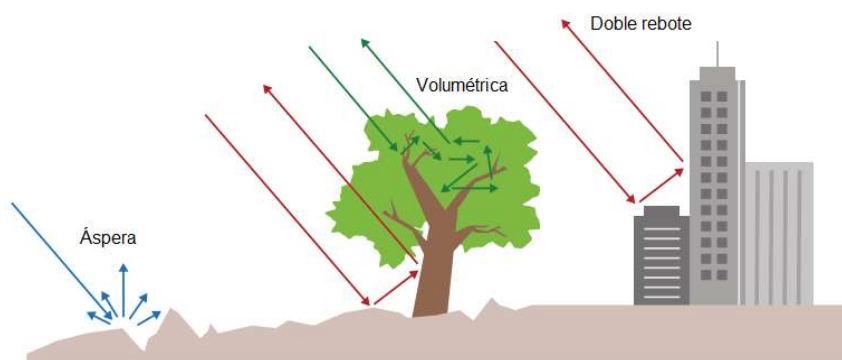
<https://maps.disasters.nasa.gov/arcgis/apps/MinimalGallery/index.html?appid=a8c2b8a227a84ae685bfb09249d7bd2a>

mismo se encuentra en movimiento, y los registros se combinan en una etapa de post procesamiento, con lo que se obtiene un producto que permite la construcción virtual de una apertura mucho mayor al tamaño de la antena física instalada en la plataforma (Moreira et al., 2013).

Contrario a las imágenes captadas por sensores ópticos, sobre las cuales se hará mención más adelante, los parámetros de los sensores radar son estables y los registros de los valores que se obtienen en cada píxel no se ven afectados por el ángulo de incidencia de la luz solar, valores que se muestran comúnmente en términos de la reflectividad correspondiente al punto sobre el terreno (Flores et al., 2019; Moreira et al., 2013).

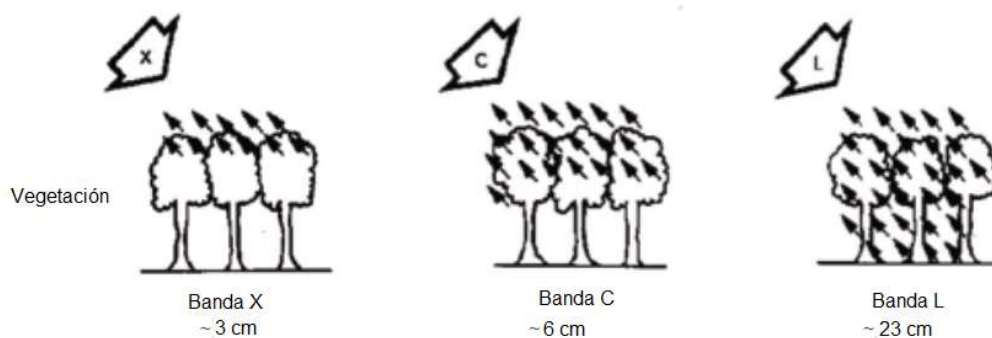
Como han explicado Flores-Anderson et al., (2019), la retrodispersión es una relación entre la señal emitida y recibida, y debe ser interpretada de acuerdo a las características de la escena a analizar, como pueden ser la aspereza de la superficie y las propiedades dieléctricas de los objetos en la imagen. Estos mismos autores destacan tres tipos de retrodispersión principales, de cobertura áspera, de doble rebote y volumétrica, según sean las características físicas del medio con el cual se pone en contacto la onda del radar (ver figura 1.9.).

Figura 1.9. Esquema de los tres tipos principales de dispersión considerados para los datos SAR (Flores et al., 2019, p. 28).



Haciendo mención a las propiedades dieléctricas de un medio, la siguiente figura 1.10. ejemplifica el concepto de cómo el tamaño de onda (λ) influye en la penetración de las señales de radar a través de la vegetación. Debido a que la longitud de onda de las señales utilizadas en el presente trabajo es de Banda C, se debe inferir por tanto que no es un objetivo metodológico el analizar inundación debajo de vegetación, ya que estas no van a brindar información correspondiente al área debajo del dosel y por tanto se utilizarán para el análisis de aguas abiertas o inundación que se registre sobre la altura de la vegetación presente en las escenas.

Figura 1.10. Penetración de la señal SAR por la longitud de onda del sensor λ (Flores et al., 2019, p. 26).



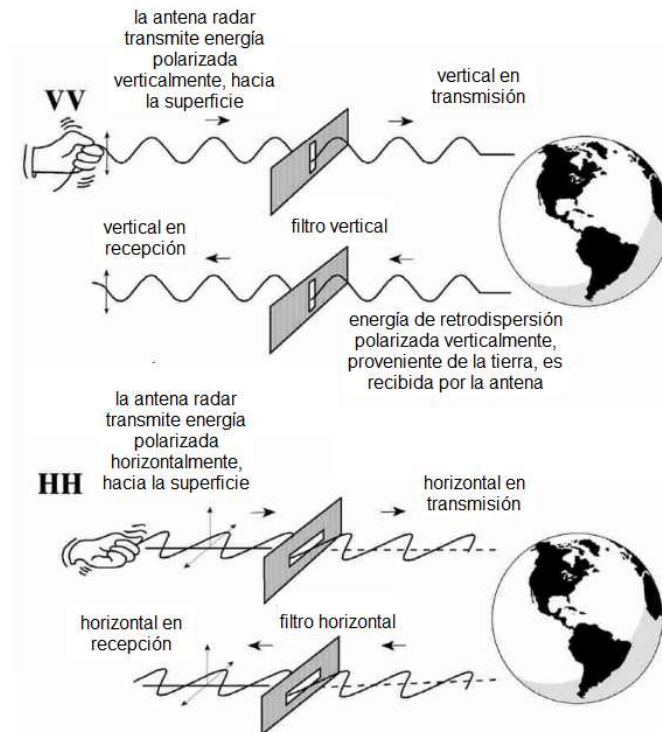
En referencia a la geometría oblicua de observación, inherente de los radares de imágenes, características del terreno, tales como la pendiente en la superficie, se tienen que considerar ya que puede influir en distorsiones por escuadra, escala y sombra. Escuadra trata sobre pendientes observadas que parecen inclinadas hacia el sensor, escala es cuando los topes de las montañas se ven adelantadas en relación a su base y la sombra se relaciona directamente con el ángulo de observación (Flores et al., 2019, p. 24).

Por otra parte, las propiedades radiométricas de las detecciones SAR se caracterizan por causar que las imágenes crudas presentan un efecto de moteado, conocido como “sal y pimienta”, mismo que puede llevar a incertidumbres en las medidas y afectar la precisión del

análisis (Anusha y Bharathi, 2020). El moteado es comúnmente tratado como un ruido en los registros y no puede reducirse por medio de incrementos en la intensidad de la señal, puesto que se genera de manera determinística en los datos SAR debido a la integración coherente de señales de retrodispersión provenientes de varios objetivos en la celda de resolución, por lo tanto se reduce aplicando filtros en los datos, que se presentarán más adelante (Hajnsek y Desnos, 2021; Sivasubramanyam Medasani y G. Umamaheswara Reddy, 2018).

SAR es un instrumento activo con su propia fuente de iluminación, lo que le permite controlar las polarizaciones de las señales que emite y las señales de retrodispersión que recibe de regreso, siendo esta polarización la orientación del plano de oscilación en una señal propagada (Flores et al., 2019, p. 27). Usualmente estas polarizaciones se controlan entre planos H (horizontal) y V (vertical), para sensores de cuatro polarizaciones se pueden llegar a tener combinaciones en las cuales el sensor alterna entre transmitir formas de onda polarizadas en H o V, con posibilidad de tanto H o V en recepción (ver ejemplo de VV y HH en la figura 1.11.).

Figura 1.11. Ejemplo conceptual para las polarizaciones VV y HH (Podest y McCartney, 2019).



Conocer la polarización y tomar decisiones acerca de la que sea preferible para un estudio, dependerá en gran manera de los tipos de retrodispersión, como se mostró en la ilustración 1, ya que estos tipos de retro dispersores contribuyen en diferentes medidas a la polarización de los canales de transmisión y aquí destaca que la polarización VV tiene una fuerte potencia de dispersión polarimétrica en retro dispersores del tipo áspero como lo son los suelos sin cobertura o las aguas abiertas (Flores et al., 2019, p. 28). Por lo tanto, la retrodispersión VV es generalmente preferida para detectar agua de inundación (DeVries et al., 2020). Otros autores apoyan esta selección, al anotar que VV provee una leve ventaja al identificar la huella espectral de inundación con datos de Sentinel-1 (Clement et al., 2018).

(Flores et al., 2019), mencionan que, en la medida de retrodispersión, conocida como sección transversal de radar (σ), influyen los tipos de retro dispersores, pero también la aspereza

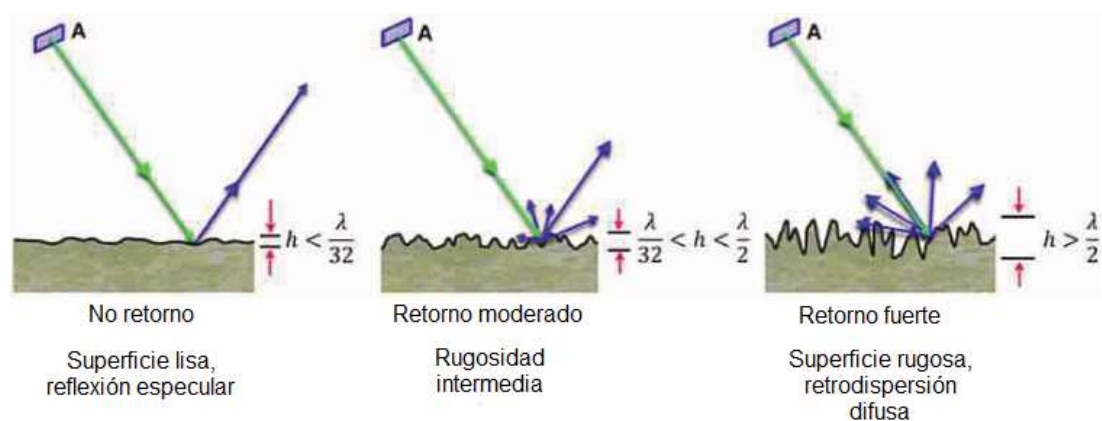
detectada por las imágenes de radar, la cual tiene relación directa con la longitud de onda. Para referencia de lo anterior la siguiente ecuación del criterio de Fraunhofer pondera que una superficie se define como rugosa, si las desviaciones de altura superan el $h_{aspereza}$, en este criterio λ es el tamaño de onda y θ es el ángulo de incidencia:

Ecuación 1.1. Criterio de Fraunhofer.

$$h_{aspereza} > \frac{\lambda}{\cos 32 * \theta_i}$$

Se puede decir, por tanto, que una misma superficie podría verse rugosa por una longitud de onda pequeña, pero lisa si se detecta con una longitud de onda más grande. Esto es sumamente importante, ya que, como se ejemplifica en la figura 1.12., si el radar detecta una superficie como lisa, no va a haber retorno de la señal al sensor, en comparación con los valores que se podrían registrar en superficies que se detecten como más o menos rugosas.

Figura 1.12. Esquema conceptual de la dependencia de la rugosidad de la superficie con la longitud de onda del sensor λ : lisa, intermedia y rugosa.



Las superficies de aguas abiertas se comportan como reflectores especulares, caracterizadas por bajos valores de retrodispersión, por lo cual se facilita la diferenciación de estas coberturas con otras que no presentan agua superficial, además que visualmente las

coberturas con agua superficial se observan más oscuras en las imágenes SAR (Clement et al., 2018; DeVries et al., 2020; Tsyganskaya et al., 2018a).

Datos SAR del Programa Copérnico

Dentro del grupo de misiones del programa Copérnico de la Unión Europea, se cuenta con sistemas SAR. La constelación de la misión Sentinel-1, lanzada por la Agencia Espacial Europea en 2014 y 2016, consiste de dos satélites idénticos (Sentinel-1 A/B), los cuales ofrecen dos modos operacionales principales en seis días de repetición. Espacialmente, cubren el total de las masas de tierra globales, zonas costeras, hielo marino, áreas polares y rutas marítimas en alta resolución, necesarios para los usos subsecuentes y servicios operacionales relacionados (DeVries et al., 2020; Torres et al., 2012).

Los datos SAR de Sentinel-1 comúnmente se encuentran disponibles luego de pocas horas del paso del satélite, permitiendo un análisis de extensión de inundación con alta resolución temporal y espacial (10 metros por píxel) de imágenes gratuitas (Clement et al., 2018; Mullissa et al., 2021), se escoge también el modo interferométrico de barrido amplio (IW) por su cobertura global (Tripathy y Malladi, 2022). Esta disponibilidad de los productos está soportada por un segmento de alta capacidad en tierra, que procesa, archiva y ofrece sistemáticamente todos los productos de datos generados, para ponerlos a disposición de los usuarios en línea de una manera rutinaria (Flores et al., 2019).

Ambos satélites de la misión están equipados con un sensor de Banda-C (longitud de onda= 5.6 cm) (Tsyganskaya et al., 2018a), esta longitud de onda en particular es conocida por tener limitaciones para penetrar doseles de vegetación densos, pero ha sido utilizada en muchos estudios como una banda eficiente para la detección de vegetación inundada en zonas poco densas de vegetación (Tsyganskaya et al., 2018b). Los datos de Banda-C provenientes de Sentinel-1 se ofrecen en múltiples modos de polarización (Flores et al., 2019).

Procesamiento de las imágenes SAR

Antes de extraer información de las imágenes SAR se requiere realizar un preprocesamiento de las mismas, a razón de atenuar efectos propios de la tecnología de los sensores radar o contar con datos de información geográfica asociada. Para esto se puede utilizar software como SNAP, recomendado por (Espinoza Cisneros et al., 2020), o bien, manipular imágenes obtenidas directamente desde plataformas tales como Google Earth Engine⁷, Sentinel Hub⁸ o el portal del Centro Satelital de Alaska⁹, por mencionar algunas. Para el presente trabajo, se utilizará Google Earth Engine (GEE), puesto que las imágenes disponibles desde esta plataforma han pasado por procesos de corrección de ruido térmico emitido por los sensores a bordo del satélite durante la adquisición de los datos, calibración radiométrica, para que los valores de píxel de las imágenes representen verdaderamente la retrodispersión del radar de la superficie reflectante en unidades físicas y, por último, corrección de terreno, utilizando SRTM 30, al convertir los datos de geometría de rango inclinado a un rango terrestre proyectado en un sistema de mapa de coordenadas, rectificando distorsiones como escorzo, inversión por relieve o sombra, relacionadas a las características de geometría de las imágenes, como se mencionó anteriormente (Tiwari et al., 2020).

Las imágenes de Sentinel-1 disponibles en GEE, forman parte de los que se conocen como productos de amplitud, imágenes a las cuales se les ha retirado la información acerca de su fase y su intensidad ha sido promediada espacialmente, para disminuir el moteado y crear píxeles de tamaño aproximadamente cuadrado (Flores et al., 2019, p. 33). Esto hace que las imágenes se hayan degradado un poco en su resolución, pero aumenta la interpretabilidad de sus datos (Moreira et al., 2013). Aun así, estos datos en GEE se deben manipular para atenuar

⁷ <https://earthengine.google.com/>

⁸ <https://www.sentinel-hub.com/>

⁹ <https://asf.alaska.edu/>

su efecto de moteado, utilizando filtros de moteado temporales o espaciales, reduciendo todavía más el efecto granulado (Espinoza Cisneros et al., 2020; Tsyganskaya et al., 2018b).

(Sivasubramanyam Medasani y G. Umamaheswara Reddy, 2018), compararon los principales filtros de moteado: Lee, Lee refinado, Lee-Sigma y Lee-Sigma mejorado, entre los cuales el Lee-Sigma mejorado presenta una la mejor conservación satisfactoria de los objetivos puntuales, la resolución espacial y las características espaciales entre todos. Sin embargo, destacaron que las eficiencias computacionales de los filtros Lee refinado y Lee-Sigma mejorado eran comparables porque ambos funcionan sobre la base de estadísticas locales (Sivasubramanyam Medasani y G. Umamaheswara Reddy, 2018, p. 7).

Por lo tanto se aplica en el presente trabajo el filtro Lee refinado, su principio de funcionamiento parte de lo que ya realizaba el algoritmo para el filtro Lee, mismo que obtiene una varianza y una media previas de cada píxel a partir de la varianza y la media locales del píxel, pero en el Lee refinado, la varianza y la media local se estiman a partir de un grupo reducido de píxeles en función de la dirección del borde, con lo que se logra eliminar el ruido a lo largo del borde, mejorando la nitidez y manteniendo detalles locales (Hajnsek y Desnos, 2021; Sivasubramanyam Medasani y G. Umamaheswara Reddy, 2018, p. 1).

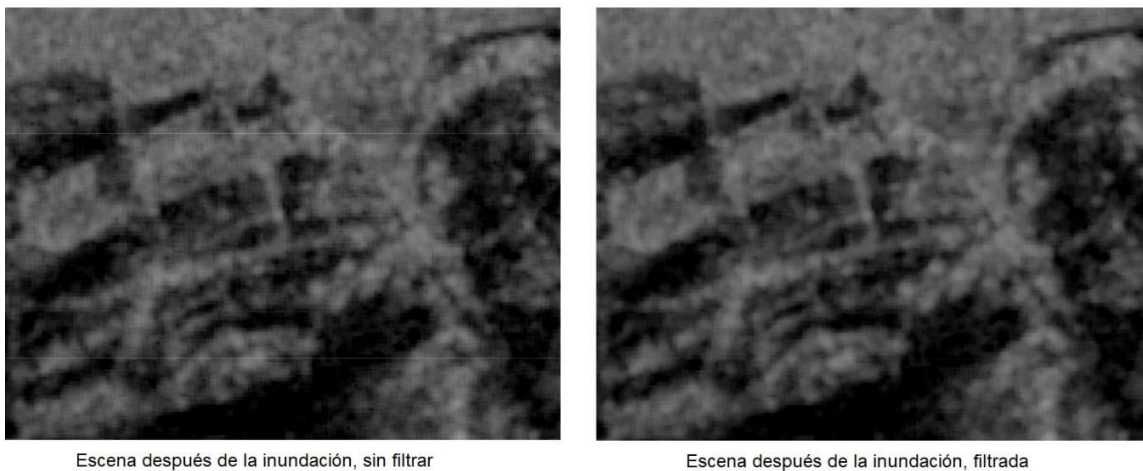
(Lemoine, 2016), publicó una fórmula para aplicar el filtro Lee refinado en GEE, basado en la versión SNAP 3.0 S1TBX de la caja de herramientas digital para procesamiento de datos de Sentinel-1, publicada por la Agencia Espacial Europea¹⁰. Esta fórmula se incluye en el código base del presente estudio, destaca el hecho que, inicialmente pasa los datos a unidades

¹⁰ <https://step.esa.int/main/snap-3-0-is-now-available/>

naturales, realiza el filtrado, para luego volver a establecer los valores de retrodispersión en decibelios ($10\log_{10}(\text{Intensidad})$).

En la figura comparativa siguiente, se aprecia un ejemplo de un área de las imágenes de Sentinel-1 para la escena de después de la inundación en Aguán, previo y post aplicación del filtro Lee refinado. Pese a que a simple vista no sea tan fácil diferenciar el efecto del filtro en las imágenes, se debe tomar en cuenta que también se está mejorando el dato para procesamiento cuantitativo.

Figura 1.13. Comparativa visual de la aplicación del filtro Lee refinado.



Una vez que estas imágenes están listas para poder interpretarse, se debe decidir sobre la técnica de detección por aplicar. El uso e importancia de las imágenes de radar para estimación y análisis de inundaciones está comprobados, lo que varía son las propuestas técnicas, en procesos únicos o combinados, para detectar agua superficial, a partir de analizar valores de retrodispersión, entre los cuales se tiene: umbral de histograma o métodos de agrupación, umbrales radiométricos, cálculo de coherencia por interferometría, algoritmos de crecimiento de región, contorneado estadístico activo, clasificación orientada en objetos, segmentación basada en píxeles, aplicación de redes neurales en un sistema de red,

dimensionamiento fractal de imágenes multitemporales, clasificación difusa y análisis de texturas (Clement et al., 2018; DeVries et al., 2020; Elkhachy et al., 2021; Long et al., 2014). Algunos de estos métodos dependen de información topográfica de alta resolución para su análisis, la cual no siempre está disponible o accesible en todos los sitios de estudio, o bien, requieren de un procesamiento en otras plataformas adicionales (Long et al., 2014).

De las anteriores, se hará énfasis en las técnicas de control de detección de cambios, que comparan varias imágenes finales y detectan los cambios entre ambas, específicamente en la aplicación de un umbral para diferenciación de la cobertura correspondiente a agua de inundación. La detección de cambios, se considera un método con buenos resultados en combinación con umbral de histograma o la segmentación (Long et al., 2014; Singha et al., 2020), destaca los cambios en la cobertura de suelo, utilizando series temporales de imágenes apiladas, al comparar una escena después de la inundación (Ex-post) con una anterior que presente condiciones normales de línea base (Ex-ante), se detecta la diferencia de presencia de agua entre estas escenas y es así cómo se logra extraer el estimado de área inundada (Elkhachy et al., 2021). (Singha et al., 2020), recomiendan que se utilicen imágenes detectadas antes y después del evento para la composición de las escenas, debido a que durante el período clave de inundación se puede presentar aspereza en las superficies del agua, causadas por el viento o la fuerte precipitación, posiblemente complicando la detección. Acorde a lo mencionado por (Clement et al., 2018), se asume que la inundación cause una diferencia negativa considerable debido a reflectividad especular de la señal de radar con el agua, comparada con la normal y más fuerte retrodispersión de las coberturas de suelo o condiciones de referencia, algo que refuerzan también (Anusha y Bharathi, 2020), recomendando esta técnica para su uso con reflectores especulares, como el agua abierta.

(Manavalan, 2017), apunta que, en análisis de la amplitud, en su medida de retrodispersión, en las áreas inundadas se reduce considerablemente los valores de retrodispersión registrados, cuando se comparan con la escena de línea base, además de mencionar que el efecto de doble rebote hará que las zonas inundadas bajo vegetación, por el contrario, aumenten su retrodispersión en la escena Ex-Post.

Es precisamente basado sobre estos principios de la detección de cambios, que el programa de formación en teledetección aplicada de la NASA (ARSET, por sus siglas en inglés), generó su entrenamiento para procesamiento de un mapeo de inundación en Google Earth Engine ((Podest y McCartney, 2019). En el cual se toman escenas antes y después del evento de inundación, a las cuales se les aplica una división entre sí, en base a matemática de ráster, y sobre la imagen de diferencia obtenida se aplica un umbral para resaltar el área inundada que se detecta en la escena luego del evento en comparación con la escena de referencia antes del evento.

(Gandhi, 2020), se basó en la conceptualización del procesamiento propuesto por UN-SPIDER, (United Nations - Space based information for Disaster Management and Emergency Response [UN-SPIDER], 2023), con la diferencia que, UN-SPIDER realiza el procesamiento con el software SNAP y la propuesta de Ujaval es enteramente en Google Earth Engine. La misma incluye la detección de cambios y su posterior aplicación de un umbral.

La selección y aplicación de umbral, es uno de los métodos de clasificación digital más utilizados (Manavalan, 2017), se divide principalmente entre umbrales manuales, semiautomáticos y automáticos (Vanama et al., 2020). Destaca que pueden aplicarse para una sola imagen de inundación (UN-SPIDER, 2023) en la cual se busca destacar el agua

superficial en la escena de inundación a partir de los valores de retrodispersión, o bien, aplicar el umbral en una imagen que se obtiene de la diferencia entre una escena compuesta de imágenes antes del evento y otra escena compuesta de imágenes después del evento, a partir de los valores de diferencia entre escenas (Gandhi, 2020; Podest y McCartney, 2019). En este segundo método, la imagen de diferencia muestra valores de píxel, en los cuales al acercarse al valor de 1, representa la mayor similitud entre las escenas ex ante y ex post, mientras que la medida de valores alejados de 1 representan mayor diferencia entre la escena ex post en referencia a la ex ante. Es a partir de este histograma que se puede realizar una iteración manual de selección de valores de umbral de diferencia, ajustando según los valores de píxel, de forma que se logre detectar la inundación sin sobre o sub estimarla.

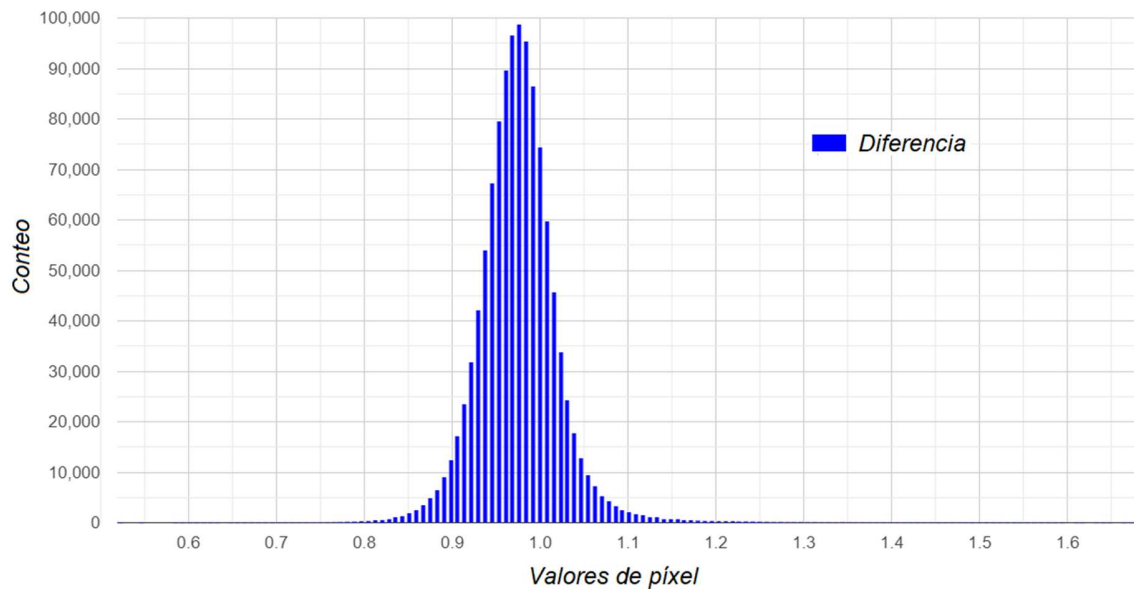
A forma de ejemplo, se presenta la siguiente figura 1.14., con el histograma de los valores de píxel en la imagen de diferencia obtenida para el evento analizado en Aguán, aplicando la expresión de matemática de bandas ráster:

Ecuación 1.2. Cálculo de diferencia entre rásters.

$$D = |\text{flotante}(P)| / |\text{flotante}(A)|$$

En la cual, la diferencia absoluta (D) se obtuvo entre la imagen compilada ex ante (A) y la imagen compilada ex post (P). Mediante la iteración manual, se definió un valor de umbral de 1.141, el cual estipula que todos los píxeles que tengan valor superior a este, se consideran píxeles inundados, esta capa inicial de inundación luego se afina la eliminación de falsos positivos, con otros procesos indicados en la metodología.

Figura 1.14. Histograma de valores en la capa de diferencia entre las escenas ex ante y ex post.



Autores como (Tiwari et al., 2020) utilizaron umbrales automáticos, pero resaltan la aplicabilidad de umbrales seleccionados manualmente, siempre y cuando se cuente con información de referencia en sitio, para el mejor ajuste. (Liang y Liu, 2020), aplicaron un umbral global, para luego definir umbrales locales en su detección. (Mahoney et al., 2020), desarrollaron el uso de umbral automático en Python para crear una máscara de inundación a partir de una sola imagen de análisis. (Long et al., 2014), aplicaron un árbol de clasificación en su método de detección de cambios con umbral, donde también se toma en consideración la varianza de brillo en los datos para el umbral. Estos son solamente unos ejemplos de diferentes acercamientos metodológicos al uso de umbrales, sin embargo, no es objetivo del presente trabajo realizar un extenso mapeado bibliográfico en este tema, para referencia de más técnicas relacionadas, referir a (Manavalan, 2017).

Justamente, (Manavalan, 2017), mencionan que si bien la segmentación del área de estudio, para definir umbrales locales ajustados a las características propias de cada segmento

definido es una forma de evitar falsas detecciones eficientemente, la manipulación manual de un umbral, como se propone en el presente trabajo, obtiene buenos resultados si se cuenta con datos en sitio para referencia, condición que se cumple para el análisis de extensión de inundación actual, provenientes de visitas de campo y referencia cruzada con datos de teledetección.

Limitaciones en el uso de imágenes SAR

Como se mencionó anteriormente, una limitación del trabajo con datos de radar de Banda-C es la baja capacidad de esta longitud de onda para penetrar dosel denso, por lo cual tiene un uso limitado para analizar condiciones de inundación debajo de estos (Flores et al., 2019). Por lo tanto, la detección de zonas de inundación bajo coberturas, será en función de la estructura de la vegetación, estado vegetativo de crecimiento y densidad entre plantas o árboles, ya que puede que el pulso energético del sensor no penetre eficientemente la cobertura, se limite la detección de inundaciones y se cataloguen estas áreas incorrectamente como “sin cambio”. Otras coberturas que pueden inducir en una subestimación son las edificaciones y zonas urbanas, ya que, si estuvieran inundadas su retrodispersión es caracterizada por el doble rebote, aumentando su intensidad (Vanama et al., 2020).

Por otra parte, la aplicación de las imágenes de la misión Sentinel 1 se encuentra ligada a los períodos de revisita del sensor a bordo de cada uno de los satélites y su coincidencia con el evento de inundación a analizar. En este caso, puede que las escenas disponibles arrojen resultados de subestimación o sobreestimación de la extensión de inundación, en caso de que las escenas disponibles sean en fechas alejadas al evento de inundación máximo. Igualmente, los modelos y algoritmos que se desarrollen y busquen un procesamiento automatizado de

los datos, representa un reto metodológico y de conocimiento de las características propias de las imágenes, así como de sus fortalezas y debilidades asociadas (Manavalan, 2017).

Al crear mapas de extensión de área inundada, derivados de análisis de imágenes de detección remota o modelado hidráulico, (Rahman et al., 2021), mencionan que es importante considerar que estas evaluaciones son solamente capaces de reportar pérdidas asociadas a inundación en relación a área cultivada que presenta inundación, pero fallan en proveer información adicional como lo es el grado de daño o afectación específica a cada tipo de cultivo. Esto puede producir sobreestimación de daños, puesto que las zonas cultivadas inundadas podrían no presentar pérdidas totales, según características propias del cultivo o del sitio.

Aprovechamiento de datos provenientes de sensores pasivos

Las imágenes de los sensores ópticos, que capturan la información de manera pasiva al recibir radiación emitida o reflejada por la Tierra y operan en las porciones del espectro electromagnético de la ondas visible, infrarroja y térmica, son opciones efectivas en relación a costo y datos aportados (Anusha y Bharathi, 2020; Clement et al., 2018; UNOOSA, 2018). Debe considerarse que requieren de observaciones sin nubes o sombras de nubes para minimizar la confusión espectral de los datos, convirtiéndose en una opción poco favorable, como único recurso en análisis de inundación en zonas tropicales, eventos usualmente asociados con alta cobertura nubosa (Clement et al., 2018; Espinoza Cisneros et al., 2020). Sin embargo, al incluirse en procedimientos que incorporan datos provenientes de sensores activos, como SAR, se complementan de buena forma y enriquecen las posibilidades de análisis.

Usos de información detectada con sensores pasivos en estimación de inundación y monitoreo de estado de la vegetación

Dado que los sensores ópticos miden la reflectancia de la radiación solar en específicos intervalos del espectro electromagnético, conocidos como bandas espectrales, y que los materiales en la tierra se comportan diferente en varias de estas bandas espectrales, se puede aprovechar esta característica para seleccionar ciertas bandas y examinar condiciones, según sea el objetivo de análisis (Njambi, 2022). Estos datos ópticos aportan también en sentido de mejoramiento de la resolución temporal, en caso que se obtengan imágenes útiles en fechas en las cuales los satélites SAR no realizaron detecciones e incluso utilizarse como medio de validación de las estimaciones a partir de radar.

Para detectar inundación, (Yang et al., 2020), notan la utilidad del uso de índices de agua que maximizan la reflectancia del agua de ciertas longitudes de ondas, en detectar cuerpos de agua y consideran que estos pueden ser implementados fácilmente y con una eficiencia alta en los cálculos. El Índice de Diferencia de Agua Normalizado (NDWI), puede calcularse usando imágenes satelitales que contengan bandas reflejadas de Verde e Infrarrojo Cercano (NIR) (Ganaie et al., 2013). Este NDWI fue mejorado, evolucionando en el Índice de Agua Normalizado modificado (MNDWI), mismo que aprovecha la tecnología de los sensores actuales e incorpora la banda del infrarrojo medio (SWIR), en vez del NIR. El agua absorbe aún más luz del SWIR y esto brinda una mejor detección de la misma.

La computación del MNDWI produce valores entre -1 y +1, en general, el agua va a presentar valores positivos, mientras que otras coberturas como tierra o vegetación estarán entre el cero y los valores negativos (Rahman et al., 2021). El índice se calcula a partir de la siguiente ecuación de bandas:

Ecuación 1.3. MNDWI

$$MNDWI = \frac{\text{Verde} - \text{Infrarrojo Medio}}{\text{Verde} + \text{Infrarrojo Medio}}$$

Aun cuando esta regla anterior, de considerar agua a los píxeles mayores a cero, resulta útil para analizar inicialmente la presencia de agua en las imágenes, una forma más automatizada de ajuste es por medio de la selección con umbral automático no supervisado de Otsu, (Otsu, 1979), que se basa en el histograma bimodal espectral (Yang et al., 2020). Para procesar el MNDWI aplicando umbral automatizado de Otsu en Google Earth Engine, (Donchyts y Clinton, 2023), desarrollaron un código base, a partir de la conceptualización aportada por (Donchyts et al., 2016).

El MNDWI obtenido para el cálculo de extensión de inundación, se ha utilizado en procesos de validación de cálculos de extensión de inundación a partir de datos SAR, al incluirse para usar esta información en la evaluación de precisión con matrices de confusión (Khatun et al., 2022). En este sentido se permite calcular la exactitud global, exactitud de usuario y exactitud de producto, además del coeficiente de Kappa. Estos anteriores definen el porcentaje de áreas clasificadas correctamente en toda el área total, la probabilidad de clasificación errónea, la probabilidad de falta de clasificación y finalmente, la diferencia entre los resultados de clasificación y una clasificación aleatoria (Tian et al., 2022).

Por otra parte, los índices de estado vegetativo originados a partir de datos ópticos, han sido ampliamente estudiados para el monitoreo de cultivos y estos se pueden calcular para las zonas cultivadas que se detectaron como inundadas, y así, de esta forma evaluar la respuesta de los cultivos al evento de inundación. Autores tales como (Rahaman y Shermin, 2022), han demostrado relaciones entre áreas inundadas y vegetación, a partir del análisis estadístico de extensión de inundación y su respectiva correlación con índices de vegetación como el NDVI. Mientras que (Pantaleoni et al., 2007), y similarmente (Yu et al., 2013), previamente

detectaron daños por inundación en cultivos de soya y maíz, según cambios en la serie de tiempo de los valores de NDVI detectados.

Con este abordaje se busca analizar la respuesta inmediata de los cultivos, bajo las premisas que, como lo ponderan Chen et al., (2019): los cultivos, de no ser perturbados en su desarrollo, alcanzarán un máximo de verdor vegetativo en un ambiente determinado y las perturbaciones inducidas por inundaciones causarán que los cultivos varíen sus niveles de verdor vegetativo. El NDVI se calcula a partir de la siguiente ecuación, donde ρ_{nir} y ρ_r son las reflectancias en las bandas del infrarrojo cercano y el rojo, respectivamente (Chen et al., 2019):

Ecuación 1.4. NDVI

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_r}{\rho_{nir} + \rho_r}$$

Los valores de referencia, para determinar el grado en que la respuesta de los cultivos se aleja de las condiciones normales, se pueden obtener con el cálculo de la media de NDVI para los años recientes al momento del evento de inundación (Chen et al., 2019). Con esto se puede ampliar acerca de, si los valores que se registran luego del evento de inundación son esperables para el mismo cultivo de análisis en esa época del año o si efectivamente se asocian a la inundación.

Por lo tanto, resulta útil obtener la mayor información posible referente a las plantaciones, en el sentido de si se trata de cultivos perennes o temporales, si se realiza rotación de cultivos, además del estado vegetativo en que se encuentran al momento del evento de inundación. Lo anterior robustece la información que se puede inferir a partir del NDVI, ya que cultivos que están en etapas tempranas de su temporada de crecimiento, van a ser más susceptibles a responder de manera negativa ante las inundaciones, de la misma manera que ciertos cultivos

más robustos y establecidos, tendrán mejor capacidad de soportar diferentes niveles de inundación e incluso tiempo sumergidos en agua.

Manipulación y análisis de datos de teledetección en plataforma en línea

El desarrollo del núcleo de trabajo se realizará usando la plataforma en línea Google Earth Engine (GEE) para la codificación del procesamiento, en lenguaje de programación JavaScript, de los algoritmos de mapeo de inundación a partir de imágenes SAR y también de imágenes ópticas, así como el cálculo del NDVI en el análisis de respuesta de la vegetación a partir de índices vegetativos, utilizando su interfaz de programación de aplicaciones (API). Esta API JavaScript de GEE cuenta con áreas para desarrollo de código, documentación y consultas, en conjunto con un marco para visualización y mapas (Gorelick et al., 2017). De igual forma, desde la API se pueden hacer operaciones y manipulación de datos geoespaciales, sin requerir su descarga y uso en un software de sistemas de información geográfica, con lo cual permite centralizar en una misma plataforma los diferentes procesos y productos asociados a la metodología.

Como se mencionó anteriormente, la restricción geoespacial del análisis de datos SAR debido a los altos requerimiento computacionales para el procesamiento de la información, ha venido a ser aliviado con la aparición de plataformas en la nube y de acceso libre como lo son Google Earth Engine (GEE), NASA Earth Exchange y Amazon Web Services, desde donde altos volúmenes de datos para Sentinel-1 pueden ser obtenidos y procesados directamente en la nube, en vez de tener que descargarlos y manipularlos en un sistema local.

Varios estudios en años recientes han utilizado series de tiempo de observación de la Tierra que se obtuvieron desde el catálogo de GEE y han podido expandir el alcance de trabajo, desde pequeños subconjuntos hasta extensiones más amplias; sin embargo, el uso de estas

técnicas computacionales aplicadas en detección remota sigue siendo considerado como incipiente (Singha et al., 2020; Vanama et al., 2020).

Presentación y distribución de la información geoespacial

Como una posibilidad adicional, disponible para usuarios de Google Earth Engine, se cuenta con Earth Engine Apps (Google Developers, 2022). Earth Engine Apps (EEA) brinda interfaces para presentación y análisis de datos provenientes de GEE, a partir de la configuración de elementos simples de Interfaz de Usuario (UI, por su nombre en inglés). Esta configuración, se realiza aplicando código en JavaScript y utilizando elementos del cálculo provenientes del API en GEE.

Las apps que se publiquen utilizando EEA son accesibles por medio del URL que se genera al publicarlas y no requieren que las personas que quieran interactuar con estas cuenten con un perfil de usuario en GEE. Con esta opción adicional, se puede llevar avanzar el trabajo científico hacia esquemas operativos funcionales, donde se distribuya y disponga de la información para las personas e instituciones usuarias finales de los datos procesados.

Metodología

El repositorio de Google Earth Engine en el cual se encuentran todos los códigos utilizados en el presente trabajo, se puede acceder mediante el link¹¹ para agregar al perfil de usuario. Cualquier actualización que se realice a los mismos se procesa automáticamente.

Datos

A continuación, la Tabla 1 compila las bases de datos a usar para la metodología propuesta, la mayoría disponibles dentro de la plataforma GEE:

Tabla 1.1 Bases de datos utilizadas en el estudio (* Código para el acceso dentro de GEE).

Datos	Resolución espacial	Referencia	Uso
<i>Sentinel-1 GRD</i>	10 m	COPERNICUS/S 1_GRD*	Conjuntos de imágenes para antes y después del evento de inundación a consultar.
<i>Imágenes de sensores ópticos Sentinel-2</i>	Bandas 2, 3, 4 y 8: 10 m	COPERNICUS/S 2_HARMONIZE D*	Cálculo del Índice de Diferencia de Agua Normalizado Modificado en GEE e Índice de Diferencia Normalizado Modificado.
<i>SRTM 30</i>	30 m	USGS/SRTMGL 1_003*	Obtener valores de elevación y generar pendiente.

¹¹ https://code.earthengine.google.com/?accept_repo=users/jorgemasis/TFG_SAR_JMA

<i>JRC Global Surface Water Mapping Layers, v1.4</i>	30 m	JRC/GSW1_4/GlobalSurfaceWater *	Referencia en el código, para aguas superficiales.
<i>Climate Hazards Group Precipitation Station (CHIRPS)</i>	5 566 m	UCSB-CHG/CHIRPS/PE NTAD *	Análisis espaciotemporal de precipitación.
<i>Mapa de cobertura de suelos en formato ráster</i>	10 m	Honduras Geoportal ICF	Referencia para áreas cultivadas.
<i>Imagen de Planet para noviembre 13, 2020</i>	3 m	ortho_analytic_4b_sr ortho_analytic_4b_xml	Imágenes referencia RGB de inundación.
<i>Mapas históricos de inundaciones</i>	No aplica, al ser capa tipo vector	Geoportal UNAH	Referencia para validación del cálculo de extensión de inundación.

Fuente: Elaboración propia

Imágenes Sentinel 1

Las imágenes analizadas cuentan con las mismas características: bandas de polarización VV, puesto que la bibliografía promueve el uso de esta polarización para detección de aguas abiertas de inundación, modo IW (Interferometric Wide Swath), frecuencia de Banda C

(GHz), resolución de píxel 10 metros y en cuanto a la dirección de paso, se incluyen juntos los pasos ascendente y descendente disponibles en el período de análisis, ya que las características topográficas de la zona de estudio son uniformes para la llanura de inundación. Además, todas las imágenes son de Nivel 1 de geometría de rango terrestre de alta definición GRDH (Ground Range Detected High Resolution), ver anexo tabla 1 y anexo tabla 2 para el detalle específico de cada imagen incluida.

Imágenes Sentinel 2

Se usan imágenes de Sentinel 2 para el cálculo del MNDWI y también para calcular el NDVI. Estas incluyen corrección atmosférica usando el algoritmo Sen2Cor, basado en la sustracción de objetos oscuros y un modelo de valores de reflectancia en tope de la atmósfera, para obtener los valores de reflectancia en superficie corregidos. Su resolución temporal es de 5 días, pero debido a que se aplica un filtro para incluir las imágenes que tengan menor presencia de nubosidad, se llega a obtener una menor resolución temporal. En cuanto a la resolución espacial, las bandas que se utilizan en ambos cálculos son de 10 metros.

Otras capas de información utilizadas

Dentro de GEE se puede acceder a capas como el modelo de elevación de altura global de 30 m por encima del desagüe más cercano (Gennadii et al., 2016), aunque en este caso se utiliza preferiblemente los datos de la misión SRTM30, para el cálculo de pendiente y elevaciones. También se accede a la capa global de cuerpos de agua superficial desarrollada por el Centro Común de Investigación (JRC) de la Comisión Europea basada en imágenes satelitales recopiladas de las misiones Landsat y los satélites Sentinel-1 y Sentinel-2, y el archivo de datos de la misión CHIRPS para datos referentes a precipitación estimada.

Dentro de los datos externos a GEE que suben a la plataforma para su uso en los códigos, se tiene: la colección de datos de cobertura de suelo en formato ráster, del Geoportal del ICF Honduras, mapas históricos en formato vectorial generados por la UNAH.

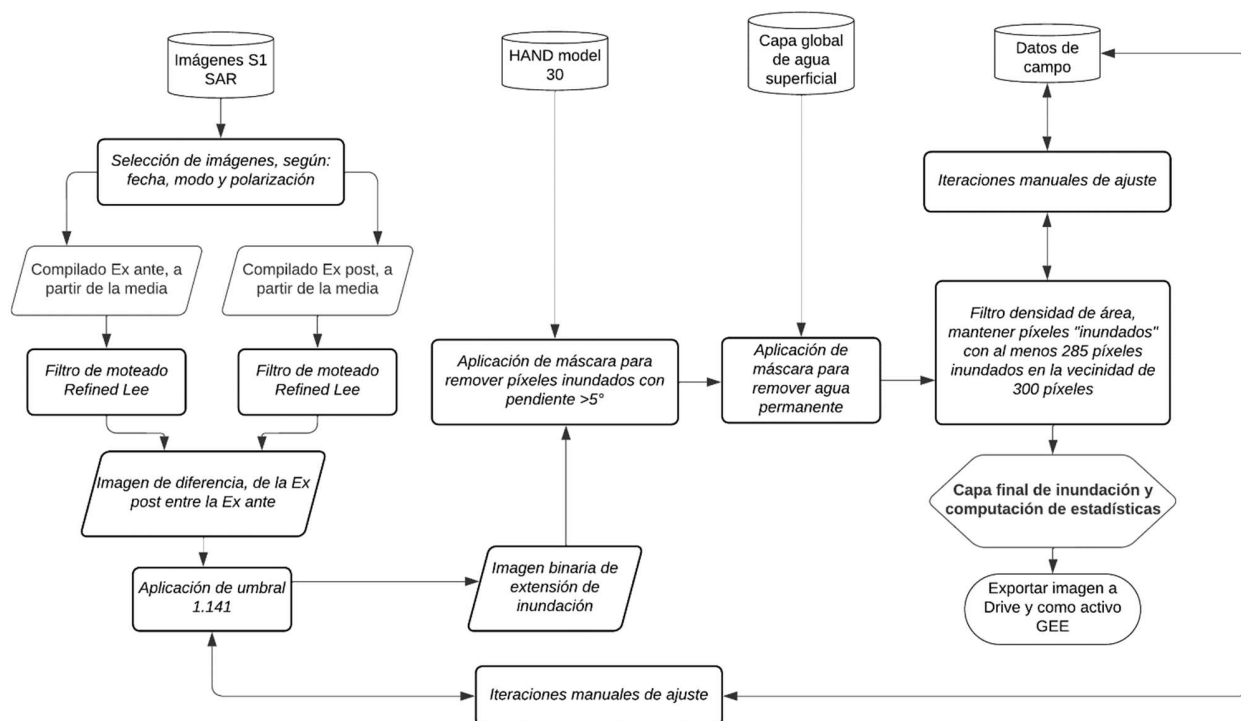
Por último, se consultan datos de alta resolución disponibles mediante la plataforma Planet. Estas son imágenes de referencia visual para análisis de sectores específicos en la cuenca, ya que, al enviar una aplicación de parte de proyectos de investigación académica, los estudiantes tienen acceso gratuito a un área máxima de descarga mensual, y las descargas fuera de este convenio tienen un valor económico definido por Planet.

Estimación de extensión de inundación mediante detección de cambios con SAR

Pasos en la herramienta de procesamiento y análisis, datos SAR

La siguiente figura, muestra el diagrama que sintetiza los pasos de la metodología que permiten identificar y estimar la extensión espacial del área inundada con base en los datos de SAR disponibles en GEE:

Figura 1.15. Diagrama de flujo cálculo de extensión de área inundada a partir de SAR en GEE.



Como se observa en el diagrama anterior, se inicia con la selección de las fechas de análisis con base en los reportes de los huracanes de noviembre del 2020, de la siguiente manera: la escena Ex ante (condiciones de referencia) se delimitó entre octubre 20 y noviembre 10 (ver anexo tabla 1 para el detalle de las imágenes resultado de este filtro), mientras que la Ex post entre el 12 de noviembre y el 30 de noviembre (ver anexo tabla 2 para el detalle de las imágenes resultado de este filtro). Para la agrupación de estas escenas, primeramente, se agrupan en colecciones Ex ante y Ex post, para seguidamente apilarlas en compuestos de imágenes a partir de sus valores medios, con lo cual se obtiene una imagen representando cada escena. Posteriormente, se cortan a la extensión del archivo formato vectorial de la cuenca, previamente cargado como un activo dentro de GEE, y se aplica una máscara para

los centros urbanos e industriales, desde los datos del Geoportal hondureño, a razón de que no agreguen ruido a los cálculos.

Seguidamente, se aplica en ambas escenas, Ex ante y Ex post, un filtro de moteado tipo “Refined Lee Speckle Filter” (Lemoine, 2016). Y con estas imágenes procesadas, utilizando una de las funciones aritméticas en GEE, se realiza una división entre la escena Ex ante dividida entre la escena Ex post, obteniendo una imagen de diferencia entre ambas. Para la imagen resultante, se aplica una máscara de umbral de 1.141, lo cual determinará que cualquier diferencia mayor a 1.141 en la diferencia de la retrodispersión entre la escena de referencia Ex ante y la Ex post será considerada como inundación. Podest y McCartney, (2019), sugieren que un valor de umbral de 1.25 es aplicable en la mayoría de los casos, pero que, en caso de contar con información en sitio, se puede ajustar el mismo. Por lo tanto, se procedió a analizar el histograma de la imagen de referencia y mediante iteraciones manuales, se ajustó el umbral a un valor que conserva el cálculo de agua abierta inundada, buscando no incluir muchos cálculos dispersos usando los puntos obtenidos en gira de campo como referencia.

El siguiente procesamiento de la imagen de inundación es un filtro de pendiente, utilizando información de elevación generada por la misión SRTM30, se calcula la pendiente por píxel, con lo cual se crea una máscara utilizada para eliminar cualquier píxel con pendiente mayor a 5% que haya podido ser identificado incorrectamente como inundado. GEE solventa las diferencias entre la escala de 30 m de SRTM disponible en la plataforma y los 10 m de resolución espacial de las imágenes Sentinel 1, al hacer un re muestreo automático a la escala objetivo.

Luego de esto, se aplica otra máscara, a partir de la capa global de agua superficial y de esta forma solamente dejar en el cálculo de inundación, píxeles que no están normalmente cubiertos por agua superficial. De manera que se resalte la cobertura de agua superficial que corresponde directamente al evento de inundación.

El último paso del procesamiento en GEE es de suma importancia, puesto que permite hacer un ajuste manual de umbral, para limpiar los datos generados y así obtener una identificación de mayor densidad de grupos de píxeles inundados. Tomando la imagen binaria de estimación de inundación (valores son 0 o 1), para cada píxel con valor de 1 (clasificado como inundado), se buscará en los 300 píxeles adyacentes, cuántos tienen ese mismo valor y se crea una imagen llamada “connections”. Se estableció, mediante un proceso iterativo manual de inspección de la capa de inundación resultante, contra los puntos registrados en la visita de campo (referencia para inundado o no inundado), un umbral de 280, con lo cual se aplica una máscara en la capa de “connections” y se dejan por fuera los píxeles clasificados como inundados que no tengan al menos 280 píxeles (95%) adyacentes clasificados también como inundados en un área de 300 píxeles a su alrededor.

Una vez que se ha obtenido la imagen final, luego del procesamiento anterior, se puede descargar tanto en formato ráster o en capa de vector. Esta descarga procede para la posterior creación de mapas en software de SIG, ya que GEE no tiene la opción actualmente de crear cartografía como la que se puede generar en estos otros softwares. Aun así, para los cálculos de estadísticas dentro de GEE, se permite agregar la capa de inundación como un activo dentro del perfil de usuario, y de esta manera se puede incluir directamente en formato ráster en otros códigos.

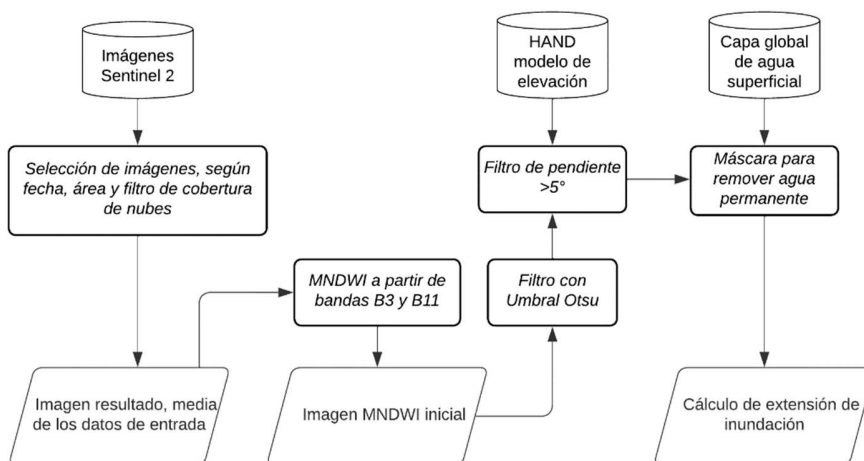
Las estadísticas de inundación son computadas dentro de la consola de GEE y se muestra la extensión de área inundada en hectáreas. A su vez, en GEE es posible realizar cálculos de extensión de área inundada en referencia a capas ráster dentro del catálogo de bases de datos de GEE o bien capas que se hayan cargado al repositorio. Se procede entonces a calcular estadísticas separadas para cada cobertura de interés, como pueden ser las zonas cultivadas, según se especifican en la capa de Cobertura Forestal del 2018 para Honduras.

Estimación de extensión de inundación a partir de MNDWI con umbral automático Otsu

Pasos en la herramienta de procesamiento y análisis, datos ópticos

La siguiente figura, muestra el diagrama que sintetiza los pasos de la metodología que permiten identificar y estimar la extensión espacial del área inundada con base en los datos ópticos de Sentinel 2 disponibles en GEE:

Figura 1.16. Diagrama de flujo cálculo de extensión de área inundada a partir de imágenes Sentinel 2 en GEE.

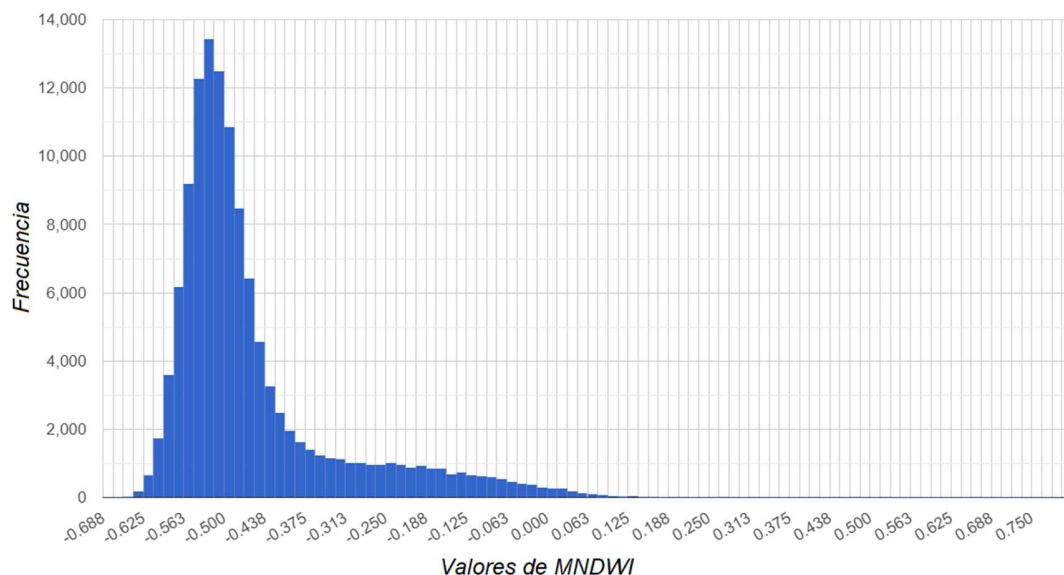


Como se muestra en la figura del diagrama anterior, se filtra el catálogo de Sentinel 2 en GEE para buscar imágenes que se capturaron dentro del área de Aguán entre el 2 de noviembre del 2020 y el 22 de noviembre del mismo año. Las imágenes de Sentinel 2 en GEE cuentan

con sus propias bandas de evaluación de la calidad, con lo cual se pueden filtrar de forma que no se incluyan imágenes con nubes ni cirrus (ver anexo tabla 3 para el detalle de las imágenes resultado de este filtro). Debido a que estas imágenes que se obtengan se unen en una imagen resultado compilada, mediante la media de sus datos, el rango temporal busca incluir cuantas imágenes sean posibles en un periodo cercano a la fecha de inundación máxima.

Una vez que se cuenta con la imagen de la media de los datos de entrada, se procede al cálculo de MNDWI, indicando en el código las bandas a utilizar, que en los datos de GEE corresponden a B3 y B11. Seguidamente se aplica el algoritmo de Donchyts y Clinton, (2023), para definición del umbral de ajuste automático Otsu, mismo que determinó un umbral de -0.227031 (ver figura 1.17.) y así filtrar los píxeles de la imagen resultado del cálculo de MNDWI según ese umbral.

Figura 1.17. Histograma de MNDWI.



A la imagen resultante de MNDWI del paso anterior, se procede aplicar las máscaras que remuevan píxeles con pendiente mayor a 5 grados, según la referencia de los datos SRTM30

de elevación a 30 metros de resolución espacial y posterior a esto la de remover píxeles de agua superficial permanente, según la capa global de agua permanente. La imagen proveniente de estos procesos, se exporta tanto al Drive de GEE, como también a activo dentro del perfil de usuario.

Trabajo de campo para obtención de referencia para el evento de inundación en sitio

Trabajo de campo para obtención de referencia para el evento de inundación en sitio

Teniendo como base de geo referencia la capa de inundación de SAR, se realizaron visitas a diferentes sitios de la cuenca durante una semana de febrero 2023 y para estos lugares visitados, se tomaron puntos geo referenciados, los cuales se catalogaron como inundados o no inundados. Las visitas se llevaron a cabo con la ayuda de la Universidad Autónoma de Honduras, sede Valle del Aguán, en vehículos personales de trabajadores de esta sede.

En los puntos que se visitaron, se utilizó un software para dispositivo iOS llamado GPS Data, el cual brinda información de geo referencia en campo, la información de cada punto se anotó en una tabla con la fecha de captura, longitud y latitud, agregando comentarios según fuera el caso, tanto a partir de conversaciones con las personas habitantes del Valle del Aguán, como comentarios aportados por profesionales de la sede Aguán de la Universidad Autónoma de Honduras.

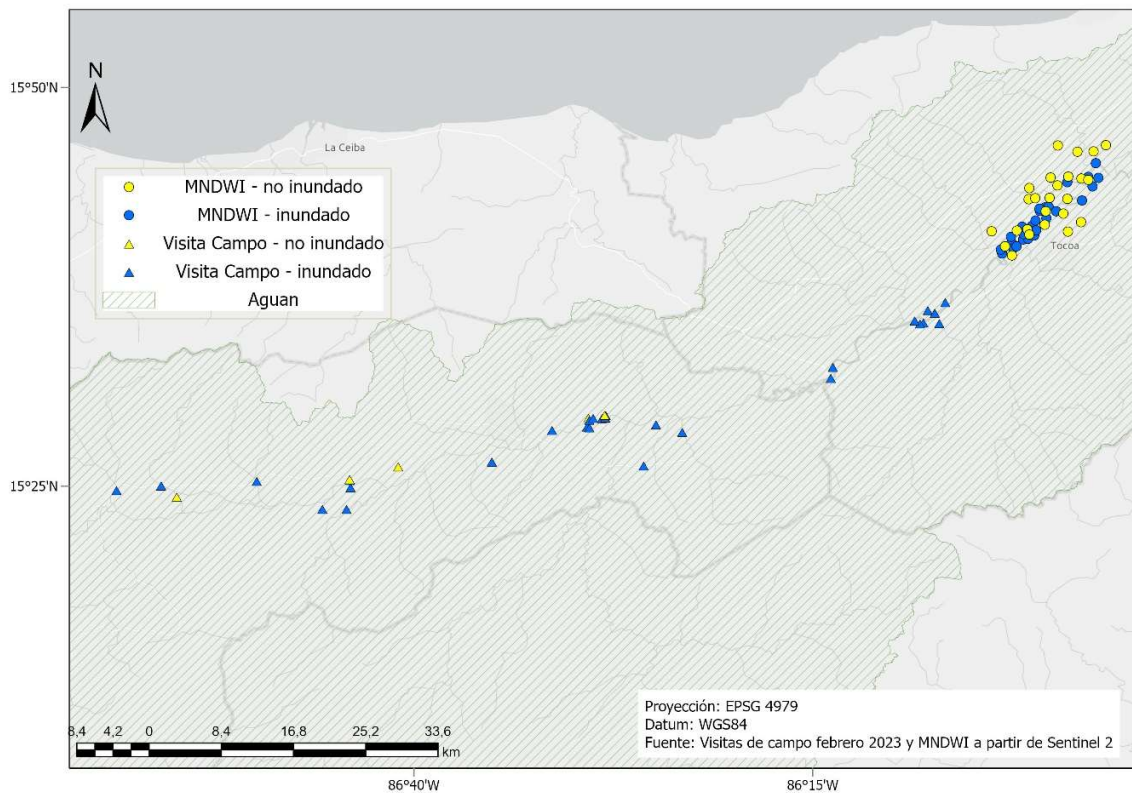
En ocasiones en las cuales se presentase la oportunidad de conversar más con las personas locales acerca de lo sucedido durante Eta e Iota, se procede a preguntar acerca del tiempo percibido de duración de la inundación, cultivos afectados e incluso saber sobre su experiencia antes, durante y después del evento. Igualmente, los datos de las imágenes que se pueden analizar sin necesidad de descarga desde la plataforma Planet, sirven para clasificar los puntos como inundados o no, al consultar las fechas de la inundación, como una ayuda visual adicional.

Se tienen los siguientes métodos cuantitativos y cualitativos de análisis de precisión, para la capa de extensión de inundación con datos SAR.

Análisis cuantitativo con base en el MNDWI y puntos de la visita al sitio

En GEE, los lugares visitados en campo se usan como referencia para la validación, al ser una capa de información vectorial con puntos geo referenciados, tiene asociados de manera binaria una clasificación con valor de 0 donde se haya confirmado que no hubo inundación, y con valor de 1 donde se haya confirmado que efectivamente se presentó inundación. Por otra parte, se extraen puntos aleatorios de la capa obtenida a partir del MNDWI, los cuales incluyen también la misma clasificación binaria que tienen los puntos de la visita de campo. Para la capa ráster de extensión de inundación a partir de SAR, se extraen puntos que coincidan, según longitud y latitud, a los obtenidos tanto para la tabla de lugares visitados en campo, como de la matriz de puntos del MNDWI, mediante el uso del paquete Terra en el software RStudio. Con esto, se obtiene una capa vectorial con puntos provenientes del procesamiento SAR, los cuales también tienen asociados de manera binaria la misma clasificación que los otros puntos. En la siguiente figura, se muestran la ubicación de los puntos de validación.

Figura 1.18. Ubicación de los puntos usados en la validación.



Con las tablas de información de los puntos se procede hacer el análisis cruzado de los conjuntos de datos binarios, primeramente, entre los puntos SAR y sus correspondientes de la visita en campo, luego entre los puntos SAR y los correspondientes al MNDWI (ver tablas en tabla anexo 4 y tabla anexo 5). Con estas matrices, se calcula la precisión global, como la probabilidad de que un píxel sea clasificado correctamente, el coeficiente Kappa, que es la proporción de concordancia una vez eliminada la concordancia casual, y por último, categorías individuales de precisión, como los errores de productor y usuario, los cuales indican la probabilidad de que un píxel de referencia se clasifique correctamente y la probabilidad de que un píxel clasificado en el mapa representa esa categoría sobre el terreno, respectivamente (Liu et al., 2007; Mirzaee et al., 2014).

Análisis cualitativo con base en datos de teledetección, en campo y consultas con actores locales

Se realizan presentaciones, en línea y en persona, con un equipo de profesionales de la Universidad Autónoma de Honduras (UNAH) con sede en Olanchito Aguán, quienes son docentes en esta sede, son también parte de comités de atención de emergencias, tienen contacto con personas que laboran en oficinas de agricultura e incluso son personas dueñas de fincas en la cuenca. Se hacen invitaciones abiertas para que otras personas interesadas puedan participar de las presentaciones, sean del sector público o privado, se facilita durante las presentaciones el link a la versión beta de la aplicación desarrollada, para que las personas puedan acercarse visualmente a diversos sitios de la cuenca y confirmar personalmente la eficiencia de los mapas de estimación de área inundada con SAR.

Este análisis cualitativo se apoya también con imágenes de Planet, las cuales ayudan, con alta precisión espacial, a examinar puntos específicos de interés en los cuales valorar visualmente la presencia de agua superficial de inundación para las escenas alrededor y durante el momento de inundación, en relación con los cálculos obtenidos con SAR y con los datos provenientes de sensores ópticos. Se encontraron imágenes correspondientes a noviembre 11 y noviembre 12 del 2020, y se descargó un área limitada a la llanura de inundación.

En la visita a Aguán, donde se toman puntos georreferenciados para lugares en diferentes sectores de la cuenca, se visita zonas de producción agrícola y se presentan los resultados de los cálculos realizados en GEE para retroalimentación por parte de las personas asistentes, además de toma de evidencia en campo de las condiciones actuales de los sitios productivos y la región en general.

Análisis de impactos en cultivos

Se hace una estimación de posibles impactos en cultivos por medio del uso de índices de vegetación, calculados a partir de datos de teledetección dentro de GEE. Los niveles de análisis corresponden a, inicialmente, analizar el estado vegetativo para toda la cuenca antes y después del evento, seguidamente, el cálculo del NDVI para el área total de coberturas categorizadas como zonas cultivadas, antes y después del evento, para ilustrar el cambio del NDVI entre esos dos momentos, y finalmente, el mismo cálculo, pero específico para área de cultivos que se detectaron como inundados por medio de SAR.

Adicionalmente, se analiza la relación con NDVI históricos de las mismas fechas en 2019, esto mediante una simple comparación, para inferir si los posibles cambios detectados en 2020 también se habían presentado en un año sin inundación.

Evaluación del uso potencial en gestión de riesgo

Componentes de la app en Google Earth Engine Apps

La app¹² dentro de Google Earth Engine se comparte de manera pública, las personas que quieran acceder a esa interfaz de usuario, no tienen restricciones de contar con cuenta de GEE ni de tener conocimiento previo en programación. Básicamente, se presentan elementos sencillos de consultar y entender, con un enfoque visual de los datos para la cuenca.

En esta app, los usuarios seleccionan una fecha de consulta y automáticamente se muestra el área inundada calculada con SAR para esa fecha, adicionalmente, se muestra un gráfico con datos provenientes de CHIRPS que ilustran los valores de precipitación promedio mensuales para el año consultado y adicionalmente, una capa en el mapa mostrando la diferencia del NDVI en la extensión del área inundada, entre antes y después del evento de inundación.

¹² <https://jorgemasis.users.earthengine.app/view/aguanflood>

El código para la app se obtiene de los códigos que se usaron para los análisis de las variables mencionadas en la metodología, se integran complementos interactivos para la publicación y uso de la misma.

Interacción de usuarios con la app

Versiones beta de esta app se comparten con miembros de la UNAH, de la gestión de riesgo COPECO y hace una demostración en sitio para la localidad de Olanchito, con partes interesadas que puedan asistir a reuniones en las inmediaciones de la UNAH en Olanchito Aguán, además de presentaciones en línea.

Se les presenta de manera demostrativa, la información que incluye la app y cómo hacer las consultas respectivas, asimismo, se aclaran dudas referentes al funcionamiento de la misma, las capacidades que tiene y los alcances dentro de los objetivos del presente trabajo.

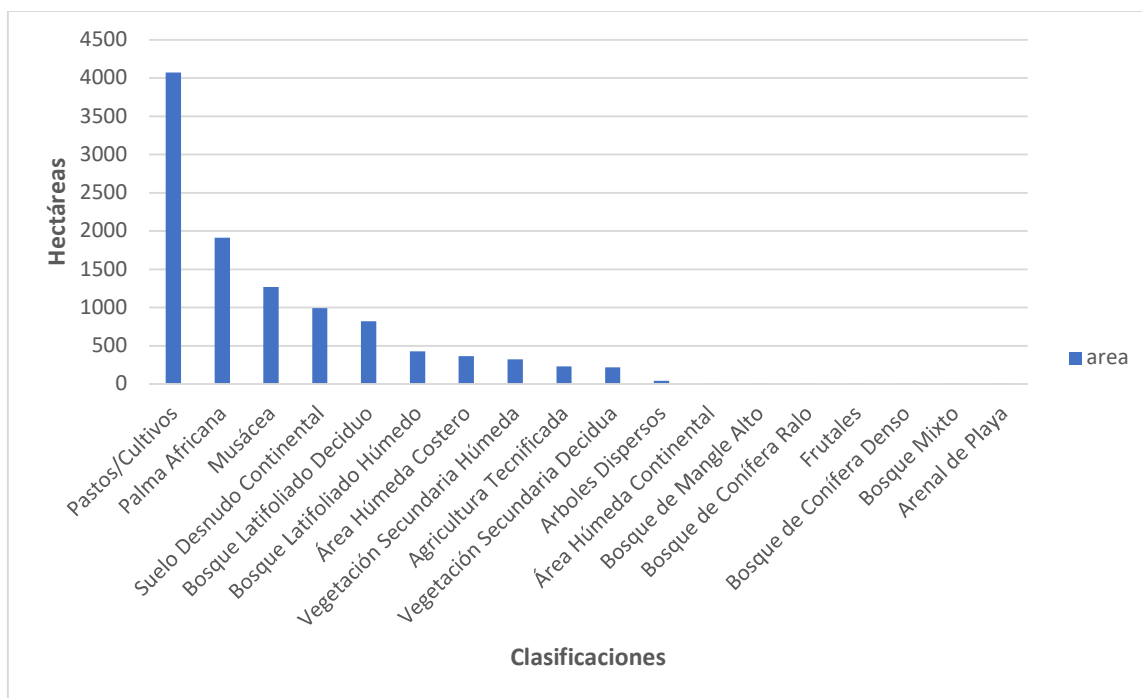
CAPÍTULO 2. RESULTADOS GENERALES

Cálculo de extensión de inundación causada por los huracanes Eta e Iota en la cuenca del río Aguán

Extensión estimada a partir de datos SAR

Se demuestra que una gran área, un total de 11 327 hectáreas para los dos eventos Eta e Iota combinados, se detectó como inundada y 66 % (7 479 ha) corresponden a área inundada en zonas de cultivos principalmente en la zona media y baja de la cuenca, esto incluye detecciones en plantaciones de Palma Africana y musáceas. En la siguiente figura 2.1. se muestran las estadísticas, según las clasificaciones de cobertura de suelo del Geoportal de Honduras, en el cual se observa que los pastos y cultivos, la Palma Africana y las musáceas fueron las principales coberturas en las cuales se detectó inundación con SAR.

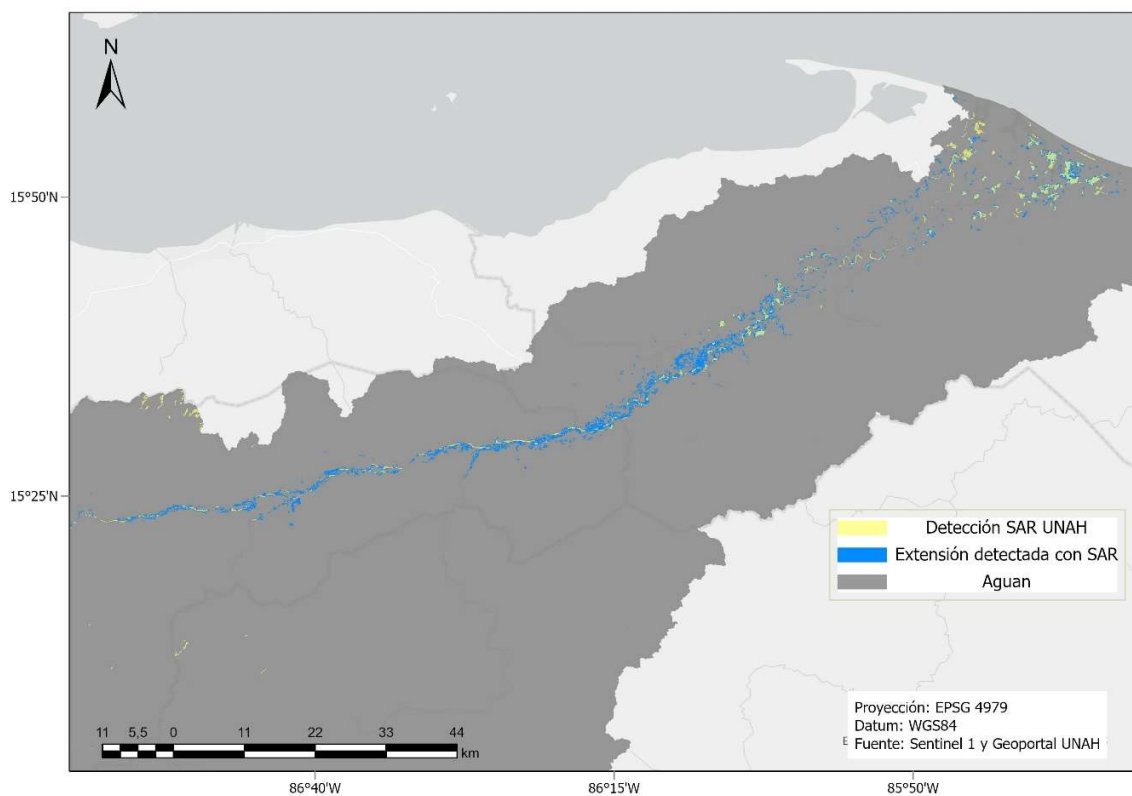
Figura 2.1. Área de detección de inundación, según coberturas.



En la figura 2.2. se presenta un consolidado comparativo de los cálculos de extensión de área inundada en el municipio de Olanchito, donde se observa el área detectada anteriormente por

parte de la UNAH y el área obtenida por medio del código en GEE en el presente trabajo, ambos a partir de datos de Sentinel 1 y el mismo período. Visualmente, se aprecia que la extensión es mayor cuando se calcula en GEE con el procedimiento del presente trabajo; además con la metodología aplicada en su momento por la UNAH se detectó inundación en zonas que para este estudio no se consideran como tal, puesto que están en regiones con alta pendiente. En general, para toda la cuenca, la UNAH logró detectar 4 358 ha, 61 % menos que con la metodología del presente estudio.

Figura 2.2. Comparativa área inundada para Valle del Aguán, con datos SAR.



Extensión estimada a partir de datos de sensores ópticos

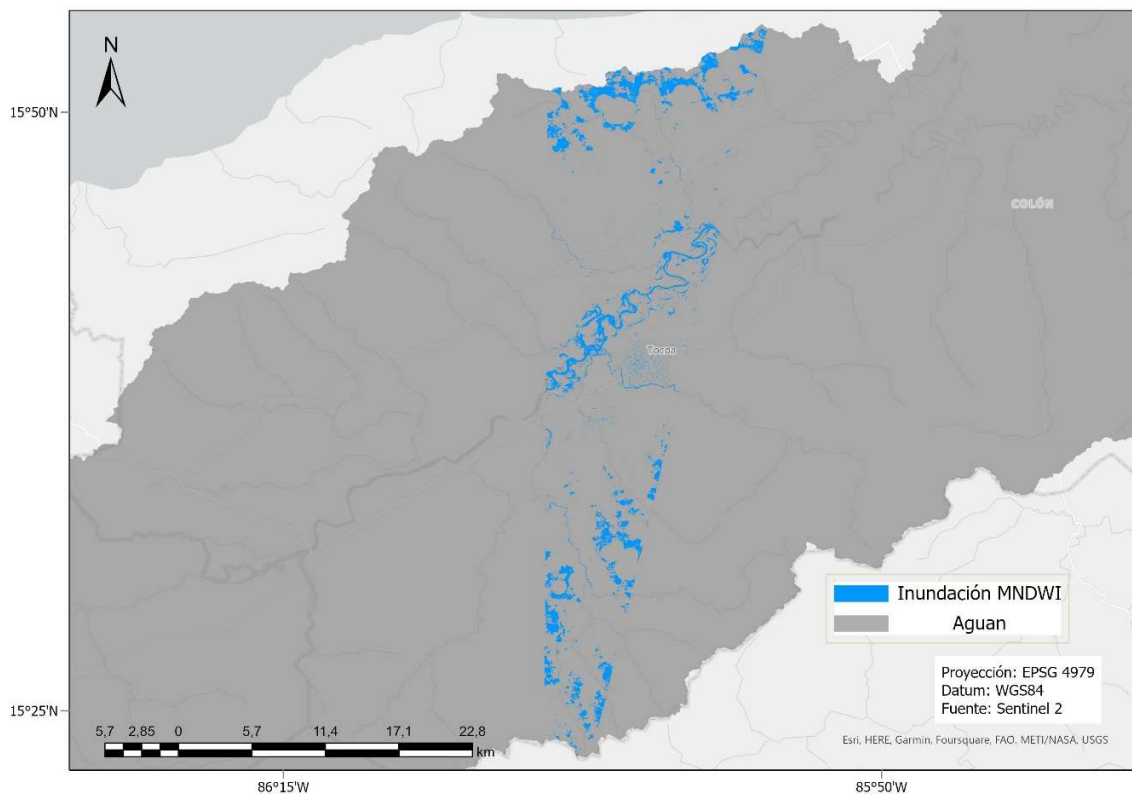
El resultado para el cálculo de inundación con el MNDWI, se muestra a continuación en la figura 2.3. Como se puede observar, no se obtuvo un cálculo para toda la extensión de la cuenca, debido a los parámetros ingresados con respecto a necesidad de procesar únicamente

imágenes libres de nubosidad, lo que causa que se reduzca el área disponible para análisis del evento de inundación.

Igualmente, en la misma figura se aprecia cómo se incluyen detecciones más alejadas de la llanura inundable, en este caso en áreas tanto al norte como al sur de Tocoa. Estas áreas que el MNDWI está detectando como inundadas, corresponden a ruido generado por la nubosidad que todavía permanece en los datos, incluso luego de los filtros aplicados.

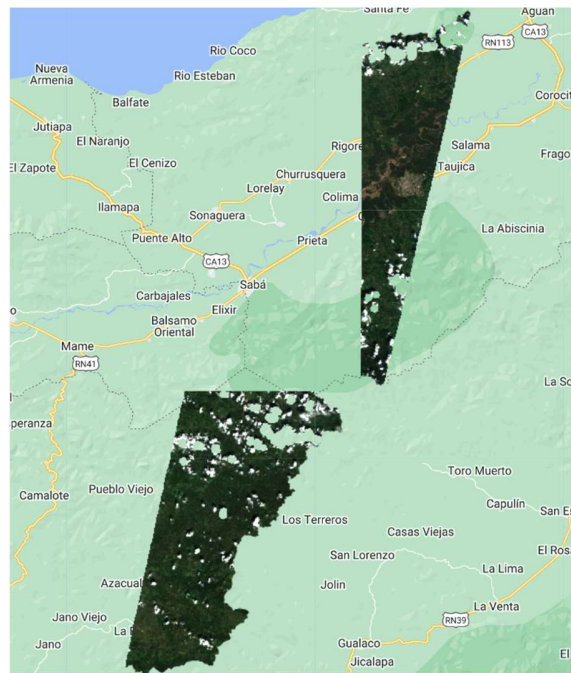
Debido a lo anterior, al momento de utilizar este cálculo para la validación del análisis con SAR, se procede a aplicar máscaras al área detectada con MNDWI, con remoción de zonas con pendiente mayor a 5 grados y selección manual de puntos aleatorios para evaluación.

Figura 2.3. Cálculo de inundación con MNDWI.



En la siguiente figura 2.4., se muestra el ejemplo del compuesto de imágenes Sentinel 2 que alimentan el cálculo de MNDWI, se observan los ruidos residuales de las nubes que se mencionaron anteriormente.

Figura 2.4. Imagen compilada de Sentinel 2 para el análisis con MNDWI.



Efectividad de la evaluación de área inundada e impactos en cultivos

Evaluación cuantitativa del cálculo de inundación

En la siguiente tabla se incluye el resumen de los resultados para las métricas de validación cuantitativa:

Tabla 2.1. Resultados de análisis cuantitativo de validación.

	Precisión global	Coficiente Kappa	Precisión de usuario	Precisión de productor
SAR y puntos de campo	0.51	0.18	1	0.57
SAR y MNDWI	0.69	0.69	1	0.69

Fuente: Elaboración propia

En la evaluación de SAR con respecto a los sitios visitados se registraron 33 puntos para la validación. Se obtuvo una precisión global de 0.51, lo que se interpreta a modo general que, en referencia a esos datos de validación, el procesamiento de SAR tiene una tasa de aciertos del 51%. El coeficiente Kappa obtenido fue 0.18, que indica un nivel leve de concordancia entre los dos conjuntos de datos, más allá de lo que se podría esperar por azar. La precisión del usuario es 1, por lo cual el procesamiento clasifica correctamente todas las muestras positivas reales, indicando que funciona bien para identificar muestras positivas. La precisión del productor es 0.57, lo cual no es un valor muy alto e indica que, para los puntos verificados en campo como no inundados, un número significativo se clasificaron como inundados.

Por otra parte, en la evaluación de la precisión de SAR con respecto al área inundada procesada a partir de MNDWI se tomaron 51 puntos totales para la validación. Se obtuvo una precisión global de 0.84, lo que se interpreta a modo general que, en referencia a esos datos de validación, el procesamiento de SAR tiene una tasa de aciertos del 84%. Con respecto a las otras métricas de evaluación, el coeficiente Kappa obtenido fue 0.69, que indica un alto grado de concordancia entre los dos conjuntos de datos, más allá de lo que se podría esperar por azar. La precisión del usuario es 1, por lo cual el procesamiento clasifica correctamente todas las muestras positivas reales, indicando que funciona bien para identificar muestras positivas. La precisión del productor es 0.69, lo cual es un valor alto e indica que, para los puntos verificados en campo como no inundados, un porcentaje de aproximadamente 30% se clasificaron incorrectamente como inundados.

Evaluación cualitativa del cálculo de inundación

Tomando en consideración que la extensión total de la cuenca del Valle del Aguán es un área sumamente amplia para un análisis cualitativo, se opta por hacer un acercamiento a ciertos

puntos de interés, que se muestran a continuación. De esta forma, aprovechando la información recabada durante la visita de campo en febrero del 2023 y las imágenes de alta resolución espacial Planet, ejemplificar los resultados del cálculo con SAR y la realidad en campo.

En la siguiente figura 2.5. se muestran cinco secciones en diferentes puntos de interés para la cuenca. Luego, en los ejemplos seleccionados para cada sección, se incluyen los puntos de las visitas de campo en color amarillo, la imagen de fondo corresponde a los datos de alta resolución Planet y el área estimada con SAR se presenta en celeste.

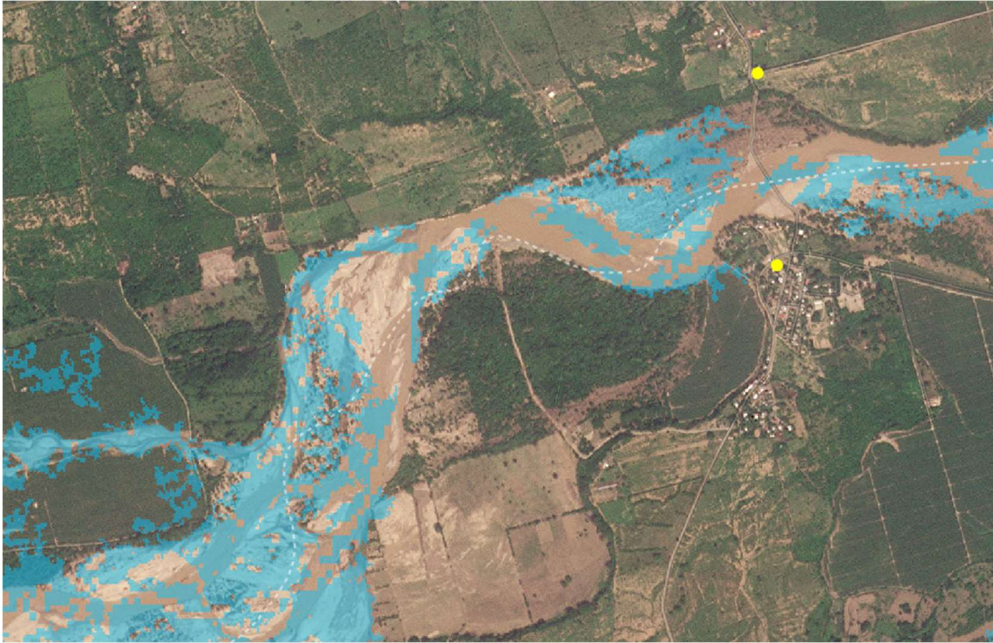
Figura 2.5. Secciones de análisis cualitativo.



Para la sección A, la figura 2.6. muestra un sector cercano al comisariato de la bananera al norte de Tierra Blanca. En la parte superior derecha se observan puntos de visita de campo, los cuales fueron mencionados como límites de inundación, en el sentido que, el río llegó como máximo hasta cada uno de ellos. La imagen óptica muestra cómo el río se ensanchó y efectivamente, aun cuando el momento del paso de esos satélites no capturaron exactamente el momento máximo de inundación, se aprecia mucha agua superficial de inundación. El cálculo de SAR delimita de manera eficiente estos límites del agua superficial, a la izquierda

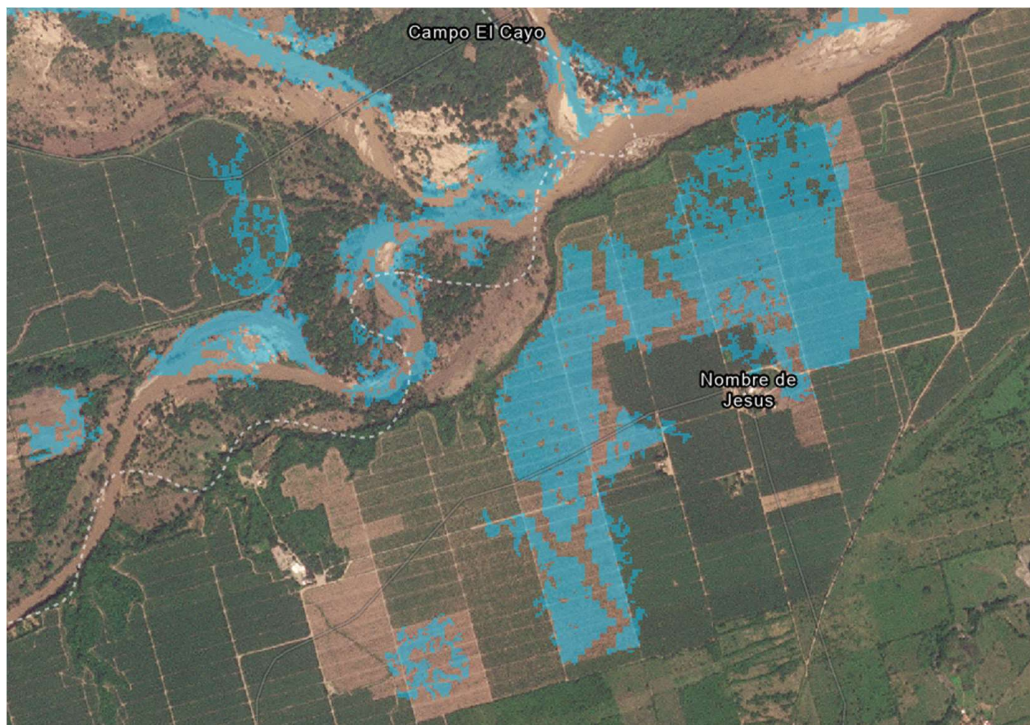
de la imagen se puede observar también, cómo se dificulta para la tecnología radar poder definir claramente la inundación cuando se trata de agua debajo de doseles de las musáceas en este caso.

Figura 2.6. Detalle sección A, sector por el comisariato.



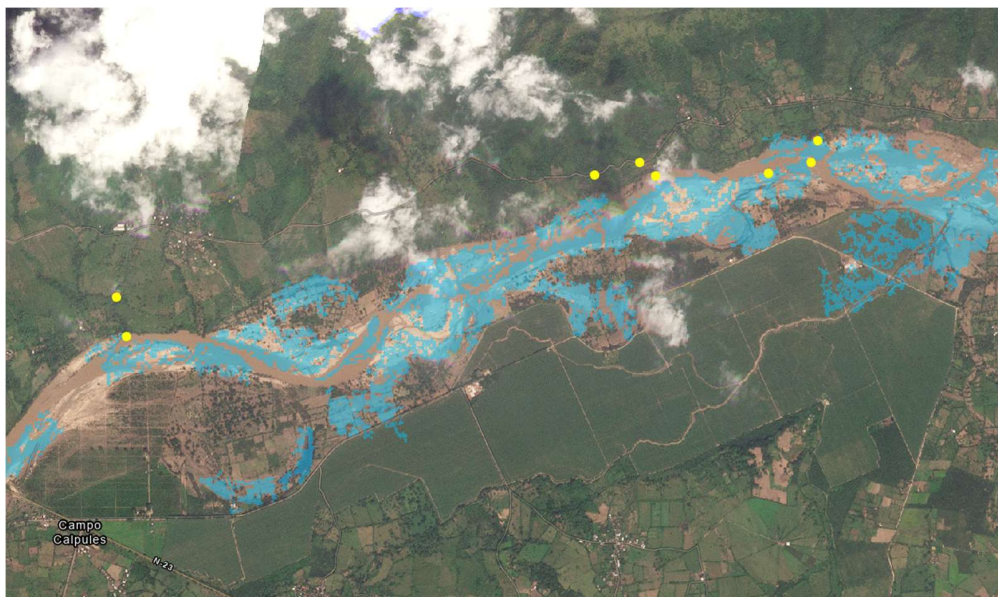
En esta misma sección A, las áreas de cultivos de musáceas, figura 2.7., muestra nuevamente cómo SAR identifica la inundación superficial, más no así las inundaciones que posiblemente se presentaban debajo del dosel.

Figura 2.7. Detalle sección A, sector por Nombre de Jesús.



Seguidamente, para la sección B, la figura 2.8. muestra varios puntos de la visita en campo, todos fueron efectivamente calculados por SAR de igual forma como se clasificaron según la consulta en sitio. Aquí es igualmente interesante observar, el ensanchamiento del río Aguán y también cómo en la parte inferior izquierda los cultivos cercanos al río fueron parcialmente identificados como inundados.

Figura 2.8. Sección B, sector suroeste de Olanchito.



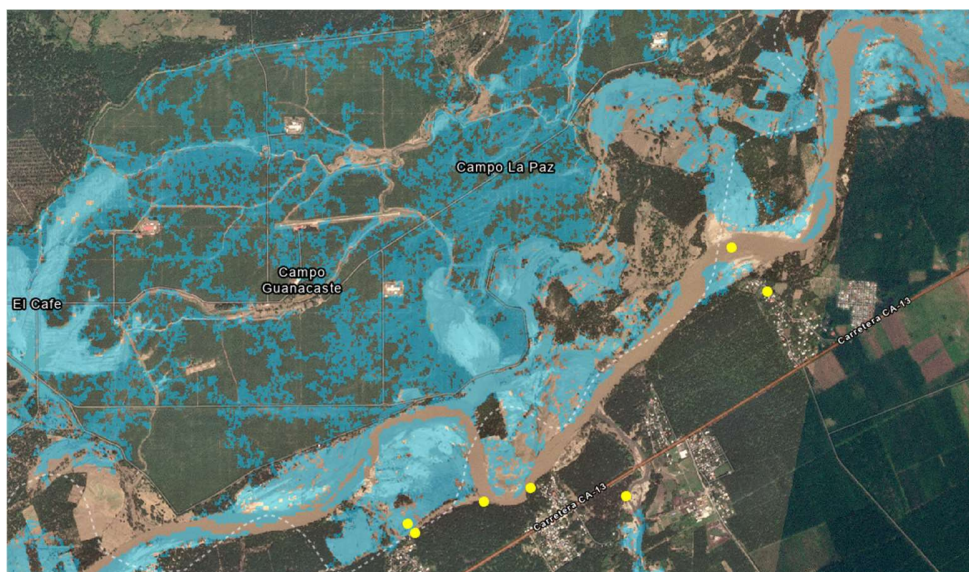
En la sección C, SAR pudo eficientemente detectar incluso los parches de menor tamaño, correspondientes al agua superficial de inundación (ver figura 2.9.).

Figura 2.9. Sección C, norte de Sabá.



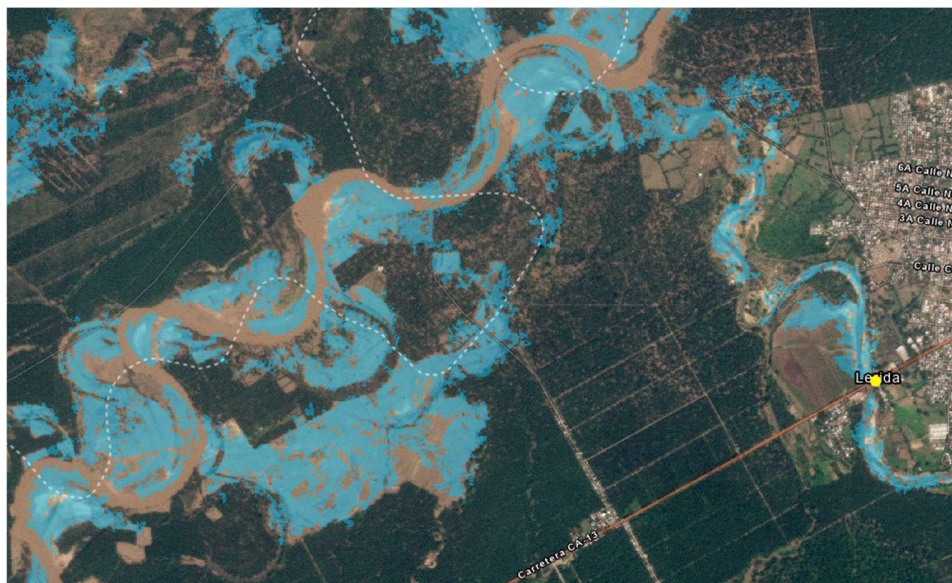
Para la sección D, se observa a continuación la eficacia de SAR para la detección del desbordamiento del río Aguán. En la orilla inferior del río se definen claramente los límites de inundación. Para la zona cultivada de Palma Africana y banano, costado superior del río, se detectan áreas dispersas inundadas, debido a características del radar y la detección de inundación debajo de vegetación.

Figura 2.10. Sección D, sector Cooperativa la Perla del Norte.



Finalmente, en la sección E, se demuestra nuevamente la capacidad de SAR para la detección de aguas superficiales, igualmente provenientes del desborde del río por el alto caudal presente en el momento de la captura de los datos (ver figura 2.11.).

Figura 2.11. Sección E, sector Lérica, cercano a Tocoa.



Impactos en cultivos a partir de NDVI

A continuación, se procede a mostrar los impactos en cultivos que se pueden explorar con el uso del NDVI. Primeramente, se muestra en la figura 2.12., el comparativo global del área disponible para el análisis, a partir de las imágenes de Sentinel 2 que se filtraron en GEE. Las fechas de búsqueda fueron, para antes del evento desde el 15 de septiembre del 2020 al 11 de noviembre del 2020, para después del evento se tomaron entre el 12 de noviembre 12 del 2020 y el 15 de diciembre del 2020. El otro criterio del filtro para las imágenes fue, que no presentaran nubosidad ni cirrus. La imagen A corresponde al compuesto para ex ante y la imagen B para ex post.

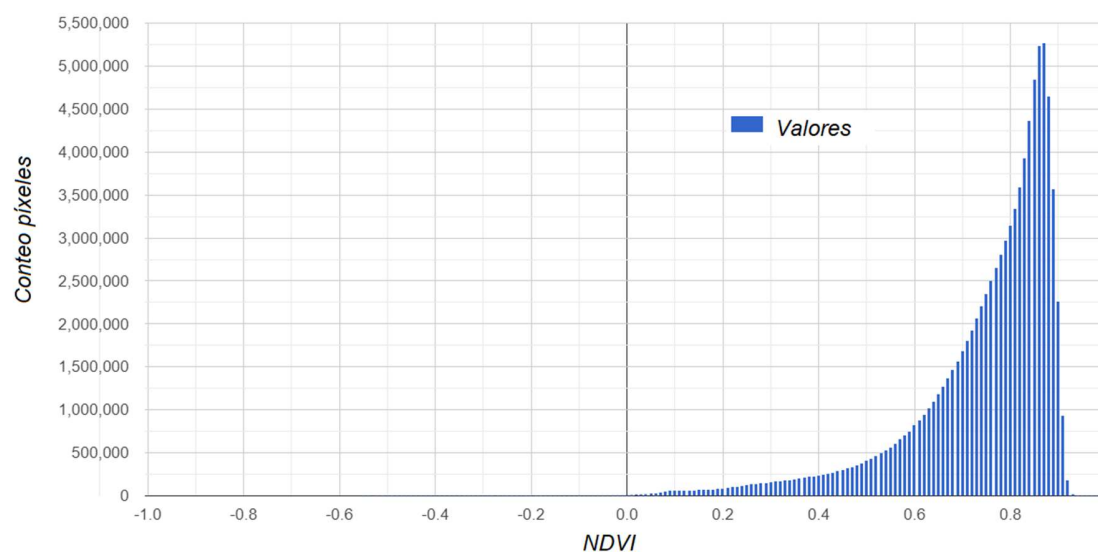
Figura 2.12. Visualización de área disponible para análisis, a partir de datos Sentinel 2.



Se observa para ambas imágenes anteriores, que no se logra abarcar la totalidad de la cuenca, ya sea por el filtro inicial que no acepta imágenes con nubosidad ni cirrus, o bien, por el procesamiento que elimina píxeles sin datos.

El cálculo del NDVI para los datos disponibles, muestra que para la escena ex ante, de modo general, la cuenca cuenta con un estado vegetativo bueno, con algunos sectores productivos agrícolas en la zona media-alta de la cuenca presentando algunos valores más bajos de NDVI. Asimismo, en la figura 2.13. se presenta la distribución de los valores del NDVI, por medio del histograma del conteo de píxeles. La mayoría de los valores se encuentran en un rango positivo de NDVI.

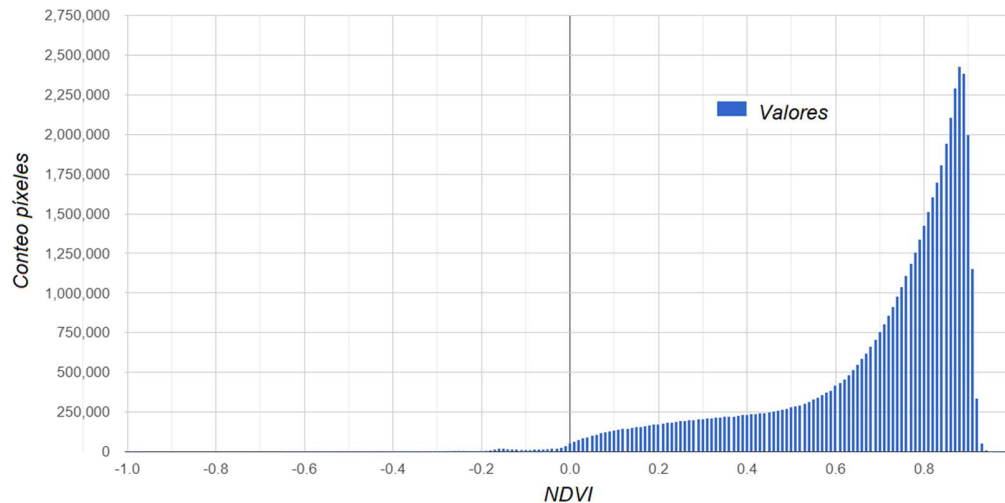
Figura 2.13. Distribución de valores NDVI ex Ante.



Seguidamente, en la escena ex post se cuenta con una menor área efectiva de análisis, ya que la escena presenta mayor nubosidad y los datos son más escasos. Los valores de estado vegetativo han disminuido, comparados con los cálculos de la escena anterior. La figura 2.14. presenta la distribución de los valores del NDVI para la imagen anterior, por medio

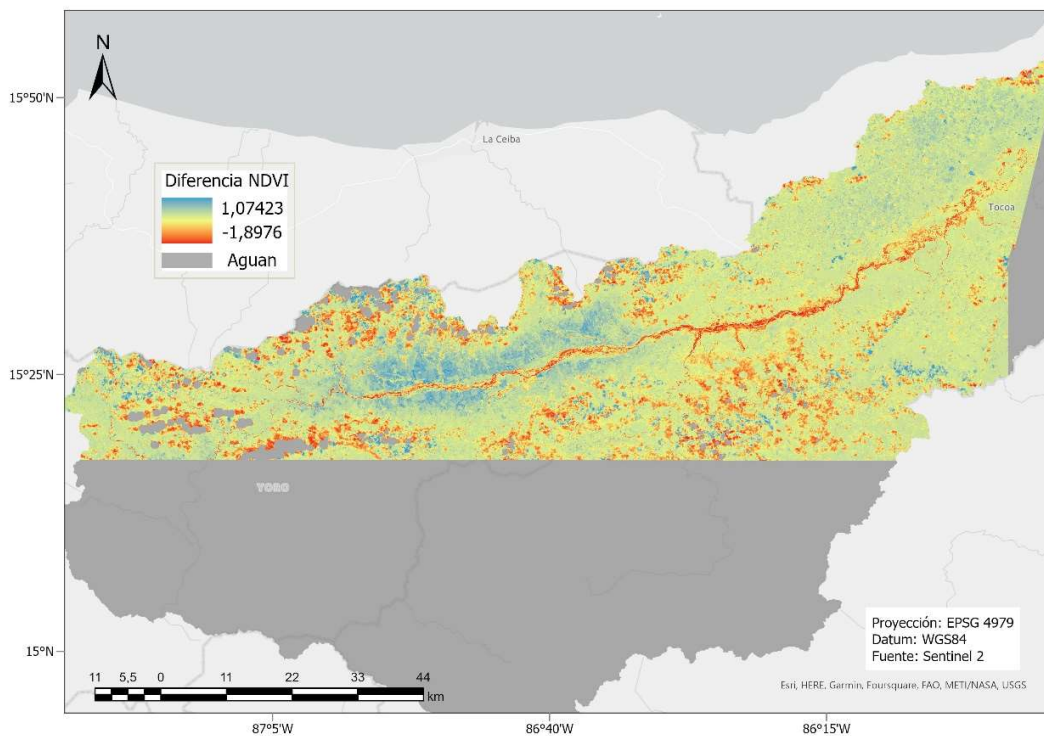
nuevamente de un histograma del conteo de píxeles. En el mismo se puede constatar un cambio en los rangos de valores.

Figura 2.14. Distribución de valores NDVI ex Post.



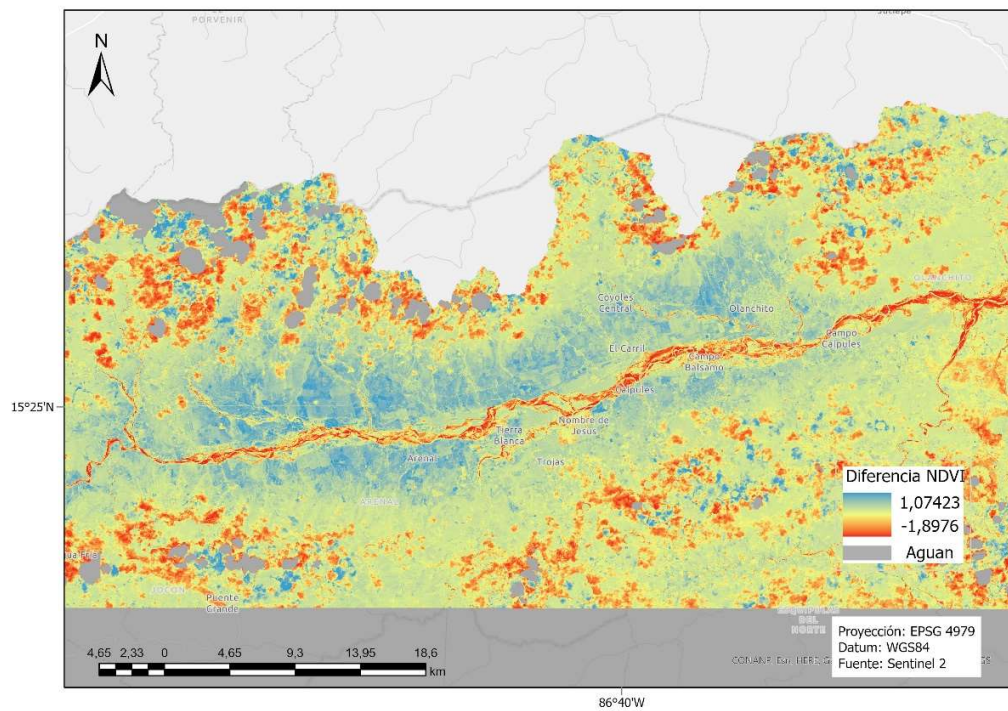
Luego procede el análisis del cambio del NDVI entre las escenas, lo cual se realiza en GEE, mediante una operación entre las dos imágenes ráster. Se toma la imagen ex Post, se sustraen los valores de NDVI de la ex Ante y se obtiene una imagen de diferencia donde se resaltan los píxeles donde los valores disminuyeron, se mantuvieron igual o aumentaron. Esta imagen de diferencia se muestra a continuación, en la figura 2.15.

Figura 2.15. Diferencia del NDVI para los datos de Aguán.



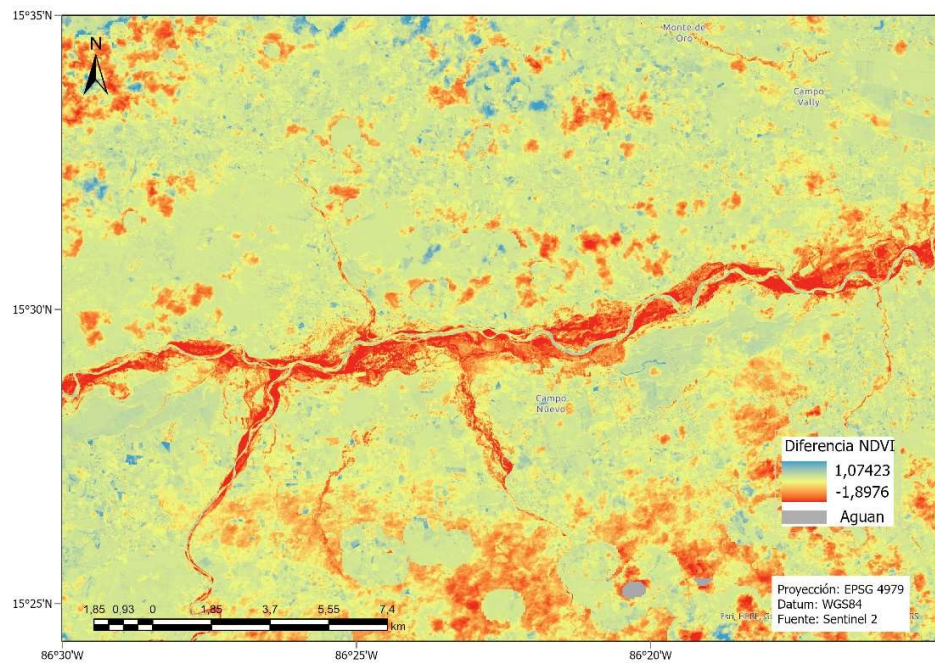
Es interesante observar cómo para el sector de la cuenca media-alta, la respuesta inmediata de la vegetación luego del evento de inundación fue de mejorar los valores de NDVI. Esto demuestra algunos efectos positivos de este tipo de eventos, puesto que esta zona es de los sectores más secos de la cuenca y posiblemente los depósitos de sedimentos y aumento de la humedad en suelo ocasionados por Eta e Iota sean unas de las razones para esta mejora en los registros del cálculo de NDVI de diferencia. El detalle visual se muestra a continuación en la figura 2.16.

Figura 2.16. Detalle diferencia de NDVI entre escenas ex ante y ex post.



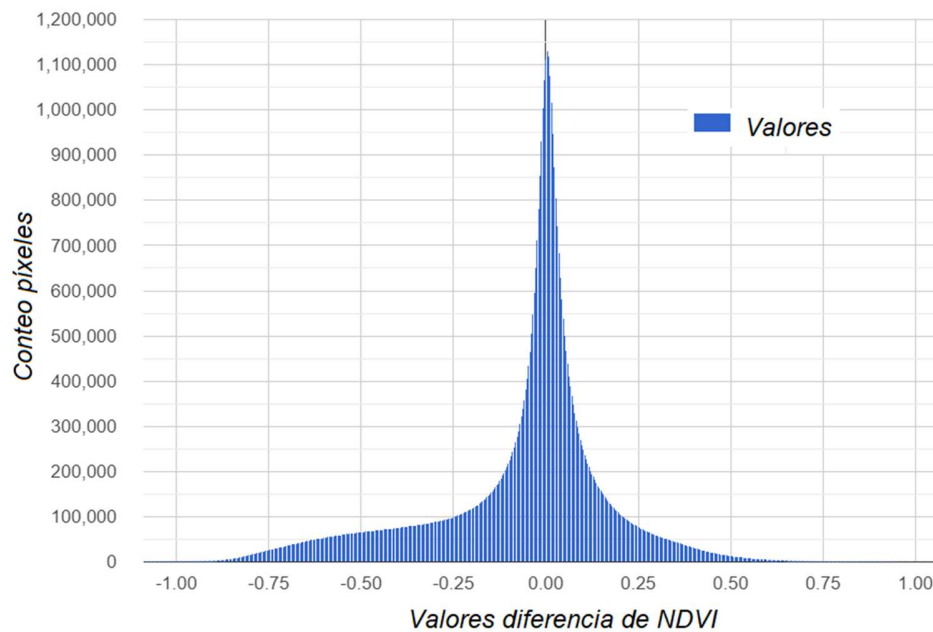
Tanto en la figura anterior, como en la que se presenta a continuación, se puede constatar también, que las zonas en la vega del río Aguán, la cuales se han presentado como inundadas a partir de los datos SAR, son de los sectores más afectados y con efectos negativos, según el análisis de estado vegetativo entre las escenas.

Figura 2.17. Detalle diferencia de NDVI entre escenas ex ante y ex post.



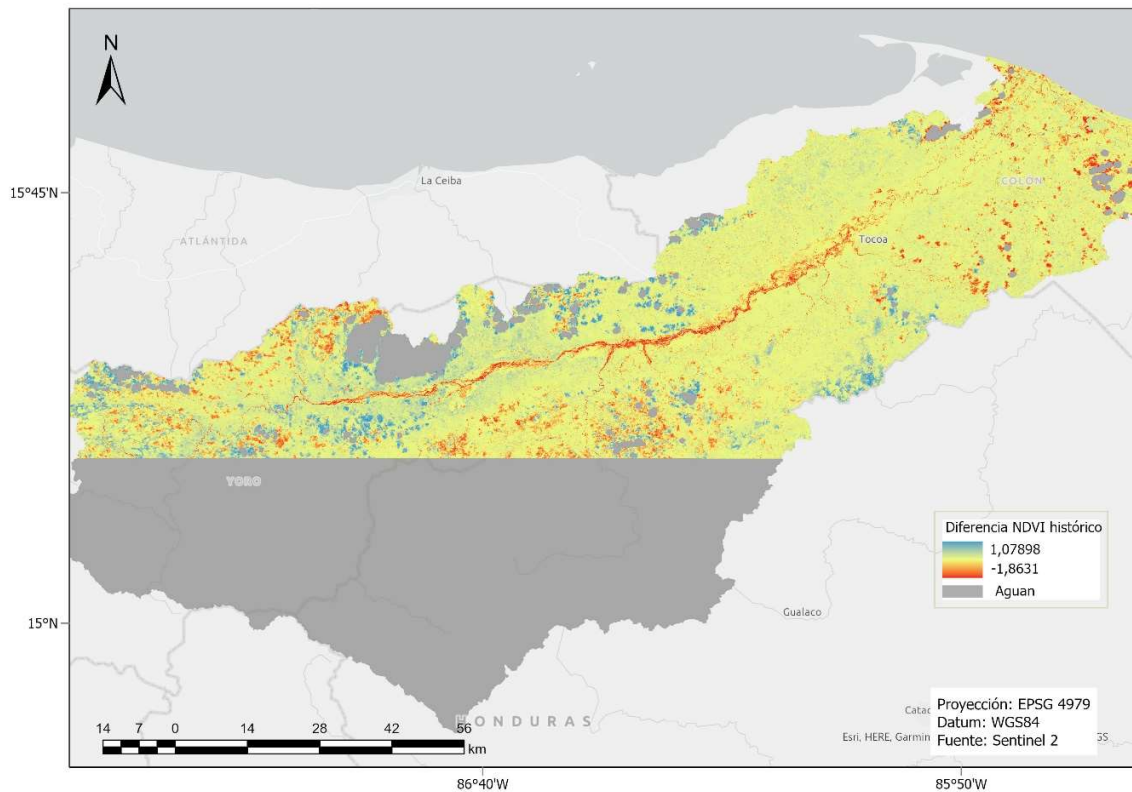
Adicionalmente, se presenta a continuación la distribución del histograma de píxeles para esta imagen de diferencia, en la figura 2.18. En el mismo se observa una distribución fuerte de valores negativos, representando disminución del NDVI generalmente.

Figura 2.18. Distribución de valores de diferencia de NDVI.



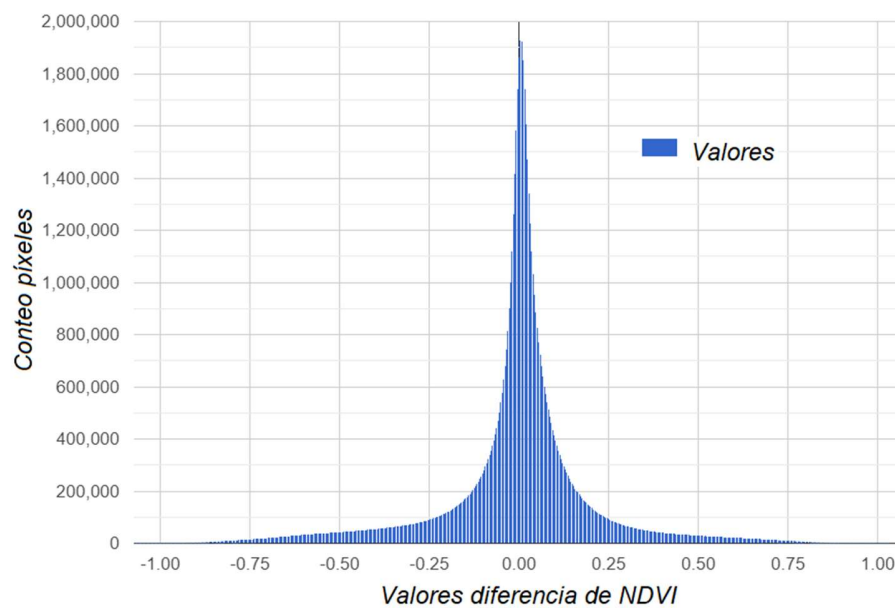
Al comparar un NDVI del final de año del 2020, con otro del 2019, se tiene que efectivamente el NDVI de 2020 no corresponde a un comportamiento del índice vegetativo para un período similar del año anterior. La siguiente figura 2.19. muestra cómo en un área de datos disponibles, para el rango de fechas del 12 de noviembre al 15 de enero, en efecto el NDVI del año en que se presentó la inundación fueron mayormente menores los valores de NDVI. Se realizó una sustracción de valores de NDVI del período 2019 al NDVI y se obtiene una imagen de diferencia donde se resaltan los píxeles donde los valores disminuyeron, se mantuvieron igual o aumentaron.

Figura 2.19. Comparación con el histórico de NDVI para los datos de Aguán, entre 2019 y 2020.



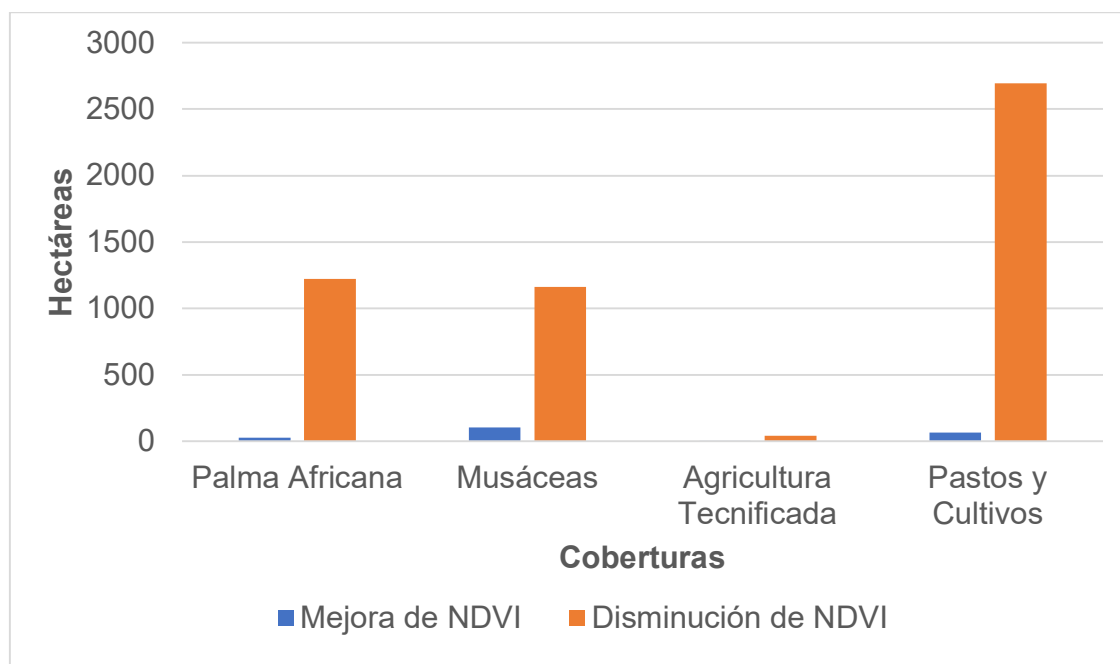
Se agrega el siguiente histograma de esa diferencia, figura 2.20., que pareciera tener una distribución balanceada entre píxeles que mejoraron su NDVI en 2020 comparados con 2019, aun así, como se mostró la figura anterior, la mayoría de píxeles con disminución de NDVI fue en áreas cercanas al río Aguán, las cuales se detectaron mayormente como inundadas.

Figura 2.20. Distribución de valores de diferencia de NDVI entre 2019-2020.



Finalmente, las estadísticas aisladas de las coberturas agrícolas provenientes de la clasificación del GeoPortal Honduras, para el área inundada detectada con SAR, muestra los siguientes comportamientos de NDVI luego de la inundación. En la figura 2.21. se logra apreciar cómo los pastos y cultivos fueron las coberturas más afectadas, según su respuesta de salud vegetativa. La Palma Africana y las musáceas, de gran extensión en la cuenca también tuvieron una respuesta mayormente negativa.

Figura 2.21. Respuesta del NDVI para cada cobertura agrícola, luego de Eta e Iota.



Uso potencial de parte de interesados a nivel local y regional

Usos potenciales en gestión de riesgo a desastres

La evaluación del uso potencial tiene sus consideraciones particulares. Desde el punto de vista funcional, se trata que la plataforma en GEE, a modo de app se distribuya de manera libre para que las personas puedan acceder sin limitaciones de conocimiento en geografía ni gestión de riesgo a desastres.

Durante la visita al valle del Aguán en febrero del 2023 se realizó una charla en la sede de la UNAH en la localidad, con participantes en persona y virtual vía Zoom, acerca de la creación de apps y cómo pueden influir en el acceso a la información para las personas del público general, instituciones pertinentes y además distribuir datos generados desde la academia (figura 2.22.). La respuesta generalizada por parte de las personas asistentes, luego de mostrar el ejemplo de la versión beta de la app del presente trabajo, fue de aceptación e incluso curiosidad para la consulta de la misma.

Figura 2.22. Presentación híbrida sede UNAH-Aguán y Zoom, 2023.



Se pudo comprobar en esta charla mencionada anteriormente y además en otra realizada de manera virtual con personas de UNAH-Aguán, United Fruit Company y COPECO, que cualquier dispositivo móvil con requerimientos mínimos de acceso a red de internet, posibilita el acceso y consulta de los datos.

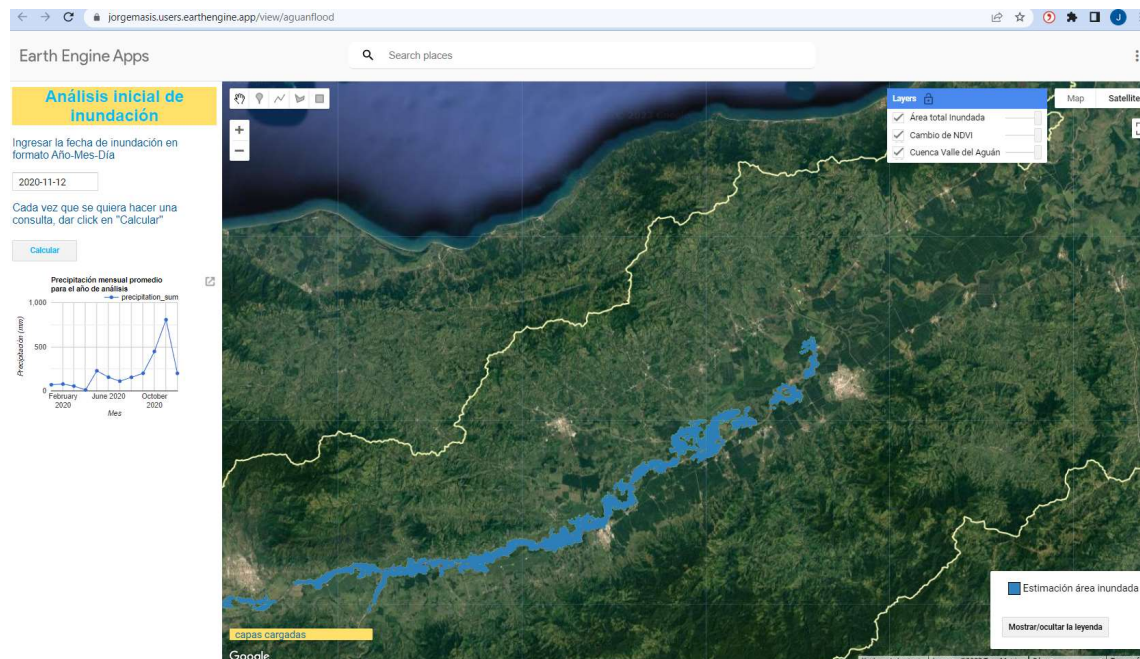
Igualmente, las personas aceptaron que era de suma importancia contar con este tipo de tecnologías de acceso rápido y simple para la verificación de los datos procesados de SAR y demás variables asociadas, además de mencionar que no prefieren una app que muestre demasiada información al mismo tiempo, sino una que sea clara de entender y sirva para procesos de educación ambiental y en gestión de riesgo.

Personas encargadas de la gestión de riesgo como lo es dentro de COPECO, mencionaron que no era una prioridad trabajar en la cuenca del valle del Aguán, puesto que tiene menor densidad poblacional comparada con otros sectores como Tegucigalpa y similares. De igual manera se les hizo saber acerca de la posibilidad de replicabilidad de la misma, por lo que queda la opción abierta de su incorporación en los planteamientos pertinentes.

Versión Beta de la app

A como se muestra en la figura siguiente, la app, en su versión beta, permite la interacción del usuario y visualización de variables calculadas en otros códigos que se manejaron para el presente trabajo, todos en un solo espacio virtual centralizado.

Figura 2.23. Aplicación en GEE Apps.

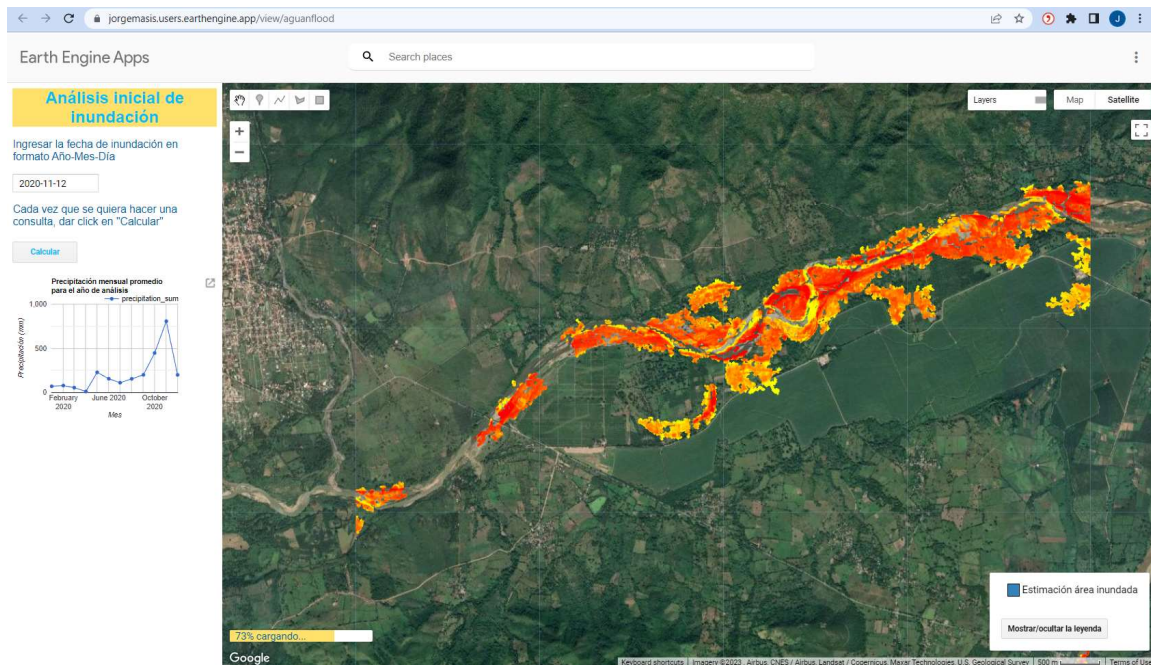


En la parte izquierda, el panel de usuario solamente requiere el ingreso de la fecha de consulta y presionar el botón de “Calcular”. El sistema calcula el área inundada y la presenta en el mapa a la derecha, a partir de esa área, calcula la diferencia de NDVI y la muestra también como una capa en el mapa, por último, como dato adicional se agrega un gráfico que muestra la precipitación promedio mensual para el año de la consulta.

Los usuarios pueden acercarse o alejarse en el mapa para visualizar zonas de interés y también tienen la opción de manipular la transparencia de las capas mostradas. El shapefile de la cuenca se agrega adicionalmente, como referencia de los límites del cálculo presentado. Y, además, los colores en el tablero y mapa, refieren a la paleta de colores de la Universidad de Costa Rica.

En la figura 2.24., se muestra otro ejemplo, más de cerca en una zona específica al azar dentro de la cuenca, donde se puede observar el cambio de NDVI, manipulando la transparencia de la capa de inundación.

Figura 2.24. Ejemplo adicional de visualización de los datos.



CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Queda demostrado que la metodología con el uso de las imágenes SAR manipuladas desde GEE brinda una herramienta eficiente de detección de área inundada, incluso cuando se compara con otros métodos de análisis a partir de datos obtenidos con sensores ópticos. A la vez, se refuerza su importancia en zonas donde la nubosidad de las imágenes con sensores pasivos no permite el mapeo en toda la extensión completa del área analizada.

Los eventos de Eta e Iota tuvieron una gran repercusión en la cuenca del Aguán, ya que 11 327 ha se detectaron como parte de la estimación de inundación por medio del uso de los datos SAR. En los cultivos, 7 479 ha de zonas agrícolas se llegó a detectar como inundada. Se mostró una mejora en otros productos que se habían generado a nivel local, de parte de la UNAH, lo cual resalta la importancia del presente abordaje.

El análisis de inundación con MNDWI resulta una herramienta igualmente valiosa y de buenos resultados, sin embargo, no se encontraron datos para la totalidad de la extensión de la cuenca para las fechas necesarias dentro del análisis. Con esto se refuerza que con la tecnología SAR, estas dificultades se pueden solventar y resalta también la complementariedad de las fuentes de datos de teledetección.

El índice de vegetación aplicado, NDVI, evidenció respuestas negativas en la salud de la vegetación para las cuatro principales coberturas relacionadas a agricultura, además de ser una fuente adicional de información para la caracterización del daño en cultivos asociado a la extensión de área inundada.

Con lo anterior queda demostrado, que el índice de vegetación permite evaluar la respuesta de los cultivos y la salud de la vegetación presente en la zona inundada. Es a la vez interesante confirmar que las inundaciones tienen en cierto grado efectos positivos en la vegetación

inundada, lo cual se ha llegado a relacionar con depósito de nutrientes y aumento de humedad en suelo, producto de las aguas provenientes de la inundación.

La metodología aplicada para el cálculo de extensión de área inundada y evaluación en cultivos, resulta una herramienta valiosa para la academia, institucionalidad pública en manejo de cultivos y gestión de riesgos, puesto que brinda información valiosa en la prontitud luego de un evento de inundación.

Igualmente, la aplicación publicada en Google Earth Engine tiene la versatilidad de poder compartirse entre partes interesadas y usarse para análisis post inundación, permite también manejar escalas de análisis según sean las necesidades del usuario. Los usuarios consultados no tenían mucho conocimiento de los datos radar ni de la aplicación en tándem de estos con datos ópticos, por lo que mostrar este tipo de iniciativas tecnológicas fue una lección valiosa.

De modo general, la facilidad de compartir código de GEE es un aliciente para que personas con conocimiento técnico puedan adaptar y probar sus propios códigos, agregando cálculos a la base que se proporciona en el presente trabajo.

Recomendaciones

Se podrá intentar mezclar las polarizaciones VV y VH, para asegurarse una mejor detección de aguas abiertas y debajo de vegetación en conjunto. Esto porque las características propias de cada una de las polarizaciones favorecen el análisis, en el área a detectar.

A partir del conocimiento local en zonas con particularidades a considerar, cómo puede ser dificultad de acceso para inspecciones post evento o necesidades de mejora de la precisión de detección, es posible realizar iteraciones con los parámetros de cálculo dentro del código de GEE para hacer un ajuste deseado.

El procesamiento del NDVI se puede mejorar al implementar código que estime y complete por interpolación, datos en las zonas nubladas, para tener información más robusta en la totalidad del sitio de estudio.

Es necesario trabajar a nivel local e identificar instituciones y actores claves, para que se pueda contar con una base de datos eficiente en torno a la información de cultivos. Esta base deberá de incluir, para ser un referente histórico, entre otros puntos: detalle de fincas y cultivos, fechas del manejo agrícola como lo son siembra y cosecha, porcentaje de inundación, rendimiento de cultivos y pérdidas específicas.

Una escala de manejo de datos y visualización más fina (nivel de finca o sector, en vez de toda la cuenca) permitiría apreciar mejor el detalle y podría resultar más interesante a las partes interesadas locales. Incluso pensar en detallar capas con cultivos específicos o tipo de agricultura desarrollada (industrial en comparación a pequeños productores).

Asociado al punto anterior, la capa nacional de coberturas de suelo del 2018 fue un recurso valioso para el presente trabajo, por lo que se recomienda su continua mejora y actualización, en la medida que mejoren las capas e información de cultivos y coberturas, así mejorará también la capacidad del algoritmo y los resultados asociados.

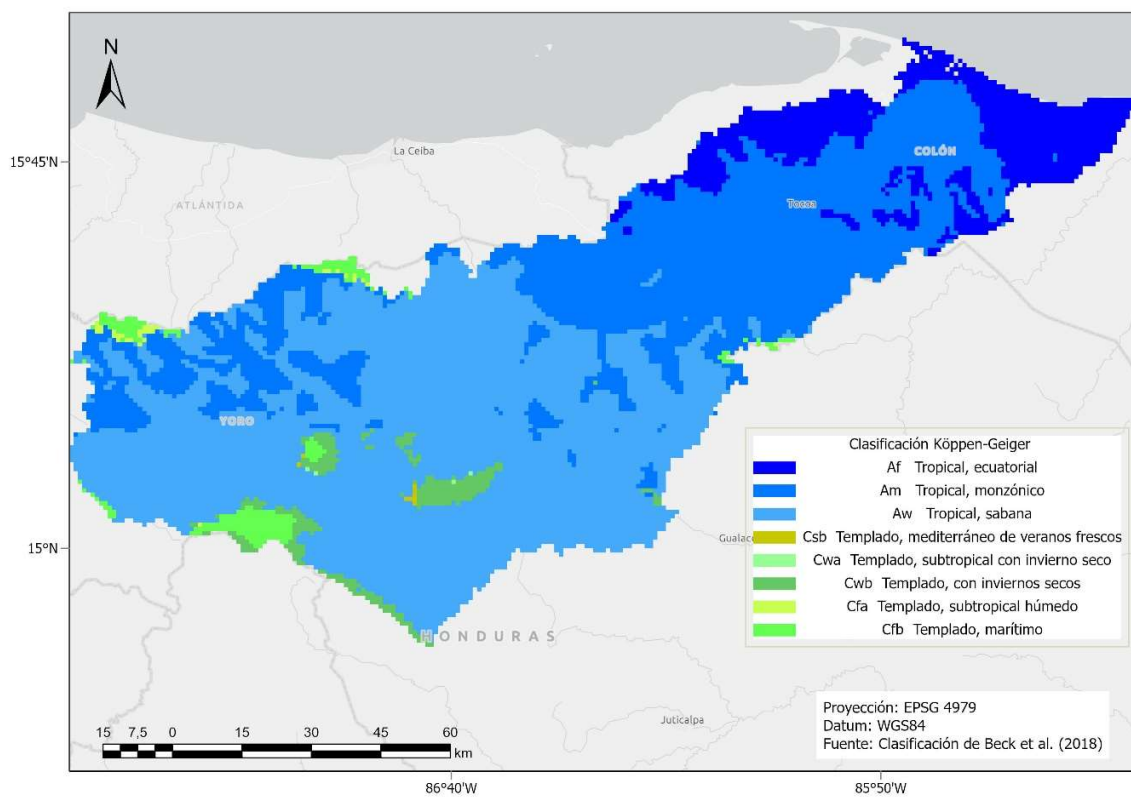
Definir a lo interno por parte de los interesados y responsables, una zonificación para análisis, como puede ser zonas prioritarias según una distribución espacial congruente con los recursos de manejo y gestión a convenir.

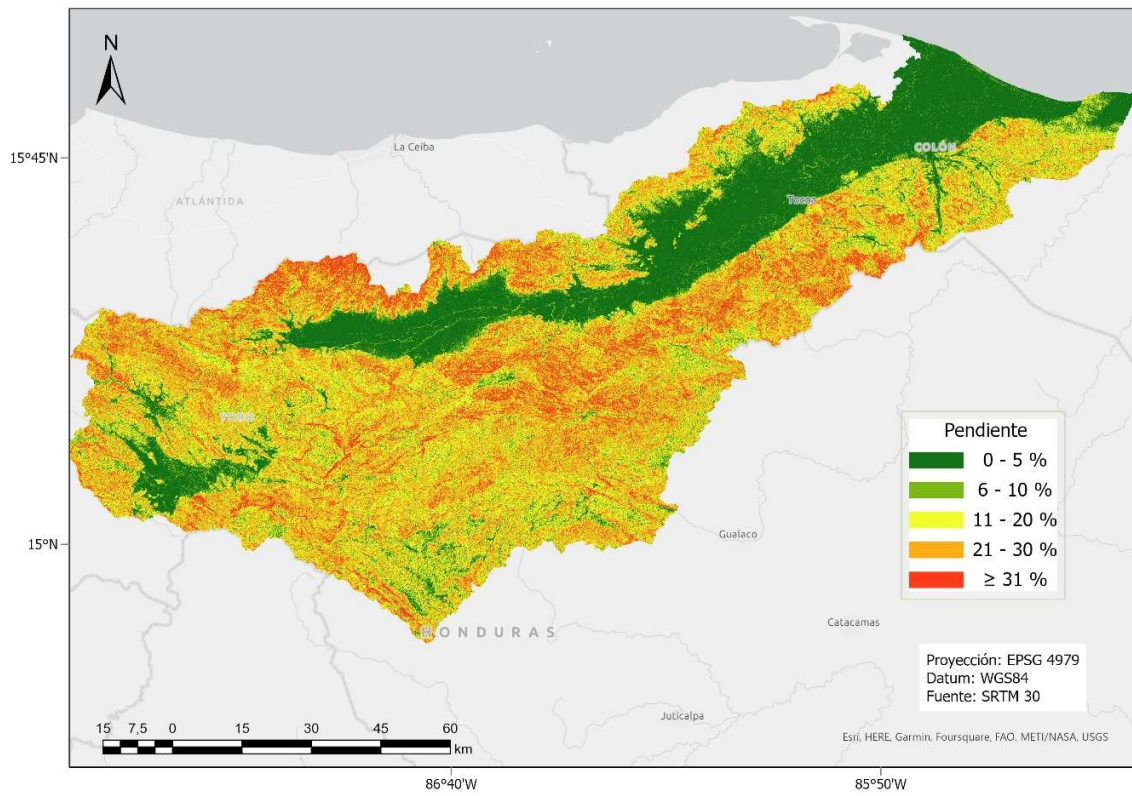
Se puede usar esta propuesta, junto con iniciativas más desarrolladas como las que genera el programa SERVIR, para migrar a una herramienta de mapeos rápidos de inundaciones ante eventos extremos, que incluya inundaciones, deslizamientos y otros tipos de eventos que se puedan analizar con teledetección. Incluso, como futuros pasos, el desarrollo de una herramienta en tiempo real para cuerpos de emergencia y alerta temprana.

Dentro del plano práctico de las visitas de campo, se debe de considerar siempre contar con soluciones a imprevistos tales como lo que ocurrió con el GPS que se había llevado a las giras de campo, el cual se vio afectado por las condiciones climáticas locales y llevó a necesitar usar otra forma de tomar puntos de georeferencia.

ANEXOS

Anexo Figura.1. Clasificación climática para la cuenca Aguán.



Anexo Figura.2. Valores de pendiente.

Anexo Tabla.1. Detalles de las imágenes Sentinel 1 seleccionadas para la detección de inundación, escena Ex Ante (todas en polarización VV).

Fecha (dd.mm .aaaa)	Paso	ID
20.10.2 020	Descen diente	COPERNICUS/S1_GRD/S1A_IW_GRDH_1SDV_20201020T112930_20201020T112959_034879_04110C_4F48
20.10.2 020	Ascend iente	COPERNICUS/S1_GRD/S1A_IW_GRDH_1SDV_20201020T235813_20201020T235838_034887_041152_A8CD
25.10.2 020	Descen diente	COPERNICUS/S1_GRD/S1A_IW_GRDH_1SDV_20201025T113729_20201025T113758_034952_041382_3FAA
25.10.2 020	Descen diente	COPERNICUS/S1_GRD/S1A_IW_GRDH_1SDV_20201025T113758_20201025T113823_034952_041382_0557
27.10.2 020	Ascend iente	COPERNICUS/S1_GRD/S1A_IW_GRDH_1SDV_20201027T235007_20201027T235032_034989_0414CA_5826
01.11.2 020	Descen diente	COPERNICUS/S1_GRD/S1A_IW_GRDH_1SDV_20201101T112930_20201101T112959_035054_0416FC_B816
01.11.2 020	Ascend iente	COPERNICUS/S1_GRD/S1A_IW_GRDH_1SDV_20201101T235813_20201101T235838_035062_041744_A715
06.11.2 020	Descen diente	COPERNICUS/S1_GRD/S1A_IW_GRDH_1SDV_20201106T113729_20201106T113758_035127_041982_BFED
06.11.2 020	Descen diente	COPERNICUS/S1_GRD/S1A_IW_GRDH_1SDV_20201106T113758_20201106T113823_035127_041982_8CE9
08.11.2 020	Ascend iente	COPERNICUS/S1_GRD/S1A_IW_GRDH_1SDV_20201108T235007_20201108T235040_035164_041AD0_5174
26.10.2 020	Ascend iente	COPERNICUS/S1_GRD/S1B_IW_GRDH_1SDV_20201026T235735_20201026T235804_023991_02D99A_4F54

Fuente: Elaboración propia

Anexo Tabla.2. Detalles de las imágenes Sentinel 1 seleccionadas para la detección de inundación, escena Ex Post (todas en polarización VV).

Fecha (dd.mm .aaaa)	Paso	ID
13.11.2 020	Descen diente	COPERNICUS/S1_GRD/S1A_IW_GRDH_1SDV_20201113T112959_035229_041D1E_FC80
13.11.2 020	Ascend iente	COPERNICUS/S1_GRD/S1A_IW_GRDH_1SDV_20201113T235813_035237_041D66_B4CA
18.11.2 020	Descen diente	COPERNICUS/S1_GRD/S1A_IW_GRDH_1SDV_20201118T113728_035302_041FA6_E1FA
18.11.2 020	Descen diente	COPERNICUS/S1_GRD/S1A_IW_GRDH_1SDV_20201118T113758_035302_041FA6_846E
20.11.2 020	Ascend iente	COPERNICUS/S1_GRD/S1A_IW_GRDH_1SDV_20201120T235007_035339_0420EA_7945
25.11.2 020	Descen diente	COPERNICUS/S1_GRD/S1A_IW_GRDH_1SDV_20201125T112929_035404_042326_1D4C
25.11.2 020	Ascend iente	COPERNICUS/S1_GRD/S1A_IW_GRDH_1SDV_20201125T235812_035412_04236D_1253
30.11.2 020	Descen diente	COPERNICUS/S1_GRD/S1A_IW_GRDH_1SDV_20201130T113728_035477_0425AC_AACE
30.11.2 020	Descen diente	COPERNICUS/S1_GRD/S1A_IW_GRDH_1SDV_20201130T113822_035477_0425AC_606F
19.11.2 020	Descen diente	COPERNICUS/S1_GRD/S1B_IW_GRDH_1SDV_20201119T112842_024333_02E43F_164D
19.11.2 020	Descen diente	COPERNICUS/S1_GRD/S1B_IW_GRDH_1SDV_20201119T112907_024333_02E43F_4626
19.11.2 020	Ascend iente	COPERNICUS/S1_GRD/S1B_IW_GRDH_1SDV_20201119T235717_024341_02E47D_D101
19.11.2 020	Ascend iente	COPERNICUS/S1_GRD/S1B_IW_GRDH_1SDV_20201119T235807_024341_02E47D_DCF6

Fuente: Elaboración propia

Anexo Tabla.3. Detalles de las imágenes Sentinel 2 seleccionadas para el cálculo de MNDWI y para cálculo de NDVI.

Fecha (dd.mm.aaaa)	ID	Uso
09.11.2020	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20201109T160511_20201109T161049_T16PEB	MNDWI
12.11.2020	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20201112T161531_20201112T162502_T16PFC	
18.09.2020	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20200918T160839_20200918T161640_T16PDC	NDVI Ex ante
18.09.2020	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20200918T160839_20200918T161640_T16PEC	
20.09.2020	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20200920T155941_20200920T161540_T16PEB	
20.09.2020	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20200920T155941_20200920T161540_T16PEC	
20.09.2020	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20200920T155941_20200920T161540_T16PFC	
28.09.2020	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20200928T160949_20200928T162839_T16PDB	
28.09.2020	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20200928T160949_20200928T162839_T16PDC	
28.09.2020	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20200928T160949_20200928T162839_T16PEC	
28.09.2020	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20200928T160949_20200928T162839_T16PFC	
09.11.2020	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20201109T160511_20201109T161049_T16PEB	
12.11.2020	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20201112T161531_20201112T162502_T16PFC	NDVI Ex post
27.11.2020	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20201127T161619_20201127T162301_T16PEC	
27.11.2020	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20201127T161619_20201127T162301_T16PFC	
12.12.2020	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20201212T161651_20201212T162756_T16PDC	
12.12.2020	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20201212T161651_20201212T162756_T16PEC	
12.12.2020	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20201212T161651_20201212T162756_T16PFC	
14.12.2020	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20201214T160649_20201214T160650_T16PEC	

17.12.2020	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20201217T161659_20201217T162442_T16PFC	NDVI Ex post, comparativo con histórico
01.01.2021	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20210101T161701_20210101T162759_T16PDC	
01.01.2021	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20210101T161701_20210101T162759_T16PEC	
01.01.2021	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20210101T161701_20210101T162759_T16PFC	
08.01.2021	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20210108T160641_20210108T161348_T16PEC	
08.01.2021	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20210108T160641_20210108T161348_T16PFC	
08.12.2019	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20191208T161651_20191208T162134_T16PFC	NDVI histórico de referencia
15.12.2019	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20191215T160651_20191215T161517_T16PEC	
28.12.2019	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20191228T161651_20191228T162143_T16PEC	
02.01.2020	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20200102T161649_20200102T161654_T16PDB	
04.01.2020	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20200104T160641_20200104T161448_T16PEC	
04.01.2020	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20200104T160641_20200104T161448_T16PFC	
12.01.2020	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20200112T161629_20200112T162640_T16PDC	
12.01.2020	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20200112T161629_20200112T162640_T16PFC	

Fuente: Elaboración propia

Anexo Tabla.4. Matriz de evaluación de precisión SAR y Puntos de Campo.

Longitud	Latitud	Usuario (L)	Producto (P)	Verdadero positivo (a)	Verdadero negativo (d)	Falso positivo (b)	Falso negativo (c)
-86.0521 1	15.6598	0	1	0	0	1	0
-86.042 4	15.6709	1	1	1	0	0	0
-86.0533 1	15.6638	1	1	1	0	0	0
-86.0405 7	15.6651	1	1	1	0	0	0
-86.037	15.6673	1	1	1	0	0	0
-86.0302 1	15.6745	1	1	1	0	0	0
-86.025 5	15.6751	1	1	1	0	0	0
-86.0294 5	15.6799	1	1	1	0	0	0
-86.0312	15.6878	1	1	1	0	0	0
-86.0209 4	15.6884	1	1	1	0	0	0
-86.0172	15.6943	1	1	1	0	0	0
-86.0059	15.6969	1	1	1	0	0	0
-86.0128 9	15.7042	1	1	1	0	0	0
-86.0072 5	15.7081	1	1	1	0	0	0
-85.9683 9	15.7151	0	1	0	0	1	0
-85.9837 2	15.7344	0	1	0	0	1	0
-85.962	15.74	0	1	0	0	1	0
-85.9542	15.7543	0	1	0	0	1	0
-86.0428 6	15.6771	1	1	1	0	0	0
-86.0184 2	15.6785	0	1	0	0	1	0
-86.0163 6	15.6841	1	1	1	0	0	0

-86.0128	15.7066	1	1	1	0	0	0
	8						
-86.0035	15.7086	0	1	0	0	1	0
	3						
-85.9954	15.7040	1	1	1	0	0	0
	1						
-85.9574	15.7299	0	1	0	0	1	0
	9						
-85.9512	15.7387	1	1	1	0	0	0
	5						
-86.0488	15.6674	0	0	0	1	0	0
	6						
-86.0416	15.6578	0	0	0	1	0	0
	8						
-86.0255	15.6849	0	0	0	1	0	0
	8						
-86.0365	15.6836	0	0	0	1	0	0
	6						
-86.0238	15.6796	0	0	0	1	0	0
	9						
-86.0076	15.6899	0	0	0	1	0	0
	4						
-86.0066	15.7038	0	0	0	1	0	0
	2						
-85.9881	15.7015	0	0	0	1	0	0
	1						
-85.9839	15.7170	0	0	0	1	0	0
	4						
-85.9692	15.7381	0	0	0	1	0	0
	9						
-85.9564	15.7666	0	0	0	1	0	0
	4						
-85.9938	15.7725	0	0	0	1	0	0
	9						
-86.0237	15.7283	0	0	0	1	0	0
	1						
-86.0014	15.7392	0	0	0	1	0	0
	2						
-85.9434	15.7732	0	0	0	1	0	0
	5						
-85.9833	15.6828	0	0	0	1	0	0
	5						

-85.9695	15.6927	0	0	0	1	0	0
	7						
-86.0629	15.6831	0	0	0	1	0	0
	8						
-86.0241	15.7165	0	0	0	1	0	0
	6						
-86.0173	15.7175	0	0	0	1	0	0
	6						
-86.0025	15.7178	0	0	0	1	0	0
	9						
-85.9943	15.7311	0	0	0	1	0	0
	1						
-85.9733	15.7662	0	0	0	1	0	0
	7						
-85.962	15.7368	0	0	0	1	0	0
	7						
-85.9829	15.7401	0	0	0	1	0	0
	7						

Fuente: Elaboración propia

Anexo Tabla.5. Matriz de evaluación de precisión SAR y MNDWI.

Longitud	Latitud	Usuario (L)	Producto (P)	Verdadero positivo (a)	Verdadero negativo (d)	Falso positivo (b)	Falso negativo (c)
-86.97747	15.4125	0	1	0	0	1	0
-86.93081	15.4175	0	1	0	0	1	0
-86.91451	15.4056	0	0	0	1	0	0
-86.83095	15.4221	0	1	0	0	1	0
-86.76235	15.3929	0	1	0	0	1	0
-86.73714	15.3929	0	1	0	0	1	0
-86.73363	15.4231	0	1	0	0	1	0
-86.73294	15.4156	0	1	0	0	1	0
-86.73399	15.4240	0	0	0	1	0	0
-86.68318	15.4373	0	0	0	1	0	0
-86.58532	15.4424	0	1	0	0	1	0
-86.52245	15.4754	0	1	0	0	1	0
-86.48449	15.4880	0	0	0	1	0	0
-86.48578	15.4788	1	1	1	0	0	0
-86.48333	15.4781	1	1	1	0	0	0
-86.48342	15.4860	1	1	1	0	0	0
-86.47944	15.4880	0	1	0	0	1	0
-86.47022	15.4877	1	1	1	0	0	0

-86.4668	15.4885	0	1	0	0	1	0
6							
-86.4663	15.491	0	1	0	0	1	0
-86.4673	15.4912	0	0	0	1	0	0
-86.4267	15.4382	0	1	0	0	1	0
6							
-86.4137	15.4813	1	1	1	0	0	0
-86.3864	15.4733	0	1	0	0	1	0
9							
-86.2311	15.5298	0	1	0	0	1	0
-86.229	15.5414	1	1	1	0	0	0
-86.1343	15.5877	1	1	1	0	0	0
4							
-86.1379	15.5867	1	1	1	0	0	0
9							
-86.1434	15.5899	1	1	1	0	0	0
7							
-86.1297	15.6007	1	1	1	0	0	0
3							
-86.1224	15.5979	1	1	1	0	0	0
2							
-86.1177	15.5871	1	1	1	0	0	0
5							
-86.1115	15.6090	0	1	0	0	1	0
2							

Fuente: Elaboración propia

BIBLIOGRAFÍA

Agarwal, A. (2000). *Integrated water resources management. TAC background papers: no. 4*. Global Water Partnership.

Allen, M. R. (2015). *Climate change 2014: Synthesis report* [IPCC, WMO].

Allouche, J. (2016). The Birth and Spread of IWRM – A Case Study of Global Policy Diffusion and Translation. *Water Alternatives*, 3(412-433). <https://www.water-alternatives.org/index.php/alldoc/articles/vol9/v9issue3/336-a9-3-2/file>

Anusha, N. y Bharathi, B. (2020). Flood detection and flood mapping using multi-temporal synthetic aperture radar and optical data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 23(2), 207–219. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2019.01.001>

Baird, J., Quinlan, A., Plummer, R., Moore, M.-L. y Krievins, K. (2021). Capacities for Watershed Resilience: Persistence, Adaptation, and Transformation. En *Water Resilience* (pp. 139–169). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48110-0_7

Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A. y Wood, E. F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 5(1), 180214. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>

Beer, T. (2018). The Impact of Extreme Weather Events on Food Security. En *Climate Change, Extreme Events and Disaster Risk Reduction* (pp. 121–133). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56469-2_8

Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres Naturales Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres Naturales en América Central (CEPREDENAC) en América Central (CEPREDENAC) (2017). *Política Centroamericana de Gestión Integral de Riesgo de Desastres PCGIR*. (PCGIR-MSRRD 2015-2030/CEPREDENAC/SICA-001-2017 PCGIR-MSRRD 2015-2030/CEPREDENAC/SICA-001-2017). Sistema de la Integración Centroamericana (SICA) Sistema de la Integración Centroamericana (SICA).

CEPAL, N. (2021). *Evaluación de los efectos e impactos causados por la tormenta tropical Eta y el huracán Iota en Honduras*. CEPAL; BID. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/46853>

Chen, H., Liang, Q., Liang, Z., Liu, Y. y Xie, S. (2019). Remote-sensing disturbance detection index to identify spatio-temporal varying flood impact on crop production. *Agricultural and Forest Meteorology*, 269-270, 180–191. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.02.002>

Clement, M. A., Kilsby, C. G. y Moore, P. (2018). Multi-temporal synthetic aperture radar flood mapping using change detection. *Journal of Flood Risk Management*, 11(2), 152–168. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12303>

Comisión Económica para América Latina y el Caribe y Secretaría de Energía, Recursos Naturales, Ambiente y Minas - Honduras. (2016). *La Economía del Cambio Climático en Honduras. Mensajes clave*.

Comisión Permanente de Contingencias (2013). Informe sobre Gestión Integral del Riesgo de Desastres en Honduras 2013. <https://dipecholac.net/docs/files/887-informe-gird-honduras-version-preliminar-web.pdf>

DeVries, B., Huang, C., Armston, J., Huang, W., Jones, J. W. y Lang, M. W. (2020). Rapid and robust monitoring of flood events using Sentinel-1 and Landsat data on the Google Earth Engine. *Remote Sensing of Environment*, 240, 111664. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111664>

Diario La Tribuna. (2020). *Eta golpea sector agrícola con inundación de cultivos (11.05.2020)*. <https://www.latribuna.hn/2020/11/05/eta-golpea-sector-agricola-con-inundacion-de-cultivos/>

Donchyts, G. y Clinton, N. (2023, 25 de abril). *Otsu thresholding - Google Earth Engine Code*. <https://code.earthengine.google.com/e9c699d7b5ef811d0a67c02756473e9d>

Donchyts, G., Schellekens, J., Winsemius, H., Eisemann, E. y van de Giesen, N. (2016). A 30 m Resolution Surface Water Mask Including Estimation of Positional and Thematic Differences Using Landsat 8, SRTM and OpenStreetMap: A Case Study in the Murray-Darling Basin, Australia. *Remote Sensing*, 8(5), 386. <https://doi.org/10.3390/rs8050386>

El Pulso (2020). Pérdidas y destrucción de cultivos por inundaciones deja la depresión tropical Eta (5.11.2020). *El Pulso*. <https://elpulso.hn/2020/11/05/perdidas-y-destruccion-de-cultivos-por-inundaciones-deja-la-depresion-tropical-eta/>

Elkhrachy, I., Pham, Q. B., Costache, R., Mohajane, M., Rahman, K. U., Shahabi, H., Linh, N. T. T. y Anh, D. T. (2021). Sentinel-1 remote sensing data and Hydrologic Engineering Centres River Analysis System two-dimensional integration for flash flood detection and modelling in New Cairo City, Egypt. *Journal of Flood Risk Management*, 14(2). <https://doi.org/10.1111/jfr3.12692>

Espinoza Cisneros, E., Molina Montero, M. J., Céspedes-Rivera, J. y Aguilar-Barboza, C. (2020). *Manual de cálculo inundaciones: Introducción al uso de imágenes de Radar de Apertura Sintética aplicado a la agricultura*.

Flores, A., Herndon, K., Thapa, R. y Cherrington, E. (2019). *Synthetic Aperture Radar (SAR) Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation*. <https://doi.org/10.25966/NR2C-S697>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). *Subregional Central America, Hurricanes Eta and Iota Urgent call for assistance*.

Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A. y Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations--a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2(1), 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>

Ganaie, H. A., Hashia, H. y Kalota, D. (2013). Delineation of Flood Prone Area using Normalized Difference Water Index (NDWI) and Transect Method: A Case Study of Kashmir Valley. *International Journal of Remote Sensing Applications*, 3(2). IJRSA10172 3 2 53 58.pdf

Gandhi, U. (2020). *Guided Project: Flood Mapping: End-to-End Google Earth Engine*. <https://docs.google.com/presentation/d/1BIv7IZ-A6ElxRNioShZoU-vSfwknh8-j4lDiJapWSTo/edit#slide=id.p>

Gennadii, D., Winsemius, H., Schellekens, J., Erickson, T., Gao, H., Savenije, H. y van de Giesen, N. (2016). *Global 30m Height Above the Nearest Drainage (HAND)*. EGU General Assembly. Geophysical Research Abstracts. <https://gee-community-catalog.org/projects/hand/>

Ghandi, U. (2020). *Calculate Annual Average Rainfall. Google Earth Engine Code*. <https://code.earthengine.google.com/016629ab35c652ee3ff0d7035c5d5cfa>

Google Developers. (2022). *Earth Engine Apps*. <https://developers.google.com/earth-engine/guides/apps>

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. y Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 7 // 202(3), 277. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>

Gupta, V., Jain, M. K., Singh, P. K. y Singh, V. (2020). An assessment of global satellite-based precipitation datasets in capturing precipitation extremes: A comparison with observed precipitation dataset in India. *International Journal of Climatology*, 40(8), 3667–3688. <https://doi.org/10.1002/joc.6419>

Hajnsek, I. y Desnos, Y.-L. (Eds.). (2021). *Remote Sensing and Digital Image Processing: Vol. 25. Polarimetric Synthetic Aperture Radar: Principles and Application* (1st ed. 2021). Springer International Publishing.

Hondudiario. (2020). *Pérdidas en cultivos de frijol rondan en 60 mil manzanas debido a las inundaciones (04.12.2020)*. <https://hondudiario.com/nacionales/perdidas-en-cultivos-de-frijol-rondan-en-60-mil-manzanas-debido-a-las-inundaciones/>

IPCC. (2021). *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

- Khatun, M., Garai, S., Sharma, J., Singh, R., Tiwari, S. y Rahaman, S. M. (2022). Flood mapping and damage assessment due to the super cyclone Yaas using Google Earth Engine in Purba Medinipur, West Bengal, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(12), 869. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10574-y>
- Lemoine, G. (2016). *Refined Lee Speckle Filter, as coded in the SNAP 3.0 SITBX, adapted by Guido Lemoine*. <https://github.com/senbox-org/s1tbx/blob/master/s1tbx-op-sar-processing/src/main/java/org/esa/s1tbx/sar/gpf/filtering/SpeckleFilters/RefinedLee.java>
- Liang, J. y Liu, D. (2020). A local thresholding approach to flood water delineation using Sentinel-1 SAR imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 159(5), 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.10.017>
- Liu, C., Frazier, P. y Kumar, L. (2007). Comparative assessment of the measures of thematic classification accuracy. *Remote Sensing of Environment*, 107(4), 606–616. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.10.010>
- Long, S., Fatoyinbo, T. E. y Policelli, F. (2014). Flood extent mapping for Namibia using change detection and thresholding with SAR. *Environmental Research Letters*, 9(3), 35002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/3/035002>
- Mahoney, C., Merchant, M., Boychuk, L., Hopkinson, C. y Brisco, B. (2020). Automated SAR Image Thresholds for Water Mask Production in Alberta's Boreal Region. *Remote Sensing*, 12(14), 2223. <https://doi.org/10.3390/rs12142223>
- Manavalan, R. (2017). Sar image analysis techniques for flood area mapping - literature survey. *Earth Science Informatics*, 10(1), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s12145-016-0274-2>
- Mirzaee, S., Motagh, M., Arefi, H. y Nooryazdan, M. (2014). Classification of agricultural fields using time series of dual polarimetry TerraSAR-X images. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-2/W3, 191–196. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-2-W3-191-2014>
- Monge, L. (2019). *Morazán MRZ-SAT CubeSat project for integration of the Central American Nations through collaboration in Space: B4. 26th IAA SYMPOSIUM ON SMALL SATELLITE MISSIONS* (núm. IAC-19,B4,1,13,x50093).
- Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I. y Papathanassiou, K. P. (2013). A tutorial on synthetic aperture radar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 1(1), 6–43. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2013.2248301>
- Moreno Rodríguez, J. M., Laguna Defior, C., Barros, V., Calvo Buendía, E., Marengo, J. A. y Oswald Spring, U. (2020). *Adaptation to climate change risks in Ibero-American countries: RIOCCADAPT report*.
- Mullissa, A., Vollrath, A., Odongo-Braun, C., Slagter, B., Balling, J., Gou, Y., Gorelick, N. y Reiche, J. (2021). Sentinel-1 SAR Backscatter Analysis Ready Data Preparation in Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 13(10), 1954. <https://doi.org/10.3390/rs13101954>

Njambi, R. (2022). *How SAR data is complementary to optical*. <https://up42.com/blog/sar-data-complementary-optical>

Otsu, N. (1979). A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 9(1). <https://ieeexplore.ieee.org/ielx5/21/4310064/04310076.pdf?tp=&arnumber=4310076&isnumber=4310064&ref=>

Pantaleoni, E., Engel, B. A. y Johannsen, C. J. (2007). Identifying agricultural flood damage using Landsat imagery. *Precision Agriculture*, 8(1-2), 27–36. <https://doi.org/10.1007/s11119-006-9026-5>

Pathak, S. (2021). Determinants of flood adaptation: Parametric and semiparametric assessment. *Journal of Flood Risk Management*, 14(2). <https://doi.org/10.1111/jfr3.12699>

Podest, E. y McCartney, S. (2019). *SAR for Flood Mapping using Google Earth Engine*. NASA Applied Remote Sensing Training Program.

La Prensa (2020). No habrá escasez de frijoles, arroz y maíz pese a inundaciones, asegura la SAG (20.11.2020). *La Prensa*. <https://www.laprensa.hn/honduras/escasez-cultivos-frijol-maiz-inundaciones-sag-eta-iota-honduras-EDLP1423733>

La Prensa (2021). Se perdieron 18,600 hectáreas de palma aceitera en Honduras (25.01.2021). *La Prensa*. <https://www.laprensa.hn/economia/se-perdieron-18600-hectareas-de-palma-aceitera-en-el-honduras-MCLP1438051>

Quesada-Román, A. y Villalobos-Chacón, A. (2020). Flash flood impacts of Hurricane Otto and hydrometeorological risk mapping in Costa Rica. *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*, 120(2), 142–155. <https://doi.org/10.1080/00167223.2020.1822195>

Rahaman, S. N. y Shermin, N. (2022). Identifying the effect of monsoon floods on vegetation and land surface temperature by using Google Earth Engine. *Urban Climate*, 43, 101162. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101162>

Rahman, M. S., Di, L., Yu, E., Lin, L. y Yu, Z. (2021). Remote Sensing Based Rapid Assessment of Flood Crop Damage Using Novel Disaster Vegetation Damage Index (DVDI). *International Journal of Disaster Risk Science*, 12(1), 90–110. <https://doi.org/10.1007/s13753-020-00305-7>

Rentschler, J. E. (2013). *Why Resilience Matters: The Poverty Impacts of Disasters*.

SECRETARIA DE RECURSOS NATURALES Y AMBIENTE. (2005). *VULNERABILIDAD ACTUAL DE LA CUENCA DEL RÍO AGUAN EN HONDURAS: FOMENTO DE LAS CAPACIDADES PARA LA ETAPA II ADAPTACION AL CAMBIO CLIMÁTICO EN CENTROAMERICA, MÉXICO Y CUBA*.

Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente y Dirección Nacional de Cambio Climático. (2019). *Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático: República de Honduras ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*.

Sene, K. (2008). Flood Warning, Forecasting and Emergency Response. Publicación en línea avanzada. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-77853-0>

Sevillano Rodríguez, M. E., Bravo Peña, L. C., Alatorre Cejudo, L. C. y Salcedo Hurtado, E. d. J. (2020). Identificación de zonas de inundación a partir de imágenes (SAR) y de eventos históricos de inundación: caso de estudio Santiago de Cali, Colombia. *Cuadernos Geográficos*, 59(2). <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v59i2.9641>

Singha, M., Dong, J., Sarmah, S., You, N., Zhou, Y., Zhang, G., Doughty, R. y Xiao, X. (2020). Identifying floods and flood-affected paddy rice fields in Bangladesh based on Sentinel-1 imagery and Google Earth Engine. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 166, 278–293. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.06.011>

Sivasubramanyam Medasani y G. Umamaheswara Reddy (2018). Analysis and Evaluation of Speckle Filters by Using Polarimetric Synthetic Aperture Radar Data Through Local Statistics. En *IEEE 2nd International Conference on Electronics, Communications and Aerospace Technology*. https://www.researchgate.net/publication/324123534_Analysis_and_Evaluation_of_Speckle_Filters_by_Using_Polarimetric_Synthetic_Aperture_Radar_Data_Through_Local_Statistics

Teleprensa. (2020). *Honduras pierde maíz, frijol y arroz en inundaciones ocasionadas por Eta (7.11.2020)*. <https://teleprensa.sv/index.php/2020/11/07/honduras-pierde-maiz-frijol-y-arroz-en-inundaciones-ocasionadas-por-eta/>

Thomas, K., Hardy, R. D., Lazrus, H., Mendez, M., Orlove, B., Rivera-Collazo, I., Roberts, J. T., Rockman, M., Warner, B. P. y Winthrop, R. (2019). Explaining differential vulnerability to climate change: A social science review. *Wiley Interdisciplinary Reviews. Climate Change*, 10(2), e565. <https://doi.org/10.1002/wcc.565>

Tian, B., Zhang, F., Lang, F., Wang, C [Chen], Wang, C [Chao], Wang, S. y Li, J. (2022). A Novel Water Index Fusing SAR and Optical Imagery (SOWI). *Remote Sensing*, 14(21), 5316. <https://doi.org/10.3390/rs14215316>

Tiwari, V., Kumar, V., Matin, M. A., Thapa, A., Ellenburg, W. L., Gupta, N. y Thapa, S. (2020). Flood inundation mapping- Kerala 2018; Harnessing the power of SAR, automatic threshold detection method and Google Earth Engine. *PloS One*, 15(8), e0237324. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0237324>

Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., Potin, P., Rommen, B., Floury, N., Brown, M., Traver, I. N., Deghaye, P., Duesmann, B., Rosich, B., Miranda, N., Bruno, C., L'Abbate, M., Croci, R., Pietropaolo, A., . . . Rostan, F. (2012). GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sensing of Environment*, 120, 9–24. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.028>

Tripathy, P. y Malladi, T. (2022). Global Flood Mapper: a novel Google Earth Engine application for rapid flood mapping using Sentinel-1 SAR. *Natural Hazards*, 114(2), 1341–1363. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05428-2>

Tsyganskaya, V., Martinis, S., Marzahn, P. y Ludwig, R. (2018a). Detection of Temporary Flooded Vegetation Using Sentinel-1 Time Series Data. *Remote Sensing*, 10(8), 1286. <https://doi.org/10.3390/rs10081286>

Tsyganskaya, V., Martinis, S., Marzahn, P. y Ludwig, R. (2018b). SAR-based detection of flooded vegetation – a review of characteristics and approaches. *International Journal of Remote Sensing*, 39(8), 2255–2293. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1420938>

UNITAR - UNOSAT. (2020). *Satellite detected waters in Alta Verapaz, Izabal and Zacapa departments of Guatemala as of 18 November 2020*. <https://unosat.org/products/2981>

United Nations (Ed.) (2015). *A/RES/70/1 - Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*.

United Nations - Space based information for Disaster Management and Emergency Response. (2023, 22 de abril). *In Detail: Recommended Practice Flood Mapping*. <https://www.un-spider.org/advisory-support/recommended-practices/recommended-practice-flood-mapping/in-detail>

United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2019). *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2019*. United Nations.

United Nations Office for Outer Space Affairs. (2018). *European Global Navigation Satellite System and Copernicus: Supporting the Sustainable Development Goals: BUILDING BLOCKS TOWARDS THE 2030 AGENDA*. Vienna.

Vanama, V. S. K., Mandal, D. y Rao, Y. S. (2020). GEE4FLOOD: rapid mapping of flood areas using temporal Sentinel-1 SAR images with Google Earth Engine cloud platform. *Journal of Applied Remote Sensing*, 14(03), 1. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.14.034505>

World Economic Forum. (2021). *The global risks report 2021: Insight report* (16th ed.). World Economic Forum.

Wrachien, D. de, Mambretti, S. y Schultz, B. (2011). Flood management and risk assessment in flood-prone areas: Measures and solutions. *Irrigation and Drainage*, 60(2), 229–240. <https://doi.org/10.1002/ird.557>

Yang, X., Chen, Y. y Wang, J. (2020). Combined use of Sentinel-2 and Landsat 8 to monitor water surface area dynamics using Google Earth Engine. *Remote Sensing Letters*, 11(7), 687–696. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2020.1757780>

Yu, G., Di, L., Zhang, B., Shao, Y., Shrestha, R. y Kang, L. (2013). Remote-sensing-based flood damage estimation using crop condition profiles. En *2013 Second International*

Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics) (pp. 205–210). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/Argo-Geoinformatics.2013.6621908>