

Universidad de Costa Rica

Facultad de Ciencias Sociales

Escuela de Geografía

**IMÁGENES RADAR DE APERTURA SINTÉTICA PARA LA DELIMITACIÓN
ESPACIOTEMPORAL AUTOMÁTICA DE INUNDACIONES: EL CASO DE LA
CUENCA HIDROGRÁFICA RÍO FRÍO, PARA EL PERIODO 2014-2020**

Estudiante:

Cristian Andres Aguilar-Barboza

Investigación dirigida presentada al comité examinador de la Universidad de Costa Rica en cumplimiento de los requerimientos para obtener el grado de licenciatura en Geografía

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio San José, 2023, marzo 2023.

Directora de tesis: M.Sc. María José Molina Montero

Lector evaluador: Dr. Edgar Espinoza Cisneros


Lector evaluador: DEA. Pascal Olivier Girto Pignot

Tribunal Examinador

Presidente


Dr. Roberto Castillo Vásquez

Profesor invitado


M.Sc. Ruben Martínez Barbáchano

Directora de T.F.G


M.Sc. María José Molina Montero

Miembro del Comité Asesor


Dr. Edgar Espinoza Cisneros

Miembro del Comité Asesor


DEA. Pascal Olivier Pignot

Sustentante


Cristian Andres Aguilar Barboza

DERECHOS DE AUTOR

Por

Cristian Andres Aguilar Barboza

2023

USO JUSTO Y DECLARACIÓN DE PERMISO DEL AUTOR

Uso justo

El presente trabajo está protegido por la normativa vigente de derechos de autor de la República de Costa Rica. De forma consistente, se permite citas breves de este material con el adecuado y apropiado reconocimiento. El uso de este material con fines de lucro o comerciales no está permitido sin el consentimiento expreso del autor, autora o autores

Permiso de duplicación

Como dueño de los derechos de autor de este trabajo, yo, Cristian Andres Aguilar Barboza autorizo la duplicación de este trabajo, totalmente o en parte, únicamente con fines educativos y académicos.

DEDICATORIA

A mis padres María y Eliecer quienes siempre me apoyaron incondicionalmente y me enseñaron la importancia del estudio. A mis amigos Jesús, Omar, Manfred y Tomás por todo su apoyo durante tantos años.

RECONOCIMIENTOS

A mis papás por enseñarme el valor del esfuerzo y el trabajo duro y por darme la oportunidad de formarme como profesional a pesar de las dificultades. A mis hermanos Marvin y Kenneth por siempre estar presentes.

A María José Molina Montero por todo el apoyo y asesoría para culminar con éxito este trabajo de investigación y por toda la mentoría en mi crecimiento como profesional. También, a los profesores Edgar Espinoza y Pascal Girot por su acompañamiento durante este trabajo.

A Jonathan Castro y Luis Diego Monge por toda la ayuda y las oportunidades durante estos años que me permitieron terminar este trabajo de investigación y crecer profesionalmente.

Mis amigos Jesús, Tomás, Manfred, Omar y Manuel por todas las experiencias vividas y las enseñanzas durante la etapa universitaria, sin ellos este trabajo no hubiera sido posible.

A profesionales como Franz Meyer, Andre Twele, Sandro Martinis, Ericka Podest y muchos otros por la apertura y los esfuerzos de democratizar el conocimiento científico en todo el mundo.

A todos los que tuvieron una participación durante esta etapa de mi vida, muchas gracias.

LISTA DE CONTENIDOS

| | |
|--|------|
| LISTA DE CONTENIDOS..... | VII |
| LISTA DE CUADROS | VIII |
| LISTA DE FIGURAS | IX |
| LISTA DE ABREVIATURAS | XI |
| RESUMEN..... | 1 |
| CAPITULO 1. ASPECTOS GENERALES..... | 2 |
| Introducción | 2 |
| Área de estudio..... | 4 |
| Problema | 7 |
| Justificación | 9 |
| Objetivo General | 12 |
| Objetivos Específicos..... | 12 |
| Antecedentes | 13 |
| Marco conceptual..... | 18 |
| Marco Metodológico..... | 27 |
| Caracterización social y biofísica de la CHRF..... | 27 |
| Detección espaciotemporal de inundaciones..... | 30 |
| Algoritmo Kittler & Illingworth (KI)..... | 41 |
| Lógica Difusa..... | 49 |
| Validación de resultados | 53 |
| CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN GENERAL DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA RÍO FRÍO | 56 |
| Introducción | 56 |
| Variables del SES utilizadas | 57 |
| Descripción y análisis de variables | 62 |
| Deforestación | 71 |
| Sedimentación del Río Frío y Humedales..... | 74 |
| Drenaje y contaminación de humedales..... | 76 |

| | |
|---|------------|
| Relación con la extensión, frecuencia e impacto de inundaciones..... | 78 |
| Conclusiones | 83 |
| CAPÍTULO 3. MAPEO ESPACIOTEMPORAL DE INUNDACIONES EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA RÍO FRÍO CON IMÁGENES SENTINEL-1 | |
| Introducción | 84 |
| Mapeo de inundaciones con el algoritmo Kittler & Illingworth | 86 |
| Impacto de la lógica difusa en el mapeo de inundaciones | 90 |
| Comportamiento espaciotemporal de las inundaciones en la CHRF | 101 |
| Tendencia espaciotemporal junio 2017-2020 | 104 |
| Tendencia espaciotemporal julio 2017-2020 | 107 |
| Tendencia espaciotemporal agosto 2017-2020 | 113 |
| Tendencia espaciotemporal setiembre 2017-2020 | 115 |
| Tendencia espaciotemporal octubre 2017-2020..... | 118 |
| Tendencia espaciotemporal noviembre 2016-2020..... | 119 |
| Tendencia espaciotemporal diciembre 2016-2020..... | 122 |
| Validación de zonas inundadas | 134 |
| Ventajas y desventajas del método automático de inundaciones | 141 |
| Conclusiones | 143 |
| CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES | 145 |
| Conclusiones | 145 |
| Recomendaciones..... | 148 |
| BIBLIOGRAFÍA | 150 |

LISTA DE CUADROS

| | |
|--|-----------|
| Cuadro 1.1. Cantones y distritos de la CHRF. | 5 |
| Cuadro 1.2. Comparativa sensores SAR, ópticos y drones en el estudio de coberturas inundadas. | 10 |
| Cuadro 1.3. Bandas de satélites SAR | 22 |
| Cuadro 1.4. Segundo nivel de variables de subsistemas de un Sistemas Socio-ecológico. 29 | |
| Cuadro 1.5. Estaciones meteorológicas de la CHRF..... | 37 |

| | |
|---|------------|
| Cuadro 2.1. Variables de segundo nivel del marco SES utilizadas y su justificación de uso. | 59 |
| Cuadro 3.1. Resumen estadístico de los resultados del algoritmo KI | 90 |
| Cuadro 3.2. Comparativa de valores de área inundada de Algoritmo KI y refinamiento difuso (FZ) | 91 |
| Cuadro 3.3. Resumen de impacto de la lógica difusa en el refinamiento de áreas inundadas | 97 |
| Cuadro 3.3. Categorías de inundación por frecuencia relativa..... | 102 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|-----------|
| Figura 1.1. Mapa área de estudio, Cuenca Hidrográfica Río Fío (CHRF). | 4 |
| Figura 1.2. Mecanismos de retrodispersión de la señal SAR según cobertura y condición inundada. | 21 |
| Figura 1.3. Primer nivel de subsistemas de un Sistema Socio-ecológico. | 28 |
| Figura 1.4. Flujo metodológico para la detección espaciotemporal automática de inundaciones en la CHRF. | 32 |
| Figura 1.5. Efecto del filtro de moteado Mejorado de Lee en imágenes SAR Sentinel-1. a- Imagen sin filtro de moteado. b- Imagen con filtro de moteado..... | 35 |
| Figura 1.6. Acumulados diarias de precipitación 2014-2020 | 38 |
| Figura 1.7. Aumento de la retrodispersión en cuerpos de agua del humedal Caño Negro en periodos secos. | 39 |
| Figura 1.8. Imágenes Sentinel-1 utilizadas por polarización y paso de órbita. | 40 |
| Figura 1.9. Índice de altura sobre el drenaje más cercano (HAND) para la CHRF. a- Visualización del índice HAND | 43 |
| Figura 1.10. Esquema de umbral de error mínimo KI. | 45 |
| Figura 1.11. Densidad de los valores de retrodispersión por polarización (VV y VH) y por clase semántica (ow = aguas abiertas, Nfl = no inundado)..... | 49 |
| Figura 1.12. Conjuntos difusos para refinamiento de resultados de zonas inundadas obtenidas con el algoritmo KI..... | 53 |
| Figura 2.1. Perspectiva de los actores entrevistados sobre el estado de los recursos naturales de la CHRF..... | 68 |
| Figura 2.2. Indicadores sociales de los cantones de la CHRF | 69 |

| | |
|---|------------|
| Figura 2.3. Evidencias de deforestación en cuenca alta de la CHRF. | 72 |
| Figura 2.4. Evidencias de sedimentación en la CHRF. | 75 |
| Figura 2.5. Perspectiva de los entrevistados respecto a la frecuencia e impacto de las inundaciones en la CHRF. | 80 |
| Figura 2.6. Diagrama de realimentación de la CHRF. | 82 |
| Figura 3.1. Resultados del algoritmo KI para la serie temporal 2014-2020 de imágenes SAR de Sentinel-1 en la CHRF. | 88 |
| Figura 3.2. Resultados del refinamiento por lógica difusa para la serie temporal 2014-2020 de imágenes SAR de Sentinel-1 en la CHRF. | 92 |
| Figura 3.3. a-Zona de suelos descubiertos en la CHRF con vocación agrícola. b- Diagrama del efecto de la rugosidad en la dispersión de la señal electromagnética. | 95 |
| Figura 3.4. Impacto de la lógica difusa en zonas de suelos descubiertos. | 99 |
| Figura 3.5. Impacto de la lógica difusa en zonas de borde entre coberturas inundadas y no inundadas. | 100 |
| Figura 3.6. Diagramas de caja de comportamiento mensual de área inundada y de precipitación en la CHRF del periodo lluvioso. | 103 |
| Figura 3.7. Mecanismo de retrodispersión en coberturas de humedal herbáceas inundadas y no inundadas. | 106 |
| Figura 3.8. Sector inundado en las cercanías de San Rafael de Guatuso, para el evento de inundación extraordinario del 2018-07-15. | 110 |
| Figura 3.10. Sector inundado en márgenes del río Sabogal, para el evento de inundación extraordinario del 2019-08-22. | 114 |
| Figura 3.11. Área irregular de baja retrodispersión. | 118 |
| Figura 3.12. Sector inundado en márgenes del Río Frío en dirección de San Rafael de Guatuso, para el evento de inundación extraordinario del 2016-11-28. | 122 |
| Figura 3.13. Sector inundado en márgenes del Río Frío en dirección de San Rafael de Guatuso, para el evento de inundación extraordinario del 2016-12-22. | 125 |
| Figura 3.14. Sector inundado al norte de Caño Negro en dirección de los Chiles, para el evento de inundación extraordinario del 2019-12-08. | 127 |
| Figura 3.15. Frecuencia de inundación por píxel y por mes del periodo lluvioso en la CHRF, para la polarización VV. Sector Los Chiles. | 128 |

| | |
|--|------------|
| Figura 3.16. Frecuencia de inundación por píxel y por mes del periodo lluvioso en la CHRF, para la polarización VH. Sector Los Chiles | 129 |
| Figura 3.17. Frecuencia de inundación por píxel y por mes del periodo lluvioso en la CHRF, para la polarización VV. Sector Caño Negro. | 130 |
| Figura 3.18. Frecuencia de inundación por píxel y por mes del periodo lluvioso en la CHRF, para la polarización VH. Sector Caño Negro | 131 |
| Figura 3.19. Frecuencia de inundación por píxel y por mes del periodo lluvioso en la CHRF, para la polarización VV. Sector San Rafael. | 132 |
| Figura 3.20. Frecuencia de inundación por píxel y por mes del periodo lluvioso en la CHRF, para la polarización VH. Sector San Rafael. | 133 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| |
|--|
| ASP: Área Silvestre Protegida |
| CHRF: Cuenca Hidrográfica Río Frío |
| CBRM: Corredor Biológico Ruta los Maleku |
| ESA: Agencia Espacial Europea |
| FMI: Fondo Monetario Internacional |
| FONAFIFO: Fondo Nacional de Financiamiento Forestal |
| GEE: Google Earth Engine |
| HAND: Índice de altura respecto al drenaje más cercano |
| IDA: Instituto de Desarrollo Agrario |
| IDH: Índice de Desarrollo Humano |
| IICA: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura |
| IMN: Instituto Meteorológico Nacional |
| IPM: Índice de Pobreza Multidimensional |
| ISRO: Organización de Investigación Espacial de la India |
| ITCO: Instituto de Tierras y Colonización |
| KI: Algoritmo Kittler and Illingworth |
| MED: Modelo de Elevación Digital |

MINAET: Ministerio del Ambiente, Energía y Tecnología
MNDWI: Índice de Diferencia de Agua Normalizado Modificado
NIR: Infrarrojo Cercano
NRCS: Sección Transversal de Radar Normalizada
PG: Precisión Global
PNUD: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
PNVT: Parque Nacional Volcán Tenorio
PP: Precisión del Productor
PU: Precisión del Usuario
RCS: Sección Transversal del Radar
RTC: Corrección Radiométrica y de Terreno
RVSM Caño Negro: Refugio Vida Silvestre Mixto Caño Negro
SAR: Radar de Apertura Sintética
SES: Sistema Socio-Ecológica
SESF: Marco de Sistema Socio-Ecológico
SINAC: Sistema Nacional de Áreas Conservación
SWIR: Infrarrojo de onda corta
ZCIT: Zona de Convergencia Intertropical
ZPT: Zona Protectora Tenorio.

RESUMEN

Esta investigación es un esfuerzo para generar información asociada a las dinámicas espaciotemporales de coberturas inundadas en la Cuenca Hidrográfica Río Frío (CHRF). Siendo esta una cuenca que se caracteriza por la presencia de grandes extensiones de ecosistemas de humedal y presentar alta exposición a fenómenos hidrometeorológicos extremos. Por lo que los resultados obtenidos pueden representar un insumo para la toma de decisiones en conservación, ordenamiento territorial y gestión del riesgo.

El abordaje metodológico se centró en un proceso totalmente automático basado en Martinis et al., (2015) y Twele et al., (2016). En el que se aprovechan imágenes Radar de Apertura Sintética (SAR por sus siglas en inglés) que permiten obtener información de la superficie terrestre sin obstáculos atmosféricos como la nubosidad, así como la implementación de un algoritmo de umbralización paramétrico que facilita trabajar con grandes conjuntos de datos y series de tiempo robustas.

En el primer capítulo se abordan aspectos generales de la investigación, que incluyen el área de estudio, problema, justificación, objetivos, antecedentes y metodología. En el segundo capítulo se caracteriza la CHRF como un sistema socio ecológico, esto con el objetivo de contemplar aquellas dinámicas sociales, económicas, culturales y biofísicas que condicionan directa o indirectamente la dinámica de las coberturas inundadas.

El tercer capítulo muestra los resultados de la detección de coberturas inundadas para los años 2014-2020. En este proceso se obtuvieron resultados satisfactorios que permitieron reflejar las dinámicas de expansión y contracción de las coberturas inundadas para los distintos meses del periodo más lluvioso del área de estudio. De igual manera, se destaca la capacidad del método y la sensibilidad de las imágenes SAR de Sentinel-1 para detectar las áreas inundadas durante eventos de inundación extraordinarios.

En las conclusiones de este trabajo se destaca la sensibilidad de las imágenes SAR de Sentinel-1 y del procesamiento automático para la detección efectiva de coberturas inundadas. Por lo que se considera un flujo metodológico eficiente en términos de procesamiento y de precisión en los resultados, de ahí que se recomienda su implementación como un sistema de monitoreo cercano al tiempo real de coberturas inundadas para la CHRF.

CAPITULO 1. ASPECTOS GENERALES

Introducción

La tecnología Radar de Apertura Sintética (SAR) se remonta a la década de 1950, con usos meramente militares (Woodhouse, 2006). Posterior a esto, se inició un proceso fortalecimiento de esta tecnología con aplicaciones civiles, que culminó en 1976 con el lanzamiento del satélite Seasat, que tenía el objetivo de realizar observaciones oceánicas (Berens, 2006). Sin embargo, este satélite estuvo en órbita alrededor de cuatro meses, cuando dejó de funcionar por un corto circuito masivo. Desde entonces se han puesto en órbita diversos satélites con tecnología SAR, como el caso de ERS-1, JERS-1, RADARSAT-1, ENVISAT, ALOS PALSAR-1, entre otros (Flores-Anderson et al., 2019). No obstante, el acceso a las imágenes SAR fue restringido, lo que limitó su popularización entre la comunidad científica internacional, y, por tanto, su aplicación en múltiples contextos (Agram et al., 2022).

La puesta en órbita del satélite Sentinel-1 en 2014 por parte de la Agencia Espacial Europea (ESA por sus siglas en inglés), propone un cambio abrupto en el acceso a las imágenes SAR. Al tratarse de una fuente de imágenes de libre acceso, que, además, captura información de forma sistemática con un alcance global (ESA, 2012; Flores-Anderson et al., 2019). A lo que se debe agregar, las características propias de estos sensores activos, que tienen la capacidad de obtener datos aún en condiciones de nubosidad (Dadhich et al., 2019). Lo anterior, se refleja en el incremento de publicaciones científicas con el uso de imágenes SAR (Agram et al., 2022; Flores-Anderson et al., 2019).

El estudio de inundaciones se ha convertido en uno de los temas de mayor abordaje con imágenes SAR, precisamente por la capacidad de obtener datos aún en condiciones de nubosidad (Notti et al., 2018). En el que destacan aplicaciones para el análisis de eventos de inundación extremos, como un insumo para los tomadores de decisiones en la gestión de desastres (Carreño Conde & De Mata Muñoz, 2019; Clement et al., 2017; Ezzine et al., 2018; Uddin et al., 2019). También, se han utilizado como sistemas operativos de monitoreo de inundaciones cercanos al tiempo real, esto en contextos donde las inundaciones son frecuentes (DeVries et al., 2020a; Martinis et al., 2018; Qiu et al., 2021; Shen et al., 2019). En menor medida, se han utilizado para el monitoreo de las dinámicas de coberturas inundadas en ecosistemas de humedal (Chapman et al., 2015; Marti-Cardona et al., 2010; Schlaffer et al., 2021).

Dentro del estudio de inundaciones con SAR se distinguen una serie de métodos de procesamiento, que incluye manuales, semiautomáticos y automáticos, estos, presentan ventajas y desventajas dependiendo del objetivo de procesamiento (se abordan en el capítulo 3 de esta investigación). Los métodos automáticos han tenido mayor protagonismo en el establecimiento de sistemas de monitoreo cercanos al tiempo real y el análisis de series de tiempo, debido a la capacidad de procesar grandes conjuntos de datos SAR, la reducción de errores asociados a procesos manuales, sumado a la homogenización de procesamiento al extraer las manchas de inundación (Notti et al., 2018).

Este trabajo de investigación muestra la ejecución de un flujo metodológico totalmente automático para la detección de inundaciones. Que incluye la descarga de imágenes, preprocesamiento radiométrico y geométrico, así como la detección de inundaciones. Donde la detección de coberturas inundadas se llevó a cabo a partir del algoritmo de umbralización paramétrico Kittler & Illingworth (KI) y de la aplicación de un refinamiento por lógica difusa, acorde a lo propuesto por Twele et al., (2016). El cual ha sido replicado en otros contextos (Landuyt et al., 2019; Liang & Liu, 2020; Martinis et al., 2018).

Lo anterior, permitió realizar un análisis espaciotemporal de las inundaciones en la Cuenca Hidrográfica Río Frío (CHRF) en el periodo 2014-2020. Cuenca en la que son frecuentes el impacto de inundaciones producto de fenómenos hidrometeorológicos extremos (Flores et al., 2019; Zumbado-Morales & Mesén-Leal, 2018a). Y en la que existen extensos ecosistemas de humedal con coberturas inundadas dinámicas espaciotemporalmente, los cuales son sometidos a intensas presiones de cambios de uso y degradación (SINAC-PNUD-GEF, 2018).

Área de estudio

La CHRF es un sistema hidrológico binacional, en el que sus límites naturales se encuentran inmersos en los límites político-administrativos de Costa Rica y parte de Nicaragua. No obstante, más del 90% de la CHRF se ubica en territorio costarricense (ver Figura 1.1), que incluye parte de los cantones de Los Chiles, Guatuso y en menor proporción Upala y San Carlos (ver Cuadro 1.1). La CHRF tiene límites naturales al norte con la vertiente sur del lago de Nicaragua, al sur con la vertiente norte de la cordillera de Guanacaste, al este la

divisoria de la cuenca hidrográfica medio queso y al oeste con la divisoria de la cuenca del río Zapote (Coloma et al., 2009).

La CHRF es una subcuenca de la cuenca hidrográfica del río San Juan, que es el sistema hidrológico más grande de Centroamérica (Acevedo, 2012). La cuenca tiene una orientación sur-norte, con una extensión aproximada 1,743 km², que equivale aproximadamente al 3% de la superficie continental de Costa Rica. En cuenca alta, es posible identificar relieves de fuertes pendiente y áreas plano ondulados, mientras que en cuenca baja se destacan extensas llanuras inundables con colinas dispersas (Acevedo, 2012; Coloma et al., 2009).

Cuadro 1.1. Cantones y distritos de la CHRF.

| Cantón | Distrito | Código distrito |
|------------|-------------|-----------------|
| Los Chiles | Los Chiles | 21401 |
| | Caño Negro | 21402 |
| | El Amparo | 21403 |
| | San Jorge | 21404 |
| Guatuso | San Rafael | 21501 |
| | Buena Vista | 21502 |
| | Cote | 21503 |
| | Katira | 21504 |
| Upala | Bijagua | 21304 |
| San Carlos | Venado | 21010 |
| | Monterrey | 21012 |

Fuente: Elaboración propia a partir Sistema Nacional de Información Territorial.

Climáticamente, en la cuenca se registran precipitaciones anuales promedio de 2,127 mm, con un periodo más seco entre enero y abril y un periodo más lluvioso entre mayo y diciembre (Acevedo, 2012). En la cuenca existe una densa red hídrica, en el que se destacan los ríos Purgatorio, Sabogal, Cote, Mónico y Buenavista, afluentes del río Frío. De igual forma, en

cuenca baja se encuentran grandes extensiones de humedal, como el sistema de humedales Caño Negro, sitio categoría RAMSAR (SINAC, 2017).

En la cuenca es posible encontrar tres Áreas Silvestres Protegidas (ASP), el Refugio Nacional de Vida Silvestre Mixto Caño Negro (RVSM Caño Negro), la Zona Protectora Tenorio (ZPT) y el Parque Nacional Volcán Tenorio (PNVT). De igual forma, se identifican tres centros de población importantes, San Rafael de Guatuso, poblado de Caño Negro y el poblado de Los Chiles. Si se toma como referencia los datos del censo poblacional del 2011 para los distritos que conforman la CHRF (únicamente Los Chiles y Guatuso), la población es de aproximadamente 39243 personas.

Las principales actividades económicas de la CHRF están asociadas al sector agropecuario, en el que se destaca la ganadería tanto de engorde como lechera y cultivos como la piña, yuca, naranja y frijol. Los cuales han pasado un proceso de expansión no controlado en los últimos años (Corte, 2018; Zumbado-Morales & Mesén-Leal, 2018). En el Capítulo 2, se aborda con mayor detalle todos los aspectos mencionados en este apartado.

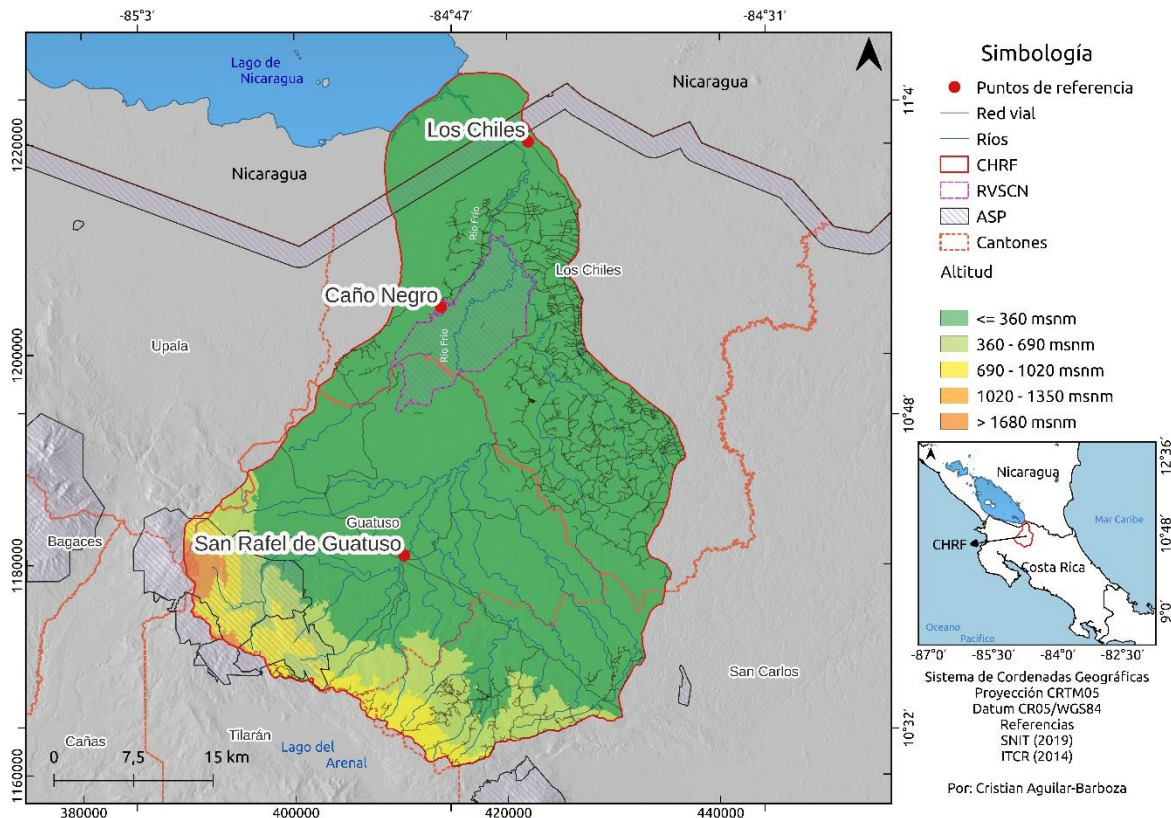


Figura 1.1. Mapa área de estudio, Cuenca Hidrográfica Río Fío (CHRF). Fuente: Elaboración propia.

Problema

La incorporación tardía de la Zona Norte a la economía nacional por parte del Estado provocó una serie de transformaciones socioeconómicas y ambientales en la región. Un ejemplo de esto es el crecimiento demográfico de la población. Girot, (1989) destaca un incremento exponencial en los cantones Guatuso y Los Chiles entre 1950 y 1984, pasando de 8675 habitantes a 44239. Este crecimiento de habitantes responde principalmente a migraciones

interregionales, potenciadas por los procesos de colonización de tierras promovidos desde el Estado, con el Instituto de Tierras y Colonización (ITCO) y los Planes de Ajuste Estructural del país en la década de 1980 (Faure et al., 2005).

Estos procesos de colonización de tierras en la CHRF desencadenaron un incremento no controlado de la deforestación y la expansión de actividades agropecuarias (Acevedo, 2012; Coloma et al., 2009). Ocasionando una degradación de los ecosistemas de bosques y humedales en la cuenca, que, a su vez, afecta la amplia gama de servicios ecosistémicos que estos ofrecen (SINAC-PNUD-GEF, 2018). Como los servicios de regulación climática, los cuales favorecen la mitigación de fenómenos hidrometeorológicos extremos.

Lo anterior, cobra especial interés en una cuenca donde el impacto de eventos hidrometeorológicos extremos es frecuente (Zumbado-Morales & Mesén-Leal, 2018). En el que se encuentran registros de al menos 19 eventos de este tipo entre 1988 y 2018, provocando pérdidas económicas acumuladas aproximadas a \$97 millones de dólares estadounidenses (Flores et al., 2019). Estas afectaciones son potenciadas por la falta de instrumentos de ordenamiento territorial en la cuenca, sumado a la falta de estudios que analicen las inundaciones en la cuenca (ProDUS, 2015).

Aunado a esto, Cubero y Carvajal (2014) consideran que a nivel nacional existe un faltante de información relacionada con la distribución espacial y temporal de las inundaciones y la existente en muchos casos es de baja calidad. Lo anterior, plantea la necesidad de implementar nuevos enfoques para el estudio de las inundaciones, como los basados en

sensoramiento remoto o teledetección, que permitan el estudio de estos fenómenos no solo en el contexto de la CHRF, sino a nivel nacional.

Justificación

El uso de imágenes radar de apertura sintética (SAR por sus siglas en inglés) en la detección y monitoreo de coberturas inundadas se ha incrementado en los últimos años, ligado al lanzamiento del satélite Sentinel-1 de la Agencia Espacial Europea (ESA por sus siglas en inglés) en 2014. Con aplicaciones en hidrología, meteorología, agricultura, gestión del riesgo, entre otras (Tsyganskaya et al., 2018). Previo a esto, aspectos como; el tiempo de revisita de satélites, la falta de cadenas de procesamiento sofisticadas para reducir el ruido e impacto atmosférico, así como el acceso a productos gratuitos. Limitaba el uso de estas imágenes como herramienta para el monitoreo del territorio (Raspini et al., 2018).

Esta tecnología representa una alternativa a otras fuentes de información de sensores remotos, como los satélites ópticos e infrarrojos o el uso de drones. Las imágenes SAR presentan una serie de ventajas, por ejemplo; estas pueden obtener información de la superficie terrestre aún en condiciones de nubosidad, condición que es constante en un contexto tropical (Flores-Anderson et al., 2019). Sumado a lo anterior, las imágenes SAR tienen una alta sensibilidad a los cuerpos de agua, debido a las características de interacción de la señal electromagnética. Especialmente en sitios donde la morfología del terreno no es accidentada y las coberturas tienen cierto nivel de homogeneidad (Chini et al., 2019). El Cuadro 1.2 muestra una

comparativa entre las imágenes SAR, imágenes ópticas y el uso de drones para el estudio de coberturas inundadas.

Cuadro 1.2. Comparativa sensores SAR, ópticos y drones en el estudio de coberturas inundadas.

| SAR | | Óptico | | Drones | |
|---|---------------------------------------|---|---|---|---|
| Ventajas | Desventajas | Ventajas | Desventajas | Ventajas | Desventajas |
| Alta resolución temporal | Difícil interpretación | Mayor facilidad de interpretación | Ampliamente afectada por condiciones de nubosidad en zonas tropicales | Mayor detalle en la información | Baja resolución temporal |
| Incidencia atmosférica mínima | Requerimientos computacionales altos. | No requiere capacidades computacionales demasiado rigurosas | Requieren de luz solar (sensor pasivo) | Aspectos como la nubosidad no los afecta (dada la altitud de vuelo) | Abarca áreas limitadas |
| Captura de información tanto de día como de noche. | Efecto de moteado (speckle). | Mayor disponibilidad de información en el espectro electromagnético | No pueden detectar los elementos bajo cobertura | | Requiere mayor presencia en campo para la obtención de datos. |
| Sensibilidad a las propiedades dieléctricas de las coberturas | | Alta resolución temporal | | | |
| Analizar grandes extensiones de terreno | | Analizar grandes extensiones de terreno | | | |

Fuente: Elaboración propia a partir de Flores-Anderson et al., (2019 y Tsyganskaya et al., (2018).

Las características de las imágenes SAR de Sentinel-1; resolución temporal, longitud de onda (banda C) y polarizaciones, en combinación con algoritmos de procesamiento de imágenes, facilita generar flujos totalmente automatizados para la detección de coberturas inundadas. Estos, son la base de estudios espaciotemporales de coberturas inundadas, que van más allá del análisis de un evento de inundación extremo. A su vez, permiten el establecimiento de sistemas de monitoreo de coberturas inundadas en sitios donde las inundaciones son muy frecuentes (Qiu et al., 2021), así como en el monitoreo de humedales (Schlaffer et al., 2021). Sin embargo, el uso de imágenes SAR a nivel nacional y regional, aún se encuentra en una etapa incipiente. Donde se destaca el trabajo de Cespedes Rivera, (2020), con un análisis multitemporal de deforestación, así como la publicación de Martínez Barbáchano, (2022) con un análisis interferométrico para deformación de la superficie terrestre. Por lo que este trabajo representa un aporte en el fortalecimiento de capacidades en el uso de esta tecnología, en este caso, enfocado en la detección de coberturas inundadas.

Los resultados de esta investigación proponen un método práctico y eficiente para la vigilancia de coberturas inundadas, el cual permite identificar sus patrones espaciotemporales, así como el impacto de eventos de inundación extremos. Aspecto de importancia en una cuenca dónde los efectos de eventos hidrometeorológicos extremos son frecuentes. A lo que se debe agregar, la escasa información que detalle la distribución de las inundaciones en la cuenca (ProDUS, 2015; Zumbado-Morales & Mesén-Leal, 2018).

En paralelo, proporcionan un mecanismo robusto para el estudio de la dinámica de los cuerpos de agua de los ecosistemas de humedal de Caño Negro. De la que dependen diversas funciones ecológicas y servicios ecosistémicos, en una cuenca donde las presiones de cambio de uso de la tierra suponen una degradación sobre los ecosistemas de humedal (SINAC-PNUD-GEF, 2018).

Por tanto, la investigación es un insumo para diversos tomadores de decisiones en la gestión del territorio, en sus dimensiones de riesgo, ambientales y económicas, en especial ante un contexto de variabilidad o cambio climático. Se espera que este flujo de trabajo pueda ser replicado en otros contextos del país y la región, para el estudio y monitoreo de coberturas inundadas, e instar al uso de tecnología SAR en futuras investigaciones.

Objetivo General

Realizar un análisis espaciotemporal de las inundaciones en la cuenca hidrográfica de Río Frío a partir de imágenes radar de apertura sintética de Sentinel-1 para el periodo 2014-2020.

Objetivos Específicos

- Caracterizar la cuenca hidrográfica de Río Frío como un sistema socio-ecológico, que integre sus componentes sociales y biofísicos, así como sus interacciones, como sustento para el estudio de las inundaciones.
- Detectar espacial y temporalmente las zonas de inundación en la cuenca hidrográfica Río Frío a partir de imágenes Radar de Apertura Sintética de Sentinel-1 para el periodo 2014-2020

- Validar la información obtenida de la detección espaciotemporal de inundaciones con base en imágenes ópticas, registros de precipitación y fuentes documentales.

Antecedentes

Estudios de inundaciones con imágenes SAR no son recientes, por ejemplo, Kiage et al., (2005) utilizaron imágenes del sensor Radarsat-1 con la polarización HH, para detectar zonas inundadas en la costa de Luisiana tras el huracán Lili, en octubre de 2002. Estos emplearon un método de diferenciación aritmética y de mejora multitemporal. Con el que obtuvieron resultados satisfactorios en la detección de las manchas de inundación. Sin embargo, estos reconocen que la diferencia temporal entre pico de inundación y el paso del sensor, implicó una pérdida de la precisión.

Por su parte Pierdicca et al., (2008) desarrollaron un método de clasificación de inundaciones basados en conjuntos difusos. Este contemplaba la utilización de imágenes SAR ERS-1, así como datos adicionales, como un modelo de elevación digital (MED) e información de usos de la tierra. Estos analizaron las inundaciones sucedidas en Alessandria Italia en 1994, con resultados satisfactorios, alcanzando métricas del 87% de los píxeles clasificados correctamente.

Martinis et al., (2009) desarrollaron un método automatizado para la detección de inundaciones, basado en umbrales locales a partir del histograma de retrodispersión. Que posteriormente se integran para la construcción de umbrales globales en cada escena. Para

esto, utilizaron el algoritmo Kittler-Illingworth (KI), obteniendo resultados precisos de las manchas de inundación. Para este trabajo utilizaron imágenes del sensor TerraSAR-X. El uso del algoritmo KI se implementó en este trabajo de investigación.

En el Parque Nacional de Doñana, España. Marti-Cardona et al., (2010) desarrollaron un monitoreo de las coberturas inundadas de los humedales, esto durante el año hidrológico de 2006-2007. Para lo que utilizaron 43 imágenes ASAR-Envisat, con las polarizaciones HH y VV. Estos lograron identificar exitosamente los diferentes periodos de expansión y contracción de las coberturas inundadas en estos ecosistemas.

En la región de Shkodër, Albania, Pulvirenti et al., (2011) diseñaron un sistema operativo de gestión de inundaciones de carácter automático. Para el que usaron imágenes SAR de muy alta resolución de COSMOS-SkyMed en banda X. Estos emplearon un flujo metodológico basado en lógica difusa que permitía combinar el conocimiento teórico de la dispersión electromagnética con datos hidráulicos, así como datos de contexto (mapas de usos de la tierra, pendiente, entre otros).

Martinis et al., (2015) basado en los resultados obtenidos en (Martinis et al., 2009) y de (Pulvirenti et al., 2011). Propone un método para refinar los resultados de zonas inundadas obtenidos de la aplicación del algoritmo KI, mediante lógica difusa. La construcción de múltiples conjuntos difusos y su nivel de pertenencia, permite delinear y descartar zonas que, por sus características de retrodispersión, área y pendiente, corresponden o no con coberturas inundadas. En este trabajo se utilizaron imágenes del sensor Terra-SAR-X.

En I-lan, Taiwán, Chung et al., (2015) mapearon las inundaciones producidas por el paso tifón Soulik, el 8 de julio del 2013, en este trabajo utilizaron imágenes del sensor COSMO-SkyMed, utilizaron un método singular (una sola imagen), delimitando las áreas inundadas a partir de un umbral de histograma de retrodispersión. Estos procesaron las imágenes radar en las horas próximas al paso del tifón, por lo que el mapa generado fue un insumo en la toma de decisiones durante la emergencia.

Con el lanzamiento del satélite Sentinel-1 en 2014, la cantidad de investigaciones asociadas a inundaciones con SAR incrementan considerablemente (Schlaffer et al., 2017). Por ejemplo, Twele et al., (2016) adaptan el método automatizado de (Martinis, Kersten, et al., 2015) en imágenes del sensor Sentinel-1. La alta resolución temporal de este sensor, sumado a su longitud de onda (banda C), permite el análisis y monitoreo espaciotemporal de zonas con recurrencia de inundaciones. Esta investigación es el principal insumo metodológico de esta investigación.

Por su parte, Clement et al., (2017) mapearon zonas de inundación en un área aproximada de 400 km² en Yorkshire en el Reino Unido. Estos emplearon imágenes del sensor Sentinel-1 y aplicaron un método de detección de cambio en combinación con un método de umbral. En sus resultados lograron determinar una buena aplicabilidad en áreas rurales. Donde los resultados obtenidos a partir de la polarización VV son más plausibles, mientras la polarización VH suele sobreestimar las inundaciones.

Otros como Jo et al.,(2018), detectaron inundaciones cerca de la ciudad de Houston en Estados Unidos, producto del huracán Harvey en 2017. Utilizaron imágenes SAR del sensor Sentinel-1. Estos emplearon un método que proporciona mapas en falso color y fáciles de interpretar, que permiten contrastar las zonas inundadas de las que no. Sin embargo, el método suele sobreestimar las zonas de inundación en diversas coberturas.

Perrou et al., (2018) analizaron espaciotemporalmente las inundaciones entre 2014 y 2015 en la cuenca hidrográfica transfronteriza Serres (Macedonia-Grecia). A partir de imágenes Sentinel-1. Utilizaron un método híbrido, basado en umbrales globales de histograma, sumado a composiciones RGB (rojo, verde, azul).

Bioresita et al., (2018) evaluaron la capacidad de datos Sentinel-1 en la detección de inundaciones y cuerpos de agua en regiones distintas de Irlanda, Inglaterra e Italia. Estos proponen un método de detección automática, basado en el modelado de píxeles y mapas de probabilidad. Obteniendo una alta precisión en los resultados. Sin embargo, este método requiere altos niveles computacionales y técnicos, así como largos tiempos de procesamiento de datos.

En el río Jialing en la provincia de Sichuan en China. Cao et al., (2019) utilizaron imágenes radar del sensor Sentinel-1, para identificar inundaciones en áreas muy extensas. En esta investigación emplearon un método singular de umbral de histograma. Aunque al tratarse de un área muy extensa, aplicaron un algoritmo automático de umbral rápido no paramétrico, basado en el histograma de regiones objetivo. Estos concluyeron que los datos de

polarización VV son más precisos que la polarización VH en la detección de inundaciones con Sentinel-1.

En un estudio realizado en Ascension Parish en Luisiana (EE. UU.). Liang & Liu, (2020) detectaron inundaciones a partir de un método automatizado basado en umbrales locales. En primera instancia generaron un umbral global, con el objetivo de delimitar zonas de agua y no agua (tierra). Que son el insumo para la estimación de umbrales locales, que buscan emparejar los cúmulos de agua con los cúmulos de tierra, ajustando las distribuciones Gamma de las intensidades de retrodispersión. Este método permite tomar en cuenta las características heterogéneas de la superficie, mejorando los resultados en comparación a métodos de umbral global. Para esto utilizaron imágenes Sentinel-1, en polarización VV y VH.

En la cuenca de Pipestem Creek, en Dakota del Norte (EE. UU.). Schlaffer et al., (2021) desarrollaron un mecanismo de monitoreo del comportamiento de las coberturas inundadas en una zona de ecosistemas de humedal. Lo anterior, con el objetivo de comprender la dinámica estacional e interanual de estos ecosistemas. En este estudio, emplearon una serie temporal de imágenes de Sentinel-1 del 2015-2021. Este estudio, demuestra la validez del uso de estas imágenes para el monitoreo de coberturas inundadas más allá de eventos de inundación extremos.

Más reciente, estudios han explorado la vinculación de imágenes Sentinel-1 con modelos de redes neuronales para el estudio de inundaciones (Helleis et al., 2022; Mayer et al., 2021;

Ulloa et al., 2022). Si bien estos estudios muestran precisiones altas, implican costos computacionales, habilidades técnicas y datos de referencia, que en el país y en la región son incipientes.

Marco conceptual

Una cuenca hidrográfica es definida por FAO, (2017) como el área geográfica drenada por un curso de agua. Fikadu et al., (2022) las describe como sistemas biofísicos que definen la superficie terrestre que drena el agua, los sedimentos, nutrientes y componentes químicos transportados por el agua, hasta un punto del cauce de un arroyo definido por límites topográficos. Sin embargo, otros como Flotemersch et al., (2015) consideran que una cuenca no es solamente una unidad hidrológica, dado que esta también es una entidad sociopolítica y ecológica. Al respecto, Cabello et al., (2015) sugiere analizar las cuencas como sistemas socioecológicos, en el que convergen procesos hidrológicos como sociales.

Basado en lo anterior, la CHRF se conceptualizará como un Sistema Socio-ecológico (SES por sus siglas en inglés), que corresponde a un término *“holístico, sistémico e integrador del ser humano-en-la naturaleza”*. Por tanto, se entiende como un sistema complejo y adaptativo en el que distintos componentes culturales, políticos, sociales, económicos, ecológicos, tecnológicos, etc. están interactuando” (Farhad, 2012, p. 265). Además, Ostrom (2009) menciona que cada SES está compuesto por múltiples subsistemas y variables internas que interactúan en distintas escalas espaciales y temporales.

La complejidad de las interacciones ser humano-naturaleza ha generado la elaboración de marcos conceptuales. Espinoza-Cisneros, (2018) considera que proporcionan un lenguaje meta-teórico que concilia múltiples posturas teóricas y permite realizar análisis comparativos, así como acumular conocimientos de base empírica. Por tanto, un Marco SES *“fue diseñado para identificar las partes básicas de trabajo y las relaciones críticas entre estos elementos, que son esenciales de considerar al estudiar los SES. Proporciona una lista general de conceptos que pueden utilizarse para analizar todos los tipos de SES”* (McGinnis y Ostrom, 2014).

El Marco SES favoreció la caracterización general de la CHRF, considerando los sistemas sociales y ecológicos que interactúan de forma compleja (Nagendra & Ostrom, 2014). De igual forma, como estas relaciones tienen incidencia en la ocurrencia, frecuencia e impacto de inundaciones en la cuenca.

Para el estudio de las inundaciones implicó el uso de la Teledetección, definida como una *“técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, estamos suponiendo que entre la tierra y el sensor existe una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial”* (Chuvieco, 2007, p. 27)

Para esta investigación se utilizaron imágenes Radar de Apertura Sintética (SAR por sus siglas en inglés), estos permiten obtener imágenes de alta resolución a larga distancia, mediante pulsos laterales que son enviados desde el satélite hasta la superficie terrestre. Al

mismo tiempo, esta oblicuidad del sensor permite que parte de la señal emitida regrese (ESA, 2014).

El retorno de esta señal se denomina retrodispersión, el sensor mide la intensidad del retorno de la señal (amplitud), así como la posición en la que se encuentra el sitio observado en un momento específico del ciclo de la longitud de onda (fase) (Flores-Anderson et al., 2019; Skolnik, 2013). Por otro lado, la intensidad de la señal de retorno está relacionada con el tipo de cobertura con el que interactúa y la forma en que ésta dispersa y conduce la señal incidente (ver Figura 1.2). Este aspecto es el que permite distinguir las coberturas de una escena radar, como las coberturas inundadas (Dadhich et al., 2019), de ahí, que se distinguen una serie de mecanismos típicos de retrodispersión (especular, superficies rugosas, volumétrica y doble rebote).

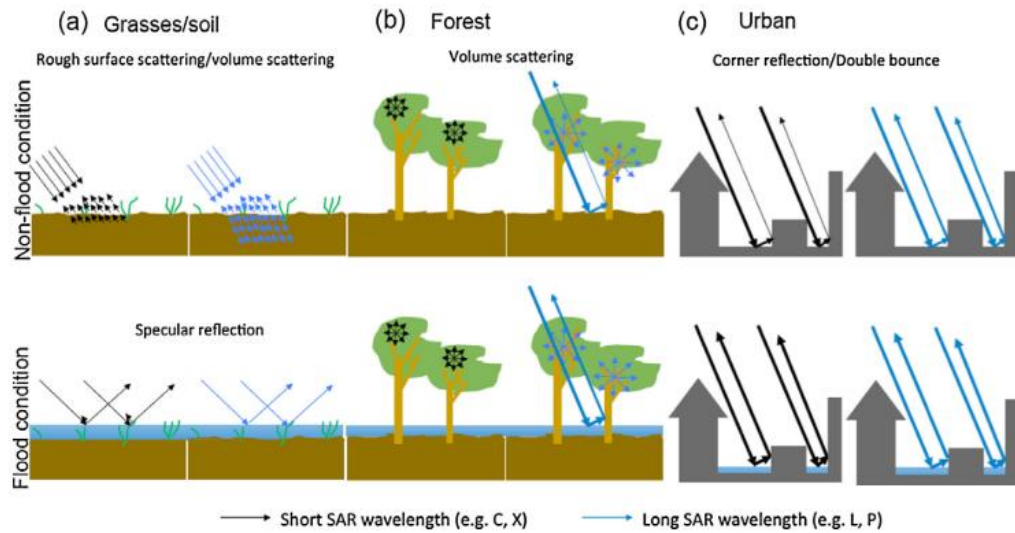


Figura 1.2. Mecanismos de retrodispersión de la señal SAR según cobertura y condición inundada.

Fuente: Schumann & Moller, (2015)

Los valores de retrodispersión que registra un sensor SAR también están relacionados con la longitud de onda en la que se emite la señal, popularmente estos rangos de longitud de onda han sido clasificados en bandas (Flores-Anderson et al., 2019). En el Cuadro 1.3, se muestran los distintos tipos de bandas de satélites SAR, así como sus aplicaciones típicas. En este caso se utilizará imágenes del satélite Sentinel-1, de la Agencia Espacial Europea (ESA por sus siglas en inglés) el cual captura información en banda C (λ 7.5-3.8 cm).

Cuadro 1.3. Bandas de satélites SAR.

| Banda | Frecuencia | Longitud de onda (λ) | Aplicaciones típicas |
|--------------|-------------------|--|---|
| Ka | 27-40 GHz | 1.1-0.8 cm | Poco utilizada en SAR (usualmente para aviones) |
| K | 18-27 GHz | 1.7-1.1 cm | Pocas veces utilizada (Absorción de agua) |
| Ku | 12-28 GHz | 2.4-1.7 cm | Pocas veces utilizada (altimetría satelital) |
| X | 8-12 GHz | 3.8-2.4 cm | SAR de alta resolución (monitoreo urbano, nieve y hielo, pequeña penetración en cobertura de vegetación). |
| C | 4-8 GHz | 7.5-3.8 cm | Potencial SAR (mapeo global; detección de cambios; monitoreo de áreas con vegetación baja a moderada; penetración mejorada; mayor coherencia); hielo, océano, navegación marítima |
| S | 2-4 GHz | 15-7.5 cm | Poco, pero creciente uso para la observación de la Tierra basada en SAR; monitoreo de la agricultura (NISAR llevará un canal de banda S; |

| | | | |
|----------|-----------|-----------|---|
| | | | expande las aplicaciones de banda C a una mayor densidad de vegetación) |
| L | 1-2 GHz | 30-15 cm | SAR de media resolución (monitoreo geofísico, de biomasa y vegetación, con alta penetración). |
| P | 0.3-1 GHz | 100-30 cm | Estudios de Biomasa. Se lanzará el primer SAR espacial en banda P. |

Fuente: Adaptado de Flores-Anderson et al., (2019).

La señal que emite un sensor radar puede tener distintas polarizaciones. Esta define la orientación del plano de oscilación de la señal enviada, puede ser lineal o circular, de las primeras se distinguen dos tipos horizontal (H) y vertical (V), en el caso de las circulares se clasifican en polarización circular derecha (RC) y polarización circular izquierda (LC) (Curry, 2013).

El sensor Sentinel-1 adquiere información en polarización lineal dual (VV + VH), que al mismo tiempo le permite enviar la señal en una polarización y recibirla en otra. Lo anterior, es posible dado que posee una cadena de transmisión conmutable tanto en H como V, sumado a dos cadenas de recepción para la polarización H y V (ESA, 2012). En lo que respecta a la

detección de inundaciones, Donezar-Hoyos et al (2017) considera que la polarización HH es la más apropiada, aunque no está disponible en Sentinel-1. Sin embargo, la polarización VV y VH ha registrado buenos resultados en la detección de inundaciones (Cao et al., 2019; Clement et al., 2017; Helleis et al., 2022; Tarpanelli et al., 2022).

La información del satélite Sentinel-1 tiene tres niveles de procesamiento, el nivel 0, contiene los paquetes fuente del instrumento comprimidos y sin procesar, el nivel 1, es el producto base para la mayoría de usuarios, se trata de datos georreferenciados y etiquetados, por último, el nivel 2, se trata de datos que poseen los parámetros geofísicos, los cuales se obtienen a partir de los datos nivel 1 (ESA, 2014a). Para esta investigación se pretende utilizar datos nivel 1.

En el contexto de la teledetección activa con SAR, una cobertura de inundación se puede discriminar en dos grandes componentes; las coberturas inundadas bajo coberturas y las coberturas inundadas de aguas abiertas (ver Figura 1.2) (Flores-Anderson et al., 2019; Tsyganskaya et al., 2018a). Dadas las características de longitud de onda (banda C) de Sentinel-1, las coberturas de inundación bajo vegetación son difíciles de estimar (Grimaldi et al., 2020; Tsyganskaya et al., 2018b). Por lo que en este trabajo se utilizó un enfoque de detección de inundaciones abiertas, estas se caracterizan por propiciar mecanismos de retrodispersión especular, las cuales se presentan como zonas de baja o muy baja retrodispersión (Martinis, Kuenzer, et al., 2015; Schlaffer et al., 2021; Twele et al., 2016).

Aspecto diferenciador de coberturas que poseen un componente vertical o volumétrico que favorece la interacción energética, y, por tanto, mayor retrodispersión.

Aunado a lo anterior, Tarpanelli et al., (2022) reconoce la capacidad de los sensores SAR de identificar coberturas inundadas de aguas abiertas. No obstante, tanto este como Schlaffer et al., (2021) destacan que la información detectada por estos satélites, no tienen la capacidad de diferenciar entre cuerpos de aguas permanentes, intermitentes u extraordinarios. Por lo que esto es una labor de los especialistas. Para solventar este aspecto, diversas investigaciones suelen utilizar información de referencia de la distribución de las zonas inundadas permanentes (Conde & De Mata Muñoz, 2019; Qiu et al., 2021; Twele et al., 2016).

En el contexto de la CHRF no existe información de este tipo o al menos con la calidad necesaria. Para plantear estas diferencias entre las coberturas inundadas, durante este trabajo se explora un mecanismo que permite diferenciarlas según su frecuencia relativa temporal de inundación.

El procesamiento de grandes conjuntos de imágenes SAR requiere la implementación de flujos de procesamiento complejos, por lo que utilizar Aprendizaje Automático, definido como *“una disciplina del campo de la Inteligencia Artificial, que, mediante algoritmos proporciona a los ordenadores la capacidad de identificar patrones a partir de datos*

*masivos con el fin de crear predicciones”*¹(Smola y Vishwanathan, 2008, p. 3), permite la ejecución de estos de forma automática, con mayor precisión y en menor tiempo.

En este caso, se utilizaron algoritmos paramétricos, estos *“parten de una función de distribución o clasificación conocida, y reducen el problema a estimar los parámetros que mejor ajusten las observaciones de la muestra. Dichos modelos resultan muy potentes cuando el proceso generador de datos sigue la distribución propuesta, aunque pueden llegar a ser muy sensibles frente a la violación de las hipótesis de partida”* (Bonilla et al., 2003, p. 840)

Existe una diversidad de algoritmos de aprendizaje automático, enfocados en múltiples campos, para este trabajo se aplicó el algoritmo Kittler-Illingworth (KI) propuesto por Kittler & Illingworth (1986), que permite a partir de la segmentación *“de imágenes satelitales en subescenas definidas por el usuario, para realizar un análisis de umbrales locales sucesivos de una limitada cantidad de divisiones con una alta probabilidad de contener elementos de una imagen con clases de “inundación” y “no inundación””*² (Martinis et al., 2009, p. 304)

Para el refinamiento de los resultados se empleó un algoritmo basado en Lógica difusa. Cuya teoría fue introducida por L. Zadeh en 1973, quien postula un conjunto difuso como una clase continua de grados de pertenencia, en el que cada conjunto difuso A en un universo discursivo X se caracteriza por una función de pertenencia de A , que se relaciona a cada elemento $x \in$

¹ Traducción propia

² Traducción propia

X en un número real $A(x) \in [0,1]$, $A : X \rightarrow [0, 1]$ (Barnadas, 2012). Los distintos niveles de pertenencia de los conjuntos difusos a generar permitirán mejorar la precisión de las zonas inundadas detectadas en cada una de las imágenes radar de apertura sintética de toda la serie temporal.

Marco Metodológico

Caracterización social y biofísica de la CHRF

La caracterización de la CHRF se realizó a través del Marco de Sistema Socio-ecológico (SES por sus siglas en inglés), el cual, *“identifica los subsistemas clave que participan en las interacciones del ser humano-ambiente, así como sus subcomponentes o variables dentro de un esquema de varios niveles.”*³ (Espinoza-Cisneros, 2018, p. 59). Específicamente se desarrolló el marco de SES propuesto por Ostrom (2009), en el que se identifican cuatro subsistemas básicos de primer nivel: sistema recurso, sistema unidad de recurso, sistema de gobernanza y sistema de usuarios. Estos subsistemas interactúan entre sí, así como entre los entornos sociales, económicos, políticos y los ecosistemas (Figura 1.3) (Ostrom, 2009).

³ Traducción propia

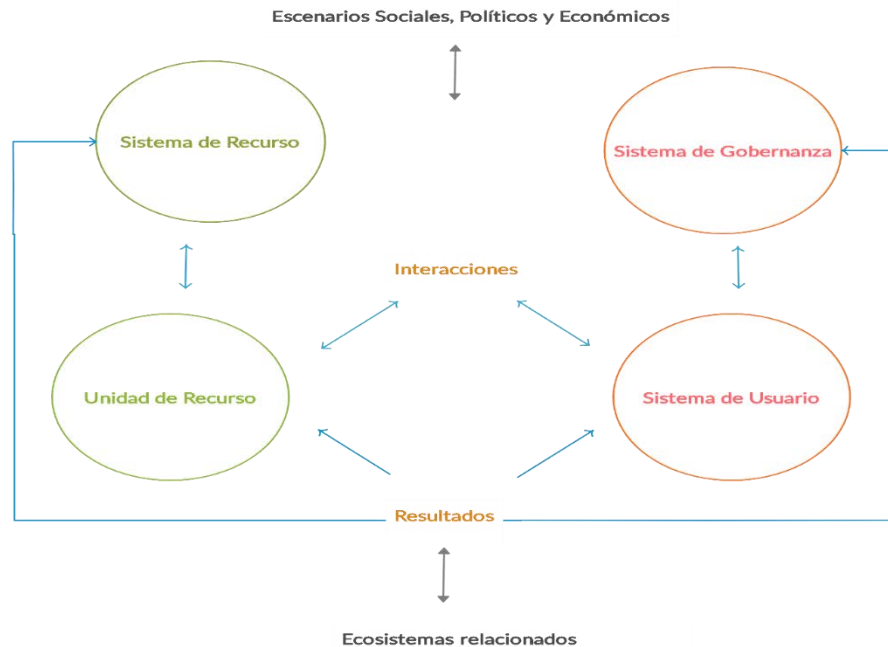


Figura 1.3. Primer nivel de subsistemas de un Sistema Socio-ecológico. Fuente: Elaboración propia a partir de Ostrom, (2009).

Cada uno de los subsistemas a su vez es desagregado en variables de segundo nivel (Cuadro 1.4), que son el resultado múltiples estudios empíricos en distintos contextos socio-ecológicos (Farhad, 2012; Ostrom, 2009). No obstante, no todas las variables son aplicables para un caso de estudio. La selección de las variables más adecuadas al contexto de la CHRf se llevó a cabo a partir de entrevistas a profundidad a informantes y actores claves (mediante herramientas virtuales), visitas a campo y lectura de información secundaria (reportes, artículos científicos, informes, etc.).

Cuadro 1.4. Segundo nivel de variables de subsistemas de un Sistemas Socio-ecológico.

| Categoría | Codificación/Nombre de la variable |
|---|--|
| Escenario social, económico y político (S) | S1 Desarrollo económico S2 Tendencias demográficas S3 Estabilidad política S4 Políticas de gobernanza de recursos S5 Mercados S6 Organizaciones mediáticas S7 Tecnología |
| Sistema de Recurso (RS) | RS1 Sector RS2 Claridad de límites del sistema RS3 Tamaño del sistema de recursos RS4 Infraestructura RS5 Productividad RS6 Propiedades de equilibrio RS7 Predictibilidad de las dinámicas del sistema RS8 Evidencia e historia de impactos RS9 Ubicación |
| Unidades de recurso (RU) | RU1 Movilidad del recurso RU2 Tasa de crecimiento o reemplazo del recurso RU3 Interacción entre unidades del recurso RU4 Valor del recurso RU5 Número de unidades/tamaño RU6 Características distintivas RU7 Distribución espacial y temporal |
| Sistema de Gobernanza (GS) | GS1 Organizaciones gubernamentales GS2 Organizaciones no-gubernamentales GS3 Estructura de la red GS4 Sistemas de derechos de propiedad GS5 Reglas operacionales GS6 Reglas de escogencia colectiva GS7 Reglas constitucionales GS8 Reglas de monitoreo y sanción |
| Usuarios (U) | U1 Número de usuarios relevantes U2 Atributos socioeconómicos de los usuarios U3 Historia de uso del recurso por los usuarios U4 Ubicación U5 Liderazgo/emprendedurismo U6 Capital social (normas -- confianza/reciprocidad) |

| | |
|---------------------------------------|---|
| | U7 Conocimiento del Sistema SSE/modelos mentales U8 Importancia del recurso (dependencia) U9 Tecnologías disponibles |
| Interacciones y resultados (I) | I1 Niveles de cosecha I2 Intercambios de información I3 Procesos de deliberación I4 Conflictos I5 Actividades de inversión I6 Actividades de cabildeo I7 Actividades auto organizadas I8 Actividades de redes e intercambios I9 Actividades de monitoreo I10 Actividades evaluativas |
| Criterios de resultados (O) | O1 Medidas de desempeño socioeconómico O2 Medidas de desempeño ecológico O3 Externalidades a otros SES |
| Ecosistemas relacionados (ECO) | ECO1 Patrones climáticos ECO2 Patrones de contaminación ECO3 Flujos dentro y fuera del SSE focal |

Fuente: Adaptado de (Ostrom, 2009)

El marco constituye una guía para estudiar los procesos sociales y ecológicos en la CHRF y como estos tienen relación directa o indirecta en aspectos como la extensión, el impacto y frecuencia de inundaciones. Lo que favoreció comprender las coberturas inundadas más allá de su delimitación y cuantificación a partir de la tecnología SAR.

Detección espaciotemporal de inundaciones

Para la detección espaciotemporal de inundaciones se ejecutó un flujo metodológico automático basado en lo propuesto por Martinis et al., (2015) y Twele et al., (2016). Este se fundamenta en la implementación del algoritmo paramétrico Kittler & Illingworth (KI) para la segmentación de zonas inundadas y no inundadas de imágenes Radar de Apertura Sintética

(SAR por sus siglas en inglés), así como en el refinamiento o depuración de los resultados a partir de lógica difusa.

Se utilizaron imágenes SAR del sensor Sentinel-1 de la Agencia Espacial Europea (ESA por sus siglas en inglés), adquiridas mediante el modo Interferométrico de banda ancha (IW por sus siglas en inglés) en banda C, con las polarizaciones VV y VH. Este sensor tiene un periodo de revisita de aproximadamente 12 días por paso de órbita y de aproximadamente 6 días combinando los pasos de órbita Ascendente y Descendente.

En la Figura 1.4 se sintetiza el flujo metodológico utilizado para la detección espacio temporal automática de inundaciones. Es importante detallar que, en la CHRF las coberturas inundadas forman parte del cotidiano, asociadas principalmente a los sistemas lagunares lacustres de Caño Negro, que prestan una amplia gama de servicios ecosistémicos. Por tanto, esta investigación no contempla la detección de áreas inundadas únicamente desde la perspectiva del impacto de eventos extremos, sino que también contempla la dinámica de estos cuerpos de agua semipermanentes, que pueden ofrecer información valiosa para diversos tomadores de decisiones.

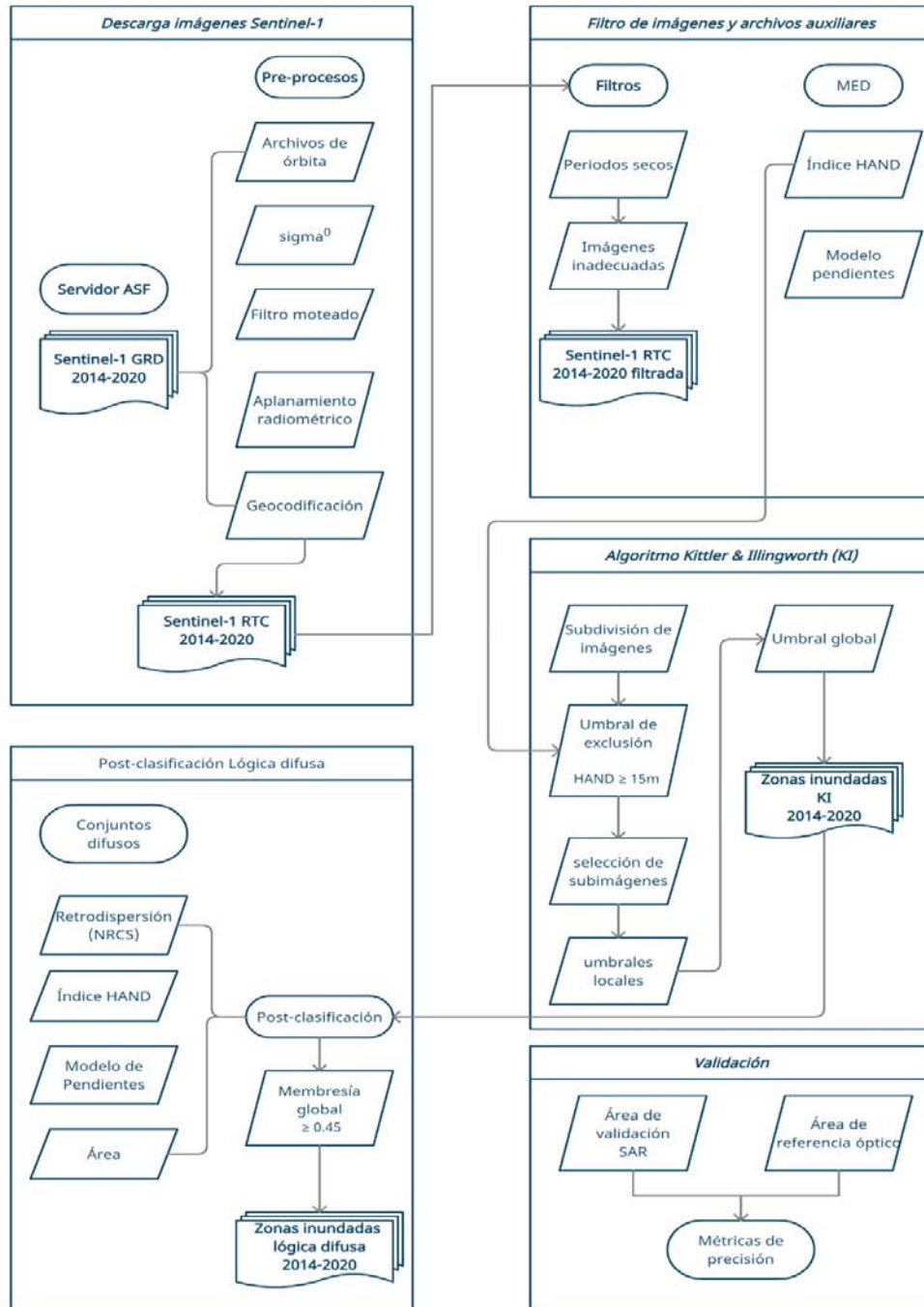


Figura 1.4. Flujo metodológico para la detección espaciotemporal automática de inundaciones en la CHRF. Fuente: Elaboración propia a partir de Martinis et al., (2015).

Descarga de imágenes Sentinel-1

La descarga de las imágenes SAR de Sentinel-1 se realizó en el servidor beta HYP3 de Alaska Satellite Facility (ASF por sus siglas en inglés), a cargo del Instituto de Geofísica de la Universidad de Alaska en Fairbanks. Sin embargo, en la actualidad este servicio fue trasladado al Alaska Satellite Facility Vertex, (<https://search.asf.alaska.edu/#/>). El cual permite descargar imágenes Sentinel-1 preprocesadas bajo la modalidad por demanda.

Esta investigación al basarse en el análisis de niveles de retrodispersión implicó la descarga de imágenes de Nivel-1 GRD, con un nivel de preprocesamiento Radiométrico y Geométrico (RTC por sus siglas en inglés) con una resolución espacial de salida de 30 m. Por lo que se consideran un producto adecuado para la etapa de procesamiento y análisis (Flores-Anderson et al., 2019; Woodhouse, 2006). Existe una gran variedad de enfoques de preprocesamiento en imágenes SAR orientados a distintas aplicaciones, a continuación, se detalla las utilizadas para esta investigación.

Nivel de preprocesamiento de datos Sentinel-1

Los sensores SAR miden la retrodispersión o Sección Transversal del Radar (RCS por sus siglas en inglés), esta medición inicial puede suponer un problema si se quiere realizar comparaciones de mediciones entre diferentes adquisiciones sean del mismo sensor o no (Woodhouse, 2006). Para solventar esto, es necesario realizar una normalización de las mediciones SAR, así como ejecutar correcciones de carácter geométrico o de terreno

relacionadas a la adquisición activa de la información. Las imágenes descargadas poseen los siguientes preprocesos:

- Aplicación de los archivos de órbita: proceso orientado a mejorar la geocodificación de las imágenes SAR.
- Calibración radiométrica: Normalización de la Sección Transversal (NRCS por sus siglas en inglés), en este caso, la normalización utilizada fue σ^0 , que relaciona el área objetivo derivado de la RCS con el área geométrica real en la superficie (Flores-Anderson et al., 2019). Esta normalización es la más común en estudios de inundaciones con SAR, al relacionar directamente retrodispersión con la superficie terrestre y está dado por la siguiente expresión:

$$\sigma^0 = \frac{\sigma}{A} \quad (1)$$

σ : Sección Transversal de Radar (RCS) o coeficiente de retrodispersión.

A: área de superficie.

σ^0 : Sección Transversal de Radar Normalizada (NRCS) o coeficiente de retrodispersión normalizado.

- Filtro de moteado (speckle): el filtro de moteado aplicado a las imágenes fue el Mejoramiento de Lee, este es un filtro adaptativo adecuado para preservar la información radiométrica y textural de la imagen, en este filtro se toma en cuenta la heterogeneidad de la superficie, catalogándolas como zonas homogéneas, heterogéneas y objetivos puntuales (Flores-Anderson et al., 2019; Lopes et al., 1990). En la Figura 3 se muestra como la aplicación del filtro de moteado disminuye el aspecto granular conocido como efecto sal y pimienta de las imágenes SAR.

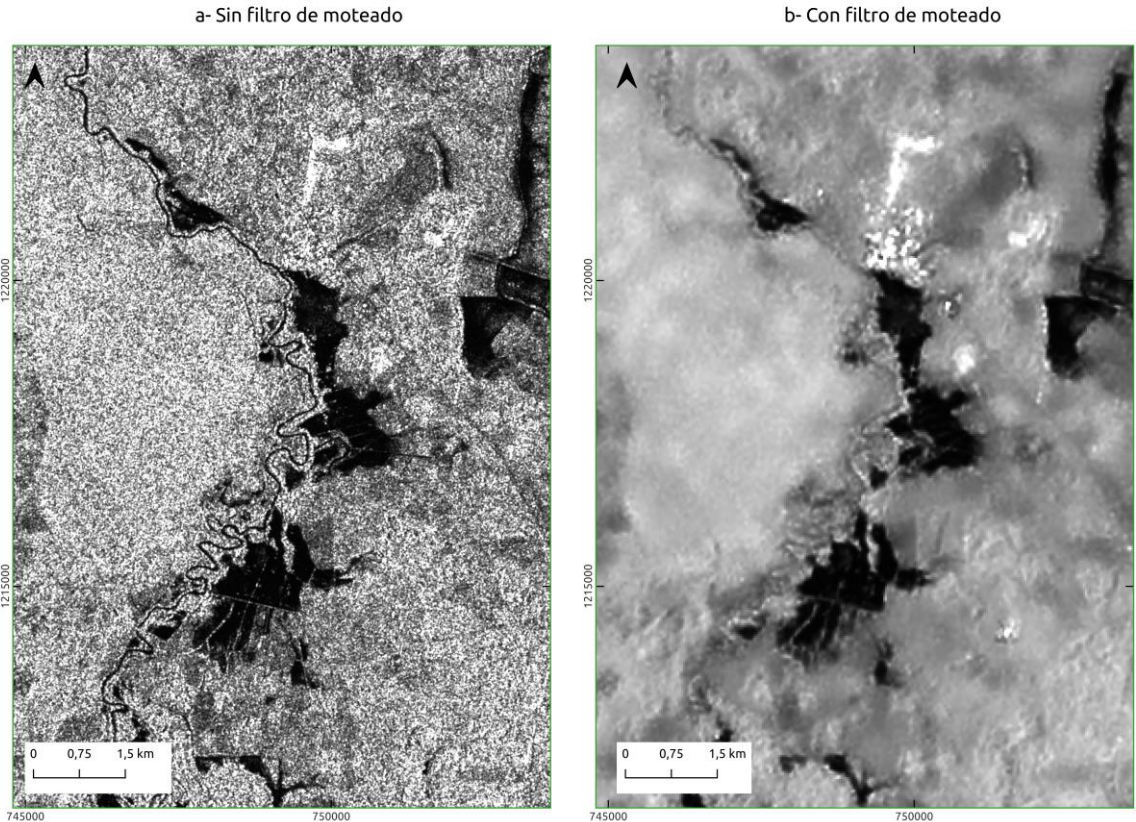


Figura 1.5. Efecto del filtro de moteado Mejorado de Lee en imágenes SAR Sentinel-1. a- Imagen sin filtro de moteado. b- Imagen con filtro de moteado. Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes SAR Sentinel-1.

- Aplanamiento radiométrico del terreno: proceso orientado a disminuir las distorsiones radiométricas de la imagen inducidas por la topografía.
- Geocodificación: destinado a disminuir las distorsiones como el desplazamiento de coberturas y la inversión por relieve, este proceso se realiza a partir de un modelo de elevación digital (MED). Tanto para el Aplanamiento radiométrico del terreno como para la Geocodificación se utiliza el modelo de elevación digital Copernicus DEM, el cual tiene una resolución de 30 m o 1 segundo de arco (ASF, 2021).

La posibilidad de descargar imágenes SAR con un nivel de preprocesamiento RTC permitió reducir los tiempos de procesamiento, dado que la etapa de calibración y corrección de estas imágenes requiere de altas demandas computacionales y tiempos de procesado. A su vez, favoreció la incorporación de imágenes SAR de Sentinel-1 tanto de órbitas ascendentes como descendentes, aumentando la escala temporal de los datos y la posibilidad de observación de inundaciones. Por otro lado, las características de preprocesamiento de las imágenes descargadas se pueden replicar utilizando el software de acceso gratuito SNAP de la Agencia Espacial Europea (ESA por sus siglas en inglés).

Conjunto de datos Sentinel-1

Se realizó la descarga de todo el conjunto de datos Sentinel-1 disponible para el área de estudio de 2014 hasta 2020, tanto de la órbita ascendente como descendente, así como las polarizaciones disponibles VV y VH. En total se descargaron 474 visualizaciones de la CHRF. Sin embargo, al total de imágenes se descartaron las imágenes de los periodos secos en la CHRF.

Periodos secos y lluviosos

En la cuenca hidrográfica Río Frío (CHRF) no existe una estacionalidad definida si se distingue un periodo de disminución de las precipitaciones entre enero y abril, así como un periodo de mayor precipitación entre mayo y diciembre con un pico de precipitaciones en los meses de julio (Acevedo, 2012). Para descartar las imágenes se utilizó información de

precipitación proveniente de 3 estaciones meteorológicas del Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica (IMN) distribuidas a lo largo de la cuenca (Cuadro 1.5).

Cuadro 1.5. Estaciones meteorológicas de la CHRF.

| Nombre | Ubicación | Coordenadas | Altitud (msnm) |
|---|-----------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| Estación Automática de Refugio Caño Negro | Los Chiles - Alajuela | Lat 10°29'34.8"N, Lon 84°25'16.3"O. | 76 |
| Estación Automática de San Jorge | Los Chiles - Alajuela | Lat 10°43' 5.5"N, Lon 84°25 '30.4" O. | 77 |
| Estación Automática de Volcán Tenorio | Alajuela | Lat 10°42'13"N, Lon 84°59' 13"O. | 680 |

Fuente: Elaboración propia a partir de Datos IMN.

La razón principal de este filtro es descartar del procesamiento aquellas visualizaciones que pueden generar altos niveles de error en la distinción de coberturas inundadas y no inundadas. Al disminuir las precipitaciones en el área de estudio se da un descenso de las coberturas inundadas permanentes asociados a los humedales de Caño Negro, lo que provoca un aumento de la retrodispersión (Figura 1.7). La presencia de estas coberturas es fundamental para el funcionamiento adecuado del algoritmo de umbralización automático, para la segmentación de clases inundada y no inundada. Este aspecto se detalla más adelante.

En la Figura 1.6 se detalla cada uno de los periodos secos y lluviosos para cada año de la serie temporal. Definiendo los periodos lluviosos entre los meses de junio y diciembre, por lo que las imágenes SAR utilizadas están asociadas a estos meses.

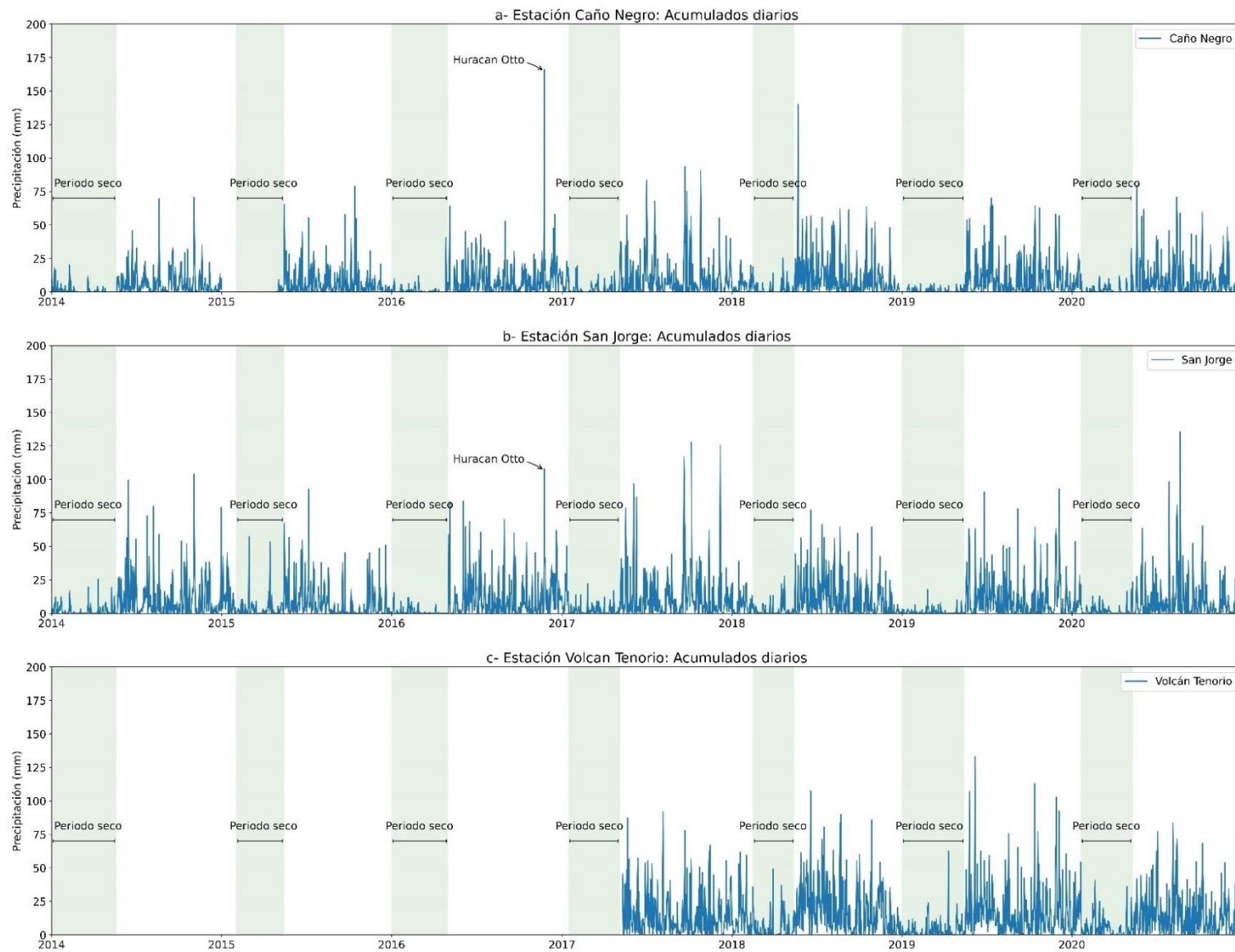


Figura 1.6. Acumulados diarios de precipitación 2014-2020. Estaciones meteorológicas Caño Negro (a), San Jorge (b) y Volcán Tenorio (c) en la CHR.F. Se detallan los periodos secos anuales. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del IMN.

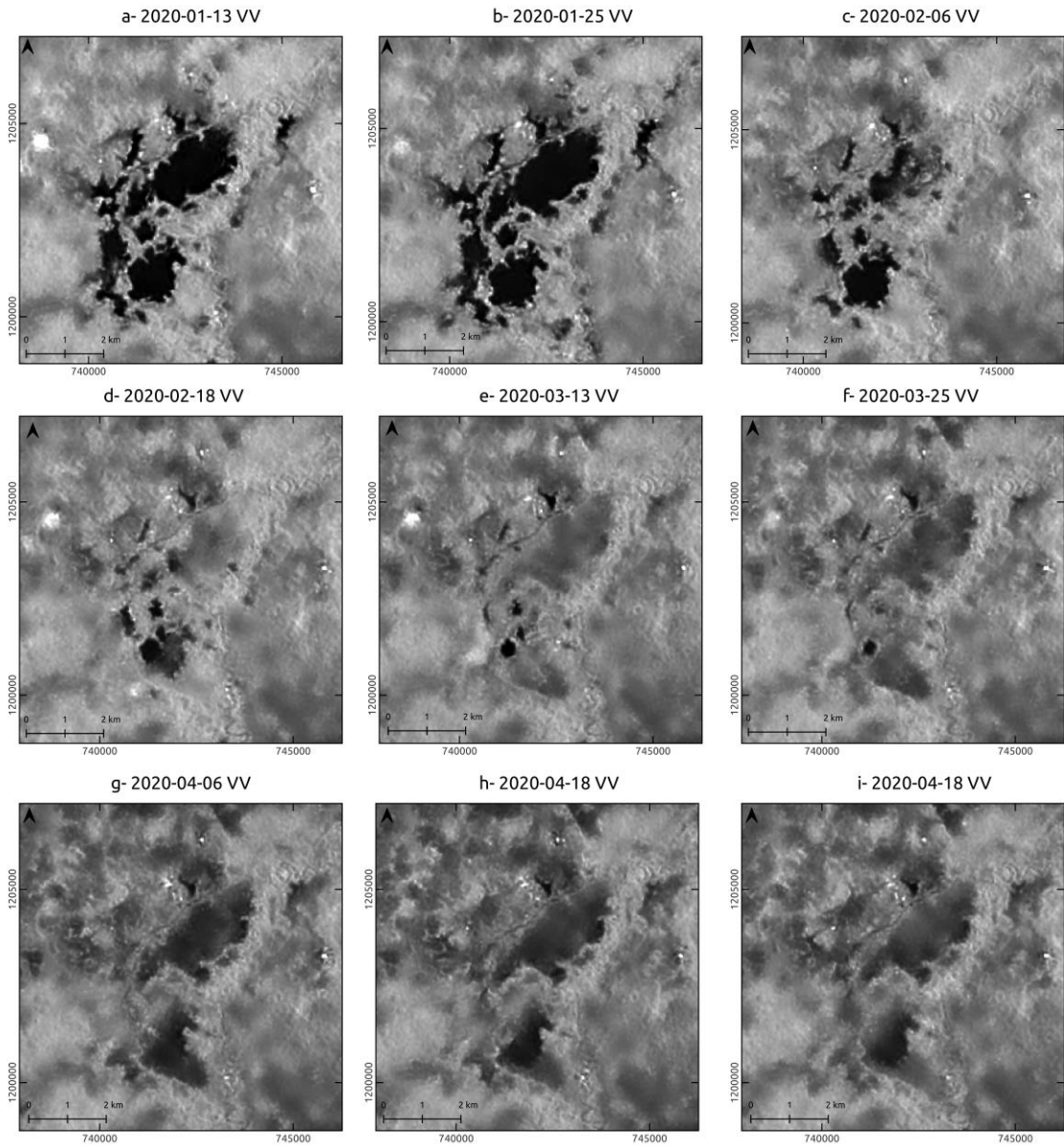


Figura 1.7. Aumento de la retrodispersión en cuerpos de agua del humedal Caño Negro en periodos secos.

Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes Sentinel-1

Conjunto de datos filtrado

Se seleccionaron un total de 299 visualizaciones para el procesamiento. En el que se debe destacar que para los años 2014, 2015 y 2016 no existe una resolución temporal bien definida de las imágenes SAR de Sentinel-1. A partir del lanzamiento del sensor Sentinel-1B a finales de 2016 es posible obtener adquisiciones SAR en la cuenca cada 12 días en un sentido de órbita y aproximadamente cada 6 días si se toman en cuenta ambos barridos de órbita. En la Figura 1.8 se detalla la distribución temporal de las imágenes utilizadas, así como el mecanismo de adquisición por órbita descendente (DES) y ascendente (ASC), así como por polarización (VV y VH).

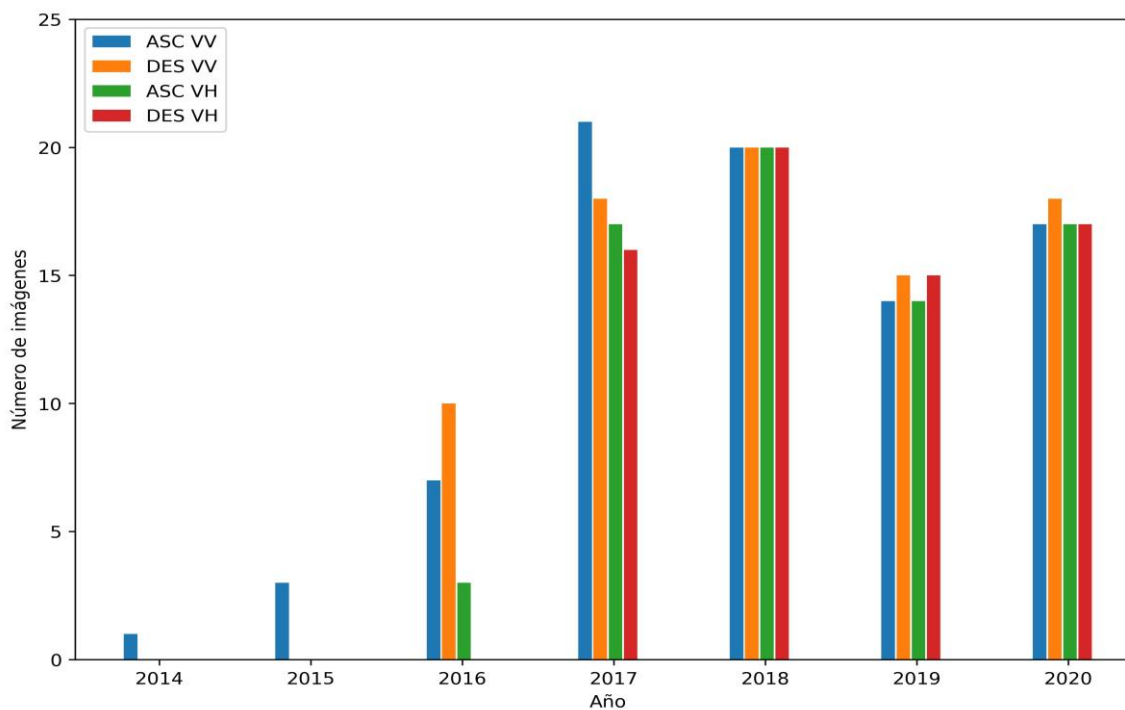


Figura 1.8. Imágenes Sentinel-1 utilizadas por polarización y paso de órbita. Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes Sentinel-1.

Algoritmo Kittler & Illingworth (KI)

El algoritmo de Kittler & Illingworth (KI) o umbral de error mínimo propuesto por Kittler & Illingworth (1986), se trata de una técnica de umbralización global paramétrica basada en umbrales locales que se utiliza agrupar valores de píxel de imágenes en clases semánticas. Esta técnica asume que el histograma de la imagen $X(g)$ que muestra la distribución de los distintos niveles de gris (g) es la única información disponible sobre la imagen (Kittler & Illingworth, 1986; Martinis et al., 2015).

La ejecución de este algoritmo se realizó en la IDE de Jupyter Notebook a partir de un código de programación en Python 3.6. El cual consta de las siguientes etapas o pasos principales:

División en subimágenes

La implementación del algoritmo KI implica la subdivisión de la imagen general $X(g)$ con dimensiones R,C en N subimágenes cuadráticas y no superpuestas X_n , (Martinis et al., 2009). La dimensión $C2$ de cada X_n , es definida por el usuario, para esta investigación y posterior a diversas pruebas empíricas se definió la dimensión $C2$ en 250×250 píxeles y $C2/2$ de 125×125 píxeles en caso de fallar el procesamiento con la dimensión inicial. La segunda dimensión se utiliza en caso de que los subimágenes generadas no cumplan una serie de criterios que se definen más adelante. Este proceso se lleva a cabo para cada una de las imágenes de forma individual.

Índice de altura sobre el drenaje más cercano (HAND)

El índice de altura sobre el drenaje más cercano (HAND por sus siglas en inglés), es una normalización de la topografía respecto a la red de drenaje a partir de un modelo de elevación digital (MED). Que muestra la distancia vertical (eje z) desde la celda de superficie catalogada como ladera hasta la celda de drenaje más cercana (Nobre et al., 2011). Diversas investigaciones (Bioresita et al., 2018; Clement et al., 2017; Martinis et al., 2018; Tsyganskaya et al., 2018b) consideran que este índice es de gran utilidad para descartar zonas de baja posibilidad de inundación.

El índice se generó siguiendo lo propuesto por Rennó et al., (2008), para el cual se utilizó el modelo de elevación digital de Copernicus, mismo que se empleó en la geocodificación de las imágenes. El procesamiento se llevó a cabo en la interfaz de Jupyter Notebook mediante un código de programación en Python 3.6. El descarte de las zonas de baja probabilidad de inundación se ejecutó mediante un umbral de exclusión, con un valor $\geq 15\text{m}$ en el índice HAND, que coincide con el propuesto por Twele et al., (2016). En la Figura 1.9 (a) se detalla el índice HAND para la CHRf, mientras que en la Figura 1.9 (b) se muestra el resultado del umbral de exclusión.

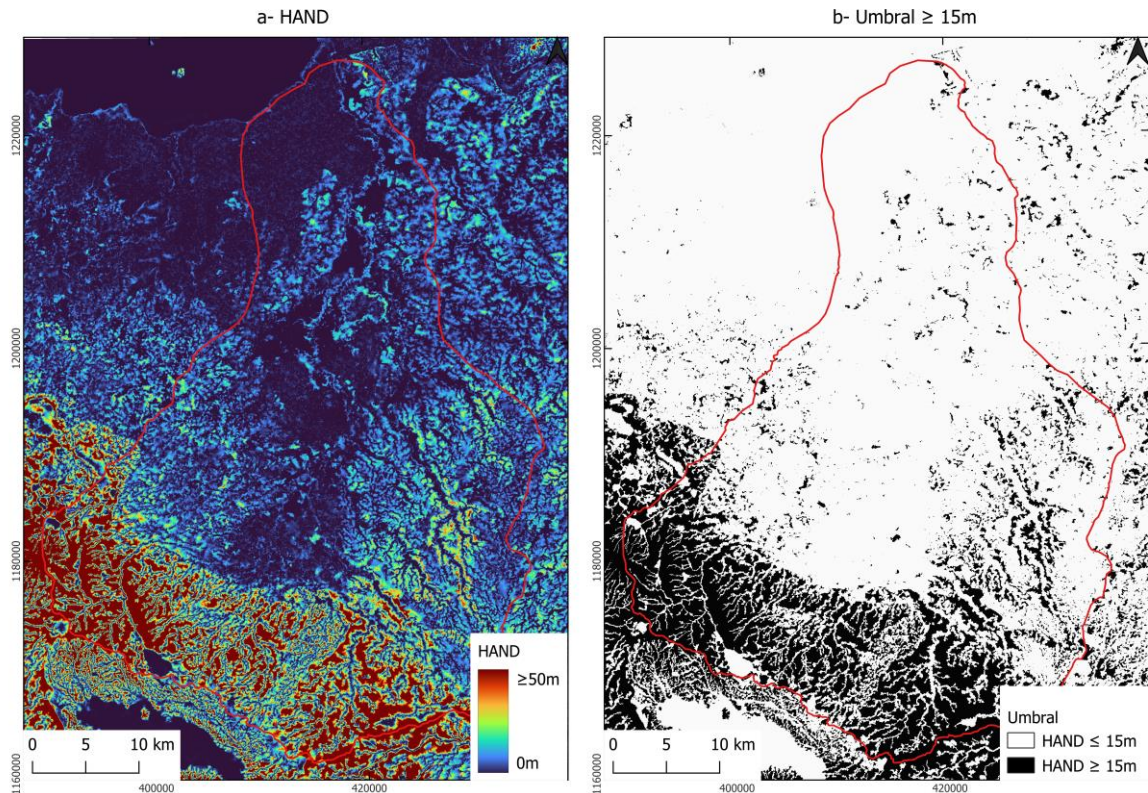


Figura 1.9. Índice de altura sobre el drenaje más cercano (HAND) para la CHRF. a- Visualización del índice HAND. Fuente: Elaboración propia a partir de modelo de elevación digital de Copernicus.

Selección de subimágenes

Las subimágenes X_n fueron subdivididas con una dimensión $C2/4$, esto con el objetivo de calcular el coeficiente variación $CV X_n$, esta es una relación entre la media aritmética μX_n y la desviación estándar σX_n de los valores de gris de X_n (Figura 1.10, b). Martinis et al., (2009) considera que esta es una estadística adecuada para identificar aquellas subimágenes

X_n , que se caracterizan por un comportamiento bimodal, relacionado con la presencia de dos clases semánticas (inundado y no inundado).

Del total de X_n , se seleccionaron 5 X_n , que cumplan con los siguientes criterios:

1. Las subimágenes X_n , con menor valor de media aritmética μX_n , en los valores de gris respecto a la media aritmética obtenida del total de las subimágenes μX_n .
2. Las subimágenes X_n , con la mayor desviación estándar σX_n , del total de σX_n .
3. Si el cálculo falla, se procederá de forma automática a reducir la dimensión C2 de los X_n , a $C2/2$. Esta situación es común cuando las zonas inundadas son dispersas y de pequeñas dimensiones, por lo que es necesario reducir el tamaño de X_n para generar histogramas de niveles de gris que reflejen más de una clase semántica (Martinis, Kersten, et al., 2015).

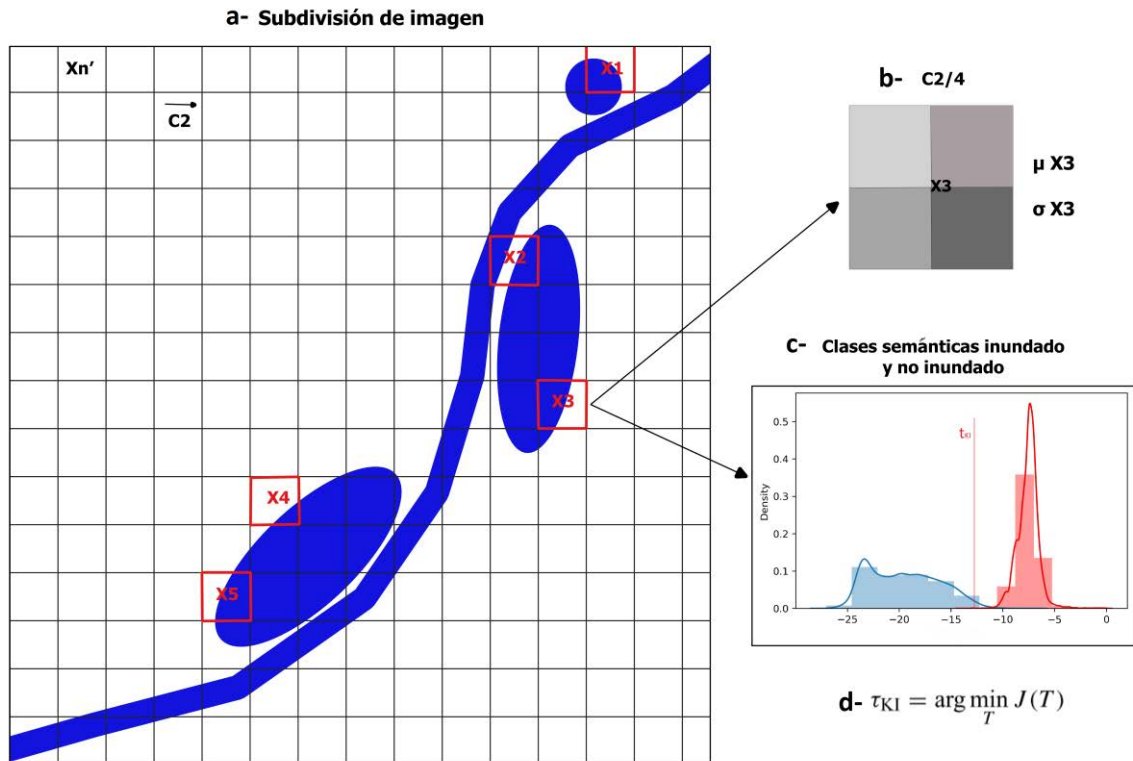


Figura 1.10. Esquema de umbral de error mínimo KI. a- Subdivisión de imágenes. b- Cálculo de coeficiente de variación CV. c- Selección de subimágenes para umbralización local. d- Umbralización local. Fuente: Elaboración propia a partir de Martinis et al., (2015).

Umbrales locales

La dificultad de discriminar un comportamiento bimodal en una imagen SAR representa un problema para establecer umbrales globales (Bioresita et al., 2018; Martinis et al., 2009). Para mitigar esto, el algoritmo KI calcula umbrales locales de las subimágenes X_n' para definir un umbral global adecuado.

El umbral de error mínimo KI parte del supuesto que los histogramas de las subimágenes seleccionadas X_n' pueden modelarse mediante dos distribuciones normales de las clases

semánticas $p(g | i)$, $i=\{1: \text{inundado}, 2: \text{no-inundado}\}$, a partir de los parámetros: media aritmética (μ_i), desviación estándar (σ_i) y una probabilidad a priori (P_i) (Martinis, et al., 2015). Lo anterior está dado por:

$$\rho(g) = \sum_{i=1}^2 P_i \rho(g \vee i) \quad (2)$$

Dónde:

$$\rho(g \vee i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} e^{-\frac{(g-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}} \quad (3)$$

Los parámetros antes expuestos son desconocidos, por lo que se estiman a partir de un umbral arbitrario (T):

$$P_i(T) = \sum_{g=a}^b h(g) \quad (4)$$

$$\mu_i(T) = \frac{\sum_{g=a}^b g * h(g)}{P_i(T)} \quad (5)$$

$$\sigma_i(T) = \frac{\sum_{g=a}^b (g-\mu_i(T))^2 * h(g)}{P_i(T)} \quad (6)$$

Donde: $a=1$ si $i=\text{inundado}$, $a=T+1$ si $i = \text{no inundado}$, $b=T$ si $i=\text{inundado}$ y $b=G$ si $i=\text{no inundado}$.

La estimación del umbral óptimo τ_{KI} se realiza mediante la optimización del criterio $J(T)$:

$$J(T) = \sum_{g=0}^{G-1} h(g)c(g, T) \quad (7)$$

Lo anterior, promedia la función de coste $c(g, T)$ sobre el histograma $J(T)$. El objetivo de la función de coste $c(g, T)$ es medir el costo de clasificar los píxeles comparando sus niveles

de gris con el umbral T. Según el nivel de brillo de la imagen (valores de gris) se pueden probar hasta G valores de umbral, en el que a cada valor de brillo se le calcula la función de coste (Kittler & Illingworth, 1986; Martinis et al., 2009).

$$J(T) = 1 + 2[P_1(T)\log\sigma_1(T) + P_2(T)\log\sigma_2(T)] - 2[P_1(T)\log P_1(T) + P_2(T)\log P_2(T)] \quad (8)$$

Con el cambio en el umbral T se ajustan los modelos de las distribuciones gaussianas, entre mejor sea el ajuste menor será la función de coste c (g, T). Por tanto, el valor de brillo que genere la menor función de coste será el umbral óptimo τ_{KI} del X_n , seleccionado (Kittler & Illingworth, 1986). Este umbral es una intersección de las dos distribuciones gaussianas (Figura 1.10, c).

$$\tau_{KI} = \arg \min_T J(T) \quad (9)$$

El proceso se realiza para los 5 X_n , que alimentaran el cálculo del umbral global de cada imagen de la serie temporal.

Umbral global

El umbral global τ_x de cada imagen SAR se estimó a partir de la media aritmética de los umbrales locales τ_{KI} . Martinis et al., (2015) considera que esta métrica es más adecuada que otras como la mediana, dado que es más sensible a valores atípicos presentes en el rango de valores. De igual forma, al tener cada valor de umbral τ_{KI} el mismo peso, la media aritmética brinda más información.

Se definieron una serie de parámetros para evaluar la pertinencia de los umbrales globales estimados. El primero está basado en la desviación estándar (σ) entre los umbrales locales τ_{KI} . En el que se consideró como umbral global exitoso si σ es menor a 5 dB, este valor es sugerido por Twele et al., (2016). Valores altos en σ indican que los umbrales pueden ser discordantes entre sí y no estar segmentando las mismas clases semánticas.

El segundo parámetro fue la definición de un umbral máximo permitido. Para estimar este umbral se realizó un muestreo aleatorio de zonas de agua y no agua en diferentes imágenes de la serie temporal de la CHRF. Con el objetivo de identificar los valores típicos de retrodispersión de cada clase semántica (inundado y no inundado). Para la polarización VV la clase inundado mostró un rango de valores de retrodispersión entre -25 dB y -12 dB VV y de -29 dB y -17 dB para la polarización VH. La clase no inundado mostró valores entre -12 dB y -5dB para la polarización VV, y entre -18dB y -7dB para VH. Estos valores tienen concordancia con los hallados en investigaciones similares (Uddin et al., 2019; Meimei Zhang et al., 2020).

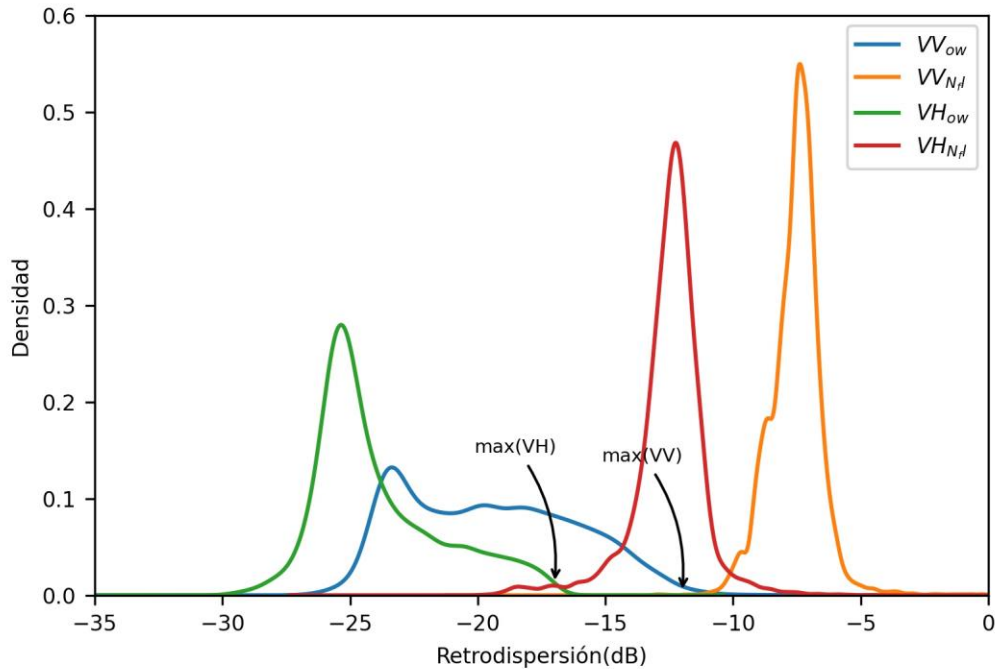


Figura 1.11. Densidad de los valores de retrodispersión por polarización (VV y VH) y por clase semántica (ow = aguas abiertas, Nfl = no inundado). Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes Sentinel-1.

El umbral global máximo permitido para la polarización VV se estableció en -12 dB y de -17 dB para la polarización VH. Si el umbral global estimado es mayor al permitido se reiniciará el proceso, en este caso con una dimensión $C2/2$ de X_n .

Lógica Difusa

En segmentación de imágenes es fundamental un umbral adecuado para establecer límites que permitan dividirla en regiones significativas y que no tengan altos niveles de sesgo (Bioresita et al., 2018). Sin embargo, cuando las regiones (clases semánticas) no están bien definidas o en su defecto son difusas, es importante realizar una segmentación específica, convirtiendo las regiones en conjuntos difusos de la imagen (Pal & Rosenfeld, 1988).

Tomando en cuenta lo anterior, se procedió a utilizar un algoritmo basado en lógica difusa para refinar el resultado de la segmentación realizada con el umbral τ_x en las imágenes de la serie temporal. La lógica difusa nos permite definir el nivel de membresía o pertenencia de un objeto a una clase determinada (Zadeh, 1965).

El nivel de membresía está dado por la función de pertenencia $f_A(x)$ que asocia a cada punto de x un número real en el intervalo $[0, 1]$, representando el valor de $f_A(x)$ el grado de pertenencia de x a A (Zadeh, 1965). El valor 0 representa nula membresía y 1 la máxima membresía (Pal & Rosenfeld, 1988).

Para esta investigación se definieron cuatro conjuntos difusos: Nivel de retrodispersión de los píxeles determinados con el umbral τ_x , índice HAND, pendiente y área de las zonas inundadas delimitadas con τ_x . Estos conjuntos difusos coinciden con los propuestos por Twele et al., (2016).

Nivel de retrodispersión (NRCS)

Se otorgó la mayor membresía X_u (1) a los valores de píxel con menor retrodispersión que el umbral global τ_x . Se asignó nula membresía X_l (0) a los píxeles que superen el valor de la media aritmética del total de píxeles etiquetados como inundado por τ_x , estos parámetros coinciden con lo propuesto por Twele et al., (2016).

$$NRCS: \left\{ \begin{array}{l} X_{u,NRCS} = \tau_x \\ X_{l,NRCS} = \mu_{\sigma^0(\tau_x)} \end{array} \right\} \quad (10)$$

Donde:

$\sigma^0(\tau_x)$: valores de retrodispersión de las zonas catalogadas como inundadas por τ_x .

Índice HAND

Se asignó la máxima membresía (1) a las zonas con un valor menor al promedio de índice HAND de las zonas etiquetadas como inundadas por el umbral global τ_x , la menor membresía (0) se asignó a aquellas zonas que sean significativamente mayor al valor promedio de índice HAND.

$$HAND: \begin{cases} X_{u,HAND} = \mu_{HAND} + f * \sigma_{HAND} \\ X_{l,HAND} = \mu_{HAND} \end{cases} \quad (11)$$

Donde:

$$f = \sigma_{HAND} + 3.5$$

Pendiente

Se utilizó la información derivada del MED de Copernicus para generar un modelo de pendientes, computado a partir de lo propuesto por Burrough et al., (1998). Se asignó la menor membresía (0) a zonas con valores de pendiente superiores a 15° , mientras se asignó la mayor membresía (1) a valores de pendiente de 0° .

$$Pendiente\alpha: \begin{cases} X_{u,\alpha=0^\circ} \\ X_{l,\alpha=15^\circ} \end{cases} \quad (12)$$

Área

Este conjunto difuso tiene el objetivo de discriminar zonas etiquetadas como inundadas por τ_x relacionadas con áreas dispersas de baja retrodispersión sin continuidad espacial. Se otorgó la mínima membresía (0) a las zonas de inundación delimitadas por τ_x con un área menor a

3 píxeles (2700 m²), la máxima membresía se otorgó a las zonas de inundación con un área mayor a 10 píxeles (9000 m²).

$$\text{Área: } \left\{ \begin{array}{l} X_{u,A=10px} \\ X_{l,A=3px} \end{array} \right\} \quad (13)$$

Membresía global

Los cuatro conjuntos difusos calculados se combinan utilizando la media aritmética de los distintos niveles de pertenencia de cada píxel. Para que un píxel sea etiquetado como inundado debe poseer una membresía media superior a 0.45, este valor concuerda con el propuesto por Twele et al., (2016). Por otro lado, si la membresía de alguno de los cuatro conjuntos difusos para un píxel es 0, este píxel tendrá una membresía global de 0 y se etiqueta como no inundado, independientemente de si los demás conjuntos tengan membresías positivas.

El resultado de este proceso es una imagen independiente con los niveles de membresía para cada píxel. Del cual se obtiene el postprocesamiento automático de los resultados obtenidos de aplicar el algoritmo de umbralización de error mínimo KI. En la Figura 1.12 se muestra un ejemplo del proceso de lógica difusa.

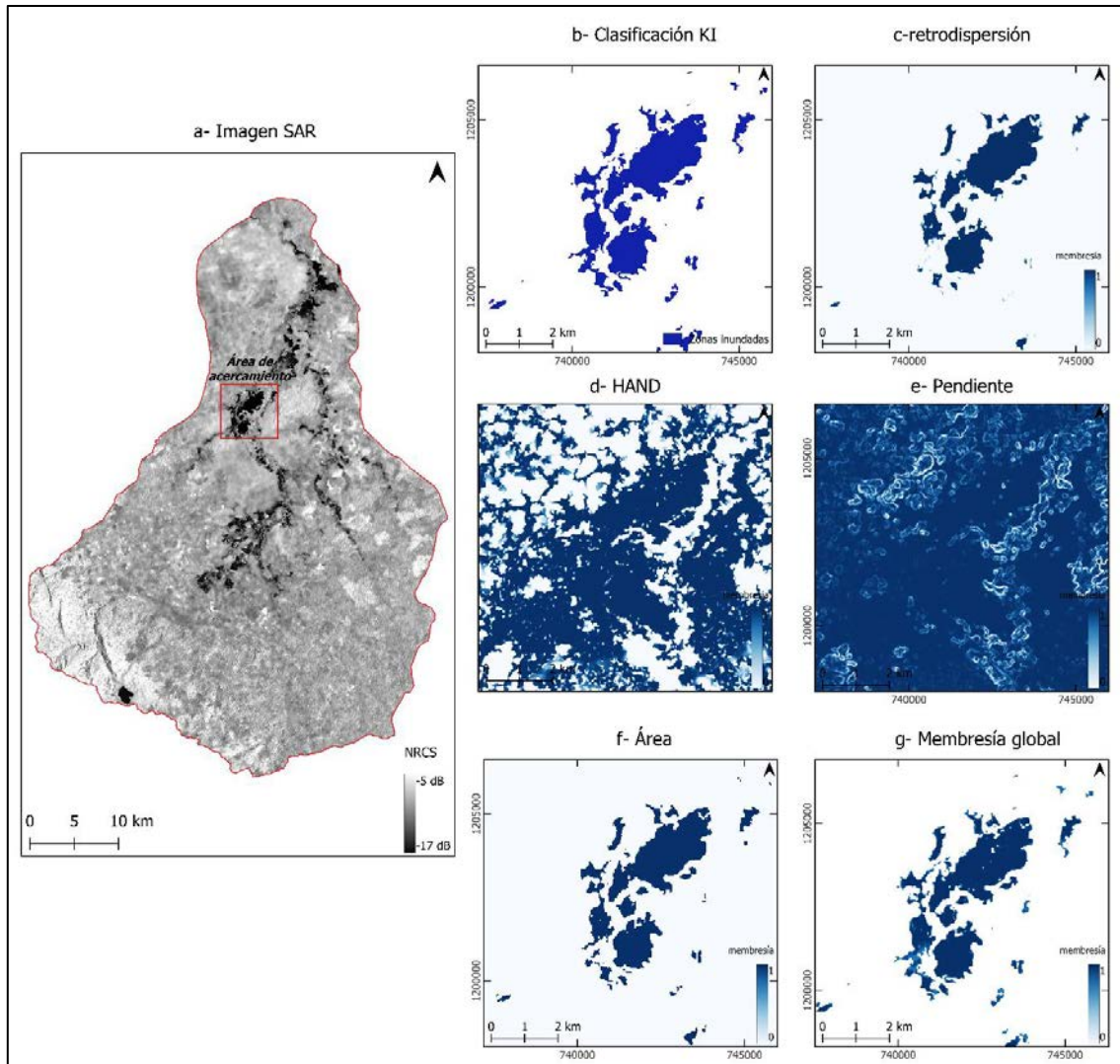


Figura 1.12. Conjuntos difusos para refinamiento de resultados de zonas inundadas obtenidas con el algoritmo KI. a- Imagen SAR de referencia para el 22-12-2016, polarización VV, órbita descendente. b- clasificación de zonas inundadas por algoritmo KI de la imagen de referencia. c- conjunto difuso de retrodispersión. d- conjunto difuso de índice HAND. e- conjunto difuso de pendiente. f- conjunto difuso de área. g- membresía global. Fuente: Elaboración propia a partir de imagen Sentinel-1.

Validación de resultados

La validación de los resultados de zonas inundadas se llevó a cabo mediante el uso de imágenes satelitales ópticas del sensor Sentinel-2. La presencia de nubosidad constante en la

CHRF dificultó la obtención de imágenes adecuadas de toda la cuenca, por lo que se procedió a utilizar sectores de imagen. Esto donde fuera posible observar coberturas de inundación. Lo anterior, es común es una práctica común para validar zonas inundadas con imágenes SAR (Clement et al., 2017; Conde & De Mata Muñoz, 2019; Liang & Liu, 2020; Qiu et al., 2021; Twele et al., 2016).

A lo anterior, se debe agregar que las imágenes ópticas tienen mayor potencial en la detección de cuerpos de agua o en su defecto coberturas inundadas que las imágenes SAR, siempre y cuando existan las condiciones de observación (Notti et al., 2018). Por lo que son una fuente de referencia adecuada para ejecutar el proceso de validación, acorde a los criterios propuestos por Olofsson et al., (2014) para evaluar precisión en usos de la tierra con datos satelitales.

Las imágenes Sentinel-2 seleccionadas para validar tienen una alta correspondencia temporal con las imágenes SAR (máximo 3 días). Dado que la separación temporal influye directamente en la presencia y dimensiones de las zonas de inundación.

Para discriminar las zonas inundadas se utilizó un umbral a partir del índice modificado de agua de diferencia normalizada (MNDWI por sus siglas en ingles), acorde a lo propuesto por Du et al., (2016). Este es un índice adecuado para discriminar coberturas inundadas y no inundadas. Ya que como menciona Du et al., (2016) las masas de agua presentan una mayor capacidad de absorción en la banda SWIR que en la banda Infrarroja cercana (NIR por sus

siglas en ingles). Diversas investigaciones utilizan este índice para validar inundaciones (Cao et al., 2019; Clement et al., 2017)

$$MNDWI_{Sentinel-2} = \frac{\rho_{verde} - \rho_{SWIR}}{\rho_{verde} + \rho_{SWIR}} \quad (14)$$

Donde:

ρ_{verde} : Banda espectral Verde

ρ_{SWIR} : Banda espectral Infrarrojo de onda corta

En total se realizaron 4 momentos de validación, para cada uno de estos se procedió a crear una matriz de confusión que permitiera mostrar numéricamente la precisión de la clasificación de zonas inundadas. Con la matriz de confusión se generó los siguientes indicadores: *Precisión general o global (PG)*, que se refiere a la proporción del mapa correctamente clasificado. *Precisión del Usuario (PU)*, vinculada a la probabilidad de que un píxel etiquetado como inundado en la clasificación corresponda a un píxel inundado en los datos de referencia. *Precisión del Productor (PP)*, asociado a la probabilidad de que un píxel etiquetado como inundado en los datos de referencia sea clasificado como inundado en los datos de clasificación También se estimó la índice concordancia kappa (k). Estos indicadores son comúnmente utilizados en la validación de estimación de áreas de inundación con imágenes SAR (Liang & Liu, 2020; Martinis, Kersten, et al., 2015; Twele et al., 2016; Meimei Zhang et al., 2020).

CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN GENERAL DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA RÍO FRÍO

Introducción

El Marco de sistemas socio-ecológico (SESF por sus siglas en inglés) se diseñó para identificar los elementos básicos de funcionamiento y relaciones críticas, que son de especial interés al estudiar un sistema socio-ecológico (SES) (McGinnis & Ostrom, 2014). El uso del SESF, ha sido empleado en múltiples ocasiones para el estudio de problemas de acción colectiva, asociados con el manejo de recursos naturales de uso común (Bolognesi et al., 2018; Nagendra & Ostrom, 2014; Partelow & Winkler, 2016). También, se ha utilizado para la caracterización de sistemas socio-ecológicos, dada la funcionalidad y estructura de este marco (Delgado-Serrano & Ramos, 2015).

La caracterización de cuencas hidrográficas en condiciones de complejidad, requiere marcos analíticos capaces de abordar múltiples escalas y dimensiones de problemas medioambientales (Cabello et al., 2015). Sin embargo, emplear el SESF para la caracterización de cuencas hidrográficas es poco frecuente (Cabello et al., 2015; Espinoza-Cisneros, 2018). A pesar de que estas integran procesos biofísicos y sociales (Espinoza-Cisneros, 2018; Flotemersch et al., 2015).

Para la caracterización general de la CHRF se utilizó el SESF propuesto por Ostrom, (2009). Este marco conceptual cuenta con una serie de subsistemas o variables de primer nivel, a su vez, estos subsistemas poseen un conjunto de variables de segundo y tercer nivel (Nagendra & Ostrom, 2014). Que permitieron comprender de forma general las dinámicas sociales,

históricas y ecológicas de la cuenca. Esto en una cuenca con interrelaciones complejas entre los sistemas sociales y ecológicos, que han desencadenado un escenario de degradación de los recursos naturales, presiones intensas de cambios de uso de la tierra, expansión no controlada de monocultivos y de ganadería, entre otras.

Variables del SES utilizadas

Como se mencionó en el apartado metodológico, no todas las variables que componen los diversos subsistemas del marco SES son necesarias para su aplicación (Céspedes Rivera, 2020; Espinoza-Cisneros, 2018; Nagendra & Ostrom, 2014). Para este trabajo solo se tomaron en cuenta aquellas que se consideraron importantes para describir la dinámica social, ecológica e histórica de la CHRF en el marco de las dinámicas asociadas a la recurrencia, extensión e impacto de inundaciones.

La Selección de las variables se llevó a cabo a partir de las entrevistas a actores claves y la revisión de documentación. En total se realizaron siete entrevistas, por medios virtuales. Entre los entrevistados se encuentran: funcionario del Refugio Nacional de Vida Silvestre Mixto Caño Negro, funcionarios de Asadas locales, miembros de la asociación de desarrollo de Caño Negro, funcionario de la municipalidad de Los Chiles y sociedad civil. Es importante detallar las dificultades logísticas para llevar a cabo trabajo de campo, dado el contexto de emergencia sanitaria por Covid-19, lo cual dificultó la obtención de mayor cantidad de información de actores de la cuenca.

Se seleccionaron un total de 6 variables de segundo nivel del Sistema Recurso (RS), 4 de Unidad Recurso (RU), 5 de Sistema de Gobernanza (GS), 4 de Actores (A), 3 de Situaciones de acción interacción y resultados (I) y 2 de Ecosistemas relacionados (ECO). En el Cuadro 2.1 se detalla cada una de estas.

Cuadro 2.1. Variables de segundo nivel del marco SES utilizadas y su justificación de uso.

| Código de la variable | Nombre de la variable | Justificación de uso |
|------------------------------------|--|--|
| Sistema Recurso (RS) | | |
| RS2 | Claridad de los límites del Sistema | La CHRF posee límites bien definidos, que responden a las características geomorfológicas y topográficas, que a su vez condicionan la dinámica hidrológica. |
| RS3 | Tamaño del sistema | La CHRF posee un tamaño bien definido, no obstante, la gestión de esta no responde a los límites de este. En el que existen otros límites como los cantonales. |
| RS4 | Infraestructura | Existe una serie de infraestructura clave, que ha moldeado las dinámicas en la CHRF. Entre las que destaca la red vial, construida a partir de 1970 |
| RS6 | Propiedades de equilibrio | Se identificaron una serie de dinámicas que han tenido un impacto en la preservación y detrimento de los ecosistemas en la CHRF. |
| RS8 | Evidencia de eventos históricos | Se identificaron una serie de eventos históricos con un impacto directo en los recursos naturales de la CHRF. |
| RS9 | Ubicación geográfica | Asociado a RS2 y RS1. |
| Unidades Recurso (RU) | | |
| RU3 | Interacción entre unidades de recursos | Se consideró específicamente para los ecosistemas de humedal de la CHRF. Estos se complementan con otros recursos como el recurso hídrico. |
| RU4 | Valor del recurso | Se consideró específicamente para los ecosistemas de humedal. Estos tienen gran importancia ecológica, también brindan una serie de servicios ecosistémicos claves a las poblaciones humanas de la CHRF. |
| RU6 | Características distintivas | Se consideró específicamente para los ecosistemas de humedal CHRF, al tratarse de un sitio RAMSAR. |
| RU7 | Distribución espacial y temporal | Disminución de la distribución espaciotemporal de los ecosistemas de bosque y de humedal en la CHRF. La cual se destaca en documentación y en las entrevistas. |
| Sistemas de Gobernanza (GS) | | |
| GS1 | Organizaciones gubernamentales | Se identificaron instituciones gubernamentales con incidencia tanto en la actualidad como en el pasado que han generado incentivos económicos para procesos de deforestación, expansión de monocultivos, como el INDER, MAG, INTA, ITCO, entre otras. En contrapartida se identifican en la CHRF instituciones como el SINAC que velan por la conservación de ecosistemas claves como los ecosistemas de humedal y bosque. |
| GS2 | Organizaciones no gubernamentales | Se identificaron una serie de ONG que brindan apoyo logístico y financiero en proyectos de gestión del recurso hídrico, monitoreo ambiental, educación ambiental, entre otras. |

| | | |
|---|---|---|
| GS3 | Estructura de la red | Se identificaron proyectos con participación de instituciones gubernamentales, no gubernamentales, asadas, asociaciones de desarrollo, sociedad civil, entre otros. Se destaca la mesa de coordinación local del Corredor Biológico Ruta Los Maleku (CBRM) |
| GS4 | Sistemas de derechos de propiedad | Se identificó inseguridad jurídica en los derechos de propiedad en el RNVS Caño Negro, lo cual dificulta la gestión del SINAC en la salvaguarda de los diversos objetos de conservación. |
| GS7 | Reglas constitucionales | Se considera una variable de interés por la presencia de planes de manejo de las ASP, en la cuenca no existen planes de ordenamiento territorial. |
| Actores (A) | | |
| A1 | Número de actores relevantes | Se identificaron una serie de actores relevantes particularmente sobre la degradación y conservación de los recursos naturales de la CHRF. Se destaca el sector agropecuario, sector turismo, asadas, municipalidades, instituciones gubernamentales como el SINAC, MAG e INDER, entre otros. |
| A2 | Atributos socioeconómicos de los usuarios | Los cantones que integran la CHRF están entre los cantones con menor índice de desarrollo humana (IDH) del país, también destaca entre los de menor escolarización, acceso a servicios esenciales, entre otros. |
| A7 | Conocimiento del SES | Los entrevistados reconocen la degradación de los recursos naturales, especialmente de los bosques y los humedales. Producto de procesos intensivos de deforestación, expansión de ganadería y agricultura, así como malas prácticas de producción agrícola. |
| A8 | Importancia del recurso (dependencia) | Existe una dependencia sobre una serie de recursos de la CHRF, principalmente asociados a los servicios ecosistémicos que ofrecen los humedales, aunque se pueden identificar otros. |
| Escenario Social, Económico y Político (S) | | |
| S1 | Desarrollo económico | El desarrollo económico de la CHRF está asociado a actividades agropecuarias, incentivada desde las políticas económicas del país, herencia de I ITCO y el INTA. En la CHRF existe una dependencia económica hacia el sector primario y se caracteriza por un bajo valor agregado. |
| S2 | Tendencia demográfica | Las políticas económicas del país durante la década de los 70s y 80s del siglo XX propiciaron migraciones interregionales, incrementando la población exponencialmente en la CHRF. |
| S4 | Política de gobernanza de recursos | Se identificaron una serie de leyes y políticas económicas que generan incentivos de degradación de ecosistemas de bosques y humedales. De igual forma, se reconocen otras que favorecen la conservación de estos (Ley Forestal 7575, Política Nacional de Humedales, entre otras). |
| Situaciones de acción interacción y resultados (I) | | |
| I2 | Intercambios de información | Existen iniciativas de la coordinación de diversos actores como SINAC, Asadas, asociaciones de desarrollo, municipalidades, entre otros. Que incluyen actividades de |

| | | |
|---------------------------------------|-------------------------------------|---|
| | | educación ambiental, proyectos de reforestación de restauración de humedales, monitoreo de calidad del recurso hídrico, entre otras. |
| I8 | Actividades de redes e intercambios | Asociado a I2 |
| I9 | Actividades de monitoreo | Asociado a I2 |
| Ecosistemas relacionados (ECO) | | |
| ECO1 | Patrones climáticos | Las características climáticas de la CHRF permiten entender la frecuencia de eventos hidrometeorológicos extremos. De igual forma, la cuenca es susceptible a los efectos del cambio climático. |
| ECO2 | Patrones de contaminación | Se identificó como el uso intensivo de agroquímicos está contaminando el recurso hídrico de la CHRF, de igual forma, la integridad de los ecosistemas de humedal y los múltiples servicios ecosistémicos que ofrecen. |

Fuente: Elaboración propia a partir de (Ostrom, 2009)

Descripción y análisis de variables

La CHRF se ubica en la Zona Norte de Costa Rica y sur de Nicaragua (ver Figura 1.1), cuyos límites naturales están dados por sus características geomorfológicas y topográficas (variables RS2 y RS9). La cuenca tiene un área aproximada de 1,718 km² (RS4), con una altitud máxima aproximada de 1,732 msnm en el volcán Tenorio y una mínima aproximada de 30 msnm, en la desembocadura del Río Frío con el lago de Nicaragua. El área de la CHRF equivale aproximadamente al 3,3% del área continental de Costa Rica.

La cuenca se caracteriza por un régimen climático principalmente del Caribe, así como influencia del lago de Nicaragua (Coloma et al., 2009). Se registra una precipitación media anual de 2,127 mm, con un periodo de lluvias más intenso entre mayo y diciembre, así como un periodo más seco entre enero y abril (Acevedo, 2012) (ECO1). Las características topográficas de la cuenca, con relieves montañosos y accidentados en la parte alta, extensas llanuras en la cuenca baja, sumado a factores climáticos, favorecen contrastes importantes en las lluvias (J. Solano & Villalobos, 2012). Esto se demuestra en las Figuras 1.6 y Figura 3.6, en el que se aprecia como los acumulados de lluvia suelen ser superiores en la parte alta de la cuenca en comparación con cuenca alta.

La combinación de diversas características; climáticas, edáficas y geomorfológicas, permiten entender la presencia de diversos ecosistemas en la cuenca, entre los que destacan el bosque tropical lluvioso y tropical nuboso en cuenca alta, mientras que en cuenca baja es posible identificar bosque tropical lluvioso, bosques de palmas, así como grandes extensiones de

ecosistemas de humedal (Acevedo, 2012), específicamente humedales palustres y lacustres, con vegetación herbácea, arbustivos y arbórea (SINAC-PNUD-GEF, 2018).

En la CHRF es posible encontrar una gran diversidad biológica, con registros de 1,016 especies de flora, así como 5,000 especies de fauna, lo que representa aproximadamente el 5,36% de la biodiversidad del país (Coloma et al., 2009). Entre estas especies destacan el pez Gaspar (*Atractosteus tropicus*), Sábalo real (*Megalops atlanticus*), Guapote (*Parachromis sp.*), Jabirú (*Jabiru mycteria*), arroz silvestre (*Oryza glauapatula* y *O. grandiglumis*), entre otras (SINAC ACAHN, 2013). La permanencia de estas especies depende en gran medida de la estabilidad de los ecosistemas de la cuenca, en especial los humedales, recurso hídrico y los bosques (RU3 y RU4). Este aspecto se retomará más adelante.

En el pasado reciente de la CHRF, es posible identificar una serie de procesos que han generado impactos negativos sobre los recursos naturales (RS8). Uno de ellos es la poca presencia estatal en la cuenca previo a 1970. Para estas fechas no existían vías de comunicación terrestres con otros centros como Ciudad Quesada o con el centro del país (Coloma et al., 2009). De ahí que las mayores relaciones socioeconómicas en la CHRF eran con Nicaragua, aprovechando la navegabilidad del Río Frío (Coloma et al., 2009; G. Quesada, 2020).

Posterior a la década de los 70, el Estado costarricense inicia una aceleración en la incorporación en la economía nacional de la Zona Norte, promoviendo la construcción de vías de comunicación (RS4), actividades agrícolas y de extracción maderera (Faure et al.,

2005), que a su vez significó un incremento de la población en la región de la CHRF (Coloma et al., 2009) (S2).

Además, durante este periodo estaba en marcha la Ley 2825 (S4), que dio origen al Instituto de Tierras y Colonización (ITCO). Este tenía el objetivo de procurar una justa distribución de la tierra, así como apoyar la producción y mejorar la calidad de vida de los trabajadores, otorgándoles tierras vírgenes para producción (FAO & Inder, n.d.; Seligson, 1978).

Para inicios de la década de los 80, el país atravesaba una severa crisis económica, donde la moneda llegó a devaluarse un 600% entre 1980 y 1982 (Villasuso, 2000). Como respuesta, el país, con apoyo financiero del Fondo Monetario Internacional (FMI), inició una etapa de reestructuración de su política económica (S1 y S4) (Fernández Alvarado & Granados Carvajal, 2000; Villasuso, 2000). Esta reestructuración incluía una serie de reformas al sector agropecuario, con el objetivo de incentivar las exportaciones de cultivos no tradicionales (piña, naranja, yuca, entre otros) (Fernández Alvarado & Granados Carvajal, 2000).

En la Zona Norte, estos incentivos provocaron la expansión de cultivos a gran escala como; la naranja, arroz, piña, palmito y yuca, a lo que se debe agregar los ya establecidos cultivos de caña y banano (Faure et al., 2005). Coloma et al., (2009) detallan que estos procesos dieron como resultado una intensificación de la deforestación en la cuenca, reduciendo significativamente la cobertura forestal. Esto se constata en lo mencionado por Acevedo, (2012) quien referencia una pérdida de bosque aproximada a 3,278 ha entre 1987 y 2001 (RU7).

En el pasado, el Estado también ha gestionado procesos con el objetivo de salvaguardar recursos naturales y los servicios ecosistémicos que estos ofrecen en la CHRF. Entre estos destaca la creación de Áreas Silvestres Protegidas (ASP), bajo la responsabilidad actual del Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC). En la cuenca se encuentran tres ASP: El Parque Nacional Volcán Tenorio (PNVT), Zona Protectora Tenorio (ZPT) y el Refugio Nacional de Vida Silvestre Mixto Caño Negro (RNVSM Caño Negro).

Las dos primeras se ubican en la cuenca alta y tuvieron su origen en 1955, cuando se declaró parque nacional los 2 kilómetros alrededor de los cráteres de los volcanes del país. Posterior, en febrero de 1976, se declara la Reserva Forestal Cordillera Volcánica Guanacaste, que incluía los volcanes Orosí, Miravalles y Tenorio (SINAC, 2013). En 1991, se crea formalmente la ZPT, y, en 1995 mediante el decreto No.24290- MIRENEM el PNVT.

Dentro de los objetivos de conservación del Plan de Manejo del PNVT y ZPT está la protección de los bosques, dada su importancia en el mantenimiento de procesos ecológicos, en el almacenamiento y captura de CO₂, estabilidad de laderas, hábitat de diversas especies tanto de flora como de fauna, disminución de la erosión del suelo y almacenamiento del recurso hídrico (SINAC, 2013) (RU4).

En cuenca baja se encuentra el RNVSM Caño Negro, creado en 1984 bajo el decreto No. 15120-MAG, con una extensión de 9,969 ha. Los objetos de conservación definidos en el plan de manejo de esta ASP son el pez gaspar, el recurso hídrico, el caimán, el jabirú, yolillales, humedales, entre otros. El refugio alberga una amplia extensión de humedales,

asociados a un sistema lagunar asentados sobre mantos acuíferos (SINAC-PNUD-GEF, 2018; SINAC ACAHN, 2013).

Los humedales ubicados en el RNVSM Caño Negro, obtuvieron la categoría de sitio RAMSAR en 1991, debido a su importancia ecológica (SINAC, 2017) (RU6). Este humedal, junto al de Palo Verde, fueron los primeros sitios en Costa Rica con esta categoría. La designación de un sitio RAMSAR implica el compromiso de los países a adoptar una serie de medidas para velar por su conservación (RAMSAR, 2014). Sobre esto, el país se ha caracterizado por un marco jurídico robusto en políticas ambientales (ONU, 2019), en el que destaca la Ley Orgánica del Ambiente (Ley 7554) de 1995, la Ley Forestal (Ley 7575) de 1996, que dio origen al Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO), Ley de la Biodiversidad (Ley 7788) de 1998, que permitió la creación del Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC), entre otras (GS7).

El país también cuenta con la Política Nacional de Humedales 2017-2030, mientras que para el área de estudio, existe el Plan de Gestión Local, Sitio Ramsar Refugio Nacional de Vida Silvestre Caño Negro, 2018-2022 (SINAC, 2017) (S4). Lo expuesto anteriormente, permite constatar lo mencionado por Chacón Araya, (2017), quien destaca que a pesar de que Costa Rica ha conseguido importantes logros ambientales, también favorece un uso inadecuado de sus recursos naturales, donde la CHRf es un buen reflejo de este fenómeno.

En la CHRf es posible identificar como esta serie de decisiones políticas, diseñadas generalmente desde sistemas de gobernanza superiores, tienen un rol importante en cómo se

han configurado las relaciones entre los sistemas sociales y ecológicos. Esto concuerda con lo mencionado por Cabello et al., (2015) en un estudio similar en otro contexto. Lo anterior, ha dado como resultado un escenario complejo y dinámico en la cuenca, donde las presiones de cambio de uso de la tierra son la principal amenaza y fuente de degradación de sus ecosistemas (Acevedo, 2012; Coloma et al., 2009; ProDUS, 2015; Sotela & Murrillo, 2016).

Los actores entrevistados coinciden en que el estado de los recursos naturales de la cuenca se ha degradado durante los últimos años (ver Figura 2.1 b) (A7). Estos reconocen, que recursos naturales como el agua, los bosques, los humedales, el suelo y la vida silvestre, poseen un nivel de amenaza de degradación alto a muy alto (ver Figura 2.1, e). De igual forma, destacan que la deforestación, la agricultura de monocultivos y la ganadería son las actividades que más favorecen la degradación de los recursos naturales (ver Figura 2.1 d).

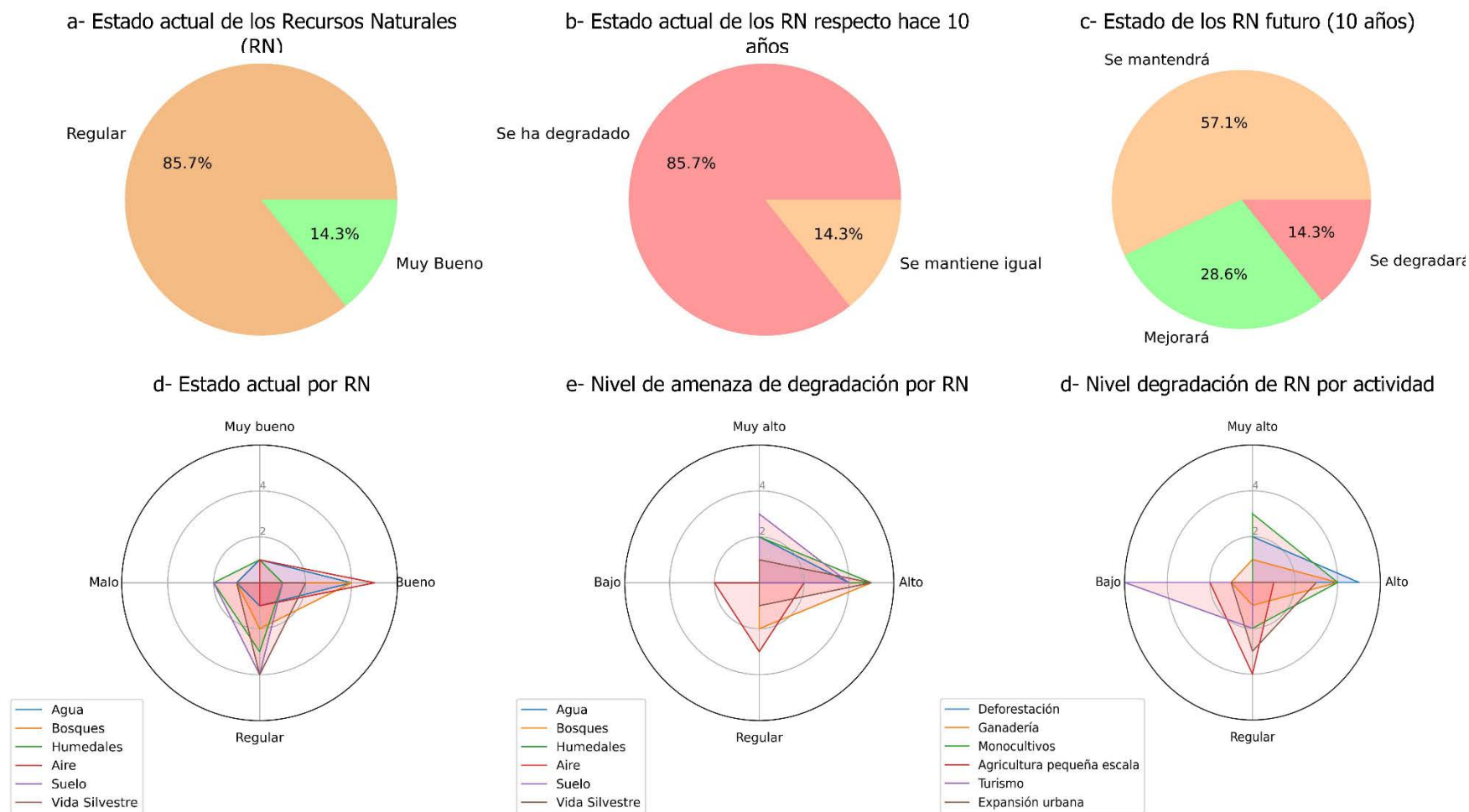


Figura 2.1. Perspectiva de los actores entrevistados sobre el estado de los recursos naturales de la CHR. a- Estado actual de los recursos naturales. b- Estado actual de los recursos naturales respecto hace 10 años. c- Estado futuro de los recursos naturales (la pregunta se realizó en una proyección de 10 años). d- Estado actual por recurso natural. e- Nivel de amenaza de degradación por recurso natural. f- Nivel de degradación de los recursos naturales por actividad socioeconómica. Fuente: Elaboración propia a partir de las entrevistas a actores claves.

Sobre lo anterior, es importante resaltar que el principal motor económico de la cuenca está asociado a las actividades agropecuarias (Sotela & Murrillo, 2016), lo que responde a los incentivos de las instituciones gubernamentales previamente mencionados, sumado a una serie de atributos socioeconómicos de los actores de la cuenca (A2).

El primer atributo para detallar es el índice de desarrollo humano (IDH), indicador creado por el Programa de la Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), que toma en cuenta factores sanitarios, educativos y económicos. Los cantones que componen la cuenca, Guatuso, Los Chiles y una pequeña parte de Upala, se encuentran en las posiciones más bajas en este indicador a nivel nacional, en las posiciones 73,79 y 72 respectivamente (PNUD, 2022b). En este es posible apreciar una brecha importante con los cantones mejor posicionados del país, como se refleja en la Figura 2.2 (a).

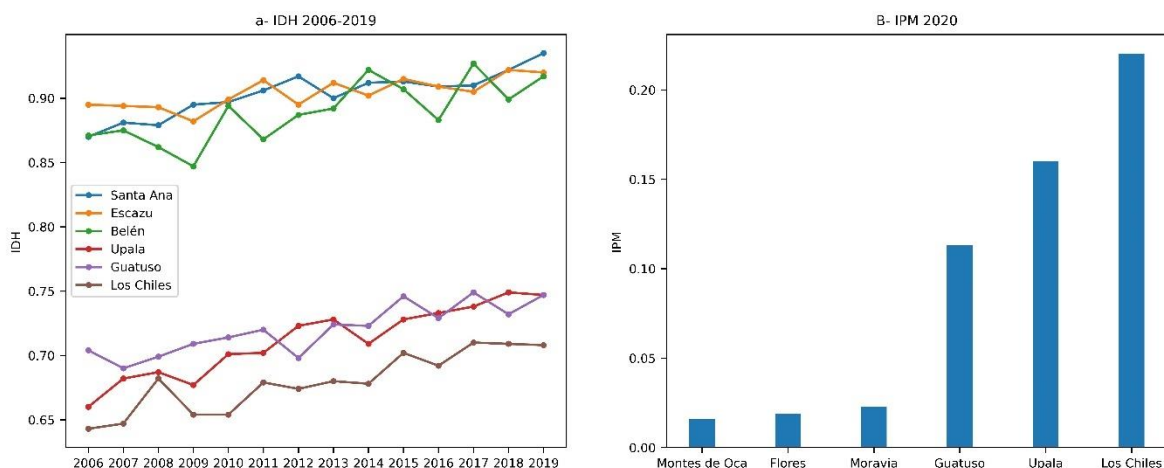


Figura 2.2. Indicadores sociales de los cantones de la CHRF. a-IDH para los cantones de la cuenca y los tres primeros cantones a nivel nacional. b- IPM para los cantones de la cuenca y los tres primeros cantones a nivel nacional. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del PNUD Atlas de Desarrollo Humano cantonal 2021.

Otro indicador para considerar es el índice de pobreza multidimensional (IPM), que refleja los desafíos de los cantones según su nivel de acceso a servicios y a condiciones que garantizan el bienestar de la familias (PNUD, 2022a). En este, al igual que con el IDH, los cantones de la CHRF se encuentran en las posiciones más desfavorecedoras (ver Figura 2.2 b). Lo anterior, se complementa con lo descrito por Arias Ramírez & Sánchez Hernández, (2012), quienes destacan los cantones de la cuenca entre los que poseen menor nivel de instrucción, mayores porcentajes de población analfabeta (Los Chiles, el de mayor a nivel nacional) y menor acceso a tecnología, según datos del censo poblacional de 2011.

Lo anterior permite entender el porcentaje de población dedicada a actividades primarias (54,7% en Los Chiles y 49,4% en Guatuso), que se destacan entre las más altas del país (Arias Ramírez & Sánchez Hernández, 2012). A su vez, esto está asociado a un bajo valor agregado de las actividades económicas, que de igual manera, se encuentran entre las más bajas a nivel nacional (Estado de la Nación, 2021) (S1).

El sector primario también se ha visto estimulado por la demanda internacional de productos agrícolas no tradicionales, como la piña (Coloma et al., 2009), situación que ha generado una expansión no contralada de este monocultivo en diversas zonas del país (Maglianesi Sandoz, 2013). Se debe resaltar que Costa Rica es el principal exportador a nivel mundial de este producto (PROCOMER, 2021), generando ingresos crecientes año a año (CANAPEP, 2022). No obstante, el Estado de la Nación, (2021) destaca que esta actividad económica que

representa el 0,41% del PIB nacional, no genera encadenamientos productivos ni multiplican el empleo.

Referido a este cultivo, uno de los entrevistados menciona: *“Procesos como la deforestación acelerada y la expansión de cultivos como la piña están dañando las condiciones ambientales de la cuenca y contaminando principalmente el agua”* (A. Alvarado, comunicación personal 28 de octubre 2021) (A7). A su vez, también destacan que la falta de instrumentos de ordenamiento territorial potencia estos fenómenos. Es importante mencionar que, en los cantones de Guatuso, Los Chiles y Upala, no existen planes de ordenamiento territorial, tampoco se registran instrumentos similares a escala cuenca (GS7).

Los entrevistados destacan una preocupación reciente de las comunidades sobre las condiciones ambientales de la CHRF, que surgen de la afectación notoria de una serie de recursos naturales y los servicios ecosistémicos que estos ofrecen (A7). Entre las principales preocupaciones de los entrevistados está la deforestación, sedimentación del Río Frío y humedales, drenaje y contaminación de humedales. Estas se detallan a continuación:

Deforestación

Esta actividad ha sido mencionada en reiteradas ocasiones previamente. Su principal objetivo es reemplazar las coberturas boscosas por usos agropecuarios (ver Figura 2.3), principalmente ganadería y piña. Los actores entrevistados reconocen esfuerzos para mitigar el impacto de esta actividad, como campañas de reforestación, que en su mayoría son

encabezadas por las Asadas locales, en colaboración de SINAC y ONGs (PNUD, Cooperación Alemana, FUNBAM, entre otras) (GS2 y I8).



Figura 2.3. Evidencias de deforestación en cuenca alta de la CHRF. La imagen muestra altas pendientes cubiertas por pastos para ganadería, en el que también se aprecia parches de bosque. Fuente: Elaboración propia.

Ligado a lo anterior, se debe reconocer el Corredor Biológico Ruta Los Maleku (CBRM), oficializado en 2006 por el Programa de Corredores Biológicos de SINAC. El CBRM cuenta con un Comité Local de Gestión. El comité está integrado por diversos actores como Asadas, Municipalidad de los Chiles, integrantes del sector productivo, asociaciones de mujeres, entre otros. A su vez, los actores entrevistados expresaron que la existencia de este corredor

biológico ha significado un canal de comunicación adecuado para la coordinación de actividades de intercambio e información y educación ambiental de diversas comunidades (I2, I8). No obstante, reconocen que la participación de las comunidades sigue siendo baja.

También, los actores entrevistados reconocen que el control y monitoreo de la deforestación es complejo, especialmente porque no existen incentivos económicos que insten a la conservación de los bosques y humedales (I9 y A8). Sobre esto, uno de ellos detalla: “*Ante la falta de ingresos económicos los recursos naturales se vuelven la fuente de ingreso. De forma ilegal en muchos casos*” (L. Sancho, comunicación personal 29 de octubre de 2021).

En el caso de las ASP, la falta de personal y de equipo adecuado, es una de las principales limitantes para el control y monitoreo de la deforestación, así como de otras amenazas que están contempladas dentro de los Planes de Manejo de estas (I9). Esto es un problema que no se delimita a la CHRF, ya que como se menciona en Madriz, (2021) el SINAC tiene un faltante de al menos 500 guardaparques a nivel nacional. A lo anterior, se debe agregar que el RVSM Caño Negro, por su categoría de manejo, la propiedad de los terrenos es compartida entre el Estado (56%) y propietarios privados (44%) (SINAC ACAHN, 2013) (GS4).

Sobre los derechos de propiedad (GS4) en el RVSM Caño Negro, un estudio del INBio, (2009) resalta una serie de aspectos: 1- Más de la mitad de la mitad de la superficie catastrada dentro del ASP se encuentra sin inscribir y la existente en muchos casos tiene errores en la medición. 2- No existe claridad en lo que respecta a datos e información relacionada a planos o registros de propiedad, sobre todo de grandes fincas provenientes del Instituto de Desarrollo

Agrario (IDA) o desde antes con el Instituto de Tierras y Colonización (ITCO), en el que estas fincas se desarrollaron planos, pero no llegaron a registrarse como propiedades legales.

3- No existe claridad en los límites de las zonas del RNVS Caño Negro, por tanto, no hay manejo efectivo de los recursos dentro del área de protección.

Sedimentación del Río Frío y Humedales

La deforestación en la CHRF ha provocado un incremento de la erosión, especialmente en cuenca alta, debido a las altas pendientes (Coloma et al., 2009). Estos materiales son transportados por los canales fluviales y depositados en cuenca baja, esto en los márgenes del Río Frío y de los sistemas de humedales (ver Figura 2.4) (RS6).



Figura 2.4. Evidencias de sedimentación en la CHRF. En la imagen se muestra un afluente del Río Frío, en el que se aprecia un caudal turbio con cargas de sedimentos. Fuente: Elaboración propia.

Acevedo, (2012) referencia un estudio de hidrodinámica del RNVSM Caño Negro, realizado por SETECOOP en 2010, el cual menciona que este sistema recibe volúmenes de sedimentos de 80,000 toneladas anuales. Un estudio anterior de Brenes et al., (2001) ya reflejaba la degradación de los humedales en Caño Negro producto de la sedimentación. Asociado a esto, unos de los entrevistados destacan que: *“Hace 15 años habían más humedales activos, pero el uso indebido de las fincas donde existían humedales, para la agricultura y ganadería han hecho que estos mismos hayan bajado a un grado mayor”* (A. Alvarado, comunicación personal 28 de octubre 2021).

Por su parte, Corte, (2018) destaca una serie de sistemas lagunares que han sido altamente degradados en la CHRF, como lo son; la laguna Las Leonas, los llanos de Samen y los Zanjos. La degradación de los humedales y del Río Frío genera una serie de afectaciones como la pérdida de navegabilidad, disminución de espejos de agua, pérdida de biodiversidad, menor regulación ante eventos hidrometeorológicos, entre otros (RS6 y RS8).

La navegabilidad es una actividad primordial para el sector turístico de la cuenca (A1 y A8). Ya que, en la zona, es común viajes en botes para recorrer el Río Frío y las Lagunas de Caño Negro. Estos tienen el objetivo de mostrar la biodiversidad del lugar, que incluye: aves como el Jaribu, caimanes, pez gaspar, entre otras.

Por otra parte, la sedimentación implica una disminución de los espejos de agua en los principales sistemas lacustres de Caño Negro (SINAC-PNUD-GEF, 2018). Por tanto, genera

afectaciones para diversas especies tanto vegetales como de fauna que habitan estos ecosistemas. Entre estas destaca el pez gaspar, considerado como fósil, dado que sus parientes cercanos se extinguieron hace millones de años (SINAC, 2017; SINAC ACAHN, 2013) (RU4 y RU6).

De igual forma, la reducción de los espejos de agua, supone una reducción de la disponibilidad del recurso hídrico para consumo de las poblaciones, así como el aporte de agua a los mantos acuíferos (Acevedo, 2012; Coloma et al., 2009; ProDUS, 2015) (RU4). Por otro lado, la pérdida de humedales también supone un impacto sobre los servicios ecosistémicos asociados a la mitigación de los impactos de fenómenos hidrometeorológicos extremos, como las inundaciones y las sequías (RS6). Este aspecto se retomará más adelante.

Drenaje y contaminación de humedales

Una práctica frecuente en la CHRf y que es reconocida en diversas noticias y documentación es el drenaje de ecosistemas de humedal, esto con el objetivo adaptar el terreno para actividades agropecuarias (ganadería y piña principalmente) (Brenes et al., 2001; Corte, 2018; SINAC, 2017) (RS8). SINAC-PNUD-GEF, (2018) destaca que esto sucede con mayor intensidad en dirección Sur del RNVSM Caño Negro. De igual forma, este documento hace referencia a que, durante el periodo seco, los ganaderos de la zona trasladan los animales a diversos sectores del ASP, aprovechando que estos sitios conservan mayor humedad.

Es importante destacar, que si bien, una gran parte de los ecosistemas de humedal se encuentran dentro los límites del RNVSM Caño Negro, también es posible encontrar

humedales fuera de estos. Si bien, no se encontraron estudios que detallen este aspecto, es posible inferir que estos se encuentran bajo una presión de cambio de uso y degradación mayor que los del ASP.

El establecimiento de actividades intensivas como el cultivo de piña suelen estar asociadas al uso intensivo de agroquímicos. En el caso de la CHRF, estudios como el de Coloma et al., (2009) hacían referencia a la presencia de nitratos en las aguas superficiales y subterráneas de la cuenca, asociados a actividades agrícolas y mal manejo de residuos de los pobladores (ECO2). Recientemente, SINAC-PNUD-GEF, (2018) destaca que estudios de calidad del agua en ríos de la CHRF concluyen que existe contaminación por diversos plaguicidas, como ametryn, bromacil y diuron; insecticidas cipermetrina, diazinón, y ethoprophos. Estos ríos son afluentes del Río Frío, y también aportan al sistema de humedales de Caño Negro, lo cual compromete la salud ecológica de los humedales.

Los entrevistados, además, detallan que existe preocupación de las comunidades por la contaminación del recurso hídrico y del estado de los humedales en la cuenca. De ahí la promoción de diversas iniciativas, encabezadas principalmente por las Asadas, miembros del CBRM y SINAC, con el apoyo de ONGs, que incluyen monitoreo de la calidad del agua, campañas de educación ambiental y esfuerzos de restauración de humedales (I8 y I9). Un ejemplo de esto es el proyecto de restauración de una parte de la laguna de Caño Negro, el cual cuenta con el financiamiento de la Unión Europea y del Gobierno de Alemania. Este proyecto otorga incentivos económicos a los pobladores que colaboren en eliminar una

especie exótica “gamolote”, la cual crece en los bordes de las lagunas y en espacios abiertos de estas (Madriz, 2022).

Relación con la extensión, frecuencia e impacto de inundaciones

En la CHRF, los eventos hidrometeorológicos extremos son frecuentes y generan pérdidas económicas importantes (Flores et al., 2019), Para los cantones de Guatuso y Los Chiles, entre 1988 y el 2019 se han registrado un total de 19 eventos hidrometeorológicos (RS8), generando pérdidas superiores a los 97 millones USD (Flores et al., 2019).

Lo anterior coincide con lo mencionado por los entrevistados, quienes detallan que, en la cuenca, las sequías y las inundaciones son frecuentes y muy frecuentes, respectivamente (ver Figura 2.5 b). Esto refleja la importancia de los ecosistemas de bosques y principalmente de los humedales para la regulación de estos fenómenos. Un ejemplo de esto es, el papel de los humedales en Caño Negro para amortiguar el impacto de las inundaciones del huracán Otto (Umaña González, 2017) (RU4).

Sin embargo, como se ha mencionado previamente, estos ecosistemas están sometidos a intensas presiones de cambio de uso y de degradación. A lo que se debe agregar, los no contemplados hasta ahora, como los efectos del cambio climático (ECO1). Al respecto, MINAET, (2008) menciona que la CHRF es susceptible a sufrir una disminución de las precipitaciones, así como un aumento en la temperatura. El cambio climático, además de ser una amenaza extra a los ecosistemas, también implica el posible aumento de la frecuencia e

intensidad de los fenómenos hidrometeorológicos extremos, como lo resalta la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2022).

En el caso específico de las inundaciones, los actores entrevistados resaltan que la falta de instrumentos de ordenamiento territorial y de estrategias en gestión de riesgo han tenido una incidencia directa en la severidad de inundaciones en la cuenca (ver Figura 2.5 a), algo que está asociado a los procesos de deforestación y cambios de uso de la tierra sin control institucional. Esto es constatado por los entrevistados, quienes consideran que la deforestación es la actividad que más ha favorecido una mayor severidad de las inundaciones (ver Figura 2.5 c) (A7).

Esto resulta en un escenario complejo, en el que la sustitución de bosques y humedales por actividades agropecuarias no solo implica una pérdida en la capacidad de mitigar eventos de inundación extremos, sino una mayor área susceptible a sufrir daños como resultado de estas (RS6). Esto se refleja en pérdidas económicas asociadas principalmente con la infraestructura vial y el sector agropecuario (Flores et al., 2019), y concuerda con lo descrito en las entrevistas, donde se menciona que la infraestructura vial y las actividades ganaderas y de cultivos tienen un nivel de afectación alto y muy alto por inundaciones (ver Figura 2.5 d).

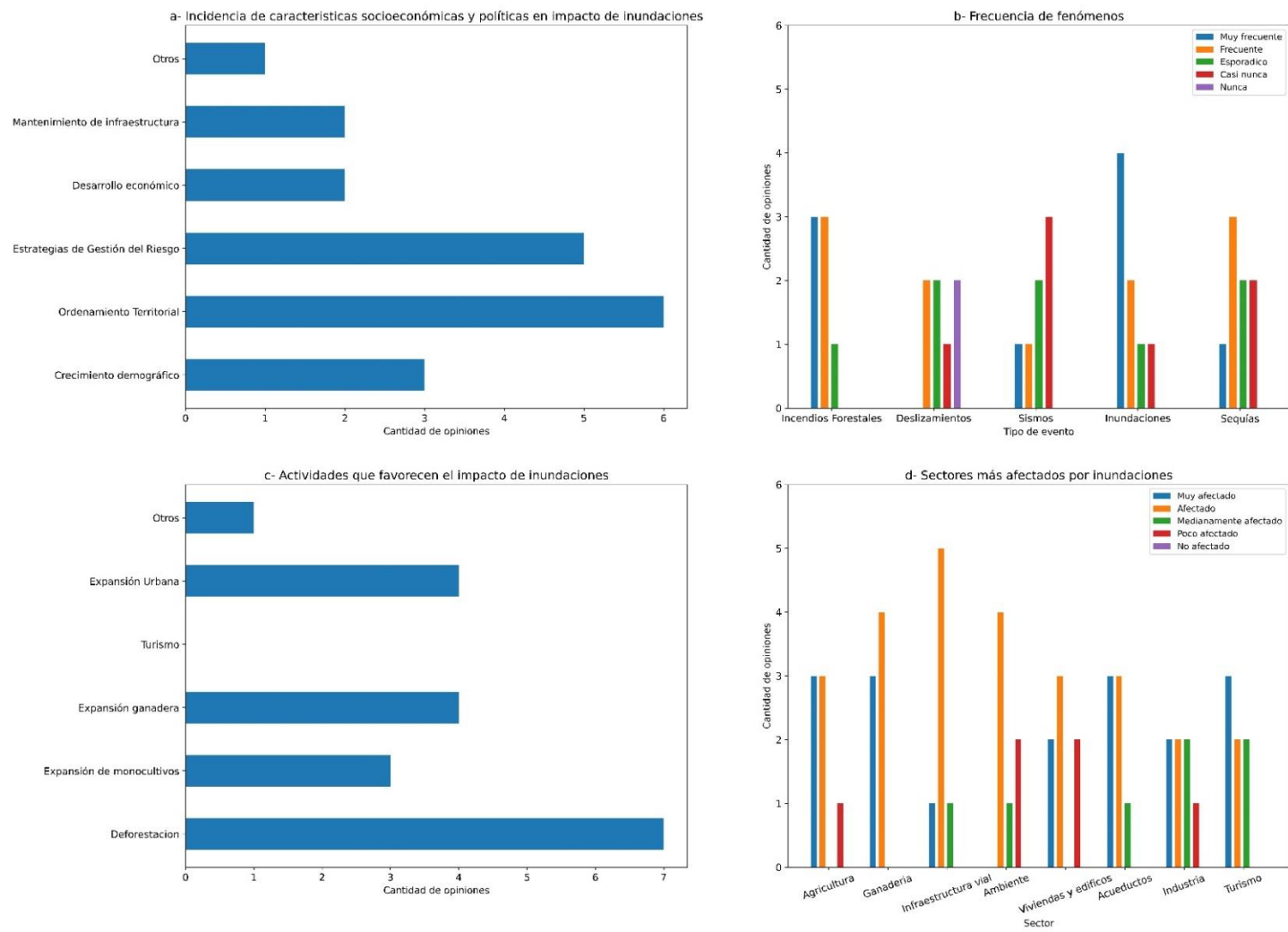


Figura 2.5. Perspectiva de los entrevistados respecto a la frecuencia e impacto de las inundaciones en la CHR. a- Incidencia de características socioeconómicas y políticas en el impacto y frecuencia de inundaciones en la CHR. b- Frecuencia de fenómenos naturales en la CHR. c- Actividades que favorecen el impacto de inundaciones en la CHR. d- Sectores más afectados por inundaciones en la CHR. Fuente: Elaboración propia a partir de las entrevistas a actores claves.

En la CHRFB las coberturas inundadas forman parte del cotidiano, asociadas principalmente a los sistemas lagunares lacustres de Caño Negro. Las cuales prestan una amplia gama de servicios ecosistémicos que dependen de su existencia. Por tanto, en este trabajo de investigación no se contempla la detección de áreas inundadas únicamente desde la perspectiva del impacto de eventos extremos. Si no, que también contempla la dinámica de estos cuerpos de agua semipermanentes, que pueden ofrecer información valiosa para diversos tomadores de decisiones.

En la Figura 2.7, se muestra un diagrama de realimentación que sintetiza las relaciones entre los sistemas sociales y ecológicos identificadas en la cuenca y descritas previamente. Y como estas tienen externalidades positivas o negativas entre ellas y su comportamiento no lineal.

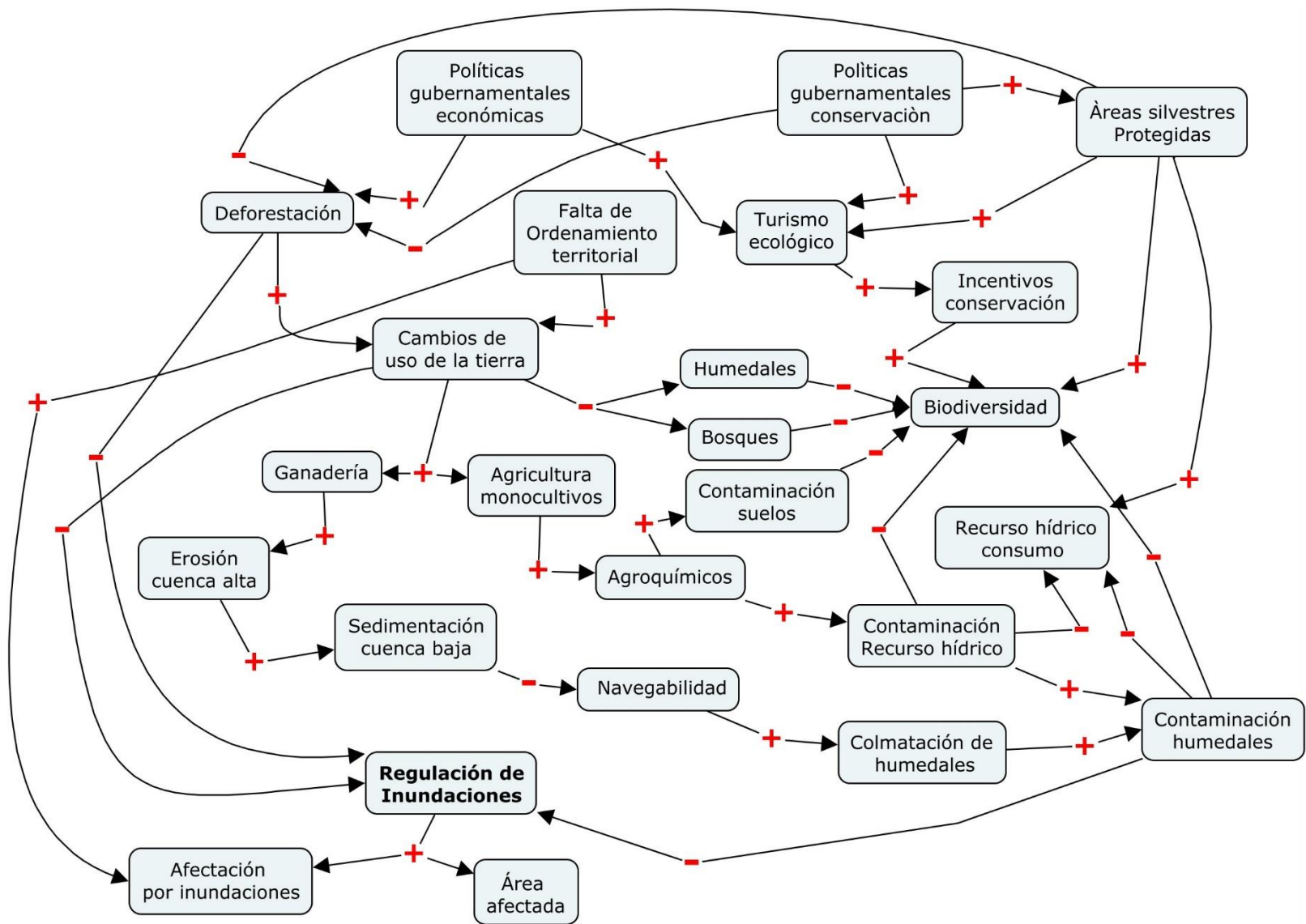


Figura 2.6. Diagrama de realimentación de la CHRF. Esta evidencia las relaciones no lineales entre los sistemas sociales y ecológicos de la cuenca. Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

El marco SES permitió realizar una caracterización general de la CHRF, considerando sus dinámicas socioeconómicas, políticas, históricas y biofísicas, así como sus interrelaciones. La implementación de este marco integral favoreció una base analítica para la comprensión de las inundaciones, más allá de su dinámica en términos frecuencia y extensión.

El marco SES, evidenció una serie de problemáticas en la cuenca, asociadas a la degradación de los recursos naturales y los servicios ecosistémicos que estos ofrecen. En el que las políticas gubernamentales han jugado un papel fundamental como la incorporación tardía de la Zona Norte en la dinámica económica del país. Esto ha configurado el desarrollo económico de la CHRF, asociado directamente con actividades agropecuarias.

Incentivado en los últimos años por la demanda internacional de productos no tradicionales como la piña. Que, en combinación con instrumentos de planificación territorial ineficientes, condujo a intensas presiones de cambios de uso de la tierra, disminuyendo las coberturas boscosas y de humedales considerablemente.

En la CHRF es posible identificar extensas ASP, que incluye, la protección de diversos ecosistemas como los bosques y humedales como objetos de conservación. La falta de personal y de equipo del SINAC, limita la vigilancia y el monitoreo. Además, la inseguridad en términos de derechos de propiedad en el RNVSM Caño Negro, restringe el accionar de esta institución. Aunque exista un reconocimiento de las comunidades sobre las problemáticas ambientales en la cuenca, la dependencia económica de actividades primarias

es una limitante para la implementación de estrategias de protección y conservación. A pesar de que esto suponga una degradación de los ecosistemas y servicios ecosistémicos identificados como esenciales, como la provisión del recurso hídrico, navegabilidad, atractivos turísticos, regulación climática, entre otros.

Los servicios ecosistémicos de regulación climática, como la mitigación de los efectos de eventos hidrometeorológicos extremos, ha disminuido a causa de la degradación y los cambios de uso de la tierra en bosques y humedales. Suponiendo un incremento de las áreas susceptibles a ser amenazadas por este tipo de fenómenos.

Se recomienda una mayor presencia del Estado, que propicie la implementación de instrumentos de planificación territorial con enfoque de cuenca, mediante la alianza de gobiernos locales, instituciones y actores. Que funja como un eje de articulación para la toma de decisiones, diversificación económica, protección y educación ambientales. Que propicie una mejora en el nivel de vida de los habitantes y un aumento al valor agregado de las actividades económicas.

CAPÍTULO 3. MAPEO ESPACIOTEMPORAL DE INUNDACIONES EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA RÍO FRÍO CON IMÁGENES SENTINEL-1

Introducción

La información de la superficie terrestre obtenida mediante sensores remotos se ha convertido en una fuente de datos popular para la detección de zonas inundadas en múltiples contextos a nivel global, que se refleja en la gran cantidad de investigaciones al respecto

(DeVries et al., 2020a; Donezar-Hoyos et al., 2017; Helleis et al., 2022; Liang & Liu, 2020; Qiu et al., 2021). Con sensores satelitales ópticos se han registrado eventos de inundaciones, sin embargo, este tipo de fenómenos se caracterizan por la presencia de masas de nubes densas, lo que dificulta la captura de información de calidad (Du et al., 2016; Tarpanelli et al., 2022; Uddin et al., 2019). La posibilidad de adquirir datos de la superficie terrestre en condiciones de nubosidad, así como en cualquier horario, sea de día o de noche, ha incrementado exponencialmente el uso de imágenes SAR en el estudio de inundaciones (Carreño Conde & De Mata Muñoz, 2019; Martinis et al., 2018; Qiu et al., 2021; Shahabi et al., 2020; Shen et al., 2019).

En este trabajo de investigación se utilizó un enfoque de detección de inundaciones abiertas automático y eficiente en términos computacionales (Bioresita et al., 2018; Martinis, Kersten, et al., 2015; Twele et al., 2016). Basado en la implementación de un algoritmo de umbralización de imágenes y refinamiento con lógica difusa, que permite obtener mapas continuos de áreas inundadas en la Cuenca Hidrográfica Río Frío (CHRF). Este aspecto es la base para una herramienta de monitoreo de inundaciones cercana al tiempo real, similar a las implementadas en otros contextos con imágenes SAR de Sentinel-1 (DeVries et al., 2020b; Qiu et al., 2021; Schlaffer et al., 2021).

El enfoque de serie de tiempo permite visualizar el comportamiento espaciotemporal de las coberturas de inundación, que es un factor fundamental en una cuenca que se caracteriza por grandes extensiones de humedales tanto palustres y lacustres con dinámicas cambiantes a lo

largo del año (Acevedo, 2012). De igual forma, permite analizar el comportamiento de eventos de inundación extraordinarios, que son frecuentes en el área de estudio por efecto de fenómenos hidrometeorológicos como ondas tropicales, frentes fríos o el caso del huracán Otto en 2016.

En este capítulo se muestran los resultados de la ejecución del algoritmo de umbralización Kittler & Illinworth (KI) y el impacto de la lógica difusa en el mapeo de áreas inundadas. También se detalla el comportamiento espaciotemporal de estas a lo largo de los meses que componen el periodo lluvioso, así como los resultados del proceso de validación numérica.

Mapeo de inundaciones con el algoritmo Kittler & Illingworth

El algoritmo de umbral de error mínimo Kittler & Illingworth (KI) se basa en el análisis de los niveles digitales de una imagen para definir una serie de umbrales que permiten segmentar estas en dos clases semánticas: inundado y no inundado (Kittler & Illingworth, 1986; Martinis et al., 2009). El algoritmo KI se caracteriza por no requerir fuentes de información externas como datos de entrenamiento o variables predictoras, lo que facilita su ejecución en términos computacionales. Sin embargo, este factor también induce que el algoritmo sea susceptible a errores de segmentación y, por tanto, pérdida de precisión (Martinis, Kersten, et al., 2015; Twele et al., 2016)

Para solventar estos errores se tomaron en cuenta una serie de procesos alternativos, como el refinamiento de las áreas inundadas mediante conjuntos difusos, cuyo impacto se detalla más adelante. También la incorporación del índice de altura sobre el drenaje más cercano (HAND

por sus siglas en inglés) como un condicionante del algoritmo KI, acorde a lo propuesto por Twele et al., (2016).

La incorporación de este índice permitió descartar de los resultados del algoritmo KI una serie de fuentes de error. Como las áreas de sombra generadas en regiones donde la topografía impide la interacción de la señal electromagnética con la superficie, que resultan en zonas con bajos niveles de retrodispersión similares al de las coberturas de agua. Aunado a lo anterior, este índice al integrar aspectos topográficos e hidrológicos concentró la ejecución del algoritmo KI sobre las llanuras de inundación de la CHRF, mejorando la coherencia de la segmentación.

Los resultados del algoritmo KI son un nuevo apilado de imágenes con información preliminar de zonas inundadas y no inundadas de la CHRF. En la Figura 3.1 se muestran los resultados de la ejecución del algoritmo KI, en lo que respecta al total de área inundada en hectáreas para cada imagen de la serie temporal (ver Figura 3.1 d), valores de umbral global (τ_x) y desviación estándar de los umbrales locales (σ) (ver Figura 3.1 b y c). De igual forma, se muestran los acumulados diarios de precipitación para cada una de las estaciones meteorológicas de la cuenca (ver Figura 3.1 a).



Figura 3.1. Resultados del algoritmo KI para la serie temporal 2014-2020 de imágenes SAR de Sentinel-1 en la CHRf. a) acumulados diarios de precipitación en mm. b) Umbral global τ_x . c) desviación estándar (σ) de los umbrales locales. d) área inundada en hectáreas. Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes Sentinel-1 y datos de precipitación del IMN.

Los resultados obtenidos evidencian poca variabilidad en los valores de umbral global (τ_x) (Figura 3.1 b), con valores promedio de -20.38 dB para la polarización VH y de -14.26 dB para la polarización VV, con desviaciones estándar (σ) de 1.83 dB y 0.73 respectivamente. Estos valores no sólo son pertinentes con los umbrales máximos permitidos en esta investigación (-17 dB para VH y -12 dB para VV), sino que son concordantes con lo expuesto en diversas investigaciones (Carreño Conde & De Mata Muñoz, 2019; Twele et al., 2016; Meimei Zhang et al., 2020).

También, los bajos valores de desviación estándar (σ) de los umbrales locales (inferiores a 5 dB) (Figura 3.1 c), son un indicativo de la efectividad del proceso de segmentación de las imágenes. Ya que los umbrales locales están segmentando las mismas clases semánticas, coincidiendo con lo estipulado por Martinis, Kersten, et al., (2015). Y con los criterios de pertinencia de los umbrales globales propuestos para esta investigación en el apartado metodológico.

Lo anterior, es posible dadas las características biofísicas de la CHRF, que favorecen la presencia de zonas inundadas continuas en los periodos lluviosos. Factor que aseguró la representatividad en los niveles digitales vinculados a la clase semántica de inundación en las imágenes SAR. Lo anterior, concuerda con lo expuesto por investigaciones como la elaborada por Martinis et al., (2009), que sugiere que para el funcionamiento efectivo del algoritmo KI en imágenes SAR, debe existir al menos un 10% de niveles digitales asociados a la clase inundada en las subimágenes utilizadas para modelar los umbrales locales.

Otro elemento observado, fue el amplio rango de valores de área inundada (ver Figura 3.1 d), que va desde las 211.9 ha hasta las 4143.46 ha en la polarización VV y de 367.95 ha hasta las 4741.72 ha en la polarización VH. No obstante, los cambios abruptos en el área inundada no implican variaciones significativas en los valores de umbral global (τ_x), por lo que estos no son susceptibles a la cantidad de área inundada, sino a la presencia o no de estas. Lo que resalta la importancia de descartar las imágenes SAR de periodos secos, dónde las áreas inundadas desaparecen en la CHRF, al menos desde la perspectiva de los mecanismos de retrodispersión en imágenes SAR de Sentinel-1.

En el Cuadro 3.1 se muestra un resumen estadístico de los resultados del algoritmo KI.

Cuadro 3.1. Resumen estadístico de los resultados del algoritmo KI

| polarización | umbral (τ_x) | | | | área inundada (ha) | | |
|--------------|---------------------|------------------|-----------------|------------------|--------------------|-----------|-----------|
| | $\mu(\tau_x)$ | min (τ_x) | max(τ_x) | $\sigma(\tau_x)$ | $\mu(\text{área})$ | min(área) | max(área) |
| VH | -20.38 | -23.32 | -18.06 | 1.83 | 1346.52 | 367.95 | 4741.72 |
| VV | -14.26 | -16.91 | -12.11 | 0.73 | 1120.37 | 211.9 | 4143.46 |

Fuente: Elaboración propia

Impacto de la lógica difusa en el mapeo de inundaciones

La aplicación de conjuntos difusos para la detección de inundaciones con imágenes SAR ha demostrado ser eficiente para mitigar el impacto de las ambigüedades típicas de un mecanismo activo de teledetección (Karmakar & Dooley, 2002; Pulvirenti et al., 2011). Investigaciones han utilizado la lógica difusa como postproceso de los resultados del algoritmo KI, obteniendo resultados positivos en términos de la mejora en la precisión y cohesión de las zonas de inundación (Martinis et al., 2018; Martinis, Kersten, et al., 2015; Twele et al., 2016).

Si bien, en esta investigación se aplicaron conjuntos difusos para refinar las zonas inundadas definidas por el algoritmo KI, los cambios en términos de área inundada no son considerables (ver Figura 3.2), al menos si se comparan con las investigaciones mencionadas anteriormente. Una forma de visualizar estos cambios es a partir de la variación en los promedios de área inundada obtenidos del algoritmo KI y el estimado posterior a la lógica difusa (Cuadro 3.2). En el que se registra una disminución del promedio de área inundada de 53,35 ha en la polarización VH y de 22,55 ha en la polarización VV. Sin embargo, si se analizan los valores mínimos y máximos es posible observar que el impacto de la lógica difusa es mayor conforme aumenta el área inundada.

Cuadro 3.2. Comparativa de valores de área inundada de Algoritmo KI y refinamiento difuso (FZ)

| polarización | algoritmo KI | | | lógica difusa (FZ) | | |
|--------------|--------------|---------|---------|--------------------|---------|---------|
| | μ área | min(ha) | max(ha) | μ área(ha) | min(ha) | max(ha) |
| VH | 1346.52 | 367.95 | 4741.72 | 1293.17 | 356.97 | 4602.86 |
| VV | 1120.37 | 211.9 | 4143.46 | 1097.82 | 207.67 | 4028.88 |

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.2 se detallan los resultados obtenidos de la lógica difusa para toda la serie temporal. En el que además de representar de buena manera la dinámica temporal de las áreas inundadas, también permite identificar una serie de picos de inundación, que superan significativamente la línea promedio de área inundada (μ , línea roja) de la serie temporal, asociados a eventos de inundación extraordinarios.

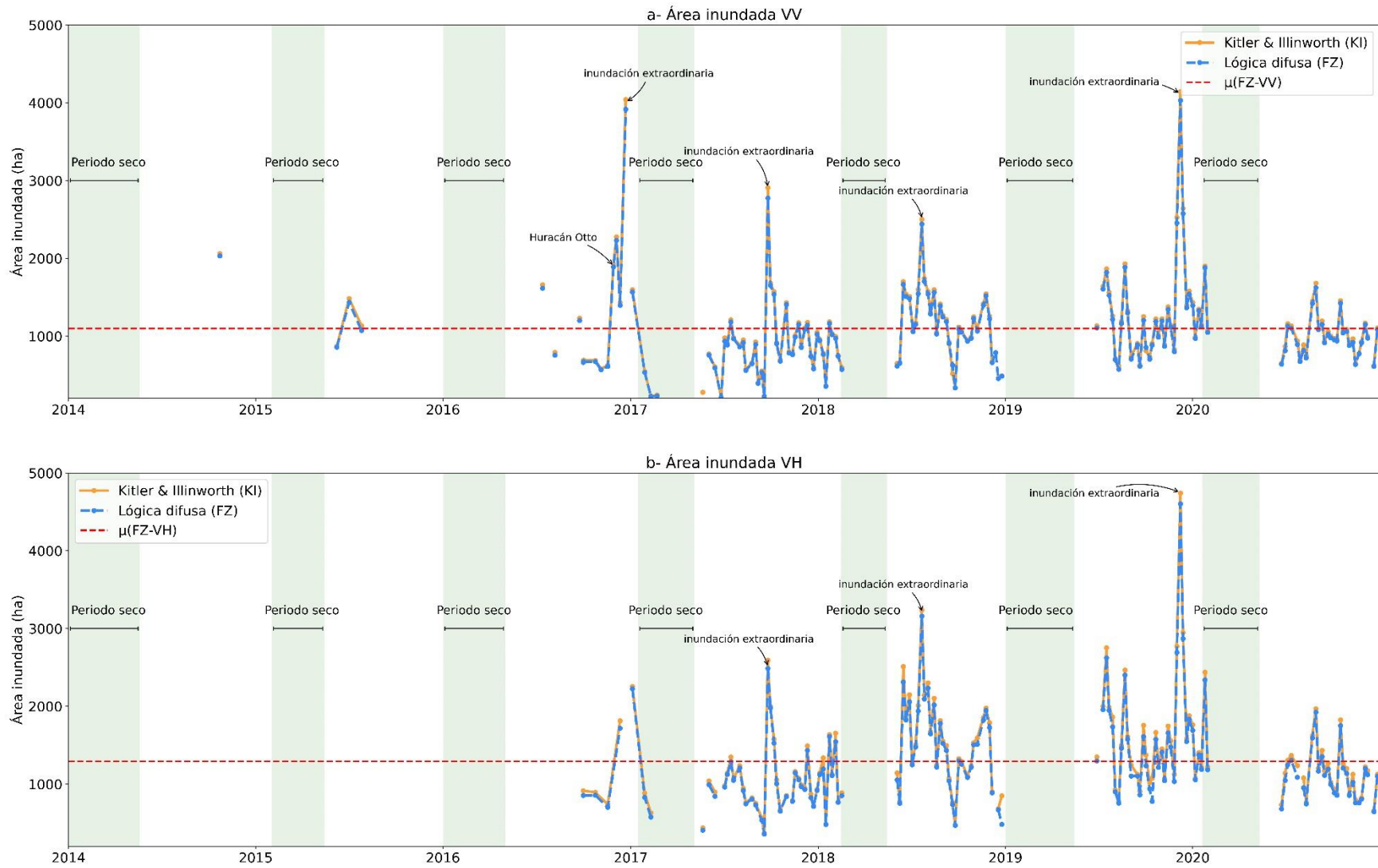


Figura 3.2. Resultados del refinamiento por lógica difusa para la serie temporal 2014-2020 de imágenes SAR de Sentinel-1 en la CHRf. a- Área inundada en hectáreas estimada con el algoritmo KI y por lógica difusa FZ para la polarización VV. b-. Área inundada en hectáreas estimada con el algoritmo KI y por lógica difusa FZ para la polarización VH. Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes Sentinel-1.

La baja diferencia en términos de área inundada entre los resultados del algoritmo KI y posterior al refinamiento por lógica difusa se puede explicar por una serie de factores. El principal está vinculado a la incorporación del índice de altura sobre el drenaje más cercano (índice HAND) como un condicionante del algoritmo KI, que como se mencionó previamente permitió descartar las áreas de sombra en montañas y descartar del proceso las áreas de menor probabilidad de inundación. Siendo estas zonas las principales fuentes de error en procesos de detección de inundaciones con imágenes SAR, independientemente del método que se utilice (Clement et al., 2017; Helleis et al., 2022; Ulloa et al., 2022).

También se debe considerar el bajo nivel de moteado (speckle) de las imágenes SAR, como resultado de aplicar el filtro adaptativo Mejorado de Lee. Es importante resaltar que el moteado es un efecto inherente de este tipo de imágenes que surge de la interferencia de múltiples ecos de retrodispersión en una celda de resolución SAR (Flores-Anderson et al., 2019). Lo anterior, se manifiesta con una apariencia granular en las imágenes, con píxeles muy brillantes y oscuros con una distribución azarosa (ver Figura 1.4). La reducción de este efecto permitió adquirir imágenes SAR más homogéneas, disminuyendo en gran medida píxeles dispersos de baja retrodispersión a lo largo de la CHRF que suelen etiquetarse como inundados.

El tercer factor está vinculado a la baja frecuencia de valores de retrodispersión asociados a suelos descubiertos con bajos niveles de humedad y poca rugosidad. Estos propician una mayor absorción y transmisividad de la señal electromagnética, así como posibles

mecanismos de retrodispersión especular (Flores-Anderson et al., 2019; Woodhouse, 2006), que generan valores de retrodispersión similares al de coberturas inundadas. En esta investigación al utilizar únicamente las imágenes correspondientes a los períodos lluviosos, los suelos descubiertos se caracterizan por altos niveles de humedad, y, por tanto, alta constante dieléctrica, que propicia una mayor retrodispersión.

A lo anterior, se debe agregar que los suelos descubiertos de la CHRF se caracterizan por estar asociados a usos agrícolas, por lo que son constantemente sometidos a diversos procesos que alteran su rugosidad. Esta condición aumenta la interacción de la señal electromagnética con la superficie y con ella la retrodispersión. Esto se registra especialmente con la polarización VV, dado que es más sensible a este tipo de cambios en la estructura de las coberturas (Flores-Anderson et al., 2019; Woodhouse, 2006).

En la Figura 3.3 se muestra un ejemplo de suelo descubierto en la CHRF, en el que es posible observar procesos de preparación agrícola que afecta la rugosidad de la cobertura.

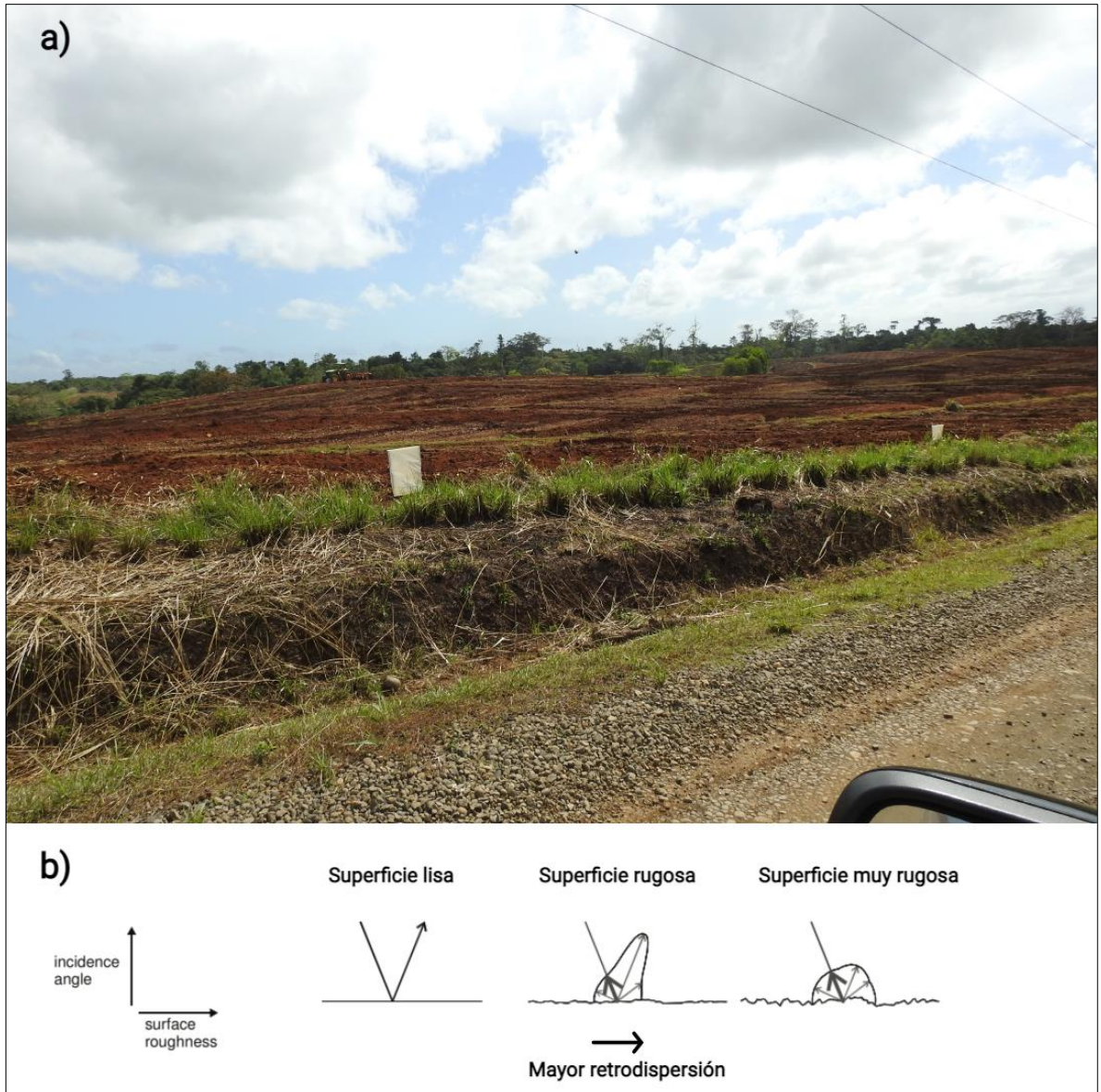


Figura 3.3. a-Zona de suelos descubiertos en la CHRf con vocación agrícola. b- Diagrama del efecto de la rugosidad en la dispersión de la señal electromagnética. Fuente: a- Tomado por Aguilar, 2022. b- Editado de Woodhouse (2006).

En términos generales, el impacto de la lógica difusa estuvo condicionado por las reducidas fuentes de error presentes en las imágenes SAR y a las características de las coberturas en la CHRF. Sin embargo, esto no implica que el procesamiento no haya sido funcional, dado que aún es posible observar zonas en la que los conjuntos difusos identificaron áreas irregulares etiquetadas como inundadas por el algoritmo KI. Estas incluyen: píxeles dispersos, suelos descubiertos y zonas de bordes entre áreas inundadas y no inundadas.

El Cuadro 3.3 presenta algunos ejemplos del efecto de la lógica difusa.

Cuadro 3.3. Resumen de impacto de la lógica difusa en el refinamiento de áreas inundadas

| Fuente de error | Descripción | Figura |
|---------------------|---|----------------|
| Píxeles dispersos | <p>Píxeles dispersos etiquetados por la clasificación del algoritmo KI como inundados, que no poseen las dimensiones mínimas asignadas en el conjunto difuso de área (3 píxeles). Por lo que se les asigna una membresía global de 0, eliminando estas áreas del resultado final.</p> <p>Es posible observar este tipo de comportamiento a lo largo de todas las visualizaciones, sin embargo, su descarte no implica una disminución considerable del área total inundada. En la Figura 3.5 es posible observar el descarte de este tipo de zonas.</p> | Ver Figura 3.5 |
| Suelos descubiertos | <p>Zonas de suelos descubiertos que por sus características de retrodispersión fueron etiquetadas como inundadas por el algoritmo KI. Esto sucede principalmente cuando las precipitaciones disminuyen considerablemente aumentando las fuentes de error.</p> <p>Un ejemplo notorio de esta situación es la observación SAR del día 25 de diciembre de 2018. En la polarización VH se obtuvo un área inundada de 850,29 ha con el algoritmo KI y de 483,97 ha posterior al refinamiento difuso (Figura 3.4). Para la polarización VV este cambio no es notorio, con 489,81 ha con el algoritmo KI y de 483,97 ha posterior al refinamiento difuso.</p> <p>La polarización VH es más propensa a generar falsos positivos de inundación en suelos descubiertos, especialmente en condiciones de baja humedad y poca rugosidad, esto está vinculado a la baja despolarización que ocurre en coberturas no volumétricas, que se refleja en bajos niveles de retrodispersión.</p> <p>La Figura 3.4 detalla como el conjunto difuso de área otorgó membresías positivas a la totalidad de las zonas inundadas detectadas por el algoritmo KI. Debido a que este conjunto difuso evalúa la continuidad espacial de las zonas inundadas. En el caso del conjunto difuso por retrodispersión, otorgó diversos niveles de membresía, desde muy altos (cercanos a 1) hasta muy bajos (cercanos a 0).</p> <p>Los conjuntos difusos con información topográfica e hidrológica, en este caso el índice HAND y pendiente detallan zonas inundadas con membresías nulas (0), por lo que estos píxeles son descartados. En lo que respecta a la membresía final o global se aprecia como la gran mayoría de los píxeles etiquetados como inundados por el algoritmo KI fueron descartados en la polarización VH.</p> | Ver Figura 3.4 |

| | | |
|-----------------------|---|-----------------------|
| <p>Zonas de borde</p> | <p>El refinamiento difuso tuvo impacto en los bordes entre las zonas etiquetadas como inundadas por el algoritmo KI y las zonas no inundadas. Se infiere que esto está relacionado al cambio en la estructura de los objetos que componen cada celda de iluminación del SAR. Ocasionando mecanismos de retrodispersión variados, donde convergen coberturas de agua con coberturas como árboles, troncos, cultivos y pastos, en una misma celda.</p> <p>En la observación SAR del 2019-12-08 en ambas polarizaciones el conjunto difuso de retrodispersión detalla píxeles de baja membresía (cercanos a 0) en las zonas de borde, por lo que estos píxeles tienen un nivel de retrodispersión ligeramente mayor que el presente en gran parte de las manchas de inundación. La imagen óptica de referencia del sensor Planet Scope muestra como en el área de referencia prevalecen coberturas de gramíneas fácilmente inundables coberturas de árboles, tanto dispersos como en parches de bosque.</p> <p>Los conjuntos difusos de carácter topográfico e hidrológico otorgan en gran medida membresías altas (cercanas a 1) en ambas polarizaciones, similar con el conjunto difuso de área, aunque si se evidencia el descarte de píxeles dispersos etiquetados como inundados por el algoritmo KI. Como la membresía global se basa en la media aritmética de la membresía de todos los conjuntos difusos, los bajos niveles de membresía en el conjunto de retrodispersión en los bordes no implica su descarte del producto final.</p> | <p>Ver figura 3.5</p> |
|-----------------------|---|-----------------------|

Fuente: Elaboración Propia.

Refinamiento difuso 2018-12-25 VH

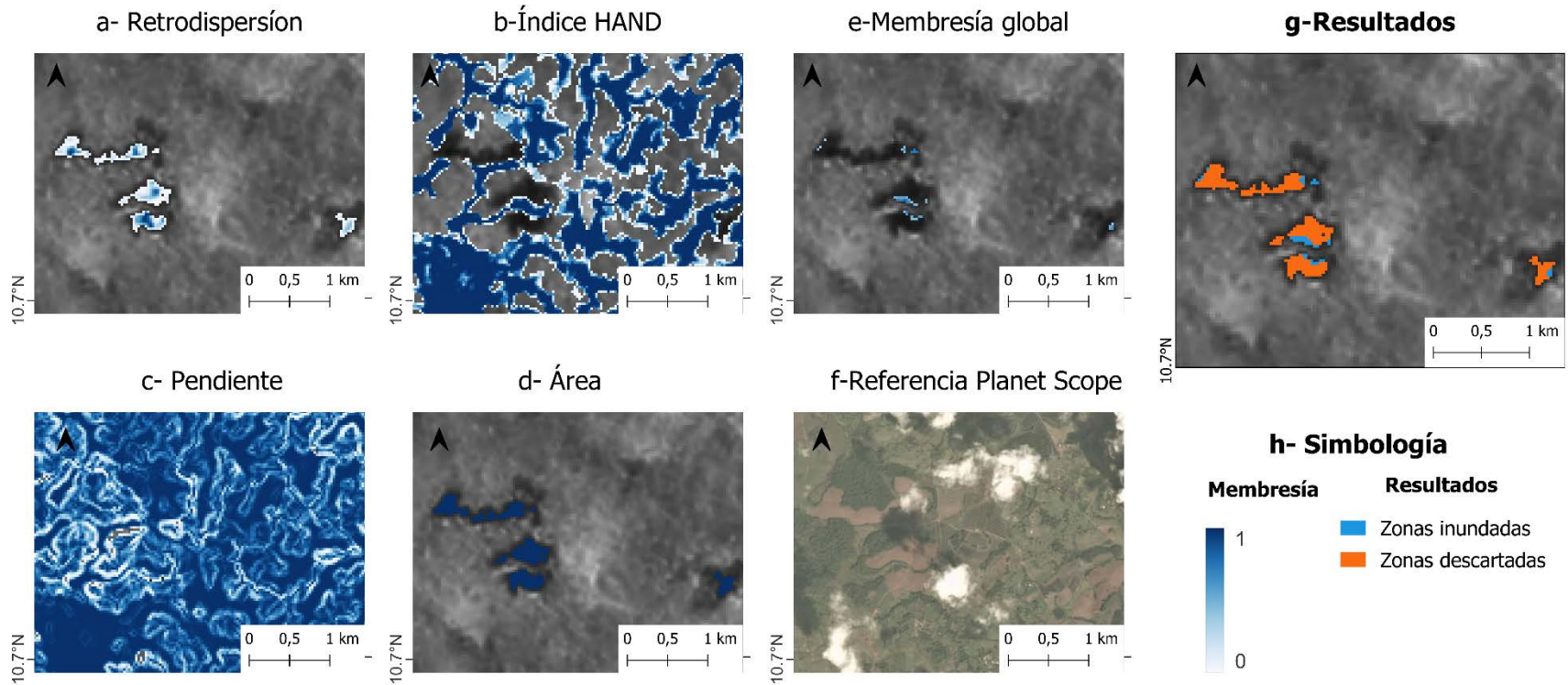


Figura 3.4. Impacto de la lógica difusa en zonas de suelos descubiertos. a- Conjunto difuso de retrodispersión. b-Conjunto difuso índice HAND. c-Conjunto difuso pendiente. d-Conjunto difuso área. e-Membresía global. f-Imagen de referencia Planet Scope del 26-12-2018. G-Resultado del refinamiento difuso. Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes Sentinel-1 y MED de Copernicus.

Refinamiento difuso 2019-12-08 VV

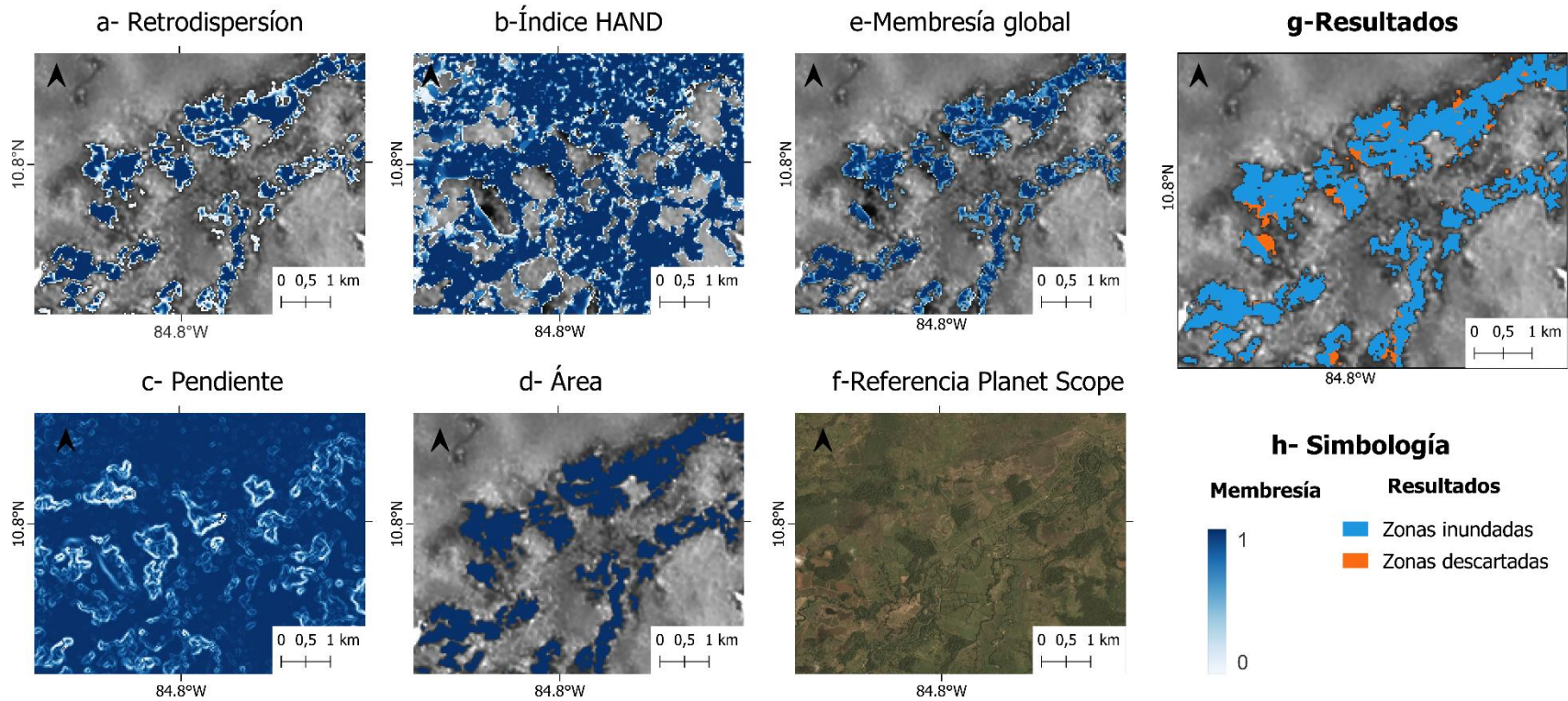


Figura 3.5 Impacto de la lógica difusa en zonas de borde entre coberturas inundadas y no inundadas.

a- Conjunto difuso de retrodispersión. b-Conjunto difuso índice HAND. c-Conjunto difuso pendiente. d-Conjunto difuso área. e-Membresía global. f-Imagen de referencia Planet Scope del 26-02-2020. G-Resultado del refinamiento difuso. Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes Sentinel-1 y MED de Copernicus.

Comportamiento espaciotemporal de las inundaciones en la CHRF

Los resultados de área inundada obtenidos de la ejecución del algoritmo KI y refinamiento difuso (ver Figura 3.3), permiten identificar una serie de patrones que reflejan el comportamiento espaciotemporal de las coberturas inundadas en la CHRF. Comportamiento que se puede analizar tomando como referencia cada uno de los meses que componen el periodo lluvioso en la cuenca (junio-diciembre). De igual forma, esta perspectiva facilita la asociación de los resultados de zonas inundadas con los registros de lluvias en el área de estudio.

La Figura 3.6, a partir de diagramas de caja muestra la dinámica numérica de las áreas inundadas y de los valores de precipitación registrados en las estaciones meteorológicas. Para el diseño de la Figura 3.6, se utilizaron los datos de las observaciones SAR posteriores a noviembre de 2016, ya que a partir de estas fechas es que existe una resolución temporal bien definida. Para las estaciones meteorológicas se toma el mismo rango temporal, a excepción de la estación Volcán Tenorio cuyos registros inician en 2017.

Por otro lado, al ser los resultados del procesamiento automático un apilado de imágenes con información de áreas inundadas y no inundadas, cada píxel de estas puede representarse como una serie individual. Por lo que es posible representar cada uno de estos acorde a su frecuencia relativa de inundación, que está relacionado al tiempo en que una cobertura permanece inundada, similar a lo propuesto por Ulloa et al., (2022) y Meimei Zhang et al., (2020).

Lo anterior, permite definir cada zona inundada en categorías: área inundada permanente, área inundada intermitente y área inundada esporádica. Se asignó una categoría acorde al número de ocasiones en que un píxel fue etiquetado como inundado en el conjunto total de datos de un mes de referencia. En el Cuadro 3.3 se describe cada una de las categorías de inundación.

Cuadro 3.3. Categorías de inundación por frecuencia relativa

| Categoría | Descripción |
|---------------------|--|
| Permanente | Píxel etiquetado en más del 70% de las observaciones SAR del mes |
| Intermitente | Píxel etiquetado en más del 30% y menos del 70% de las observaciones SAR del mes |
| Esporádica | Píxel etiquetado en menos del 30% de las observaciones SAR del mes |

Fuente: Elaboración propia

En las Figuras 3.15, 3.16, 3.17, 3.18, 3.19 y 3.20 al final de esta sección se muestran los resultados del análisis de frecuencia de inundación por píxel para diversos sectores de la CHRF. En estos es posible apreciar el comportamiento espaciotemporal de las diversas coberturas inundadas de la cuenca. Que permite contrastar zonas con coberturas inundadas permanentes, intermitentes y esporádicas.

Dinámica mensual de áreas de inundación

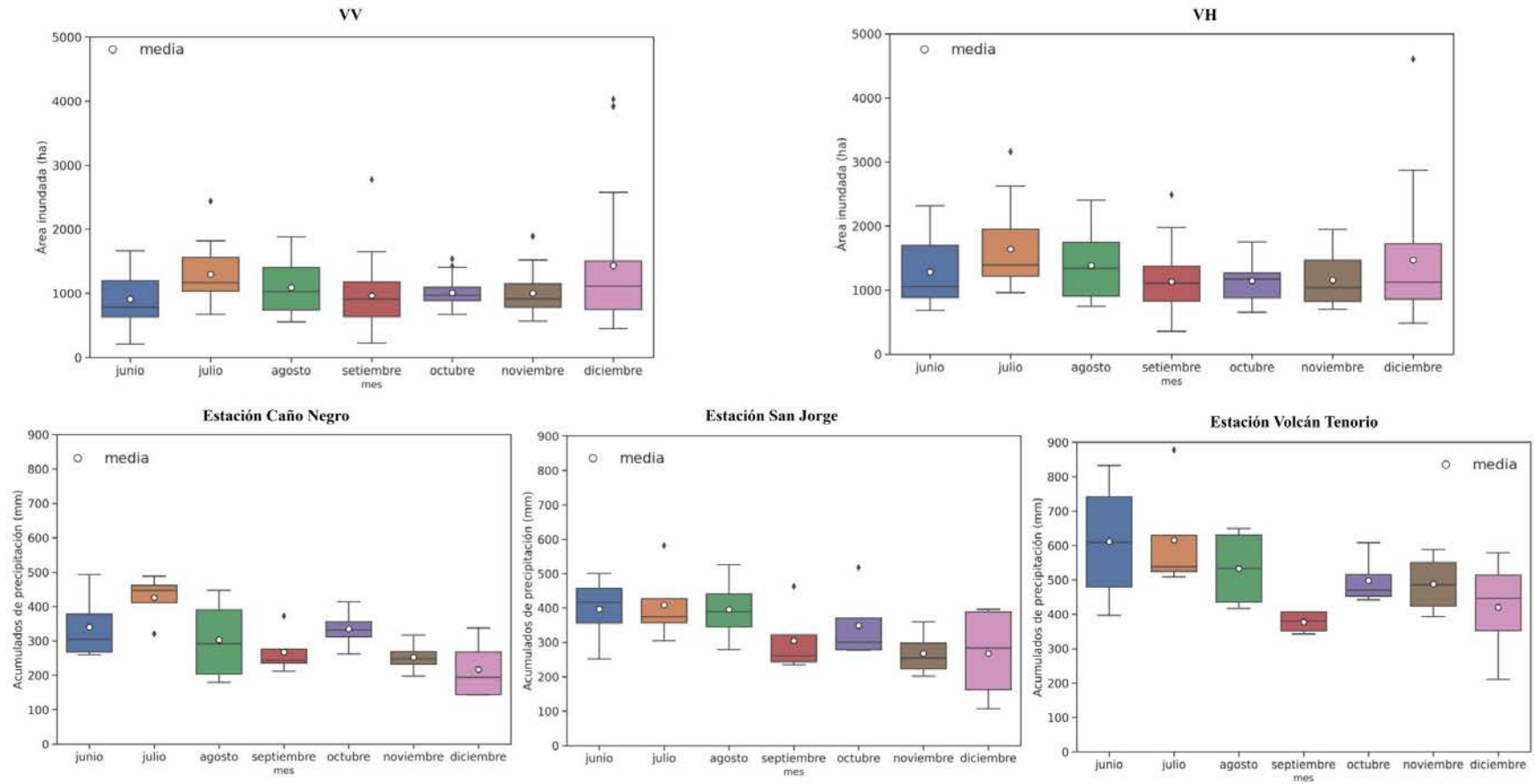


Figura 3.6. Diagramas de caja de comportamiento mensual de área inundada y de precipitación en la CHRF del periodo lluvioso. a- Polarización VV. b- Polarización VH. c- Estación Caño Negro. d- Estación San Jorge. e- Estación Volcán Tenorio. Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes Sentinel-1 y datos de precipitación del IMN.

Tendencia espaciotemporal junio 2017-2020

Los meses de junio se caracterizan por un comportamiento muy variable de las coberturas inundadas. Aspecto se refleja en el amplio rango típico de áreas inundadas mostradas en la Figura 3.6 (a y b), con valores de 1456,73 ha para la polarización VV y 1629,66 ha para la polarización VH. En el que es posible observar los valores más bajos a principios del mes, los cuales aumentan gradualmente hasta obtener los registros más altos en la segunda mitad de este.

Para este periodo se registran las mediciones más bajas de área inundada de todos los meses que componen el periodo lluvioso en la CHRF, al menos para la polarización VV. En el que el 75% de las observaciones registran áreas inundadas menores a 1200 ha y el 50% menores a 784.29 ha (ver Figura 3.6 a y b). Si bien en la polarización VH también se registran valores de inundación muy bajos, en el mes de setiembre y diciembre es posible apreciar cifras inferiores. Las diferencias entre los resultados de las polarizaciones se justifican a partir de la combinación de factores asociados a las características del sensor y de las coberturas en la CHRF. Estos se detallan a continuación.

La disminución de las lluvias durante los meses de enero y mayo en la CHRF implican el descenso del nivel de saturación de los suelos y de la tabla de agua en los humedales tanto lacustres como palustres (Acevedo, 2012). Mismos que se caracterizan por una estacionalidad bien definida, en la que gran parte llegan a secarse por completo y son cubiertos por vegetación (SINAC-PNUD-GEF, 2018). Con el incremento de las lluvias en el

mes de junio se produce el aumento de la saturación de los suelos que a su vez favorece la presencia de coberturas inundadas, principalmente en el RNVS Caño Negro (SINAC ACAHN, 2013). No obstante, este aumento de las coberturas inundadas se produce de forma gradual y heterogénea, por lo que la cobertura de agua no sobrepasará en todos los casos la cobertura vegetal, que en su mayoría se trata de vegetación herbácea (SINAC-PNUD-GEF, 2018).

Lo anterior, supone un aspecto fundamental en los mecanismos de retrodispersión de la señal electromagnética con la superficie. Por ejemplo, si comparamos un área de humedal que durante el periodo seco está cubierta por vegetación, es previsible esperar mecanismos de retrodispersión volumétricos (ver Figura 3.7 a), que favorecen la despolarización de la señal electromagnética (Flores-Anderson et al., 2019; Woodhouse, 2006). Por lo que en la polarización VH se esperaría un nivel de retrodispersión superior al de VV. Con el incremento de la cobertura de agua, la interacción de la señal cambia radicalmente a mecanismos de retrodispersión especular (típicos de un área inundada).

Sin embargo, si el área de inundación en un píxel es parcial o la lámina de agua no supera en todos los casos la vegetación, es posible que se generen mecanismos de retrodispersión de doble rebote (ver Figura 3.7 b). Lo que implica un aumento de la retrodispersión especialmente en la polarización VV, dado que es más sensible a los cambios en la vertical de una superficie (Flores-Anderson et al., 2019). Mientras que en la polarización VH puede

que estos cambios no sean perceptibles. Por lo que un píxel etiquetado como inundado en la polarización VH es probable que no lo sea en la polarización VV debido a estas diferencias.

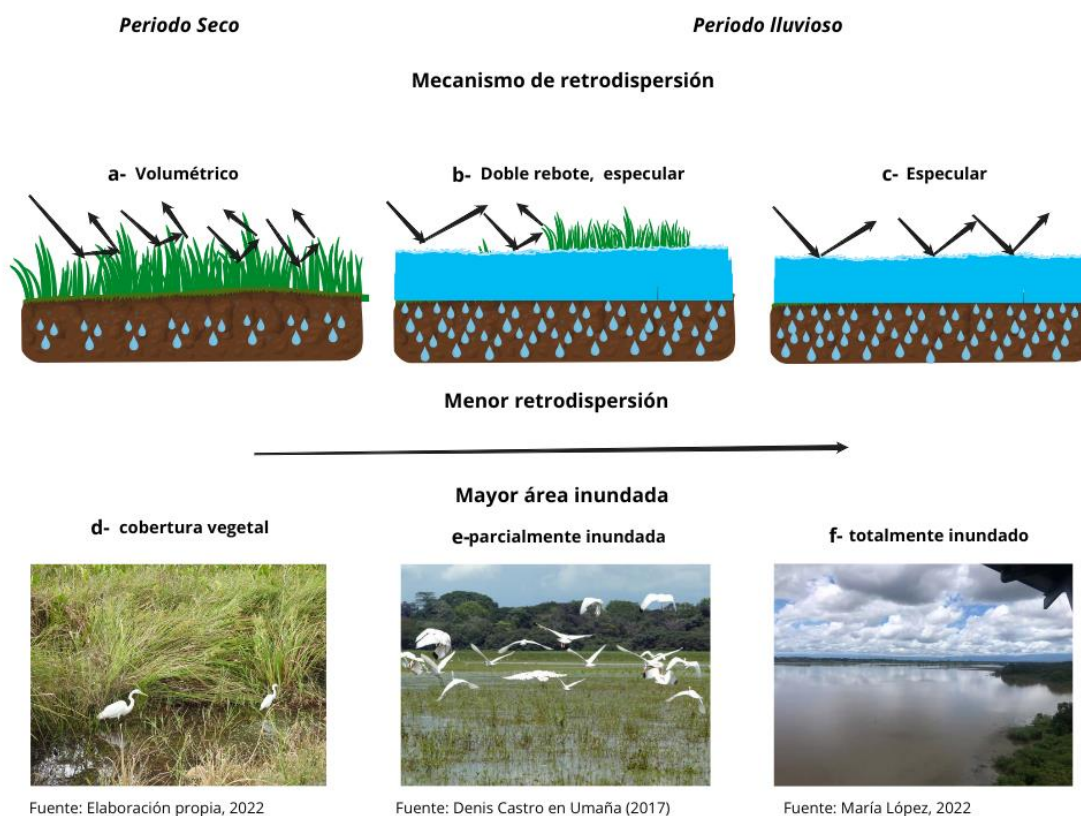


Figura 3.7. Mecanismo de retrodispersión en coberturas de humedal herbáceas inundadas y no inundadas.

a- mecanismos de retrodispersión de una cobertura vegetal no inundada. b- mecanismos de retrodispersión de una cobertura parcialmente inundada. c- mecanismos de retrodispersión en cobertura inundada de aguas abiertas. d- ejemplo de humedal cubierto por vegetación herbácea en Caño Negro. e- ejemplo de humedal parcialmente inundado en Caño Negro. f- ejemplo de humedal completamente inundado en Caño Negro. Fuente: Elaboración propia.

Esto supone la razón principal de las diferencias en términos de área inundada entre la polarización VV y VH observados en la serie temporal. Que se pueden ver potenciados en

los meses que reflejan la transición entre el periodo seco y lluvioso como junio y diciembre. Estas diferencias entre polarizaciones son destacadas en diversas investigaciones (Clement et al., 2017; Ezzine et al., 2018; Helleis et al., 2022; Twele et al., 2016).

Las zonas inundadas durante el mes de junio se concentran principalmente en el sector más al norte de la cuenca, principalmente en el RNVS Caño Negro, así como en las cercanías del poblado de los Chiles (ver Figura 3.15, 3.16, 3.17 y 3.18). En el que predominan las bajas frecuencias de inundación (esporádicas) que refleja de buena manera el proceso de expansión de las coberturas inundadas en humedales con el inicio del periodo lluvioso.

De igual forma, en las lagunas de Caño Negro es posible apreciar zonas con altas frecuencias de inundación (permanente e intermitentes). Aspecto que se puede relacionar con lo mencionado por SINAC ACAHN, (2013), quienes destacan que algunos humedales lacustres de Caño Negro mantienen su condición inundada aún en el periodo seco.

Tendencia espaciotemporal julio 2017-2020

Los meses de julio registran las métricas de área inundada más altas de toda la serie temporal (ver Figura 3.6 a y b), con valores promedio de 1296,89 ha para VV y 1640,72 ha para VH y mediana de 1165,12 ha para VV y 1391,70 ha para VH. Esto coincide con lo observado en los registros de precipitación, dado que este mes también registra los mayores acumulados de lluvia (ver Figura 3.6 c, d y e). Sobre esto, Coloma et al., (2009) menciona que durante julio se registran las mayores lluvias y caudales en la CHR.F.

Las lluvias constantes durante este mes propician la consolidación y expansión de las zonas de humedal en condición inundada. Donde se puede apreciar un incremento de la frecuencia de inundación coberturas inundadas en las lagunas de Caño Negro, así como en una serie de humedales herbáceos en las cercanías de los Chiles (ver Figura 3.17 y 3.18).

En lo que respecta a las áreas inundadas esporádicas son potenciadas por la presencia de eventos de inundación extraordinarios. Durante los meses de julio se identificaron dos eventos de inundación extraordinarios, esto en los años 2018 y 2019 (ver Figura 3.2).

Julio de 2018 corresponde con el mes más lluvioso de toda la serie temporal, esto según los registros de las estaciones meteorológicas Volcán Tenorio y San Jorge. Con acumulados de precipitación de 877,8 mm y 581,1 mm respectivamente. En la Figura 3.6 (d y e) se observa cómo estos acumulados de lluvia corresponden con mediciones atípicas en el rango de datos.

Lo anterior, es resultado de la alta actividad de la zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), que provocó superávits de precipitación entre el 100-160% en la Zona Norte del país, a lo que se debe agregar los efectos de una serie de ondas tropicales (G. Chinchilla, 2018). El día 14 de julio, la estación San Jorge registró acumulados de 66,4 mm y la estación Volcán Tenorio 71,4 mm en un lapso de 11 horas aproximadamente, asociadas a los efectos de la onda tropical número 16 (G. Chinchilla, 2018). Por esta razón, durante las observaciones SAR de los días 15 y 22 de julio de 2018 registraron valores de área inundada significativamente superiores al promedio de toda la serie temporal (Cuadro 3.2).

En la observación SAR del 15 de julio se midieron áreas inundadas de 1598,32 ha en la polarización VV y 2010,43 ha en la polarización VH. En esta es posible identificar una concentración importante de coberturas inundadas en las cercanías de San Rafael de Guatuso (ver Figura 3.8). Para este sector de la cuenca no se registran coberturas inundadas en prácticamente la totalidad de las imágenes SAR, por lo que están estrictamente asociadas a eventos de inundación extraordinarios, y en este caso a inundaciones rápidas. La presencia de inundaciones en diversos sectores del cantón de Guatuso durante estas fechas es mencionada en una serie de noticias (Ruiz Espinoza, 2018; Valverde, 2018).

La detección de este evento en particular demuestra el buen comportamiento del método en la detección de inundaciones rápidas y en áreas de baja frecuencia no asociadas a humedales. No obstante, esto depende de la buena correlación temporal entre el sensor y el pico de inundación, que en este caso es de apenas unas horas. Diversos autores comentan que este es el principal factor para poder detectar inundaciones rápidas (Notti et al., 2018; Meinan Zhang et al., 2020).

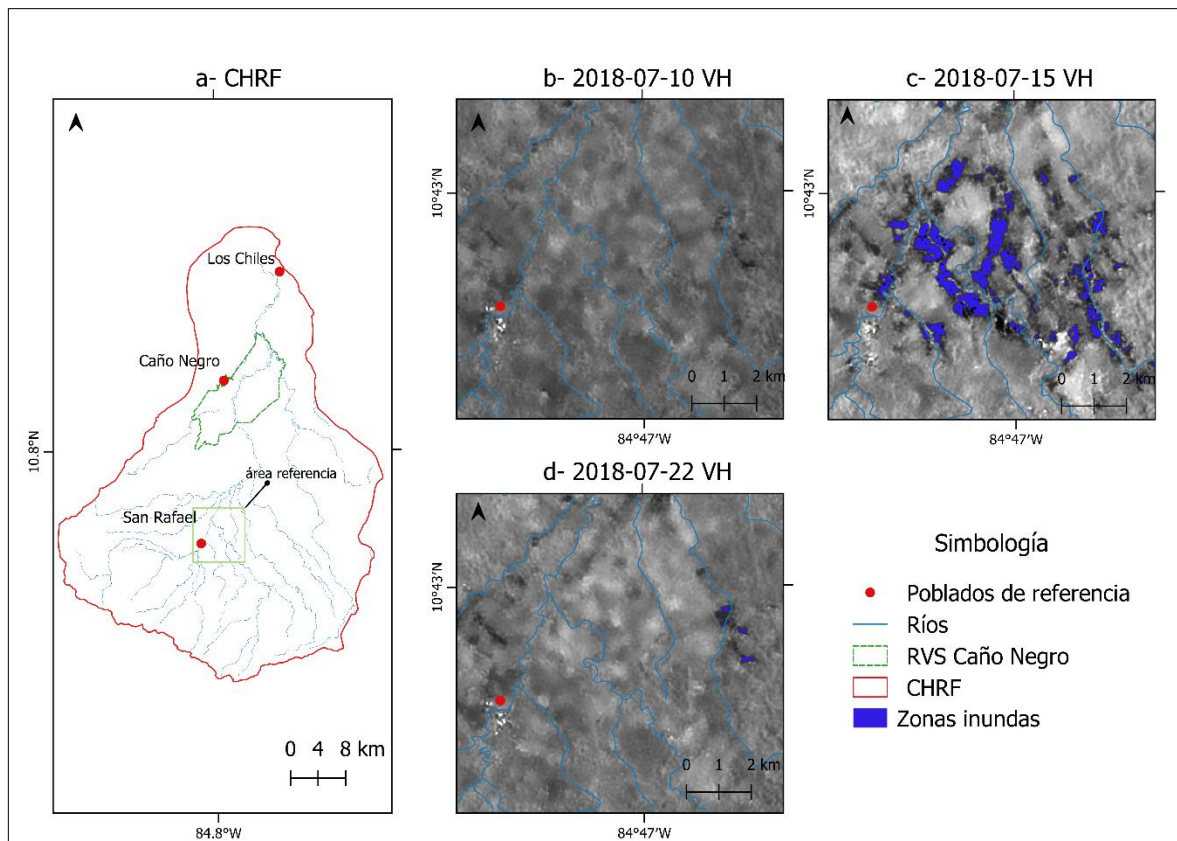


Figura 3.8. Sector inundado en las cercanías de San Rafael de Guatuso, para el evento de inundación extraordinario del 2018-07-15. a- Cuenca hidrográfica Río Frío. b-Área de referencia para el 2018-07-10 con la polarización VH. c- Sector de referencia para el 2018-07-15 para la polarización VH, en el que se muestran las zonas inundadas. d- Sector de referencia para el 2018-07-22 para la polarización VH. Fuente: Elaboración propia, a partir de imágenes de Sentinel-1.

La medición del día 22 de julio de 2018 evidenció un incremento considerable del área inundada respecto al día 15 julio, con registros de 2499,72 ha en la polarización VV y 3239,54 en VH. En la Figura 3.6 (a y b) es posible observar estos valores de área inundada como registros atípicos o anómalos en el total de las mediciones de los meses de julio. Estas coberturas inundadas se pueden asociar a las condiciones de saturación de los suelos,

provocadas por las fuertes lluvias en días previos, así como a los efectos del paso de la onda tropical número 17 el día 18 de julio (G. Chinchilla, 2018).

Las coberturas inundadas detectadas se distribuyen principalmente en el sector norte de la cuenca. En la Figura 3.9 se muestra un ejemplo de una zona inundada en la confluencia del río Sabogal y Río Frío, así como en las cercanías del poblado de los Chiles. Es importante destacar que la mayoría de las zonas de inundación registradas se encuentran sobre ecosistemas de humedales (SINAC-PNUD-GEF, 2018), lo que refleja la importancia de estos en la contención de inundaciones. No obstante, como se mencionó en el análisis socioecológico (SES), gran cantidad de estos humedales tienen usos de la tierra agropecuarios. Por lo que es necesario información detallada y actualizada de usos de la tierra para estimar el impacto de las inundaciones sobre las actividades antrópicas en la CHRf.

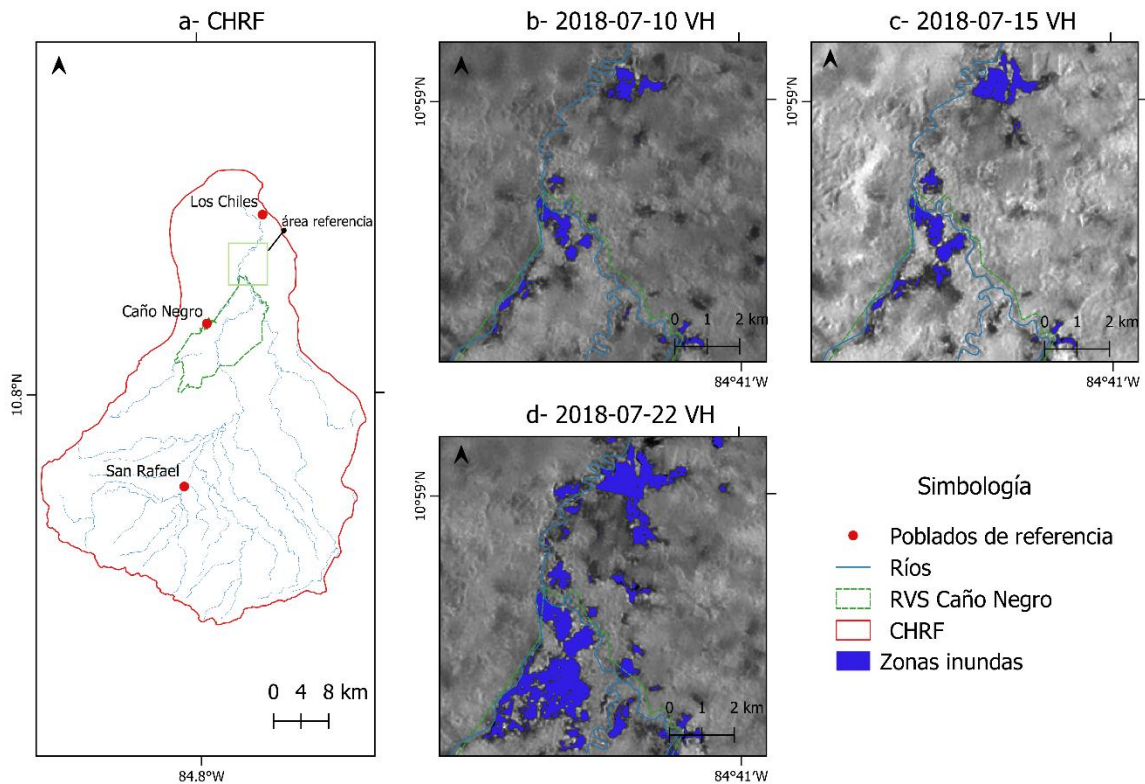


Figura 3.9. Sector inundado en la confluencia del Río Frío y el río Sabogal, para el evento de inundación extraordinario del 2018-07-22. a- Cuenca hidrográfica Río Frío. b-Área de referencia para el 2018-07-10 con la polarización VH. c- Sector de referencia para el 2018-07-15 para la polarización VH. d- Sector de referencia para el 2018-07-22 para la polarización VH en el que se muestran las zonas inundadas. Fuente: Elaboración propia, a partir de imágenes de Sentinel-1.

Para el evento de inundación extraordinario identificado el 17 de julio de 2019, se denota una distribución espacial de las coberturas inundadas muy similar al descrito para la observación del 22 de julio de 2018. Con acumulados de área inundada ligeramente inferiores, con 1862,79 para la polarización VV y 2751,73 ha para VH. Este evento puede asociarse a las condiciones de saturación de los suelos en la CHRF, producto de intensas lluvias durante todo el mes. Sumado a los efectos de la tormenta tropical número 14 del día 14 de julio, que

ocasionó lluvias de variada intensidad principalmente en la Zona Norte y Caribe del país (M. Chinchilla, 2019). Lluvias que en la CHRF se concentraron en la cuenca baja con más de 100 mm de lluvia en la estación Caño Negro en un lapso 8 de horas entre el 14 y 15 de julio.

Tendencia espaciotemporal agosto 2017-2020

Durante los meses de agosto se registra una leve disminución de las áreas de inundación respecto al mes de julio. Cambio que se puede expresar a partir de la disminución de los valores promedio (1091,54 ha para VV y 1383,22 ha para VH) y mediana (1027,28 ha para VV y 1340,19 ha para VH), ver Figura 6 (a y b). De igual forma, durante este mes es posible apreciar mediciones de área inundada más altas en la primera parte del mes, mismas que se van reduciendo gradualmente. Lo anterior, coincide con la disminución de las lluvias en la CHRF respecto al mes de julio, en especial en la parte baja de la cuenca, como se evidencia en los datos de la estación Caño Negro, Figura 6 (c, d y e). Lo que favorece la disminución de las áreas inundadas y su frecuencia. Las mayores concentraciones y frecuencia de coberturas inundadas se concentran en el sector más al norte de la CHRF (ver Figura 3.15, 3.16, 3.17 y 3.18).

Si bien, lo anterior corresponde con el comportamiento típico registrado para los meses de agosto. Tanto en la Figura 3.2 como en la Figura 3.6 (a y b) es posible identificar en ambas polarizaciones, una medición de área inundada que supera significativamente los valores promedio de toda la serie temporal. Esto en la observación SAR del día 22 de agosto del 2019, en la que se midieron 1885,29 ha en la polarización VV y 2466,75 ha en VH. Dicha

inundación extraordinaria estuvo vinculada a lluvias intensas durante los días 18 al 20 de agosto, como parte de los efectos de la tormenta tropical número 26 (Vindas, 2019).

El incremento de las zonas inundadas se presentó en todos los sectores de la cuenca baja, en los márgenes del Río Frío, Sabogal y otros afluentes. En la Figura 10 se muestra un ejemplo en el que se incluyen zonas detectadas como inundadas en los márgenes del río Sabogal. Que permite resaltar la capacidad del método ejecutado en identificar inundaciones dispersas y de muy baja dimensión, las cuales son difíciles de detectar.

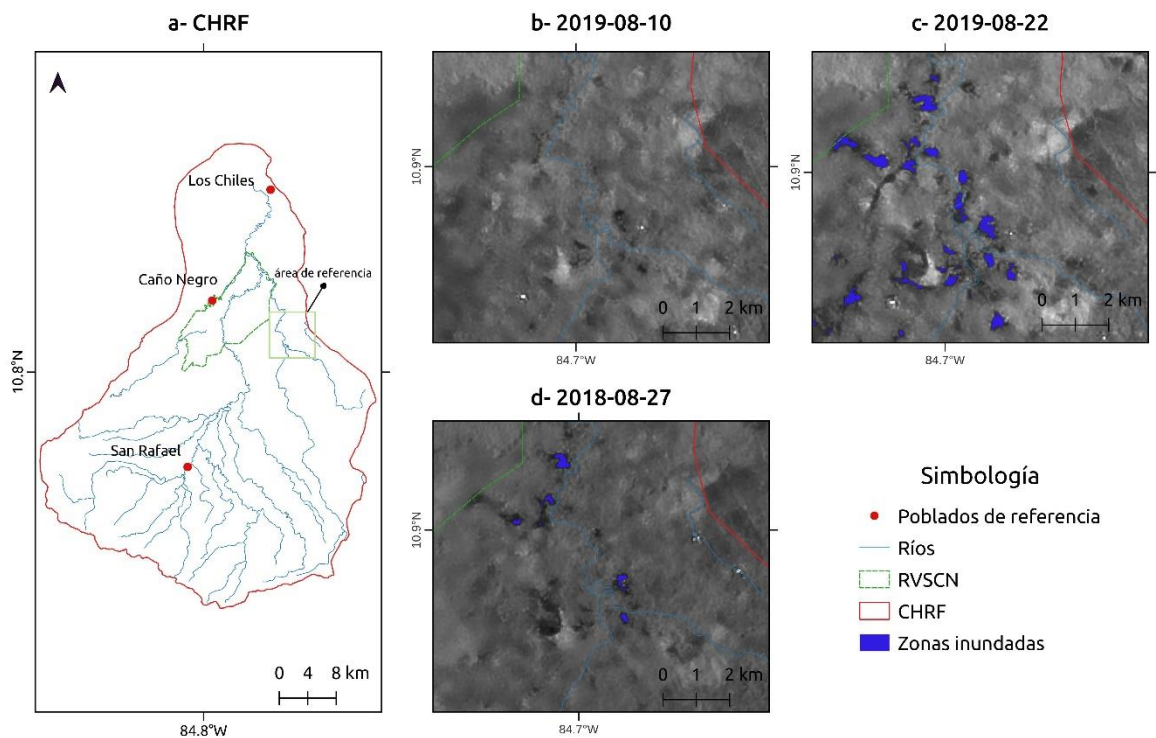


Figura 3.10. Sector inundado en márgenes del río Sabogal, para el evento de inundación extraordinario del 2019-08-22. a- Cuenca hidrográfica Río Frío. b-Área de referencia para el 2019-08-10 con la polarización VH. c- Sector de referencia para el 2018-08-22 para la polarización VH en el que se muestran las zonas inundadas. d- Sector de referencia para el 2018-08-27 para la polarización VH. Fuente: Elaboración propia, a partir de imágenes de Sentinel-1.

Tendencia espaciotemporal setiembre 2017-2020

Para los meses de setiembre sucede una disminución importante de la extensión de las coberturas inundadas respecto a los meses de julio y agosto. Que se refleja en la disminución de los valores promedio (926,77 ha en VV y 1122,55 ha en VH) y mediana (908,92 ha en VV y 1103,72 ha en VH) de área inundada. Muy similares a los estimados durante los meses de junio. En el que el 75% de los registros son inferiores a 1187,19 ha en VV y 1343,60 ha en VH. A lo que se debe agregar, las mediciones de área inundada más bajas de la serie temporal en la polarización VH. En la polarización VV hay registros equivalentes durante el mes de junio, tal y como se aprecia en la Figura 3.6 (a y b).

El análisis de inundación por píxel evidencia una clara disminución de la extensión de las coberturas inundadas y de su frecuencia. En el que áreas inundadas catalogadas como permanentes en meses previos se convierten en intermitentes o esporádicas durante setiembre. Las Figuras 3.15, 3.16, 3.17 y 3.18 reflejan este comportamiento en el sector de Caño Negro y en las cercanías del poblado Los Chiles.

Lo anterior, coincide con la disminución de las lluvias en la CHRF, registrada en todas las estaciones meteorológicas y en especial en la estación Volcán Tenorio (ver Figura 3.6 c, d y e). En el que además de apreciar una disminución de los acumulados promedios de precipitación, también es posible observar una baja dispersión del conjunto de datos. Que se refleja en el bajo rango típico de estos (ver Figura 3.6 c, d y e). Por lo que es posible inferir

una disminución de la saturación de los suelos en la cuenca y con ella la capacidad de mantener coberturas inundadas.

La Figura 3.6 (a, b, c y d) muestran un valor atípico o anómalo en los diagramas de caja durante este mes. Que en el caso de las mediciones de área inundada corresponden con la observación SAR del día 25 de setiembre de 2017. Con registros de 2591,89 ha para VH y 2907,41 para VV. Que se relacionan a un mes de setiembre particularmente lluvioso (Chaves, 2017). Así como al impacto de la onda tropical número 41, que ingresó al país el día 19 de setiembre y produjo lluvias en el Valle Central, toda la región Pacífica y en la Zona Norte (G. Chinchilla, 2017). Las estaciones Caño Negro y San Jorge midieron entre el 19 y el 25 de setiembre acumulados de 229 mm y 326 mm respectivamente, cifra que supera con diferencia los acumulados mensuales de setiembre en la serie temporal en solo unos días.

Las zonas inundadas detectadas durante este evento extraordinario se distribuyen a lo largo de los márgenes del Río Frío y el Río Sabogal, tanto en ecosistemas de humedales como no asociadas a estos. No obstante, se debe destacar que la medición de la polarización VV es mayor que la obtenida con VH. Lo cual es una característica inusual, debido a las diferencias en los mecanismos de interacción de la señal electromagnética entre las polarizaciones. El análisis de este resultado muestra una zona irregular clasificada como inundada por el procesamiento automático, ubicada al sur del poblado de San Rafael de Guatuso (ver Figura 3.11)

Esta zona se caracteriza por no seguir un patrón que responda a la disposición de las coberturas, y a los cambios en los mecanismos de retrodispersión que estas generan. De igual forma, dicha mancha de baja retrodispersión es extensa y continua (ver Figura 3.11 b y d), aspecto que no se ajusta a las características de las coberturas inundadas encontradas en la CHRF. Ya que usualmente se tratan de inundaciones dispersas a lo largo del territorio, a excepción de las lagunas del humedal Caño Negro.

A lo anterior, se debe agregar la información recuperada por el sensor Sentinel-2 el día 26 de setiembre de 2017 (un día después), en la que no es posible identificar evidencias que supongan la presencia de coberturas inundadas. Por tanto, se puede catalogar esta área como un falso positivo en la segmentación de la imagen. Se puede inferir que el origen de esta mancha de baja retrodispersión está vinculado a la presencia de lluvias intensas en esta zona al momento de la captura de la información. Ya que como menciona Woodhouse, (2006) la presencia de estas puede favorecer la atenuación de la señal electromagnética de microondas, en especial en longitudes de onda de la banda X y C.

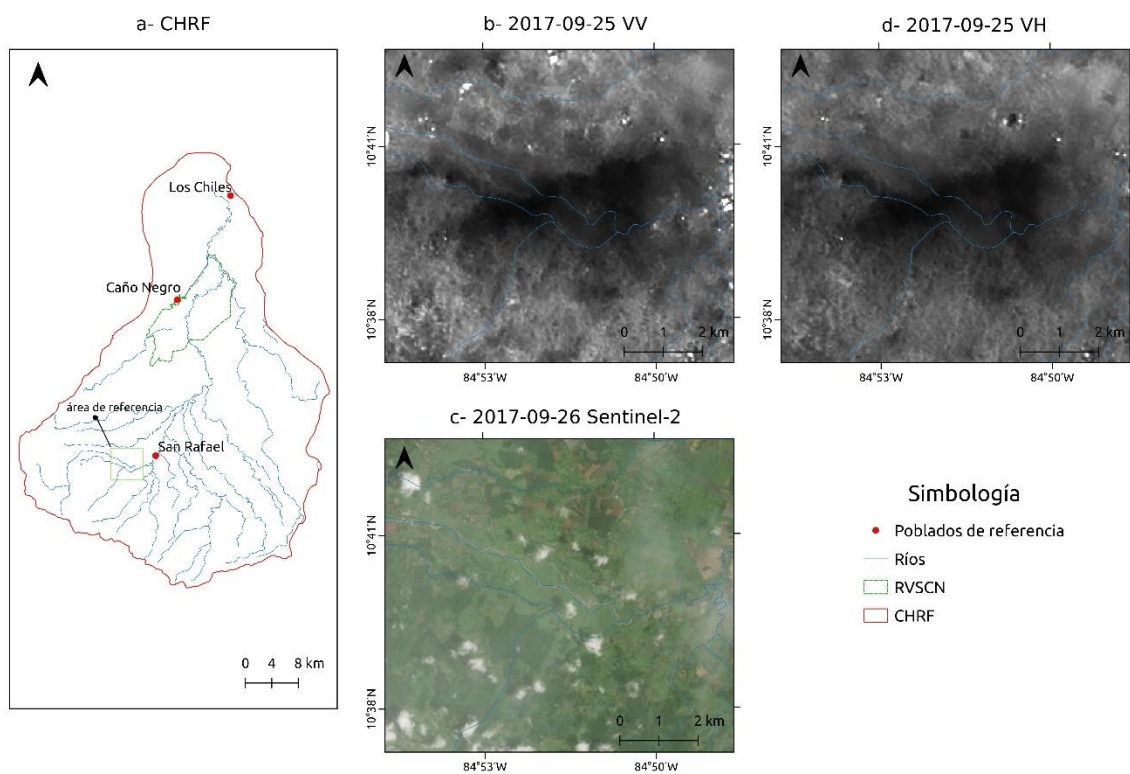


Figura 3.11. Área irregular de baja retrodispersión. a- Cuenca hidrográfica Río Frío. b- Área irregular para la polarización VV. c- Área irregular para la polarización VH. d- Imagen de Sentinel-2 de referencia. Fuente: Elaboración propia, a partir de imágenes Sentinel-1 y Sentinel-2.

Tendencia espaciotemporal octubre 2017-2020

Los meses de octubre muestran un leve incremento de las áreas inundadas respecto al mes de setiembre, que se refleja en valores promedio (1007,88 ha para VV y 1141,42 ha para VH) y de mediana (971,35 ha para VV y 1171,01 ha para VH) superiores, ver Figura 6 (a y b). En esta figura también se aprecia que la dispersión de los valores de área inundada son los más bajos de todo el periodo lluvioso. Que se puede constatar a partir del rango típico de valores (867,2 ha para VV y 1098,49 ha para VH) y del rango intercuartil (241,02 ha para VV y

407,68 ha para VH). Por tanto, se trata de un comportamiento homogéneo de las zonas inundadas, en el que no se identificaron eventos de inundación extraordinarios.

Lo anterior, se puede explicar a partir del comportamiento de la precipitación en la CHRF, en la que se debe contemplar las condiciones secas observadas durante los meses de setiembre. Que no favorecen la permanencia de coberturas inundadas. Para el mes de octubre se registra un incremento de las lluvias en todas las estaciones meteorológicas, aunque con acumulados mucho menores a los observados en meses como julio y agosto (ver Figura 6 c, d y e).

El aporte de las lluvias de octubre favorece el aumento de la frecuencia de inundación en los humedales lacustres del RNVS Caño Negro, respecto al mes de setiembre (ver Figura 3.17 y 3.18). Mientras que las zonas inundadas esporádicas se reducen considerablemente respecto a otros meses.

Tendencia espaciotemporal noviembre 2016-2020

Para los meses de noviembre, se aprecian métricas promedio (1001,4 ha para VV y 1153,4 ha para VH) y de mediana (913,6 ha para VV y 1040,06 ha para VH) de área inundada similares a las registradas durante el mes de octubre, Figura 6 (a y b). Que también se reflejan en la distribución espaciotemporal de estas coberturas, en el que las coberturas inundadas están localizadas principalmente en los ecosistemas de humedal lacustrinos del RNVS Caño Negro.

Sin embargo, durante los meses de noviembre en la Zona Norte del país son frecuentes fenómenos hidrometeorológicos, como; empujes fríos, ondas tropicales y el caso particular del huracán Otto en 2016 (G. Chinchilla, 2016; D. Poleo Brito, 2019; D. A. Poleo Brito, 2018; E. Solano, 2017). Estos se caracterizan por generar lluvias intensas en cortos periodos de tiempo, en el rango de horas o días en la CHRF. Estos incrementan drásticamente las áreas inundadas detectadas en las observaciones SAR. Un ejemplo de esto son los efectos del huracán Otto.

El huracán Otto ingresó a territorio de Costa Rica el día 24 de noviembre en el cantón de Los Chiles (parte de la CHRF), generando precipitaciones intensas en toda la Zona Norte en muy pocas horas (IMN, 2016). Las estaciones Caño Negro y San Jorge entre las 4:00 pm y 7:00 pm registraron acumulados de precipitación de 129 mm y 70,8 mm respectivamente. En la zona montañosa de la Zona Norte, Quesada-Román & Villalobos-Chacón (2020) mencionan que sobre el volcán Miravalles precipitaron aproximadamente 300 mm en 6 horas durante el paso del huracán.

A las lluvias intensas se debe agregar la rápida transición entre los complejos volcánicos y el piedemonte con las llanuras aluviales, detallado por Quesada-Román & Villalobos-Chacón, (2020) para las cuencas hidrográficas del cantón Upala. Aunque es posible encontrar un escenario similar en la CHRF. Dicho escenario dio paso a inundaciones rápidas en la cuenca, que se caracterizaron por el transporte de cantidades importantes de flujos de lodos, detritos y escombros que fueron depositados en las llanuras aluviales (Hernandez et al., 2017).

Este evento de inundación extraordinario fue detectado por la observación SAR del día 28 de noviembre de 2016, cuyo registro está disponible únicamente con la polarización VV. En el que se estimaron 1888,96 ha de área inundada, cifra mucho menor a la registrada en otros eventos extraordinarios, aunque supone un aumento exponencial respecto a la observación SAR del día 17 de noviembre de 2016, en la que se detectaron 610,88 ha.

La baja extensión de las áreas inundadas detectadas respecto a otros eventos de inundación extraordinarios, como los registrados durante julio de 2018 o diciembre de 2016 y 2019, se pueden explicar a partir de dos factores. El más relevante está vinculado a la diferencia temporal entre el paso del sensor Sentinel-1 y el pico de inundación, que en este caso es de aproximadamente 4 días. Por lo que el área inundada pudo verse seriamente reducida, al menos desde la perspectiva de los mecanismos de retrodispersión.

El siguiente factor está asociado al efecto del arrastre de gran cantidad de materiales de cuenca alta a cuenca baja, estos implican cambios en los mecanismos de retrodispersión, ya que afectan la rugosidad de las coberturas inundadas. Por lo que no propician mecanismos de retrodispersión especular consistentes, de ahí que no serían segmentados en la clase inundada por el procesamiento automático.

En la Figura 3.12 se muestra un ejemplo de zonas inundadas generadas por el huracán Otto en los márgenes del Río Frío en dirección de San Rafael de Guatuso.

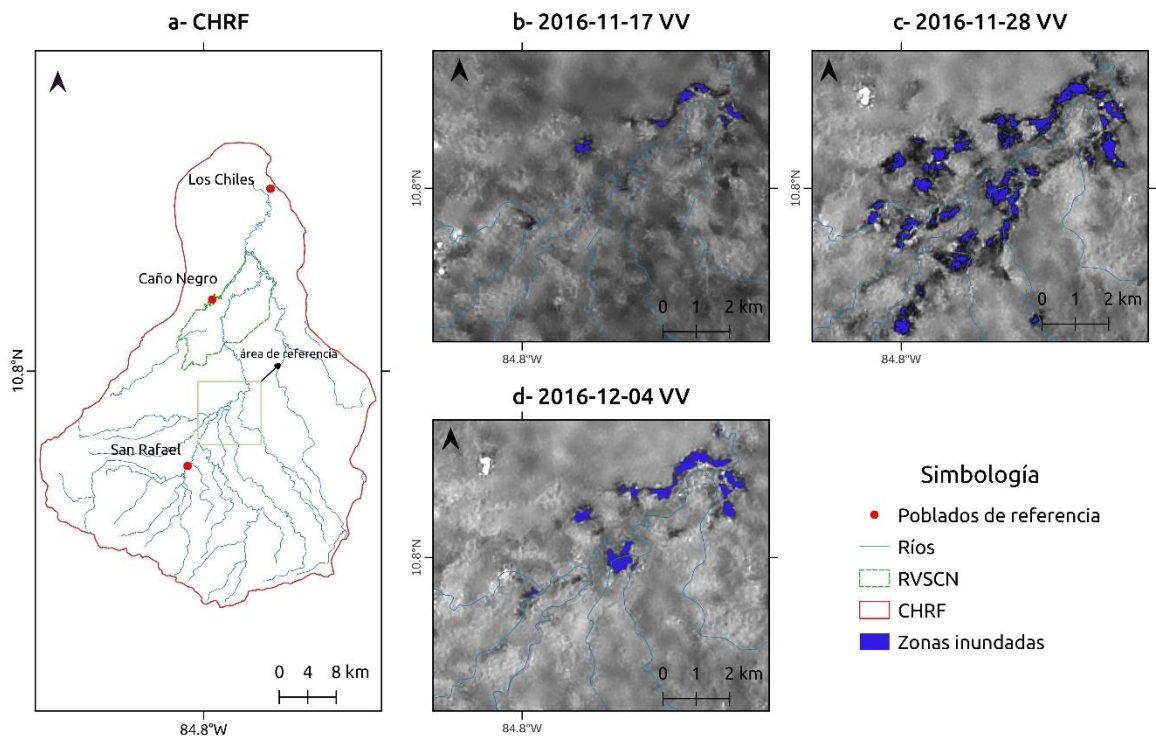


Figura 3.12. Sector inundado en márgenes del Río Frío en dirección de San Rafael de Guatuso, para el evento de inundación extraordinario del 2016-11-28. a- Cuenca hidrográfica Río Frío. b-Área de referencia para el 2016-11-17 con la polarización VV. c- Sector de referencia para el 2016-11-28 para la polarización VV, en el que se muestran las zonas inundadas. d- Sector de referencia para el 2016-12-04 para la polarización VV. Fuente: Elaboración propia, a partir de imágenes de Sentinel-1.

Tendencia espaciotemporal diciembre 2016-2020

Los meses de diciembre muestran la mayor variabilidad en los registros de áreas inundadas y de precipitación de los meses que componen el periodo lluvioso en la CHRF. Que se evidencia en el amplio rango típico de los diagramas de caja expuestos en la Figura 3.6. Donde es posible encontrar mediciones muy bajas de área inundada, similares a las de meses como junio y setiembre, pero también las mediciones más altas de la serie temporal. Lo anterior, se puede atribuir a meses de diciembre muy secos como el de 2018 y 2020 y muy

lluviosos como el caso de 2016, esto según datos de las estaciones meteorológicas en la cuenca.

La distribución espaciotemporal de las coberturas inundadas durante este mes es un buen reflejo de esa variabilidad, en el que las áreas inundadas esporádicas muestran una expansión importante en todos los sectores de la cuenca (ver Figura 3.15, 3.16, 3.17, 3.18, 3.19 y 3.20). En el caso de las áreas permanentes se concentran en las áreas de humedales lacustres manteniéndose sin cambios significativos, muy similar a lo reflejado en meses previos.

Las zonas de baja frecuencia de inundación están potenciadas por eventos de inundación extraordinarios, como los sucedidos en diciembre de 2016 y de 2019. En la Figura 3.6 (a y b) es posible apreciar valores anómalos de área inundada vinculado a estos eventos, mismos que son muy superiores a cualquier otra medición de la serie temporal. A continuación, se detalla cada uno de estos:

En la observación SAR del día 22 de diciembre de 2016 se detectó un área inundada superior a la media de toda la serie temporal (Cuadro 3.2), con 3917,63 ha en la polarización VV (no hay disponibilidad de VH). Este evento de inundación extraordinario se puede explicar a partir de las probables condiciones de alta saturación de los suelos en la cuenca, como resultado del paso del huracán Otto en noviembre del mismo año. A lo que se debe añadir las lluvias constantes a lo largo del mes, que provocaron excesos entre de precipitación entre los 25 mm hasta los 315 mm en la Zona Norte (Naranjo Díaz, 2016). En la CHRF durante este mes se midieron acumulados de lluvia de 413,4 mm en la estación Caño Negro y 513 mm en

la estación San Jorge. De los cuales 111 mm se registraron entre el 20 y 21 de diciembre en la estación San Jorge.

Este escenario de lluvias intensas favoreció la presencia de coberturas inundadas en múltiples sectores de la CHRF, tanto asociados con ecosistemas de humedal como no asociadas a estos. A diferencia de otros eventos extraordinarios, este no se puede catalogar como un evento de inundación rápida, sino como una inundación gradual. En el que, además, existe una buena correlación temporal entre el pico de inundación y la observación SAR. Por otro lado, diversas noticias destacan afectaciones a los medios de vida producto de estas inundaciones en la cuenca (Madrigal & Arguedas, 2016; Rojas, 2016).

La Figura 3.13 detalla las coberturas inundadas detectadas en la observación SAR del día 22 de diciembre de 2016, esto en el mismo sitio de la Figura 3.12. En este es posible observar un aumento significativo de las coberturas inundadas respecto a las detectadas para el huracán Otto.

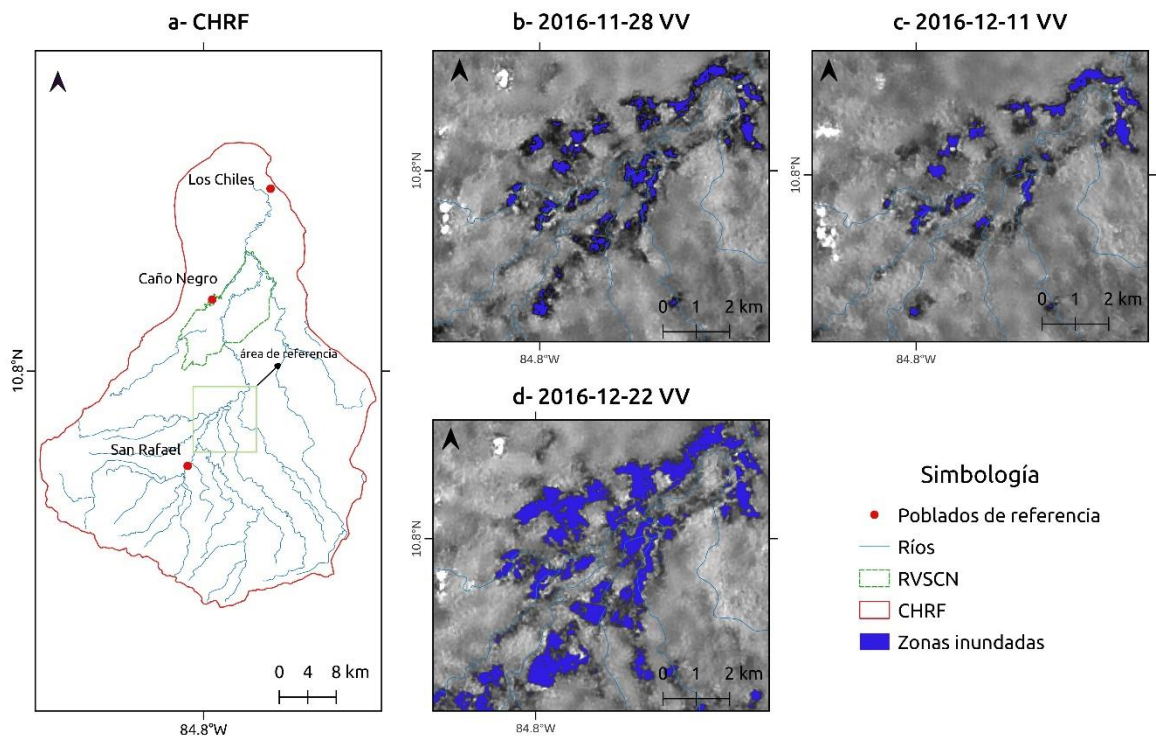


Figura 3.13. Sector inundado en márgenes del Río Frío en dirección de San Rafael de Guatuso, para el evento de inundación extraordinario del 2016-12-22. a- Cuenca hidrográfica Río Frío. b-Área de referencia para el 2016-11-28 con la polarización VV. c- Sector de referencia para el 2016-12-11 para la polarización VV. d- Sector de referencia para el 2016-12-22 para la polarización VV, en el que se muestra en incremento de las zonas inundadas. Fuente: Elaboración propia, a partir de imágenes de Sentinel-1.

Un escenario similar se presentó durante diciembre de 2019, en el que durante los últimos días del mes de noviembre se registraron lluvias intensas en la Zona Norte, como parte de los efectos de las ondas tropicales número 53 y 54 (D. Poleo Brito, 2019). Entre los días 27 y 29 de noviembre, la estación meteorológica Volcán Tenorio midió 231,6 mm de lluvia, la estación San Jorge 160 mm y la estación Caño Negro 129,6 mm. Provocando un incremento

importante de las áreas inundadas, que se refleja en la observación SAR del 01 de diciembre, donde la polarización VV registró 2453,63 ha y la polarización VH 2693,77 ha.

El 5 y 6 de diciembre de 2019 se presentaron los efectos del frente frío número 2, en el que la mayor cantidad de lluvia cayó en la Zona Norte y Caribe del país, con acumulados de 100 mm en 24 horas (E. Solano & Vindas, 2019). En la CHRF los mayores registros de precipitación se presentaron el día 5, donde en la estación Volcán Tenorio se midieron acumulados de 92,6 mm, cifra similar en la estación San Jorge con 92,8 mm y en la estación Caño Negro 56,8 mm.

Lo anterior, implicó un aumento de las coberturas inundadas en la observación SAR del día 8 de diciembre respecto a la observación anterior. En la polarización VV se midieron 4028,88 ha y 4602,86 ha en VH, siendo esta la medición más alta en toda la serie temporal. Las zonas inundadas se distribuyen en múltiples sectores de toda la CHRF, tanto en los márgenes del Río Frío como en muchos de sus afluentes. Para este evento se registran daños a los medios de vida de la población, específicamente en el cantón de Guatuso (Navarro, 2019; D. Quesada, 2019). En la Figura 3.14 se detalla un sector que muestra la evolución de las áreas inundadas durante este evento.

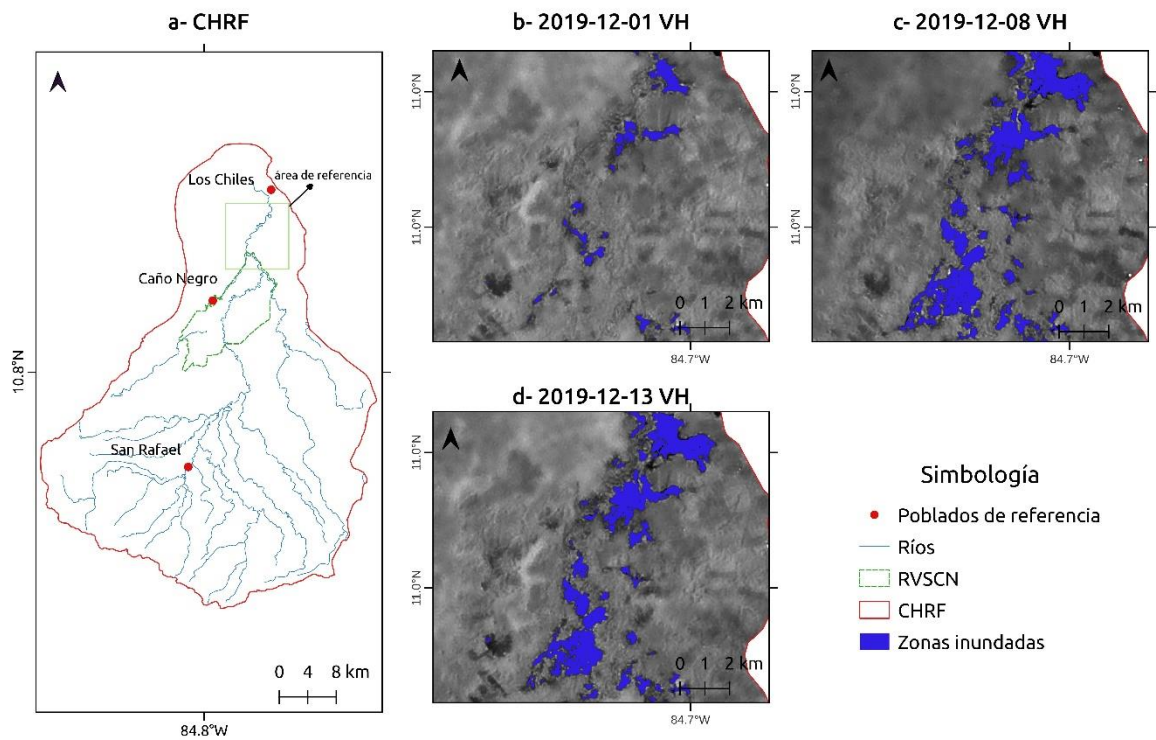


Figura 3.14. Sector inundado al norte de Caño Negro en dirección de los Chiles, para el evento de inundación extraordinario del 2019-12-08. a- Cuenca hidrográfica Río Frío. b-Área de referencia para el 2019-12-01 con la polarización VH. c- Sector de referencia para el 2019-12-08 para la polarización VH, en el que se muestra el incremento de las zonas inundadas. d- Sector de referencia para el 2019-12-13 para la polarización VH, en este se aprecia como una gran parte de las coberturas inundadas se mantienen. Fuente: Elaboración propia, a partir de imágenes de Sentinel-1.

A continuación, se muestran las figuras asociadas al análisis de frecuencia de inundación. En el que cada píxel está asociado a la temporalidad con la que fue etiquetado como inundado.

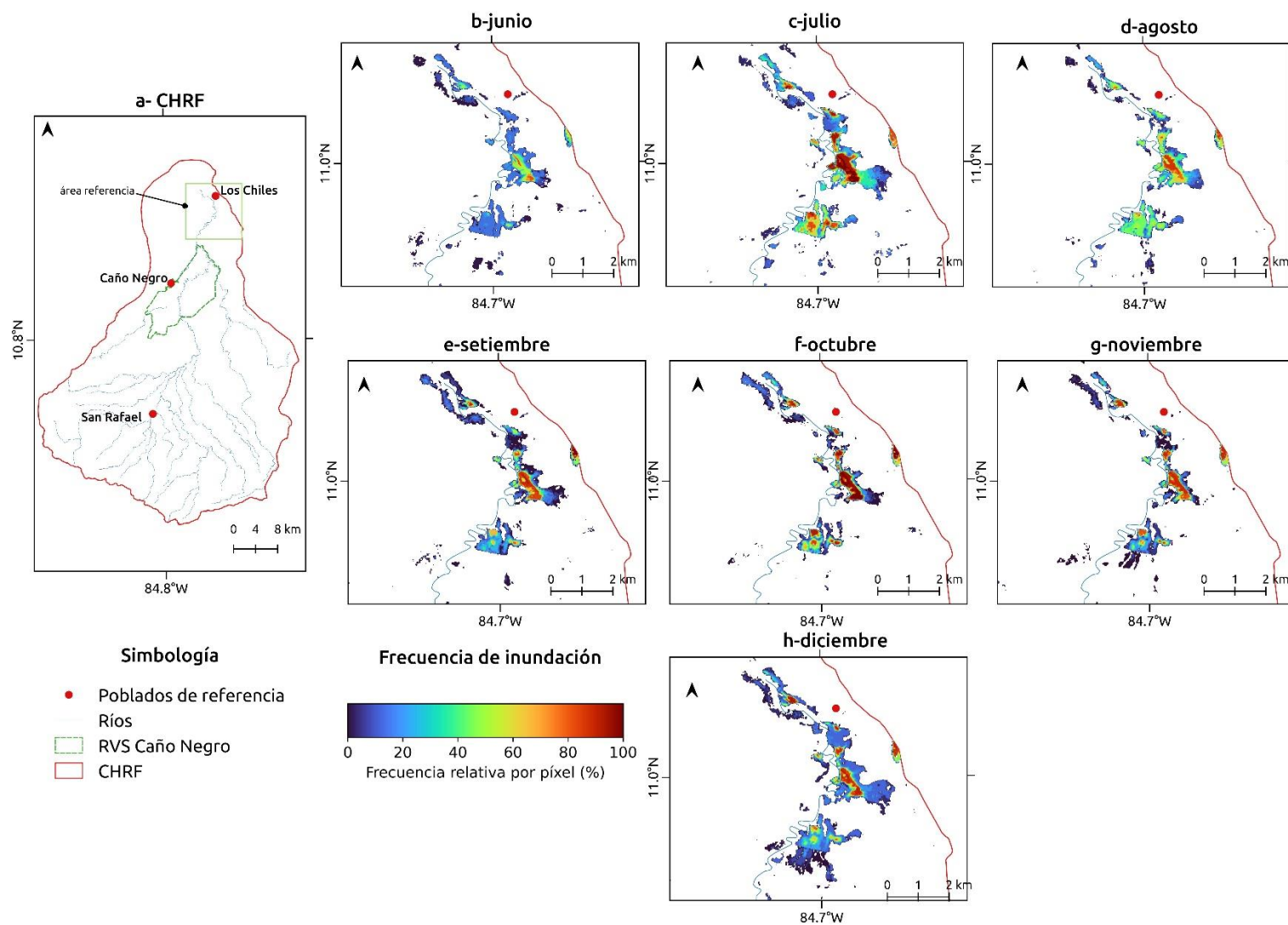


Figura 3.15. Frecuencia de inundación por píxel y por mes del periodo lluvioso en la CHRF, para la polarización VV. Sector Los Chiles. a- CHRF. b- frecuencia por píxel para los meses de junio. c- frecuencia por píxel para los meses de julio. d- frecuencia por píxel para los meses de agosto. e- frecuencia por píxel para los meses de setiembre. f- frecuencia por píxel para los meses de octubre. g- frecuencia por píxel para los meses de noviembre. h- frecuencia por píxel para los meses de diciembre. Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes Sentinel-1.

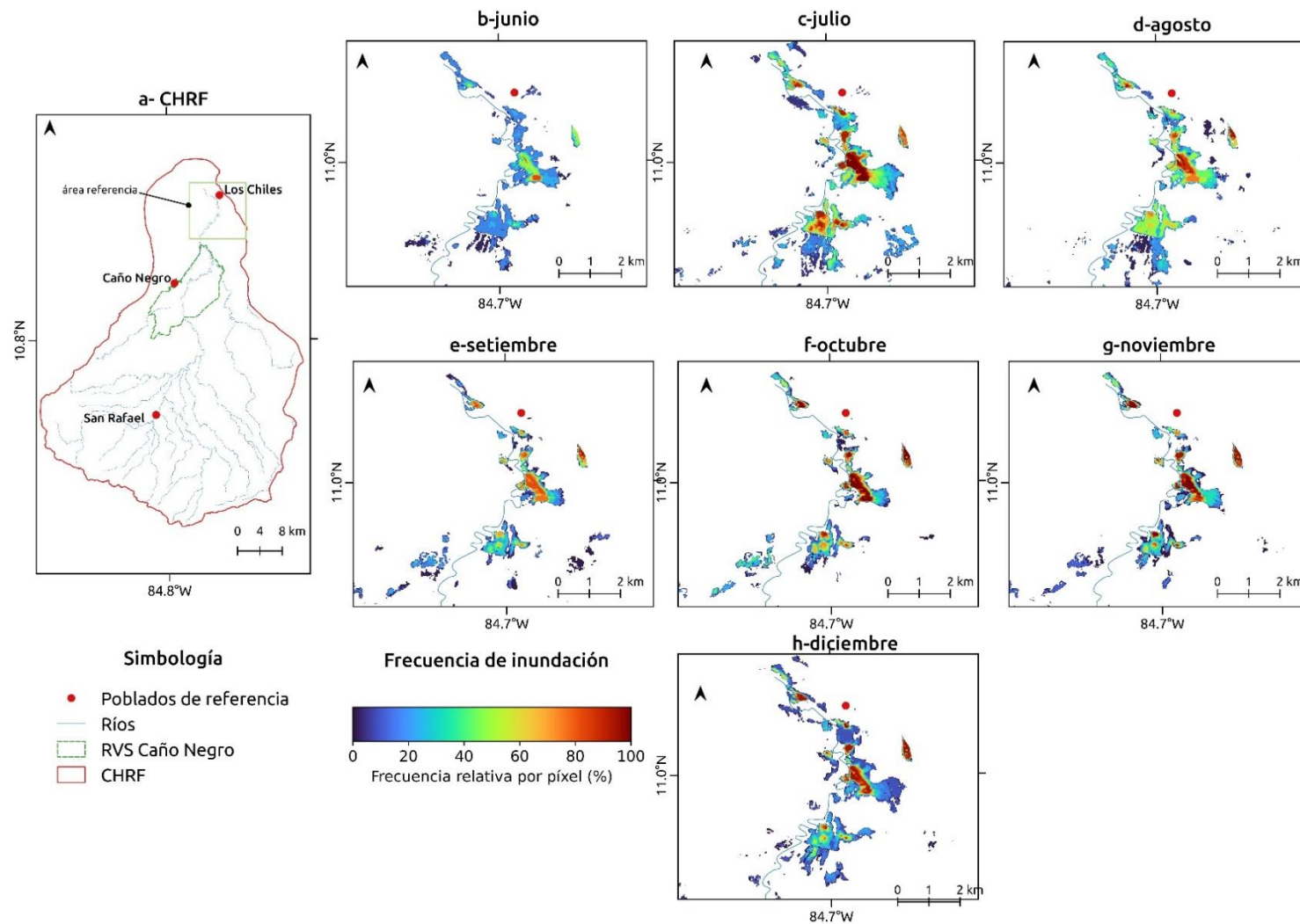


Figura 3.16. Frecuencia de inundación por píxel y por mes del periodo lluvioso en la CHRF, para la polarización VH. Sector Los Chiles. a- CHRF. b- frecuencia por píxel para los meses de junio. c- frecuencia por píxel para los meses de julio. d- frecuencia por píxel para los meses de agosto. e- frecuencia por píxel para los meses de setiembre. f- frecuencia por píxel para los meses de octubre. g- frecuencia por píxel para los meses de noviembre. h- frecuencia por píxel para los meses de diciembre. Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes Sentinel-1.

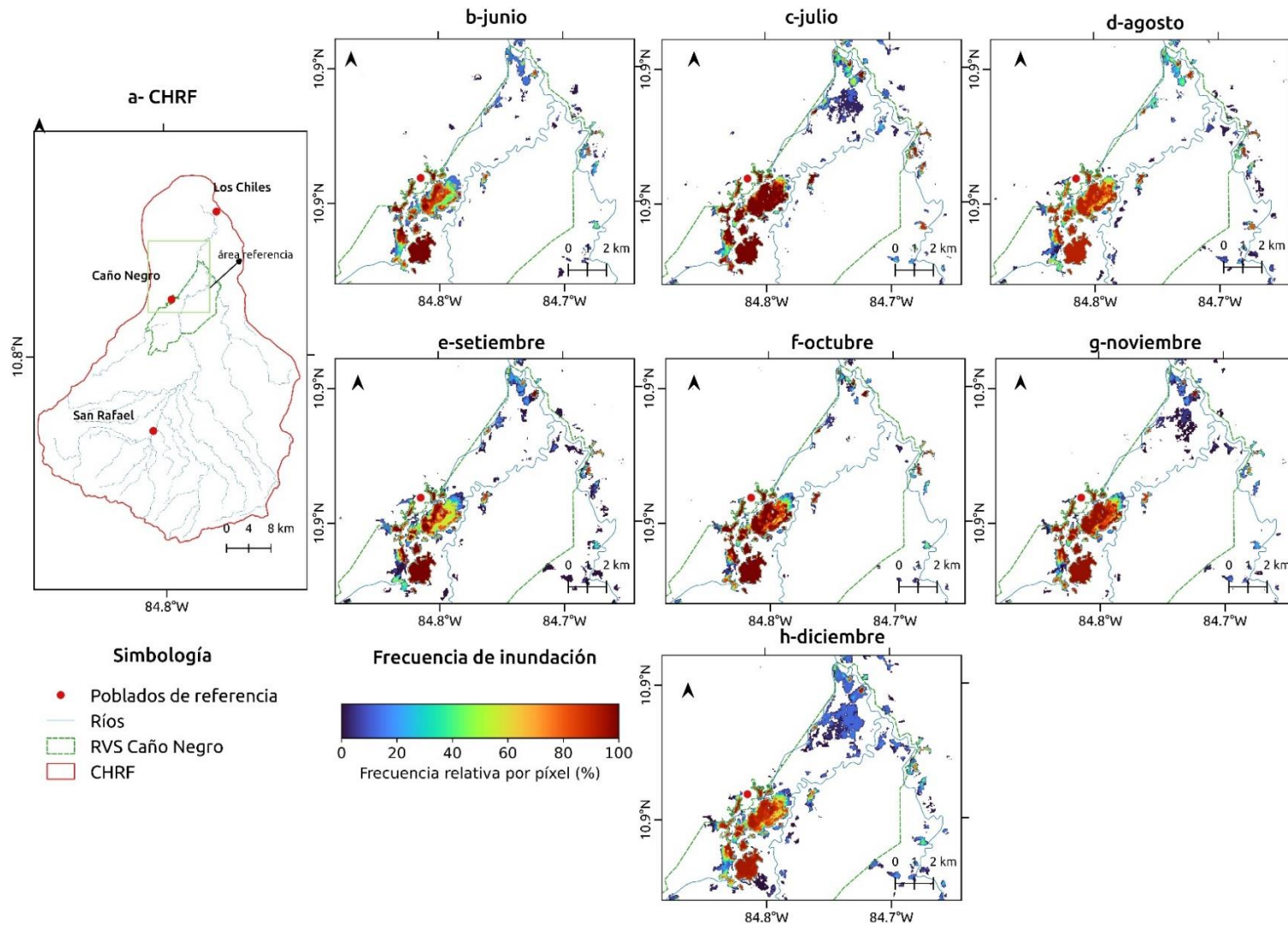


Figura 3.17. Frecuencia de inundación por píxel y por mes del periodo lluvioso en la CHRf, para la polarización VV. Sector Caño Negro. a- CHRf. b- frecuencia por píxel para los meses de junio. c- frecuencia por píxel para los meses de julio. d- frecuencia por píxel para los meses de agosto. e- frecuencia por píxel para los meses de setiembre. f- frecuencia por píxel para los meses de octubre. g- frecuencia por píxel para los meses de noviembre. h- frecuencia por píxel para los meses de diciembre. Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes Sentinel-1.

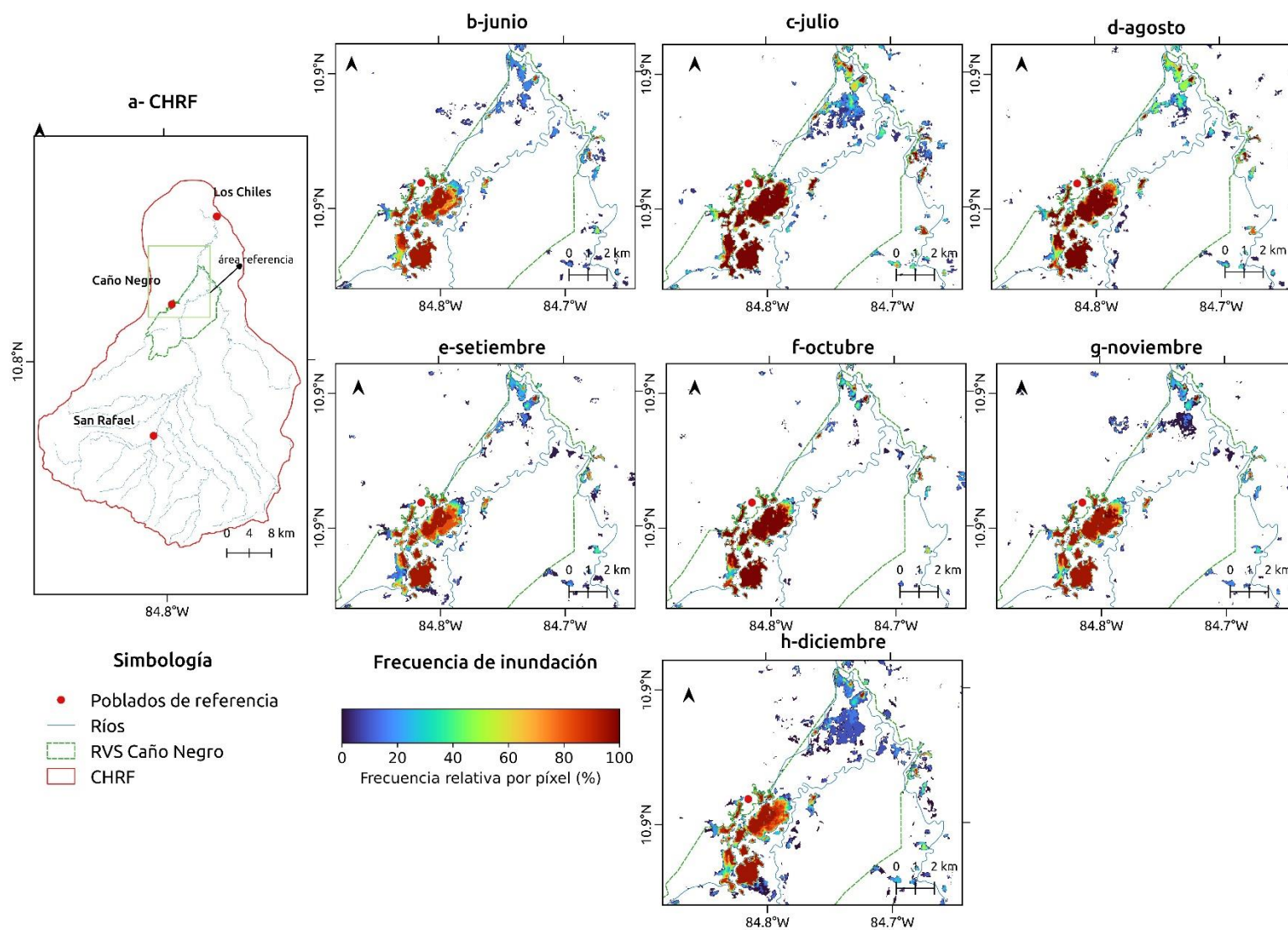


Figura 3.18. Frecuencia de inundación por píxel y por mes del periodo lluvioso en la CHRF, para la polarización VH. Sector Caño Negro. a- CHRF. b- frecuencia por píxel para los meses de junio. c- frecuencia por píxel para los meses de julio. d- frecuencia por píxel para los meses de agosto. e- frecuencia por píxel para los meses de setiembre. f- frecuencia por píxel para los meses de octubre. g- frecuencia por píxel para los meses de noviembre. h- frecuencia por píxel para los meses de diciembre. Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes Sentinel-1.

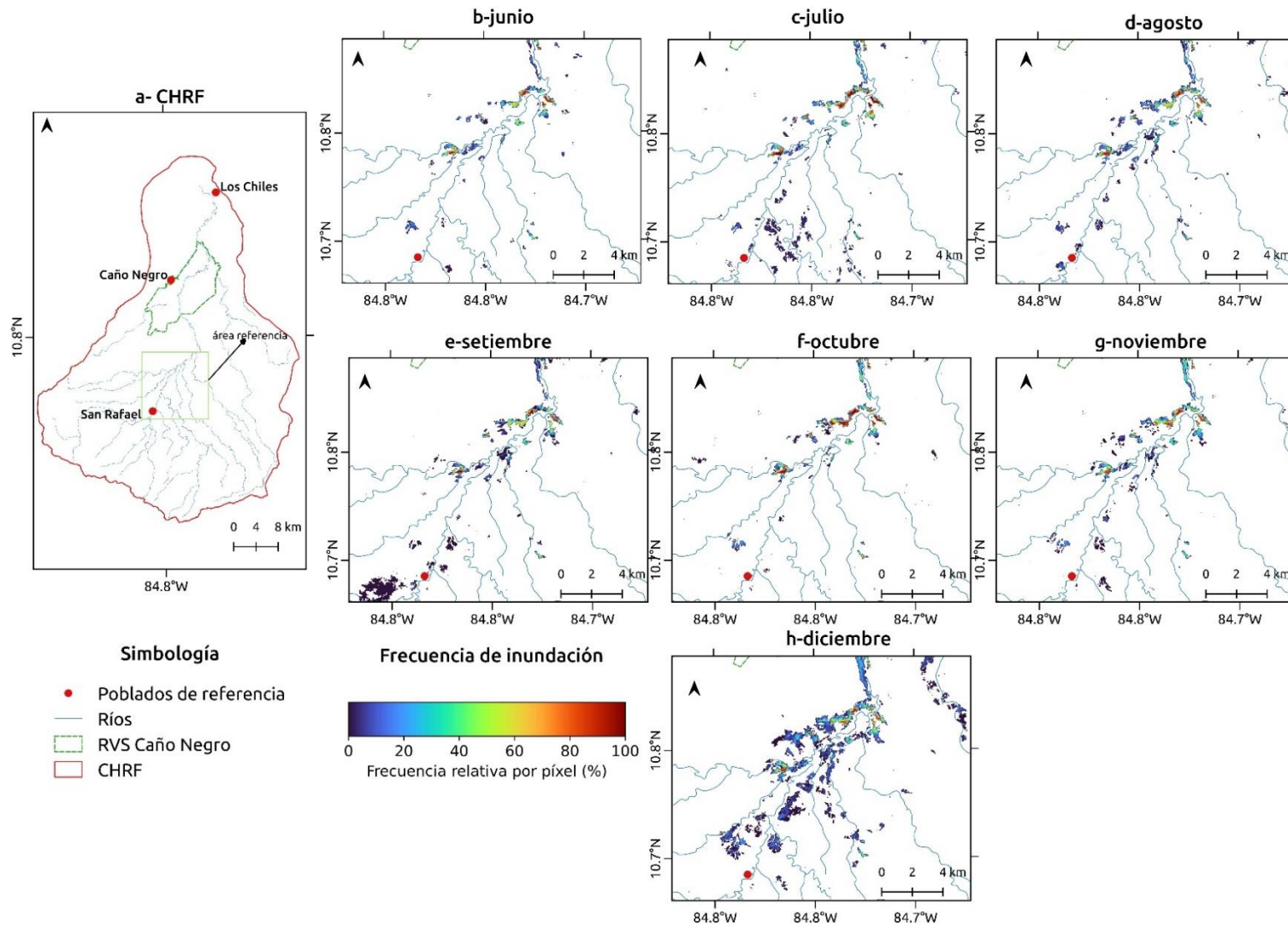


Figura 3.19. Frecuencia de inundación por píxel y por mes del periodo lluvioso en la CHRF, para la polarización VV. Sector San Rafael. a- CHRF. b- frecuencia por píxel para los meses de junio. c- frecuencia por píxel para los meses de julio. d- frecuencia por píxel para los meses de agosto. e- frecuencia por píxel para los meses de setiembre. f- frecuencia por píxel para los meses de octubre. g- frecuencia por píxel para los meses de noviembre. h- frecuencia por píxel para los meses de diciembre. Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes Sentinel-1.

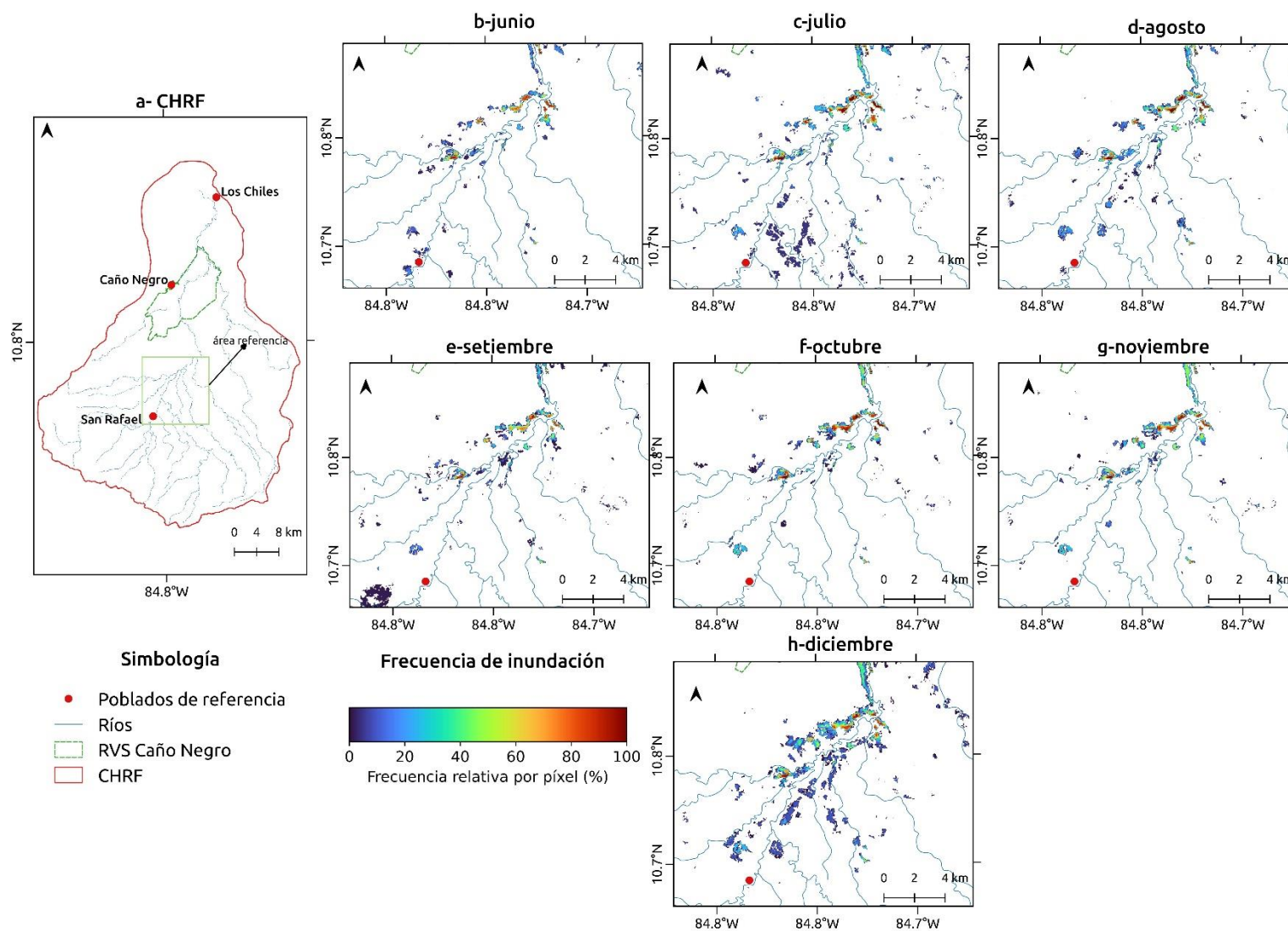


Figura 3.20. Frecuencia de inundación por píxel y por mes del periodo lluvioso en la CHRF, para la polarización VH. Sector San Rafael. a- CHRF. b- frecuencia por píxel para los meses de junio. c- frecuencia por píxel para los meses de julio. d- frecuencia por píxel para los meses de agosto. e- frecuencia por píxel para los meses de setiembre. f- frecuencia por píxel para los meses de octubre. g- frecuencia por píxel para los meses de noviembre. h- frecuencia por píxel para los meses de diciembre. Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes Sentinel-1.

Validación de zonas inundadas

Para la validación numérica se utilizaron 4 sectores de la CHRF, en los que existe una visualización adecuada de las coberturas inundadas, en imágenes ópticas del sensor Sentinel-2. Estos sectores se distribuyen a lo largo de la cuenca, así como en diversos momentos de la serie temporal.

El Cuadro 3.4 y la Figura 3.21 muestran los resultados del proceso de validación para cada uno de los 4 sectores, en el que se detallan las métricas de precisión del productor (PP), precisión del usuario (PU), precisión global (PG) e índice Kappa. Sumado a la distribución espacial de las áreas de concordancia, errores de omisión y comisión. Lo anterior, para cada polarización y clase semántica (inundado y no inundado).

Cuadro 3.4. Métricas de precisión para cada sector de validación de la CHRF

| Sector | Fecha S1 | Fecha S2 | Polarización | PP(%) | | PU(%) | | PG(%) | kappa |
|----------|------------|------------|--------------|----------|-------------|----------|-------------|-------|-------|
| | | | | inundado | no inundado | inundado | no inundado | | |
| Sector A | 2017-09-25 | 2017-09-26 | VV | 80,3 | 97,96 | 90,69 | 95,26 | 94,5 | 0,81 |
| | | | VH | 79,63 | 98,1 | 91,21 | 95,11 | 94,4 | 0,81 |
| Sector B | 2017-09-25 | 2017-09-26 | VV | 60,76 | 98,92 | 82,27 | 96,84 | 96,02 | 0,67 |
| | | | VH | 56,81 | 99,04 | 83,12 | 96,5 | 95,81 | 0,65 |
| Sector C | 2018-07-27 | 2018-07-30 | VV | 77,06 | 84,87 | 75,22 | 86,12 | 81,95 | 0,61 |
| | | | VH | 79,79 | 80,21 | 69,56 | 87,51 | 80,06 | 0,58 |
| Sector D | 2019-12-08 | 2019-12-10 | VV | 82,65 | 96,38 | 68,39 | 98,32 | 95,2 | 0,72 |
| | | | VH | 84,21 | 95,35 | 61,13 | 98,58 | 94,46 | 0,67 |

Fuente: Elaboración propia

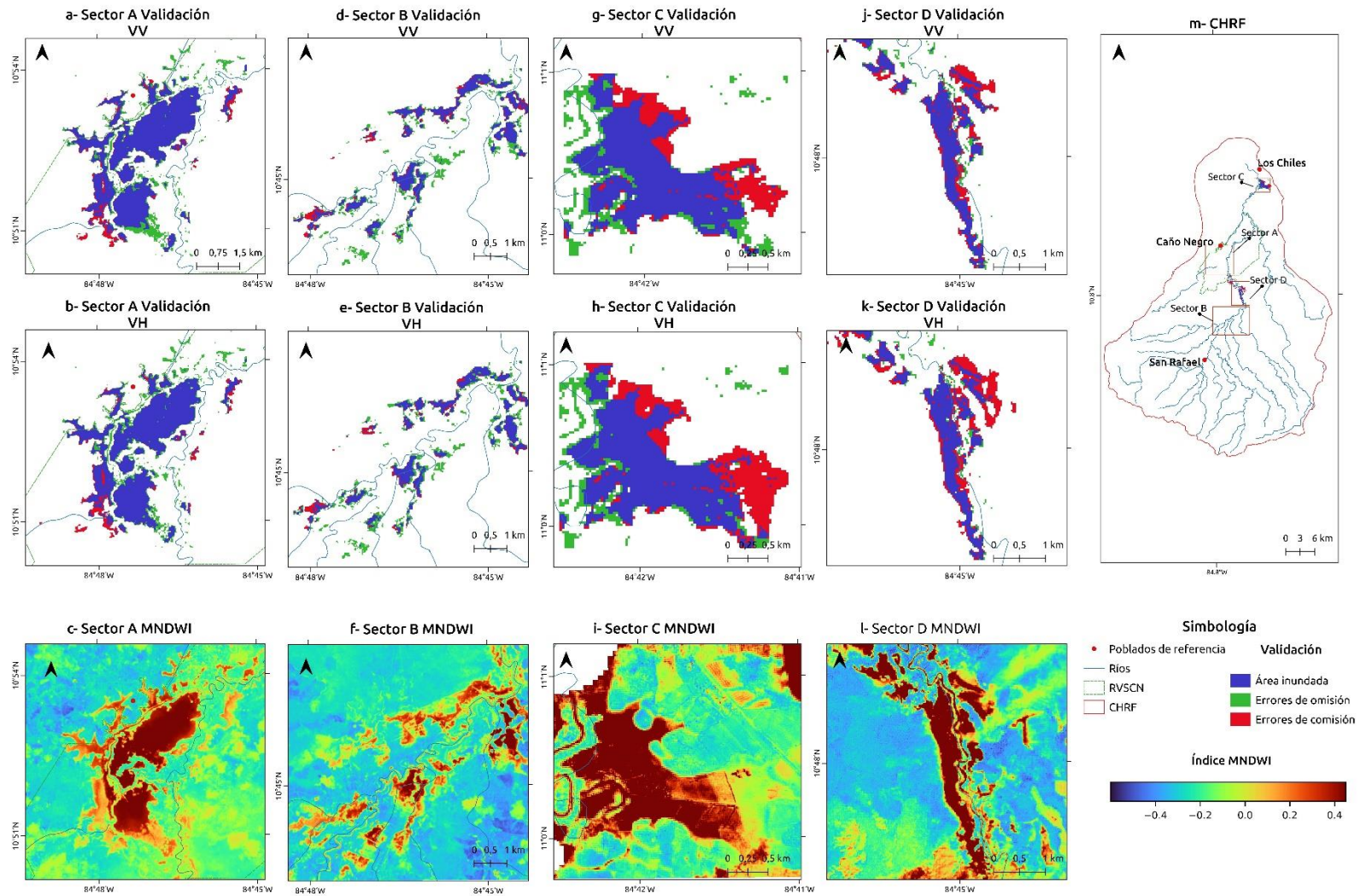


Figura 3.21. Sectores de validación, errores de omisión y comisión. a- Sector A. Validación para polarización VV. b-Sector A. Validación para polarización VH. c- Sector A. Referencia de índice MNDWI. d- Sector B. Validación para polarización VV. e- Sector B. Validación para polarización VH. f- Sector B. Referencia de índice MNDWI. g- Sector C. Validación para polarización VV. h- Sector C. Validación para polarización VH. i- Sector C. Referencia de índice MNDWI. j- Sector D. Validación para polarización VV. k- Sector D. Validación para polarización VH. l- Sector D. Referencia de índice MNDWI. m- Cuenca hidrográfica Río Frío. Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes Sentinel-1 y Sentinel-2.

El Sector A se extiende en gran parte de las lagunas lacustres de Caño Negro, en el que se identifican coberturas inundadas permanentes a lo largo de la serie temporal. La validación numérica se ejecutó con la imagen Sentinel-1 del día 25 de setiembre del 2017, en la que se identificó un evento de inundación extraordinario, mientras que la imagen de referencia de Sentinel-2 es del día 26 de setiembre del mismo año.

La polarización VV y VH muestran métricas similares, con una precisión global (PG) de 94,5% y 94,4% respectivamente. A lo que se debe agregar valores de índice kappa de 0,81 en ambas polarizaciones, tratándose de un nivel de acuerdo muy bueno o casi perfecto según la clasificación propuesta por Landis & Koch, (1977). Se destaca un alto valor de precisión del Usuario (PU) para la clase inundado, con 90,69 % para la polarización VV y 91,21 % para VH. Lo anterior, implica errores de comisión bajos, como se detalla en la Figura 3.21 (a y b). En la precisión del productor (PP) para la clase inundado se obtuvo un 80,3% para VV y 79,63% para VH.

Los resultados similares entre las polarizaciones VV y VH, son un indicador del grado de homogeneidad y poca rugosidad de las coberturas inundadas. Por lo que favorecen mecanismos de retrodispersión especulares consistentes, independientemente de la polarización. Las métricas de precisión de este sector coinciden en buena medida con las registradas en diversas investigaciones en zonas con características similares (Bioresita et al., 2018; Schlaffer et al., 2021; Twele et al., 2016).

Para el Sector B se utilizaron las mismas imágenes del Sector A. Este se ubica al sur de Caño Negro, en dirección de San Rafael de Guatuso (ver Figura 3.21, m). En este sector convergen múltiples coberturas-usos con diversas estructuras (parches de bosque, cultivos, pastos, entre otros). La presencia de estas dificulta mecanismos de retrodispersión especulares consistentes ante condiciones de inundación. Por lo que se trata de coberturas inundadas dispersas y de baja extensión.

Se obtuvo una precisión global (PG) de 96,2% en la polarización VV y 95,81% en VH, lo que se interpreta como un muy buen desempeño de la segmentación. La precisión del usuario (PU) para la clase inundada fue de 82,27% para VV y 83,12 % para VH. Estos valores reflejan que las zonas inundadas detectadas a partir de la imagen de Sentinel-1 tienen una alta correspondencia con las de la imagen de referencia Sentinel-2.

La precisión del productor (PP) para la clase inundada es comparativamente la más baja de los 4 sectores de validación. En el que se obtuvo 60,76% para la polarización VV y 56,81% para la polarización VH. Vinculada directamente a la dificultad de medir inundaciones de baja extensión y dispersas. Además, se aprecia una menor omisión en la polarización VV (ver Figura 3.21 d y e). Relacionada con el mayor contraste observado entre coberturas inundadas y no inundadas (vegetación) en la polarización VV (Twele et al., 2016). Por último, la índice kappa en ambas polarizaciones muestra una concordancia buena, según la clasificación de Landis & Koch, (1977), con 0,67 para la polarización VV y 0,65 para VH.

Diversas investigaciones (Landuyt et al., 2019; Meinan Zhang et al., 2020) coinciden en que ambientes inundados heterogéneos complican la segmentación de la clase inundada con imágenes SAR. Lo que justifica el aumento de la omisión para este sector. No obstante, las métricas de precisión obtenidas son satisfactorias y reflejan de forma adecuada la dinámica de estas coberturas.

El Sector C se ubica al norte de la CHRFB, específicamente en las cercanías del poblado de Los Chiles. En este priman una serie de humedales palustres herbáceos, que facilitan la presencia de coberturas inundadas en diversos momentos de la serie temporal. Sobre estos es posible identificar ciertas zonas con usos de la tierra vinculados a la ganadería y cultivos. La validación se llevó a cabo con la imagen de Sentinel-1 del día 27 de julio de 2018, mientras la imagen de referencia Sentinel-2 del 30 de julio de 2018. Por lo que la diferencia temporal es de aproximadamente 3 días.

La precisión global (PG) para la polarización VV fue de 81,95% y de 80,06% para VH. Si bien estos valores se pueden asociar a una buena segmentación de clases, son los más bajos del total de sectores de validación. La precisión del usuario (PU) fue de 75,22% en VV y 69,56% en VH, lo que representa un aumento significativo de los errores de comisión respecto al Sector A y B.

Estos errores de comisión pudieron verse influenciados por la diferencia temporal entre las imágenes de Sentinel-1 y Sentinel-2. Ya que como se refleja en la Figura 3.21 (i) en las áreas de comisión es posible apreciar valores de MNDWI altos (cercaos y superiores a 0), por lo

que es posible que dichas zonas tuvieron una condición inundada en días previos. Lo anterior, destaca nuevamente la importancia de una buena correlación temporal entre las fuentes de datos (Martinis, Kersten, et al., 2015; Twele et al., 2016; Meimei Zhang et al., 2020).

La precisión del productor (PP) muestra un buen ajuste, similar al reportado para el Sector A, con 77,06 % para VV y 79,79% para VH. Con errores de omisión principalmente ligados a parte del cauce del Río Frío, que no son identificables en las imágenes SAR, pero sí en las ópticas de Sentinel-2. El índice kappa presenta un nivel de concordancia bueno para la polarización VV (0,61) y una concordancia moderada en la polarización VH (0,58), esto según la clasificación de Landis & Koch, (1977).

El Sector D, se ubica entre Caño Ciego y las lagunas de Caño Negro, en el que se registran una serie de coberturas inundadas en los márgenes del Río Frío (ver Figura 3.21 m). Esto sobre una serie de humedales herbáceos con usos de la tierra dedicados principalmente a ganadería. Esta zona presenta coberturas inundadas esporádicas a lo largo de la serie temporal, asociada principalmente a eventos de inundación extraordinarios. La validación se llevó a cabo con la imagen SAR del día 8 de diciembre de 2019 (evento extraordinario) y la imagen de referencia Sentinel-2 del día 10 de diciembre del mismo año.

La precisión global (PG) fue de 95,2% para VV y 94,46% para VH, cifra muy similar entre las polarizaciones y con las registradas en los Sectores A y B. El índice kappa muestra un nivel de concordancia buena en ambas polarizaciones según la clasificación de Landis & Koch, (1977), con 0,72 en la polarización VV y 0,67 en VH. La precisión del productor (PP)

para la clase inundada fue de 82,65% para VV y 84,21% para VH. Que refleja un bajo porcentaje de errores de omisión (ver Figura 3.21, j y k). Mismos que están asociadas a coberturas inundadas de muy baja extensión, que son perceptibles en la imagen Sentinel-2 pero no en Sentinel-1.

La precisión del productor (PP) para la clase inundado fue de 68,39% para VV y 61,13% para VH. Que muestra un incremento de los errores de comisión respecto a los anteriores sectores de validación. La Figura 3.21 (j y k) detalla como estos se ubican principalmente en el sector derecho de la concentración de las coberturas inundadas. Su origen está asociado a la diferencia temporal entre la imagen Sentinel-1 y Sentinel-2, que en este caso es de aproximadamente 2 días. Ya que como se constata en la Figura 3.21 (l) los valores de MNDWI para las áreas de comisión son altas (superiores a 0). Por lo que al igual que en el Sector C, es posible que en días previos dichas zonas tuvieran una condición inundada.

En general, las métricas de precisión para todos los sectores son satisfactorias, mostrando la eficiencia de las imágenes SAR de Sentinel-1 y del método automático en la detección de inundaciones. Además, las polarizaciones no muestran diferencias significativas en las métricas de precisión, similar a lo encontrado por Twele et al., (2016), artículo base de esta investigación.

Donde coberturas inundadas homogéneas y extensas son identificadas con gran precisión en ambas polarizaciones, con un nivel bajo de errores de comisión y omisión. Mientras que en inundaciones dispersas y de baja extensión se dio un incremento esperable de errores de

omisión. No obstante, los resultados siguen mostrando de buena manera la dinámica de las coberturas inundadas.

Este proceso de validación demostró la importancia de la correspondencia temporal entre los datos a validar y los de referencia. Dado que a mayor diferencia temporal se genera un aumento de los errores de comisión en las coberturas inundadas. En especial en zonas de la CHRf con baja frecuencia de inundación no asociados a humedales lacustres.

Por último, se considera necesario ampliar los procesos de validación, en especial ante eventos de inundación extraordinarios, no obstante, las condiciones de nubosidad en la CHRf no facilitan el acceso a datos ópticos de calidad.

Ventajas y desventajas del método automático de inundaciones

Los métodos automáticos basados en umbrales para la detección de inundaciones, tienen la ventaja de garantizar la objetividad y la reproducibilidad, ya que se calculan a partir de las estadísticas de las imágenes SAR (Martinis et al., 2009; Schlaffer et al., 2021). A diferencia de métodos manuales que dependen de la interpretación y la experiencia de un especialista para definir umbrales adecuados. O en su defecto para llevar a cabo procesos de digitalización para establecer coberturas inundadas (Bioresita et al., 2018; Martinis, Kuenzer, et al., 2015).

Los métodos manuales ofrecen la ventaja de reducir los errores asociados a falsos positivos y negativos de clasificación (omisión y comisión), no obstante, implican altos tiempos de procesamiento (Bioresita et al., 2018). Por lo que son útiles cuando se analiza un evento de inundación en concreto, no así cuando se trata de una serie de tiempo, que implica el

procesamiento de gran cantidad de imágenes. De ahí que los métodos automáticos son más adecuados para abordar series de tiempo, o en su defecto para el establecimiento de un mecanismo de monitoreo. Aunque son más susceptibles a errores de omisión y comisión.

Sí comparamos los métodos de umbralización automáticos, con otros como los basados en algoritmos de clasificación (supervisada, no supervisada y basada en objetos). Los segundos se caracterizan por necesitar datos de entrenamiento del algoritmo, así como de una serie de covariables (bandas espectrales, índices espectrales, datos topográficos, de usos de la tierra, entre otros) (Chapman et al., 2015; Plank et al., 2017; Tsyganskaya et al., 2019). Que facilita la incorporación de múltiples fuentes de información, como puede ser datos ópticos con datos SAR (DeVries et al., 2020b; Plank et al., 2017; Tarpanelli et al., 2022).

Estos procesos se caracterizan por ser más robustos y precisos, aunque suelen implicar costos computacionales y tiempos de procesamiento mayores. A lo que se debe agregar, que en la CHRF información de referencia actualizada y de calidad adecuada son escasos. Lo que supone una ventaja comparativa del método utilizado en esta investigación, el cual solo utiliza la información proveniente de las imágenes SAR y un modelo de elevación digital.

Recientemente se han publicado experiencias utilizando diversas arquitecturas de redes neuronales (Deep Learnig) para la detección de inundaciones con SAR, con resultados con un alto nivel de precisión (Helleis et al., 2022; Mayer et al., 2021). Mayer et al., (2021) destaca que este tipo de técnicas no se han popularizado debido a la gran cantidad de datos necesarios, así como los altos costos computacionales que suponen. No obstante, en la

actualidad la generación de información geoespacial es cada vez mayor y de mejor calidad, sumado al desarrollo de entornos de procesamiento en la nube, lo que hace este tipo de métodos más alcanzable.

Sin embargo, la implementación de este tipo de métodos basados en redes neuronales en la CHRf es complejo, debido a la falta de información de referencia, habilidades técnicas y capacidades de procesamiento. No obstante, los resultados de esta investigación pueden convertirse en un insumo para la implementación de estas en un futuro cercano. El Cuadro # expone un resumen comparativo entre diversos métodos o enfoques para identificar zonas inundadas con imágenes SAR.

Cuadro 3.5. Comparativa entre métodos de detección de inundaciones con imágenes SAR

| Método | Tiempo de procesamiento | Capacidad computacional | Datos auxiliares | Precisión | Serie de tiempo |
|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------|------------------|------------------------|
| Digitalización | alto | baja | baja | moderada-alta | no favorece |
| Umbrales manuales | moderado-alto | baja | baja | moderada-alta | no favorece |
| Umbrales automáticos | moderado-alto | baja-moderada | baja | moderada-alta | favorece |
| Algoritmos de clasificación | alto | alto | alto | alto | no favorece* |
| Redes Neuronales | muy alto | muy alto | muy alto | alto-muy alto | favorece |

*No es común su implementación en series de tiempo. Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

Este trabajo presentó una cadena de procesamiento automatizada para la cartografía y monitoreo de coberturas inundadas, que se ve fortalecida por las adquisiciones sistemáticas y de libre acceso de Sentinel-1. Los resultados obtenidos no solo permiten distinguir los

efectos de eventos de inundación extraordinarios o extremos, también propone un enfoque novedoso para analizar la dinámica de las coberturas inundadas en los ecosistemas de humedal de la cuenca. En el que se logró identificar una concordancia de los resultados de área inundada con los patrones de precipitación del periodo lluvioso de la CHRF.

Se constató que la inclusión de información topográfica como el índice de altura respecto al drenaje más cercano (índice HAND), mejoró el proceso de umbralización automático del algoritmo KI. Esto al restringir las zonas de muy baja probabilidad de inundación dadas sus características topográficas. Por otra parte, el refinamiento por lógica difusa permitió ajustar los resultados de la clasificación del algoritmo KI, eliminando áreas de error asociadas a suelos descubiertos y píxeles dispersos etiquetados como inundados.

La detección de coberturas inundadas mostró resultados satisfactorios al discriminar coberturas inundadas homogéneas y extensas, como los sistemas de lagunas de Caño Negro. Así como en coberturas inundadas heterogéneas y de baja dimensión, donde convergen diversas coberturas que no favorecen mecanismos de retrodispersión especular concisos. Lo anterior, se refleja en las métricas de precisión global (PG) para los sectores de validación, que van desde los 96,02 % a 81,95% en la polarización VV y de 95,81% a 80,06% en VH.

Los porcentajes más bajos de PG están asociados a sitios de coberturas inundadas dispersas y de baja dimensión. Usualmente sitios con estas características no suelen ser validados en investigaciones similares, sin embargo, las métricas obtenidas en este trabajo son satisfactorias. Por otro lado, no se identificaron diferencias significativas entre las precisiones

de la polarización VV y VH, no obstante, la polarización VV muestra un mejor desempeño en áreas de inundación dispersas.

La correlación temporal entre el pico de inundación y la adquisición de la observación SAR, es fundamental para una medición más acertada de un evento de inundación extraordinario, en escenarios de inundaciones rápidas como el descrito en el Huracán Otto. Ante eventos de inundación de expansión gradual -llamados así en este trabajo-, como los descritos en diciembre de 2016 y 2019, las imágenes SAR logran una identificación más precisa de las manchas inundadas.

Utilizar una serie robusta de imágenes SAR, favoreció la creación de un mecanismo que permite analizar cada sitio de la cuenca acorde a su frecuencia relativa de inundación, asociado al tiempo que cada sitio-píxel mantiene una cobertura inundada. Lo anterior, permitió categorizar estas coberturas en una serie de categorías, inundación permanente, intermitente y esporádica. Que, a su vez, son un insumo para comprender la dinámica espaciotemporal de las coberturas inundadas en ecosistemas de humedal, así como discriminar aquellos sitios donde las coberturas inundadas están únicamente asociada a eventos de inundación extraordinarios.

CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Los objetivos propuestos en esta investigación fueron alcanzados. El primero de ellos mediante una caracterización general de la CHRF como un sistema socio-ecológico (SES),

para el que se utilizó el Marco socio-ecológico (SESF) propuesto por Ostrom, (2009). Esto permitió la comprensión de la CHRF como un sistema que históricamente ha sido sometido a presiones intensas de cambio de uso de la tierra, incentivadas por las políticas económicas del país. Lo que ha provocado una degradación de los ecosistemas de bosques y humedales, así como de los servicios ecosistémicos que estos ofrecen. Entre ellos, los servicios ecosistémicos asociados a la regulación climática y la mitigación ante los efectos de eventos hidrometeorológicos extremos.

La CHRF plantea un escenario complejo, en el que las decisiones de los sistemas sociales permiten suponer un aumento de la exposición y vulnerabilidad ante amenazas como las inundaciones, en especial ante un escenario de cambio o variabilidad climática. No obstante, el abordaje de estos conceptos asociados a la gestión del riesgo, no son abordados en este trabajo de investigación.

Los objetivos específicos dos y tres también fueron abordados satisfactoriamente. Donde se logró implementar un flujo totalmente automatizado y eficiente en términos computacionales, para la detección de coberturas inundadas. Los resultados muestran una concordancia adecuada con los patrones de precipitación, para lo que se utilizaron datos de tres estaciones meteorológicas de la cuenca. Demostrando la sensibilidad de las imágenes SAR y del enfoque de procesamiento para detectar la dinámica espaciotemporal de las coberturas inundadas. De igual manera, el proceso de validación permitió evidenciar numéricamente el adecuado funcionamiento en la detección de coberturas inundadas en

diversos escenarios, tanto inundaciones extensas y homogéneas, como inundaciones de baja dimensión y heterogéneas.

Los resultados de este trabajo muestran el potencial del uso de imágenes SAR para el estudio de inundaciones a nivel nacional y regional. Potenciado por la posibilidad de obtener información sistemáticamente, donde aspectos como la nubosidad no suponen una problemática para su uso. De igual manera, tanto las imágenes SAR como el enfoque de procesamiento automático, ofrecen una serie de posibilidades. Entre ellas, la capacidad de establecer este flujo metodológico como un mecanismo de monitoreo de coberturas inundadas en la CHR. Que, sea un insumo para análisis de amenaza de inundación, así como una fuente de información ante el manejo de emergencias por inundaciones. En paralelo, también puede establecerse como un mecanismo estudio de las dinámicas de las coberturas inundadas en los humedales, de la que dependen una amplia gama de funciones ecológicas y servicios ecosistémicos, similar a lo propuesto recientemente por Schlaffer et al., (2021).

Una externalidad positiva de la ejecución de este trabajo de investigación fue la ejecución de diversos talleres, cursos y charlas, para el fortalecimiento de capacidades en el procesamiento e interpretación de imágenes SAR, tanto a nivel nacional como en la región centroamericana. Donde a partir de estos se logró la capacitación de al menos # personas en esta tecnología. Potenciados por el soporte y acompañamiento de diversas instituciones u organizaciones, como el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), Asociación de las Ciencias del Suelo, NASA SERVIR, Universidad de Alaska en Fairbanks, entre otras.

Recomendaciones

Es necesario la generación de mapas de usos de la tierra detallados para la CHRF, que permitan el evaluar el impacto de eventos de inundación extraordinarios. Esto cobra relevancia en una cuenca con intensas presiones de cambio de uso de la tierra.

Como se mencionó previamente, se recomienda la implementación de este flujo metodológico como un mecanismo de monitoreo en la CHRF. De igual manera, se recomienda la implementación de este flujo de trabajo en otras cuencas hidrográficas, tanto en el país o en la región centroamericana. Como puede ser la cuenca del río Medio Queso, la cuenca del río San Carlos, Sixaola, entre otras.

El procesamiento de este trabajo se llevó a cabo en un equipo local, lo cual supone una demanda importante de recursos computacionales, aspecto que limita su implementación. Por esta razón, se sugiere implementar en un entorno en la nube. Específicamente, la plataforma Opensarlab, creada por la Universidad de Alaska en Fairbanks para el procesamiento de imágenes SAR a partir del lenguaje de programación Python. Otra alternativa, es el motor de procesamiento de Google Earth Engine (GEE), a partir de su API de Python. No obstante, se debe hacer la salvedad que el catálogo de imágenes de Sentinel-1 en GEE no poseen un nivel de preprocesamiento RTC.

En el futuro cercano se considera necesario complementar la información de Sentinel-1 con la adquirida de los satélites NISSAR de la NASA y la Organización de Investigación Espacial de la India (ISRO por sus siglas en inglés). Así como del satélite BIOMASS de la ESA. Estos satélites serán puestos en órbita entre 2023 y 2024, lo que favorecerá un mayor conjunto de

datos en menor tiempo, favoreciendo la detección de inundaciones. En paralelo, estos satélites al poseer banda L (longitud), permitirán abordar el componente de las inundaciones bajo vegetación.

BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, H. (2012). *Gestión Integrada de Cuencas Hidrográficas, desde la aproximación de los servicios de los ecosistemas: el caso de la cuenca del Río Frío* [Universidad Internacional de Andalucía]. <http://repositorio.conicit.go.cr/>
- Agram, P. S., Warren, M. S., Calef, M. T., & Arko, S. A. (2022). An Efficient Global Scale Sentinel-1 Radar Backscatter and Interferometric Processing System. *Remote Sensing*, 14(15), 1–13. <https://doi.org/10.3390/rs14153524>
- Arias Ramírez, R., & Sánchez Hernández, L. (2012). *Decimoctavo Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible Análisis de la desigualdad socioeconómica en Costa Rica por criterio territorial*. <https://repositorio.conare.ac.cr/handle/20.500.12337/363>
- ASF. (2021). *Sentinel-1 RTC Product Guide*. Alaska Satellite Facility. https://hyp3-docs.asf.alaska.edu/guides/rtc_product_guide/
- Barnadas, B. (2012). Mathematics of Fuzzy Sets and Fuzzy Logic. In *Studies in Fuzziness and Soft Computing*. <https://pzs.dstu.dp.ua/logic/bibl/math.pdf>
- Baştanlar, Y., & Özuysal, M. (2014). Introduction to Machine Learning. In *Cambridge University Press* (Primera ed, pp. 105–128). https://doi.org/10.1007/978-1-62703-748-8_7
- Berens, P. (2006). Introduction to synthetic aperture radar. In *Advanced Radar Signal and Data Processing*. <http://www.rto.nato.int/abstracts.asp>
- Bioresita, F., Puissant, A., Stumpf, A., & Malet, J. P. (2018). A method for automatic and rapid mapping of water surfaces from Sentinel-1 imagery. *Remote Sensing*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/rs10020217>
- Bolognesi, T., Gerlak, A. K., & Giuliani, G. (2018). Explaining and measuring social-ecological pathways: The case of global changes and water security. *Sustainability (Switzerland)*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/su10124378>
- Bonilla, M., Olmeda, I., & Puertas, R. (2003). MODELOS PARAMÉTRICOS Y NO PARAMÉTRICOS EN

PROBLEMAS DE CREDIT SCORING. *Taylor & Francis*, 32(118), 833–869.

Brenes, L. G., Solano, F., & Salas, D. (2001). Degradación del sistema lagunar Caño Negro (norte costarricense) por sedimentación. *Revista de Ciencias Ambientales*, 21(1), 36–41.

<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.15359/rca.21-1.6> URL:

Burrough, P., Goodchild, M., McDonnell, R., Switzer, P., & Worboys, M. (1998). Principles of Geographical Information Systems. In *Oxford University Press* (Primera ed).

Cabello, V., Willaarts, B. A., Aguilar, M., & del Moral Ituarte, L. (2015). River basins as social-ecological systems: Linking levels of societal and ecosystem water metabolism in a semiarid watershed. *Ecology and Society*, 20(3). <https://doi.org/10.5751/ES-07778-200320>

CANAPEP. (2022). *Estadísticas*. Camara Nacionalo de Productores y Exportadores de Piña.

<https://canapep.com/estadisticas/#>

Cao, H., Zhang, H., Wang, C., & Zhang, B. (2019). Operational flood detection using Sentinel-1 SAR data over large areas. *Water (Switzerland)*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/w11040786>

Carreño Conde, F., & De Mata Muñoz, M. (2019). Flood Monitoring Based on the Study of Sentinel-1 SAR Images: The Ebro River Case Study. *Water*, 11(12), 2454.

<https://doi.org/10.3390/w11122454>

Céspedes Rivera, J. (2020). *Evaluación espacio-temporal de la deforestación en la Reserva Forestal Golfo Dulce a partir del imágenes SAR, en el periodo 2014-2020*. Universidad de Costa Rica.

Chacón Araya, K. (2017). *SECTOR AGROPECUARIO NO APUNTA A UNA MAYOR SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL*. Programa Estado de La Nación. <https://estadonacion.or.cr/sector-agropecuario-no-apunta-a-una-mayor-sostenibilidad-ambiental/>

Chapman, B., McDonald, K., Shimada, M., Rosenqvist, A., Schroeder, R., & Hess, L. (2015). Mapping regional inundation with spaceborne L-Band SAR. *Remote Sensing*, 7(5), 5440–5470.

<https://doi.org/10.3390/rs70505440>

Chaves, K. (2017). 2017 registra el setiembre más lluvioso de los últimos años. *La Nación*.

<https://www.nacion.com/sucesos/desastres/2017-registra-el-setiembre-mas-lluvioso-de-los-ultimos-anos/H3RQYHY5KNHUZO6RGRUOZDVPFI/story/>

Chinchilla, G. (2016). *Resumen Meteorológico de noviembre de 2016*.

<https://www.imn.ac.cr/boletin-meteorologico>

Chinchilla, G. (2017). Resumen Meteorológico de setiembre 2017. In *Instituto Meteorológico Nacional*. <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/437028/SEPTIEMBRE>

Chinchilla, G. (2018). *Resumen Meteorológico de julio de 2018*.

<https://www.imn.ac.cr/documents/10179/454290/JULIO>

Chinchilla, M. (2019). *Resumen Meteorológico de julio 2019*.

<https://www.imn.ac.cr/documents/10179/474355/JULIO>

Chini, M., Pelich, R., Pulvirenti, L., Pierdicca, N., Hostache, R., & Matgen, P. (2019). Sentinel-1

InSAR coherence to detect floodwater in urban areas: Houston and hurricane harvey as a test case. *Remote Sensing*, 11(2), 1–20. <https://doi.org/10.3390/rs11020107>

Chung, H. W., Liu, C. C., Cheng, I. F., Lee, Y. R., & Shieh, M. C. (2015). Rapid response to a typhoon-induced flood with an SAR-derived map of inundated areas: Case study and validation.

Remote Sensing, 7(9), 11954–11973. <https://doi.org/10.3390/rs70911954>

Chuvieco, E. (2007). *Teledetección ambiental La observación de la Tierra desde el Espacio*. Editorial Ariel S.A.

Clement, M. A., Kilsby, C. G., & Moore, P. (2017). 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>

Coloma, C., Caballero, L., Ricart, M., Bueno, S., Boada, M., Galante, E., & Acevedo, H. (2009).

Diagnóstico de la cuenca de río Frío Arenal- Huetar Norte Costa Rica.

<https://www.semanticscholar.org/paper/Diagnóstico-de-la-cuenca-de-río-Frío%2C-Arenal-Huetar-Boada-Ballarà/0c43cf86816bd2a467e9d676fb45d308aaf7125e>

- Conde, F. C., & De Mata Muñoz, M. (2019). Flood monitoring based on the study of Sentinel-1 SAR images: The Ebro River case study. *Water (Switzerland)*, *11*(12), 1–25.
<https://doi.org/10.3390/w11122454>
- Corte, A. (2018). Destrucción ambiental en Caño Negro y la cuenca baja del río Frío. *Ambientico*, *181*. [https://www.ambientico.una.ac.cr/revista-ambientico/destruccion-ambiental-en-cano-negro-y-la-cuenca-baja-del-rio-frio/?search=Destrucción ambiental en Caño Negro y la cuenca baja del río&perpage=15&order=ASC&orderby=date&pos=0&source_list=collection&ref=%25](https://www.ambientico.una.ac.cr/revista-ambientico/destruccion-ambiental-en-cano-negro-y-la-cuenca-baja-del-rio-frio/?search=Destrucción+ambiental+en+Caño+Negro+y+la+cuenca+baja+del+río&perpage=15&order=ASC&orderby=date&pos=0&source_list=collection&ref=%25)
- Curry, R. (2013). Radar Essentials: A concise handbook for radar design and performance analysis. In *Radar Essentials: A concise handbook for radar design and performance analysis*.
<https://doi.org/10.1049/sbra029e>
- Dadhich, G., Miyazaki, H., & Babel, M. (2019). Applications of sentinel-1 synthetic aperture radar imagery for floods damage assessment: A case study of nakhon si thammarat, Thailand. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, *42*(2/W13), 1927–1931. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-1927-2019>
- Delgado-Serrano, M. del M., & Ramos, P. A. (2015). Making Ostrom’s framework applicable to characterise social ecological systems at the local level. *International Journal of the Commons*, *9*(2), 808–830. <https://doi.org/10.18352/ijc.567>
- DeVries, B., Huang, C., Armston, J., Huang, W., Jones, J. W., & Lang, M. W. (2020a). Rapid and robust monitoring of flood events using Sentinel-1 and Landsat data on the Google Earth Engine. *Remote Sensing of Environment*, *240*(January), 111664.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111664>
- DeVries, B., Huang, C., Armston, J., Huang, W., Jones, J. W., & Lang, M. W. (2020b). 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>

Donezar-Hoyos, U., Larrañaga-Urien, A., Tamés-Noriega, A., Sánchez-Gil, C., Albizua-Huarte, L., Ciriza-Labiano, R., & del Barrio-Arellano, F. (2017). Aplicación de imágenes Sentinel-1 y Sentinel-2 en la detección y delimitación de información de crisis de desastres naturales en el marco de los servicios Copernicus EMS. *Revista de Teledetección*, 2017(50), 49–58.

<https://doi.org/10.4995/raet.2017.8896>

Du, Y., Zhang, Y., Ling, F., Wang, Q., Li, W., & Li, X. (2016). Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the swir band. *Remote Sensing*, 8(4).

<https://doi.org/10.3390/rs8040354>

ESA. (2012). *SENTINEL-1 ESA's Radar Observatory Mission for GMES Operational Services* (K. Fletcher (Ed.)).

ESA. (2014). *ESA-Eduspace- Radar de apertura sintética (SAR)*. European Space Agency (ESA).

https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_Global_ES/SEMVKXF64RH_0.html

Espinoza-Cisneros, E. (2018). Optimizing social-ecological analysis of coupled human-river systems through the integration of conceptual frameworks: the case of the Savegre watershed, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 3(61E), 57–76.

<https://doi.org/10.15359/rgac.61-3.3>

Estado de la Nación. (2021). *Estado de la Nación 2021*. <https://estadonacion.or.cr/informes/>

European Space Agency (ESA). (2014). *ESA - Eduspace ES - Cambio global - Radar de apertura sintética (SAR)*. European Space Agency.

Ezzine, A., Darragi, F., Rajhi, H., & Ghatassi, A. (2018). Evaluation of Sentinel-1 data for flood mapping in the upstream of Sidi Salem dam (Northern Tunisia). *Arabian Journal of Geosciences*, 11(8), 1–9. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3505-7>

FAO. (2017). *Watershed Management in Action: Lessons Learned From FAO Field Projects*. In

Mountain Research and Development.

<https://www.fao.org/publications/card/fr/c/46226b17-5bb8-4e24-b140-b6f1af6942f6/>

FAO, & Inder. (n.d.). *ITCO-IDA-INDER.*

https://www.inder.go.cr/acerca_del_inder/historia/sistematizacion-ITCO-IDA-INDER.pdf

Farhad, S. (2012). Los Sistemas Socio-ecológicos. Una aproximación conceptual y metodológica.

XIII Jornadas de Economía Crítica.

Faure, G., Samper, M., Meneses, D., Ramirez, F., Avendaño, J., Rodríguez, A., Miranda, O.,

Solórzano, W., Picado, W., Rodríguez, D., Rodríguez, N., & Arce, H. (2005). *Trayectoria y disyuntivas del agro en la zona norte de Costa Rica* (primera ed). CIRAD y IIS-UCR.

http://bibliotecavirtual.clacso.org.ar/Costa_Rica/iis-ucr/20120725031502/trayectorias.pdf

Fernández Alvarado, L., & Granados Carvajal, E. (2000). Costa Rica: el nuevo marco regulatorio y el sector agrícola. In *Red de Desarrollo agropecuario.*

https://www.cepal.org/sites/default/files/publication/files/4470/S00121031_es.pdf

Fikadu, T., Teferi, E., Dubale, B., Gusha, B., Mantel, S. K., Tanner, J., Palmer, C. G., Woldu, Z.,

Alamirew, T., & Zeleke, G. (2022). Implications of Watershed Management Practices on Water Availability Using Hydrus-1D Model in the Aba Gerima Watershed, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Water (Switzerland)*, 14(19), 1–13. <https://doi.org/10.3390/w14193095>

Flores-Anderson, A., Herndon, K., & Cherrington, E. (Eds.). (2019). *The Synthetic Aperture Radar*

(SAR) Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation (Primera ed). SERVIR. <https://doi.org/10.25966/nr2c-s697>

Flores, R., Salas, J., & Rivera, J. (2019). *Impacto de los fenómenos naturales para el periodo 1988-*

2018, por secotres, provincias, cantones y distritos. Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica.

Flotemersch, J. E., Leibowitz, S. G., Hill, R. A., Stoddard, J. L., Thoms, M. C., & Tharme, R. E. (2015).

A Watershed Integrity Definition and Assessment Approach to Support Strategic

Management of Watersheds. *River Research and Applications*.

<https://doi.org/10.1002/rra.2978>

Giroto, P. (1989). Formación y estructuración de una frontera viva el caso de la región norte de Costa Rica. *Geostmo*, 3(2), 17–42.

Grimaldi, S., Xu, J., Li, Y., Pauwels, V. R. N., & Walker, J. P. (2020). Flood mapping under vegetation using single SAR acquisitions. *Remote Sensing of Environment*, 237, 111582.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111582>

Helleis, M., Wieland, M., Krullikowski, C., Martinis, S., & Plank, S. M. (2022). Sentinel-1-based water and flood mapping: benchmarking convolutional neural networks against an operational rule-based processing chain. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 1–1. <https://doi.org/10.1109/jstars.2022.3152127>

Hernandez, G., Barquero, A. I., Hernández, W., Méndez, A. L., & Sanchez, H. (2017). *INFORME ESTADO DE LA NACIÓN EN DESARROLLO HUMANO SOSTENIBLE 2017 Gestión del riesgo en Costa Rica e impactos del huracán Otto*. 37p.

IMN. (2016). Huracán Otto Informe técnico. In I.

<https://www.imn.ac.cr/documents/10179/20909/Informe+IMN+Huracán+Otto#:~:text=A las 3 pm del,oeste a 4 km%2Fh>.

INBio. (2009). *Informe Final Estudio de Tenencia de Tierras para el Refugio Nacional de Vida Silvestre Caño Negro y su posible ampliación*. Alajuela, Costa Rica.

Jo, M. J., Osmanoglu, B., Zhang, B., & Wdowinski, S. (2018). Flood extent mapping using dual-polarimetric sentinel-1 synthetic aperture Radar imagery. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(3), 711–713. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-711-2018>

Karmakar, G. C., & Dooley, L. S. (2002). A generic fuzzy rule based image segmentation algorithm. *Pattern Recognition Letters*, 23(10), 1215–1227. <https://doi.org/10.1016/S0167->

8655(02)00069-7

- Kiage, L. M., Walker, N. D., Balasubramanian, S., Babin, A., & Barras, J. (2005). Applications of Radarsat-1 synthetic aperture radar imagery to assess hurricane-related flooding of coastal Louisiana. *International Journal of Remote Sensing*, *26*(24), 5359–5380.
<https://doi.org/10.1080/01431160500442438>
- Kittler, J., & Illingworth, J. (1986). Minimum error thresholding. *Pattern Recognition*, *19*(1), 41–47.
[https://doi.org/10.1016/0031-3203\(86\)90030-0](https://doi.org/10.1016/0031-3203(86)90030-0)
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, *33*(1), 159–174. <http://www.jstor.org/stable/2529310>
- Landuyt, L., Van Wesemael, A., Schumann, G. J. P., Hostache, R., Verhoest, N. E. C., & Van Coillie, F. M. B. (2019). Flood Mapping Based on Synthetic Aperture Radar: An Assessment of Established Approaches. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *57*(2), 722–739. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2860054>
- Liang, J., & Liu, D. (2020). A local thresholding approach to flood water delineation using Sentinel-1 SAR imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *159*(February 2019), 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.10.017>
- Lopes, A., Touzi, R., & Nezry, E. (1990). Adaptive Speckle Filters and Scene Heterogeneity. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *28*(6), 992–1000.
<https://doi.org/10.1109/36.62623>
- Madrigal, R., & Arguedas, C. (2016, December 21). 200 casas anegadas por desbordamiento de ríos en Upala. *La Nación*. <https://www.nacion.com/sucesos/200-casas-anegadas-por-desbordamiento-de-rios-en-upala/WS7JL6RPCBCY7D3GHNWVE67ZYM/story/>
- Madriz, A. (2021, January 29). Parques Nacionales y otras áreas silvestres no pueden seguir creciendo por falta de presupuesto, reconoce el Sinac. *La República*.
<https://www.larepublica.net/noticia/parques-nacionales-y-otras-areas-silvestres-no-pueden->

seguir-creciendo-por-falta-de-presupuesto-reconoce-el-sinac

Madriz, A. (2022, April 22). Inicia recuperación de humedal del Refugio Nacional de Vida Silvestre Caño Negro. *La República*. <https://www.larepublica.net/noticia/inicia-recuperacion-de-humedal-del-refugio-nacional-de-vida-silvestre-cano-negro>

Maglianesi Sandoz, M. A. (2013). Desarrollo de las Piñeras en Costa Rica y sus Impactos sobre Ecosistemas Naturales y Agro-Urbanos. *Biocenosis*, 27(1–2), 62–70.
<https://investiga.uned.ac.cr/revistas/index.php/biocenosis/article/view/611/507>

Marti-Cardona, B., Lopez-Martinez, C., Dolz-Ripolles, J., & Bladè-Castellet, E. (2010). ASAR polarimetric, multi-incidence angle and multitemporal characterization of Doñana wetlands for flood extent monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 114(11), 2802–2815.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.06.015>

Martínez Barbáchano, R. (2022). Estimación de la deformación superficial de las laderas del volcán Turrialba (Costa Rica) después de una erupción mediante interferometría diferencial de imágenes radar de apertura sintética (SAR) Sentinel-1A Estimation of the surface deformation of t. *Revista Geográfica de América CENTRAL*, 68(1), 79–101.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.15359/rgac.68-1.3>

Martinis, S., Kersten, J., & Twele, A. (2015). A fully automated TerraSAR-X based flood service. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 104, 203–212.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.07.014>

Martinis, S., Kuenzer, C., Wendleder, A., Huth, J., Twele, A., Roth, A., & Dech, S. (2015). Comparing four operational SAR-based water and flood detection approaches. *International Journal of Remote Sensing*, 36(13), 3519–3543. <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1060647>

Martinis, S., Plank, S., & Ćwik, K. (2018). The use of Sentinel-1 time-series data to improve flood monitoring in arid areas. *Remote Sensing*, 10(4), 1–13. <https://doi.org/10.3390/rs10040583>

Martinis, S., Twele, A., & Voigt, S. (2009). Towards operational near real-time flood detection using

- a split-based automatic thresholding procedure on high resolution TerraSAR-X data. *Natural Hazards and Earth System Science*, 9(2), 303–314. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-303-2009>
- Mayer, T., Poortinga, A., Bhandari, B., Nicolau, A. P., Markert, K., Thwal, N. S., Markert, A., Haag, A., Kilbride, J., Chishtie, F., Wadhwa, A., Clinton, N., & Saah, D. (2021). Deep Learning approach for Sentinel-1 Surface Water Mapping leveraging Google Earth Engine. *ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 100005. <https://doi.org/10.1016/j.ophoto.2021.100005>
- McGinnis, M. D., & Ostrom, E. (2014). Social-ecological system framework: Initial changes and continuing challenges. *Ecology and Society*, 19(2). <https://doi.org/10.5751/ES-06387-190230>
- MINAET. (2008). *Plan Nacional de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos*. https://da.go.cr/wp-content/uploads/2018/05/Plan_Nacional_Gestion_Integrada_Recursos_Hidrico.pdf
- Nagendra, H., & Ostrom, E. (2014). Applying the social-ecological system framework to the diagnosis of urban lake commons in Bangalore, India. *Ecology and Society*, 19(2). <https://doi.org/10.5751/ES-06582-190267>
- Naranjo Díaz, J. (2016). Resumen Meteorológico diciembre 2016. *Instituto Meteorológico Nacional (IMN)*, ISSN 1654-0465. <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/454290/SETIEMBRE>
- Navarro, A. (2019, December 6). 18 viviendas afectadas en Guatuso por lluvias producto de frente frío. *Monumental*. <https://www.monumental.co.cr/2019/12/06/18-viviendas-afectadas-en-guatuso-por-lluvias-producto-de-frente-frio/>
- Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Hodnett, M., Rennó, C. D., Rodrigues, G., Silveira, A., Waterloo, M., & Saleska, S. (2011). Height Above the Nearest Drainage - a hydrologically relevant new terrain model. *Journal of Hydrology*, 404(1–2), 13–29. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.051>
- Notti, D., Giordan, D., Caló, F., Pepe, A., Zucca, F., & Galve, J. P. (2018). Potential and limitations of open satellite data for flood mapping. *Remote Sensing*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/rs10111673>

- Olofsson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E., & Wulder, M. A. (2014). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*, 148, 42–57. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>
- OMM. (2022). *Estado del clima en América Latina y el Caribe*. <https://reliefweb.int/report/world/estado-del-clima-en-america-latina-y-el-caribe-2021>
- ONU. (2019). *Costa Rica: abriendo el camino hacia un planeta más limpio*. ONU Para El Ambiente. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/costa-rica-abriendo-el-camino-hacia-un-planeta-mas-limpio>
- Ostrom, E. (2009a). A General Framework for Analyzing Sustainability of Social-Ecological Systems. *Source: Science, New Series*, 325(5939), 419–422. <https://doi.org/10.1126/science.1170749>
- Ostrom, E. (2009b). Social-Ecological Systems. *American Association for the Advancement of Science*, 325(5939), 419–422.
- Pal, S. K., & Rosenfeld, A. (1988). Image enhancement and thresholding by optimization of fuzzy compactness. *Pattern Recognition Letters*, 7(2), 77–86. [https://doi.org/10.1016/0167-8655\(88\)90122-5](https://doi.org/10.1016/0167-8655(88)90122-5)
- Partelow, S., & Winkler, K. J. (2016). Interlinking ecosystem services and Ostrom's framework through orientation in sustainability research. *Ecology and Society*, 21(3). <https://doi.org/10.5751/ES-08524-210327>
- Perrou, T., Garioud, A., & Parcharidis, I. (2018). Use of Sentinel-1 imagery for flood management in a reservoir-regulated river basin. *Frontiers of Earth Science*, 12(3), 506–520. <https://doi.org/10.1007/s11707-018-0711-2>
- Pierdicca, N., Chini, M., Pulvirenti, L., & Macina, F. (2008). Integrating physical and topographic information into a fuzzy scheme to map flooded area by SAR. *Sensors*, 8(7), 4151–4164. <https://doi.org/10.3390/s8074151>
- Plank, S., Jüssi, M., Martinis, S., & Twele, A. (2017). Mapping of flooded vegetation by means of

- polarimetric sentinel-1 and ALOS-2/PALSAR-2 imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 38(13), 3831–3850. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1306143>
- PNUD. (2022a). *Atlas de desarrollo humano cantonal, 2021*. Programa de La Naciones Unidas. <https://www.undp.org/es/costa-rica/atlas-de-desarrollo-humano-cantonal-2021>
- PNUD. (2022b). *Índice de Desarrollo Humano (IDH)*. Programa de Las Naciones Unidas Para El Medio Ambiente. <https://www.undp.org/es/costa-rica/publications/indice-de-desarrollo-humano-idh>
- Poleo Brito, D. (2019). *Resumen Meteorológico de noviembre de 2019*. <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/474355/NOVIEMBRE>
- Poleo Brito, D. A. (2018). *Resumen Meteorológico de noviembre de 2018*. <https://www.imn.ac.cr/boletin-meteorologico>
- PROCOMER. (2021). *AUMENTA INTERÉS POR PIÑA DE “LUJO” DE PANAMÁ*. Promotora Del Comercio Exterior de Costa Rica. [https://www.procomer.com/alertas_comerciales/exportador-alerta/aumenta-interes-por-pina-de-lujo-de-panama/#:~:text=En 2020%2C Costa Rica fue,millones de USD \(16%25\)](https://www.procomer.com/alertas_comerciales/exportador-alerta/aumenta-interes-por-pina-de-lujo-de-panama/#:~:text=En 2020%2C Costa Rica fue,millones de USD (16%25)).
- ProDUS. (2015). *Plan de Desarrollo Turístico del Cantón de Guatuso*. <https://www.sinac.go.cr/ES/docu/coop/proy/Plan de Desarrollo Turístico Sostenible del cantón de Guatuso, Alajuela.pdf>
- Pulvirenti, L., Pierdicca, N., Chini, M., & Guerriero, L. (2011). An algorithm for operational flood mapping from Synthetic Aperture Radar (SAR) data using fuzzy logic. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(2), 529–540. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-529-2011>
- Qiu, J., Cao, B., Park, E., Yang, X., Zhang, W., & Tarolli, P. (2021). Flood Monitoring in Rural Areas of the Pearl River Basin (China) Using Sentinel-1 SAR. *Remote Sensing*, 13(7), 1384. <https://doi.org/10.3390/rs13071384>
- Quesada-Román, A., & Villalobos-Chacón, A. (2020). Flash flood impacts of Hurricane Otto and

- hydrometeorological risk mapping in Costa Rica. *Geografisk Tidsskrift - Danish Journal of Geography*, 00(00), 1–14. <https://doi.org/10.1080/00167223.2020.1822195>
- Quesada, D. (2019, December 12). SEAMOS ESPERANZA: familia en Guatuso pensó que lo perdería todo en esta Navidad. *Radio Santa Clara*. <https://www.radiosantaclara.cr/seamos-esperanza-familia-en-guatuso-penso-que-lo-perderia-todo-en-esta-navidad/>
- Quesada, G. (2020, April 28). Río Frío, del norte norte, exuberante: lleno de historia y vida acuática. *El Norte Hoy*. <https://elnortehoycr.com/2020/04/28/rio-frio-exuberante-lleno-de-historia-y-vida-del-norte-norte/>
- RAMSAR. (2014). *HUMEDALES DE IMPORTANCIA INTERNACIONAL (LOS SITIOS RAMSAR)*. <https://www.ramsar.org/es/acerca-de/humedales-de-importancia-internacional-los-sitios-ramsar-0>
- Raspini, F., Bianchini, S., Ciampalini, A., Del Soldato, M., Solari, L., Novali, F., Del Conte, S., Rucci, A., Ferretti, A., & Casagli, N. (2018). Continuous, semi-automatic monitoring of ground deformation using Sentinel-1 satellites. *Scientific Reports*, 8(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25369-w>
- Rennó, C. D., Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Soares, J. V., Hodnett, M. G., Tomasella, J., & Waterloo, M. J. (2008). HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. *Remote Sensing of Environment*, 112(9), 3469–3481. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.03.018>
- Rojas, M. (2016, December 21). Lluvias provocan inundaciones en Guatuso. *Diario Extra*. <https://www.diarioextra.com/Noticia/detalle/319386/lluvias-provocan-inundaciones-en-guatuso>
- Schlaffer, S., Chini, M., Dorigo, W., & Plank, S. (2021). Monitoring Surface Water Dynamics in the Prairie Pothole Region Using Dual-Polarised Sentinel-1 SAR Time Series. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 1–27. <https://doi.org/10.5194/hess-2021-330>

- Schlaffer, S., Chini, M., Giustarini, L., & Matgen, P. (2017). Probabilistic mapping of flood-induced backscatter changes in SAR time series. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 56, 77–87. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.12.003>
- Schumann, G. J. P., & Moller, D. K. (2015). Microwave remote sensing of flood inundation. *Physics and Chemistry of the Earth*, 83–84, 84–95. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.05.002>
- Seligson, M. A. (1978). La reforma agraria en Costa Rica. In *Estudios Sociales Centroamericanos* (Vol. 7, Issue 19, pp. 55–82).
- Shahabi, H., Shirzadi, A., Ghaderi, K., Omidvar, E., Al-Ansari, N., Clague, J. J., Geertsema, M., Khosravi, K., Amini, A., Bahrami, S., Rahmati, O., Habibi, K., Mohammadi, A., Nguyen, H., Melesse, A. M., Ahmad, B. Bin, & Ahmad, A. (2020). Flood detection and susceptibility mapping using Sentinel-1 remote sensing data and a machine learning approach: Hybrid intelligence of bagging ensemble based on K-Nearest Neighbor classifier. *Remote Sensing*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/rs12020266>
- Shen, X., Anagnostou, E. N., Allen, G. H., Robert Brakenridge, G., & Kettner, A. J. (2019). Near-real-time non-obstructed flood inundation mapping using synthetic aperture radar. *Remote Sensing of Environment*, 221(November 2018), 302–315. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.008>
- SINAC-PNUD-GEF. (2018). *Ecosistemas Vegetales del Complejo de Humedales de Caño Negro, Los Chiles, Costa Rica*.
- SINAC. (2013). *Plan General de Manejo Parque Nacional Volcán Tenorio y Zona Protectora Tenorio*.
- SINAC. (2017). *Plan de Gestión Local del Sitio Ramsar Refugio Nacional de Vida Silvestre Caño Negro* (H. Acevedo, V. Obando, & Y. Villalobos (Eds.)). https://enbcr.go.cr/sites/default/files/pglcanonegro_02oct2017.pdf
- SINAC ACAHN. (2013). *Refugio Nacional de Vida Silvestre Mixto Caño Negro, alajuela, Costa Rica: Plan de Manejo 2012-2020* (p. 111). <https://www.sinac.go.cr/ES/planmanejo/Plan Manejo>

- ACAHN/Plan General de Manejo RNMVS Caño Negro (2012).pdf
- Skolnik. (2013). Radar Handbook. In *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis* (Vol. 53).
- Solano, E. (2017). *Resumen Meteorológico de noviembre de 2017*.
<https://www.imn.ac.cr/documents/10179/454290/SETIEMBRE>
- Solano, J., & Villalobos, R. (2012). Regiones y sub-regiones climáticas de Costa Rica. *Instituto Meteorológico Nacional, mapa 1*, 32.
- Sotela, O. B., & Murrillo, L. S. (2016). Uso / Cobertura De La Tierra En Los Cantones De Upala , Guatuso Y Los Chiles En El Año 2011. *Revista Geográfica de America Central*, 56, 59–91.
<https://doi.org/DOI:> <http://dx.doi.org/10.15359/rgac.1-56.3>
- Tarpanelli, A., Mondini, A. C., & Camici, S. (2022). Effectiveness of Sentinel-1 and Sentinel-2 for flood detection assessment in Europe. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(8), 2473–2489. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-2473-2022>
- Tsyganskaya, V., Martinis, S., & Marzahn, P. (2019). Flood monitoring in vegetated areas using multitemporal Sentinel-1 data: Impact of time series features. *Water (Switzerland)*, 11(9).
<https://doi.org/10.3390/w11091938>
- Tsyganskaya, V., Martinis, S., Marzahn, P., & Ludwig, R. (2018a). 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>
- Tsyganskaya, V., Martinis, S., Marzahn, P., & Ludwig, R. (2018b). Detection of Temporary Flooded Vegetation Using Sentinel-1 Time Series Data. *Remote Sensing*, 10(8), 1286.
<https://doi.org/10.3390/rs10081286>
- Twele, A., Cao, W., Plank, S., & Martinis, S. (2016). Sentinel-1-based flood mapping: a fully automated processing chain. *International Journal of Remote Sensing*, 37(13), 2990–3004.
<https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1192304>
- Uddin, K., Matin, M. A., & Meyer, F. J. (2019). Operational flood mapping using multi-temporal

- Sentinel-1 SAR images: A case study from Bangladesh. *Remote Sensing*, 11(13).
<https://doi.org/10.3390/rs11131581>
- Ulloa, N. I., Yun, S. H., Chiang, S. H., & Furuta, R. (2022). Sentinel-1 Spatiotemporal Simulation Using Convolutional LSTM for Flood Mapping. *Remote Sensing*, 14(2).
<https://doi.org/10.3390/rs14020246>
- Umaña González, P. (2017). *Los humedales contribuyen a mitigar el impacto de fenómenos naturales*. Universidad de Costa Rica. <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2017/02/07/los-humedales-contribuyen-a-mitigar-el-impacto-de-fenomenos-naturales.html>
- Villasuso, J. M. (2000). *Reformas Estructurales y Política Económica en Costa Rica*.
<https://www.cepal.org/es/publicaciones/7608-reformas-estructurales-politica-economica-costarica>
- Vindas, R. (2019). *Resumen Meteorológico de agosto de 2019*.
<https://www.imn.ac.cr/documents/10179/474355/AGOSTO>
- Woodhouse, I. (2006). Introduction to Microwave Remote Sensing. In *Taylor & Francis* (Primera ed).
- Zadeh, L. (1965). Fuzzy Sets. *Information and Control*, 8, 338–353.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
- Zhang, Meimei, Chen, F., Liang, D., Tian, B., & Yang, A. (2020). Use of sentinel-1 grd sar images to delineate flood extent in Pakistan. *Sustainability (Switzerland)*, 12(14), 1–19.
<https://doi.org/10.3390/su12145784>
- Zhang, Meinan, Huang, H., Li, Z., Hackman, K. O., Liu, C., Andriamiarisoa, R. L., Rahevivo, T. N. A. N., Li, Y., & Gong, P. (2020). Automatic high-resolution land cover production in madagascar using sentinel-2 time series, tile-based image classification and google earth engine. *Remote Sensing*, 12(21), 1–15. <https://doi.org/10.3390/rs12213663>
- Zumbado-Morales, F., & Mesén-Leal, R. (2018). Gestión de cuencas y turismo. Caso de la cuenca

del Río Frío, Guatuso, Costa Rica. *Economía, Sociedad y Territorio*, 18(56), 141–163.
<https://doi.org/10.22136/est20181110>

