

UNIVERSIDAD CATOLICA DE MANIZALES
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
MAESTRIA EN TELEDETECCION (SENSORAMIENTO REMOTO)
INFORME FINAL DE INVESTIGACION

**USO DE MODELO DE ELEVACION DIGITAL EN PROYECTOS DE MODELACION
HIDRAULICA EMPLEANDO TECNICAS DE INTERFEROMETRIA DE RADAR DE
APERTURA SINTETICA (InSAR)**

ESTUDIANTE

CLAUDIA PATRICIA MUNERA MESA

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INVESTIGACION

ANGELA MARIA ALZATE ALVAREZ

CODIRECTOR DEL TRABAJO DE INVESTIGACION

MARIO FERNANDO MONTERROSO TOBAR

Octubre 2019

DEDICATORIA

A mi hija Isabella y mi familia.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia, por apoyarme siempre y por el acompañamiento que han tenido conmigo durante toda mi vida profesional.

A mi Directora Ángela María, por sus aportes en la revisión del documento de investigación.

A mi Codirector Fernando Monterroso, por su paciencia, explicaciones y apoyo incondicional en el desarrollo de los temas que se exponen en el trabajo de investigación.

A mis compañeros de maestría y amigos, por compartir conmigo estos años de estudio.

A Sarah Weber por su apoyo durante la última etapa de la maestría.

A la Universidad Católica de Manizales, por la formación que he recibido de ella durante estos últimos años.

TABLA DE CONTENIDO

1	RESUMEN	1
2	INTRODUCCIÓN.....	2
3	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	4
4	JUSTIFICACIÓN	7
5	OBJETIVOS	9
5.1	Objetivo general	9
5.2	Objetivos específicos.....	9
6	MARCO TEÓRICO	9
6.1	Teledetección	9
6.2	Imágenes de radar	11
6.3	Radar de apertura sintética SAR.....	13
6.3.1	Principios básicos de los sistemas SAR.....	18
6.3.2	Formación de las imágenes de radar SAR	21
6.4	Interferometría SAR (InSAR).....	21
6.5	Aplicaciones InSAR en la generación de modelos digitales de elevación	25
6.6	Aplicaciones SAR en la modelación hidráulica para determinar zonas de inundación.....	27
7	ZONA DE ESTUDIO	33
8	METODOLOGÍA	37
8.1	Enfoque	37
8.2	Proceso metodológico para la estimación del MDE usando InSAR.....	38
8.3	Proceso metodológico para la implementación del modelo hidráulico	54
8.4	Proceso metodológico para la estimación del mapa de inundación a partir del procesamiento de Imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR).....	57
9	RESULTADOS	64
9.1	Determinación del MDE de la franja o corredor de inundación del río Negro mediante el uso de imágenes de radar SENTINEL-1 usando interferometría SAR	64
9.1.1	MDE obtenido de la franja de inundación del río Negro	64
9.1.2	Validación de modelos digitales de elevación generados con InSAR	65
9.2	Implementación del modelo hidráulico.....	72
9.2.1	Análisis hidrológico	72
9.2.2	Geometría del canal a modelar.....	73
9.2.3	HEC-RAS - Modelación hidráulica	73
9.2.4	Condiciones iniciales y de frontera del modelo hidráulico	75
9.2.5	Calibración del modelo hidráulico - Rugosidad de Manning	76
9.2.6	Validación del modelo hidráulico.....	77
9.2.7	Simulación de un evento de inundación de creciente asociado al período de retorno de los 100 años.....	84
10	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	88

11	CONCLUSIONES.....	91
12	BIBLIOGRAFÍA	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Elementos que conforman un sistema de teledetección	10
Figura 2.	Zona del espectro	12
Figura 3.	Evolución temporal de los satélites SAR	16
Figura 4.	Geometría de un Radar de Apertura Real - RAR	16
Figura 5.	Geometría de un Radar de Apertura Sintética -SAR-.....	17
Figura 6.	Deformación por topografía en imágenes SAR	18
Figura 7.	Componentes de una onda electromagnética	19
Figura 8.	Penetración de cada banda para diferentes tipos de coberturas	20
Figura 9.	Retro dispersión de diferentes objetos en la superficie terrestre.	21
Figura 10.	Ciclos de Fase para la Generación de un Interferograma	24
Figura 11.	Geometría de Generación de InSAR	24
Figura 12.	Ubicación espacial de la cuenca tributaria del río Negro	34
Figura 13.	Localización de las estaciones de caudal ubicadas al interior del cauce principal del río Negro.....	36
Figura 14.	Flujograma metodología implementada	37
Figura 15.	Diagrama de flujo para la generación del MDE	38
Figura 16.	Imágenes SAR utilizadas.....	40
Figura 17.	Interferograma 2016 sin filtro	42
Figura 18.	Interferograma 2017 sin filtro	43
Figura 19.	Interferograma 2018 sin filtro	43
Figura 20.	Interferograma 2019 sin filtro	44
Figura 21.	Imagen de coherencia (izq), histograma de coherencia (der)	45
Figura 22.	Interferograma 2016 después de aplicar el filtro Deburst.....	47
Figura 23.	Interferograma 2017 después de aplicar el filtro Deburst.....	47
Figura 24.	Interferograma 2018 después de aplicar el filtro Deburst.....	48
Figura 25.	Interferograma 2019 después de aplicar el filtro Deburst.....	48
Figura 26.	Interferograma 2016 después de aplicar el filtro Goldstein.....	49
Figura 27.	Interferograma 2017 después de aplicar el filtro Goldstein.....	49
Figura 28.	Interferograma 2018 después de aplicar el filtro Goldstein.....	49
Figura 29.	Interferograma 2019 después de aplicar el filtro Goldstein.....	49
Figura 30.	Interferograma desenvuelto 2016.....	50
Figura 31.	Interferograma desenvuelto 2017.....	50
Figura 32.	Interferograma desenvuelto 2018.....	50

Figura 33. Interferograma desenvuelto 2019.....	50
Figura 34. DEM 2016	51
Figura 35. DEM 2017	51
Figura 36. DEM 2018	51
Figura 37. DEM 2019	52
Figura 38. DEM georreferenciado y orto rectificado - 2016	52
Figura 39. DEM georreferenciado y orto rectificado - 2017	53
Figura 40. DEM georreferenciado y orto rectificado - 2018	53
Figura 41. DEM georreferenciado y orto rectificado - 2019	54
Figura 42. Diagrama de flujo para la implementación del modelo hidráulico.....	54
Figura 43. Definición de la geometría del modelo hidráulico - DEM, alineamiento río y secciones transversales.....	55
Figura 44. Diagrama de flujo para la generación del mapa de inundación a partir del procesamiento de imágenes de radar de apertura sintética (SAR).....	58
Figura 45. Imágenes SAR 09 de mayo de 2018 y 21 de mayo de 2018	59
Figura 46. Recortes de imágenes SAR 09 de mayo de 2018 y 21 de mayo de 2018	59
Figura 47. Imágenes calibradas SAR 09 de mayo de 2018 y 21 de mayo de 2018	60
Figura 48. Imágenes filtradas SAR 09 de mayo de 2018 y 21 de mayo de 2018	60
Figura 49. Imágenes corregidas geoméricamente SAR 09 de mayo de 2018 y 21 de mayo de 2018	61
Figura 50. Imagen producto de juntar la imagen SAR 09 de mayo de 2018 con la imagen SAR de 21 de mayo de 2018.....	61
Figura 51. Representación de la imagen en RGB	62
Figura 52. Imágenes clasificadas por clases	63
Figura 53. Polígono de inundación del evento ocurrido el 20 de mayo de 2018	63
Figura 54. Perfil longitudinal del río Negro MDE Sentinel 1 vs MDE referencia	65
Zona con presencia de cobertura vegetal	65
Zona sin presencia de cobertura vegetal	65
Figura 55. Secciones transversales	65
Figura 56. MDE franja de inundación río Negro	66
Figura 57. MDE CARTOANTIOQUIA	66
Figura 58. Puntos de control topográfico.....	67
Figura 59. Histograma de frecuencias - MDE	68
Figura 60. Mapa de diferencias de altura MDE Cartoantioquía y MDEs Sentinel 1	70
Figura 61. Comparación secciones transversales MDE 2018 versus MDE de referencia...	71
Figura 62. Serie de caudales máximos diarios ajustados - Estación Puente Real	73

Figura 63. Alineamiento y secciones implementadas en el modelo hidráulico.....	74
Figura 64. Tramo de simulación y caudales considerados en los principales afluentes del río Negro.....	75
Figura 65. Hidrógrafa registrada en el evento máximo registrado el 20 de mayo de 2018	77
Figura 66. Mancha de inundación obtenida de la modelación hidráulica - Validación modelo	78
Figura 67. Mancha de inundación obtenida del procesamiento de imágenes de radar - Evento ocurrido el 20 de mayo de 2018.....	79
Figura 68. Subtramos río Negro	80
Figura 69. Conformación del cauce -Subtramo zona rural sin meandros.....	80
Figura 70. Conformación del cauce -Subtramo zona rural con meandros.....	81
Figura 71. Conformación del cauce -Subtramo zona urbana.....	82
Figura 72. Conformación del cauce -Subtramo zona rural - Aguas abajo de la zona urbana	82
Figura 73. Anchos de las llanuras de inundación del río Negro - Modelación hidráulica vs inundación real	84
Figura 74. Mancha de inundación Tr=100 años.....	85
Figura 75. Detalle de inundación del río Negro en el tramo de zona rural con meandros y zona urbana del municipio de Rionegro.....	86
Figura 76. Perfil hidráulico del río Negro - Tr=100 años.....	87
Figura 77. Secciones transversales del cauce del río Negro.....	88

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	SAR vs otros instrumentos de observación terrestre.	11
Tabla 2.	Longitudes de onda de radar	12
Tabla 3.	Descripción general de los sensores espaciales SAR y sus principales características	13
Tabla 4.	Características de las bandas.....	19
Tabla 5.	Misiones satelitales para el uso del monitoreo de inundaciones	28
Tabla 6.	Aplicaciones SAR en modelos hidráulicos	31
Tabla 7.	Características de las imágenes procesadas - Generación MDE.....	40
Tabla 8.	Características de las imágenes procesadas - Generación zonas de inundación	57
Tabla 9.	Parámetros estadísticos de los MDE (valores en metros)	67
Tabla 10.	RMSE de las diferencias entre los MDEs	70
Tabla 11.	Comparación cotas elevación MDE versus puntos de control	71
Tabla 12.	Información hidrometeorológica	72
Tabla 13.	Rendimiento hidrológico del río Negro.....	72
Tabla 14.	Caudales usados como condición inicial en el modelo.....	75
Tabla 15.	Calibración HEC-RAS	76
Tabla 16.	RMS tramos de modelación	83

1 RESUMEN

El presente proyecto tiene como finalidad estimar las zonas de inundación del río Negro (municipio de Rionegro - Antioquia), implementando un modelo hidráulico bidimensional a partir de un Modelo Digital de Elevación DEM obtenido de Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR), utilizando imágenes de Sentinel 1. Así mismo, se calibró y validó el modelo con datos de inundaciones ocurridas en la zona. Los resultados obtenidos muestran la utilidad y potencial de usar datos InSAR en la modelación de eventos de inundación, donde el error vertical es relativamente bajo en las zonas de baja pendiente y poca presencia de cobertura vegetal; obteniéndose resultados que se aproximan un 8% a eventos de inundación ocurridos en la zona.

La disponibilidad de datos SAR del Satélite Sentinel ofrece una oportunidad para la observación, simulación y pronóstico de eventos de inundación, permitiendo la posibilidad de implementar modelos de simulación numéricos precisos, rápidos y rentables.

Palabras claves: Inundaciones, InSAR, modelación hidráulica, Sentinel-1.

ABSTRACT

The purpose of this project is to estimate the flood zones of the Negro River (municipality of Rionegro - Antioquia), implementing a two-dimensional hydraulic model based on a Digital Elevation Model DEM obtained from Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR), using images Sentinel 1. Likewise, the model with flood data in the area, was calibrated and validated. The results obtained show the usefulness and potential of using InSAR data in the modeling of flood events. The vertical error is relatively low in areas of low slope and low presence of vegetation cover. Result were obtained that approximate 8% to flood events in the area.

The availability of Sentinel Satellite SAR data offers an opportunity for observation, simulation and forecasting of flood events, allowing the possibility of implementing precise, fast and cost-effective numerical simulation models.

Keywords: Floods, InSAR, hydraulic modeling, Sentinel-1.

2 INTRODUCCIÓN

Los eventos de inundaciones se encuentran entre las amenazas naturales más peligrosos y sus impactos han aumentado dramáticamente en todo el mundo durante las últimas décadas (Yan K. , 2015), representando el 56% de todos los desastres relacionados con el clima que ha tenido graves impactos ambientales y sociales a nivel global (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), 2015).

Según Mason, Schumann, & Bates (2018) la mayoría de las cuencas del mundo no están instrumentadas, por tanto, la distribución espacial del riesgo de inundación es a menudo difícil de estimar debido al alto costo de adquisición de información topográfica y la falta de información hidrometeorológica; información que es necesaria para implementar modelos de inundación.

Los modelos hidráulicos son una herramienta importante para el pronóstico y predicción de la extensión y magnitud de eventos de inundación; proporcionando información de mapas de amenazas y evaluación del riesgo ante un posible escenario de inundación, permitiendo estimar las zonas afectadas y toma de medidas de mitigación ante las posibles amenazas a las poblaciones que son vulnerables a estos acontecimientos.

En los últimos años se ha facilitado la adquisición de la información relacionada con los Modelos Digitales del Terreno (DEM) a una escala detallada con el uso de las imágenes satelitales, herramientas que han permitido desarrollar estudios relacionados con eventos de inundación. Esta nueva tecnología de adquisición de información ha permitido agilizar los tiempos de entrega de proyectos, al igual que una mejor calidad en la información comparada con información topográfica adquirida de levantamientos topográficos realizados con equipo terrestre.

La topografía de la planicie de inundación es la variable principal que afecta el movimiento de la onda de inundación y la predicción de la extensión de la misma; por tanto, los datos de elevación de la superficie terrestre son un aporte crítico e importante para un modelo hidráulico de inundación, que controla el flujo de agua a través de la llanura de inundación. A mayor detalle en los datos del terreno, mayor es la precisión para predecir la extensión de la inundación. Sin embargo, la resolución espacial y la precisión vertical de diferentes conjuntos de datos de elevación varían mucho y pueden producir diferencias significativas en los resultados de modelo hidráulico implementados.

Entre los sistemas satelitales que brindan datos topográficos, existen plataformas cuya información es gratuita, de fácil acceso y con disponibilidad a nivel mundial. Entre estos, está el sistema radar *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM), el sistema ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) y ALOS PALSAR que se destacan por su alta resolución espacial y disponibilidad global. Si bien, estos sistemas muestran rangos de precisiones conocidas, algunos autores señalan que esto dependerá finalmente de las situaciones locales presentes en la zona de estudio (Kiamehr & Sjöberg, 2005; Schumann, et al, 2008; Li & Wong, 2009).

Algunos estudios han demostrado el potencial e importancia de la teledetección en el contexto de la detección de inundaciones (Rahman & Di, 2017). En particular, mapeando los eventos de inundación implementando los sistemas de Radar de Apertura Sintética (SAR), a través de técnicas como la retrodispersión o análisis de la intensidad y la coherencia InSAR han sido utilizados para identificar la presencia de agua; Refice, et al. (2014) y Chayma, et al. (2018) implementaron este tipo de técnicas, mostrando que la coherencia InSAR permite delimitar los campos inundados que exhiben pocos cambios en la intensidad de retrodispersión.

Por otro lado, respecto a la modelación de inundaciones, se ha encontrado que en la última década ha habido avances significativos en la comprensión y entendimiento de los procesos que controlan la escorrentía y la propagación de la onda de inundación, en las técnicas de simulación hidráulica, considerando nuevas fuentes de información topográfica y el manejo de la incertidumbre asociado; estudios como el de Ackermann (1994), Dutta y Herat (1998), Cuartero, et al. (2001), Cuartero, et al. (2003), Kumar (2005), Ludwig & Schneider (2006), Hoffman (2006), Tarekegn *et al.* (2010), Lencinas *et al.* (2010), Díaz *et al.* (2010), Jacobsen (2010), Rozas Vásquez *et al.* (2010), Yamazaki *et al.* (2012), Burgos (2012) y (Yan K. , 2015) emplearon MDE globales para hacer estimaciones hidrológicas e hidráulicas para estudio de inundación, obteniéndose buenos resultados, a pesar de las incertidumbres obtenidas por el tipo de información utilizada.

De acuerdo a lo anterior, se encontró que hoy en día existe un consenso general de que la mayor disponibilidad y calidad de los datos de detección remota de bajo costo o libre acceso es información valiosa para mejorar la predicción de inundaciones en cuencas no instrumentadas, sin embargo, su valor y potencial para soportar la modelación hidráulico de inundaciones aún no se han explorado suficientemente en vista de la inevitable incertidumbre que afecta a cualquier ejercicio de modelación. En este contexto, esta

investigación tiene como objetivo explorar el potencial y las limitaciones de las técnicas de InSAR en proyectos de modelación hidráulica empleando técnicas de InSAR mediante el uso de imágenes de Sentinel 1 del programa Copernicus de la agencia espacial europea, aplicado al río Negro en el municipio de Rionegro departamento de Antioquia en Colombia.

El documento está organizado de la siguiente manera: en el capítulo 3 se define el problema de investigación; en el capítulo 4 se expone la justificación del trabajo investigativo; en el capítulo 5 se definen los objetivos; en el capítulo 6 se expone el marco teórico base de la investigación; en el capítulo 7 se presenta la metodología implementada en cada una de las actividades analizadas; en el capítulo 8 se presentan los resultados; en el capítulo 9 se discuten los resultados obtenidos y en el capítulo 10 se proponen las conclusiones obtenidas de la investigación.

3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Las inundaciones representan una de las amenazas naturales más costosas y perjudiciales del mundo (Plate, 2002). Esta situación es particularmente evidente en las regiones o zonas menos desarrolladas, en especial en las zonas que se ubican dentro del trópico, donde la carencia de información impide la delimitación adecuada de los límites de inundación.

La falta de información pertinente que permita definir las zonas con condiciones de riesgo asociadas a estos fenómenos naturales, pone en riesgo a las poblaciones aledañas que residen cerca o en la propia llanura de inundación, dado que carecen de información adecuada que permita tomar decisiones acerca de las medidas a implementar para mitigar la condición de riesgo asociada al efecto de inundación de una corriente hídrica.

Por lo tanto, las inundaciones representan una preocupación apremiante la cual debe considerarse como uno de los roles aplicados más importantes de las ciencias hidrológicas (Bronstert & Menzel, 2002). La falta de información topográfica de alta resolución dentro de muchas regiones infiere que los enfoques de teledetección para el mapeo y delimitación de llanuras de inundación son estudios prometedores, en especial en las zonas de baja pendiente, donde existen amplios valles y la topografía asociadas a estas zonas resulta ser compleja por la extensión y amplitud de la misma, donde el

trabajo de campo resulta ser bastante complejo y en algunos casos imposible de realizarse dada las restricciones de acceso y coberturas existentes.

Actualmente existen herramientas y técnicas en teledetección que permiten la captura de información espacial para la delimitación y definición de zonas de inundación; Birkett, 2000; Frazier & Page, 2000; Pietroniro & Prowse, 2000; Smith, 1997; Toyra et al., 2002 delimitaron áreas de inundación en valles aluviales empleando la porción del infrarrojo del espectro electromagnético; Refice, et al., (2014) y Chayma, et al. (2018) delimitaron manchas de inundación empleando técnicas de retrodispersión con imágenes de radar.

Por otro lado, existe otro enfoque de delimitar las llanuras de inundación, a través de modelos numéricos o modelación hidráulica, técnica que requiere de información topográfica como el dato de entrada más importante para la implementación del mismo (Farr et al., 2007) y adicionalmente, corresponde a una de las fuentes con mayor incertidumbre y sensibilidad en el desarrollo de modelación hidráulica (Jung et al., 2012a).

De acuerdo a lo anterior, se tiene que cuando mayor es el detalle y resolución en los datos de la superficie de la tierra o información topográfica, mayor será la precisión para predecir la extensión de la inundación. Sin embargo, la resolución espacial y la precisión vertical de diferentes conjuntos de datos de elevación varían mucho y pueden producir diferencias significativas en la salida del modelo de simulación hidráulica. Esto tiene implicaciones para el uso rutinario de modelos de inundación que permitan la evaluación del riesgo de inundación. Por tanto, es importante estudiar la capacidad de los diferentes conjuntos de datos de elevación o modelo digitales de elevación disponibles para evaluar su aplicabilidad en la modelación hidráulica de inundaciones.

Estudios hidráulicos empleando DEM globales (SRTM y ASTER DEM) realizados por Kumar (2005), Yamazaki *et al.* (2012) y Yan K. (2015) evalúan la aplicabilidad de estos modelos digitales de elevación, mostrando resultados satisfactorios de modelación hidráulica con incertidumbres de 14.70 m a 16.0 m.

Adicional a los modelos de elevación globales que existen en la actualidad y que son de libre acceso, se cuenta con la posibilidad de generar nuevos modelos de elevación digital a partir de la técnica de Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR), encontrándose varias aplicaciones en la extracción de DEM (Kyriou, A., Nikolakopoulos,

K. 2018; Zhu, X., X., et al.2018; Rizzoli, P., et al.2017; Dubois, C., et al.2016; Avtar, R., et al.2015; Rossi, C., et al.2013; Liao, M., et al.2013; Zhang, W., et al.2012; Zhou, H., et al. al.2011; Wegmuller, U., et al.2009); obteniéndose con esta técnica un enfoque poderoso para derivar DEM de calidad a partir de un par de imágenes SAR.

Dentro de las imágenes SAR existentes en la actualidad, vale la pena mencionar que el programa de observación de la Tierra Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA), ofrece datos satelitales de dominio abierto, como es el caso de las imágenes de Sentinel 1, a partir del cual se obtiene información SAR con resolución temporal de 12 días. Esta liberación de información al público ha abierto una nueva dimensión en la ciencia de la observación de la tierra y constituye un hito notable en la historia de la teledetección (Letsios, et al., 2019), generando una fuente de información gratis a nivel global de la superficie terrestre que permite obtener información topográfica de cualquier lugar del mundo.

De acuerdo a lo anterior y teniendo en cuenta los avances en la generación de datos espaciales de campo utilizando sensores remotos e información geográfica (GIS), es posible integrar datos espaciales con técnicas como InSAR en una representación casi verdadera de la topografía de la llanura de inundación. En el presente trabajo investigativo, se busca implementar un modelo hidráulico para determinar la llanura de inundación en un cauce de planicie (río Negro localizado en el municipio de Rionegro en el departamento de Antioquia - Colombia) tomando como información topográfica un modelo digital de elevación estimado a partir de la implementación de técnicas de Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) usando imágenes Sentinel 1.

Con la implementación del modelo hidráulico se busca dar respuesta a las siguientes preguntas: ¿Cómo se pueden emplear las técnicas de InSAR en proyectos de modelación hidráulica para predecir un evento de inundación empleando las imágenes de Sentinel 1?, ¿Cuál es la incertidumbre del modelo hidráulico implementado a partir del DEM generado con las técnicas InSAR?, ¿Cómo afecta la incertidumbre del DEM generado los resultados del modelo hidráulico? y ¿Cuál es la precisión del modelo de inundación implementado para reproducir eventos de creciente sobre el río Negro utilizando la topografía obtenida a través de InSAR con imágenes Sentinel 1?.

4 JUSTIFICACIÓN

De manera general, los estudios para delimitar las manchas de inundación se han venido realizando aplicando técnicas de retrodispersión con imágenes de radar y técnicas de clasificación empleando la porción del infrarrojo del espectro electromagnético con imágenes ópticas. También se han implementado modelos numéricos de simulación hidráulica usando información topográfica tomada directamente de campo o información capturada espacialmente, encontrándose que los modelos globales de elevación digital han sido ampliamente utilizados para delimitar zonas de inundación considerando escenarios de inundación de crecientes.

En las ciencias hidrológicas, la teledetección ofrece un medio de coste eficiente para tener información topográfica de buena calidad para la simulación de eventos de inundación y delimitación de zonas con posibles condiciones de riesgo de amenaza por inundación, constituyéndose como uno de los aportes más importantes en la historia de la teledetección la liberación de información gratis como es el caso de las imágenes de Sentinel, información que permite obtener características topográficas de cualquier parte del mundo y que a la vez es insumo para el desarrollo de estudios asociados con la superficie terrestre y las dinámicas que se generan en ella.

Actualmente, el estudio de eventos de inundación es vital para la planificación y desarrollo de un territorio; por tal razón, se hace necesario la búsqueda de alternativas o nuevas herramientas que permitan obtener información cartográfica de calidad, de fácil obtención para generar modelos cartográficos adecuados que sirvan de insumo para implementar modelos hidráulicos de inundación de forma precisa, a bajo costo y a corto tiempo, sin incurrir en costos elevados y períodos de tiempo extensos para la obtención de las zonas que son objeto de inundación.

De acuerdo a lo anterior, este estudio pretende evaluar el uso de modelo de elevación digital en proyectos de modelación hidráulica empleando técnicas de interferometría de radar de apertura sintética (InSAR) con imágenes de Sentinel 1, para determinar la aplicabilidad de esta información cartográfica en modelos de simulación hidráulicos en escenarios de eventos de crecientes o inundaciones aplicado a un cauce de planicie que presenta amplias llanuras de inundación.

La Interferometría de Radar de Apertura Sintética -InSAR- (por sus siglas en inglés) es reconocida como una herramienta muy prometedora para la captura de información

cartográfica, convirtiéndose en una de las aplicaciones de las imágenes radar que presenta más perspectivas de futuro en cuanto a su aplicación a la extracción de topografía, conocida como una técnica que se centra en el estudio y explotación de información proporcionada por las imágenes de fase de las imágenes complejas InSAR, donde se utilizan dos imágenes de una misma escena, tomadas por dos antenas separadas, que permiten derivar la información altimétrica a partir de la diferencia de fase de las ondas observadas desde cada una de las posiciones orbitales.

Al aplicar esta técnica en la evaluación hidráulica de un cauce de planicie, se pueden realizar comparaciones con eventos de inundaciones reales presentados en la zona, que permitirá identificar la precisión de la información cartográfica obtenida a partir de esta herramienta y la pertinencia de usar esta información para simular eventos de crecientes en cauces con zonas de planicie extensas.

El uso de InSAR en el estudio de modelación hidráulica de inundaciones utilizando imágenes de Sentinel 1, será un aporte a las ciencias hidrológicas, porque permitirá identificar la aplicabilidad de los modelos digitales obtenidos a partir de esta técnica de InSAR en la simulación de escenarios de creciente; herramienta que será de insumo para los entes territoriales, comunidades y autoridades ambientales, como instrumento de planificación, para delimitar las franjas de inundación y zonas con condiciones de riesgo por inundación; insumo para los tomadores de decisiones en la prevención, protección y gestión de los riesgos de inundaciones de poblaciones que se acentúan cerca de quebradas.

En este orden de ideas, se podrá contar con información actualizada, para delimitar la zona de inundación en la región de estudio y generar un nuevo conocimiento referente a las ventajas y limitaciones del uso de cartografía InSAR con imágenes de Sentinel 1 para la implementación de modelos de inundación hídrica; logrando un mayor entendimiento y comprensión de la información y procesamiento de la misma para la definición de las zonas inundables.

5 OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Evaluar las técnicas de interferometría de radar de apertura sintética (InSAR) en la generación de modelos digitales del terreno, como herramienta para proyectos de modelación hidráulica en el municipio de Rionegro Antioquia.

5.2 Objetivos específicos

- Determinar la calidad de Modelos Digitales de Elevación generados por imágenes de Sentinel-1 a partir de InSAR.
- Generar modelos de inundación a partir del procesamiento de Imágenes de Radar de Apertura Sintética en el área de Rionegro Antioquia.
- Cuantificar la incertidumbre del DEM generado y evaluar el efecto de esta incertidumbre en el mapeo de la llanura de inundación con el modelo hidráulico implementado.
- Validar la calidad de los resultados obtenidos del modelo hidráulico usando InSAR con otros modelos de inundación implementados en la zona.

6 MARCO TEÓRICO

Teniendo en cuenta que el objetivo principal de este trabajo de grado se enfoca en la utilización de imágenes de radar empleando técnicas de Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) para estudios de modelación hidráulica, es necesario plantear algunos parámetros que sirvan de ejes conceptuales para el entendimiento y descripción de técnicas específicas en la utilización de este tipo de imágenes satelitales, así como conceptos sobre hidrología, hidráulica y riesgos por inundación. Igualmente se presenta un estado del arte en la aplicación de estas técnicas para el estudio de inundaciones.

6.1 Teledetección

La teledetección espacial es una técnica que consiste en la captura, procesamiento y análisis de la información espacial capturada o adquirida de la superficie terrestre y la atmósfera desde sensores instalados en plataformas espaciales, cuyo objeto principal es la obtención de información de las propiedades físicas de un objeto o un fenómeno sin necesidad de tener contacto directo con el mismo; información que es representada a

través de imágenes o matrices que dejan ver las características del objeto o fenómeno capturado.

La teledetección es definida como la ciencia de capturar datos de la superficie de la tierra sin entrar en contacto con ella, la cual se realiza detectando y grabando la energía emitida o reflejada y procesando, analizando y aplicando esa información (Pellikka & Rees, 2010; Chuvieco, 1996 y Tricart, 1979).

Dado que la técnica no tiene contacto directo con el objeto evaluado, requiere que entre el sensor y el objeto haya un flujo de información, el cual es conocido como radiación electromagnética la cual puede ser emitida por el objeto o proceder de otro cuerpo y haber sido reflejada por este. El mayor emisor de esta radiación en el sistema solar es el sol, y la radiación que refleja la tierra y los objetos situados en ella es la que se utiliza comúnmente en Teledetección (Chuvieco, 1996).

Se llama teledetección pasiva cuando la fuente de la energía medida es el sol y teledetección activa cuando la energía medida no es emitida por el sol sino emitida desde el sensor de la plataforma, como los sensores de radar que trabajan en el rango de las microondas (Richards & Jia, 2006).

En el proceso de teledetección se involucra una interacción entre la radiación incidente y los objetos de interés, donde también se involucra la percepción de energía emitida y el uso de sensores que no requieren energía solar (Figura 1).

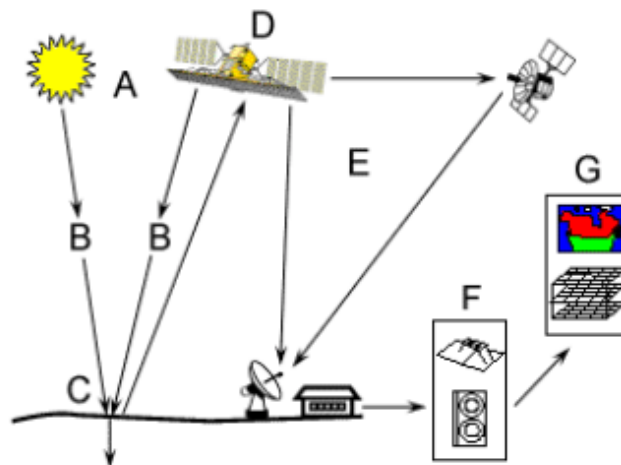


Figura 1. Elementos que conforman un sistema de teledetección

Fuente: Sanchez (2012)

En la literatura investigada, se encontró que esta técnica presenta sus primeros trabajos o inicios en la década de los 60, inicialmente aplicada en plataformas aéreas hasta llegar a las actuales plataformas satelitales para la obtención de imágenes de la superficie (Chuvieco E. , 1996).

6.2 Imágenes de radar

Como se expuso anteriormente, los sistemas de teledetección pueden ser pasivos o activos dependiendo del sistema de flujo energético que estos posean, en el caso de los sistemas de radar, estos son sistemas activos, ya que poseen su propia fuente de energía, lo que les permite emitir esta energía sobre los objetos observados y capturar la señal que se refleja.

En la Tabla 1 se observa una comparación entre los sistemas de teledetección multispectral, lidar y radar:

Tabla 1. SAR vs otros instrumentos de observación terrestre.

Sistema de teledetección	Lidar	Óptico multispectral	Radar
Plataforma	Aérea	Aérea - Espacial	Aérea - Espacial
Radiación	Propia	Reflejo solar	Propia
Espectro electromagnético	Infrarrojo	Visible - Infrarrojo	Microondas
Frecuencia	Única	Múltiple	Múltiple
Polarimetría	No aplica	No aplica	Fase polarimétrica
Interferometría	No aplica	No aplica	Fase interferométrica
Tiempo de adquisición	Día - Noche	Día	Día - Noche
Clima	Bloqueo por nubes	Bloqueo por nubes	Ve a través de las nubes

Fuente: Sarmap (2009)

Acordando a la Tabla 1, se tiene que los sistemas de radar tienen ventajas evidentes sobre los otros sistemas de teledetección, lo cual es beneficioso a la hora de obtener insumos para realizar estudios de deformación de terreno, estudio de amenazas y riesgos, elaboración de DEM'S, entre otras aplicaciones (Sarmap, 2009).

Adicional a lo anterior, se tiene que las imágenes de RADAR trabajan en la zona del espectro electromagnético de la longitud de onda de microondas (0.3 y 100 cm) (Figura

2). Por esta razón, estas imágenes tienen la ventaja de capturar información con presencia nubes y lluvia, así como la toma de información en la oscuridad.

Según Chavez (2010), el rango del espectro para las bandas del microondas está representado por las letras C, L y X y las letras P, S y Q (Tabla 2).

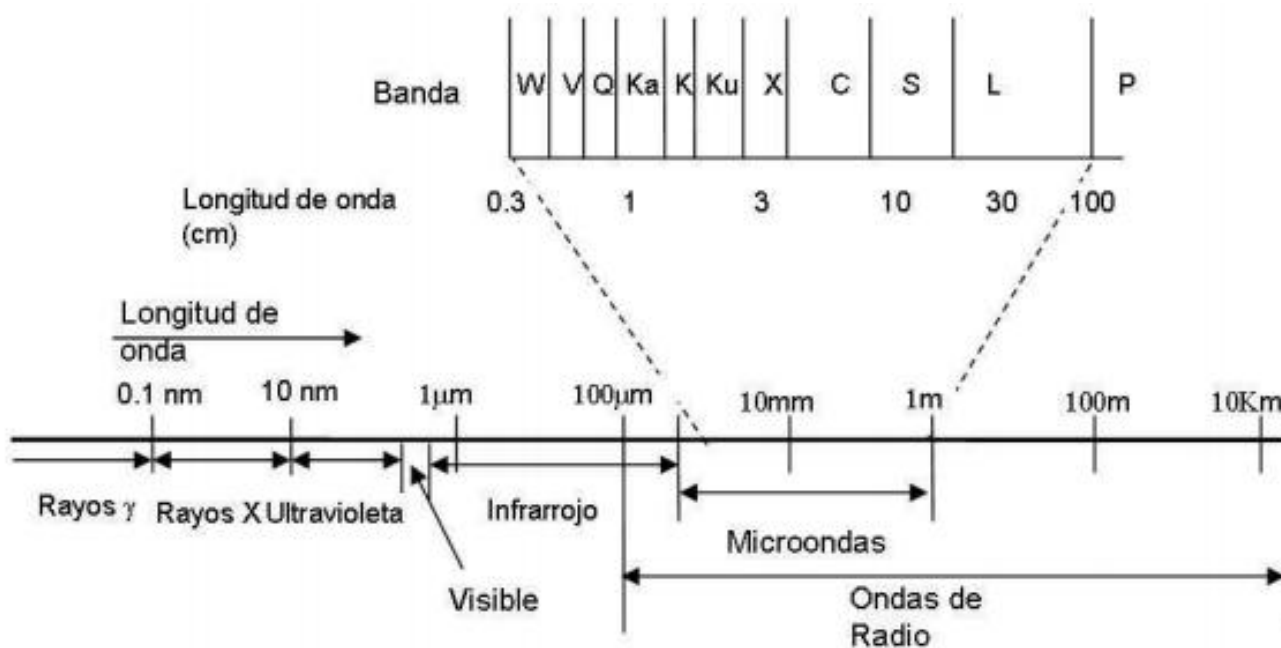


Figura 2. Zona del espectro

Fuente: Fernández (2009)

Tabla 2. Longitudes de onda de radar

Banda	Frecuencia (GHz)	Longitud de onda (cm)
P	0.3-1	30-100
L	1-2	15-30
S	2-4	7.5-15
C	4-8	3.75-7.5
X	8-12.5	2.4-3.75
Ku	12.5-18	1.67-2.4
K	18-26.5	1.1-1.67
Ka	26.5-40	0.75-1.1
Milimétrica a submilimétrica	100-26.5	0.3-0.75

Fuente: Fernández (2009)

Una de las grandes virtudes en el trabajo de imágenes satelitales en este rango del espectro es que es transparente a la influencia atmosférica, lo cual se considera como

una ventaja si se compara con el trabajo con imágenes en zonas del espectro óptico, ya que son imágenes idóneas para el trabajo en zonas del planeta que presentan alta nubosidad (Chuvieco E. , 2000). Asimismo, Chavez (2010) menciona que *“la interacción de la radiación electromagnética con los componentes atmosféricos es muy pequeña lo cual se pueden obtener imágenes en cualquier condición climática, al atravesar nubes o cualquier componente atmosférico”*.

Según Skolnik (1990) y Chavez (2010) el radar emplea pulsos de energía electromagnética provenientes de una escena de interés, la cual se ilumina por un ángulo que radia energía de forma coherente en las bandas anteriormente mencionadas.

6.3 Radar de apertura sintética SAR

El radar de apertura sintética (SAR) se ha utilizado ampliamente para la teledetección durante más de 30 años (Moreira, et al., 2013). Proporcionando imágenes de alta resolución, tanto de día como de noche, sin importar la condición climática, información que ha sido implementada en diferentes áreas de la ciencia para valoraciones del cambio climático, monitoreos ambientales, mapeos, detección de deformaciones y aplicaciones de seguridad, entre otras.

En la actualidad operan más de 15 sensores SAR espaciales y se lanzarán 10 nuevos sistemas SAR en los próximos 5 años. SAR es único en su capacidad de imágenes: proporciona imágenes bidimensionales de alta resolución independientes de la luz del día, la cobertura de nubes y las condiciones climáticas. Está predestinado a monitorear procesos dinámicos en la superficie de la Tierra de manera confiable, continua y global. Los sistemas SAR tienen una geometría de imágenes de aspecto lateral y se basan en un radar pulsado instalado en una plataforma con un movimiento hacia adelante.

En la Tabla 3 se listan los sensores espaciales SAR que han sido implementados a lo largo de la historia de la Teledetección y en la Figura 3 la evolución temporal de estos satélites.

Tabla 3. Descripción general de los sensores espaciales SAR y sus principales características

Sensor	Operación	Banda de frecuencia	Polarización	Comentarios	Institución	País
Seasat	1978	L	HH	Primer satélite SAR. Operó sólo	NASA/JPL	USA

Sensor	Operación	Banda de frecuencia	Polarización	Comentarios	Institución	País
				tres meses		
ERS - 1	1991-2000	C	VV	Primer satélite SAR Europeo	ESA	Europa
ERS - 2	1995-2011	C	VV			
J-ERS-1	1992-1998	L	HH	Primer satélite SAR Japonés	JAXA	Japón
SIR-C	Abril de 1994	L y C	HH, VV, VH, HV	Misión de radar de imágenes de transbordador, primera demostración de SAR de multifrecuencia en el espacio	NASA/JPL	USA
X-SAR	Octubre de 1994	X	VV		DLR	Alemania
					ASI	Italia
Radarsat - 1	1995 a la fecha	C	HH	Primer satélite SAR Canadiense, ancho de franja de hasta 500 km con modo de imagen ScanSAR	CSA	Canada
SRTM	Febrero de 2000	C, X	HH, VV	Primer SAR interferométrico espacial	NASA/JPL	USA
					DLR	Alemania
					ASI	Italia
ENVISAT/ASAR	2002-2012	C	HH, VV, VH, HV	Primer satélite SAR con tecnología de módulo de transmisión / recepción, ancho de franja de hasta 400 km	ESA	Europa
ALOS/PaLSAR	2006-2011	L	HH, VV, VH, HV	Satélite avanzado de observación terrestre (Daichi), ancho de franja de hasta 360 km	JAXA	Japón
TerraSAR-X	2007 a la fecha	X	HH, VV, VH, HV	Primer radar biestático en el espacio, resolución de hasta 1.0, topografía global disponible para finales de 2014	DLR/Astrium	Alemania
TanDEM-X	2010 a la fecha					
Radarsat - 2	2007 a la fecha	C	HH, VV, VH, HV	Resolución de hasta 1.0 m x 3.0 m, ancho de franja de 500 km.	CSA	Canadá

Sensor	Operación	Banda de frecuencia	Polarización	Comentarios	Institución	País
COSMO-SkyMed -1/4	2007 a la fecha	X	HH, VV, VH, HV	Constelación de 4 satélites de hasta 1.0 m de resolución	ASI/MiD	Italia
RISAT-1	2012 a la fecha	C	HH, VV, VH, HV		ISRO	India
RISAT-2	2009-2014	C	HH, VV, VH, HV	Primer satélite de la serie		
RISAT-2B	Mayo de 2019	C	HH, VV, VH, HV			
HJ-1C	2012 a la fecha	S	VV	Constelación de 4 satélites - Primer satélite de la serie	CRESDA/CAST/NRSCC	China
Kompsat-5	2013	X	HH, VV, VH, HV	Satélite multiusos con resolución de 1.0 m	KARI	Korea
PAZ	2013	X	HH, VV, VH, HV	Constelación con TerraSAR -X y TanDEM -X	CDTI	España
ALOS-2	2013	L	HH, VV, VH, HV	Resolución de hasta 1.0 m x 3.0 m, ancho de franja de 490 km.	JAXA	Japón
Sentinel -1a	2013	C	HH, VV, VH, HV	Ancho de franja de 400 km	ESA	Europa
Sentinel -1b	2015	C	HH, VV, VH, HV			
Radarsat-1/2/3	2017	C	HH, VV, VH, HV	Constelación de 3 satélites, con ancho de franja de 500 km	CSA	Canadá
SAOCOM-1A	2018	L	HH, VV, VH, HV	Constelación de dos satélites, totalmente polarimétricos.	CONAE	Argentina
SAOCOM-1B	2019					

Fuente: Yan K. (2015), CONAE (s.f), ESA (s.f), NASA (s.f)

Dentro de la técnicas que existe para la generación de imágenes de Radar, se encontró el método tradicional conocido como Sistema Radar de Apertura Real o RAR (Figura 4) que significa la abertura utilizada para recoger la energía reflejada que se requiere para formar una imagen; y el Sistema Radar de Apertura Sintética o SAR (Figura 5), método inverso al RAR, el cual logra una resolución mayor cuanto menor es la longitud de la antena.

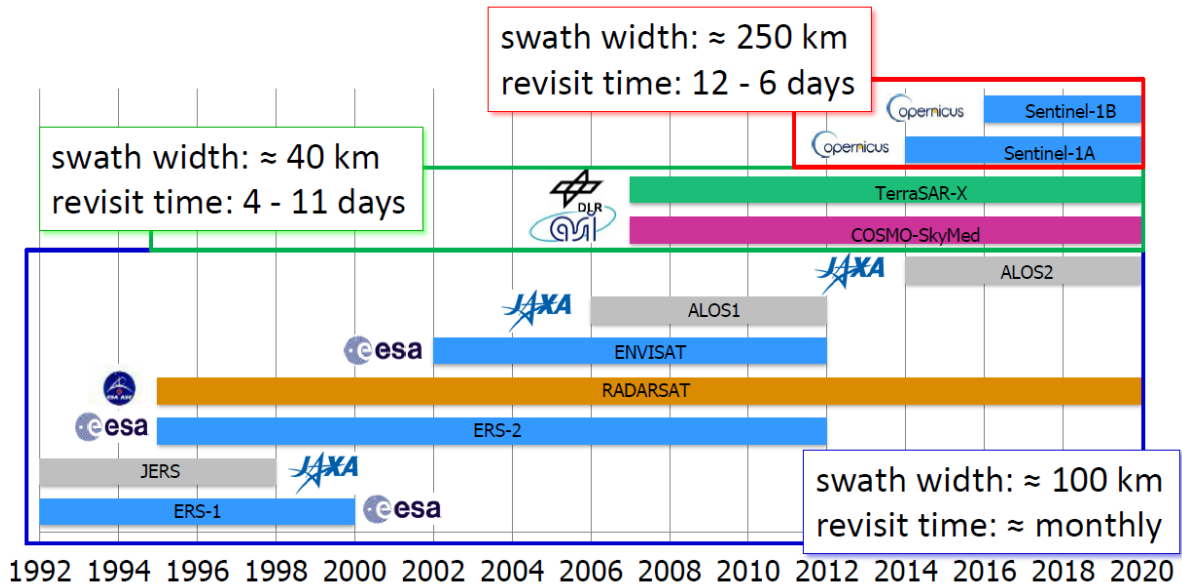


Figura 3. Evolución temporal de los satélites SAR
Fuente: ESA (s.f)

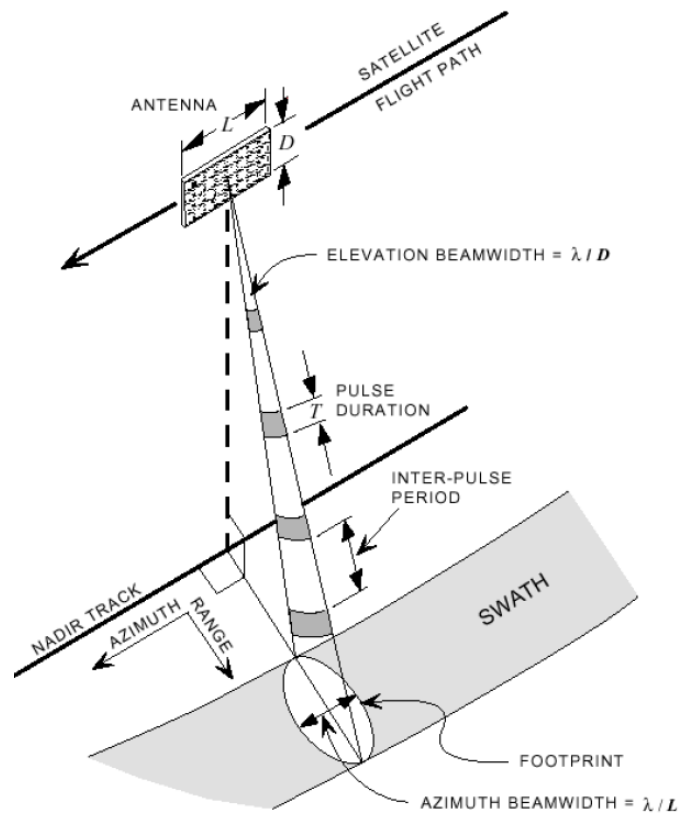


Figura 4. Geometría de un Radar de Apertura Real - RAR
Fuente: Sarmap (2009)

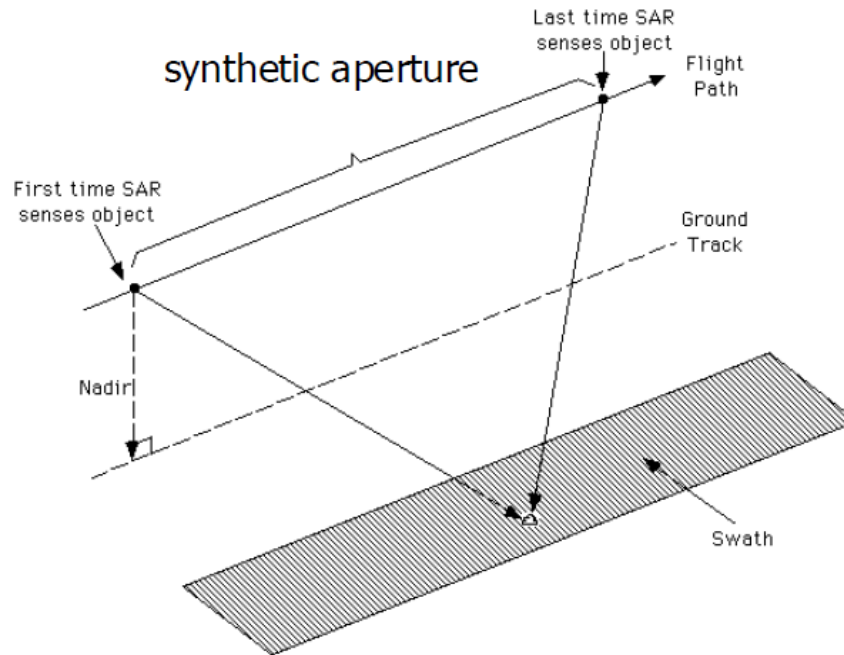


Figura 5. Geometría de un Radar de Apertura Sintética -SAR-
Fuente: Sarmap (2009)

Un radar de imágenes genera una representación en dos dimensiones de una porción de terreno, usando la retro dispersión que retorna desde la porción iluminada en rango y azimut, un sistema SAR recoge la información de la fase y la amplitud de la señal (eco) reflejada o redirigida. Según Wasowski (2006), la imagen generada forma “una matriz de valores complejos donde la amplitud es un mapa de la reflectividad del suelo del área escaneada y la fase depende de la reflectividad local y de la distancia del sensor al objetivo (slant range o dirección de línea de vista - LOS (Line of Sight direction)” p.85.

Según Monterroso (2016), “el Radar de Apertura Sintética -SAR- se fundamenta en el efecto *Doppler*, el cual según lo expresado por Chávez (2010) y Jiménez (2012) está basado en el hecho de que cuando la fuente emisora de ondas observadas está en movimiento relativo, se acorta el ancho de banda hacia donde se mueve el emisor y se alarga hacia donde se aleja. Es importante indicar que en su mayoría las imágenes de SAR poseen un ruido llamado *Speckle*, el cual es un efecto de ruido (sal y pimienta) que se presenta específicamente en la adquisición de la imagen” p.39.

El radar de apertura sintética (SAR) tiene visión lateral, lo que indica que su antena esta direccionada hacia un costado y hacia abajo del satélite, lo que permite conformar la imagen a partir de los datos de ecos reflejados en la superficie terrestre; por tanto, la

imagen de radar es obtenida de un sistema ortogonal de coordenadas cuyos ejes son: dirección de vuelo (Azimuth); y tiempos de tránsito, definido como rango inclinado (slant range).

Según Monterroso (2016), “las imágenes SAR se presentan en tonalidades de grises, las cuales esta relacionadas con la propiedad de dispersión de la superficie, donde los cuerpos de agua se ven en tonos negros al poseer muy poca retro dispersión; por el contrario, las ciudades y vías se verán con tonos de grises muy claros” p.39.

El sistema SAR es capaz de obtener imágenes con una mayor resolución azimutal, simulando una antena de mayor tamaño, mediante la combinación coherente de los ecos recibidos de las diferentes posiciones reflejadas y la información del desplazamiento del sensor (Skolnik, 1990).

En la captura de información del sistema SAR, aparecen deformaciones relacionadas con la topografía de la zona que se está iluminando: acortamiento; inversión; y sombra (Curlander & McDonough, 1991 - Figura 6)

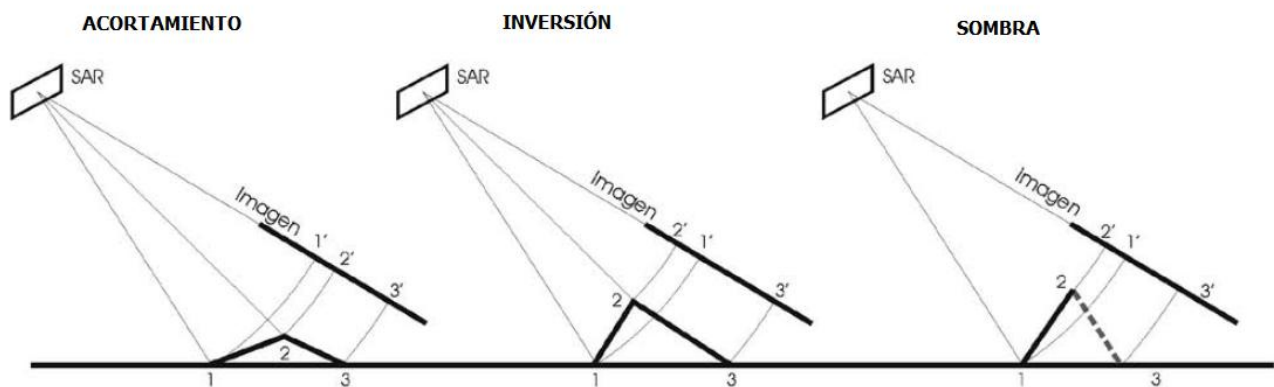


Figura 6. Deformación por topografía en imágenes SAR
Fuente: Euillades, et al., (2005)

6.3.1 Principios básicos de los sistemas SAR

La energía electromagnética viaja por el espacio en forma de ondas derivadas de la interacción entre campos eléctricos y magnéticos (perpendiculares entre sí). Una onda electromagnética (Figura 7) tiene velocidad (c), frecuencia (f) y longitud de onda (λ). Estas características se pueden relacionar de la siguiente manera:

$$c = f\lambda \tag{1}$$

La longitud de onda entonces se define como:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

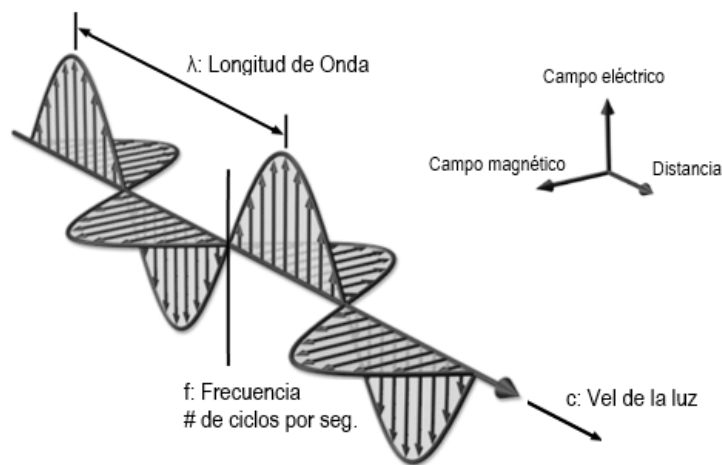


Figura 7. Componentes de una onda electromagnética
Fuente: Torres (2013)

La frecuencia se mide en ciclos por segundo (Hertz), la velocidad se mide en metros por segundo y la longitud de onda se mide en metros.

Además de esto, existen otras características propias de las ondas de radar como son la amplitud, que es la distancia del centro al extremo del pico de la misma; y la polarización, que no es otra cosa que la orientación de la onda (usualmente vertical u horizontal) que permite una medida de la simetría del objetivo. Esta polarización puede ser o no cruzada dependiendo de cómo recibe la antena la energía transmitida, ya sea la misma orientación (HH, VV) o distinta la recibida de la emitida (HV, VH).

A partir de algunas de estas características como la longitud de la onda y la frecuencia de la misma, se puede entrar a clasificar por bandas o rangos (Tabla 4) a los cuales se les pueden atribuir ciertas características, para el uso en alguno campos científicos dentro de la teledetección.

Tabla 4. Características de las bandas

Nombre banda	Longitud de onda	Gama de frecuencias	Ejemplos de aplicación
Banda-P	~65 cm	300 MHz - 1 GHz	Biomasa, humedad

Nombre banda	Longitud de onda	Gama de frecuencias	Ejemplos de aplicación
			del suelo, penetración
Banda-L	~23 cm	1 GHz - 2 GHz	Agricultura, gestión forestal, humedad del suelo
Banda-C	~5 cm	4 GHz - 8 GHz	Océano y agricultura
Banda-X	~3 cm	8 GHz - 12 GHz	Océano, agricultura, radar de alta resolución

Fuente: NASA (2017)

En función de la frecuencia y la polarización, las ondas pueden tener diferentes niveles de penetración, en la vegetación, o el suelo, teniendo en cuenta las características de este, por ejemplo, si se encuentra húmedo o seco. Generalmente entre más larga es la onda, mayor va a ser el nivel de penetración dentro del objetivo, por otro lado, en cuanto a la polarización, las ondas van a tener menos penetración si se trata de una polarización cruzada (VH/HV), mientras que el nivel de penetración aumentara si se trabaja con ondas con una sola polarización (HH/VV) (Sarmap, 2009).

En la Figura 8, se observan los niveles de penetración para diferentes tipos de objetivos.

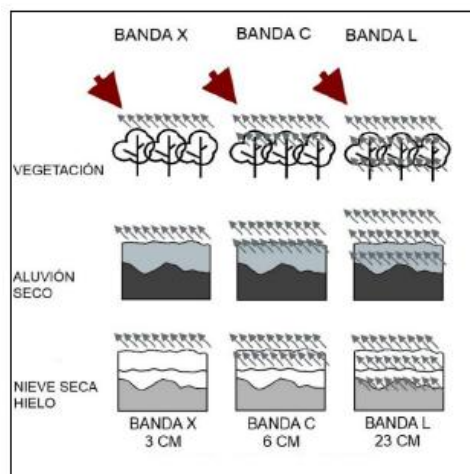


Figura 8. Penetración de cada banda para diferentes tipos de coberturas

Fuente: Sarmap (2009)

6.3.2 Formación de las imágenes de radar SAR

Ferretti, et al., (2007) afirman que: “Una imagen de radar es un mosaico formado por un arreglo de filas y columnas de píxeles, en este caso cada píxel se asocia a una pequeña parte de la superficie terrestre llamada resolución de celda, donde cada píxel contiene un número complejo que lleva información de amplitud y fase de la señal de retorno de todos los elementos que se encuentran dentro de la escena, junto con la resolución de celda proyectada en el suelo. La amplitud depende más de la rugosidad del suelo que de la composición química de los elementos dispersores en el terreno. Por lo que típicamente las rocas expuestas y área urbana muestran alto valor de amplitud, mientras que superficies planas y suaves muestran bajo valor de amplitud porque la radiación se refleja lejos del radar” p.17.

Teniendo en cuenta el funcionamiento básico de un sensor de radar, que emite pulsos de energía de una forma específica (frecuencia, dirección, orientación, etc.) y luego recibir el eco o la retro-dispersión de la misma, produce una imagen cuyos píxeles son entendidos como los coeficientes de retro-dispersión del área que representa sobre el terreno (Figura 9), esta respuesta o este coeficiente, dependerá de factores como las condiciones del terreno (rugosidad, tipo de superficie, pendiente, sombras, etc.) el ángulo de incidencia y la polarización de la observación (Torres, 2013).

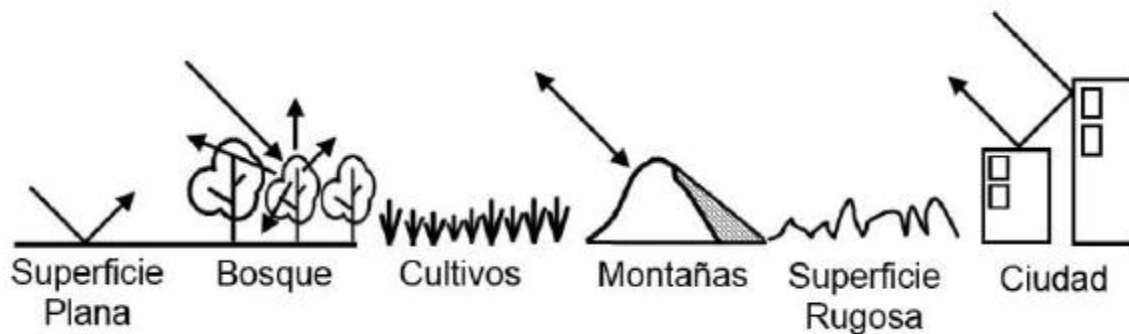


Figura 9. Retro dispersión de diferentes objetos en la superficie terrestre.

Fuente: Sarmap (2009)

6.4 Interferometría SAR (InSAR)

La interferometría se centra en el estudio y explotación de la información proporcionada por las imágenes de fase de las imágenes complejas SAR (Hanssen, 2001); por tanto,

usando imágenes tomadas desde puntos de vista ligeramente distintos, se puede obtener información de la topografía del terreno y así mismo estudiar los desplazamientos o deformaciones que se han producido en el terreno (DInSAR) (Fernández, 2009).

La técnica de interferometría tuvo sus inicios a principios de los años 70, estudios que fueron documentados por (Graham, 1974), en donde se describen las características generales de los sistemas interferométricos SAR aerotransportados, y las aplicaciones desarrolladas inicialmente a partir de la interferometría como son el mapeo topográfico.

En la década de los 80, se empezó a implementar las técnicas de interferometría aplicadas a las geociencias, cuyos estudios fueron realizados por Zebker & Goldstein, (1987), quienes evaluaron las medidas de la superficie oceánica con el uso de la interferometría, testeando las imágenes SAR sobre San Francisco.

En la actualidad la técnica InSAR, ha tomado una gran importancia como una herramienta poderosa para realizar el mapeo de la superficie terrestre, incluyendo la superficie oceánica, así mismo también el uso de la denominada DinSAR o interferometría diferencial, la cual es una técnica que usa InSAR para medir el desplazamiento de la superficie por fenómenos físicos como terremotos, deslizamientos o subsidencia (Bamler & Hartl, 1998).

De esta manera InSAR es una técnica usada para medidas de altura de terreno, diferencias en las alturas, o como se mencionó anteriormente medidas de desplazamiento, esta involucra al menos dos imágenes SAR con valores complejos, las cuales son tomadas desde antenas a las altitudes ligeramente diferentes (Skolnik, 1990). El InSAR aporta más información sobre el objeto que se presenta en una sola imagen SAR mediante la explotación de las señales de fase del SAR, una segunda imagen SAR muestra información adicional de al menos un parámetro en las imágenes que es diferente al compararlo con la primera imagen (Bamler & Hartl, 1998).

Para trabajar la técnica InSAR, se debe tener en cuenta que el SAR puede observar una misma área desde vistas con ángulos ligeramente diferentes, esto puede hacerse simultáneamente mediante dos radares montados en la misma plataforma (single pass InSAR) o en diferentes tiempos mediante la repetición de orbitas del mismo satélite, (two pass InSAR), lo que influye directamente en el desarrollo de este método (Skolnik, 1990).

De esta manera, se puede definir principio de la interferometría SAR (InSAR), como la explotación de las diferencias generadas entre las imágenes de radar, en donde se comparan las fases de imágenes con una diferencia de posición o con diferencia de tiempo, una vez se ha realizado el registro apropiado de estas; realizado este proceso se obtiene como resultado una imagen que muestra la diferencia de fases, lo que se conoce como un interferograma, este contiene una serie de franjas o patrón de diferencia de fase que contiene la información de geometría relativa de la superficie terrestre, siendo esta información afectada por muchos fenómenos físicos (Massonet & Feigl, 1998).

En esta técnica se usa la fase, donde la diferencia de dos imágenes SAR en un par interferométrico, a partir del cual se genera una figura llamada Interferograma (representación geométrica del cambio de fase en dos imágenes) la cual representa los cambios de fase representados en 2π . La Interferometría radar se basa precisamente en la variación de la fase producida por una modificación de las propiedades del terreno empleando dicho par (Hanssen, 2001), según la siguiente ecuación (Tomas, 2008):

$$\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} * r + \phi_{(scattering)} \quad (3)$$

En donde λ es la longitud de onda electromagnética r es el rango, y $\phi_{(scattering)}$ es el cambio de fase debido a la dispersión producida por el blanco, siendo este segundo término, en general una variable que se considera aleatoria que se puede presentar en valores de 0 a 2π (Figura 10).

Acorde a lo anterior, se tiene que el cambio de fase puede ser utilizado para determinar cambios de elevación de la escena, obteniéndose con esto lo que se conoce como modelo digital de elevaciones o modelo digital del terreno. Chávez (2010) y Van Genderen (en Fernández, 2009) indican que “el Interferograma registra un modelo de interferencia compuesto de franjas (fringes) que contienen toda la información sobre la geometría relativa entre las dos imágenes, cada franja, que corresponde con un ciclo de fase, equivale a un cambio de distancia suelo-satélite” (Figura 11), la cual se trata de una deformación escalar y no vectorial como la obtenida con sistemas GPS.

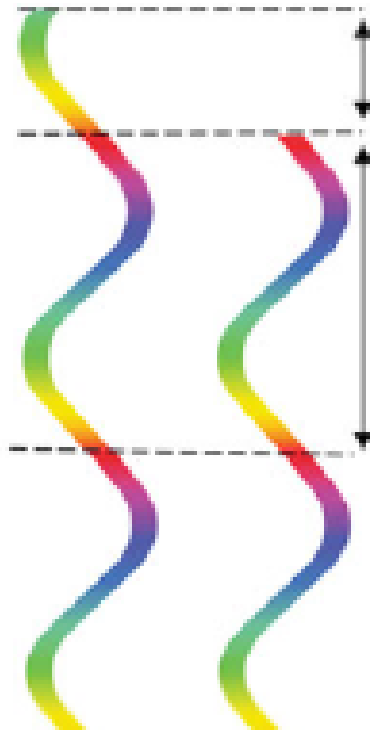


Figura 10. Ciclos de Fase para la Generación de un Interferograma
 Fuente: Schneevoigt, et al., (2012)

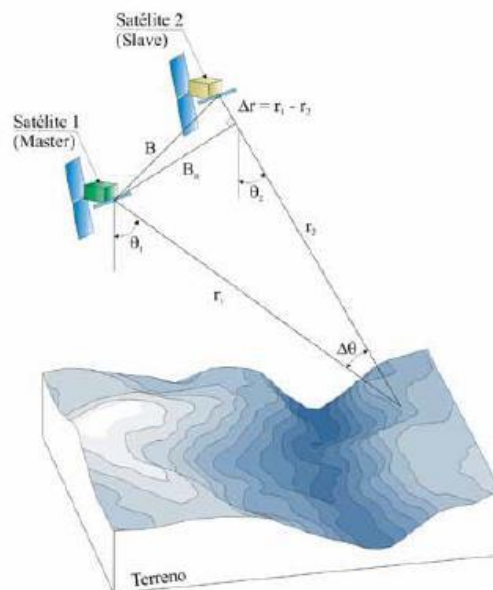


Figura 11. Geometría de Generación de InSAR
 Fuente: Tomas (2008)

En función de lo anterior, se concluye que el Interferograma está compuesto por la diferencia entre dos imágenes de SAR: una imagen maestra y una imagen esclava. Se adquieren dos imágenes de la misma escena desde posiciones orbitales diferentes (Monterroso, 2016); la línea base (B) es la distancia que existe entre ambas orbitas, r_1 es la distancia existente desde el satélite hasta el objeto en estudio para el caso de la imagen maestra, y r_2 es la distancia entre la imagen esclava y el objeto en estudio. Lo anterior expuesto se puede expresar en las siguientes ecuaciones, en donde la fase corresponde a un determinado pixel de cada imagen a utilizar (Monterroso, 2016):

$$\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} * r_1 + \phi_{(scattering)} \quad (4)$$

$$\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} * r_2 + \phi_{(scattering)} \quad (5)$$

Si para ambas imágenes la morfología del terreno es la misma, en las cuales no se ven cambios en la superficie, los términos correspondientes a la dispersión son iguales. y se dice que (4) y (5) son iguales. Ahora bien, si se restan ambas adquisiciones, se obtiene la fase interferométrica la cual se expresa en la siguiente ecuación (Monterroso, 2016):

$$\Psi_{int} = \phi_1 - \phi_2 = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r = \frac{4\pi}{\lambda} (r_2 - r_1) \quad (6)$$

Este es un término de fase correspondiente a un Interferograma entendido como la diferencia de ambas fases, ϕ_1 y ϕ_2 .

6.5 Aplicaciones InSAR en la generación de modelos digitales de elevación

Hoy en día, un DEM se puede generar, haciendo levantamiento topográfico directamente sobre el terreno, mediante un par de imágenes estereoscópicas, imágenes de Apertura sintética como la radargrametría (Eftekhari, et al., 2013), datos Lidar, levantamiento con láser, fotogrametría, sistema de posicionamiento global o implementando técnicas de interferometría SAR (Makineci & Karabörk, 2016 y Wang, et al., 2018).

El proceso de creación y adquisición de modelos digitales de elevación de alta resolución es una labor compleja (Reddy et al., 2017); a pesar de la existencia de DEM globales como ASTER y SRTM con tamaño de celda de 30 m, estos modelos no siempre pueden ser aplicables para todo tipo de estudios (Mukherjee et al., 2013); por tanto, la creación de

DEM de alta resolución es vital, especialmente cuando la adquisición de datos es un desafío; razón por la que la generación de DEM a partir de técnicas InSAR ha sido ampliamente estudiado y validado, logrando identificar la aplicabilidad de la técnica en diferentes lugares del mundo y permitiendo realizar diferentes estudios en el área de las ciencias de la tierra.

En la década de los noventa, la parte teórica de la interferometría SAR tuvo un avance significativo en cuanto al entendimiento y desarrollo de la técnica; sin embargo, a la fecha existían falencias en el procesamiento y desarrollo de software para el procesamiento y análisis de las imágenes para la generación de modelos digitales de elevación (Gens & Van Genderen, 1996).

A la fecha con el desarrollo de sistemas de satélites y su capacidad de resolución constantemente mejorada, combinada con los resultados cada vez más precisos del procesamiento interferométrico y los avances computacionales se han desarrollado varias investigaciones para la extracción de DEM usando interferometría para estudios asociados a deformaciones, generación de cartografía, clasificación de superficies terrestres, riesgos volcánicos y eventos sísmicos, así como monitoreo de subsidencia terrestre.

Muchas investigaciones se han concentrado en la generación de DEM utilizando diferentes métodos en todo el mundo, Giles & Franklin (1996) extrajeron DEM a partir de imágenes SPOT y evaluaron superficies topográficas derivadas con mediciones de campo; Kucera (1999) obtuvo DEM usando interferometría SAR con imágenes ERS; Kervyn (2001) adquirió DEM a partir de interferometría mediante el uso de imágenes ERS; Lee et al. (2008) emplearon fotografía aérea digital; Svobodová & Tuček (2009) utilizaron el método de kriging; Rossi & Gernhardt (2013) generaron DEM utilizando TanDEM-X; Wang et al. (2018) emplearon la fusión de datos ASTER GDEM y datos ICESat/GLAS; Mohammadi, et al., (2018) generaron un DEM a partir de imágenes satelitales de Sentinel 1 utilizando la técnica de Radar de Apertura Sintética de Interferometría (InSAR) para una parte de Cameron Highlands, Pahang, Malasia.

En los últimos años el uso de las imágenes SENTINEL-1 para la generación de DEM, las ha convertido en una de las fuentes más importantes de datos RADAR entre los académicos e investigadores de todo el mundo, ofreciendo una amplia cobertura de información gratis tanto espacial como temporal (Mohammadi, et al., 2018).

Actualmente, la interferometría SAR es una de las aplicaciones de las imágenes radar que presenta más perspectivas de futuro en cuanto a su aplicación a la extracción de topografía. Por ello, existe en la literatura un gran número de trabajos que describen con detalle y desde el punto de vista teórico cada uno de los procesos necesarios para generar modelos numéricos de elevaciones del terreno con esta técnica. Como trabajos relevantes en este ámbito podemos citar a Gabriel & Goldstein (1988), Goldstein et al. (1988), Prati & Rocca (1990), Prati et al. (1990), Castillo & Arbiol (1995), Arbiol et al. (1995), Wegmuller et al. (2009), Zhou et al. (2011), Zhang et al. (2012), Liao et al. (2013), Rossi et al. (2013), Avtar et al. (2015), Dubois et al. (2016), Rizzoli et al. (2017), Zhu et al. (2018) y Kyriou et al. (2018); trabajos donde se pudo demostrar la eficiencia de esta técnica para la captura de información digital de elevación tanto en zonas con cobertura de nubes como en zonas con una significativa cobertura o en zonas relativamente planas y con poca textura, lugares poco aptos o propicios para el análisis estereoscópico de imágenes de sensores ópticos.

En Colombia se han desarrollado algunos proyectos de investigación aplicando Interferometría Diferencial D-InSAR para la generación de mapas de deformación, patrones de subsidencia, estudios de deformación del terreno, entre otros; pero sólo se encontró un estudio aplicando Interferometría InSAR para la generación de un modelo digital de elevación, tal como se describe a continuación:

- Guerrero & Hernandez (2017) en su trabajo de grado, determinaron un modelo digital de elevación a partir de imágenes de radar Sentinel-1 usando InSAR en Bogotá; obteniéndose un DEM con resultados positivos, mostrando que a pesar de la irregularidad del DEM la correlación con el modelo de referencia es alta.

6.6 Aplicaciones SAR en la modelación hidráulica para determinar zonas de inundación

En los últimos años, la tecnología satelital se ha vuelto extremadamente importante para proporcionar un mecanismo rentable, confiable y crítico para la prevención, preparación y gestión de inundaciones.

Con la disponibilidad de múltiples datos satelitales temporales de las series IRS, Landsat, ERS, Radarsat y Sentinel, ha sido posible monitorear eventos de inundación a nivel mundial, convirtiéndose esta información en la herramienta más poderosa para generar mapas de inundación en tiempo real, información que se puede utilizar de manera

efectiva para la gestión del riesgo de inundaciones (Yamagata & Akiyama, 1988). Es de resaltar que los aspectos más importantes de las imágenes SAR para la modelación de inundaciones es la resolución de la imagen y el tiempo de revisita del satélite.

Los ciclos de repetición o tiempos de revisita de los satélites SAR son del orden de 11 a 46 días (Tabla 5), la duración de una inundación es del orden de uno pocos días, encontrándose que es casi imposible capturar más de una imagen por inundación con los satélites de ciclo de repetición baja (por ejemplo, TerraSARX, 11 días y RADARSAT-2, 24 días, Di Baldassarre et al., 2011). Sin embargo, en la actualidad existen constelación de satélites como Sentinel-1 y COSMO-SkyMed que tienen tiempos de revisita de 6 días y 2 horas respectivamente, lo que ha hecho posible la adquisición de varias imágenes para un solo evento de inundación; tal es el caso, que con las imágenes de COSMO-SkyMed se han evaluado eventos de inundación de Italia en el año 2009, en Albania en el año 2010, Pakistan en el año 2010, Tailandia en el año 2010, y Australia en el año 2011 (Pierdicca et al., 2013). También se ha utilizado con éxito en diversas aplicaciones en el campo de la gestión de riesgos y emergencias, como las inundaciones en Myanmar y Haití.

Tabla 5. Misiones satelitales para el uso del monitoreo de inundaciones

Satélite	Año de lanzamiento	Resolución espacial (m)	Ciclo de revisita (días)	Costo (€)
ALOS	2006-2011	10-100	46	Gratis
ENVISAT ASAR	2002-2012	12.5-1000	35	Gratis
TerraSAR-X	2007	1-40	11	1750-5950
RADARSAT-2	2007	1-100	24	3600-8400
COSMO-SkyMed	2007	1-100	16 (2 horas con 4 satélites)	1650-9450
Sentinel-1	2014	5-100	12 (6 con 2 satélites)	Gratis
ERS-1	1991-2000	25-150	35	90-180
ERS-2	1995-2000	25-250	35	90-180

Fuente: (Di Baldassarre et al., 2011; Schumann et al., 2014)

Para integrar las imágenes SAR a los modelos hidráulicos, estas deben procesarse con técnicas especiales que permiten determinar la extensión de la inundación; existen muchas técnicas de procesamiento de imágenes SAR para delimitar la extensión de la inundación, las cuales han sido revisadas por varios autores (por ejemplo, Schumann et al., 2009; Di Baldassarre et al., 2011; Liu et al., 2004, Lu et al., 2004).

Algunos de los métodos incluyen interpretación visual (Macintosh & Profeti, 1995), umbrales del histograma de la imagen (por ejemplo, Brivio et al., 2002), algoritmos de textura de la imagen (Schumann et al., 2005), algoritmos automáticos de clasificación (Hess et al., 1995), y modelos de contorno activo basados en estadísticas de imagen (Horritt, 1999). En los estudios realizados se encontró que cada método tiene sus propios pros y contras, y que, además, cada método es elegido acorde a las características del evento de inundación y área de estudio.

Se han desarrollado varios tipos de algoritmos para mapear inundaciones utilizando datos SAR (Horritt & Bates, 2001; Matgen et al., 2007; Brisco et al., 2011; Henry et al., 2006; Cossu et al., 2009; Martinis et al., 2015; Chini et al., 2012; Dasgupta et al., 2018; Giordan et al., 2018; Nico et al., 2000; Pierdicca et al., 2018). Entre las técnicas de umbral más utilizadas y ampliamente empleadas, se busca identificar un valor de retrodispersión por debajo del cual un píxel se clasifica como agua. Específicamente, dicho umbral se puede determinar utilizando procedimientos automatizados, pero puede variar constantemente dependiendo de factores ambientales o de la geometría específica de adquisición de satélites, por ejemplo (Giustarini et al., 2015; Henry, 2006; Martinis, 2009; Pierdicca, et al., 2013).

Otra solución muy común se basa en el uso de técnicas de detección de cambios, que calculan la diferencia entre una imagen adquirida durante la inundación y una adquirida antes del evento. En particular, las áreas inundadas pueden identificarse ya que están asociadas con una disminución en la retrodispersión. Por un lado, esto permite la discriminación de cuerpos de agua permanentes (caracterizados principalmente por valores bajos y estables de retrodispersión) de las superficies temporales de agua; Por otro lado, podría ocurrir que los cambios en la cobertura del suelo asociados con diferentes valores de retrodispersión en los dos pasos de tiempo considerados (como ocurre típicamente para los cultivos) pueden conducir a una sobreestimación de las áreas inundadas (Giustarini, 2013, 2015; Matgen , 2007).

Dentro de las investigaciones, se encontraron los estudios realizados por Macintosh & Profeti (1995) quienes realizaron una interpretación visual simple con imágenes ERS para el mapeo de inundaciones; técnicas de retrodispersión de radar a partir de un umbral establecido (Brivio et al. 2002; Schumann et al. 2009); técnicas de polarización (Hirose et al. 2001; Henry et al. 2006); técnicas de clasificación orientada a objetos (Heremans

et al. 2003); algoritmo de clasificación automática (Hess et al. 1995, Schumann et al. 2009); técnica de cambios múltiples (Laugier et al. 1997).

Con la disponibilidad de los sensores de alta resolución, como TerraSAR-X y COSMO-SkyMed, que permiten una mayor precisión en las mediciones sobre el terreno, se encontró que existen varios estudios realizados para delimitar las superficies de agua en grandes áreas del mundo utilizando la información de coherencia, estudios realizados por Wendleder, et al., (2012), Bellifemine, et al., (2010), Dellepiane & Angiati (2012), Giustarini, et al., (2013) y Refice, et al., (2014), permitieron validar la eficiencia de la técnica; adicionalmente, se encontró que con estos sensores se mejoraron los algoritmos de la técnica del umbral del histograma de la imagen para detectar no solo las superficies de aguas abiertas, sino también las áreas inundadas en las coberturas forestales y agrícolas a partir de imágenes de COSMO-SkyMed SAR basadas en un enfoque de clasificación difusa (Mason et al., 2012, Giustarini et al., 2013, Martinis et al., 2009, Pulvirenti et al., 2012, Matgen et al., 2011 y Schumann et al., 2010).

Para la delimitación de la extensión de la inundación de imágenes SAR de alta resolución en áreas urbanas, Matgen et al. (2011) y Giustarini et al. (2013) presentaron un método basado en la calibración de una distribución estadística de valores de retrodispersión de "aguas abiertas" inferidas de Imágenes SAR de inundaciones, donde combinaron el umbral radiométrico, el crecimiento de la región y la detección de cambios como un enfoque que permite la extracción automática y confiable de la extensión de inundación.

Gracias al desarrollo de las técnicas de delimitación de la extensión de inundación, los sistemas de monitoreo de inundaciones basados en esos algoritmos fueron establecidos en las misiones satelitales. Por ejemplo, Martinis et al. (2013) presentaron un sistema combinado de monitoreo de inundaciones en dos fases (es decir, MODIS y TerraSAR-X) para apoyar la gestión de desastres por inundaciones. Este sistema proporciona imágenes de inundación a diferentes resoluciones espaciales y adquisición bajo demanda de tiempo crítico, así como la plataforma de preprocesamiento y basada en la web para la difusión de imágenes en tiempo casi real.

Los estudios realizados por Westerhoff et al. (2013) presentaron una técnica automatizada de detección de aguas superficiales de SAR, con los mapas de salida cargados en un servidor de datos abierto. El algoritmo consistió en hacer coincidir la

distribución de retrodispersión con el conjunto de datos de las coberturas secas y las coberturas con presencia de agua superficial.

Martinis et al. (2014) presentaron una cadena de procesamiento totalmente automatizada para la detección de inundaciones casi en tiempo real utilizando datos SAR de TerraSAR-X de alta resolución.

Respecto a los modelos de inundación, se encontró que se han realizado varios estudios que han utilizado con éxito imágenes satelitales SAR en la predicción de la extensión de la inundación utilizando diversas técnicas de calibración (Aronica et al., 2002; Di Baldassarre et al., 2009a y 2010; Pappenburger et al., 2007; Horritt & Bates., 2001; Bates et al., 2004; Brandimarte et al., 2009; Prestininzi et al., 2011 - Tabla 6). Particularmente se encontró que algunos estudios implementados en áreas con poca información topográfica, un SAR de baja resolución pudo ser calibrado y ajustado a un modelo hidráulico 1D (Di Baldassarre et al., 2009a), simulaciones 2D (Tarpanelli et al., 2013; Mason et al., 2018) y modelos sofisticados de elementos finitos o volúmenes finitos (Horritt, 2000; Horritt et al., 2007).

Di Baldassarre et al., (2009a), usó imágenes de resolución gruesa ENVISAT ASAR, donde pudo implementar un modelo hidráulico y compararlo con un evento de inundación ocurrido, encontrando resultados muy cercanos a lo real.

Tabla 6. Aplicaciones SAR en modelos hidráulicos

Imagen SAR	Resolución espacial (m)	Modelo implementado y resultados	Caso de estudio	Referencia
ENVISAT ASAR	150	Calibración de modelo hidráulico Simulación de caudales y niveles de agua	Río Tiver (Italia)	Tarpanelli et al., (2013)
ENVISAT ASAR	150	Selección del modelo hidráulico más adecuado acorde al evento de inundación	Río Po (Italia)	Prestininzi et al., (2011)
TERRA ASTER	90	Modelo de inundación para proponer y formular un plan de mitigación de riesgos de inundación	Ciudad de Jimani (República Dominicana)	Brandimarte et al., (2009)
ERS-1 SAR	25	Calibración de un modelo hidráulico de elementos finitos a partir de la identificación de los coeficientes de rugosidad	Río Thames (UK)	Horritt, (2000)
ENVISAT ASAR	100	Verificación y validación de un modelo hidráulico 1D con	Río Po (Italia)	Di Baldassarre

Imagen SAR	Resolución espacial (m)	Modelo implementado y resultados	Caso de estudio	Referencia
		información real y cercana al tiempo de adquisición		et al., (2009a)
ERS-2 SAR	25	Demostrar la ventaja del mapeo probabilístico de inundaciones sobre los enfoques deterministas contabilizando las incertidumbres en la modelación hidráulica	Río Dee (UK)	Di Baldassarre et al., (2010)
ERS-2 SAR y RADARSAT	25	Calibraciones del modelo hidráulico en un procedimiento de actualización Bayesiano	Río Severn (UK)	Bates et al., (2004)
ERS-2 y ENVISAT	25 y 150	Generación de un mapa de riesgo de inundación para un evento fusionando las imágenes SAR con un mapa de vulnerabilidad	Río Dee (UK)	Schumann and Di Baldassarre (2010)
ERS-1 SAR	25	Calculo de las incertidumbres en un modelos hidráulico implementado en la estructura GLUE	Río Thames (UK)	Aronica et al., (2002)
ENVISAT ASAR	12.5	Calculo de la incertidumbre en la imagen SAR utilizando un enfoque de conjunto difuso	Río Alzette (Luxemburgo)	Pappenberger et al., (2007)
ERS-2 SAR y ENVISAT ASAR	25 y 150	Calculo de la incertidumbre de la extensión de la inundación estimada con el modelo de inundación implementado	Río Dee (UK)	Di Baldassarre et al., (2009b)

Fuente: (Di Baldassarre et al., 2011; Schumann et al., 2014)

Hunter et al., (2005) y Di Baldassarre et al. (2010), demostraron la ventaja del mapeo probabilístico de inundaciones sobre los enfoques deterministas, utilizando imágenes ERS-2.

Bates et al., 2004, reprodujo mapas probabilísticos de inundaciones que dan cuenta de las incertidumbres en el modelado de inundaciones usando imágenes ERS-2 SAR y RADARSAT.

En general, las imágenes satelitales SAR de bajo costo pueden contribuir al modelado de la inundación en varios aspectos, como la identificación de parámetros óptimos del modelo y mejores estructuras del modelo, el desarrollo de un plan de mitigación del riesgo de inundación y mapas de riesgo de inundación, evaluación de incertidumbres en los modelos de inundación, así como verificación del modelo de inundación en tiempo casi real.

Jung et al., 2012b y Alsdorf et al., 2005, usaron imágenes de radar de apertura sintética interferométrica (InSAR) en la calibración del modelo hidráulico 2D en un afluente del Mississippi. Con estos trabajos se mostró el potencial de usar imágenes InSAR para mejorar la predicción y la evaluación de futuros eventos de inundación.

Por otro lado, se han realizado estudios para evaluar el potencial de los DEM globales como el SRTM para la predicción de extensión de la inundación (por ejemplo, Sanders 2007; Yan et al., 2014); obteniendo como resultados un rendimiento adecuado en el proceso de simulación hidráulico; por ejemplo, Sanders (2007) descubrió que la topografía SRTM produjo una zona de inundación un 25% más grande en comparación con la topografía de alta resolución en una aplicación de modelo de flujo constante en el río Santa Clara; Wang et al. (2012) encontró que el modelo HEC-RAS construido con SRTM produce una extensión de inundación 6.8% mayor y una profundidad media del agua de aproximadamente 2 m menos profunda que la proporcionada por una topografía de alta precisión.

También se ha explorado el potencial de SRTM DEM en la simulación de niveles en modelos hidráulicos unidimensionales (1D). Por ejemplo, Patro et al. (2009) mostraron los resultados obtenidos con el modelo MIKE 11, el cual fue implementado con información SRTM, obteniéndose niveles de agua con RMSE inferiores a 1.0 m.

7 ZONA DE ESTUDIO

La presente investigación se desarrolló sobre el río Negro, corriente hídrica perteneciente a la cuenca del río Negro, localizada en la vertiente oriental de la cordillera central en el oriente de Antioquia, perteneciente a la macro cuenca Magdalena-Cauca (Figura 12); sus principales afluentes son: el Río Pantanillo y las quebradas La Pereira, La Mosca, La Marinilla, La Cimarrona, La Chachafruto y La Compañía. Está conformada por diez municipios: Envigado, El Retiro, La Ceja, Guarne, San Vicente, El Peñol, Rionegro, El Carmen de Viboral, Marinilla y El Santuario, que combinan diferentes dinámicas y en el tiempo han modificado el paisaje y la vocación de uso del suelo (CORNARE, 2017).

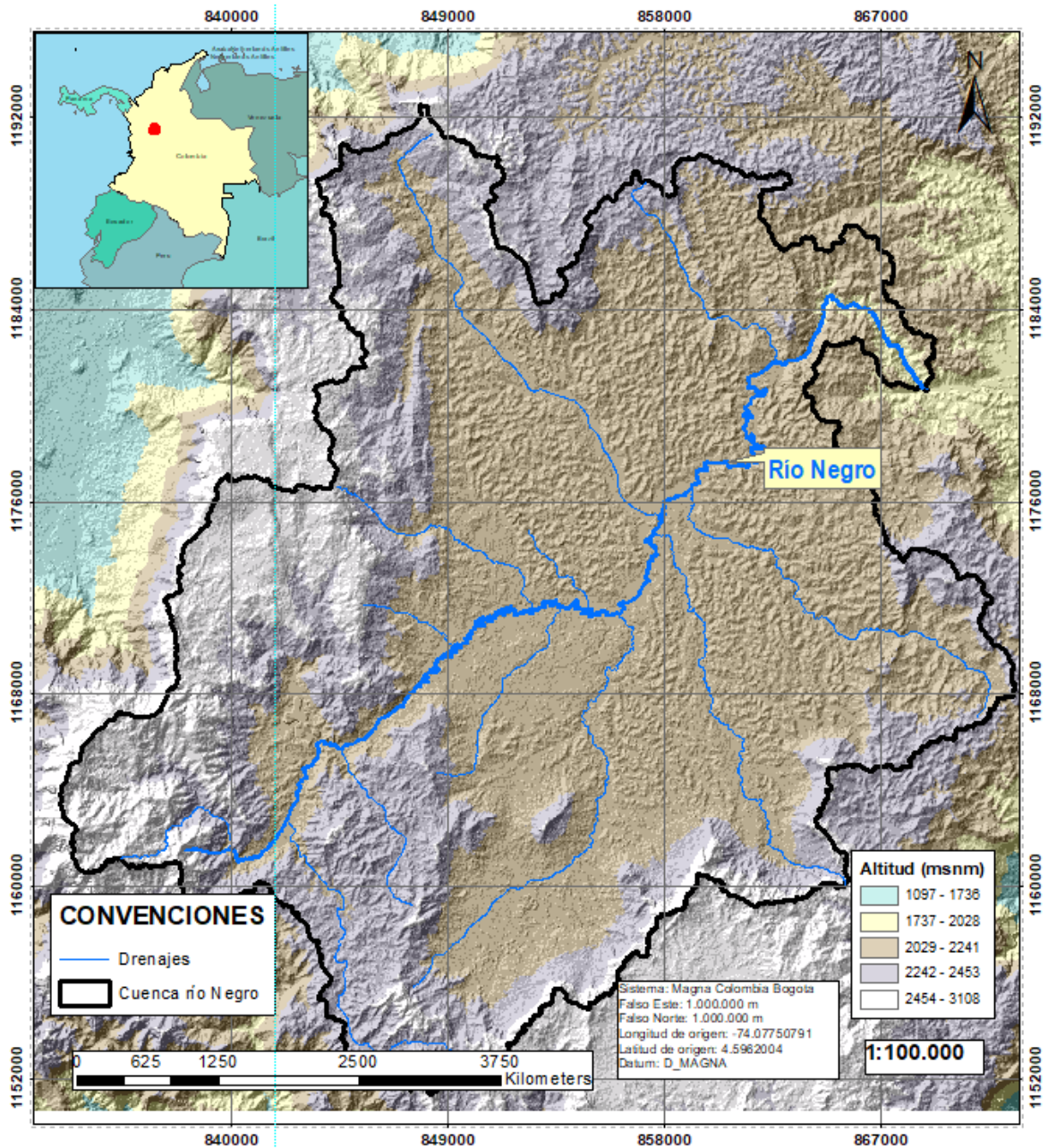


Figura 12. Ubicación espacial de la cuenca tributaria del río Negro
Fuente: Datos de CORNARE (2017)

La cuenca tiene una extensión de 92474 Ha con una población aproximada de 622618 habitantes; el cauce del río Negro tiene una longitud total de 136 km, nace en la cota 2605 msnm y desemboca al embalse de Guatapé en la cota 1904 msnm.

El río objeto de estudio ha sido eje estructurante en el desarrollo de la dinámica de los centros urbanos de los municipios antes mencionados, sobre el cual han acontecido en

los últimos años varios eventos de inundación que han puesto en emergencia algunos de los centros urbanos que colindan con el mismo, poniendo en riesgo la población asentada e infraestructura existente. Este río, tributa sus aguas al cuerpo lacustre Peñol-Guatapé; surtiendo el sistema interconectado del Valle de Aburrá.

El altiplano por donde discurre el río Negro se caracteriza por presentar altitudes entre 1900 y 2800 m, con precipitaciones que oscilan de los 1700 a los 2000 mm, presentándose un comportamiento bimodal en la precipitación identificándose así la época seca entre los meses de junio a agosto y diciembre a marzo y la época húmeda en los meses restantes del año (CORNARE, 2017). El clima ha sido un factor de gran importancia para el desarrollo agrícola de sus regiones y la dinámica de las fuentes hídricas existentes en la zona.

Según el Plan de Ordenación y Manejo de La Cuenca Hidrográfica del Río Negro (CORNARE, 2017), al interior de la cuenca del río Negro se han registrado 28 casos de inundación, encontrándose que estos eventos se han intensificado de forma dramática durante los últimos 7 años.

El efecto de las inundaciones en esta cuenca ha afectado grandes porciones de territorio urbano, en el que el río al desbordarse afecta gran cantidad de casas y personas, que se han asentado en sus riberas, por lo que no hay una zona de prevención alrededor de estas y ha generado que mayor población sea vulnerable a los ciclos naturales de esta corriente. La deforestación a través de quemas también juega un papel importante, ya que la destrucción de los bosques genera un menor tiempo de tránsito del agua en la cuenca, por lo que, en épocas de lluvias, fácilmente los cuerpos de agua se colmatan y superan su nivel normal, haciéndose camino a través de sus llanuras de inundación, que en gran parte están invadidas por asentamientos humanos (CORNARE, 2017). Es de resaltar que las inundaciones en la cuenca del río Negro es el segundo tipo de evento más frecuente en la cuenca del Río Negro, caracterizadas por ser inundaciones lentas que, si bien han producido afectaciones importantes en bienes e infraestructura, no tienen el poder destructivo que tienen eventos como las avenidas torrenciales.

La cuenca del Río Negro se caracteriza en general por sus bajas pendientes en su parte central, mientras que en los bordes se presentan áreas de relieve montañoso que corresponden en el caso de su límite occidental, al borde del Valle de Aburrá, lo cual le asigna en términos generales una conformación tipo “batea” que en su parte central se

caracteriza por zonas planas a levemente onduladas, surcadas por corrientes de agua con cauces poco profundos y que presentan crecientes e inundaciones cuyas manchas afectan de manera importante a asentamientos humanos ubicados en ellas.

Dentro de los antecedentes de inundación encontrados, se tiene constancia de inundaciones por desbordamiento en los episodios registrados de lluvias intensas durante el fenómeno de La Niña de los años 2010 y 2011, los cuales ocasionaron graves daños en las principales cabeceras municipales de la cuenca. Durante estos episodios se registraron inundaciones en los municipios de Rionegro, Marinilla y El Santuario entre otros; eventos que fueron registrados en las estaciones de caudal existente al interior del cauce del río Negro (Figura 13).



Figura 13. Localización de las estaciones de caudal ubicadas al interior del cauce principal del río Negro

8 METODOLOGÍA

8.1 Enfoque

El enfoque de investigación es cuantitativo no experimental, basado en eventos de inundación ocurridos en los últimos años en la zona de estudio, en un espacio de tiempo definido. En la Figura 14 se presenta el flujogramas de la metodología desarrollada en el trabajo investigativo.

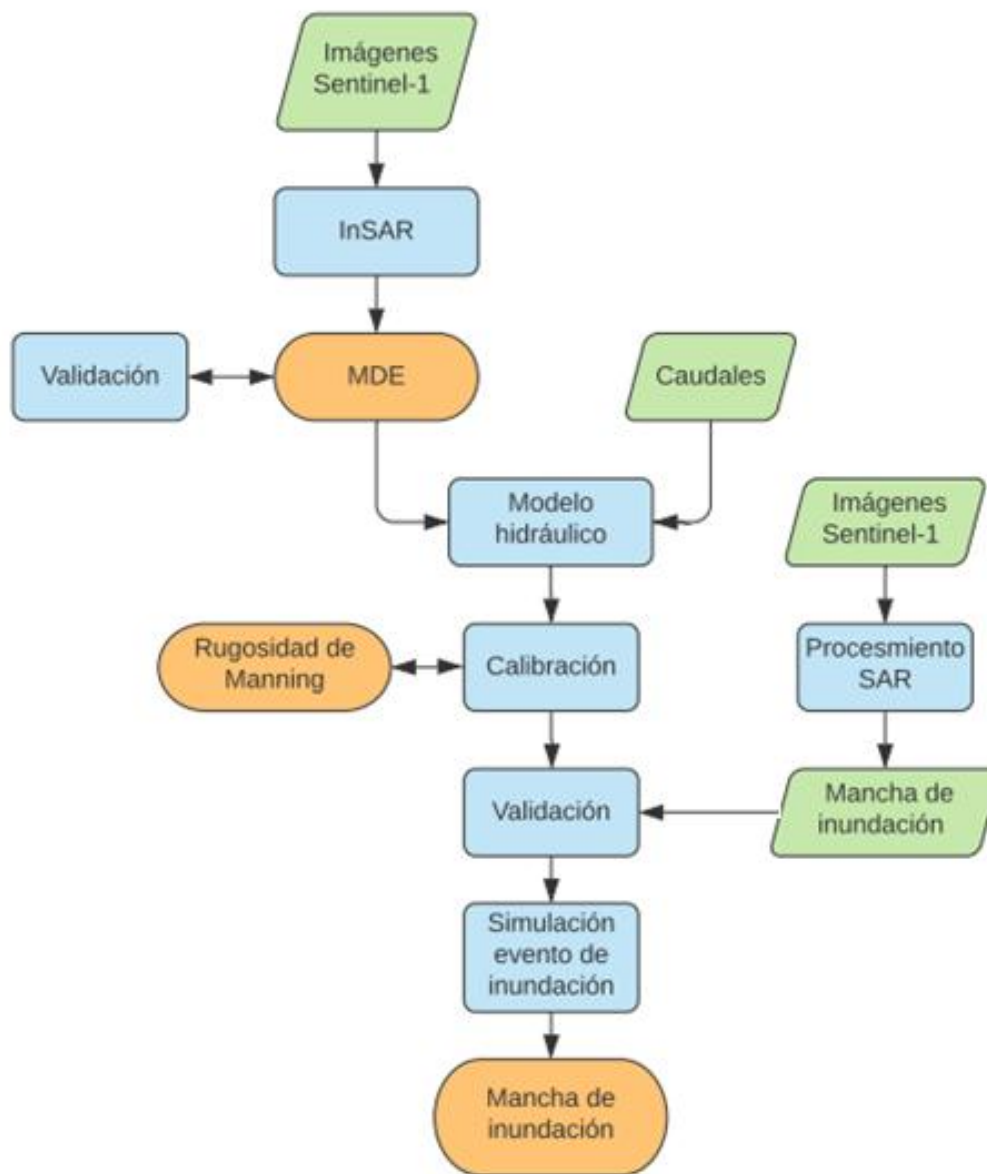


Figura 14. Flujograma metodología implementada

8.2 Proceso metodológico para la estimación del MDE usando InSAR

En la Figura 15 se presenta el diagrama que ilustra el proceso metodológico que se realizó para obtener el MDE a partir del par de imágenes de radar Sentinel 1, utilizando la técnica de interferometría SAR, proceso que es implementado en el Software SNAP (Sentinels Application Platform de la Agencia Espacial Europea - ESA). Los pasos para la realización de la metodología son los siguientes:

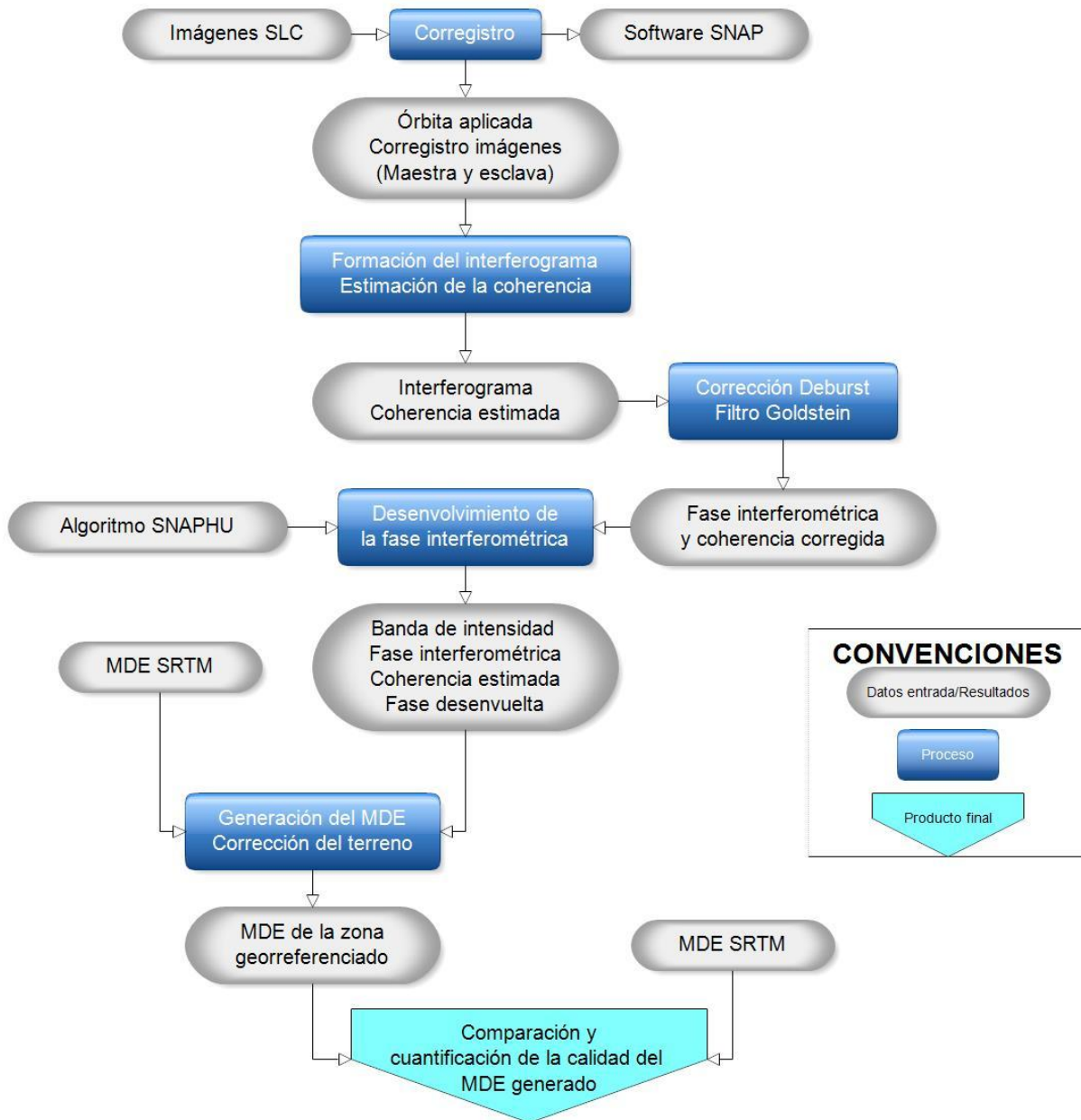
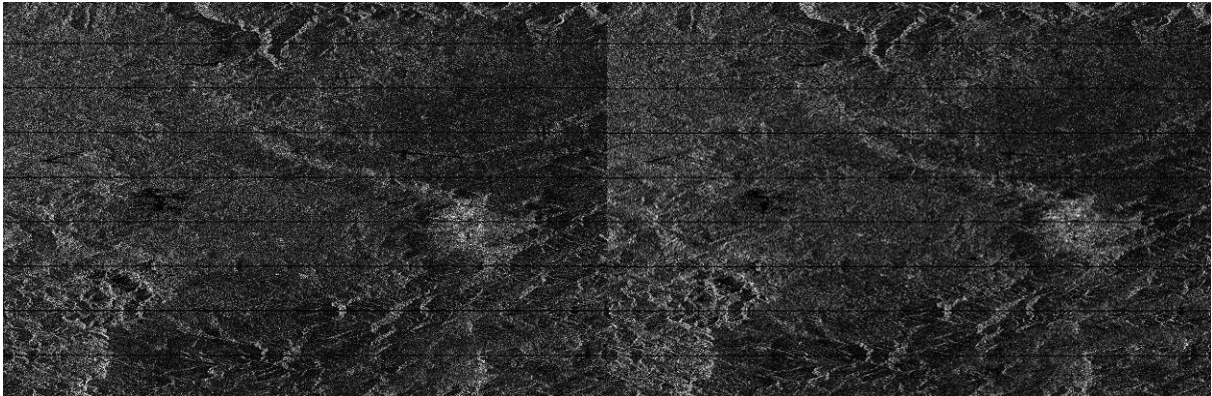


Figura 15. Diagrama de flujo para la generación del MDE

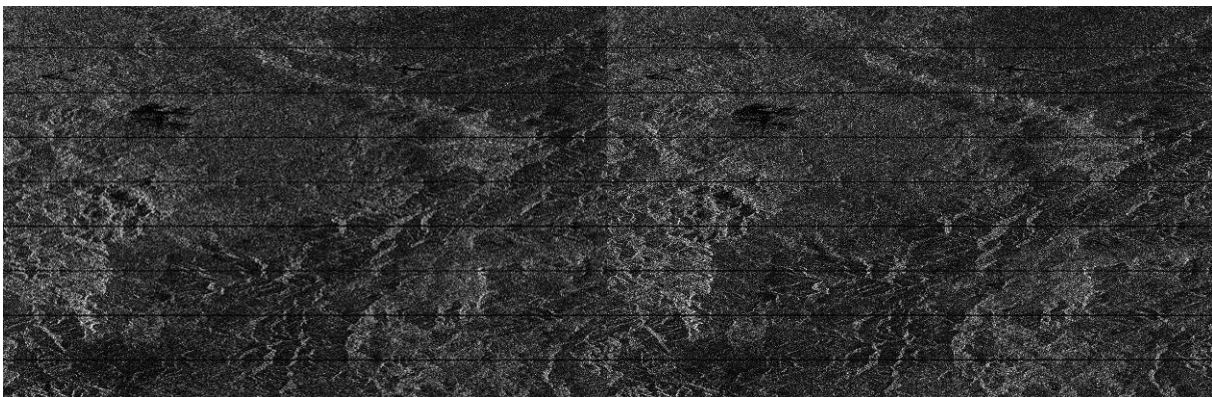
-
1. Selección de las imágenes de radar para la zona de estudio: Para generar el MDE se opta por usar las imágenes de SENTINEL, dado que son imágenes de fácil adquisición, con posibilidad de tener imágenes con resolución espacial menor 20 m (condición que facilita los análisis hidráulicos para el modelo de inundación a implementar), con resolución temporal para la zona de 12 días (desde 2016, año en que se lanzó el Sentinel 1B), lo que facilita contar con información en distintos momentos para hacer análisis multitemporales de cambios en la morfología o dinámica del cauce que se va a evaluar.

En la Tabla 7 se presentan las características de las imágenes Sentinel utilizadas en la investigación y en la Figura 16 se observan imágenes completas de la zona de estudio; las cuales cubren la totalidad de la zona.



Sentinel 1A - 05/08/2016

Sentinel 1A - 29/08/2016



Sentinel 1B - 16/12/2017

Sentinel 1B - 28/12/2017

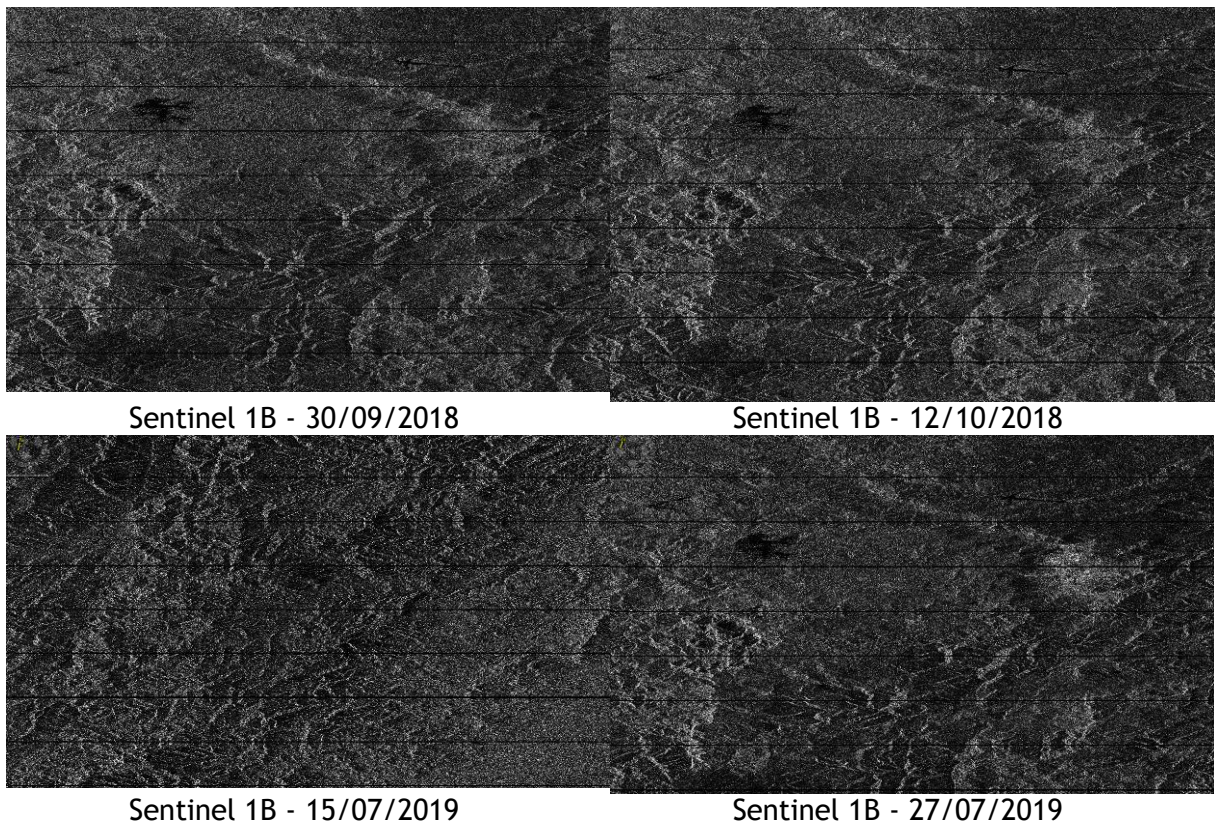


Figura 16. Imágenes SAR utilizadas

Tabla 7. Características de las imágenes procesadas - Generación MDE

Par	Imagen	Fecha	Resolución espacial (m)	Dirección de orbita	Polarización	Canal	Tipo y nivel de procesamiento	Sistema	Línea base (m)
1	Imagen 1 (Master)	15/07/2019	5x20	Descendente	VH	C	IW-SLC	Sentinel 1B	4.82
	Imagen 2 (Slave)	27/07/2019							
2	Imagen 1 (Master)	30/09/2018	5x20	Descendente	VH	C	IW-SLC	Sentinel 1B	56.27
	Imagen 2 (Slave)	12/10/2018							
3	Imagen 1 (Master)	16/12/2017	5x20	Descendente	VH	C	IW-SLC	Sentinel 1B	10.81
	Imagen 2 (Slave)	28/12/2017							
4	Imagen 1 (Master)	05/08/2016	5x20	Descendente	VV	C	IW-SLC	Sentinel 1A	108.5
	Imagen 2 (Slave)	29/08/2016							

2. Formación de los pares interferométricos: Se organizan los pares interferométricos, los cuales estarán conformados de acuerdo a la línea base y a la fecha de toma de las dos imágenes, se tuvo en cuenta en este paso que las

imágenes fueran temporalmente cercanas y/o que coincidieran con algunos de los eventos registrados, esto para evitar problemas de coherencia en los interferogramas.

3. Realización del correregistro de las imágenes: En este proceso se genera un archivo adicional en el que se combinan dos imágenes Sentinel 1 (par interferométrico) con el mismo sub-swath y polarización, usando las órbitas de cada producto y un DEM (por defecto SRTM) con el que realiza un remuestreo por medio de un método de interpolación seleccionado, para obtener valores de elevación (SNAP, 2015).

Este proceso se hace en dos etapas, una correlación cruzada utilizando las órbitas del satélite como base, y luego a nivel de pixel, para realizar la estimación del CPM (Polinomio de correregistro) y remuestreo interferométrico acoplando las imágenes esclavas a las maestras. La correlación cruzada crea una alineación entre las imágenes, y los desplazamientos se calculan maximizando la función en ambas etapas (SNAP, 2015).

4. Formación del interferograma y eliminación de la tierra plana: Se genera una imagen que proporciona información del cambio de fase entre el par interferométrico, a partir de esto se genera una representación por medio de franjas en valores relativos de 0 a 2π , las franjas son obtenidas al remover el efecto de la curvatura de la tierra, por lo que en este proceso el algoritmo realiza simultáneamente la estimación y remoción de la fase de tierra plana por medio de las órbitas y metadatos, esta fase está presente en la señal interferométrica debido a la curvatura de la superficie de referencia y es sustraída por medio de un estimador polinomial del interferograma, su sustracción es necesaria para obtener las diferencias de fase y analizar posibles movimientos en la superficie sin que la curvatura de la tierra influya en ello (SNAP, 2015). Al realizar el proceso de anterior, el interferograma queda referido a la topografía o a los desplazamientos del terreno y es posible realizar análisis posteriores. En este proceso también se crea una imagen de coherencia en la que se puede evaluar la calidad del interferograma.

En la Figura 17, Figura 18, Figura 19 y Figura 20 se muestran los interferogramas sin filtros obtenidos, cuya rampa cromática que varía en el color muestra en qué

lugares de la escena se tienen diferencias de fase similares, en otras palabras, se puede asumir que de acuerdo a la frecuencia y la dirección de las franjas que se forman en un interferograma, existen cambios o variaciones en la topografía de la escena.

En la Figura 21(izq) se muestran las imágenes con los valores de coherencia y fase interferométrica. En términos generales, la escala de valores de la coherencia se visualiza en tonalidades de negro a blanco, con valores de 0 a 1; 1(tono blanco) representa los valores con máxima coherencia, que para las imágenes de análisis corresponde a la zona urbana del municipio de Rionegro. En la Figura 21(der) se presentan los histogramas de escena asociados a cada imagen, se observa que en todas las imágenes analizadas se presentan valores de coherencia por debajo de 0.31, lo que significa que las imágenes son poco coherentes y las únicas zonas donde se observa alta coherencia es en las zonas urbanas (no hay cambios).

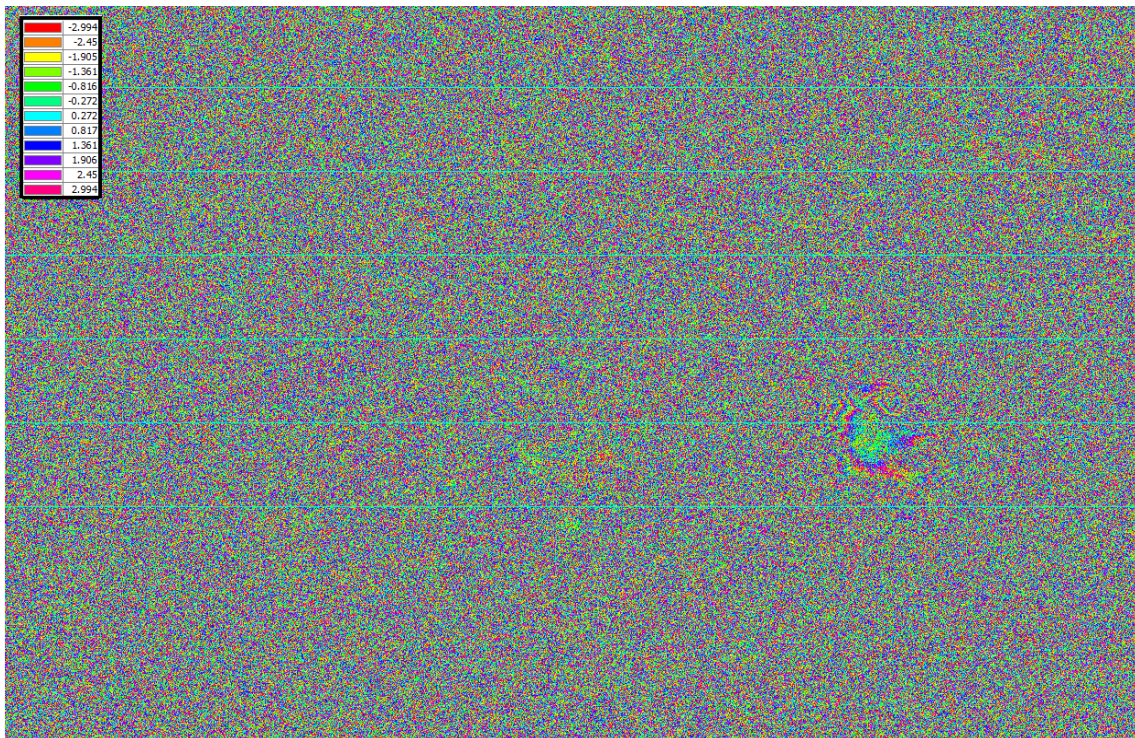


Figura 17. Interferograma 2016 sin filtro

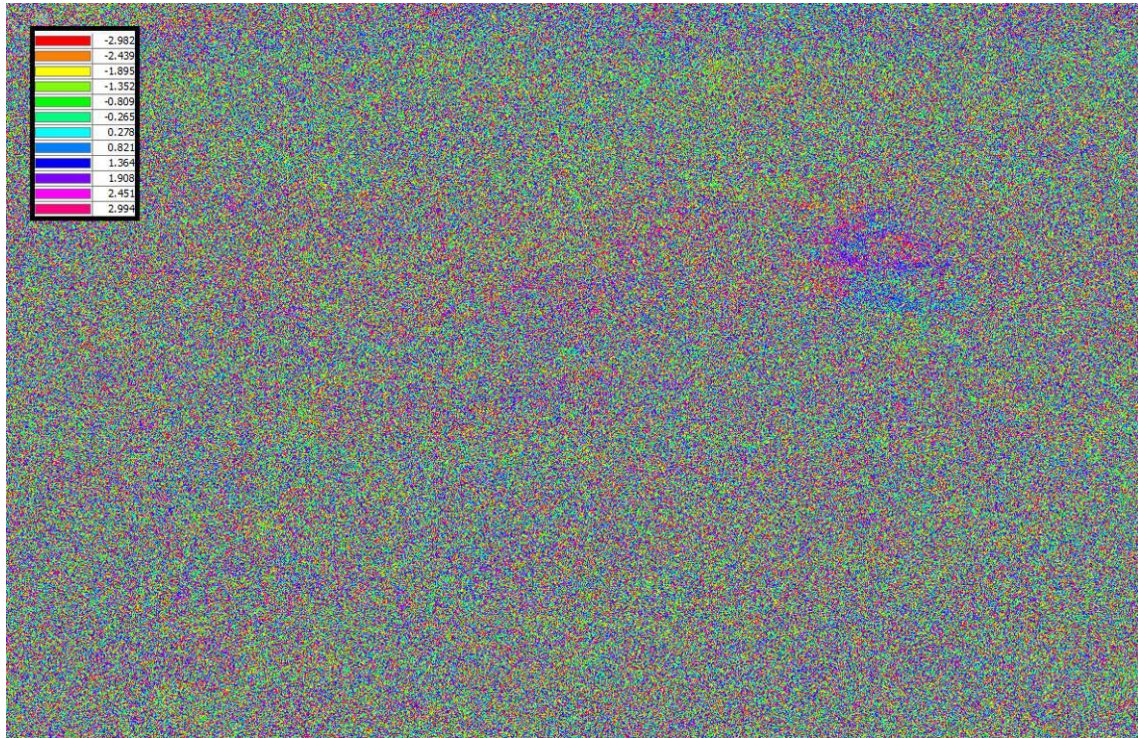


Figura 18. Interferograma 2017 sin filtro

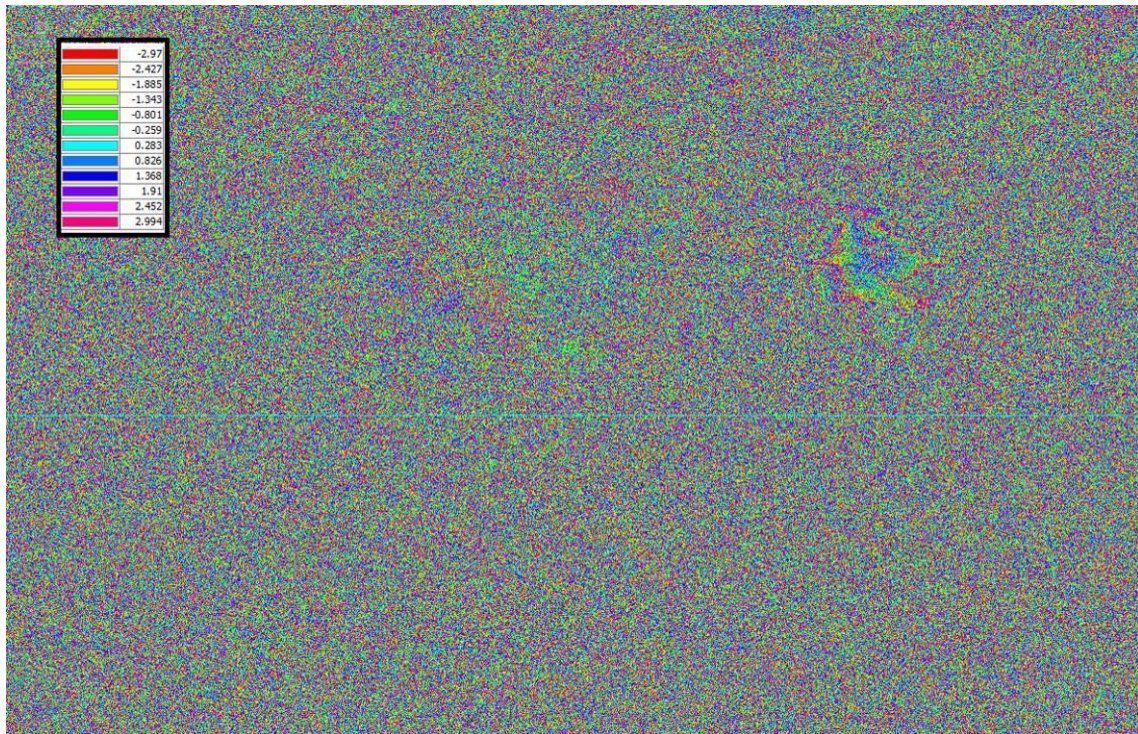


Figura 19. Interferograma 2018 sin filtro

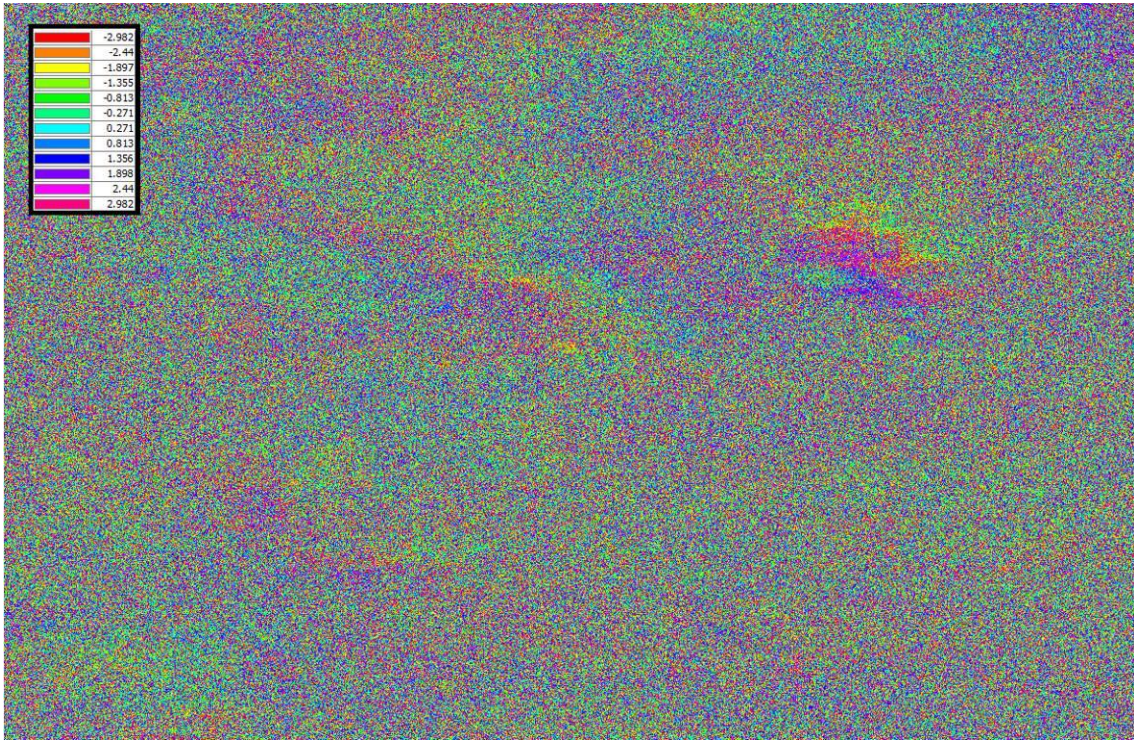
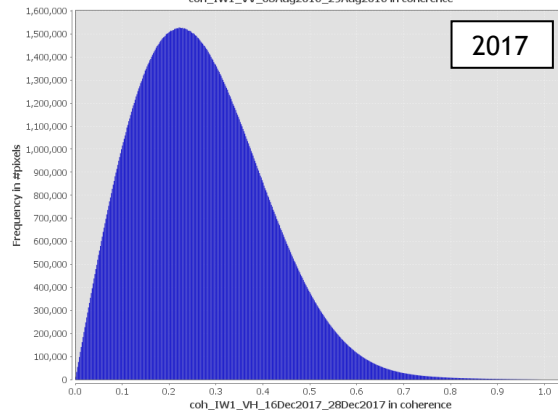
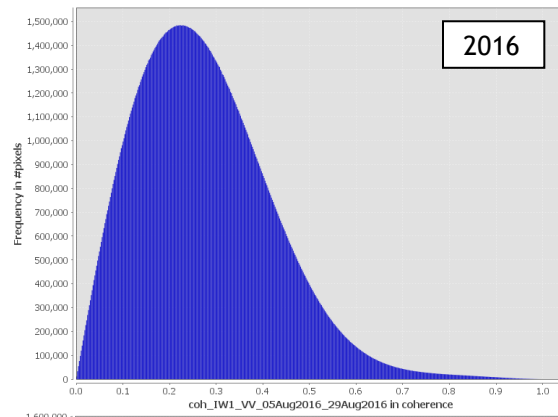
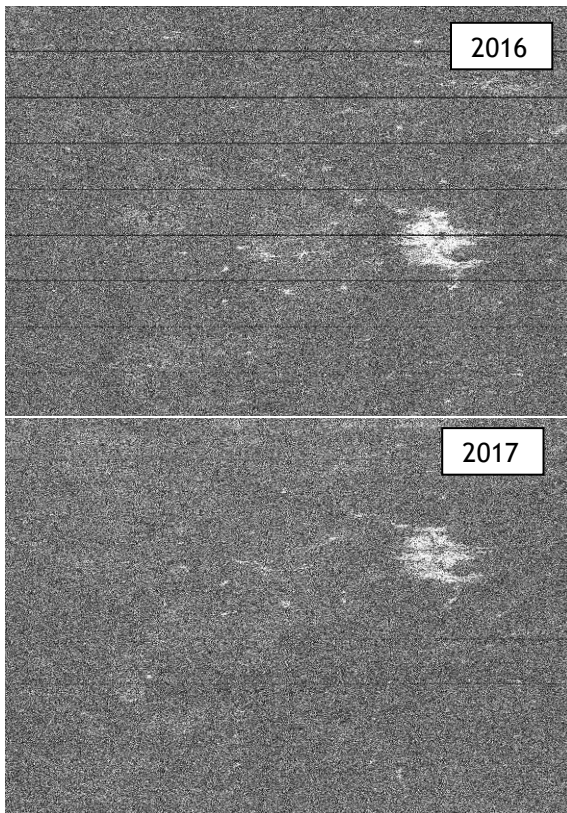


Figura 20. Interferograma 2019 sin filtro



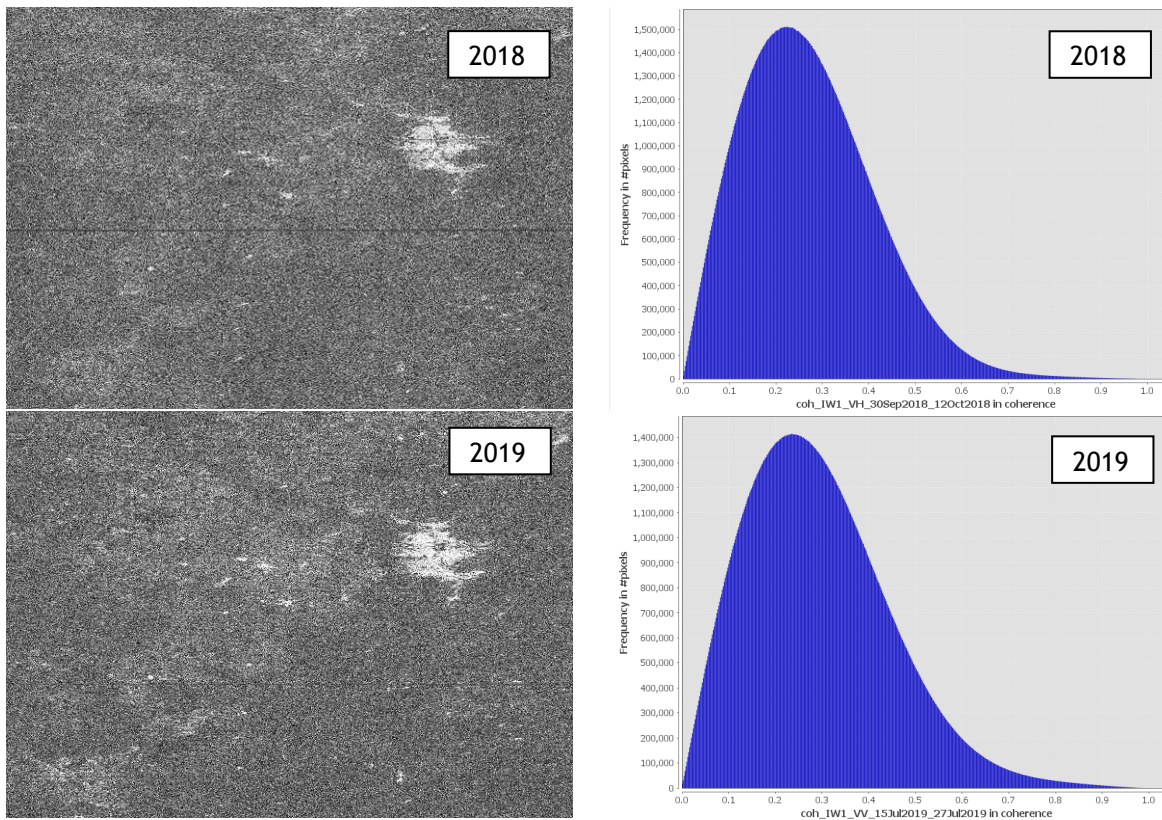


Figura 21. Imagen de coherencia (izq), histograma de coherencia (der)

5. Aplicación del filtro Deburst: Debido a que las imágenes IW de Sentinel 1 - TOPSAR presenta tres sub-swaths, los cuales están compuestos por series de ráfagas o bursts en inglés; en todos los sub-swaths de imágenes S1 se generan unas franjas horizontales que representan la división de las ráfagas. La remoción de estas se realiza con el filtro Deburst, el cual por medio del remuestreo de píxeles en una cuadrícula con tamaños en rango y azimut en común realiza la sincronización de las ráfagas, este proceso no representa pérdida de datos ya que el traslapo en azimut de la imagen es suficiente para tener continuidad del terreno. (SNAP 2015). En la Figura 22, Figura 23, Figura 24 y Figura 25 se muestran los resultados de los interferogramas obtenidos posterior a la aplicación del filtro.

6. Filtro de Fase Goldstein: El filtrado de fase es una técnica de preprocesamiento que reduce en gran medida los residuos en el último paso del desenvolvimiento de la fase y mejora la precisión de este. El método implementado en este operador es un algoritmo adaptativo no lineal propuesto por Goldstein y Werner en 1998. (SNAP, 2014). Este filtro permite que las franjas interferométricas se

vuelven más visibles y definidas. Este filtrado se puede aplicar a un interferograma o un grupo de interferogramas, dependiendo de la aplicación específica. En la Figura 26, Figura 27, Figura 28 y Figura 29 se muestra el filtro aplicado a la fase interferométrica en la zona de estudio (área recortada), donde se evidencia que las diferencias de fase se encuentran más visibles, apreciándose mejor las variaciones de la topografía de la zona.

7. Desenvolvimiento de la fase: Proceso mediante el cual se obtienen valores absolutos de altura del interferograma (Blanco & Barreto, 2009), que es el módulo 2π de la señal de fase absoluta (que es desconocida). En ese sentido, el problema directo es la fase “envuelta” dada en un intervalo de $(-\pi, \pi)$ y por otra parte el problema inverso, que es el desenvolvimiento de la fase que es mucho más complejo debido a su no linealidad y no singularidad, lo que demanda un análisis más profundo. Existen muchas técnicas para resolver este problema, pero su eficacia dependerá de varios factores como el ruido de la fase, la geometría, el desplazamiento o deformación de la topografía respecto de la ubicación del radar. Además, hay que tener en cuenta que sea la técnica que se use, los resultados no son una solución única y están supeditados a revisiones o evaluaciones de su exactitud o fiabilidad (Chen & Zebker, 2002).

Para el caso de estudio, este proceso se realizó empleando la herramienta SNAPHU (Statistical-Cost, Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping) de Chen y Zebker (2000).

SNAPHU es una herramienta que tiene implementado un algoritmo (MCF Minimum Cost Flow) para el desenvolvimiento de fase, cuya función objetivo es calcular la solución óptima de desenvolvimiento de los datos de entrada observados, estimando la máxima probabilidad. Un algoritmo de optimización usando técnicas de flujo de red.

En la Figura 30, Figura 31, Figura 32 y Figura 33 se muestra la fase interferométrica desenvuelta, donde se puede observar que se pasó de tener una diferencia de fase interferométrica a unas alturas o diferencias de alturas entre pixeles que se estimaron a partir del interferograma inicial. Estos valores por sí solos no constituyen un modelo digital de elevación, ya que la fase desenvuelta presenta las diferencias de alturas y no las alturas absolutas de cada punto.

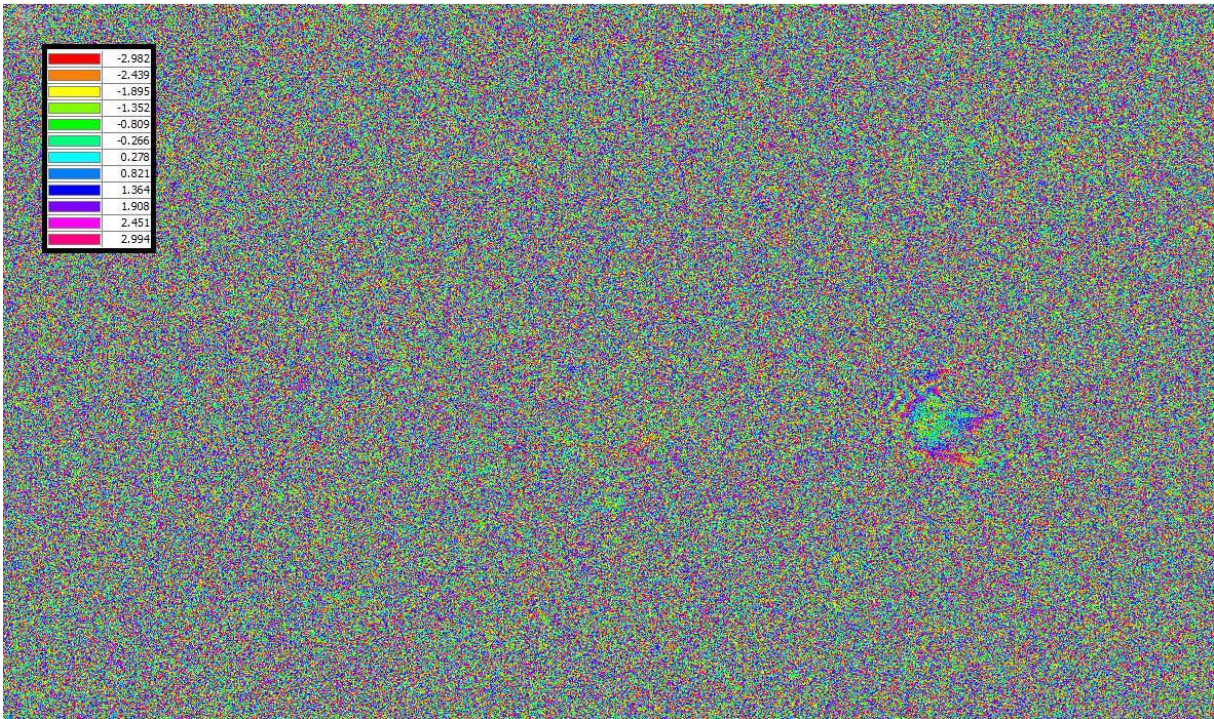


Figura 22. Interferograma 2016 después de aplicar el filtro Deburst

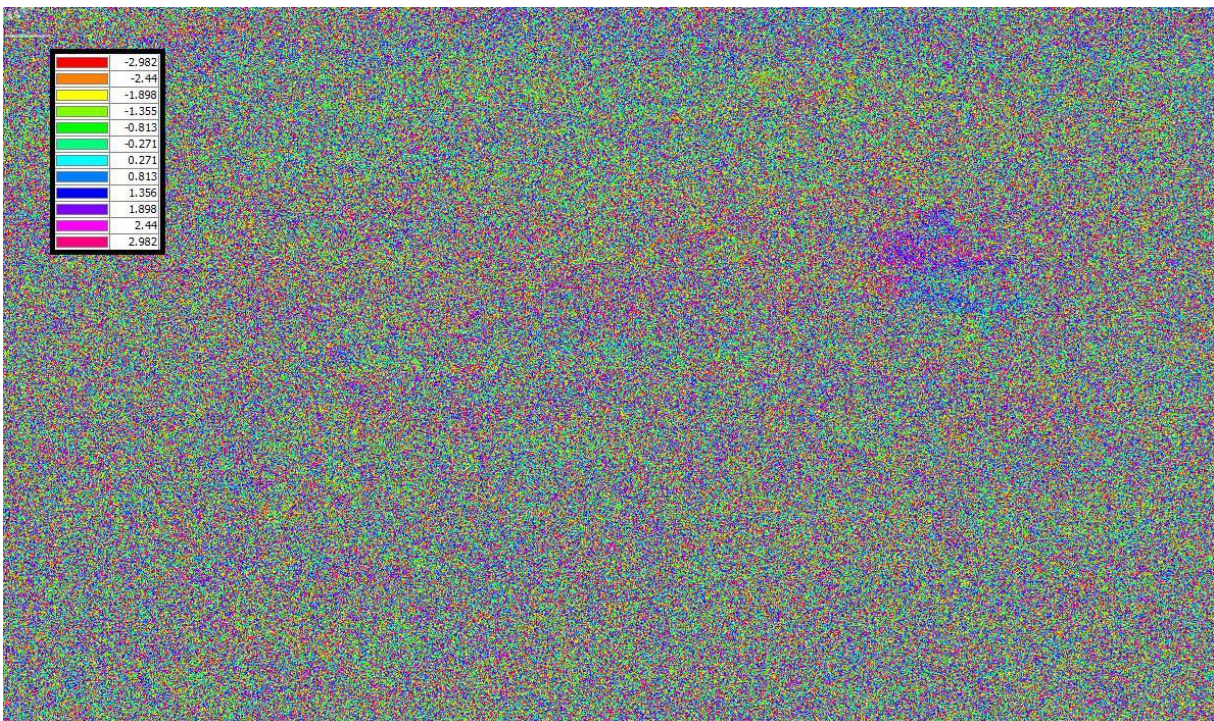


Figura 23. Interferograma 2017 después de aplicar el filtro Deburst

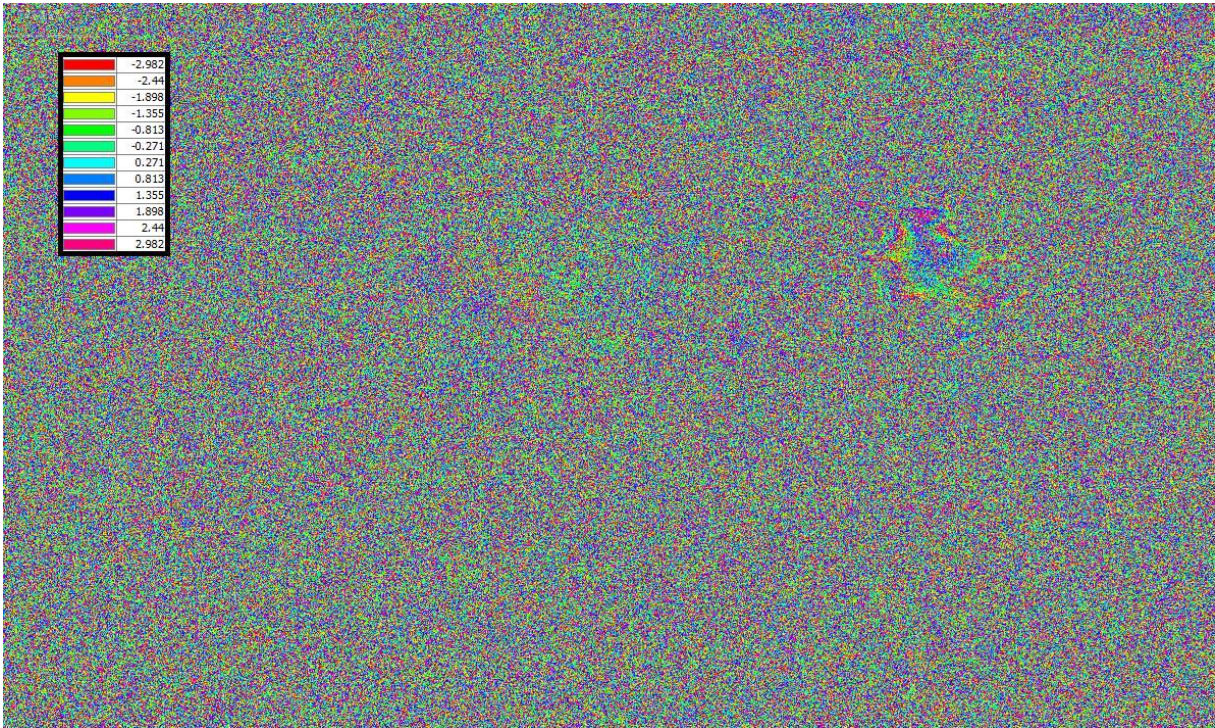


Figura 24. Interferograma 2018 después de aplicar el filtro Deburst

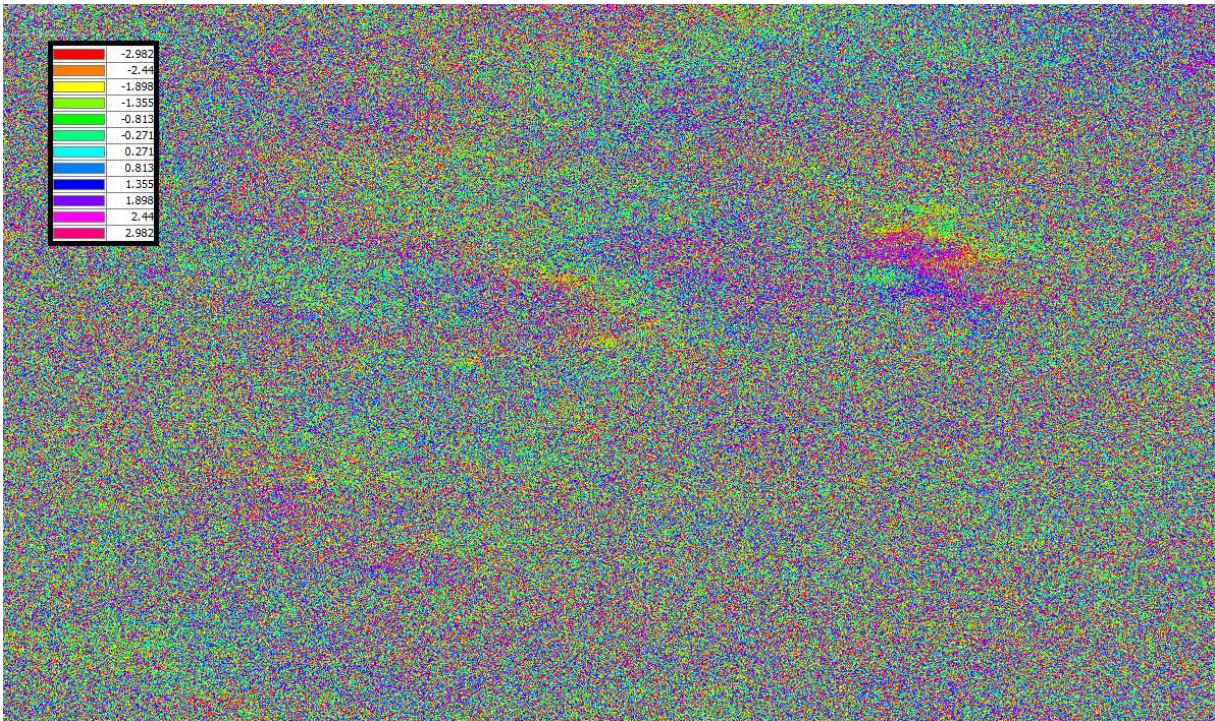


Figura 25. Interferograma 2019 después de aplicar el filtro Deburst

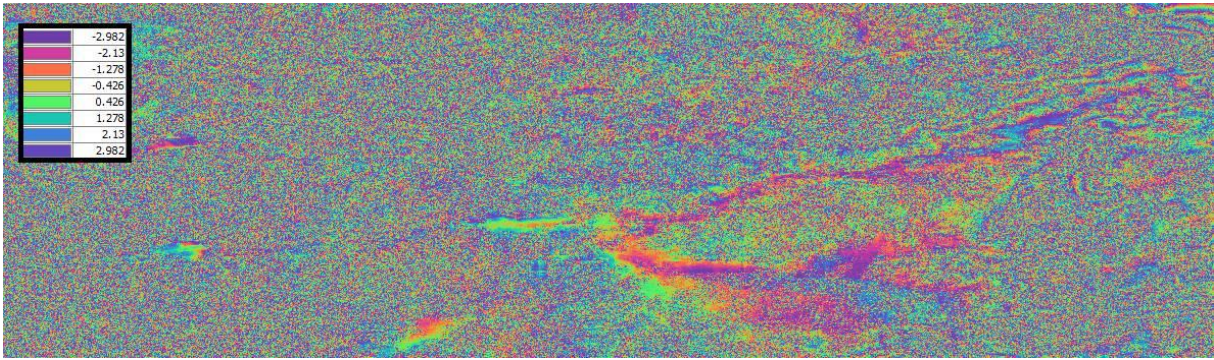


Figura 26. Interferograma 2016 después de aplicar el filtro Goldstein

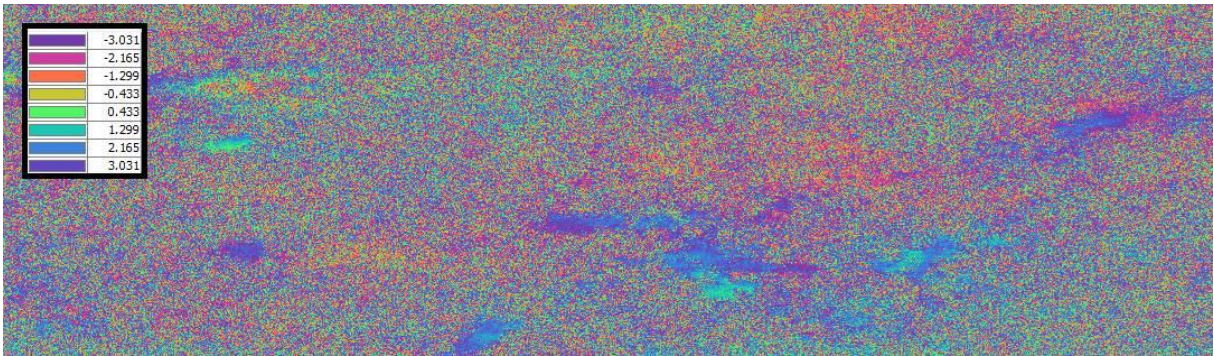


Figura 27. Interferograma 2017 después de aplicar el filtro Goldstein

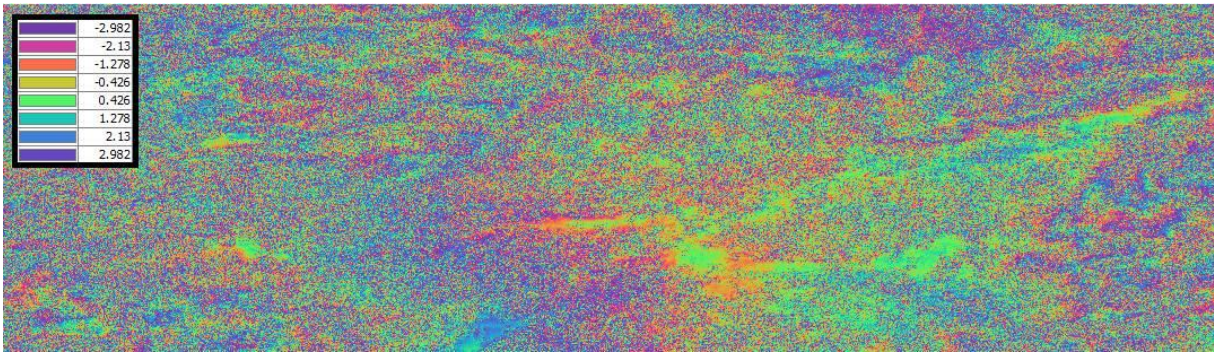


Figura 28. Interferograma 2018 después de aplicar el filtro Goldstein

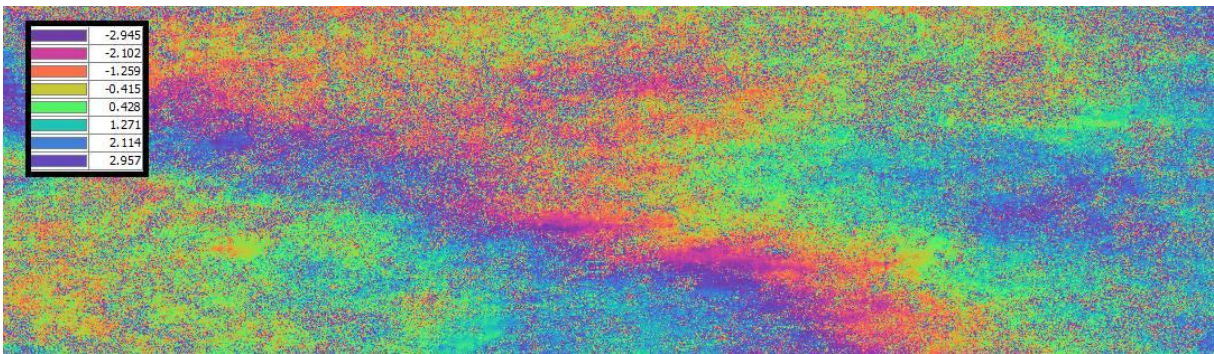


Figura 29. Interferograma 2019 después de aplicar el filtro Goldstein

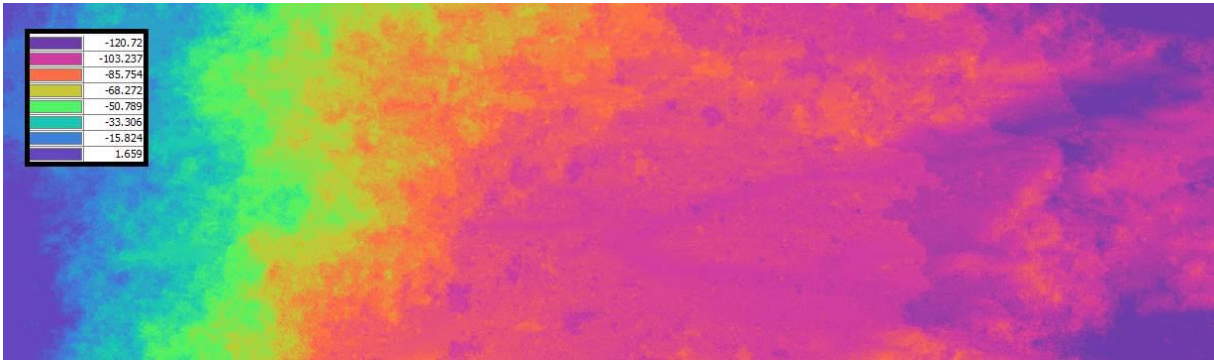


Figura 30. Interferograma desenvuelto 2016

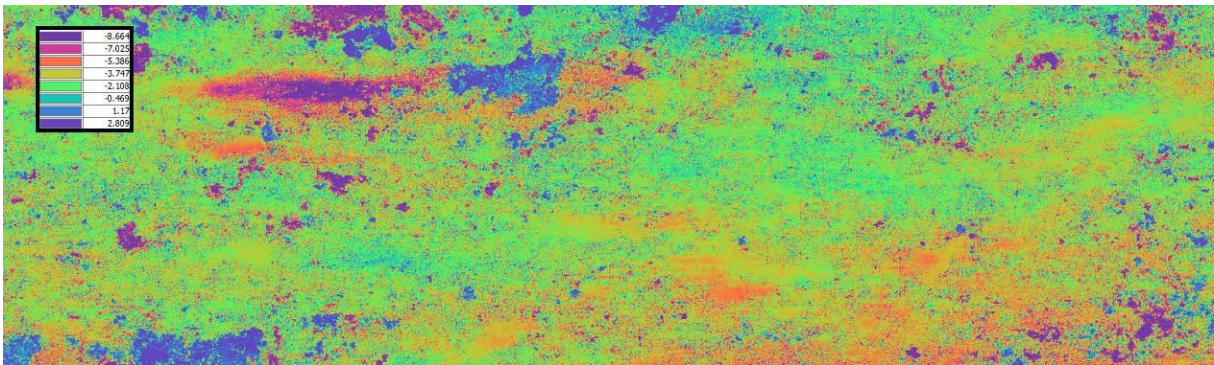


Figura 31. Interferograma desenvuelto 2017

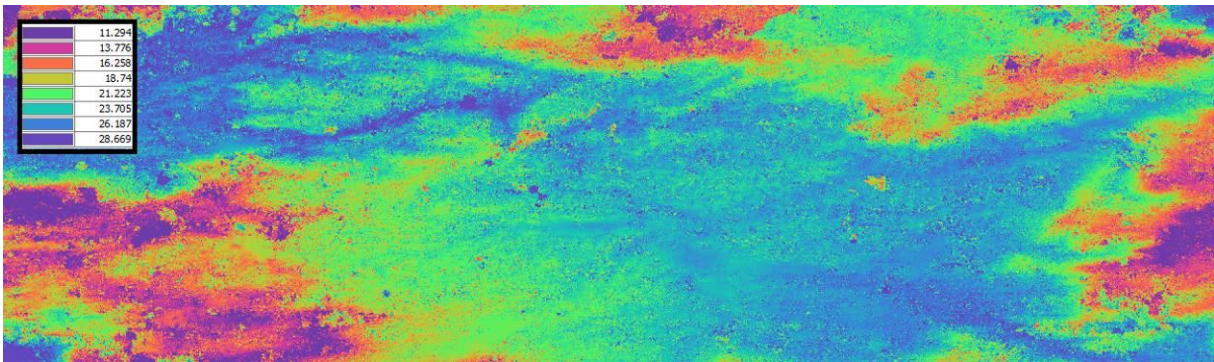


Figura 32. Interferograma desenvuelto 2018

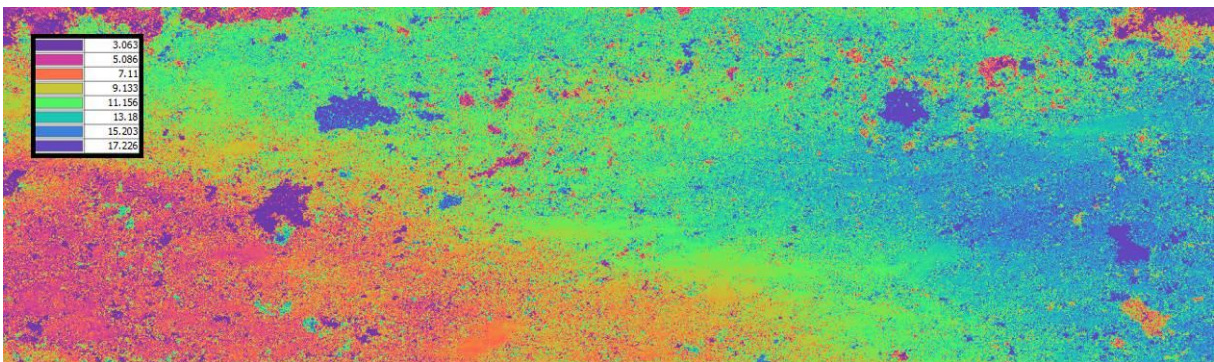


Figura 33. Interferograma desenvuelto 2019

-
8. **Formación del DEM:** Se procede a convertir la fase interferométrica en valores de altura codificadas, donde se calcula primero la fase de referencia de un número de alturas discretas y comparar la fase real del interferograma con estos valores para determinar la altura (Figura 34, Figura 35, Figura 36 y Figura 37), utilizándose como referencia un DEM externo (SRTM 90 m).

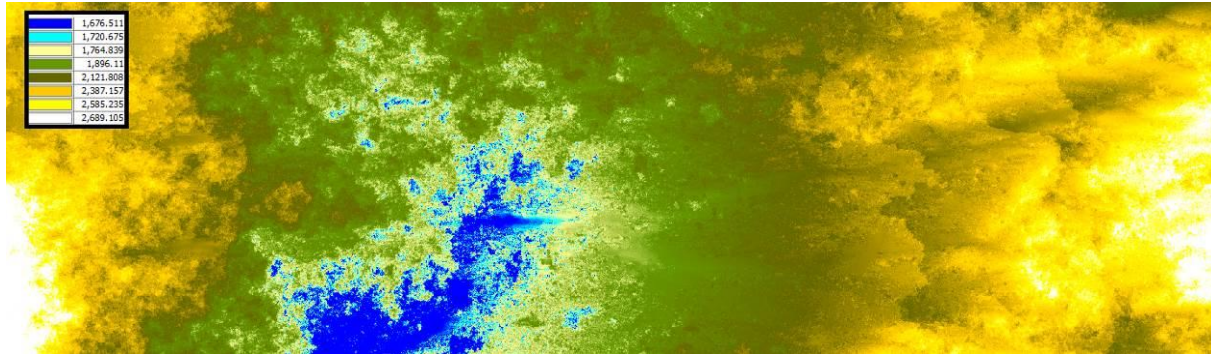


Figura 34. DEM 2016

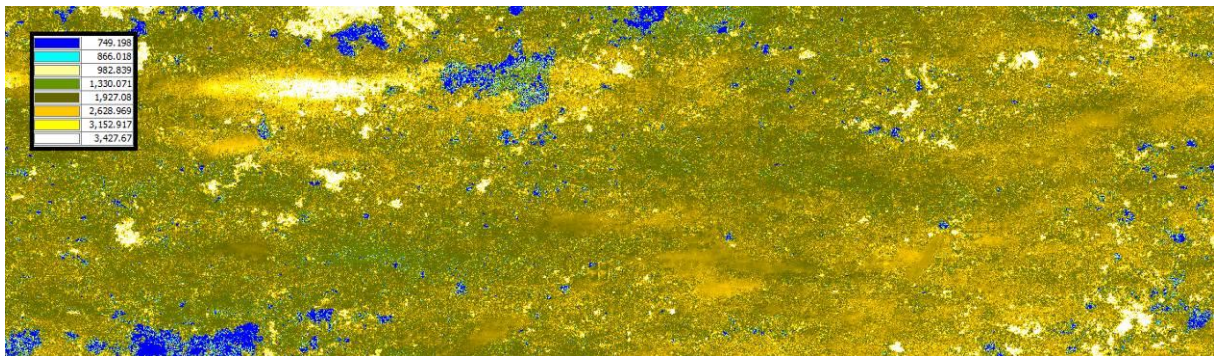


Figura 35. DEM 2017

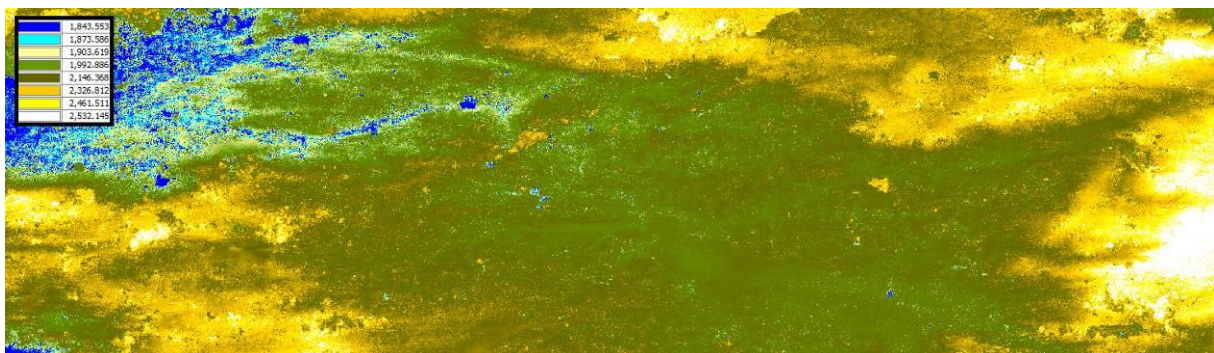


Figura 36. DEM 2018

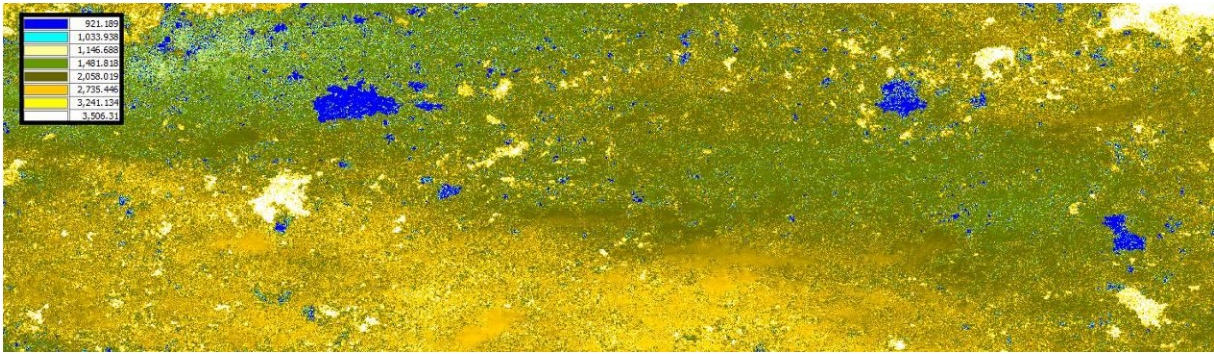


Figura 37. DEM 2019

9. Georreferenciación del DEM y correcciones geométricas: Debido a la topografía de las escenas y la inclinación del sensor, las distancias pueden ser distorsionadas o susceptibles a error en las imágenes de radar. Las correcciones de terreno compensan este error o distorsión para que la representación de la imagen de radar sea lo más cercana a la realidad (Olmsted, 1993).

Además de esto se ortorectifica la imagen basado en la órbita, la información del metadato y los parámetros de inclinación sumado a un DEM externo de referencia. En la Figura 38, Figura 39, Figura 40 y Figura 41 se puede observar el DEM georreferenciado y orto rectificado.

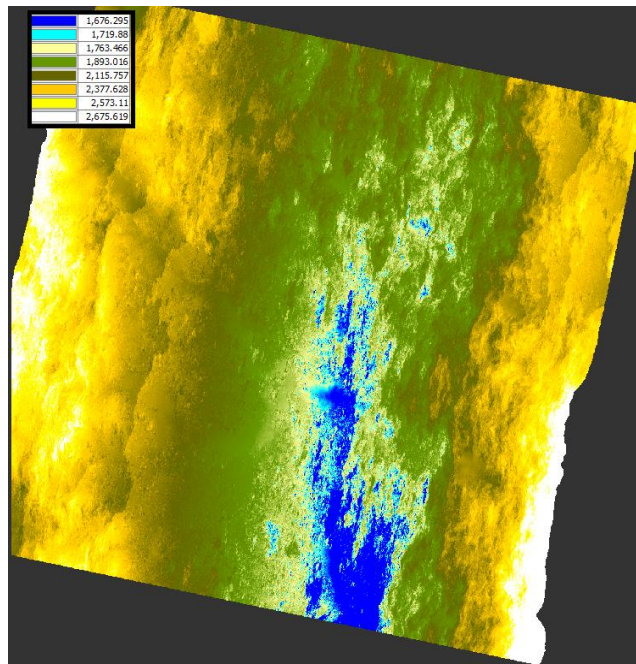


Figura 38. DEM georreferenciado y orto rectificado - 2016

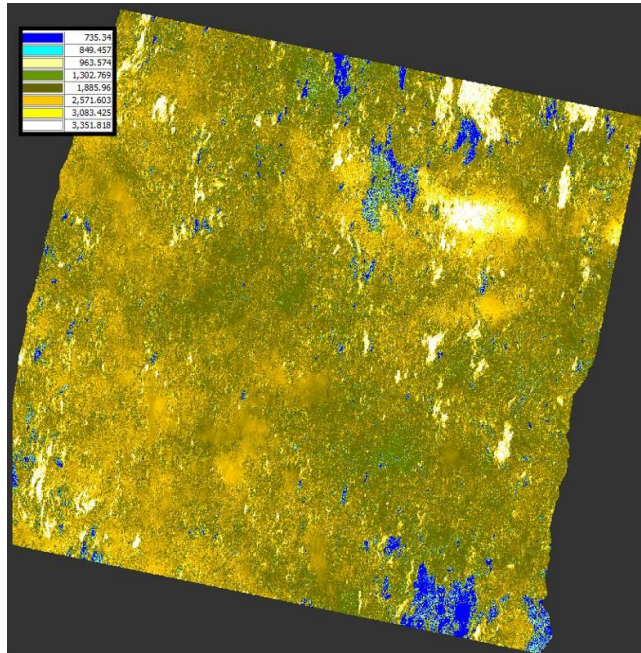


Figura 39. DEM georeferenciado y orto rectificado - 2017

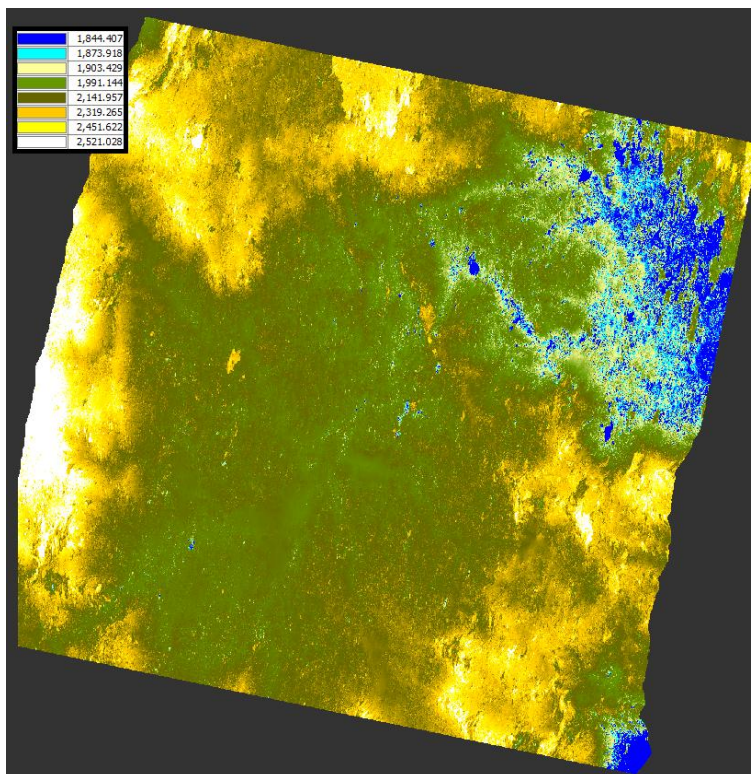


Figura 40. DEM georeferenciado y orto rectificado - 2018

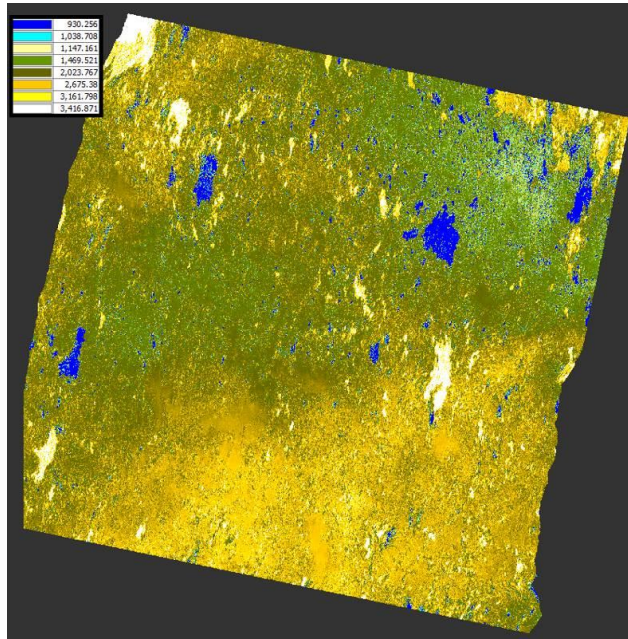


Figura 41. DEM georreferenciado y orto rectificado - 2019

8.3 Proceso metodológico para la implementación del modelo hidráulico

En la Figura 42 se presenta el proceso metodológico que se realizó para implementar el modelo hidráulico del río Negro.

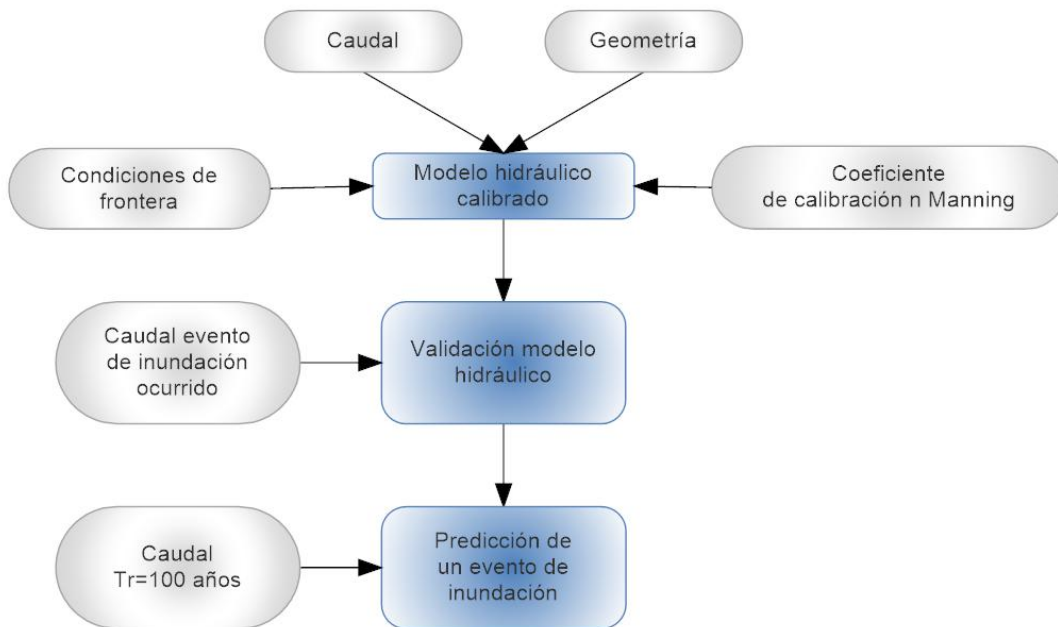


Figura 42. Diagrama de flujo para la implementación del modelo hidráulico

La metodología planteada contiene los procesos necesarios para hacer la valoración hidráulica del río Negro ante un evento de inundación.

1. Estimación del caudal de creciente: Se estima o identifica el caudal de creciente asociado a un evento de inundación, utilizando información hidrometeorológica de las estaciones de nivel existentes en la cuenca de estudio (Figura 13).

Para el análisis de caudales máximos de creciente, se procedió a realizar un análisis de frecuencia de inundación con información de la estación Puente Real (localizada en la zona urbana del municipio de Rionegro), estación administrada por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales); dicho análisis consistió en el estudio e interpretación de la serie de datos limnigráficas (series de caudal) obtenidos de eventos de creciente ocurridos en la zona.

2. Definición de la geometría del cauce de estudio: Con la información cartográfica obtenida de las imágenes Sentinel 1, se procede a delimitar en una faja de 1.6 km todo el corredor del río Negro, donde está incluido el cauce principal y la zona de llanura de inundación de este. Adicionalmente, se define el eje principal del río y secciones transversales, las cuales están espaciadas entre 50 m y 200 m, en un ancho entre 300 m a 800 m (Figura 43).

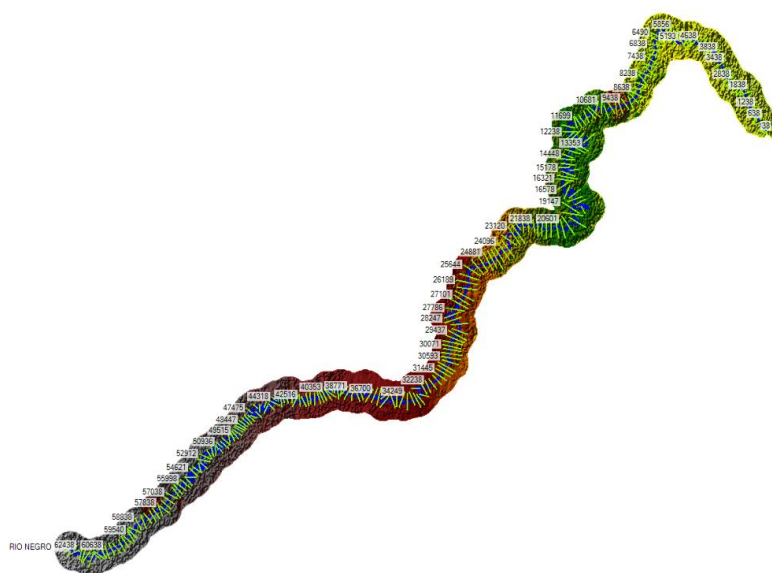


Figura 43. Definición de la geometría del modelo hidráulico - DEM, alineamiento río y secciones transversales

-
3. Definición de las condiciones de frontera del modelo: El cálculo de los perfiles de flujo se realizó considerando el río como una corriente de baja pendiente, donde se desarrollan básicamente flujos subcríticos, razón por la que se opta por modelar el cauce con un régimen de flujo subcrítico. Para las condiciones de borde se utilizó aguas abajo la profundidad normal calculada con base en la pendiente del lecho de 0.06 %.
 4. Calibración del modelo hidráulico: Es importante al momento de realizar una modelación hidráulica de un cauce en particular, calibrar el modelo implementado, y así evaluar la capacidad del modelo de representar las condiciones reales de la corriente analizada. Para ello, bajo las condiciones de caudal de diseño, de rugosidad del canal y de condiciones de entrada al modelo hidráulico, se verificó las alturas alcanzadas de la lámina de agua y así evaluar el concepto de banca llena (Posada, 1994).

Posada (1994), indica que el caudal que representa la banca llena, es decir, aquel que ocupa el canal principal de la corriente corresponde a un caudal con periodo de retorno que oscila entre 1.5 años y 2.33 años.

5. Validación del evento de inundación: Una vez definida las condiciones iniciales del modelo (geometría y caudales), condiciones de frontera (tipo de transito hidráulico) y calibración del mismo, se procede a realizar la simulación de un escenario de un evento de inundación ocurrido en la zona, tomando como información el caudal de creciente ocurrido e información de las manchas de inundación detectadas para la fecha; esta última son tomadas a partir de información de radar donde se identifica o delimita las zonas inundadas.
6. Simulación del modelo hidráulico para un $T_r=100$ años: Teniendo el modelo calibrado y validado, se procede a simular o predecir un evento de inundación proyectado para unas condiciones de caudal probables (periodo de retorno de los 100 años) con el objeto de tener un referente de inundación que se pueda presentar en la zona para unas condiciones máximas de creciente.

8.4 Proceso metodológico para la estimación del mapa de inundación a partir del procesamiento de Imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR)

En la Figura 44 se presenta la metodología para elaborar el mapa de inundación empleando las técnicas de procesamiento de imágenes de radar de apertura sintética (SAR).

La metodología planteada contiene los procesos necesarios para llegar a la obtención del mapa de inundación, los pasos para la realización de la metodología son los siguientes:

1. Selección de las imágenes de radar para la zona de estudio: Se realizó la consulta y búsqueda de imágenes Sentinel-1 tipo GRD disponibles en las fechas de inundaciones reportadas en la zona desde la fecha de apertura de las imágenes (octubre de 2014) hasta abril de 2019 (periodo en el que fueron consultados los eventos) las cuales cubren la totalidad de la zona de estudio, esto se realizó por medio de la plataforma Open Hub del programa Copernicus de la ESA. Una vez consultada las imágenes disponibles y fechas, se procedió a descargar las imágenes de la zona de estudio, de manera que se pudiera encontrar una representación del evento de inundación ocurrido. En la Tabla 8 se presentan las características de las imágenes utilizadas en la investigación y en la Figura 45 se observan imágenes completas de la zona de estudio

Tabla 8. Características de las imágenes procesadas - Generación zonas de inundación

Imagen	Fecha	Resolución espacial (m)	Dirección de órbita	Polarización	Canal	Tipo y nivel de procesamiento	Sistema
Imagen 1	09/05/2018	10x10	Descendente	VH	C	IW-GRD	Sentinel 1B
Imagen 2	21/05/2018						

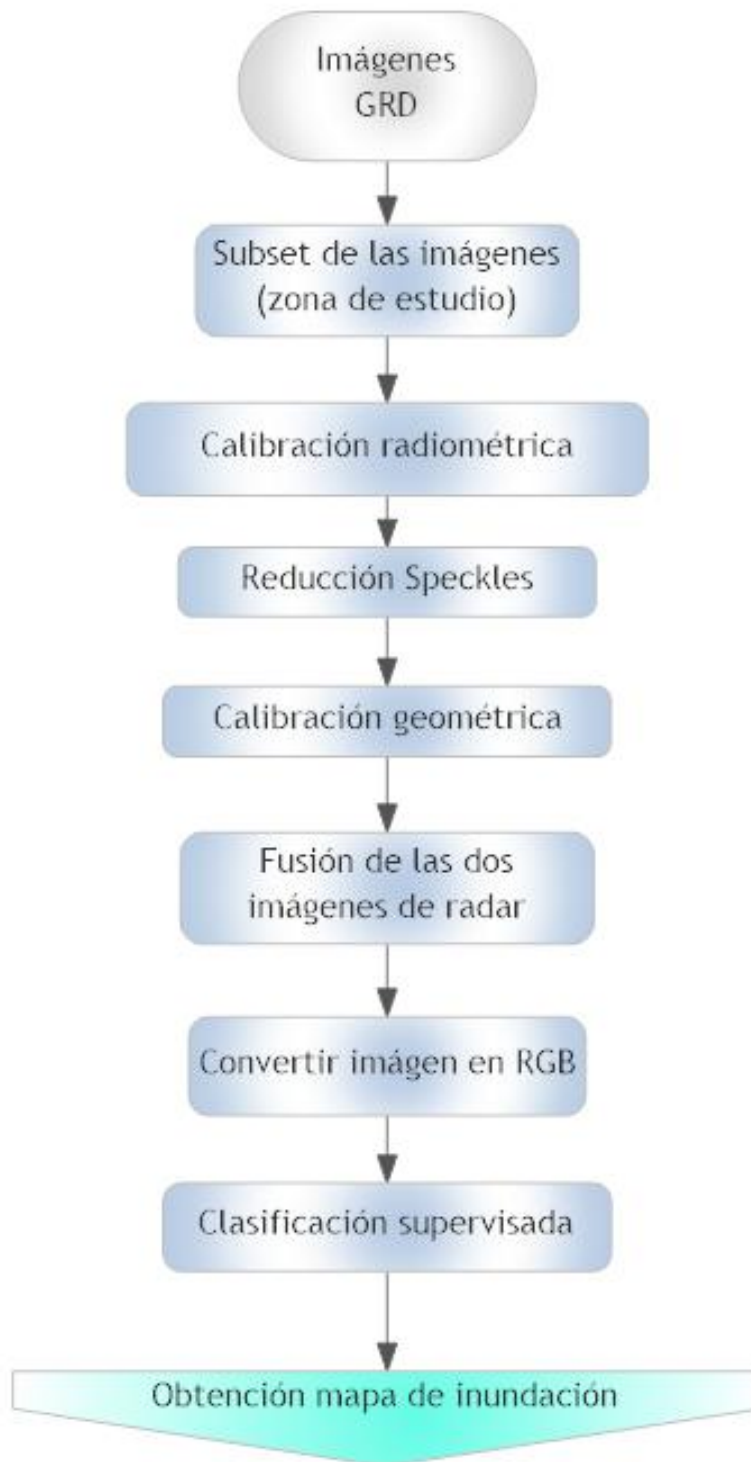
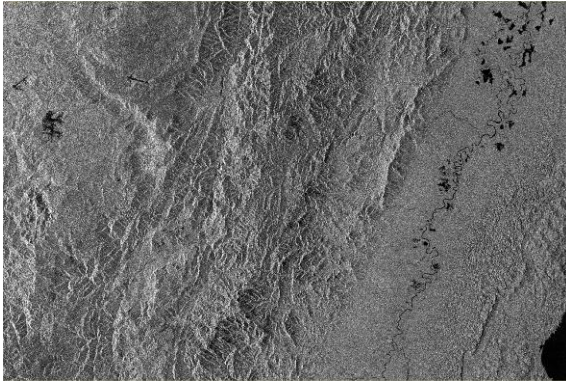
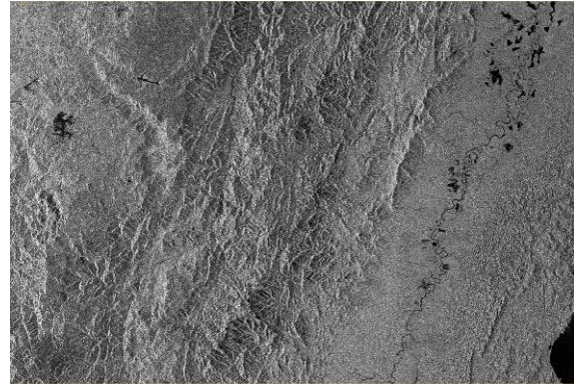


Figura 44. Diagrama de flujo para la generación del mapa de inundación a partir del procesamiento de imágenes de radar de apertura sintética (SAR)



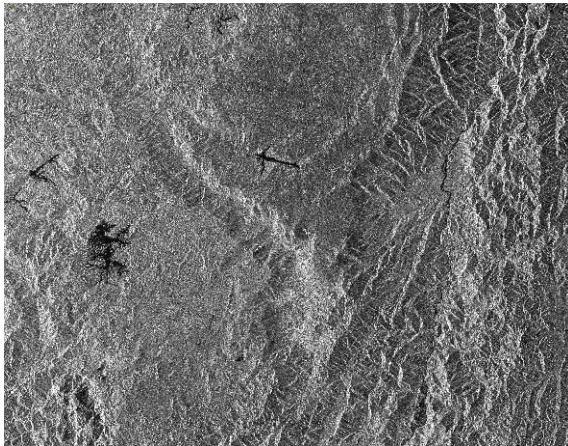
09/05/2018



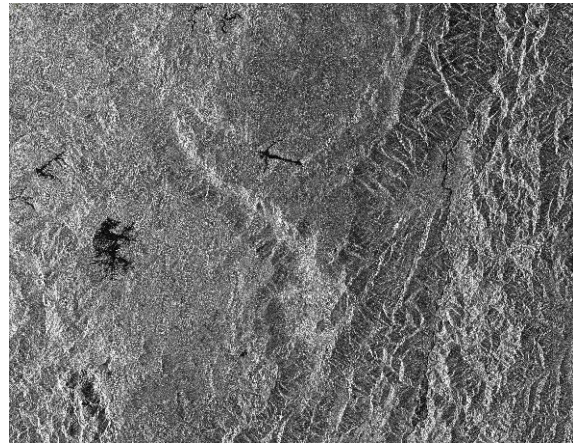
21/05/2018

Figura 45. Imágenes SAR 09 de mayo de 2018 y 21 de mayo de 2018

2. Selección de una sección de la imagen: Dado que la imagen Sentinel tiene una franja de cobertura de 250 km, se procedió a realizar un recorte sólo de la zona de estudio, con el objetivo de optimizar el preprocesamiento de las imágenes (Figura 46).



09/05/2018



21/05/2018

Figura 46. Recortes de imágenes SAR 09 de mayo de 2018 y 21 de mayo de 2018

3. Calibración radiométrica: Consiste en crear una imagen donde el valor de cada pixel corresponde a la retro dispersión de la escena.; información que es importante para realizar análisis de tipo cuantitativo, que permitan comparar imágenes con otras de diferentes sensores, diferentes modalidades, adquiridas en diferentes tiempos o procesadas por diferentes procesadores (Figura 47).
4. Reducción de Speckle: Se aplica un filtro para reducir el speckle, para retirar el ruido de las imágenes, y posteriormente hacer una clasificación adecuada (Figura 48).

-
5. Calibración geométrica: Se corrigen las distorsiones geométricas de las imágenes relacionadas el rango oblicuo, inversión del relieve, las sombras, el desplazamiento en contra del nadir; obteniéndose una imagen corregida y orientada correctamente (Figura 49).

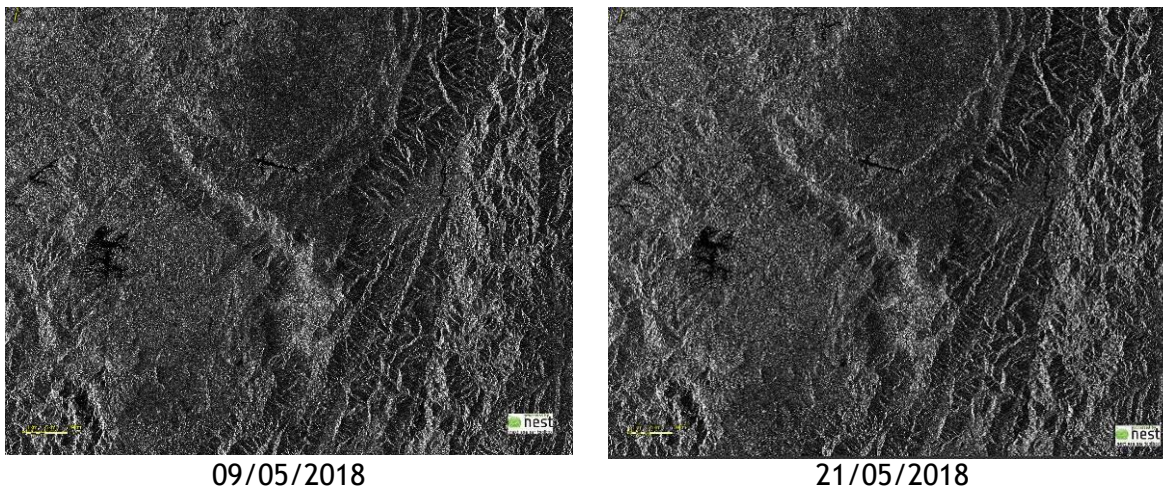


Figura 47. Imágenes calibradas SAR 09 de mayo de 2018 y 21 de mayo de 2018

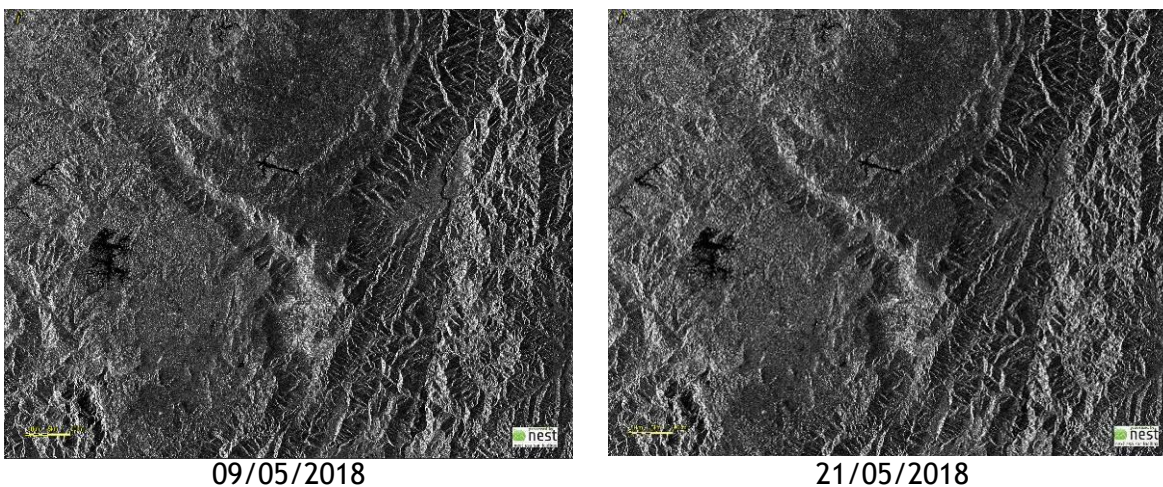


Figura 48. Imágenes filtradas SAR 09 de mayo de 2018 y 21 de mayo de 2018

6. Generación de una única imagen: Se genera una única imagen que acople las propiedades de las dos fechas capturadas (antes de la inundación y después de la inundación), con el objeto de poder representar los cambios de ocurrido durante el evento de inundación (Figura 50).
7. Representación de la imagen en RGB: Para distinguir con claridad los cambios generados por el evento de inundación, se procedió a representar la imagen obtenida de la fusión de ambas imágenes, donde el color rojo representa la vegetación que fue inundada (doble rebote), el color oscuro o negro las aguas

permanentes (reflexión especular) e inundación o desbordamiento de los cauces (color azul), áreas inundadas por efecto de desbordamiento de los cauce (Figura 51).

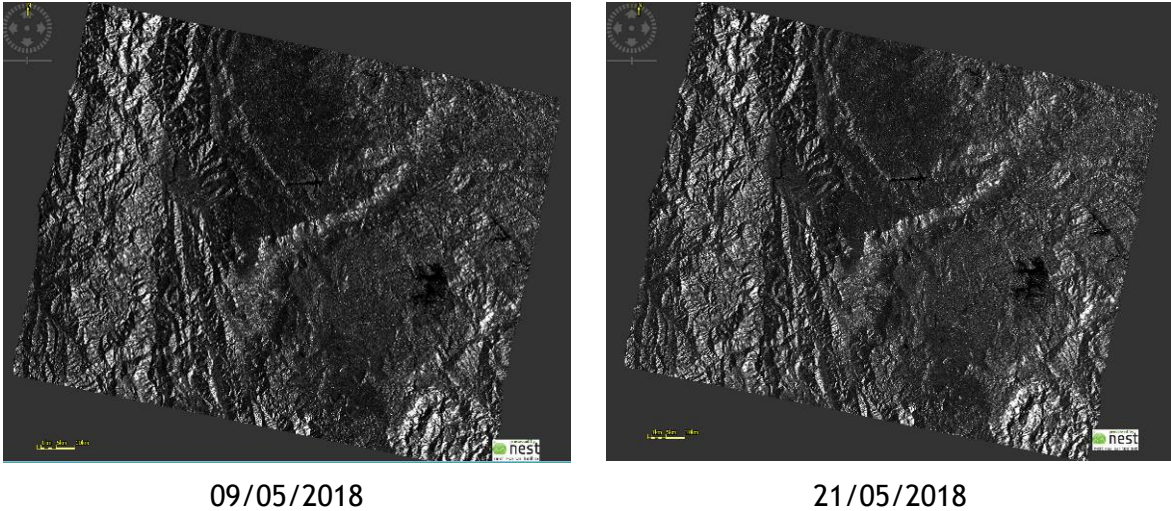


Figura 49. Imágenes corregidas geométricamente SAR 09 de mayo de 2018 y 21 de mayo de 2018

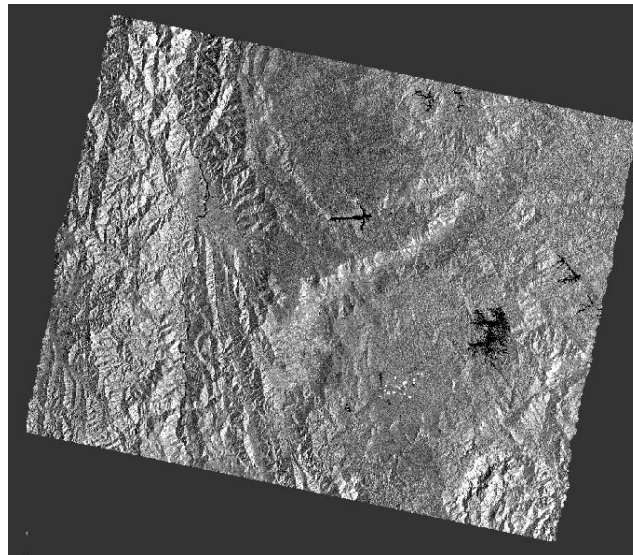


Figura 50. Imagen producto de juntar la imagen SAR 09 de mayo de 2018 con la imagen SAR de 21 de mayo de 2018

8. Clasificación supervisada: Se realizó una supervisión clasificada (Random forest “Bosques aleatorios”) donde se definieron 6 diferentes de clases y de cada clase se obtuvieron 15 muestras (vegetación inundada, agua permanente, agua no

permanente, drenajes, vegetación, zona urbana), y finalmente se clasificó la imagen de acuerdo a cada categoría (Figura 52).

9. Definición de las zonas de inundación: Con la clasificación de las imágenes y luego de hacer un filtro, se identificaron las zonas inundadas y se delimitó el polígono completo que abarcó todas las zonas inundables del evento ocurrido el 20 de mayo de 2018 (Figura 53).

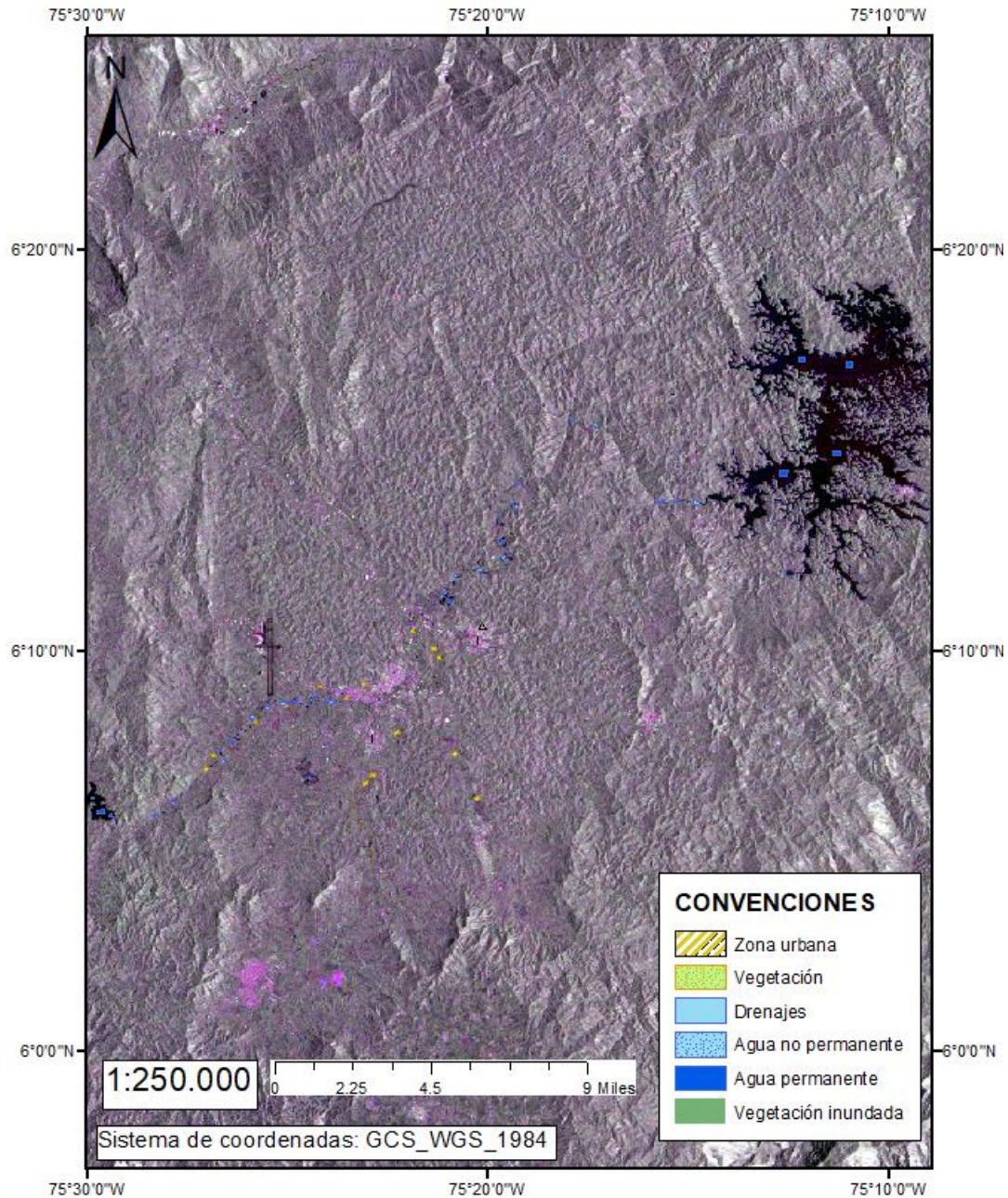


Figura 51. Representación de la imagen en RGB

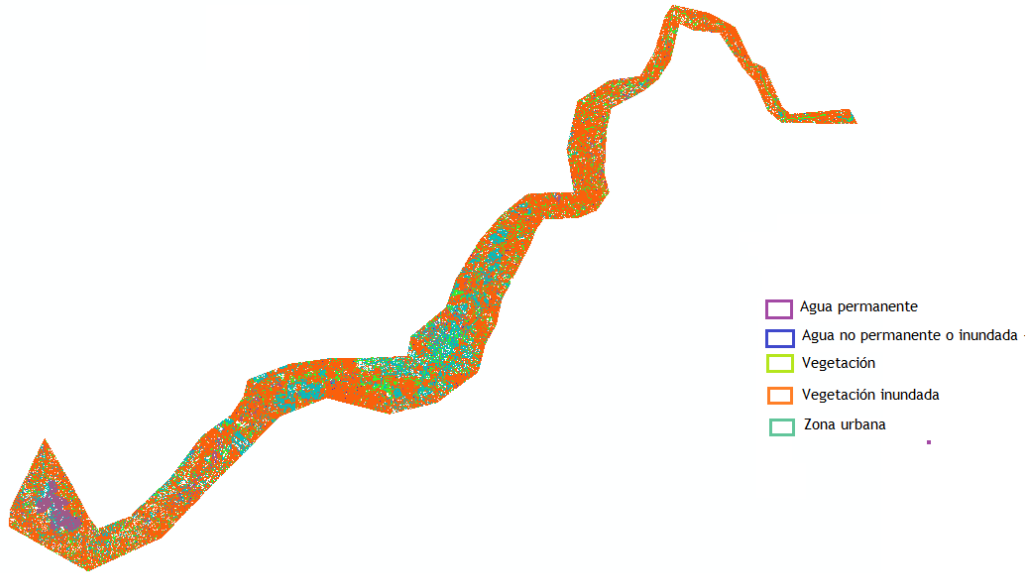


Figura 52. Imágenes clasificadas por clases

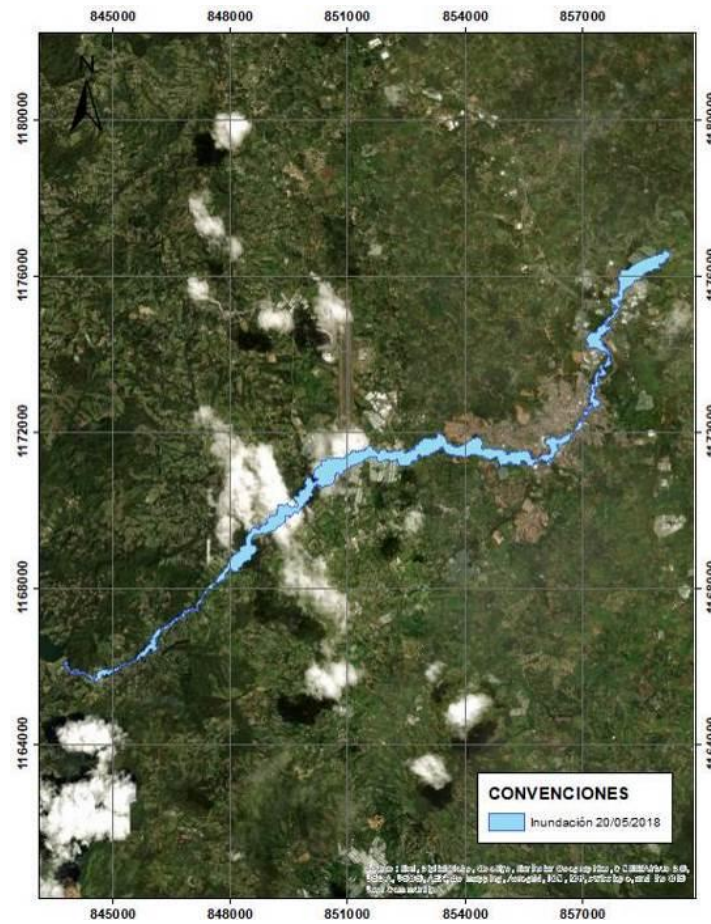


Figura 53. Polígono de inundación del evento ocurrido el 20 de mayo de 2018

9 RESULTADOS

9.1 Determinación del MDE de la franja o corredor de inundación del río Negro mediante el uso de imágenes de radar SENTINEL-1 usando interferometría SAR

Se muestra el resultado obtenido del MDE de la franja de inundación del río Negro y la interpretación del resultado obtenido; donde se hace un análisis puntual del terreno aledaño al cauce principal del río Negro o zona de llanura de inundación, realizando comparaciones con datos topográficos levantados en campo con un MDE de referencia.

9.1.1 MDE obtenido de la franja de inundación del río Negro

A partir de las imágenes Sentinel-1 y utilizando interferometría SAR según la metodología antes descrita, se obtuvo un modelo digital de elevación MDE de la zona aledaña al río Negro (llanura de inundación) para cada una de las imágenes implementadas, con una resolución geométrica de 14 m x 14 m (Figura 56).

Evaluando visualmente cada uno de los MDE obtenidos de las imágenes de Sentinel se puede concluir que los MDE obtenidos ofrecen una buena representación del área de estudio, encontrándose diferencias puntuales a nivel local, en especial en la parte más alta del cauce (costado suroccidental), donde este presenta una mayor pendiente, presencia de mayor cobertura vegetal en la zona de inundación, y una sección hidráulica reducida; lugar donde visualmente se evidencia poco detalle de la conformación del cauce del río Negro; en la zona de baja pendiente donde existe poca cobertura vegetal, se pudo identificar buena captura en la información del terreno (sector central y costado nororiental).

Evaluando cuantitativamente, se hace una comparación entre el perfil longitudinal del río del MDE obtenido del Sentinel 1 versus el MDE de referencia, encontrándose una tendencia similar, con diferencias entre 0.02 m y 35 m (Figura 54).

Por otro lado, se hizo una comparación de estos modelos en cortes transversales (secciones transversales al río) para evaluar las diferencias de un modelo a otro, encontrándose que en la sección cuyas márgenes están conformadas por una densa cobertura vegetal las diferencias en elevación son entre 5 a 10 m, perdiéndose el detalle y forma del terreno, a diferencia de la sección donde no hay presencia de cobertura

vegetal donde las diferencias de elevación son entre 2 a 4.0 m presentándose unas formas del terreno similares (Figura 55).

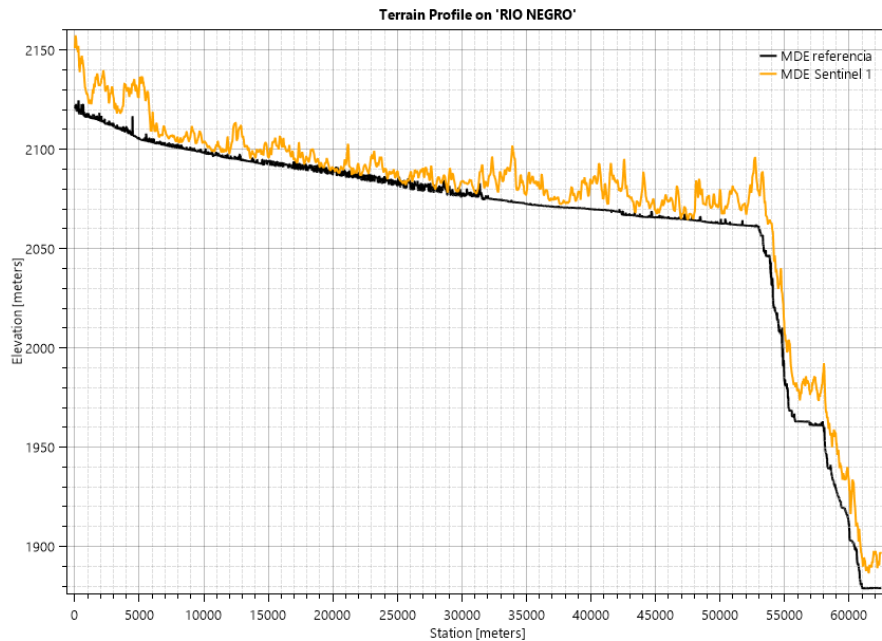
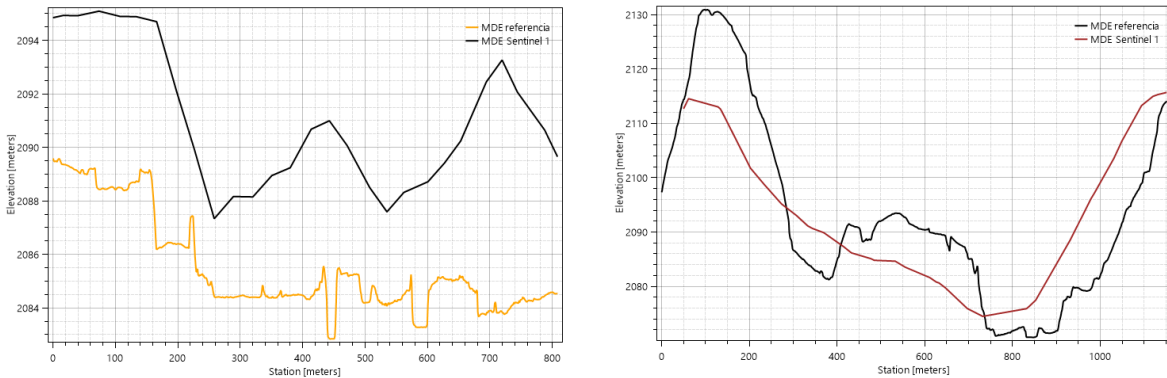


Figura 54. Perfil longitudinal del río Negro MDE Sentinel 1 vs MDE referencia



Zona con presencia de cobertura vegetal Zona sin presencia de cobertura vegetal
Figura 55. Secciones transversales

9.1.2 Validación de modelos digitales de elevación generados con InSAR

Con el objeto de comprobar la calidad de los modelos digitales de elevación generados y determinar el porcentaje de error de los mismos, se hace un proceso de validación con un MDE de referencia que para el caso específico corresponde al MDE generado del Proyecto Cartografía de Antioquia (IGAC, 2010), con una resolución geométrica de 10 m

x 10 m (Figura 57) y puntos de control medidos en campo con estación total en distintos puntos de la zona (Figura 58).

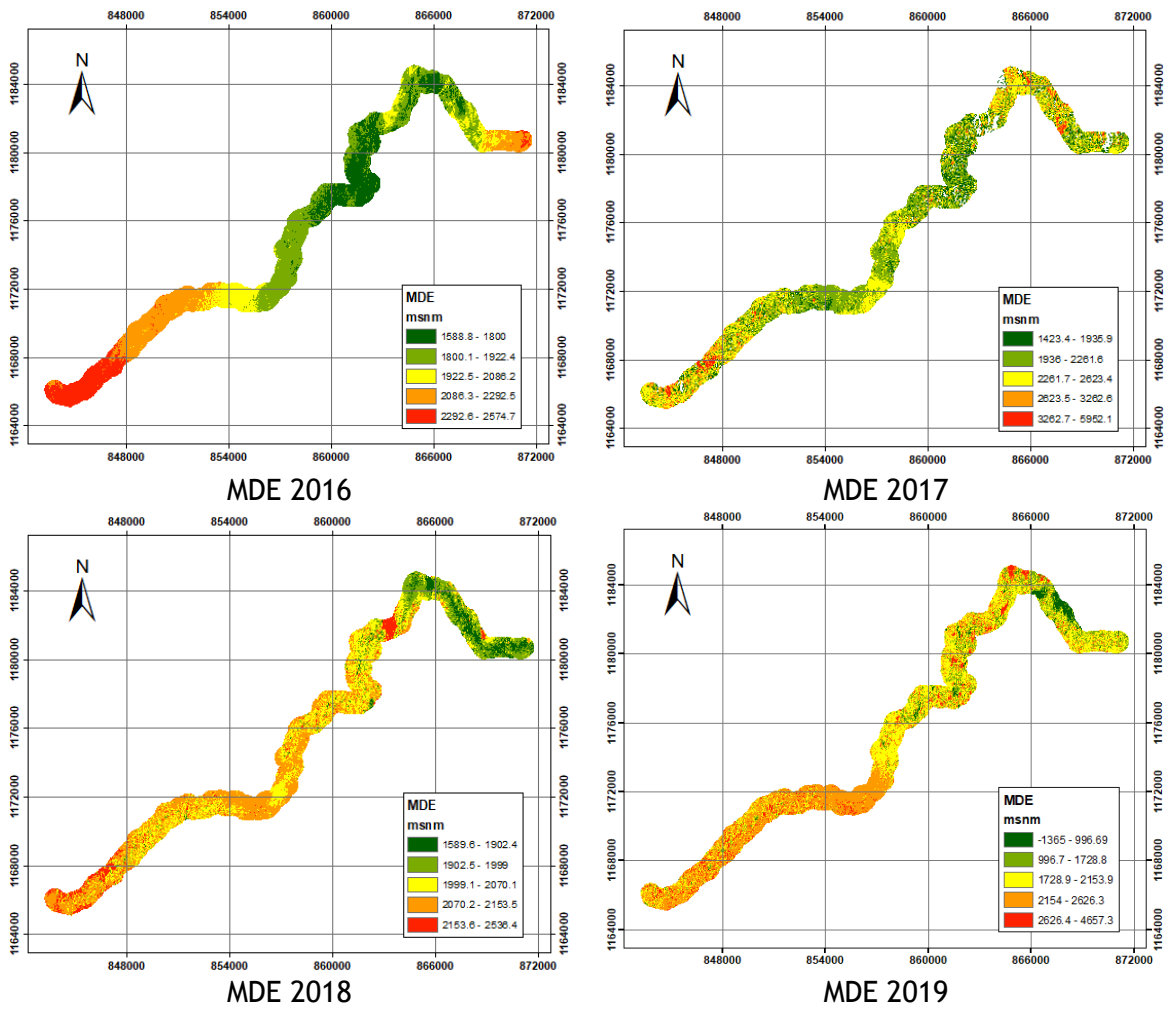


Figura 56. MDE franja de inundación río Negro

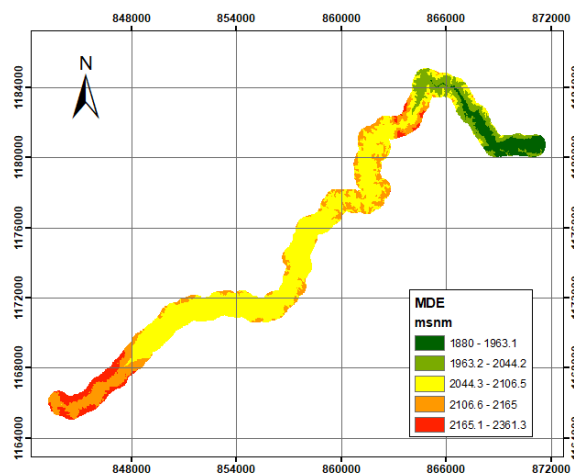


Figura 57. MDE CARTOANTIOQUIA

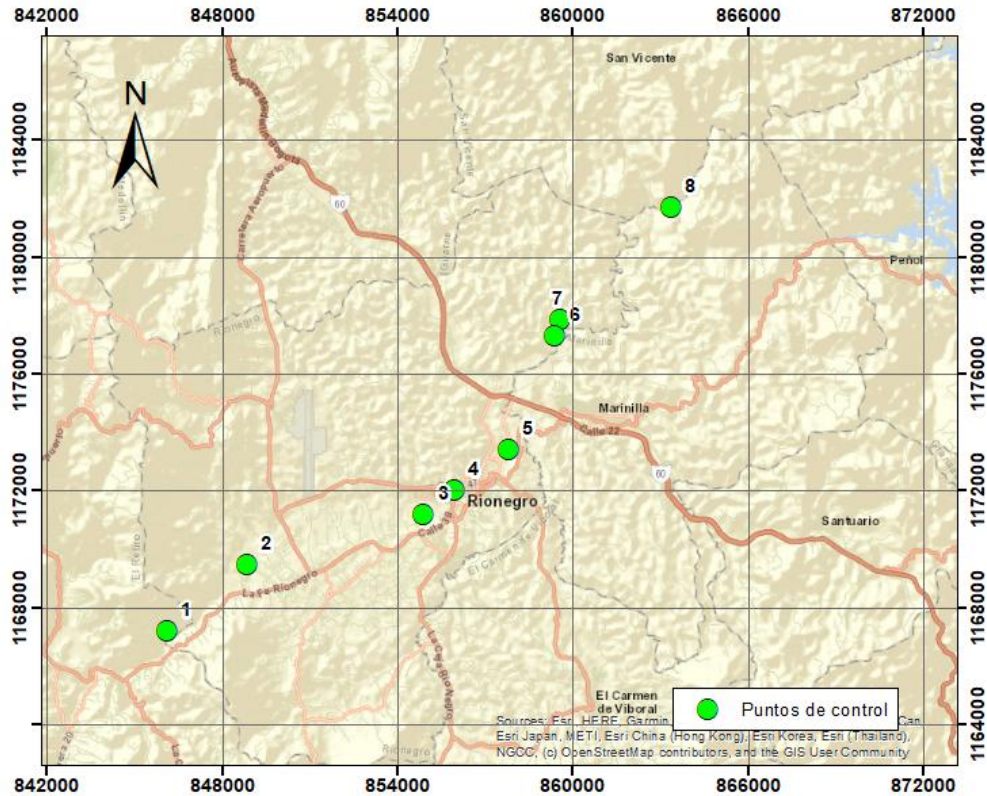


Figura 58. Puntos de control topográfico

Al estimar los parámetros estadísticos en cada uno de los MDE (Tabla 9), se observan variaciones importantes en los MDE del año 2017 y 2019, los cuales presentaron las mayores fluctuaciones con una amplia desviación estándar y cotas elevadas; por otro lado, se identifica que los MDE del año 2016 y 2018, presentan similitudes en sus valores máximos y mínimos, que están más cerca de los valores correspondientes del MDE de Cartoantioquía (IGAC, 2010).

Tabla 9. Parámetros estadísticos de los MDE (valores en metros)

MDE	Promedio	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
MDE 2016	1979.04	219.56	1588.77	2574.72
MDE 2017	2218.36	481.99	1423.4	5952.14
MDE 2018	2047.78	85.32	1589.61	2536.40
MDE 2019	2076.59	491.89	1502.30	3990.98
MDE CARTOANTIOQUIA	2080.36	65.30	1880.04	2361.28

En la Figura 59 se muestran los histogramas de los MDEs generados de las imágenes obtenidas del Sentinel 1 y MDE de Cartoantioquía, donde se evidencia unas diferencias

importantes entre las cotas del terreno. En el histograma de frecuencias del MDE de Cartoantioquía se encontró que se marca una tendencia y un pico hacia los 2120 metros, tendencias muy similares a los MDE generados de los años 2018 y 2019; por otro lado, los histogramas obtenidos de los MDE de los años de 2016 y 2017 muestran una tendencia similar con picos hacia los 1800 metros.

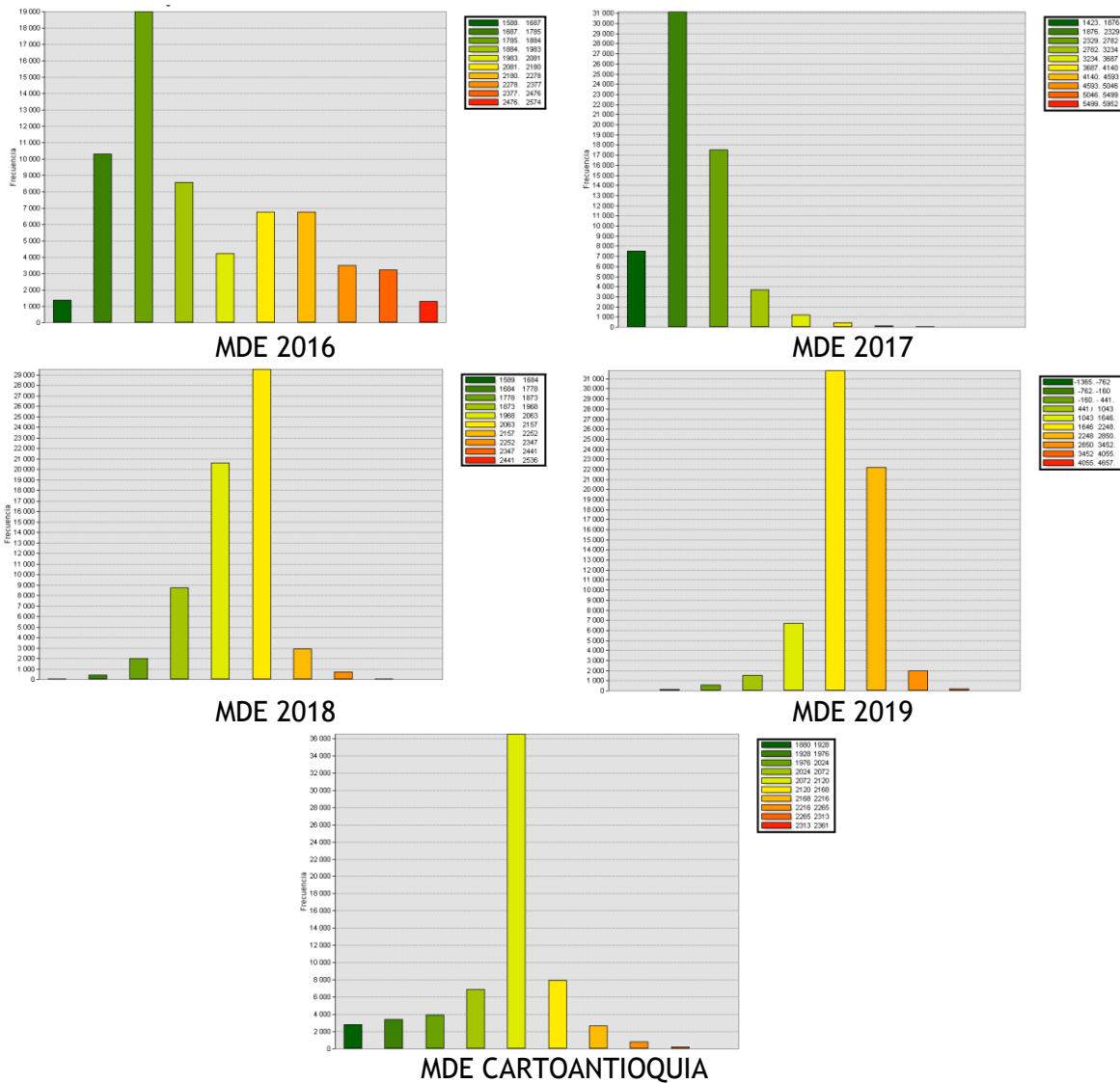


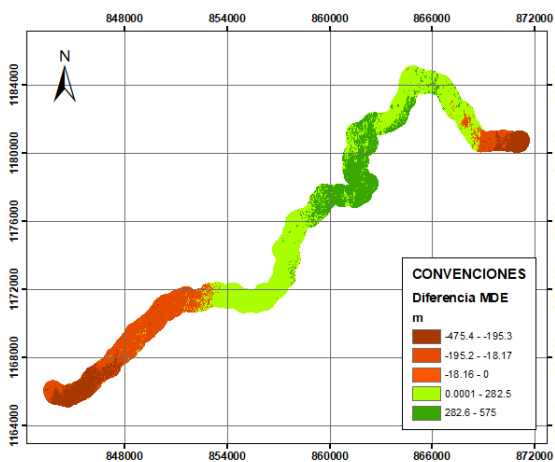
Figura 59. Histograma de frecuencias - MDE

Es de resaltar que estas grandes diferencias, están asociadas a las condiciones de la zona en el momento de la toma de datos y la topografía pueden influir en los resultados dado que se pudieron presentar distorsiones geométricas (sombras, inversión por relieve o layover, escorzo o foreshortening). Por lo anterior, se concluye que a pesar de que la resolución temporal es la mejor dentro de las posibilidades que ofrece Sentinel para esta

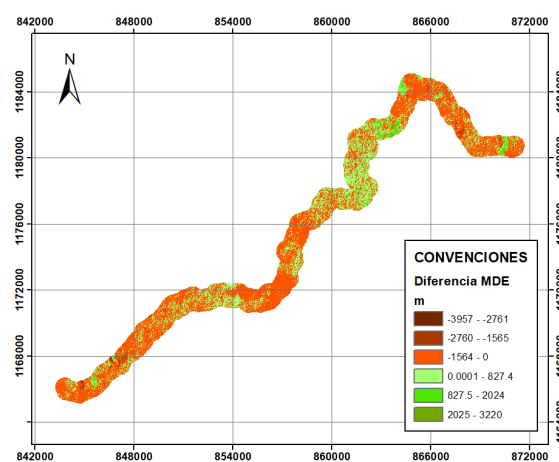
zona (12 días), en este lapso cualquier cambio en las condiciones del terreno, (cambios de los niveles de humedad en la superficie debido a condiciones climáticas), afectan los datos y por esto, los resultados finales. Estos aspectos se evidencian desde que se estima la coherencia del par interferométrico escogido donde más del 50% de la imagen tiene un valor de coherencia de menos de 0.29, derivando en un corregistro de imágenes con mucho ruido y unos resultados con valores atípicos.

En la Figura 60 se muestra las diferencias de alturas entre cada una de los MDE obtenidos de Sentinel y el MDE de referencia, donde se muestran diferencias negativas en el costado suroccidental y nororiental de la cuenca (zona de alta montaña) y diferencias positivas que varían entre 306 m y 1078 m en el altiplano de la cuenca de análisis; estas diferencias que se concentran en la parte central del tramo de cauce evaluado, las cuales se deben a las inconsistencias o errores obtenidos de la imágenes por efectos de sombras desde la ubicación del radar. Es de resaltar que el MDE que obtuvo menos diferencias respecto al MDE de referencia, es el MDE obtenido de la imagen Sentinel 1 del año 2018, la cual se asemeja mejor al MDE de referencia por los pocos cambios en cotas de terreno.

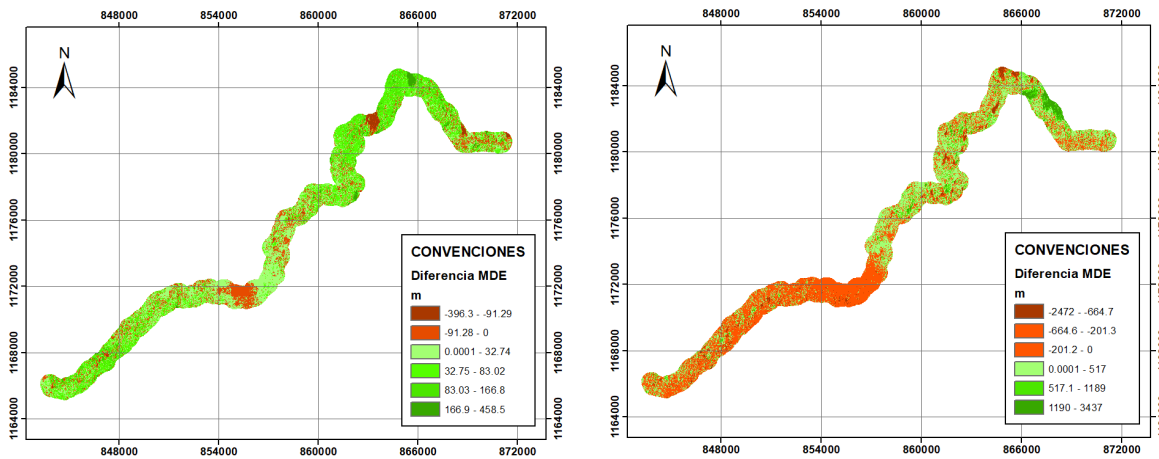
Adicionalmente, se calculó el RMSE (Root Mean Square), encontrándose que el MDE obtenido con las imágenes Sentinel de 2018 presenta el menor error cuadrático medio respecto a los otros modelos digitales de elevación, por lo que se concluye que es el mejor modelo que se acomoda o ajusta a la condición del terreno asociada a la franja de inundación del río Negro (Tabla 10).



Diferencia MDE Cartoantioquia - MDE 2016



Diferencia MDE Cartoantioquia - MDE 2017



Diferencia MDE Cartoantioquia - MDE 2018 Diferencia MDE Cartoantioquia - MDE 2019

Figura 60. Mapa de diferencias de altura MDE Cartoantioquia y MDEs Sentinel 1

Tabla 10. RMSE de las diferencias entre los MDEs

MDE	RMSE
MDE 2016	73.58
MDE 2017	160.18
MDE 2018	21.43
MDE 2019	149.30

Teniendo en cuenta lo anterior, se opta por seleccionar el MDE del año 2018, dado que corresponde al modelo que más se asemeja al MDE de referencia; y el cual servirá de insumo para hacer lo análisis hidráulicos y pronósticos de inundación en un cauce de estudio.

Por otro lado, se hizo un ejercicio de validación de cada uno de los modelos implementados con los puntos terrestres de control cuyas coordenadas y cotas fueron amarradas al sistema local de referencia (placas certificadas); las cotas de estos puntos de control fueron comparadas con las elevaciones del terreno obtenidas de cada uno de los MDE, obteniéndose que el MDE que presenta más similitud con las elevaciones de los puntos de control, corresponde al MDE del año 2018 el cual tiene errores menores al 6% al comparar las elevaciones de este con los puntos de control (Tabla 11).

Por otro lado, se pudo detectar que los puntos de control localizado en las zonas donde hay carencia de cobertura vegetal son los sitios donde los MDE obtenidos se aproximan más a los valores de elevación (Tabla 11).

Tabla 11. Comparación cotas elevación MDE versus puntos de control

No	Elevación Puntos de control	MDE 2019	Error (%)	MDE 2018	Error (%)	MDE 2017	Error (%)	MDE 2016	Error (%)	Características del tramo
1	2159.48	2159.3	0.01	2202.49	1.99	2159.35	0.01	2367.59	9.64	Zona rural con meandros
2	2099.18	2999.78	42.90	2004.27	4.52	3664.85	74.58	2154.97	2.66	Zona rural meandros
3	2088.66	2385.96	14.23	2082.04	0.32	2144.81	2.69	1962.51	6.04	Zona urbana
4	2097.3	2424.28	15.59	2096.89	0.02	2136.95	1.89	1911.61	8.85	
5	2075.65	1897.56	8.58	2060.91	0.71	1189.96	42.67	1821.78	12.23	
6	2078.85	1729.05	16.83	2053.94	1.20	1967.62	5.35	1814.05	12.74	Zona rural meandros
7	2091.42	1892.54	9.51	2094.19	0.13	2063.25	1.35	1789.35	14.44	
8	2115.7	2645.97	25.06	2234.03	5.59	1815.28	14.20	1986.36	6.11	

Adicionalmente, con el objeto de validar por sectores la calidad del MDE que mejor se ajustó, en la Figura 61 se muestran las secciones transversales por sectores, encontrándose que las secciones que mejor se ajusta se localizan en las zonas donde no hay cobertura vegetal, y donde las llanuras de inundación están conformadas por suelo desnudo, pasto o arbustos.

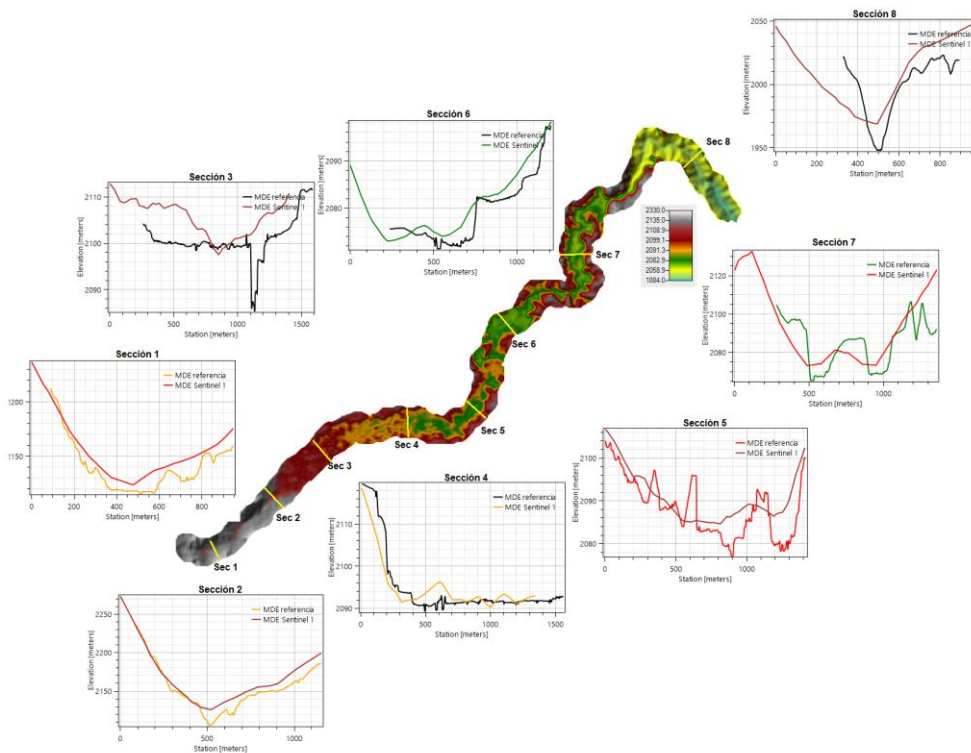


Figura 61. Comparación secciones transversales MDE 2018 versus MDE de referencia

9.2 Implementación del modelo hidráulico

9.2.1 Análisis hidrológico

Para implementar el modelo hidráulico del río Negro, es preciso contar con información hidrometeorológica que permita estimar los caudales que discurren a lo largo del cauce principal, insumo necesario para establecer las condiciones de borde del modelo. En la Tabla 12 se muestra la información hidrometeorológica recolectada.

Tabla 12. Información hidrometeorológica

Variable	Estación	Tipo	Periodo de tiempo	Operario	Coordenadas
Caudales máximos diarios	Puente Real	LG	01/01/1974 - 31/12/2018	IDEAM	855823.84E, 1171269N
Caudales máximos diarios	Charco Manso	LM	02/07/2000 - 30/09/2018	CORNARE	850194E, 1170705N
Caudales máximos diarios	Montenevado	LM	02/07/2000 - 30/09/2018	CORNARE	845187E, 1165989N

Con el objeto de estimar los caudales máximos en el tramo de modelación hidráulica del río Negro se utilizó la metodología de análisis de frecuencia a la serie de caudales máximos diarios de la estación Puente Real.

Dicha serie fue evaluada y validada empleando las pruebas de homogeneidad y tendencia, donde se valoró la calidad de la información y se realizaron los respectivos ajustes pertinentes para garantizar información adecuada para los análisis concernientes (Figura 62).

Para el cálculo de los caudales en los puntos pertinentes se escalan los caudales estimados desde la estación Puente Real hasta el sitio objeto de interés mediante el criterio de rendimiento hidrológico (Tabla 13).

$$\frac{Q_1}{A_1} = \frac{Q_2}{A_2} \quad (9)$$

Tabla 13. Rendimiento hidrológico del río Negro

Tr (años)	2.33	5	10	25	50	100
Rendimiento (m ³ /s/Km ²)	0.15	0.25	0.34	0.44	0.52	0.60

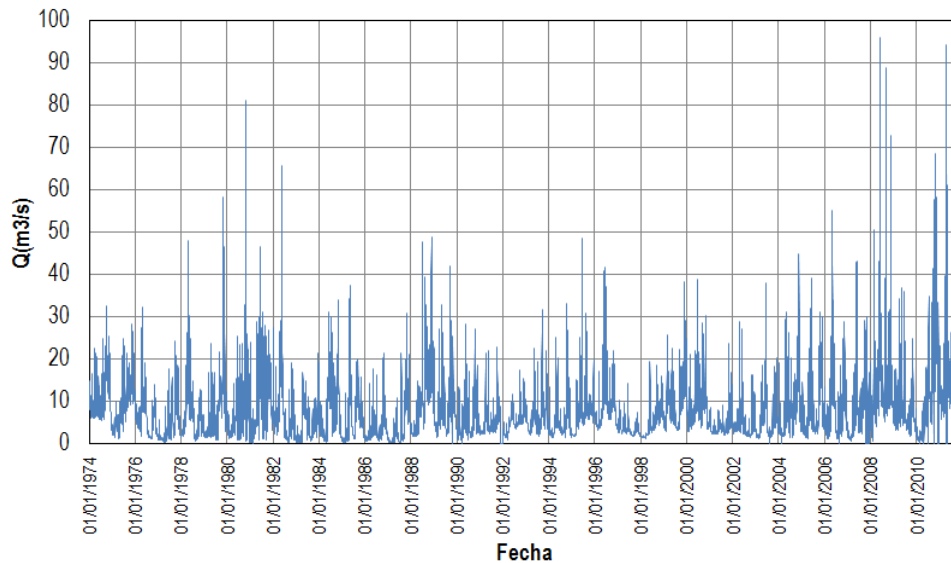


Figura 62. Serie de caudales máximos diarios ajustados - Estación Puente Real

9.2.2 Geometría del canal a modelar

Para la modelación hidráulica se hizo necesario tener la geometría del río Negro en una longitud tal que permitiera evaluar los perfiles de flujo y parámetros hidráulicos de interés.

La información topográfica fue obtenida a partir de las técnicas de interferometría de radar de apertura sintética (InSAR), se obtuvo un MDE de las llanuras de inundación del río Negro y del cauce del mismo, se trazó el alineamiento y las secciones transversales para establecer el modelo hidráulico del río Negro (Figura 63).

9.2.3 HEC-RAS - Modelación hidráulica

Una vez definidos los caudales y la geometría del cauce a modelar, el objeto del estudio hidráulico consiste en definir el comportamiento hidráulico del cauce en el tramo de interés, lo cual se determinará con base en los caudales definidos y las condiciones topográficas actuales, para así evaluar los cambios en el perfil del flujo para definir las zonas de inundación.

Para implementar el modelo hidráulico se emplea el software para flujo en canales HEC-RAS del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, el cual calcula el perfil de flujo con las ecuaciones de flujo uniforme utilizando el método estándar por pasos, se determinan

para diferentes escenarios hidráulicos los niveles y perfiles de velocidad en las diferentes secciones analizadas de la geometría del cauce de estudio.

El modelo HEC-RAS es bidimensional (River Analysis System) desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros Militares de los Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers-Hydrologic Engineering Center - HEC). El HEC-RAS 5.0.7 es la última versión, compuesta por cuatro grandes componentes de análisis: módulo de flujo permanente y no permanente, cálculos de transporte de sedimentos (fronteras móviles) y análisis de calidad del agua.

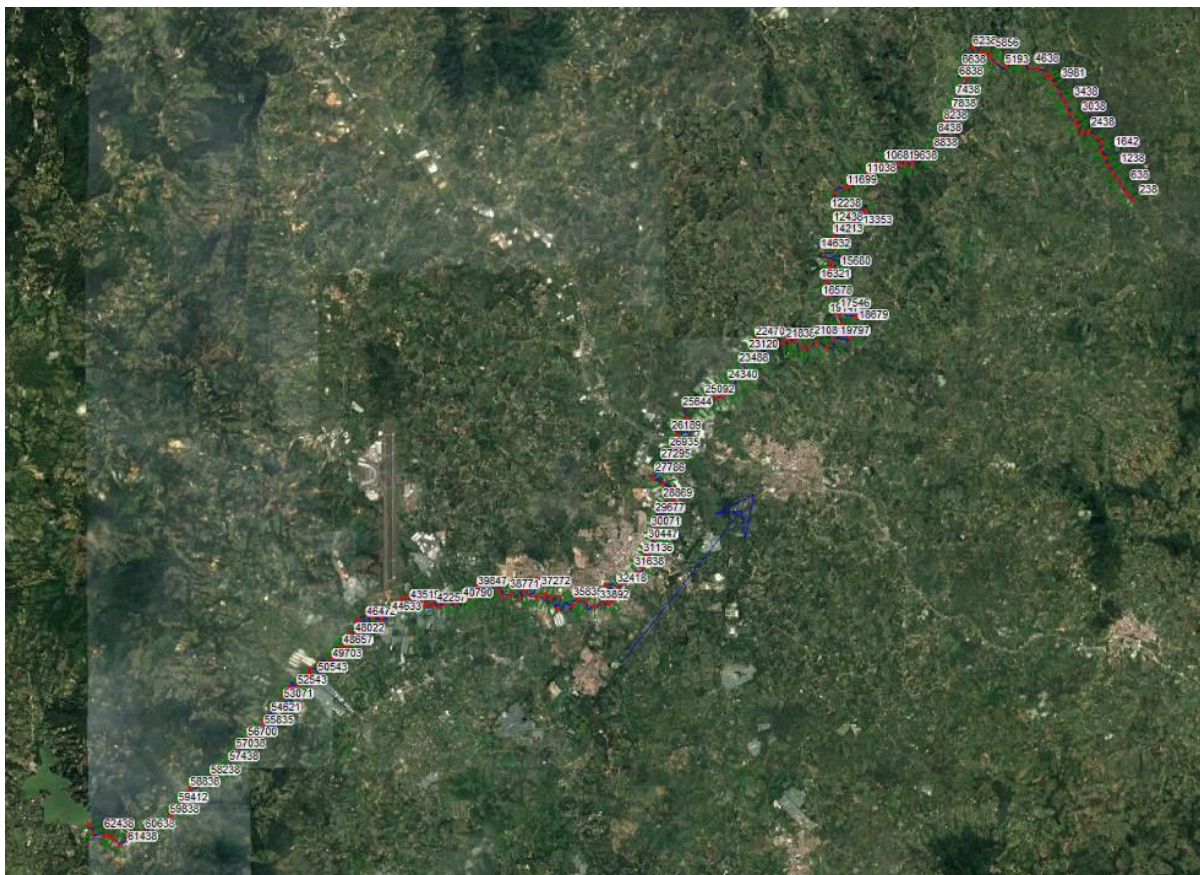


Figura 63. Alineamiento y secciones implementadas en el modelo hidráulico

El software fue diseñado por Gary W. Brunner cuya interfaz gráfica permite simular cálculos hidráulicos bidimensionales para redes hídricas, ya sea, natural o artificial, permitiendo la estimación de parámetros hidráulicos como los niveles de agua, velocidades de flujo, esfuerzos cortantes, entre otras variables para diferentes caudales de periodo de retorno; información que es relevante para determinar las zonas de inundación.

9.2.4 Condiciones iniciales y de frontera del modelo hidráulico

Para la implementación del modelo, se optó por hacer las simulaciones considerando flujo permanente y se evaluó bajo régimen subcrítico, donde se establecieron las siguientes condiciones de frontera:

- Serie de caudales y lámina de agua al inicio del tramo de modelación, en la abscisa K0+000 (Estación Montenevado)
- Lámina de agua al final del tramo de modelación, en la abscisa K33+709 (Estación Puente Autopista)
- Serie de caudales en los puntos de confluencia de los afluentes principales (Tabla 14 y Figura 64).

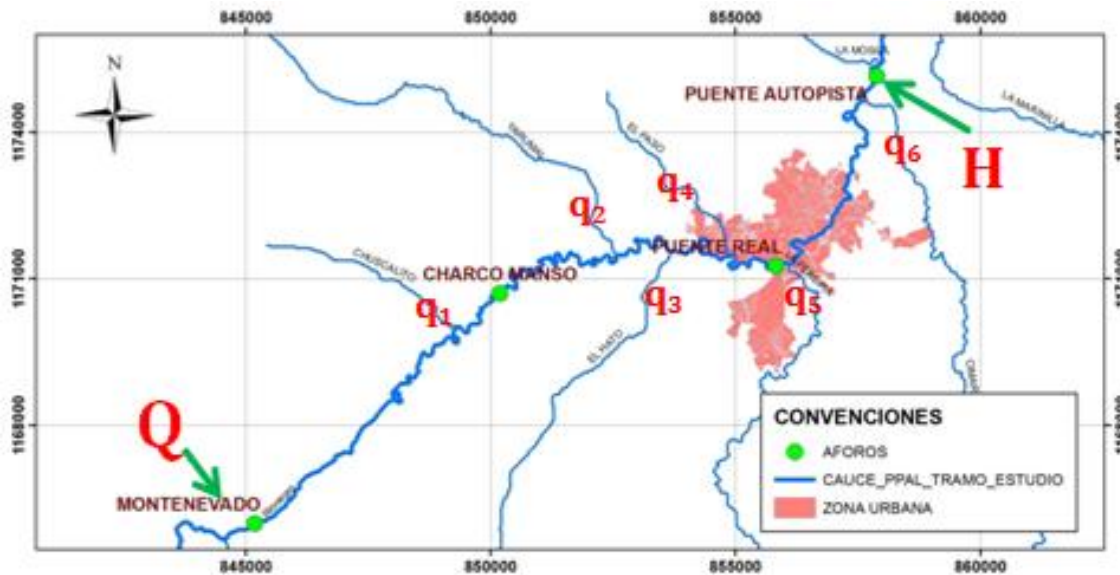


Figura 64. Tramo de simulación y caudales considerados en los principales afluentes del río Negro

Tabla 14. Caudales usados como condición inicial en el modelo

Sección	Abscisa (m)	Punto caudal	Área de drenaje (km ²)	Q (m ³ /s)
476.8	K0+000	Estación Montenevado	199	8.78
345	K10+442	Q. Chuscalito	231	11.02
276	K19+738	Q. La Yarumal	279	12.95
262	K22+115	Q. El Hato	293	13.67

Sección	Abscisa (m)	Punto caudal	Área de drenaje (km ²)	Q (m ³ /s)
223	K24+616	Q. El Paso	304	16
191	K27+114	Q. La Pereira	456	19.79
100	K33+030	Q. Cimarrona	521	22.61

9.2.5 Calibración del modelo hidráulico - Rugosidad de Manning

La rugosidad de Manning es el coeficiente más importante y sensible en la modelación hidráulica, razón por la que es necesario ajustar este parámetro en el tramo de modelación, con el objeto de garantizar que los niveles de flujo estimados en el modelo sean coherentes o consistentes con las condiciones reales del terreno.

El coeficiente de Manning es sensible ante los cambios de vegetación, materiales del lecho, materiales de los taludes que conforman el cauce, además de la existencia de obstrucciones o presencia de curvas e irregularidades en la sección hidráulica. Por lo anterior para calibrar el modelo hidráulico es necesario ajustar dicho parámetro en el tramo de modelación.

Con el objeto de cuantificar el coeficiente de rugosidad (n de Manning) para el río Negro, se realizaron varios ensayos numéricos suponiendo diferentes valores por subtramos (acorde a las características del cauce, vegetación aledaña, materiales del lecho y condiciones morfométricas); seleccionando los coeficientes de Manning que ajustaran los niveles de agua más próximos a los niveles medidos de las estaciones de caudal existentes y analizadas en el estudio. Los resultados de esta calibración se resumen en la Tabla 15.

Tabla 15. Calibración HEC-RAS

Abscisa	Tramo	Sitio	Q (m ³ /s)	Nivel medido (m)	Nivel modelo (m)	Error (%)	n
K0+000 - K4+639	Zona rural No meandros	Montenevado	8.78	1.19	1.19	0.00	0.038
K4+639 - K22+444	Zona rural Meandros	Charcomanso	11.02	2.24	2.23	0.45	0.037

Abscisa	Tramo	Sitio	Q (m ³ /s)	Nivel medido (m)	Nivel modelo (m)	Error (%)	n
K22+444 - K30+516	Zona urbana	Puente Real	16	1.71	1.70	0.58	0.062
K30+516 - K33+705	Zona rural Meandros	Puente Autopista	22.61	2.65	2.65	0.00	0.03

En función de los análisis anteriores, se estimó los valores de rugosidad de Manning por subtramos para el cauce del río Negro y se establece sobre las llanuras de inundación un valor de 0.045, valor seleccionado en función de la vegetación que predomina en la zona.

9.2.6 Validación del modelo hidráulico

Con los parámetros numéricos e hidráulicos ajustados en el modelo HEC-RAS, se procede a realizar una simulación considerando el escenario de inundación ocurrido el 20 de mayo de 2018, del cual se cuenta con información del caudal registrado por la estación Puente Real y la mancha o llanura de inundación obtenida a partir de imágenes de radar (Sentinel 1).

En la Figura 65 se muestra la hidrógrafa del 20 de mayo de 2019 registrada por la estación Puente Real, información que sirve como condición inicial en el tramo de análisis y para la condición de salida se utilizaron los niveles de flujo registrados al final del tramo.

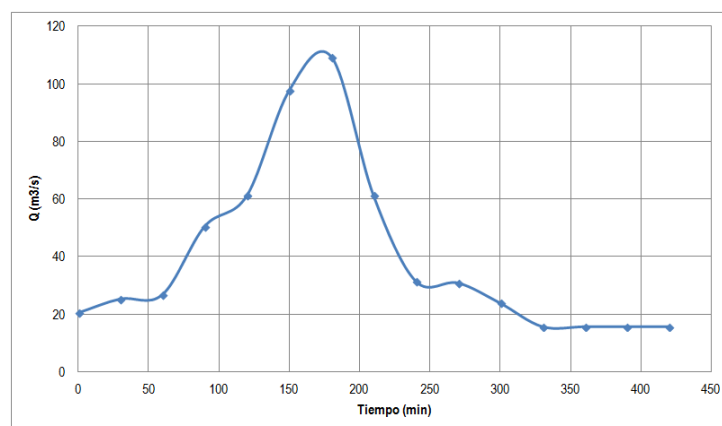


Figura 65. Hidrógrafa registrada en el evento máximo registrado el 20 de mayo de 2018

En la Figura 66 se muestra la mancha de inundación obtenida después del proceso de simulación hidráulica del evento ocurrido el 20 de mayo de 2018, donde se puede evidenciar que en algunas zonas o sectores del río se observa que las manchas de inundación presentan cierta similitud como es el caso de la zona urbana del municipio de Rionegro y el tramo ubicado aguas arriba de la zona urbana; a diferencia de la mancha de inundación obtenida aguas abajo de la zona urbana, la cual muestra grandes diferencias respecto a la obtenida en día del evento (Figura 67).

Según Múnera (2013), el río Negro está sectorizado en cuatro subtramos de acuerdo a su condición morfométrica y geomorfológica (Figura 68):

- Zona rural sin meandros: Comprendido desde el embalse de la Fé hasta la zona donde el cauce empieza a evidenciar meandros (K62+438 - K56+550), el tramo se caracteriza por presentar un cauce encañonado, con una pendiente medio alta de 0.26%, con una sección tipo “U”, con un ancho que varía entre 10 m a 15 m, altura de bancas de 2.0 m a 2.5 m, no se evidencia presencia de llanuras de inundación dado que el cauce se encuentra limitado por amplios taludes y cobertura vegetal compuesta por arbustos y árboles de bajo a mediano tamaño (Figura 69).

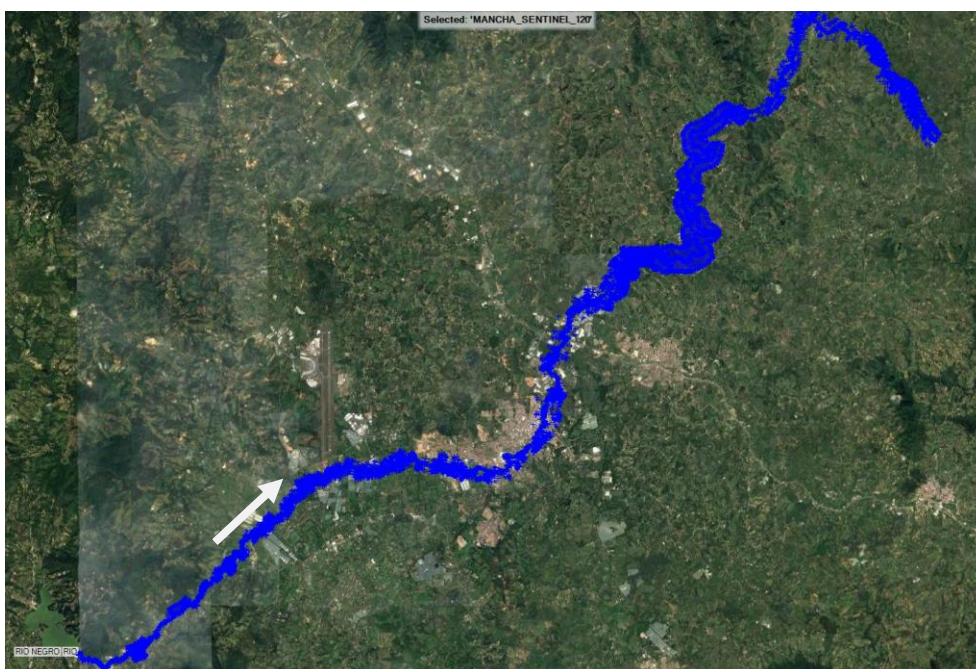


Figura 66. Mancha de inundación obtenida de la modelación hidráulica - Validación modelo

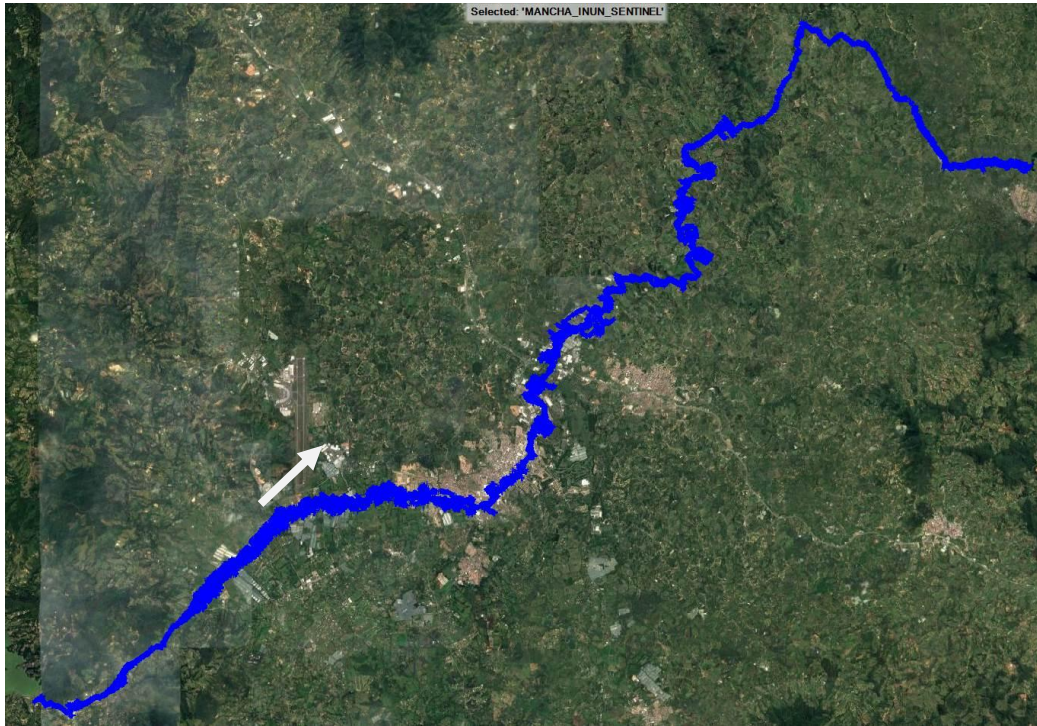


Figura 67. Mancha de inundación obtenida del procesamiento de imágenes de radar - Evento ocurrido el 20 de mayo de 2018

- Zona rural con meandros: Comprendido desde el sitio donde el río empieza a evidencia presencia de meandros hasta la entrada de la zona urbana del municipio de Rionegro(K56+550 - K39+004); en este tramo el cauce presenta un cambio considerable de la pendiente del lecho con un promedio de 0.10%; la geometría del cauce es con forma de “V” con un ancho que varía de 10 m a 15 m, altura de bancas de 2.5 m a 3.0 m; las márgenes tienden a estar desprotegidas con alguna presencia de pastos y arbustos, evidenciándose proceso de erosión y socavación de orillas; adicionalmente, se evidencia amplias llanuras de inundación que varían entre 500 m y 700 m (medidas desde orilla) (Figura 70).

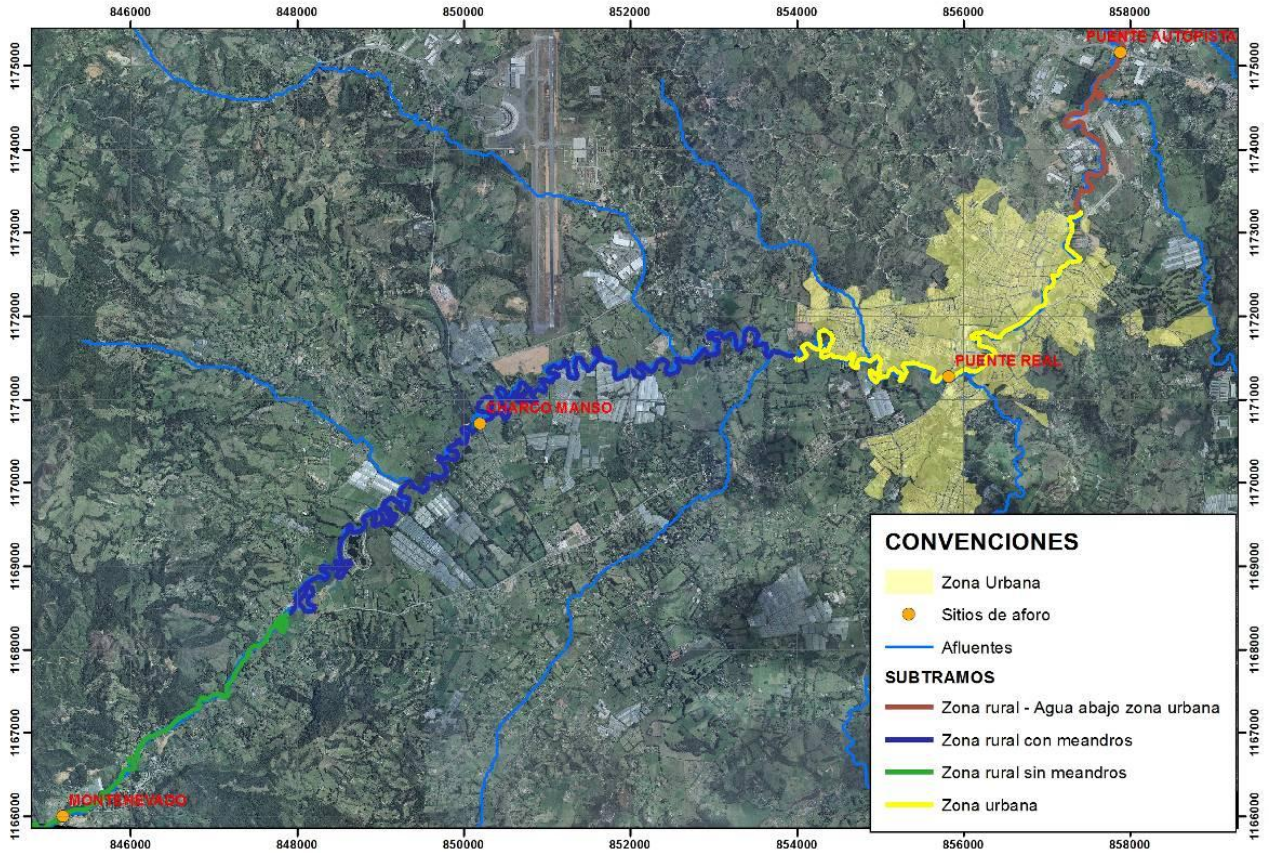


Figura 68. Subtramos río Negro
Fuente: Múnera (2013)



Figura 69. Conformación del cauce -Subtramo zona rural sin meandros



Figura 70. Conformación del cauce -Subtramo zona rural con meandros

- **Zona urbana:** Comprendido desde el inicio de la zona urbana hasta el final de la misma (K39+004 - K27+101), el tramo se caracteriza por presentar un cauce con intervenciones y adecuaciones tanto en el cauce principal como en las llanuras de inundaciones, para efectos de adecuar la zona y el desarrollo del urbanismo; el cauce en este tramo presenta una pendiente baja de 0.10%, con presencia de meandros y zonas rectificadas, la sección hidráulica del cauce presenta en general una forma trapezoidal con un ancho promedio de 20 m y altura de bancas de 3.0 m; en algunas zonas se evidencia presencia de llanuras de inundación, las cuales no fueron objeto de urbanismo para garantizar la amortiguación de crecientes en eventos extremos (Figura 71).
- **Zona rural - Aguas abajo zona urbana:** Comprendido desde el final de la zona urbana hasta la cola del embalse de Guatapé (K27+101- K0+000), el tramo se caracteriza por presentar un alineamiento algo sinuoso, pero sin presencia de meandros, con un canal encañonado, con una sección tipo cajón con un ancho que varía entre 20 a 25 m, y una altura de bancas de 1.5 a 3 m, una pendiente promedio de 0.15%, las márgenes se conforman por árboles y arbustos y se evidencia poca presencia de llanuras de inundación, donde es notorio que el canal presenta mayor eficiencia para evacuar los caudales de creciente (Figura 72).



Figura 71. Conformación del cauce -Subtramo zona urbana



Figura 72. Conformación del cauce -Subtramo zona rural - Aguas abajo de la zona urbana

Con el propósito de evaluar la calidad de los resultados del modelo hidráulico implementado del escenario de inundación ocurrido el 20 de mayo de 2019, se utilizó un indicador estadístico que permitiera medir dicha calidad. Para el análisis en mención, que permitiera estimar las variaciones de los parámetros del modelo computacional, se utilizó como criterio de calidad el parámetro estadístico RMS (root mean square o desviación cuadrática media) de los residuos, definido como:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{Calculadoi} - X_{Medidoi})^2}{N}} \quad (10)$$

Donde N es el número de datos.

Es importante mencionar que cuando el RMS es cero 0, significa que lo calculado es “idéntico” a lo modelado y un valor diferente de cero, representa la medida de la desviación cuadrática media referida a la diferencia de los valores calculados y medidos.

En la Figura 73 se muestra la representación o tendencia de los anchos de las llanuras de inundación obtenidos del ejercicio de validación hidráulico y los anchos estimados del evento de inundación obtenido de las imágenes de radar, donde se evidencia que los resultados del modelo implementado tiende a tener cierta similitud en los tramos del río donde existe presencia de zona urbana, presencia de meandros y llanuras de inundación amplias; tramos que se caracterizan por presentar poca cobertura vegetal, baja pendiente del cauce, y conformación geomorfológica de una cauce ancho; obteniéndose para estos tramos un RMS de 54 y 48, errores cuadrático bajo en comparación con los otros tramos, donde el RMS es superior a 100 (Tabla 16).

Tabla 16. RMS tramos de modelación

Subtramo	Abscisa	RMS
Zona rural sin meandros	K62+438 - K56+550	118.65
Zona rural sin meandros	K56+550 - K39+004	54
Zona urbana	K39+004 - K27+101	48
Zona rural aguas abajo zona urbana	K27+101 - K0+000	320.99
Tramo completo	K62+438 - K0+000	233.6

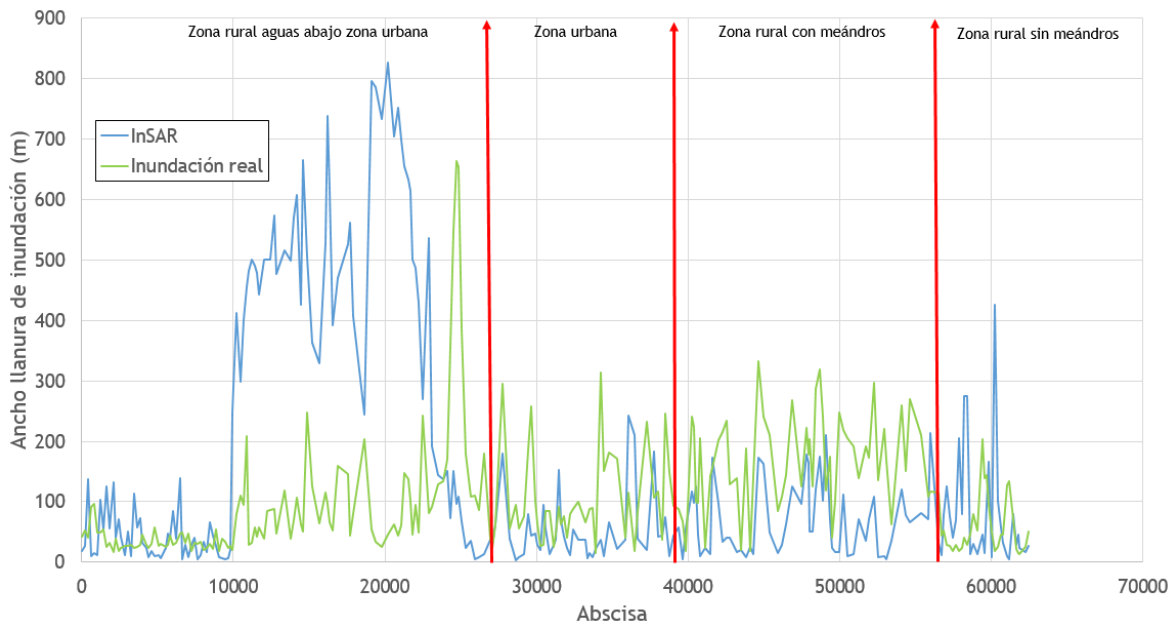


Figura 73. Anchos de las llanuras de inundación del río Negro - Modelación hidráulica vs inundación real

De acuerdo a la clasificación por subtramos realizada por Múnera (2013) y los resultados obtenidos del ejercicio de validación, se concluye que el modelo hidráulico implementado utilizando información topográfica generada con imagen de Sentinel 1 usando la interferometría SAR, tiene resultados en ciertos tramos o sectores que concuerdan con lo que se apreció de las imágenes de radar del evento de inundación ocurrido el 20 de mayo de 2018, lo que se puede considerar una validación del modelo para este episodio de inundación; resaltando que en los sectores o zonas donde no hubo concordancia se debe a que la topografía obtenida no concuerda con la realidad del territorio, debido a presencia de una amplia cobertura vegetal donde la longitud de onda no es capaz de penetrarla obviando detalles del terreno e información relevante para la implementación del modelo hidráulico.

9.2.7 Simulación de un evento de inundación de creciente asociado al período de retorno de los 100 años

Una vez calibrado y validado el modelo hidráulico, se procedió a realizar la simulación de un evento de inundación asociado al periodo de retorno de los 100 años, se obtuvieron los siguientes resultados:

-
- En la Figura 74 se muestra la mancha de inundación en planta asociada a la creciente de periodo de retorno de los 100 años, donde se evidencia que el río Negro en los tramos donde el modelo presentó la validación adecuada, presenta extensiones de inundación de 400 m en el tramo de la zona rural con meandros y 250 m en promedio en la zona urbana; tal situación evidencia que la población asentada cerca del río Negro en la zona urbana tiene una alta vulnerabilidad a presentar situación del riesgo por inundación en caso de que el río presente una creciente de tal magnitud (Figura 75).

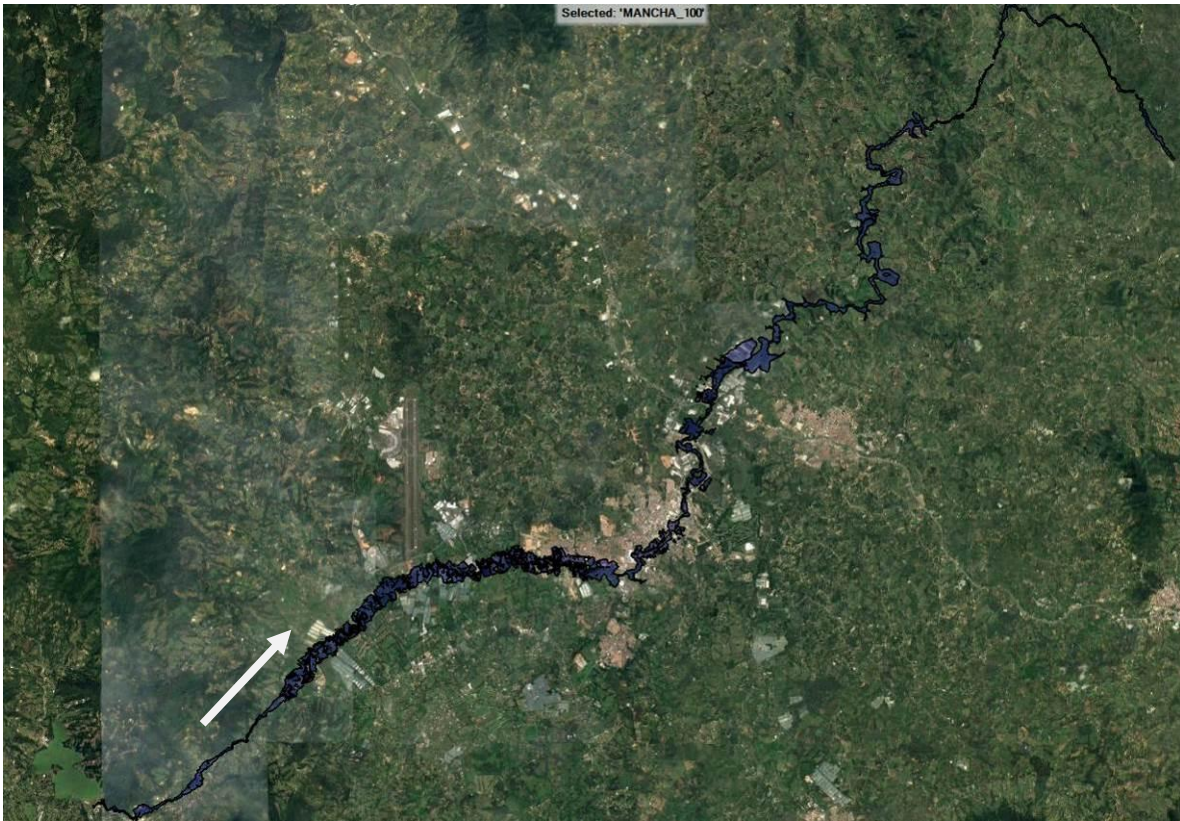


Figura 74. Mancha de inundación $Tr=100$ años

- En la Figura 76 se muestra el nivel del agua, a lo largo del tramo (62.5 km) para el caudal simulado. En general, y para todo el tramo de simulación, los niveles de la superficie libre son en promedio de 2.70 m con una velocidad promedio de 1.50 m/s; valores que son coherentes con las condiciones geomorfológicas que se evidencian en el cauce del río Negro, que por presentar baja pendiente tiende a desarrollar bajas velocidades ante escenarios de crecientes, con láminas de agua del orden de 2 a 3 m por encima del lecho.

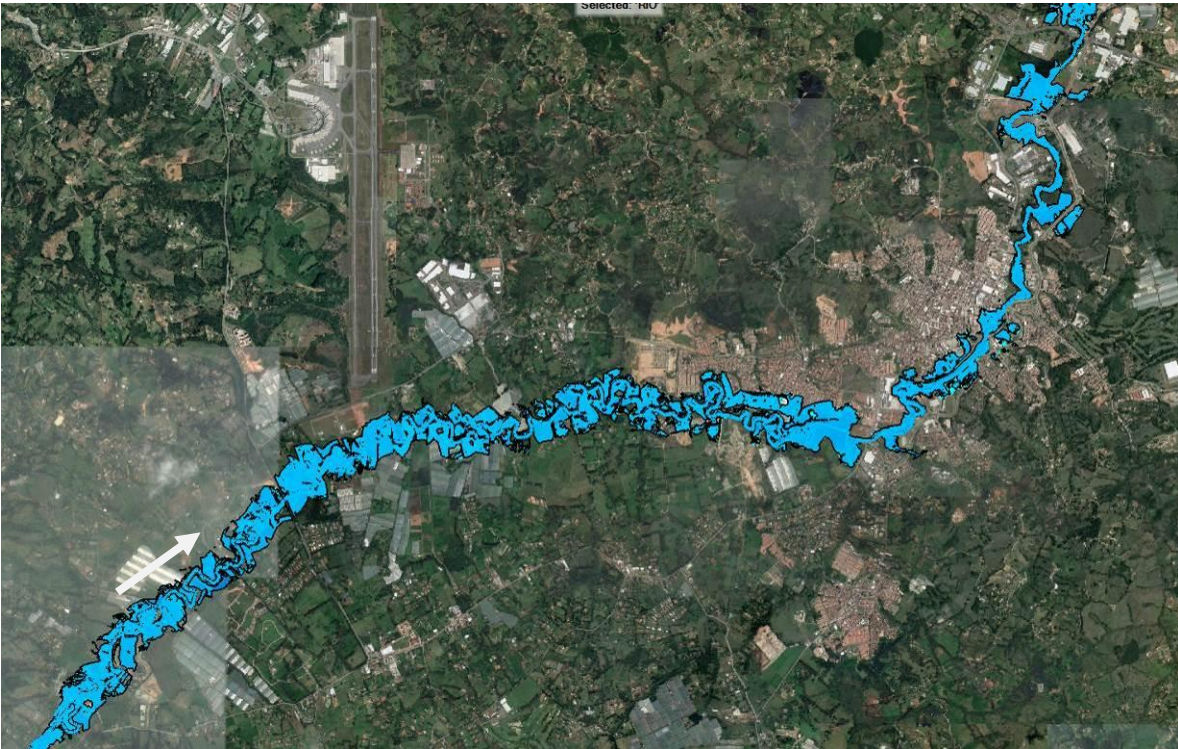


Figura 75. Detalle de inundación del río Negro en el tramo de zona rural con meandros y zona urbana del municipio de Rionegro

- En el perfil hidráulico se evidencia algunas irregularidades en el fondo del cauce, el cual está asociado a la falta de detalle o falta de información topográfica que no fue posible ser identificadas con las técnicas de interferometría de radar; sin embargo, esta falta de información en el modelo implementado para los escenarios de creciente representa un 8.5% en los niveles o láminas de creciente, es decir, se incurre en un error del 8.5% de los valores de lámina de agua estimados en el modelo por la falta de detalles topográfico del cauce.
- En la Figura 77 se presentan las secciones transversales del río Negro en los tramos donde el modelo representa de forma adecuada la condición real del cauce del río Negro, donde se evidencia la forma o conformación geomorfológica del cauce del río Negro y las llanuras de inundación; información que fue capturada por el radar Sentinel 1, cuyo procesamiento se realizó empleando interferometría SAR. Adicionalmente, en las secciones transversales se identifican las láminas de agua y zonas de inundación del río.

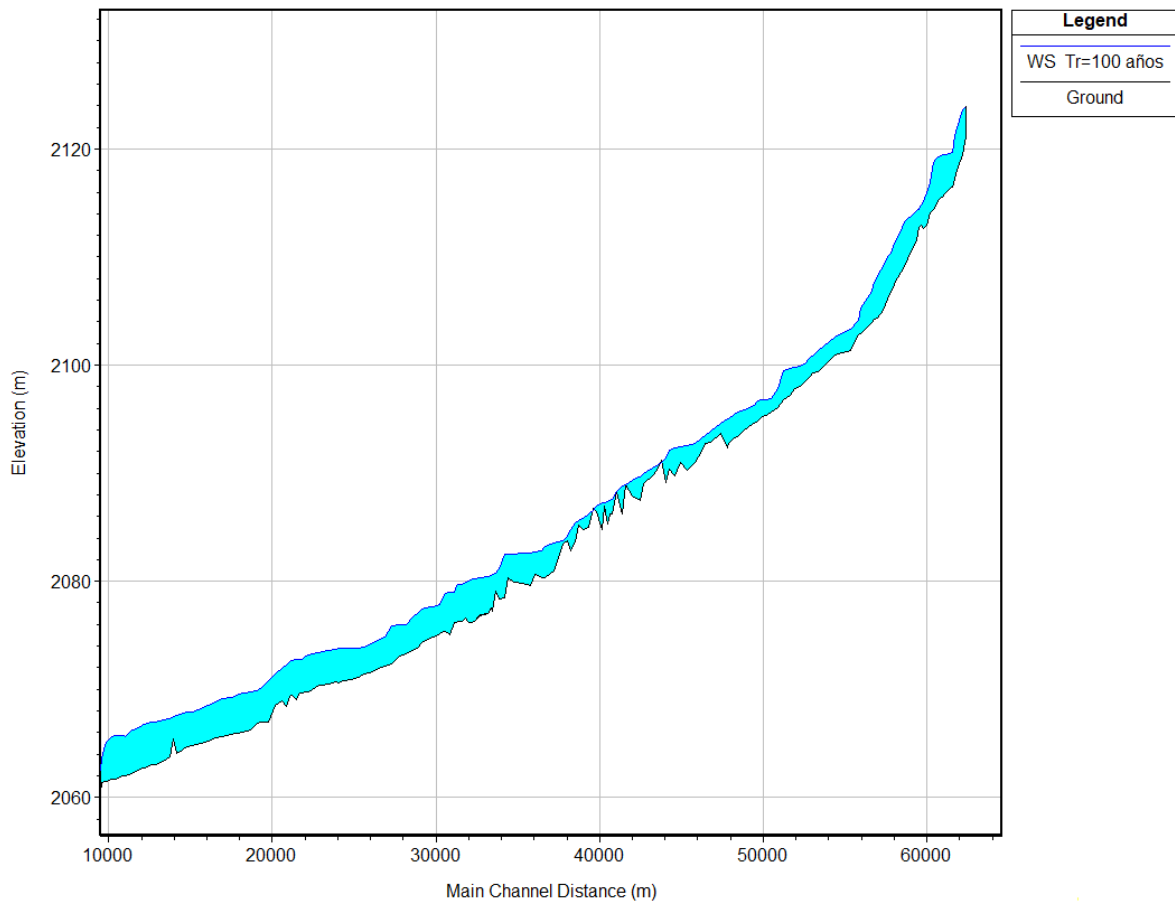
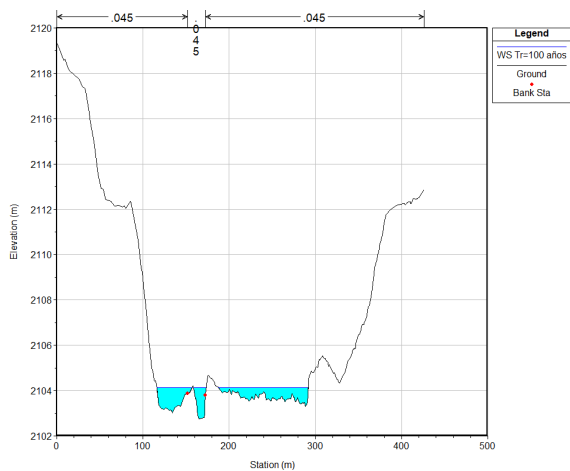
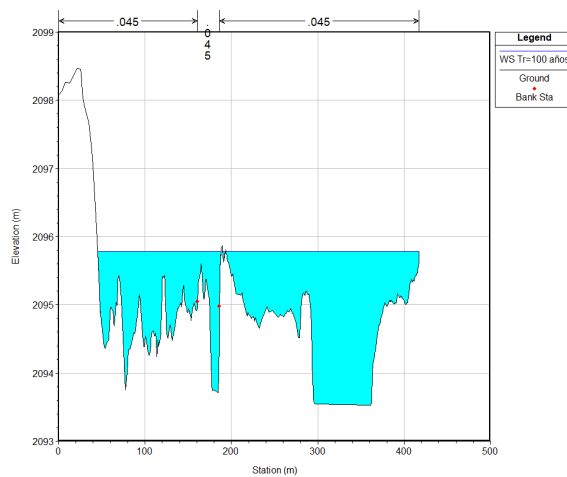


Figura 76. Perfil hidráulico del río Negro - Tr=100 años



K55+835



K48+657

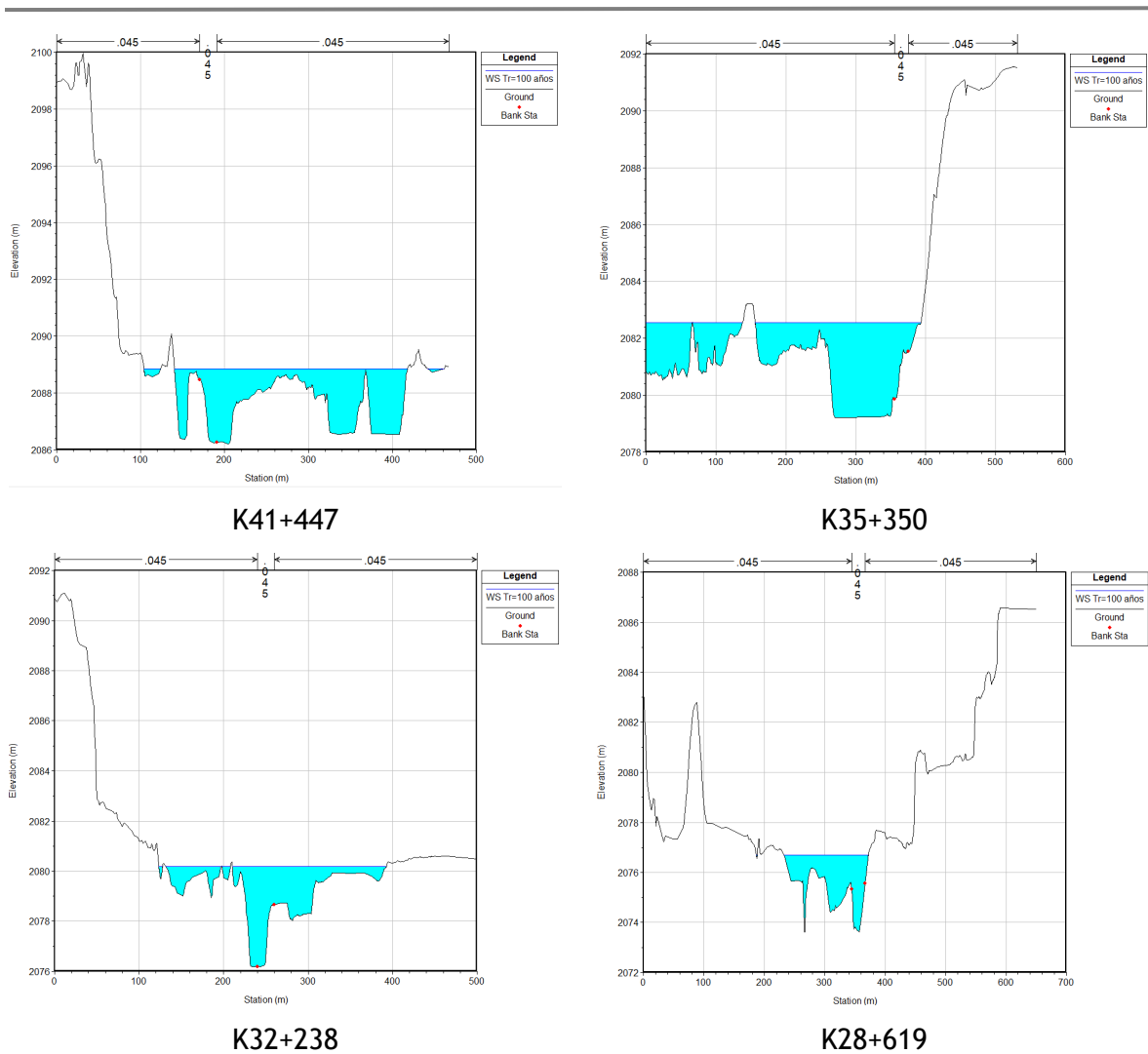


Figura 77. Secciones transversales del cauce del río Negro

10 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El trabajo o análisis de realizados tienen como principal objetivo explorar el potencial y las limitaciones de los datos topográficos o modelos digitales de elevación de libre acceso obtenidos a partir de técnicas de interferometría de radar utilizando imágenes de Sentinel 1, información que sirvió de insumo para la implementación de un modelo hidráulico de inundaciones.

Es de anotar que tanto los datos de entrada del modelo como otros aspectos del modelo (grado de incertidumbre, objetivo de la modelación) están profundamente entrelazados entre sí, situación que debe ser previamente analizada, con el objeto de identificar posibles problemas de los datos ingresados en el modelo y entender los resultados

obtenidos en el modelo hidráulico. Por ejemplo, la resolución del DEM podría ser un problema menor que afecta los resultados del modelo en comparación con su precisión vertical. Otras fuentes de incertidumbres consideradas importantes en la modelación hidráulica son las incertidumbres topográficas las cuales afectarían el rendimiento general del modelo. Por otra parte, es importante resaltar que los resultados del modelo basados en un modelo simple y datos a escala poco detallada pueden arrojar mejores resultados que los modelos más complejos y con datos más precisos, dado que lo principal en la modelación hidráulica es la correcta elección de los datos de entrada y las herramientas y criterios de modelación empleados.

Las nuevas fuentes de datos son cada vez más importantes para implementar los estudios de inundaciones en áreas con escasez de información. Al mismo tiempo, se están desarrollando nuevas tecnologías en teledetección a un ritmo acelerado, mejorando cada vez más la precisión, resolución y frecuencia de las imágenes satelitales, los cuales son más fáciles de adquirir y procesar, dado los avances científicos que se han venido implementando en los últimos años. Es por eso que resulta bastante atractivo emplear los datos obtenidos de las imágenes de radar de Sentinel 1, ya que, por tener una amplia cobertura global, una buena resolución, buena frecuencia y libre adquisición facilita el desarrollo de herramientas que puedan ser implementadas para modelaciones de tipo hidráulico.

Según los estudios realizados por (Yan K., 2015) los DEM de cobertura global con baja precisión vertical (SRTM, ASTER GDEM, ACE2 GDEM, GTOPO30 y TanDEM-X) generalmente no son útiles para estudios de inundación, ya que se requieren estimaciones precisas en los niveles de la lámina de agua. Sin embargo, como el DEM obtenido por InSAR a partir de imágenes Sentinel 1 tiene una resolución de 14 m, en el presente trabajo se logró demostrar que este DEM puede ser tan preciso en las zonas donde no existe cobertura vegetal, obteniéndose diferencias de nivel en la lámina de agua de 2.5 m en la vertical; lo que muestra que el uso de estas imágenes y las técnicas InSAR a gran escala para cauces de baja pendiente y amplias llanuras de inundación puede ser prometedor para el desarrollo de modelaciones hidráulicas en sitios de escasa información topográfica.

En el desarrollo de este trabajo se encontró además que el DEM obtenido debe ser ajustado para eliminar o corregir características indeseables como huecos, colinas artificiales y cobertura vegetal, para obtener un modelo digital del terreno adecuado y tener mayor precisión en las alturas topográficas del terreno; lo anterior se concluye por

los resultados poco precisos obtenidos del modelo hidráulico implementado en el presente trabajo, donde no se obtuvieron buenos resultados en las zonas donde el DEM presentaba presencia de cobertura vegetal.

Es necesario precisar que para el caso de las imágenes de LiDAR, las técnicas para el procesamiento de estas imágenes están muy avanzadas y conducen a un DTM de terreno desnudo muy preciso; sin embargo, en el caso de estudio, por ejemplo, los procedimientos de eliminación de vegetación han sido poco estudiados e implementados, y dicho trabajo puede ser objeto de investigación, para poder garantizar un DTM con mayor precisión.

A pesar de las limitaciones señaladas anteriormente, la resolución de los datos topográficos suele ser menos significativa que la precisión en la vertical para proporcionar resultados confiables en la modelación hidráulica a gran escala, donde se debe garantizar siempre que la resolución del DEM no sea demasiado gruesa (mayor que el ancho promedio del cauce de estudio) para capturar el canal principal del río.

La incertidumbre introducida por los datos topográficos puede ser tan significativa como las otras fuentes de errores en los estudios de inundaciones fluviales, como por ejemplo los coeficientes de rugosidad, información hidrológica, entre otras. Lo anterior, es importante estudiarlo más a fondo, ya que esta incertidumbre topográfica podría ser compensada por otras fuentes de incertidumbres relacionadas con las condiciones de borde del modelo hidráulico, donde es necesario precisar más acerca de estas variaciones.

Es importante resaltar que de los resultados de modelación obtenidos en los tramos donde no existía influencia de cobertura vegetal, las extensiones de la lámina de inundación presentaron un patrón de inundación muy similar al patrón de inundación identificado en un evento de inundación conocido, donde las extensiones o zonas de inundación obtenidas del modelo se aproximaron en un 8%, razón por la que se concluye que el modelo implementado permite describir de forma adecuada la onda de propagación de inundación del río Negro en un escenario de inundación. Resaltando que el modelo implementado carece de detalles y de información de la forma del lecho o fondo del cauce; pero gracias a la escala de modelación y la magnitud de la inundación, donde la onda de propagación presenta mayor influencia en las llanuras de inundación y

no en el cauce como tal, los resultados obtenidos son coherentes con las condiciones reales de inundación que presentan el río Negro en los tramos evaluados.

11 CONCLUSIONES

Acorde a los análisis realizados y resultados obtenidos en el trabajo realizado con relación al evento de inundación sobre el cauce del río Negro (municipio de Rionegro - Antioquia), se tienen las siguientes conclusiones:

- A partir de las imágenes Sentinel 1 se puede obtener o adquirir información de libre acceso, la cual tiene un alto potencial, ya que a partir de técnicas de interferometría de radar de apertura sintética se pueden obtener modelos de elevación del terreno con una precisión vertical razonable para implementar modelos hidráulicos de inundaciones en zona con escasas de información topográfica.
- Se ha realizado una evaluación de la capacidad de los datos de las imágenes de Sentinel 1 para generar un modelo digital de elevación en la franja de inundación del río objeto de estudio, empleando la técnica InSAR y se ha encontrado que el modelo de elevación obtenido sirve de insumo para implementar un modelo de simulación hidráulico para eventos de inundación, permitiendo predecir zonas de inundación aproximadas para condiciones del terreno de baja pendiente y poca presencia de cobertura vegetal.
- Se logró demostrar que el MDE generado puede ser tan preciso en las zonas donde no existe cobertura vegetal, obteniéndose diferencias de nivel en la lámina de agua de 2.5 m en la vertical; lo que muestra que el uso de estas imágenes y las técnicas InSAR a gran escala para cauces de baja pendiente y amplias llanuras de inundación puede ser prometedor para el desarrollo de modelaciones hidráulicas en sitios de escasa información topográfica.
- Se encontró que las extensiones de la lámina de inundación presentaron un patrón de inundación muy similar al patrón de inundación identificado en un evento de inundación conocido, con una aproximación del 8% en las zonas donde no existía influencia de cobertura vegetal.

-
- En el contexto de la zona de estudio, región que constantemente es expuesta a eventos de inundación, los resultados obtenidos en el presente trabajo, permiten concluir que para las condiciones topográficas y coberturas actuales de la zona, se puede hacer uso de las técnicas InSAR empleando las imágenes de Sentinel 1, para estimar MDE, implementar modelos hidráulicos y tener herramientas que permitan pronosticar a futuro posibles ocurrencias de inundación que se pueden presentar en la zona; de tal manera que se tenga información de alertas tempranas en caso de algún riesgo o amenaza por desbordamientos del río Negro.

En particular, el rendimiento de los modelos de inundación basados en datos InSAR puede ser similar al de los modelos basados en DEM de alta precisión y resolución, siempre y cuando se realice en un cauce de baja pendiente, con amplias llanuras de inundación y sin presencia de cobertura vegetal. Se resalta que su utilidad real podría verse afectada por varios factores, como la escala del río en estudio, el objetivo de la modelación, la frecuencia de la inundación, la disponibilidad de información en el canal, entre otras, así como la elección de las condiciones de modelación.

Los modelos hidráulicos basados en técnicas InSAR pueden alcanzar niveles razonables de precisión en términos de predicción de nivel de agua y extensión de inundación, sin embargo, estos todavía tienen una precisión mucho menor que los modelos basados en DEM de alta resolución y precisión.

Los resultados proporcionados por un modelo de inundación a gran escala que utiliza datos InSAR (con una precisión del nivel del agua de 2-2.5 m) permite generar mapas de inundación a gran escala como una medida no estructural zonificar las zonas que pueden ser susceptibles a presentar eventos de inundación de gran magnitud, para estimar las zonas con riesgo por inundación y tener la posibilidad de implementar medidas para este tipo de situaciones que acarrearán riesgo a la población y pérdidas económicas de gran magnitud.

Además de las conclusiones principales, a continuación, se enumeran varios hallazgos identificados en esta tesis:

- La resolución DEM es a menudo menos importante que su precisión vertical para el modelado hidráulico en estudios de inundación a gran escala, siempre que las características topográficas clave estén bien representadas.

-
- La predicción del perfil hidráulico de inundación de 100 años de periodo de retorno en el área de estudio del río Negro, utilizando el modelo HEC-RAS basado en datos de topografía InSAR, está dentro de la precisión que generalmente se asocia con los estudios de inundación a gran escala.
 - El rendimiento en la simulación de los niveles de agua para estudios de inundación a gran escala en áreas con escasez de datos de un modelo hidráulico construido y calibrado utilizando InSAR y altimetría de radar se considera razonable, pero generalmente no suficiente para estudios detallados de inundación.
 - Para el uso de las técnicas de InSAR empleando las imágenes Sentinel en la generación de modelos de elevación digital como insumo para implementar un modelo hidráulico para simulación de eventos de inundación debe evaluarse detalladamente para cada zona o región en particular los siguientes aspectos:
 - Evaluar el contenido o presencia de cobertura vegetal en las llanuras de inundación; si esta cobertura es menor del 60% de la zona de estudio, el grado de aproximación en los resultados de la simulación hidráulica son del 10% al 15%; razón por la que se descarta implementar dicha técnica en caso de que el porcentaje de cobertura vegetal sea superior al 60%.
 - Evaluar las pendientes del terreno asociado al cauce principal y llanuras de inundación, si las pendientes del terreno son menores del 10%, las aproximaciones en los resultados de la mancha de inundación son del 6% al 16% respecto a una inundación real; razón por la que se sugiere que si las pendientes del terreno son superiores al 10% no implementar la técnica.
 - Evaluar el ancho del cauce de estudio, si este presenta un ancho menor a 10 m no usar el modelo obtenido de la técnica InSAR.

12 BIBLIOGRAFÍA

Ackermann, F. (1994). Digital Elevation Models - Techniques and Application, Quality Standards, Development. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 421-432.

-
- Alsdorf, D., Dunne, T., Melack, J., Smith, L., & Hess, L. (2005). Diffusion modelling of recessional flow on central Amazonian floodplains. *Geophysical Research Letters*.
- Arbiol, R., Castillo, M., Franquesa, C., & Pala, V. (1995). Aplicación de la interferometría SAR a la geocorrección de imágenes del satélite ERS-1. *SELPER*, 23-28.
- Aronica, G., Bates, P., & Horritt, M. (2002). Assessing the uncertainty in distributed model predictions using observed binary pattern information within GLUE. *Hydrological Processes*, 2001-2016.
- Avtar, R., Yunus, P., Kraines, S., & Yamamuro, M. (2015). Evaluation of DEM generation based on Interferometric SAR using TanDEM-X data in Tokyo. *Physics and Chemistry of the Earth*, 166-177.
- Bamler, R., & Hartl, P. (1998). Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems*, 1-54.
- Bates, P. (2004). Remote sensing and flood inundation modelling. *Hydrological Processes*.
- Bellifemine, V., Bovenga, F., Candela, L., Nutricato, R., Pasquariello, G., & Refice, A. (2010). Identificazione di aree inondate da immagini SAR a media ed alta risoluzione. *Proc. XIV ASITA*, 211-216.
- Birkett, C. (2000). Synergetic remote sensing of lake chad; variability of basin Inundation. *Remote Sensing of Environment*, 218-236.
- Blanco, P., & Barreto, G. (2009). *La Interferometría Diferencial D-InSAR - Una técnica para el monitoreo de la subsidencia en Bogotá D.C. Instituto Cartográfico de Cataluña, Dirección de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá (DPAE) y Fondo para la Prevención (FOPAE)*. Bogotá.
- Brandimarte, L., Brath, A., Castellarin, A., & Baldassarre, G. (2009). Isla Hispaniola: A trans-boundary flood risk mitigation plan. *Physics and Chemistry of the Earth*.
- Brisco, B., Schmitt, A., Murnaghan, K., Kaya, S., & Roth, A. (2011). SAR polarimetric change detection for flooded vegetation. *Digit Earth*, 1-12.
- Brivio, P., Colombo, R., Maggi, R., & Tomasoni, R. (2002). Integration of remote sensing data and GIS for accurate mapping of flooded areas. *Int J Remote Sens*, 429-441.
- Bronstert, A., & Menzel, L. (2002). Advances in flood research. *Journal of Hydrology*.
- Burgos, V. (2012). Evaluación de ASTER GDEM y SRTM-C/X para modelación hidráulica de la rotura de presa El Carrizal, Mendoza. IFRH 2012. *Instituto Nacional del Agua*.
- Castillo, M., & Arbiol, R. (1995). Obtención de modelos numéricos de elevaciones con Interferometría SAR. *Revista de la Asociación Española de Teledetección*, 4-11.
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED). (2015). *The Human Cost of Weather-Related Disasters 1995-2015*. Geneva, Switzerland: UN Office for Disaster Risk Reduction (UNISRD).
-

-
- Chávez, J. L. (2010). *Tratamiento digital de imágenes multiespectrales*. Mexico D.F: Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Chayma, C., Marco, C., Riadh, A., & Renaud, H. (2018). Flood Mapping in a Complex Environment Using Bistatic TanDEM-X/TerraSAR-X InSAR Coherence. *Remote sensing*, 3-20.
- Chen, C., & Zebker, H. (2002). Phase unwrapping for large SAR interferograms "Statistical segmentation and generalized network models". *IEEE*, 1709-1719.
- Chen, C. W., & Zebker, H. A. (2000). Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms. *Journal of the Optical Society of America A*. Vol 1, 401-414.
- Chini, M., Pulvirenti, L., & Pierdicca, N. (2012). Analysis and interpretation of the COSMO-SkyMed observations of the 2011 Japan tsunami. *IEEE*, 467-471.
- Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de Teledetección espacial*. Madrid: Ediciones Rialp S.A.
- Chuvieco, E. (2000). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Madrid: Ediciones Rialp S.A.
- CORNARE. (2017). *Plan de Ordenación y Manejo de La Cuenca Hidrográfica del Río Negro*. Santuario.
- Cossu, R., Schoepfer, E., Bally, P., & Fusco, L. (2009). Near real-time SAR-based processing to support flood monitoring. *Real-Time Image Process*, 205-218.
- Cuartero, A., & Felicísimo, A. (2003). Rectificación y ortorrectificación de imágenes de satélite: análisis comparativo y discusión. *Geofocus*, 45-58.
- Cuartero, A., Felicísimo, A., & Ariza, F. (2001). *Análisis del error en modelos digitales de elevaciones según la fuente de datos*. Universidad de Extremadura.
- Curlander, J. C., & McDonough, R. N. (1991). *Synthetic Apertura Radar. Systems and Signal Processing: Wiley Series in Remote Sensing*,. New York: John Wiley & Sons.
- Dasgupta, A., Grimaldi, S., Ramsankaran, R., R, A., A, J., Pauwels, V., & Walker, J. (2018). Towards operational SAR-based flood mapping using neuro-fuzzy texturebased approaches. *Remote Sens*, 313-329.
- Dellepiane, S., & Angiati, E. (2012). A new method for cross-normalization and multitemporal visualization of SAR images for the detection of flooded areas. *IEEE*, 2765-2779.
- Dellepiane, S., Bo, G., Monni, S., & Buck, C. (2000). SAR images and interferometric coherence for flood monitoring. *IEEE*, 2608-2610.
- Dellepiane, S., Monni, S., Bo, G., & Buck, C. (2000). Flood damage assessment using SAR interferometry: A quantitative evaluation of results. *FRINGE*.
- Di Baldassarre, G., Schumann, G., & Bates, P. (2009a). Near real time satellite imagery to support and verify timely flood modelling. *Hydrological Processes*, 799-803.
-

-
- Di Baldassarre, G., Schumann, G., & Bates, P. (2009b). A technique for the calibration of hydraulic models using uncertain satellite observations of flood extent. *Journal of Hydrology* 367.
- Di Baldassarre, G., Schumann, G., Bates, P., Freer, J., & Beven, K. (2010). Flood-plain mapping: a critical discussion of deterministic and probabilistic approaches. *Hydrological Sciences Journal*, 364-376.
- Di Baldassarre, G., Schumann, G., Brandimarte, L., & Bates, P. (2011). Timely Low Resolution SAR Imagery To Support Floodplain Modelling: a Case Study Review. *Surveys in Geophysics*, 255-269.
- Díaz, G., Gómez, M., Deccechis, F., Lencinas, J., & del Valle, H. (2010). *Evaluación de los modelos digitales de elevación SRTM-C/X y ASTER GDEM y su relación con los errores planimétricos de datos pancromáticos Quickbird ortorrectificados*. Laboratorio de Percepción Remota y SIG. Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico (CIEFAP).
- Dubois, C., Thiele, A., & Hinz, S. (2016). Building detection and building parameter retrieval in InSAR phase images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 228-241.
- Dutta, D., & Herat, S. (1998). *Methodology for flood damage assessment using GIS and Distributed Hydrologic Model ERSDAC, 2003*. Japan: Earth Remote Sensing Data Analysis Center.
- Dutta, D., & Herat, S. (2003). *Methodology for flood damage assessment using GIS and Distributed Hydrologic Model ERSDAC*. Japan: "Aster reference Guide Version 1.0." Earth Remote Sensing Data Analysis Center.
- Eftekhari, A., Ghannadi, M., Motagh, M., & SaadatSeresht, M. (2013). Object Coordinates Extraction by Radargrammetry and Multi Step Image Matching. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 147-151.
- Euillades, L. D., Euillades, M. H., & Blanco, G. A. (2005). Aplicación de modelos digitales de elevación basados en imágenes SAR en el estudio de la geología estructural. *1° premio al mejor Trabajo Técnico de las II Jornadas de Geotecnología*.
- European Space Agency ESA. SNAP (Version 5.0). (2015). Obtenido de <http://www.array.ca/> <http://step.esa.int>.
- Farr, T., Rosen, P., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., & Alsdorf, D. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*.
- Fernández Oliveras, M. P. (2009). *Determinación de movimientos verticales del terreno mediante técnicas de interferometría radar DINnSAR. Tesis doctoral*. Granada: Universidad de Granada.
- Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., & Rocca, F. (2007). *InSAR Principles: Guidelines for SAR interferometry processing and interpretation (Vol. 19)*. Países Bajos: ESA Publications.
-

-
- Frappart, F., Seyler, F., Martinez, J., Leon, J., & Cazenave, A. (2005). Floodplain water storage in the Negro River basin estimated from microwave remote sensing of inundation area and water levels. *Remote Sens Environ*, 387-399.
- Frazier, P., & Page, K. (2000). Water body detection and delineation with Landsat TM data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 66, 1461-1467.
- Gabriel, A. K., & Goldstein, R. M. (1988). Crossed orbit interferometry: Theory and. *International*, 857-872.
- Gabriel, A., & Goldstein, R. (1988). Crossed orbit interferometry: Theory and experimental results from SIR-B. *International Journal of Remote Sensing*, 857-872.
- Gens, R., & Van Genderen, J. (1996). SAR interferometry—issues, techniques, applications. *International Journal of Remote Sensing*, 1803-1835.
- Geudtner, D., Winter, R., & Vachon, P. (1996). Flood monitoring using ERS-1 SAR interferometry coherence maps. *IEEE*, 966-968.
- Giles, P., & Franklin, S. (1996). Comparison of derivative topographic surfaces of a DEM generated from stereoscopic SPOT images with field measurements. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62, 1165-1170.
- Giordan, D., Notti, D., Villa, A., Zucca, F., Calò, F., Pepe, A., . . . Allasia, P. (2018). Low cost, multiscale and multi-sensor application for flooded area mapping. *Nat. Hazards Earth Syst*.
- Giustarini, L., Hostache, R., Matgen, P., Schumann, P., Bates, P., & Mason, D. (2013). A change detection approach to flood mapping in urban areas using TerraSAR-X. *IEEE*, 2417-2430.
- Giustarini, L., Vernieuwe, H., Verwaeren, J., Chini, M., Hostache, R., Matgen, P., . . . De Baets, B. (2015). Accounting for image uncertainty in SAR-based flood mapping. *Appl. Earth Obs*, 70-77.
- Goldstein, R., Zebker, H., & Werner, C. (1988). Satellite radar interferometry: Two dimensional phase unwrapping. *Radio Science*, 23, 713-720.
- Graham, L. C. (1974). Synthetic Interferometer Radar for Topographic Mapping. *IEEE*, 763-768.
- Guerrero, C., & Hernandez, P. (2017). *Determinación de un modelo digital de elevación a partir de imágenes de radar Sentinel-1 usando interferometría SAR*. Bogotá: Universidad Distrital F.J.C.
- Hanssen, F. (2001). *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Delft University of Technology. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Henry, J., Chastanet, P., Fellah, K., & Desnos, Y. (2006). Envisat multi-polarized ASAR data for flood mapping. *Int J Remote Sens*, 1921-1929.
- Heremans, R., Willekens, A., Borghys, D., Verbeeck, B., Valckenborgh, J., Acheroy, M., & Perneel, C. (2003). Automatic detection of flooded areas on ENVISAT/ASAR
-

-
- images using an object-oriented classification technique and an active contour algorithm. In: *Recent Advances in Space Technologies. IEEE*, 311-316.
- Hess, L., Melack, J., Filoso, S., & Wang, Y. (1995). Delineation of inundated area and vegetation along the Amazon floodplain with the SIR-C synthetic aperture radar. *IEEE*, 896-904.
- Hirose, k., Maruyama, Y., Do Van, Q., Tsukada, M., & Shiokawa, Y. (2001). Visualization of flood monitoring in the lower reaches of the Mekong River. *22nd Asian Conference on Remote Sensing*.
- Hoffmann, J., & Walter, D. (2006). How complementary are SRTM-X and -C band Digital Elevation Models? In *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. Vol.72, N°.3*, 261-268.
- Horritt, M. (1999). Statistical active contour model for SAR image segmentation. *Image and Vision Computing*, 213-224.
- Horritt, M. (2000). Calibration of a two-dimensional finite element flood flow model using satellite radar imagery. *Water Resources Research*.
- Horritt, M., & Bates, P. (2001). Predicting floodplain inundation: raster-based modelling versus the finite-element approach. *Hydrological Processes*.
- Horritt, M., Di Baldassarre, G., Bates, P., & Brath, A. (2007). Comparing the performance of a 2-D finite element and a 2-D finite volume model of floodplain inundation using airborne SAR imagery. *Hydrological Processes*.
- Hunter, N., Bates, P., Horritt, M., De Roo, A., & Werner, M. (2005). Utility of different data types for calibrating flood inundation models within a GLUE framework. *Hydrology and Earth System Sciences*.
- IGAC (2010). Proyecto Cartografía de Antioquia “CartoAntioquia”. En el marco del Convenio interadministrativo 4085 de 2009 para la generación de la Cartografía del Departamento de Antioquia, suscrita entre el Departamento de Antioquia, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi -IGAC-, el Municipio de Medellín, el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Empresas Públicas de Medellín -EPM-, el Instituto para el Desarrollo de Antioquia -IDEA- e ISAGEN.
- IDEAM. (2017). *Guía metodológica para la elaboración de mapas de inundación*. Bogotá.
- Jacobsen,, K. (2010). Comparison of ASTER GDEMs with SRTM Height Models. *EARSeL Symposium, Dubrovnik. Remote Sensing for Science, Education and Natural and Cultural Heritage*, 521-526.
- Jimenez, D. (2012). *Movimientos de Ladera en la Vertiente Meridional de Sierra Nevada (Granada, España): Identificación, Análisis y Cartografía de Susceptibilidad y Peligros mediante SIG*. Granada: Universidad de Granada, Departamento de Ingeniería Civil.
- Jung, H., Jasinski, M., Kim, J.-W., Shumm, C., & Bates, P. (2012b). Calibration of two-dimensional floodplain modeling in the central Atchafalaya Basin Floodway System using SAR interferometry. *Water Resources Research*.
-

-
- Jung, Y., & Merwade, V. (2012a). Uncertainty Quantification in Flood Inundation Mapping Using Generalized Likelihood Uncertainty Estimate and Sensitivity Analysis. *Journal of Hydrologic Engineering*, 507-520.
- Kervyn, F. (2001). Modelling topography with SAR interferometry: illustrations of a favourable and less favourable environment. *Computers & geosciences*, 1039-1050.
- Kiamehr, R., & Sjöberg, L. E. (2005). Effect of the SRTM global DEM on the determination of a high-resolution geoid model: a case study in Iran. *J Geod, Vol. 79*, 540-551.
- Kucera, L. (1999). Using ERS SAR interferometry for DEM creation in the Czech Republic. *In Fringe99 Workshop on ERS SAR interferometry, ESA*.
- Kumar Singh, S. (2005). *Analysis of uncertainties in digital elevation models in flood (hydraulic) modelling*. Dehradun India: International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation Enschede, The Netherlands & Indian.
- Kyriou, A., & Nikolakopoulos, K. (2018). Assessing the suitability of Sentinel-1 data for landslide mapping. *European Journal of Remote Sensing*, 402-411.
- Laugier, O., Fella, K., Tholey, N., & Meyer, C. (1997). High temporal detection and monitoring of flood zone dynamic using ERS data around catastrophic natural events: the 1993 and 1994 Camargue Flood events. *ESA*, 559-564.
- Lazecky, M., Comut, F., Qin, Y., & Perissin, D. (2017). Sentinel-1 Interferometry System in the High-Performance Computing Environment. In *The Rise of Big Spatial Data. Springer International Publishing*, 131-139.
- Lee, C., Jones, S., Bellman, C., & Buxton, L. (2008). DEM creation of a snow covered surface using digital aerial photography. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*.
- Lencinas, J., & Díaz, G. (2011). Corrección geométrica de datos satelitales QuickBird, incidencia de los modelos digitales de elevación SRTM-C/X y ASTER GDEM. *GeoFocus*, n°11, 431 - 454.
- Letsios, V., Faraslis, I., & Stathakis, D. (2019). InSAR DSM using Sentinel 1 and spatial data creation. *AGILE*, 17-20.
- Li, J., & Wong, D. (2009). Effects of DEM sources on hydrologic applications. *Computers Environment and Urban Systems*, 1-11.
- Liao, M., Jiang, H., Wang, Y., Wang, T., & Zhang, L. (2013). Improved topographic mapping through high-resolution SAR interferometry with atmospheric effect removal. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 80, 72-79.
- Liu, Y., Nishiyama, S., & Yano, T. (2004). Analysis of four change detection algorithms in bi-temporal space with a case study. *International Journal of Remote Sensing*, 2121-2139.
-

-
- Lu, D., Mausel, P., Brondizio, E., & Moran, E. (2004). Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 2365-2401.
- Ludwig, R., & Schneider, P. (2006). Validation of digital elevation models from SRTM X-SAR for applications in hydrologic modelling. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 60,, 339-358.
- Macintosh, H., & Profeti, G. (1995). The use of ERS SAR data to manage flood emergencies at the smaller scale. In: 2nd ERS Applications. *Workshop, European Space Agency*, 243-246.
- Makineci, H., & Karabörk, H. (2016). Evaluation digital elevation model generated by synthetic aperture radar data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 41.
- Martinis, S., Hahmann, T., Twele, A., & Roth, A. (2009). Extraction of water and flood areas from SAR data. *ResearchGate*.
- Martinis, S., Kersten, J., & Twele, A. (2014). A fully automated TerraSAR-X based flood service. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*.
- Martinis, S., Kersten, J., & Twele, A. (2015). A fully automated TerraSAR-X based flood service. *ISPRS J. Photogramm.*
- Martinis, S., Twele, A., Strobl, C., Kersten, J., & Stein, E. (2013). A Multi-Scale Flood Monitoring System Based on Fully Automatic MODIS and TerraSAR-X Processing Chains. *Remote Sensing* 5.
- Mason, D., Schumann, G., Neal, J., Garcia-Pintado, J., & Bates, P. (2012). Automatic near real-time selection of flood water levels from high resolution Synthetic Aperture Radar images for assimilation into hydraulic models: A case study. *Remote Sensing of Environment*, 705-716.
- Mason, G., Schumann, & Bates. (2018). *Data utilisation in flood inundation modelling*. Environmental Systems Science Centre.
- Massonet, D., & Feigl, K. (1998). Radar Interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Reviews of geophysics*, 441-500.
- Matgen, P., Hostache, R., Schumann, G., Pfister, L., Hoffmann, L., & Savenije, H. (2011). Towards an automated SAR-based flood monitoring system: Lessons learned from two case studies. *Phys. Chem. Earth Part B*, 241-252.
- Matgen, P., Schumann, G., Henry, J.-B., Hoffmann, L., & Pfister, L. (2007). Integration of SAR-derived river inundation areas, high-precision topographic data and a river flow model toward near real-time flood management: *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 247-263.
- Mohammadi, A., Bin, B., & Shahabi, H. (2018). Extracting digital elevation model (DEM) from Sentinel-1 satellite imagery: case study a part of Cameron highlands, Pahang, Malaysia. *International Journal of Management and Applied Science*.

-
- Monterroso Tobar, M. F. (2016). *Estimación del retroceso glaciar en el Parque Nacional Natural de los Nevados -PNNN- a través del uso de imágenes ópticas e interferometría diferencial -DINSAR-*. Manizalez.
- Moreira, A., Prats, P., Younis, M., Krieger, G., & Hajnsek, I. (2013). *A tutorial on Synthetic Aperture Radar*. Germany: Microwaves and Radar Institute of the German Aerospace Center (DLR).
- Mukherjee, S., Joshi, P., Mukherjee, S., Ghosh, A., Garg, R., & Mukhopadhyay, A. (2013). Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 205-217.
- Múnera, C. (2013). *Análisis comparativo de los modelos HEC-RAS, CCHE2D, G-STARS y BRI-STARS, para la modelación hidráulico-morfológica en un cauce aluvial*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- NASA. (2017). *Conceptos Básicos del Radar de Apertura Sintética*.
- Nico, G., Pappalepore, M., Pasquariello, G., Refice, A., & Samarelli, S. (2000). Comparison of SAR amplitude vs. coherence flood detection methods - a GIS application. *Int. J. Remote Sens*, 1619-1631.
- Olmsted, C. (1993). *Scientific SAR User's Guide*. Fairbanks Alaska: Alaska SAR Facility. ASF-SD-003.
- Pappenberger, F., Frodsham, K., Beven, K., Romanowicz, R., & Matgen, P. (2007). Fuzzy set approach to calibrating distributed flood inundation models using remote sensing observations. *Hydrology and Earth System Sciences*.
- Patro, S., Chatterjee, C., Singh, R., & Raghuwanshi, N. (2009). Hydrodynamic modelling of a large flood-prone river system in India with limited data. *Hydrological Processes* 23, 2774-2794.
- Pellikka, P., & Rees, G. (2010). Remote sensing of glaciers: techniques for topographic, spatial, and thematic mapping of glaciers. *Taylor & Francis Group*.
- Pierdicca, N., Pulvirenti, L., & Chini, M. (2018). Flood Mapping in Vegetated and Urban Areas and Other Challenges: Models and Methods, in: *Flood Monitoring through Remote Sensing*. *Remote Sensing*, 138-179.
- Pierdicca, N., Pulvirenti, L., Chini, M., Guerriero, L., & Candela, L. (2013). Observing floods from space: Experience gained from COSMO-SkyMed observations. *Acta Astronautica*, 122-133.
- Pietroniro, A., & Prowse, T. (2000). Preface: application of remote sensing in hydrology. *Hydrological processes* 16, 1537-1541.
- Plate, E. (2002). Flood risk and flood management. *Journal of Hydrology*, 2-11.
- Posada, L. (1994). *Hidráulica fluvial: Transporte de sedimentos*. Medellín: Universidad Nacional - Facultad de Minas.

-
- Prati, C., & Rocca, F. (1990). Limits to the resolution of elevation maps from stereo SAR images. *International Journal of Remote Sensing*, 2215-2235.
- Prati, C., Giani, M., & Leuratti, N. (1999). SAR interferometry: a 2-D phase unwrapping technique based on phase and absolute values information. *Proceedings IGARS*.
- Prestininzi, P., Baldassarre, G., Schumann, G., & Bates, P. (2011). Selecting the appropriate hydraulic model structure using low-resolution satellite imagery. *Advances in Water Resources*.
- Profeti, G., & Macintosh, H. (1997). Flood management through LANDSAT TM and ERS SAR data: a case study. *Hydrol Process*, 1397-1408.
- Pulvirenti, L., Chini, M., Marzano, F., Pierdicca, N., Mori, S., Guerriero, L., . . . Candela, L. (2012). Detection of floods and heavy rain using Cosmo-SkyMed data: the event in Northwestern Italy of November. *IEEE*, 3026-3029.
- Rahman, M., & Di, L. (2017). The state of the art of spaceborne remote sensing in flood management. *Nat. Hazards*, 1223-1248.
- Reddy, G., Kumar, N., Sahu, N., & Singh, S. (2017). Evaluation of automatic drainage extraction thresholds using ASTER GDEM and Cartosat-1 DEM: A case study from basaltic terrain of Central India. The Egyptian. *Journal of Remote Sensing and Space Science*.
- Refice, A., Belmonte, A., Bovenga, F., Pasquariello, G., & Nutricato, R. (2013). On the interpolation of sparse-grid InSAR data without need of phase unwrapping. *European Journal of Remote Sensing*, 807-821.
- Refice, A., Capolongo, D., Pasquariello, G., D'Addabbo, A., Bovenga, F., Nutricato, R., . . . Pietranera, L. (2014). SAR and InSAR for Flood Monitoring: Examples With . *IEEE*.
- Refice, A., Capolongo, D., Pasquariello, G., D'Addabbo, A., Bovenga, F., Nutricato, R., . . . Pietranera, L. (2014). SAR and InSAR for Flood Monitoring: Examples With COSMO-SkyMed Data. *IEEE*.
- Refice, A., Capolongo, D., Pasquariello, G., D'Addabbo, A., Bovenga, F., Nutricato, R., . . . Pietranera, L. (2014). SAR and InSAR for Flood Monitoring: Examples With COSMO-SkyMed Data. *IEEE*.
- Richards, J. A., & Jia, X. (2006). Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction. *Springer*.
- Rizzoli, P., Martone, M., Gonzalez, C., Wecklich, C., Tridon, B., Brautigam, B., . . . Moreira, A. (2017). Generation and performance assessment of the global TanDEM-X digital elevation model. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 119-139.
- Rossi, C., & Gernhardt, S. (2013). Urban DEM generation, analysis and enhancements using TanDEM-X. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 85, 120-131.
-

-
- Rozas, D., Rebolledo, C., & Gutiérrez, P. (2010). *Evaluación de la calidad de los DEM SRTM y ASTER en una cuenca costera de la Región de la Araucanía, bajo distintas condiciones de relieve y cobertura vegetal*. Latin American Remote SensingWeek, LARS ISPRS.
- Sanchez Jara, P. (2012). *La teledetección enfocada a la obtención de mapas digitales*. Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Sanders, B. (2007). Evaluation of on-line DEMs for flood inundation modeling. *Advances in Water Resources* 30, 1831-1843.
- Sarmap, U. B. (Agosto de 2009). *Synthetic Aperture Radar and SARscape*. Obtenido de The earth observation gateway: <http://www.sarmap.ch/pdf/SAR-Guidebook.pdf>.
- Schneevoigt, J., Sund, M., Bogren, W., & Weydahl, J. (2012). Glacier displacement on Comfortlessbreen, Svalbard, using 2-pass differential SAR interferometry (DInSAR) with a digital elevation model Polar. *Cambridge University Press* 2011. doi:10.1017/S0032247411000453, 17-25.
- Schumann, G., & Moller, D. (2015). Microwave remote sensing of flood inundation. *Phys Chem Earth Parts ABC*, 84-95.
- Schumann, G., Bates, P., Horritt, M., Matgen, P., & Pappenberger, F. (2009). Progress in integration of remote sensing-derived flood extent and stage data and hydraulic models. *Reviews of Geophysics* 47.
- Schumann, G., Bates, P., Neal, J., & Andreadis, K. (2014). Measuring and mapping flood processes in Hydro-meteorological Risks. *Hazards, and Disasters, Elsevier*.
- Schumann, G., Di Baldassarre, G., Alsdorf, D., & Bates, P. (2010). Near real-time flood wave approximation on large rivers from space: Application to the River Po, Italy. *Water Resources Research* 46.
- Schumann, G., Matgen, P., Cutler, M., Black, A., Hoffmann, L., & Pfister, L. (2008). Comparison of remotely sensed water stage from LiDAR, topographic contours and SRTM. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. 63, 283-296.
- Schumann, Guy, Di Baldassarre, Giuliano, Bates, D., & Paul. (2009). The Utility of Spaceborne Radar to Render Flood Inundation Maps Based on Multialgorithm Ensembles. *Geoscience and Remote Sensing. IEEE*.
- Skolnik, M. I. (1990). *Radar Handbook*. Boston: McGraw-Hill.
- Smith, L. (1997). Satellite remote sensing of river inundation area, stage and discharge: a review. *Hydrological Processes* 11, 1427-1439.
- Svobodová, j., & Tuček, P. (2009). Creation of DEM by kriging method and evaluation of the results. *Geomorphologia Slovacaet Bohemica*, 53-60.
- Tarekegn, T., Haile, A., Rientjes, T., Reggiani, P., & Alkema, D. (2010). Assessment of an ASTER-generated DEM for 2D hydrodynamic flood modelling. *In Int. Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 12, 457-465.
-

-
- Tarpanelli, A., Brocca, L., Melone, F., & Moramarco, T. (2013). Hydraulic modelling calibration in small rivers by using coarse resolution synthetic aperture radar imagery. *Hydrological Processes* 27, 1321-1330.
- Tocasuche Castro, N., & Peñalosa Molina, L. (2018). *Detección y análisis de deslizamientos utilizando interferometría diferencial (D-InSAR) entre los años 2015 y 2017 en las provincias norte y Valderrama del departamento de Boyacá*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas - Facultad de Ingeniería.
- Tomas, R. (2008). *Estudio de la subsidencia de la ciudad de Murcia mediante Interferometría SAR diferencial avanzada (Tesis de doctorado)*. Alicante: Universidad de Alicante.
- Torres, T. M. (2013). Determinación de la deformación del terreno por movimientos en masa usando interferometría SAR (Radar de Apertura Sintética). *Universidad Nacional de Córdoba, Instituto de Altos Estudios Espaciales "Mario Gulich", Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE)*.
- Toyra, J., Pietroniro, A., Martz, L., & Prowse, T. (2002). A multi-sensor approach to wetland flood monitoring. *Hydrological Processes* 16, 1569-1581.
- Tricart, J. L. (1979). Paisaje y ecología. *Revue de Geomorphologie Dynamique*, XXVIII, 3.
- Wang, W., Yang, X., & Yao, T. (2012). Evaluation of ASTER GDEM and SRTM and their suitability in hydraulic modelling of a glacial lake outburst flood in southeast Tibet. *Hydrological Processes* 26, 213-225.
- Wang, X., Holland, D., & Gudmundsson, G. (2018). Accurate coastal DEM generation by merging ASTER GDEM and ICESat/GLAS data over Mertz Glacier. *Antarctica. Remote Sensing of Environment*, 206, 218-230.
- Wasowski, C. C. (2006). Investigating landslides with space-borne Synthetic. *Engineering Geology*, 173-199.
- Wegmuller, U., Santoro, M., Werner, C., Strozzi, T., Wiesmann, A., & Lengert, W. (2009). DEM generation using ERS-ENVISAT interferometry. *Journal of Applied Geophysics*, 51-58.
- Wendleder, A., Wessel, B., Roth, A., Breunig, M., Martin, K., & Wagenbrenner, S. (2012). TanDEM-X water indication mask: Generation and first evaluation results. *IEEE*, 1-9.
- Westerhoff, R., Kleuskens, M., Winsemius, H., Huizinga, H., Brakenridge, G., & Bishop, C. (2013). Automated global water mapping based on wide-swath orbital synthetic-aperture radar. *Hydrological and Earth System Sciences*, 651-663.
- Yamagata, Y., & Akiyama, T. (1988). Flood damage analysis using multi-temporal Landsat Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing* 9, 503-514.
- Yamazaki, D., Baugh, C. A., Bates, P. D., Kanae, S., Alsdorf, D. E., & Oki, T. (2012). Adjustment of a spaceborne DEM for use in floodplain hydrodynamic modelling. *Journal of Hydrology*, 81-91.
-

-
- Yan, K. (2015). *Low-cost Space-borne Data for Inundation Modelling: Topography, Flood Extent and Water level*. Delft: UNESCO-IHE Institute for Water Education.
- Yan, K., Neal, J., Solomatine, D., & Di Baldassarre, G. (2014). Global and low-cost topographic data to support flood studies. *Hydro-meteorological Hazards Risks, and Disasters*, 105-124.
- Zebker, H. A., & Goldstein, R. M. (1987). Interferometric radar measurement of ocean surface currents. *Natura*, 707-709.
- Zhang, W., Wang, W., & Chen, L. (2012). Constructing DEM Based on InSAR and the Relationship between InSAR DEM's Precision and Terrain Factors. *Energy Procedia*, 184-189.
- Zhou, C., Zhou, Y., Dongchen, E., Wang, Z., Sun, & Jiabing. (2011). *Estimation of ice flow velocity of calving glaciers using SAR interferometry and feature tracking*. Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan, China, 6.
- Zhou, H., Zhang, J., Gong, L., & Shang, X. (2011). Comparison and Validation of Different DEM Data Derived from InSAR. *Procedia Environmental Sciences*, 590-597.
- Zhu, X., X, Baier, G., Lachaise, M., Shi, Y., Adam, F., & Bamler, R. (2018). Potential and limits of non-local means InSAR filtering for TanDEM-X high-resolution DEM generation. *Remote Sensing of Environment*, 148-161.