



DETERMINACIÓN DE ÁREAS INUNDABLES EN LA RESERVA FORESTAL PROTECTORA NACIONAL DEL RÍO LEÓN (RFPN-RÍO LEÓN) POR MEDIO DE IMÁGENES DE RADAR.

Trabajo de grado para optar por el Título de Ingeniero Topográfico

Presentado por:

Edgar Mauricio Ordoñez Castro

Código: 1134900 - 3740

Director:

Francisco Luis Hernández Torres, Msc.

Programa Académico de Ingeniería Topográfica

Escuela de Ingeniería Civil y Geomática

Universidad del Valle

Cali – Colombia

Septiembre de 2019

Nota de aceptación

Firma del director

Firma del evaluador

Firma del evaluador

Santiago de Cali, septiembre de 2019

DEDICATORIA

A Dios por ser el camino y mi fortaleza en los momentos de dificultad.

A mis padres Luz Dary Castro y Calos Edgar Ordoñez por permitirme tener educación de alta calidad y ser el motor de mis sueños, doy gracias por todos sus esfuerzos.

A mis familiares y amigos que me animaron y apoyaron en todo el proceso.

AGRADECIMIENTOS

A mi Director de Trabajo de Grado, Profesor Francisco Hernández Torres por su disposición y guía en el proceso, asesorarme sin limitación

Al equipo de WWF Colombia por su apoyo, confianza y por brindarme la información para el desarrollo de esta tesis.

A todas las personas que me acompañaron en el desarrollo de este trabajo de grado

Contenido

Resumen	7
1. Introducción	8
2. Planteamiento del problema.....	9
3. Objetivos.....	9
4. Justificación	10
5. Marco teórico.....	11
6. Metodología	22
7. Resultados	33
8. Discusión.	40
9. Conclusiones.	42
10. Bibliografía.....	44

Tabla de Tablas

Tabla 1 Productos utilizados	24
Tabla 2 Datos de campo para comprobar áreas de inundación y no inundación.....	38

Tabla de Figuras

Figura 1 Relación de planos de superficie e imagen SAR	16
Figura 2 Red Neuronal Artificial	18
Figura 3 Zona de estudio	23
Figura 4 Metodología	25
Figura 5. Reducción de ruido térmico de imágenes SAR.....	26
Figura 6. Imágenes de calibración radiométrica a) Sigma b) Beta.	26
Figura 7. Imagen de calibración radiométrica de terreno (Terrain Flattening).....	27
Figura 8. Reducción de Ruido Speckle	28
Figura 9. Corrección geométrica de terreno.	29
Figura 10 Flujo metodológico del análisis de umbrales de los coeficientes de retrodispersión	29
Figura 11. Aplicación de matriz de co-ocurrencia y texturas. a) Contraste, b) Disimilitud, c) Homogeneidad, d) energía, e) Correlación y f) ASM	31
Figura 12. Composición de texturas. Homogeneidad, Disimilitud y ASM	31
Figura 13 Histogramas de imágenes. a) histograma imágenes Sentinel, b) histograma imágenes Sentinel con ajuste de umbral, c) histograma imágenes ALOS Palsar y, d) histograma imágenes ALOS Palsar con ajuste de umbral.....	32
Figura 14. Relación de datos meteorológicos mensuales	33
Figura 15. Promedio de Precipitación muestreado anualmente	34
Figura 16 composiciones binarias. a) clasificación binaria Sentinel, b) solapamiento de imágenes binarias Sentinel, c) clasificación binaria ALOS Palsar y, d) solapamiento de imágenes binarias ALOS Palsar	35

Figura 17. extensión total de inundación (solapamiento de sensores)	36
Figura 18 Mapa de áreas inundables.....	37
Figura 19 Mapa de distribución de muestras tomadas en campo.....	38
Figura 20 Mapa de comparación Humedales vs. Inundación	40

Resumen

La Reserva Forestal Protectora Nacional del Río León (RFPN-Río León) fue declarada bajo esta categoría por medio del acuerdo INDERENA No. 023 de 1971. La reserva se encuentra ubicada entre la jurisdicción del departamento de Antioquia y Chocó y cuenta con una extensión de 38.938 ha (SIDAP, 2010). Dentro de la reserva atraviesan 2 afluentes importantes, el río León y el río Tumaradocito.

El presente estudio tiene como fin determinar áreas susceptibles a inundación, mediante el uso de imágenes satelitales, las cuales proporcionan métodos directos de estudio para la dinámica terrestre. Se aplicó la metodología planteada por Castro-Gómez, (2015); Podest, (2018); Song, Sohn, & Park, (2007), por medio de la cual se estimó los valores de umbral de retrodispersión para clasificación, a partir de imágenes tomadas por los sensores Alos-Palsar 1 (ALP1) y Sentinel 1-A, 1-B. La matriz de co-ocurrencia que permitió identificar los valores de retrodispersión para la clasificación, se determinó a partir de la ecuación definida por Pathak & Barooah, (2013) después del pre-procesamiento (Reducción de Ruido Térmico, Calibración Radiométrica, Calibración Radiométrica de Terreno, Corrección de Ruido Speckle y Corrección Geométrica de Terreno) y procesamiento (Conversión de valores de retrodispersión a Decibels) de las polarizaciones disponibles de cada sensor.

Las áreas definidas como susceptibles a inundación obtenidas por medio de la metodología planteada, fueron evaluadas por medio de datos tomados in situ y comparándolos con el mapa de humedales de Colombia. Se encontró que de acuerdo a los datos tomados en campo existe una precisión del 90% en la determinación de áreas susceptibles a inundación y, acorde al análisis por medio del mapa de humedales de Colombia se presenta que el 85% del área definida como susceptible a inundación se encuentra dentro del área definida como humedal temporal, que equivale al 75% de la zona de estudio definida.

PALABRAS CLAVE:

Matriz de co-ocurrencia, retrodispersión, Sentinel, Alos-Palsar, Inundación

1. Introducción

Las inundaciones son fenómenos naturales con ciclos de retorno, es la ocupación por parte del agua de zonas que habitualmente están libres de esta, por desbordamiento de ríos, torrentes o ramblas, por lluvias torrenciales, deshielo, por subida de las mareas por encima del nivel habitual, por maremotos, huracanes, entre otros (IDEAM, 2014). Se pueden presentar de dos tipos, pluvial, causado por la precipitación generando anegamiento (encharcamiento) y fluvial, que ocurre por el cambio en la mecánica hídrica e hidráulica de los drenajes (IDEAM, 2014).

La Reserva Forestal Protectora Nacional del Río León (RFPN-Río León), fue declarada bajo esta categoría por medio del acuerdo INDERENA No. 023 de 1971. Además, el Concejo de Turbo, Antioquia por medio del acuerdo No. 017 de 2003 declaró como zonas de Reservas Naturales y Áreas de Interés Ambiental el cerro El Cuchillo y Lomas Aisladas (SIDAP, 2010). Actualmente la reserva, se encuentra en la elaboración del plan de manejo de la misma. Para su elaboración, se debe determinar las zonas de amenaza y riesgo por inundación de acuerdo con el decreto 1807 de 2014. En dicho decreto en el Título I, Artículo 3 menciona que, se deben realizar la delimitación y zonificación de áreas de amenaza de inundación.

La reserva forestal protectora nacional del río León se encuentra ubicada entre la jurisdicción del departamento de Antioquia y Chocó. Y cuenta con una extensión de 38.938 ha (SIDAP, 2010). La reserva es atravesada por 2 afluentes importantes, el río León y el río Tumaradocito. La reserva del río León se encuentra aproximadamente a 20 m.s.n.m., se sitúa en la planicie aluvial del río Atrato (llanura de inundación), y cuenta con pendiente promedio del 4% (Anaya et al., 2017; SIDAP, 2010). El comportamiento climático está influenciado por las zonas de convergencia tropical que generan un comportamiento unimodal para esta zona, que consta de una temporada seca que inicia en el mes de enero y finaliza en marzo y para el resto del año se comprende la temporada húmeda (Anaya et al., 2017; IDEAM, 2001; SIDAP, 2010). La zona cuenta con una precipitación total anual promedio para el municipio de Turbo de hasta 2000 milímetros (zona media baja de la cuenca del río León), y para los municipios de Mutatá y Villarraga (nacimiento del río León) oscilan alrededor de los 4000 milímetros y cuenta con una temperatura promedio de 28°C (IDEAM, 2001).

La metodología a desarrollar en este proyecto está basada en las técnicas de Sensores Remotos de acuerdo con (Ellis et al., 2012) los estudios asociados a inundaciones por medio de sensores remotos y aplicando modelos hidráulicos e hidrológicos contribuyen a soluciones efectivas y eficientes, en lugares donde la información in situ es escasa.

En este documento se aborda la identificación de áreas susceptibles a inundación, mediante el uso de imágenes satelitales. Las dinámicas espaciotemporales de inundación de la zona de estudio fueron identificadas haciendo uso de imágenes de Radar y de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

2. Planteamiento del problema

Según Wahlstrom & Guha-Sapir, (2015) las inundaciones son el desastre natural más común del mundo relacionado con el clima. Este fenómeno, se atribuye directamente a las fuertes precipitaciones, pero el cambio climático, la rápida urbanización y el desarrollo urbano no planificado actúan como un catalizador, alterando la respuesta hidrológica de la cuenca (Singh et al., 2018).

Colombia, durante los años 2010 a 2012, experimentó unas condiciones de inundación asociadas con la ocurrencia del evento de La Niña, que se caracterizó por anomalías marcadas en el régimen de precipitaciones particularmente en las regiones Andinas, Caribe y Pacífica, lo cual aunado a la falla y rompimiento de diques ocasionó inundaciones con una magnitud superior a los registros históricos. Esta emergencia afectó amplias zonas del país, y tuvo consecuencias económicas, sociales y ambientales severas (IDEAM, 2014).

En mayo de 2017, se registraron intensas lluvias, sobre el territorio nacional. Los departamentos más afectados por grandes inundaciones, emergencias y deslizamientos fueron el Meta, Putumayo, Antioquia, Chocó, Cundinamarca, Santander, Boyacá, Huila, Caquetá, Valle del Cauca, Cauca y Magdalena.

Se debe resaltar, que la zona de reserva presenta una alta temporalidad de lluvias anual, oscilando entre los 2000 a 4000 milímetros. A parte de ello su topografía es plana ya que cuenta con 4% de pendiente, la textura de los suelos es en su mayoría arcillosa y su nivel freático es alto. Todas estas características conjunto a las modificaciones hidráulicas hacen que se generen anegamientos, que conllevan a amenazas a la población, tanto para habitar, cultivar y disfrutar de la reserva.

Para realizar la determinación de áreas inundables de manera convencional, es necesario hacer uso de información hidrológica e hidráulica in situ, que para la mayoría de casos es escasa o nula de acuerdo a dificultades de acceso o simplemente por la no presencia de estaciones de medición de las variables de estudio.

Lo que conduce a las siguientes preguntas: ¿Cómo identificar las zonas inundables en la Reserva Forestal Protectora Nacional del Río León? ¿Cuál es la incertidumbre asociada a la identificación de las zonas susceptibles de inundación en la Reserva Forestal Protectora Nacional del Río León?

Para dar respuesta a estos interrogantes se propone el desarrollo de los siguientes objetivos.

3. Objetivos

Objetivo General

Identificar y evaluar las zonas inundables asociadas a altas precipitaciones por medio de sensores remotos, en la RFPN-RÍO LEÓN.

Objetivos Específicos

- Determinar las variables que permitan la caracterización de las áreas inundables
- Identificar las áreas que tienen amenaza de inundación en la RFPN-Río León, a través de procesos de teledetección.

4. Justificación

Según la (OEA, 1993) las inundaciones son un evento natural y recurrente para un río. Además, los ríos igualarán o excederán la inundación media anual con cierta regularidad, debido a la ocurrencia de inundaciones que serán el resultado de lluvias fuertes o continuas que sobrepasan la capacidad de absorción del suelo y la capacidad de carga de los ríos, riachuelos y áreas costeras. Esto hace que un determinado curso de aguas rebalse su cauce e inunde tierras adyacentes. Como las llanuras de inundación son, en general, aquellos terrenos sujetos a inundaciones recurrentes con mayor frecuencia, y ubicados en zonas adyacentes a los ríos y cursos de agua se convierten en un peligro para la población y las actividades de desarrollo.

Las áreas urbanas son las más propensas a sufrir afectaciones por inundaciones, debido a la deficiente o inadecuada planificación sobre los usos de las tierras con el fin de avanzar en el crecimiento urbano. Asimismo, el crecimiento urbano, producto de nuevos asentamientos humanos urbanos y rurales concentrados, las actividades económicas, las redes de distribución y las herencias culturales causan la modificación del ciclo hidrológico natural (Amarante & Caffera, 2003).

Actualmente la reserva, se encuentra en la elaboración del plan de manejo de la misma. Para su elaboración, se debe determinar las zonas de amenaza por inundación de acuerdo con el decreto 1807 de 2014. En dicho decreto en el Título I, Artículo 3 menciona que, se deben realizar la delimitación y zonificación de áreas de amenaza de inundación para la elaboración del mismo, además la dirección de Parques Nacionales Naturales de Colombia (2015) menciona en la guía para la elaboración de planes de manejo, la identificación de amenazas dentro de las reservas naturales nacionales que se refiere a las actividades y/o situaciones que generen riesgo entre estas las inundaciones.

La metodología a desarrollar en este proyecto está basada en la utilización de Sensores Remotos, de acuerdo con (Ellis et al., 2012) los estudios asociados a inundaciones por medio de sensores remotos haciendo uso modelos hidráulicos e hidrológicos contribuyen a soluciones efectivas y eficientes, en lugares donde la información in situ es escasa. Debido a que la zona de estudio cuenta condiciones topográficas con poca pendiente y presenta alta nubosidad debido a su comportamiento climático unimodal, que está influenciado por las zonas de convergencia tropical, se plantea el uso de sensores radar para llevar a cabo el proyecto.

En conclusión, la teledetección haciendo uso de tecnología radar es una herramienta de análisis útil para la identificación de áreas inundables en lugares donde la información in situ es escasa y donde las condiciones climáticas no permiten el uso de sensores ópticos. Además, permite obtener información para ser utilizada por instituciones como Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, las corporaciones autónomas regionales y demás entes encargados de la prevención y manejo de desastres naturales.

5. Marco teórico

5.1. Marco conceptual

5.1.1. Inundaciones

Las inundaciones son una acumulación de agua sobre la superficie, en zonas que habitualmente se encuentran secas. Dentro de las principales variables para la determinación de inundaciones y sequías se relaciona la humedad aparente del suelo, que se define como el agua almacenada en la capa superior de la superficie terrestre.

5.1.2. Sistemas de Información geográfica

Los sistemas de información geográfica (SIG) integran el hardware, software y datos geográficos, y está diseñado para capturar, almacenar, administrar, analizar y desplegar toda la información espacial georreferenciada.

5.1.3. Percepción remota

La percepción remota integra un conjunto de técnicas y procedimientos para capturar información de un objeto o la superficie terrestre a través de sensores que pueden estar situados en satélites, aviones o estructuras estáticas. Dentro de la percepción remota del espectro electromagnético se pueden distinguir dos tipos básicos de sensores que se definen en: captador pasivo, detecta la radiación electromagnética emitida o reflejada de fuentes naturales y, captador activo, posee fuentes internas que generan artificialmente la radiación (radar).

5.1.4. Sentinel-1

Es un satélite Radar de Apertura Sintética. Actualmente tiene dos satélites de radar (ESA, 2018)). Sentinel-1A, se lanzó en abril de 2014 y está en pleno funcionamiento. Sentinel-1B, se lanzó en abril de 2016 y actualmente se encuentra en fase de calibración. Los dos satélites comparten la misma órbita polar, un solo satélite puede adquirir datos para toda la Tierra cada 12 días, el instrumento de radar contiene la banda C que operan a una longitud de onda de 5,55 cm.

5.1.5. ALOS Palsar - 1

El satélite ALOS porta un Radar de Apertura Sintética que captura información en la banda L y una frecuencia central de 1270 MHz, lo que da como resultado una longitud de onda de

23,62 cm., lanzado por la JAXA en 2006, que realizaba observación global hasta el fin de la vida útil de la misión en abril de 2011.

5.1.6. Polarización

El sistema SAR mide la matriz de reflexión difusa al transmitir con dos polarizaciones ortogonales, durante la transmisión, las dos polarizaciones ortogonales se alternan mediante pulsos sucesivos y, durante la recepción la señal de las dos polarizaciones se recibe de manera simultánea, generando cuatro canales de datos. Cuando la energía transmitida es polarizada en la misma dirección que la recibida, al sistema se le conoce como de polarización similar. HH indica que la energía se transmite y se recibe horizontalmente polarizada; VV que la energía se transmite y se recibe verticalmente polarizada.

5.1.7. Retrodispersión

La magnitud física medida directamente por el sensor radar es la intensidad de la radiación retrodispersada, la cual depende del Coeficiente de Retrodispersión o backscattering (σ^0) de cada superficie. Este coeficiente relaciona la energía retrodispersada con la recibida por unidad de área en la dirección del alcance terrestre. Cada tipo de cubierta tiene un Coeficiente de Retrodispersión o Reflectividad Radar promedio que depende principalmente de su conductividad o constante dieléctrica.

5.1.8. Ruido Speckle

Las imágenes de SAR tienen ruido de texturas tipo sal y pimienta denominadas moteado o ruido Speckle que hace más difícil la interpretación de características físicas de la superficie en las imágenes (Čotar, Oštir, & Kokalj, 2016). El ruido Speckle es causado por la aleatoriedad de interferencias constructiva y destructiva de las ondas de retorno con desfase, pero coherentes dispersadas dentro de las celdas de resolución (Čotar et al., 2016; Podest, s. f.).

5.1.9. Modelo digital de elevación (DEM)

Representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo. Estos valores están contenidos en un archivo de tipo Raster con estructura regular, en los modelos digitales de elevación existen dos cualidades esenciales que son la exactitud y la resolución horizontal o grado de detalle digital de representación que varían dependiendo del método que se emplea para generarlos. De esta denominación genérica pueden diferenciarse los términos Modelo Digital de Terreno (DTM) que hace referencia a un DEM en el que se representa solo la morfología del terreno (no está la información de las alturas de los objetos culturales ni de la vegetación) y Modelo Digital de Superficie (DSM) que incluye en su representación la altura de estos y los restantes objetos que están sobre la superficie de la tierra

5.1.10. Proyección Cartográfica

Es un sistema gráfico de representación de ubicaciones situadas en la superficie terrestre sobre posiciones representativas situadas sobre una superficie plana, por medio de transformaciones matemáticas.

5.1.11. Sistema de Referencia Geodésico

Un sistema de Referencia Geodésico es un estándar para su uso en la cartografía, geodesia y navegación. Se utiliza para determinar coordenadas de puntos sobre la superficie terrestre a través de un estándar de referencia de la superficie esférica (el datum o elipsoide de referencia), manteniendo una relación con el campo gravitacional.

5.1.12. Georreferenciación

La georreferenciación es un proceso para determinar en coordenadas cartográficas la posición de un elemento en un sistema de coordenadas espacial, diferente al que se encuentra, puesto que todos los elementos de una capa en un mapa tienen una ubicación geográfica, el cual permite situarlos en la superficie de la Tierra.

5.2. Marco teórico

La detección y análisis de cambios en la cobertura terrestre ha sido una actividad primordial para el ser humano desde siempre, Song, Sohn, & Park, (2007) proponen analizar y clasificar los cambios tanto en cuerpos de agua como en las coberturas, por medio de imágenes de radar (SAR); para el análisis los autores implementan una clasificación de áreas húmedas utilizando imágenes del sensor RADARSAT-1, para esto aplican una serie de pasos metodológicos que consisten en:

5.2.1. Reducción de ruido térmico

Acorde con la compresión y la cuantización de datos que determinan los bits o saturación de información en los datos, se relacionan la señal de entrada, ruido térmico y rendimiento del cuantificador (Snoei et al., 2009). el ruido térmico genera dificultad en la estimación precisa de la reflectividad en las imágenes SAR (Castro-Gómez, 2015b). A continuación, se presenta el modelo matemático que determina la reducción del mismo:

$$g(R) = (S + T)/Q \quad (1)$$

Donde, S es la cantidad de retrodispersión recibida, T es la cantidad de ruido térmico, Q es la cantidad de cuantización.

$$SNR(r) = [g^{-1}(R) + T/S(r) + g^{-1}(R).T/S(r)]^{-1} \quad (2)$$

Si se define $n(r)$ la función relación de los datos brutos y la imagen final, se podrá definir el ruido térmico como:

$$STR(r) = [S(r) \cdot n(r)] / [T \cdot n(r)] = \sigma^0(r) / NESZ(r) \quad (3)$$

Donde, σ^0 define la retrodispersión de la escena y $NESZ$ es el ruido equivalente a sigma.

5.2.2. Calibración Radiométrica

Como primer paso se realiza la calibración radiométrica, que consiste en convertir los valores digitales (DN) a coeficientes de retrodispersión (Song, Sohn, & Park, 2007). Para el cálculo de la retrodispersión (sigma) se debe calcular beta, que se caracteriza de la siguiente manera:

$$\beta_j^0 = 10 \times \log_{10}[(DN_j^2 + A_3)/A_{2j}] \quad (4)$$

Donde, A_{2j} es el valor de ganancia de escalado de j-ésimo píxel hacia una dirección de rango oblicuo, A_3 es un desplazamiento fijo y DN_j se refiere al número digital que representa la magnitud de j-ésimo píxel

$$\sigma_j^0 = \beta_j^0 + 10 \log_{10}(\sin I_j) \quad (5)$$

Donde, I_j es el ángulo de incidencia de j-ésimo del píxel.

$$I_j = \cos^{-1} \left[\frac{(h^2 - r_j^2 + 2 \cdot R \cdot h)}{2 \cdot r_j \cdot R} \right] \quad (6)$$

Donde, R es el radio de la tierra, h es la altitud de la órbita de la imagen, y r_j es el rango oblicuo de j-ésimo píxel.

$$r_j = a + j \cdot dRg \cdot b + (j \cdot dRg)^2 \cdot c + (j \cdot dRg)^3 \cdot d + (j \cdot dRg)^4 \cdot e + (j \cdot dRg)^5 \cdot f \quad (7)$$

Donde a , b , c , d , e , y f son los coeficientes de conversión desde un rango de tierra a un rango inclinado, y dRg representa el espaciado de píxeles.

5.2.3. Corrección Radiométrica de terreno

La corrección radiométrica por pendiente, está asociada al efecto topográfico del terreno en los cálculos radiométricos; se realiza con el fin de obtener los valores de retrodispersión sigma ajustados, ya que en el paso anterior se tomó la tierra como plana (Song, Sohn, & Park, 2007). Para realizar esta corrección se debe contar con un modelo digital de elevación de alta resolución; el modelo matemático se determina así:

$$P_r = \frac{P_t \lambda^2 G_t(\gamma) G_r(\gamma)}{(4\pi)^3 R^4} \sigma^0 A \quad (8)$$

Donde, P_r es la potencia recibida, P_t es la potencia transmitida, λ es la longitud de onda del radar, R es la distancia al área de dispersión, γ es el ángulo de mira del radar, $G_t(\gamma)$ y $G_r(\gamma)$ son las ganancias de antena de transmisión y recepción con un ángulo de observación gamma, σ^0 es el coeficiente de dispersión para el área A .

$$A = \frac{\delta_r \delta_a}{\sin(\eta)} \quad (9)$$

Donde, η es el ángulo de incidencia, δ_r y δ_a son el rango de inclinación y el espaciado de píxeles de azimut, respectivamente.

5.2.4. Reducción de Ruido Speckle

El ruido Speckle es un efecto de distorsión en la señal del radar, lo cual hace presentar un efecto de sal y pimienta en las imágenes (Castro-Gómez, 2015b; Lee, 1981; Podest, 2018b). Es necesario la corrección de dicho ruido para realizar análisis de manera óptima, para lo cual Lee, 1981 propone la aplicación de un filtro con el fin de, reducir ruidos radiométricos basándose en la aplicación de medidas estadísticas; a continuación, se presenta el modelo matemático:

$$z_{ij} = x_{ij} u_{ij} \quad (10)$$

Donde, z_{ij} equivale al valor del pixel, x_{ij} equivale al valor de la reflectividad y u_{ij} equivale al ruido; ij hacen referencia a la posición (fila y columna).

$$\hat{x}_{ij} = \bar{x}_{ij} + \bar{k}_{ij}(z_{ij} - \bar{x}_{ij}) \quad (11)$$

Donde, k es el coeficiente adaptativo del filtro Lee. Y se expresa de la siguiente manera:

$$k = \frac{var(x)}{\bar{x}_{ij}\sigma^2 + var(x)} \quad (12)$$

Donde, $var(x)$ es la influencia de la varianza entre la convolución de la media de la ventana de los pixeles analizados. $var(x)$ se determina de la siguiente manera:

$$var(x) = \left(\frac{var(z) + \bar{x}^2}{\sigma_v^2 + 1} \right) - \bar{x}^2 \quad (13)$$

5.2.5. Corrección geométrica de terreno

La corrección geométrica de terreno o geocodificación consiste en la reproyección de coordenadas en un grupo de imágenes asociadas (Wegmiller, 1999). En SAR se menciona la transformación de coordenadas de rango Doppler a coordenadas de mapa ortogonal asociado, en la geocodificación es necesario el uso de datos tomados en campo o de otros sensores, como producto de reproyección. Para llevar a cabo esta corrección se utiliza la descripción de la geometría y proyección de los productos SAR, para así asociar los puntos de control extraídos del DEM que se usará como producto de reproyección. A continuación, se presenta el modelo matemático:

$$A = \frac{az \cdot r}{\cos \psi} \quad (14)$$

Donde, α_z es el azimut del pixel espaciado, r es la inclinación del pixel espaciado y ψ ángulo de proyección definido como el ángulo entre la normal de la superficie y la normal del plano de la imagen (ver Figura 1).

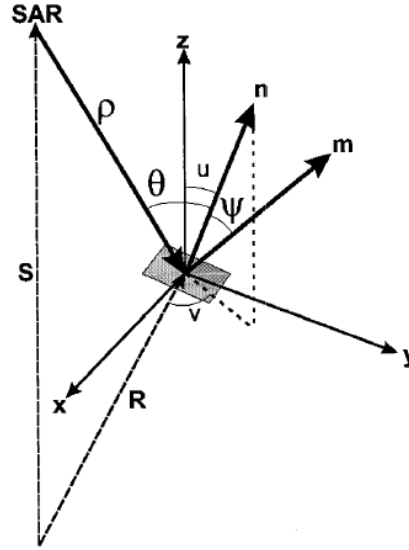


Figura 1 Relación de planos de superficie e imagen SAR

Fuente: Wegmiiller, 1999

Figura 1: Geometría de imágenes SAR con vectores: x azimut, z vertical, r vector de observación del radar, R centro de la Tierra a píxel, S centro de la Tierra a SAR, n superficie normal y m normal del plano de la imagen y ángulos: θ (ángulo de incidencia local), ψ (ángulo de proyección) y u, v (ángulos esféricos de n).

5.2.6. Matriz de Co-ocurrencia

La matriz de co-ocurrencia (GLCM por sus siglas en inglés) puede revelar propiedades y patrones en una imagen sobre la espacialización de los niveles de gris (Pathak & Barooah, s. f.). Consiste en determinar la homogeneidad, el contraste, la disimilitud, energía, el segundo momento angular y la correlación; se determina por medio de una matriz bidimensional que proporciona la ocurrencia entre los pares de pixel a nivel de grises. La base de esta matriz es la relación con el vecino más cercano, teniendo en cuenta los cambios en cada fracción de la imagen analizada por la ventana del método del vecino.

$$M_{CO} = \sum_{x=1}^K \sum_{y=1}^K \begin{cases} 1, si I(x, y) = i, y I(x + d_x, y + d_y) = j \\ 0, de otra manera \end{cases} \quad (15)$$

Donde, I es la imagen de dimensión $K \times K$, (x, y) son posiciones en la imagen y el vector $d(d_x, d_y)$ es quien define el desplazamiento de la matriz.

5.2.6.1. Grupo de contraste.

- *Contraste*

$$\sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} (i - j)^2 \quad (16)$$

Donde, $P_{i,j}$ representa la matriz de co-ocurrencia, i, j representa las posiciones en la matriz

- *Disimilitud*

$$\sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} |i - j| \quad (17)$$

Donde, $P_{i,j}$ representa la matriz de co-ocurrencia, i, j representa las posiciones en la matriz

- *Homogeneidad*

$$\sum_{i,j=0}^{N-1} \frac{P_{i,j}}{1 + (i - j)^2} \quad (18)$$

Donde, $P_{i,j}$ representa la matriz de co-ocurrencia, i, j representa las posiciones en la matriz

5.2.6.2. Grupo de orden y estadística.

- *Segundo Momento Angular (ASM)*

$$\sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j}^2 \quad (19)$$

Donde, $P_{i,j}$ representa la matriz de co-ocurrencia, i, j representa las posiciones en la matriz

- *Energía*

$$\sqrt{ASM} \quad (20)$$

- *Correlación*

$$\sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} \left[\frac{(i - \mu_i)(j - \mu_j)}{\sqrt{(\sigma_i^2)(\sigma_j^2)}} \right] \quad (21)$$

Donde, $P_{i,j}$ representa la matriz de co-ocurrencia, i, j representa las posiciones en la matriz, μ, σ representan la Media y Desviación Estándar de la matriz.

5.2.7. Clasificación

Para el análisis de dinámicas y cambios es posible relacionar la interacción de las crecidas o inundaciones que se presentan por altas precipitaciones en la superficie (Cazals et al., 2016a). Las redes neuronales tipo Feed Foward han sido ampliamente utilizados en percepción remota para resolver problemas de identificación o clasificación (Basogain Olabe, 2008; Taravat, Proud, Peronaci, Del Frate, & Oppelt, 2015).

Para la clasificación se define una red neuronal que identificará valores de umbral de retrodispersión, y determinará zonas inundables y no inundables. Se propone una red Feed

Forward para el estudio, declarada por (Papantonopoulos, Takahashi, Bountis, & Loos, 2014). A continuación, se presenta la arquitectura de la red:

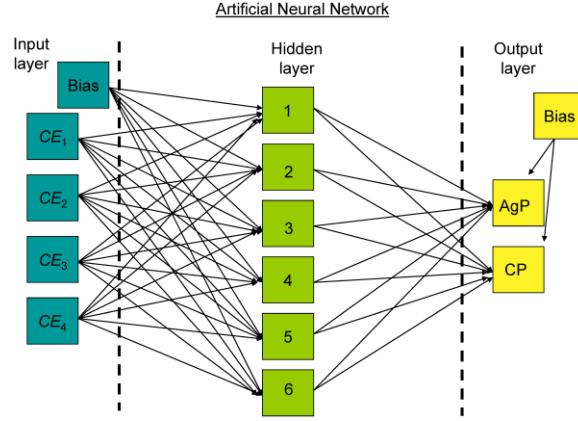


Figura 2 Red Neuronal Artificial

Fuente: Papantonopoulos et al., (2014)

Papantonopoulos et al., (2014) apuntan a la realización del análisis, que partiendo como insumo principal las imágenes de radar obtenidos del satélite Sentinel-1 y complementando con datos externos; entre los insumos están relacionados las ya mencionadas imágenes de radar (imagery SAR), un modelo digital de elevación obtenido a partir de datos LiDAR y Datos de muestra piezométrica (información tomada en campo).

Para la elaboración del clasificador, los autores optaron por la implementación de una red neuronal FeedForward, que se describe como una red supervisada en el modelo del perceptrón multicapa (MLP), con método de aprendizaje BackPropagation (Caicedo B, & López S, 2009).

$$x_p = [x_{p1}, x_{p2}, \dots, x_{pi}, \dots, x_{pN}]^T \quad (22)$$

Donde:

x_p es el patrón o vector de entrada de la red, x_{pi} entrada i -ésima del vector de entrada.

A partir del vector de entrada se calcula la entrada neta en la j -ésima neurona de la capa oculta:

$$Neta_{pj}^h = \sum_i^N w_{ji}^h x_{pi} + \theta_j^h \quad (23)$$

Donde:

$Neta_{pj}^h$ es la entrada neta de la j -ésima neurona de la capa oculta, w_{ji}^h es el peso de interconexión entre la neurona i -ésima de la entrada y la j -ésima de la capa oculta, x_{pi} entrada i -ésima del vector de entrada, θ_j^h término de tendencia de la neurona j -ésima de la capa oculta.

Se calcula la salida de la neurona j -ésima usando la función de activación y la entrada neta:

$$i_{pj}^h = f_j^h(Neta_{pj}^h) \quad (24)$$

Donde:

i_{pj}^h salida de la j -ésima neurona de la capa oculta, f_j^h función de activación de la j -ésima unidad oculta, $Neta_{pj}^h$ es la entrada neta de la j -ésima neurona de la capa oculta.

Después de calcular las salidas de la capa oculta, se debe calcular la entrada neta de la k -ésima neurona de la capa de salida:

$$Neta_{pk}^0 = \sum_{j=1}^L w_{kj}^0 i_{pj}^0 + \theta_k^0 \quad (25)$$

Donde:

$Neta_{pk}^0$ entrada neta de la k -ésima neurona de la capa de salida, w_{kj}^0 es el peso de interconexión entre la neurona j -ésima de la entrada y la k -ésima de la capa de salida, i_{pj}^0 salida de la j -ésima neurona de la capa oculta, θ_k^0 termino de tendencia de la neurona k -ésima de la capa de salida.

$$y_{pk} = f_k^0(Neta_{pk}^0) \quad (26)$$

Donde:

y_{pk} salida de la k -ésima unidad de salida, f_k^0 función de activación de la k -ésima unidad de salida, $Neta_{pk}^0$ entrada neta de la k -ésima neurona de la capa de salida.

Con ello se calcula los términos de error para las unidades de salida.

$$\delta_{pk}^o = (d_{pk} - y_{pk}^o) f_k^{o'}(Neta_{pk}^o) \quad (27)$$

Donde:

δ_{pk}^o Término de error para la k -ésima neurona de la capa de salida, d_{pk} Valor de salida deseado para la k -ésima neurona de la capa de salida.

Se estiman los términos de error para las unidades ocultas.

$$\delta_{pj}^h = f_j^{h'}(Neta_{pj}^h) \sum_{k=1}^M \delta_{pk}^o w_{kj}^o \quad (28)$$

Donde:

δ_{pj}^h Término de error para la j -ésima neurona de la capa oculta h .

Se actualizan los pesos sinápticos en la capa de salida

$$w_{kj}^o(t+1) = w_{kj}^o(t) + \alpha \delta_{pk}^o i_{pj}^h \quad (29)$$

Se actualizan pesos en la capa oculta

$$w_{ji}^h(t+1) = w_{ji}^h(t) + \alpha \delta_{pj}^h x_{pi} \quad (30)$$

Finalmente se verifica si el error global cumple con la condición de finalización, sino se repite el mismo procedimiento.

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^M (d_{pk} - y_{pk})^2 \quad (31)$$

5.3. Marco Referencial

La respuesta Radar o Retrodispersión concuerda respecto a los parámetros del sensor, como pueden ser: ángulo de incidencia, polarización (emisión y recepción de la señal), longitud de onda y entre otras (Widhalm, Bartsch, & Heim, 2015).

Para determinación de áreas inundables, se debe analizar el contenido de humedad en el suelo, para ello se debe estudiar la constante dieléctrica, ya que esta cambia dependiendo del tipo de cobertura (Widhalm et al., 2015); los autores (Ulaby, Moore, & Fung, 1981) determinan que para alta humedad los valores de retrodispersión son bajos, ya que la constante dieléctrica es alta; en Radar cuando se analiza humedad y/o agua bajo bosques la respuesta de la retrodispersión cambia debido a que el conjunto de los bosques y el agua generan efecto de doble rebote autores (Ulaby, Moore, & Fung, 1981; Widhalm, Bartsch, & Heim, 2015).

Čotar, Oštir, & Kokalj, (2016) identificaron los cuerpos de agua mediante imágenes de radar del satélite Sentinel 1, empleando datos auxiliares sobre los cuerpos de agua permanentes y contrastándolos con un análisis de histogramas de las imágenes. (Manalili, 2018) aplicó una metodología de muestreo de umbrales en los valores de retrodispersión sigma, debidamente suavizados mediante el índice de diferencia normalizada de sigma (NDSI).

Castro-Gómez, (2015) realiza diagnósticos basados en la aplicación de análisis de umbral conjunto a operaciones directas para la determinación de áreas inundables. Estas pueden ser más precisas y eficientes si se compara con análisis con algunos sensores ópticos. Existen evaluaciones basados en la aplicación de análisis de umbral conjunto a operaciones directas, para la determinación de áreas inundables (Podest, 2018). Plantea pasos metodológicos de preprocesamiento referenciados por una amplia cantidad de autores, los cuales hacen la base del procesamiento de imágenes de Radar (SAR), sin embargo, los análisis que se lleguen a realizar por postprocesos varían a partir del resultado al que se quiera llegar. En este caso los autores realizan un análisis de inundación, para lo cual se analizan las zonas húmedas, zonas inundadas y zonas secas por medio de la clasificación o análisis de umbrales de retrodispersión.

De otra manera (Irwin, Beaulne, Braun, & Fotopoulos, 2017) proponen el pre-proceso de imágenes de radar utilizado por una amplia cantidad de autores, como punto de partida en la clasificación obtienen 3 clases Agua, No Agua e Indefinido, para reducir la incertidumbre en las áreas identificadas como indefinidas. Irwin et al., (2017) proponen el uso de técnicas estadísticas como: comparación de umbrales, distribución normal, cálculo de mínimos locales, varianza, media y entre otros; aplicando dichos métodos Irwin et al., (2017) determinan que en la zona existen áreas de transición que fueron clasificadas por medio de la humedad aparente del suelo y fueron clasificadas porcentualmente donde se evalúa el agua superficial.

Existen metodologías de muestreo de umbrales para identificar cuerpos de agua por medio de valores de retrodispersión sigma; para el post-procesamiento de las imágenes de radar Manalili, (2018) plantean la implementación del uso de lenguaje de código abierto, para el pre-proceso de las imágenes los autores proponen el uso de del software SNAP. Posterior a la preparación de los productos Radar, se realiza el análisis de histogramas de las imágenes, esto para extraer los umbrales de clasificación, para realizar la extracción se debe realizar un suavizado de histogramas por medio del índice de diferencia normalizada de sigma (NDSI).

Para la aplicación del NDSI, se precisa del uso de una imagen maestra y una esclava (que identifica el pre-inundación y post-inundación) y así poder identificar los cambios en la superficie, para evaluar el índice se debe aplicar el registro a las imágenes, que relaciona los valores digitales y las correcciones térmicas y demás ruidos atmosféricos. Cabe resaltar que el NDSI se aplica a los pixeles por medio local (acorde a su vecindad cuadrada).

Para la identificación de zonas inundables se hace uso de un DEM al cual se le extrae la pendiente, que servirá para limitar y caracterizar por valores de alta y baja pendiente los cuerpos de agua y zonas inundables.

Por otro lado Karszenbaum et al., (2000) determinan que para la identificación de áreas inundables es necesario el uso de información in situ, como también estudios de coberturas y humedad del suelo en la zona de estudio, estos como producto de validación. Para la identificación Karszenbaum et al., (2000) utilizan 2 sensores con canal simple (polarización simple), con el fin de obtener un análisis más detallado del comportamiento de la retrodispersión en la zona de estudio, cada sensor con su canal identifica humedad en diferentes rangos, realizando llenado de información de acuerdo con a su método de emisión y recepción.

De acuerdo con Kwoun & Lu, (2009) para llegar a una buena clasificación de coberturas e inundación, se deben registrar tomas de diferentes coberturas para así identificar cambios en series de tiempo, para lo cual Kwoun & Lu, (2009) toman 9 coberturas incluyendo agua y anegamientos, para así comprarlas con los productos Radar usados y estimar el valor de retrodispersión adecuado de inundación, ya que en su metodología proponen la combinación de dos sensores SAR. Kwoun & Lu, (2009) proponen el análisis de coberturas ya

que existen sensores que muestran variaciones fuera de lo normal en algunas coberturas, estas variaciones son causadas por condiciones ambientales o en algunos casos por errores sistemáticos no definidos, para ello Kwoun & Lu, (2009) realizan la calibración radiométrica haciendo uso de objetos fijos como áreas urbanas, carreteras y entre otros, para definirlos como puntos de partida, ya que sus valores de retrodispersión no varían en el tiempo a pesar de las condiciones climáticas, son constantes.

6. Metodología

6.1. Zona de estudio

La Reserva Forestal Protectora Nacional del Río León, se encuentra ubicada entre la jurisdicción del departamento de Antioquia y Chocó, cuenta con una extensión de 38.938 ha (SIDAP, 2010). La reserva es atravesada por dos importantes afluentes como son el río León y Tumaradocito.

La cuenca del río León, nace en la zona suroccidental de la serranía de Abibe al norte del municipio de Mutatá y el río desemboca en el golfo de Urabá, esta cuenca es integrada por un conjunto de subcuencas entre las cuales se destacan Chigorodó, Carepa y Apartadó. La mecánica hídrica de la cuenca ha sido afectada por la versatilidad dinámica agrícola y aprovechamiento forestal en la zona (IDEAM, 2001).

La subcuenca del río Tumaradocito nace en la zona sureste dentro de la reserva del río León, en el sector de Nuevo Oriente, y hace parte de la cuenca del río Atrato, el río Tumaradocito drena de manera directa al río Atrato. Esta subcuenca está integrada por un conjunto de drenajes pequeños, que entre los cuales se destacan Caño El Peligro, Caño La Bache y Caño Macondo. Al igual que la cuenca del río León se ha visto afectada la mecánica hídrica por la versatilidad dinámica agrícola y aprovechamiento forestal en la zona (IDEAM, 2001; Senado de la República de Colombia, 2007).

La reserva del río León se encuentra aproximadamente a 20 m.s.n.m., se sitúa en la planicie aluvial del río Atrato (llanura de inundación), y cuenta con una pendiente promedio del 4% (Anaya et al., 2017; SIDAP, 2010). El comportamiento climático está influenciado por las zonas de convergencia tropical que generan un comportamiento unimodal para esta zona, que consta de una temporada seca que inicia en el mes de enero y finaliza en marzo y para el resto del año se comprende la temporada húmeda (Anaya et al., 2017; IDEAM, 2001; SIDAP, 2010). La zona cuenta con una precipitación total anual promedio para el municipio de Turbo de hasta 2000 milímetros (zona media baja de la cuenca del río León), y para los municipios de Mutatá y Villarraga (nacimiento del río León) oscilan alrededor de los 4000 milímetros y cuenta con una temperatura promedio de 28°C (IDEAM, 2001).

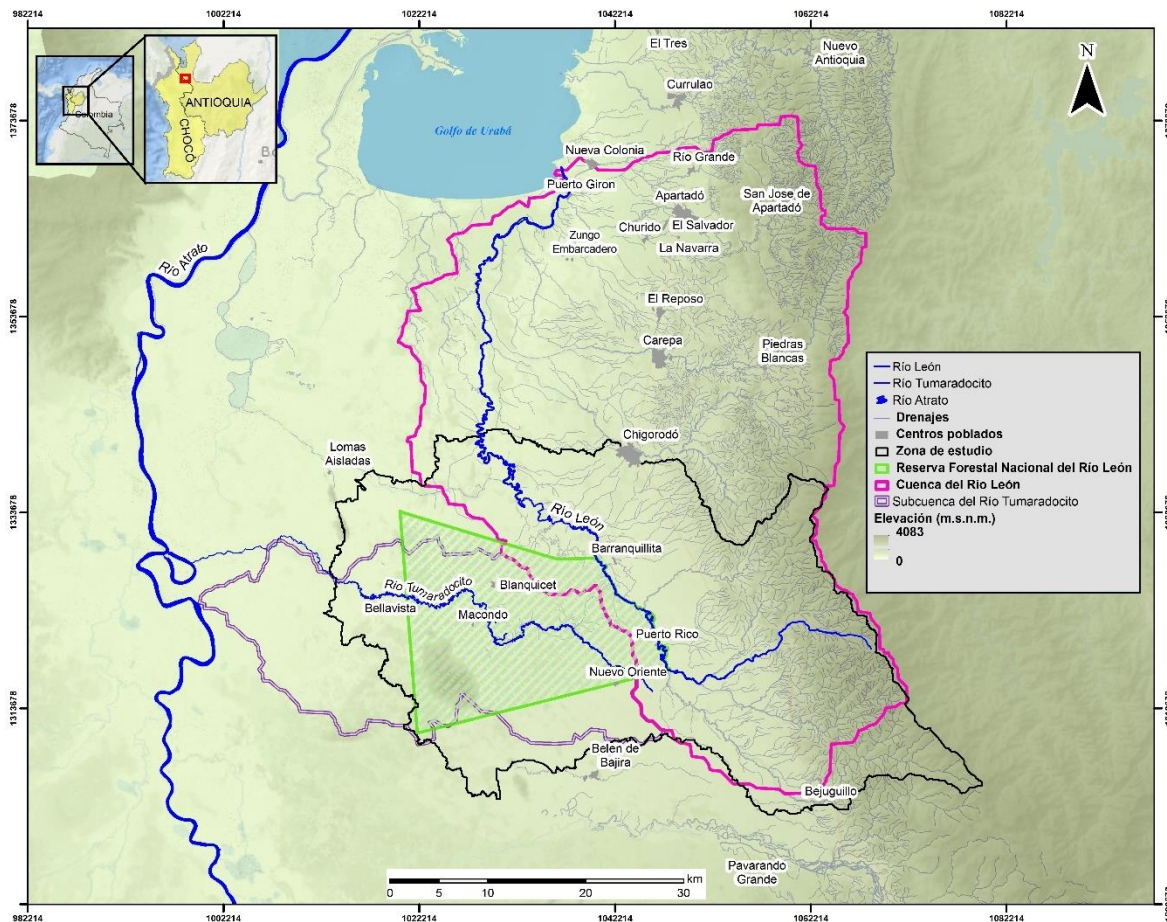


Figura 3 Zona de estudio

Fuente: WWF, IGAC, CORPOURABÁ

6.2. Fuentes de información

Para la determinación de áreas inundadas se utilizaron 2 insumos principales que se dividen en el uso de Imágenes de dos sensores radar e información meteorológica; los sensores empleados fueron Sentinel-1 y ALOS Palsar 1.

Sentinel-1 actualmente tiene dos satélites de radar. Sentinel-1A, se lanzó en abril de 2014 y está en pleno funcionamiento. Sentinel-1B, se lanzó en abril de 2016 y actualmente se encuentra en fase de calibración. Los dos satélites comparten la misma órbita polar, un solo satélite puede adquirir datos para toda la Tierra cada 12 días, el instrumento de radar contiene la banda C que operan a una longitud de onda de 5,55 cm (Cazals et al., 2016b). Los productos de Sentinel-1 son de acceso libre y se pueden conseguir en la página de Alaska Satellite Facility (<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/?#>)

ALOS Palsar 1 es un sensor que cuenta con banda L y una frecuencia central de 1270 MHz, lo que da como resultado una longitud de onda de 23,62 cm., lanzado por la JAXA en 2006, que realizaba observación global hasta el fin de la vida útil de la misión en abril de 2011

(Chapman et al., 2015). Los productos de ALOS Palsar 1 son de acceso libre y se pueden conseguir en la página de Alaska Satellite Facility (<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/?#>)

Las estaciones hidrometeorológicas de IDEAM, se encuentran situadas en gran parte del territorio colombiano. Para el este estudio se seleccionaron las estaciones con mayor información que estuvieran dentro y más próximas a la zona de estudio. Se obtuvo información mensual de 1 estación, la estación de Nuevo Oriente que está ubicada en latitud 7°27'37.2" norte, longitud 76°41'22.4" oeste.

En la selección de imágenes para el análisis, se tuvo en consideración dos factores importantes. Uno de estos es la información meteorológica (estaciones de IDEAM), con la cual se determinó periodos de máxima y mínima precipitación en la zona. El otro factor correspondió a la disponibilidad de información de los sensores en los periodos identificados por medio de la información meteorológica.

- Productos Utilizados

Tabla 1 Productos utilizados

Sensor	Nombre	Fecha
Alos-Palsar 1	ALPSRP212400130	19-01-2010
Alos-Palsar 1	ALPSRP225820130	21-04-2010
Alos-Palsar 1	ALPSRP232530130	06-06-2010
Alos-Palsar 1	ALPSRP245950130	06-09-2010
Sentinel-1	S1B_IW_GRDH_1SDV_20170107T232203_20170107T232228_003749_006714_EDE3	07-01-2017
Sentinel-1	S1B_IW_GRDH_1SDV_20170224T232202_20170224T232227_004449_007BE1_707B	24-02-2017
Sentinel-1	S1B_IW_GRDH_1SDV_20170320T232202_20170320T232227_004799_00861A_655A	20-03-2017
Sentinel-1	S1B_IW_GRDH_1SDV_20170425T232204_20170425T232229_005324_009543_CF2C	25-04-2017
Sentinel-1	S1B_IW_GRDH_1SDV_20170519T232207_20170519T232232_005674_009F02_58BB	19-05-2017
Sentinel-1	S1B_IW_GRDH_1SDV_20170624T232209_20170624T232234_006199_00AE48_58A0	24-06-2017
Sentinel-1	S1B_IW_GRDH_1SDV_20170706T232209_20170706T232234_006374_00B339_E081	06-07-2017
Sentinel-1	S1B_IW_GRDH_1SDV_20170823T232212_20170823T232237_007074_00C766_0FDA	23-08-2017
Sentinel-1	S1B_IW_GRDH_1SDV_20170928T232214_20170928T232239_007599_00D6AB_5B7B	28-09-2017

Sentinel-1	S1B_IW_GRDH_1SDV_20171010T232214_20171010T232239_007774_00DBAF_2077	10-10-2017
Sentinel-1	S1B_IW_GRDH_1SDV_20171127T232213_20171127T232238_008474_00F04C_9DF7	27-11-2017
Sentinel-1	S1B_IW_GRDH_1SDV_20171221T232212_20171221T232237_008824_00FB6A_99A7	21-12-2017

6.3. Pre proceso de imágenes ALOS-Palsar y Sentinel-1

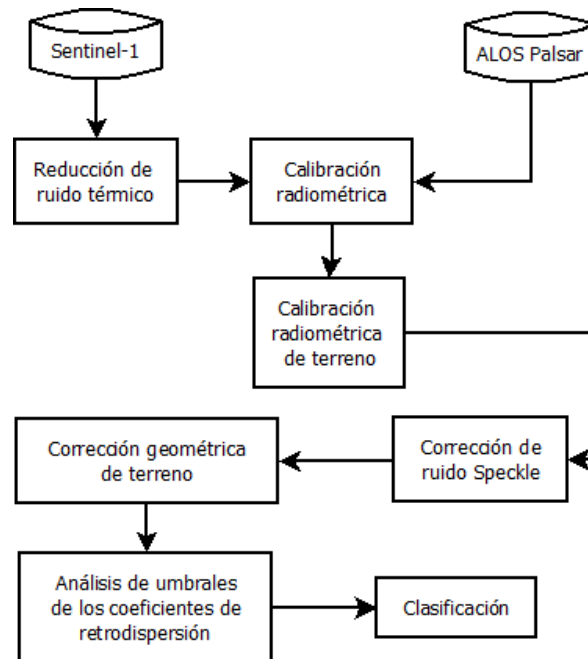


Figura 4 Metodología

De acuerdo con la metodología, exceptuando la reducción de ruido térmico se realizó cada paso metodológico de manera independiente para los productos de cada sensor.

6.3.1. Reducción de Ruido Térmico:

El ruido térmico es la energía de trasfondo que es generado por el receptor, dicho ruido sesga la reflectividad de la señal hacia valores altos y obstaculiza la precisión en las medidas del sensor. Los productos de primer nivel de Sentinel-1 albergan un metadato con parámetros para llevar a cabo la corrección o reducción del ruido generado. Para llevar a cabo la reducción de ruido térmico se emplean las ecuaciones (1), (2) y (3).



Figura 5. Reducción de ruido térmico de imágenes SAR

En la Figura 5 se puede notar que, con respecto a la imagen bruta los valores digitales se suavizan ya que el ruido generado sesga la respuesta hacia valores altos, en comparación visual la imagen bruta en contra a la corregida se ve más brillante y no se pueden detallar algunos objetos.

6.3.2. Calibración radiométrica:

La calibración radiométrica es la conversión de valores digitales de la imagen (DN) a valores de coeficientes de retrodispersión de la superficie reflectante del Radar, para el cálculo se hace uso de las ecuaciones (4), (5), (6) y (7), y se obtendrá los valores Sigma y Beta para la zona de estudio.

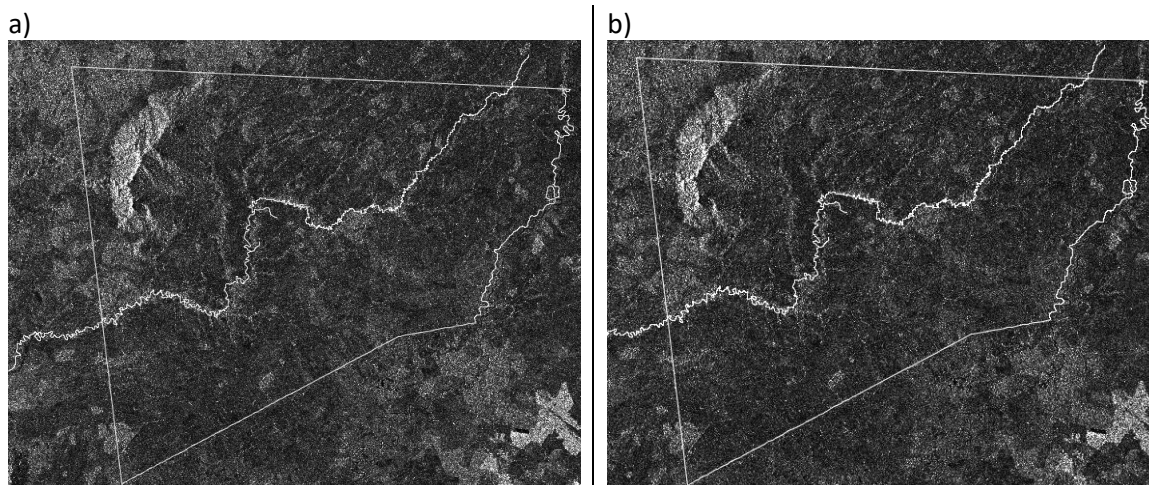


Figura 6. Imágenes de calibración radiométrica a) Sigma b) Beta.

En la **Figura 6** se obtuvieron 2 imágenes de salida ya que, de acuerdo con la metodología propuesta para el siguiente paso de calibración radiométrica de terreno, es necesario tener una banda Sigma y una banda Beta.

6.3.3. Calibración radiométrica de terreno:

Cuando se realizan clasificaciones de la cobertura terrestre por métodos de teledetección, existen zonas que, por su topografía no plana, producen resultados inexactos. Dichos resultados se deben a variaciones en el terreno que no solamente afectan la posición de un objetivo, incluso el retorno de la señal radar. La finalidad del análisis es identificar y clasificar áreas de inundación de la manera más detallada posible, se propone la corrección radiométrica de terreno para así corregir los errores asignados por retorno de sombras en zonas montañosas. Las ecuaciones (8) y (9) determinan el modelo matemático que describe la corrección radiométrica de terreno.



Figura 7. Imagen de calibración radiométrica de terreno (Terrain Flattening)

En la **Figura 7** se obtuvo la corrección de valores radiométricos en la zona, por medio del efecto topográfico, ya que existen partes de la zona de estudio que por su topografía genera sombras y se puede tomar como inundación aparente.

6.3.4. Reducción de ruido Speckle:

Se aplicó un filtro de Speckle tipo Lee con una ventana de filtrado de tamaño 3x3. El filtro de Lee se basa en suponer que la media y la varianza del píxel considerado, son iguales a la media y la varianza local de los píxeles de la ventana móvil, definida con referencia a la necesidad de la investigación y del ruido que tenga la imagen SAR. Las ecuaciones que definen el modelo utilizado están definidas en las (10), (11), (12) y (13).

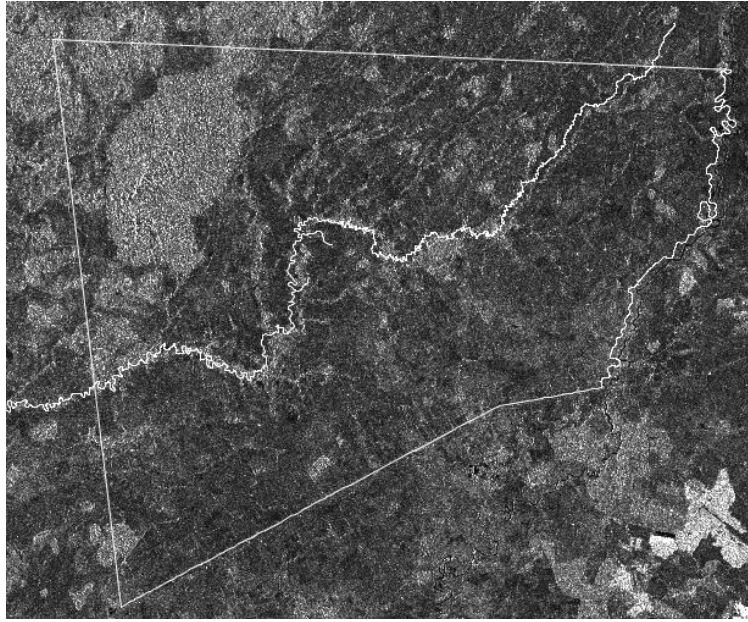


Figura 8. Reducción de Ruido Speckle

En la **Figura 8** se presenta la imagen resultante de la reducción de Ruido Speckle, y efectivamente se reduce el ruido de tipo sal pimienta, lo que permite detallar más precisamente objetos y para este caso, áreas con agua aparente.

6.3.5. Corrección geométrica de terreno:

La corrección geométrica de terreno transformará la orientación radar de las imágenes y las llevara al sistema de referencia adecuado con su respectiva orientación geométrica real de terreno, por tanto, como último paso del pre-procesamiento, se aplicará la corrección geométrica del terreno para compensar las distorsiones y re-proyectar la escena a la proyección geográfica (Song et al., 2007b). A partir de los archivos de orbita, ángulo de inclinación del sensor y la debida corrección con un modelo digital de terreno preciso, para realizar esta corrección se hace uso de la ecuación (14)

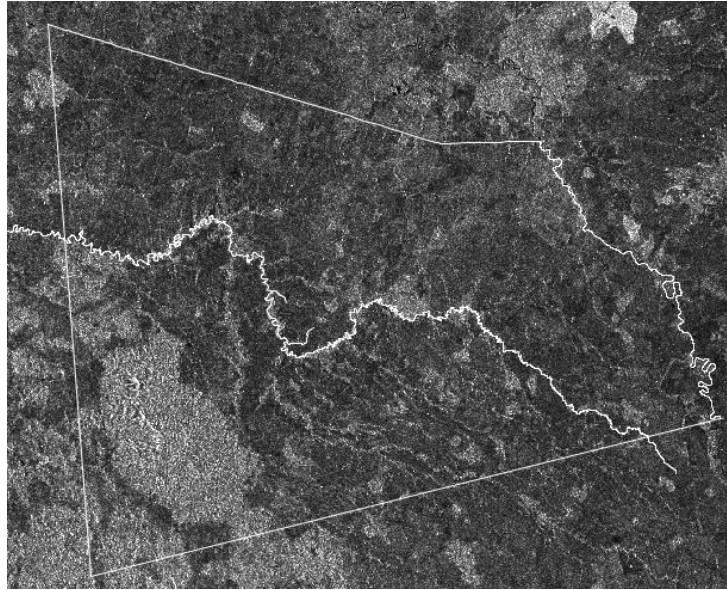


Figura 9. Corrección geométrica de terreno.

En la Figura 9 se obtiene debidamente orientada y Geocodificada la imagen SAR.

- Como la resolución espacial de los productos de cada sensor es diferente (Sentinel-1 10m y Alos 12.5m), resoluciones que cambian después de aplicar el filtro lee en la reducción del ruido Speckle, por lo tanto, se ajusta la salida de los productos Sentinel con un tamaño de pixel de 38m x 38m, misma resolución de la salida de los productos de Alos-Palsar.

6.3.6. Análisis de umbrales de los coeficientes de retrodispersión

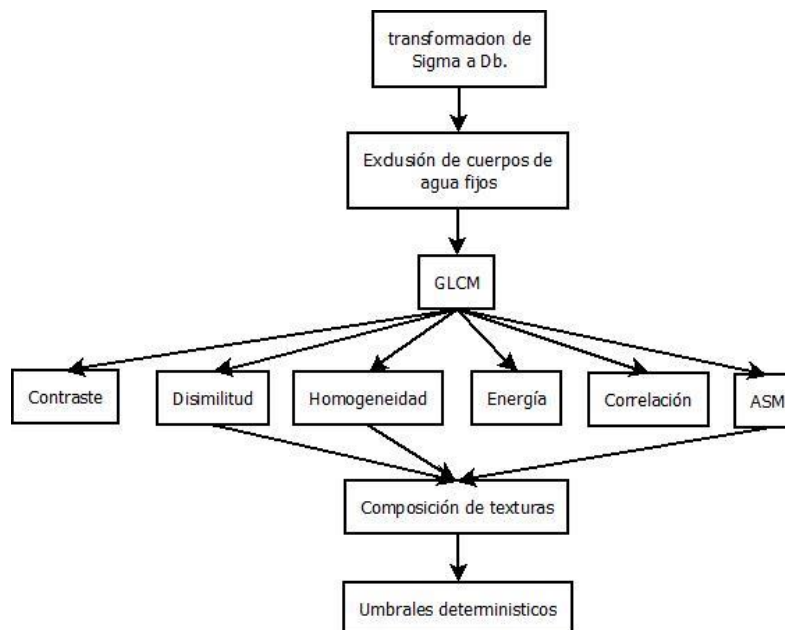


Figura 10 Flujo metodológico del análisis de umbrales de los coeficientes de retrodispersión

6.3.6.1. Transformación de Sigma a dB

Para realizar la transformación de los valores de Sigma a dB, se utilizó el resultado obtenido en el paso metodológico 6.3.5, empleando la siguiente ecuación de acuerdo con Castro-Gómez, (2015):

$$\sigma^0[dB] = (20 \times \log_{10}(\omega)) - 83 \quad (32)$$

Donde, ω es el resultado de la corrección geométrica de terreno.

6.3.6.2. Exclusión de cuerpos de agua fijos

Para excluir los cuerpos de agua fijos, se seleccionó un umbral para cada producto resultante del paso anterior. Para esto, se analizó el histograma del coeficiente de retrodispersión filtrado. Los valores bajos de la retrodispersión corresponden a cuerpos de agua fijos.

6.3.6.3. Matriz de Co-Ocurrencia:

En el análisis de información espacial, la forma de las características de la textura puede ser usados para la clasificación de imágenes. La textura es el patrón de variaciones de intensidad en las imágenes y puede ser usada para el mejoramiento de precisión en las clasificaciones de coberturas. En la extracción de la textura y evaluación de la GLCM se emplean las ecuaciones (15), a (21). Basado en el resultado anterior se aplica la GLCM.

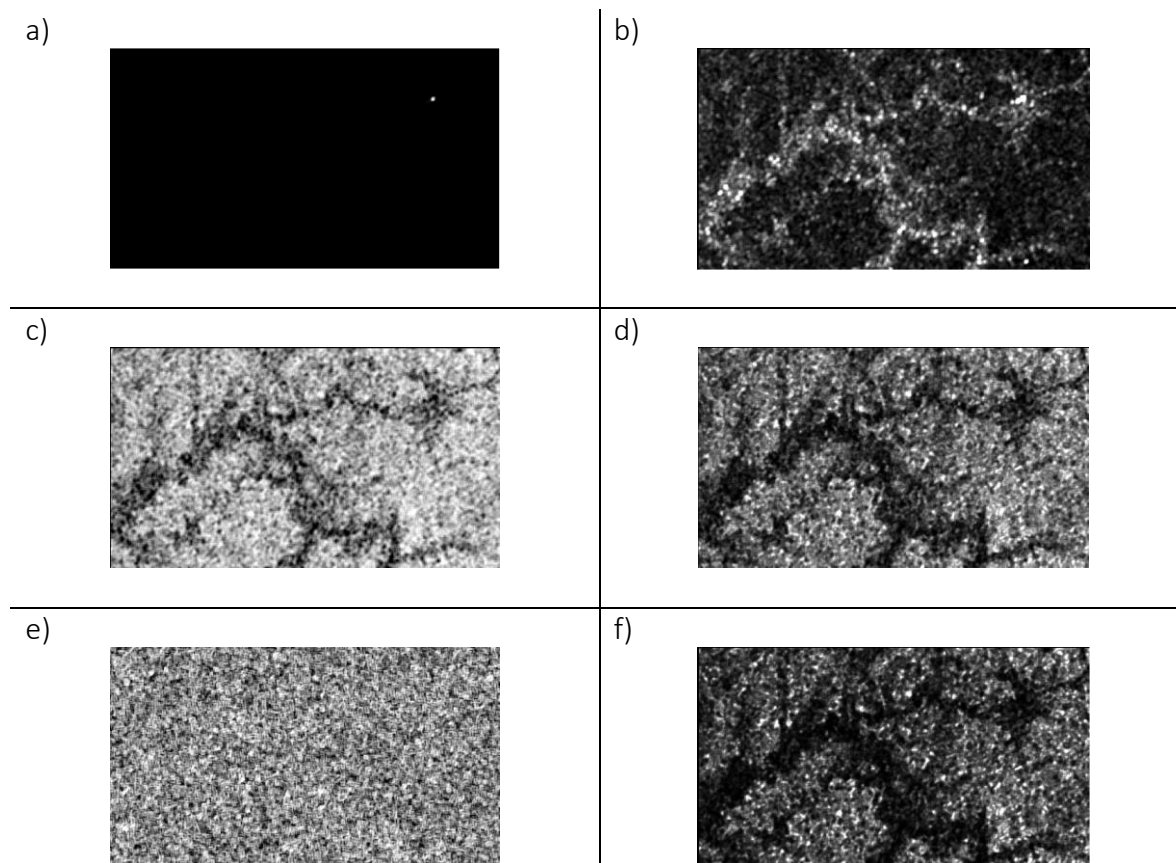


Figura 11. Aplicación de matriz de co-ocurrencia y texturas. a) Contraste, b) Disimilitud, c) Homogeneidad, d) energía, e) Correlación y f) ASM

En la Figura 11 se muestra el resultado del cálculo de texturas, para lo que se analiza por partes la zona de estudio, para así estudiar más detalladamente el fenómeno.

6.3.6.4. Composición de texturas

Para llegar a la clasificación de umbrales y determinar las áreas inundables, se realizó el análisis de texturas por medio de la matriz de co-ocurrencia para cada producto utilizado. Para generalizar las áreas inundadas bajo dosel por medio de la matriz de co-ocurrencia se realizó la composición de 3 de las 6 imágenes de texturas que se obtuvieron, teniendo en cuenta cual era más determinística en el análisis.

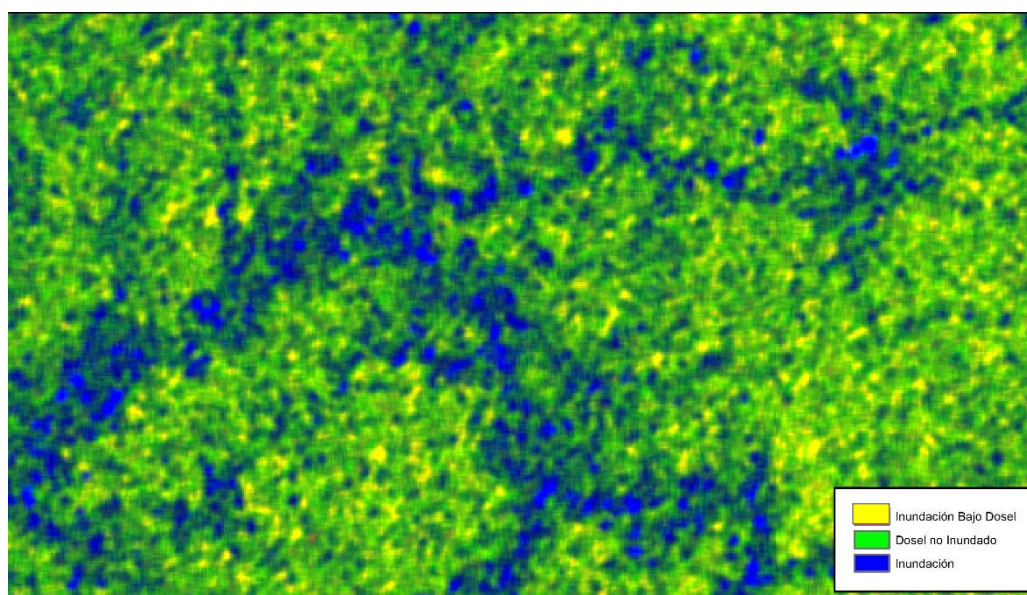


Figura 12. Composición de texturas. Homogeneidad, Disimilitud y ASM

En la Figura 12 se presenta la composición de las texturas seleccionadas, que fueron Homogeneidad, Disimilitud y ASM. Lo que se puede analizar y determinar es que las zonas de color amarillo y azul representan áreas inundadas, con lo cual se tomaron muestras de dichas zonas.

6.3.6.5. Umbrales Determinísticos

Después de identificar áreas con inundación aparente tanto bajo dosel y a cielo abierto, por medio de los patrones encontrados en la matriz de co-ocurrencia y por medio de la conversión a decibeles, se estima el valor de retrodispersión de las áreas inundadas, donde el valor estimado para Sentinel el umbral fue de < -105 dB y, para ALOS-Palsar el umbral fue de < -110 dB, se definen los umbrales en decibeles para así mantener la homogeneidad de los valores primeramente hallados por medio de la conversión de sigma a dB, ya que fue la

base para la identificación de inundaciones a cielo abierto y la exclusión de cuerpos de agua permanentes.

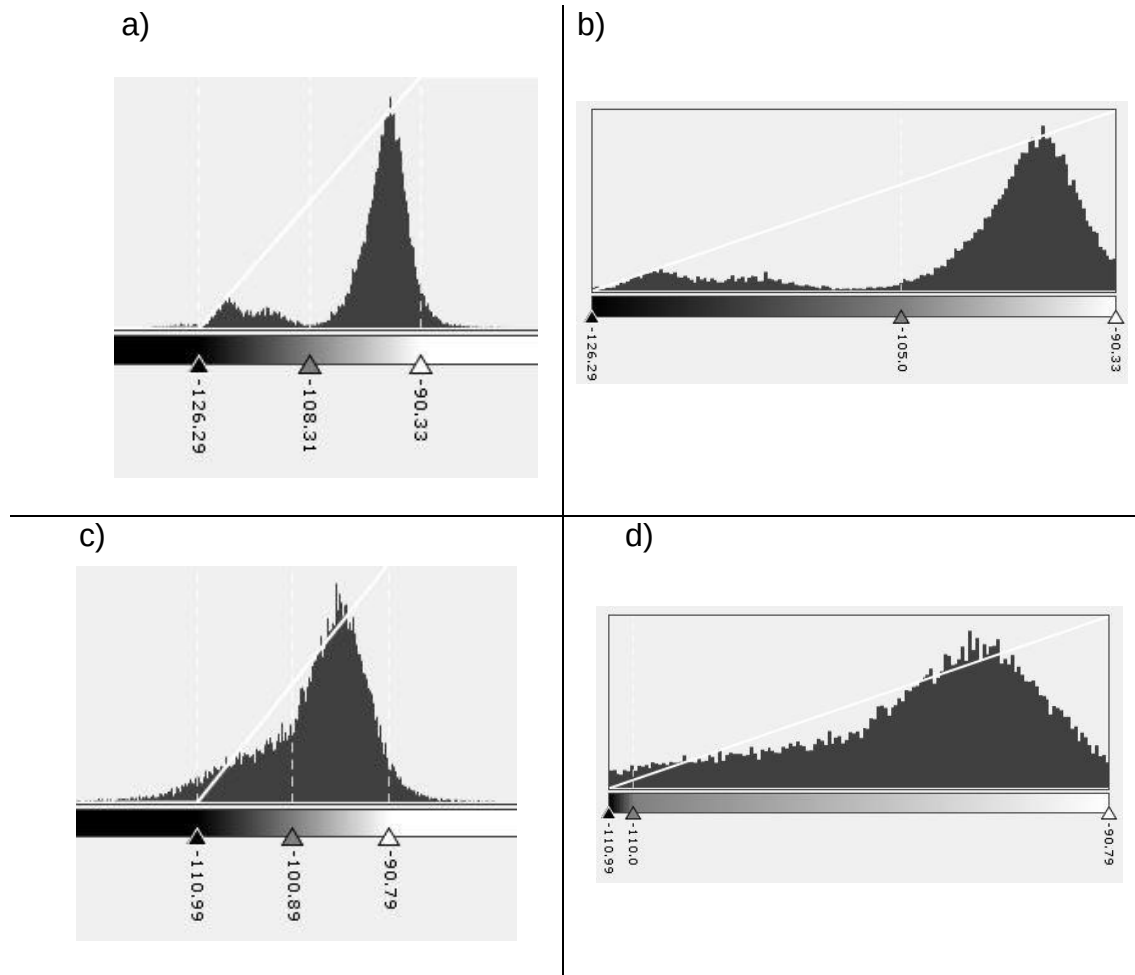


Figura 13 Histogramas de imágenes. a) histograma imágenes Sentinel, b) histograma imágenes Sentinel con ajuste de umbral, c) histograma imágenes ALOS Palsar y, d) histograma imágenes ALOS Palsar con ajuste de umbral

6.3.7. Clasificación

Para la determinación de áreas inundadas y no inundadas se propone el método de clasificación supervisada por medio de redes neuronales de tipo FeedFoward. La clasificación supervisada es una técnica empleada mediante la extracción de información, la finalidad es clasificar pixel a pixel una imagen en 2 o más tipos de clases basado en las características de los pixeles de entrenamiento y de evaluación. La implementación está definida por 2 fases principales. 1 fase de entrenamiento, durante esta fase se entrena la red neuronal con el vector de clases o de muestras seleccionadas para la clasificación. 2 fase de clasificación, para este punto se toma la red neuronal antes entrenada, para aplicarla a la imagen a clasificar, también se evalúan los resultados de la clasificación por si se debe mejorar el entrenamiento, la clasificación se realiza comparando pixel a pixel, teniendo en cuenta las

características del pixel y/o valor que representa. El modelo matemático que describe la implementación de la red neuronal esta especificado en las ecuaciones (22) a la (31).

6.3.8. Verificación en campo

Para verificar los resultados obtenidos en la clasificación de las áreas inundadas, se realizó un muestreo en campo desarrollado por medio de técnicas GNSS, esto consistió en posicionar puntos con alta fiabilidad; dichos puntos se trataron representar locaciones inundadas y no inundadas, pero debido a problemas de orden publico y de accesibilidad solo fue posible tomar 30 puntos en sitios donde se representaba inundación in situ.

7. Resultados

En las fuentes de información uno de los principales insumos, es la información meteorológica, para el análisis se seleccionó la estación que está ubicada en el corregimiento de Nuevo Oriente que se encuentra dentro de la zona de estudio y contiene mayor información. Dicha información se analizó con la tarea de determinar comportamientos de precipitación a partir de promedios mensuales. A continuación, se presenta la relación de precipitación promedio mensual de los años 2006-2015.

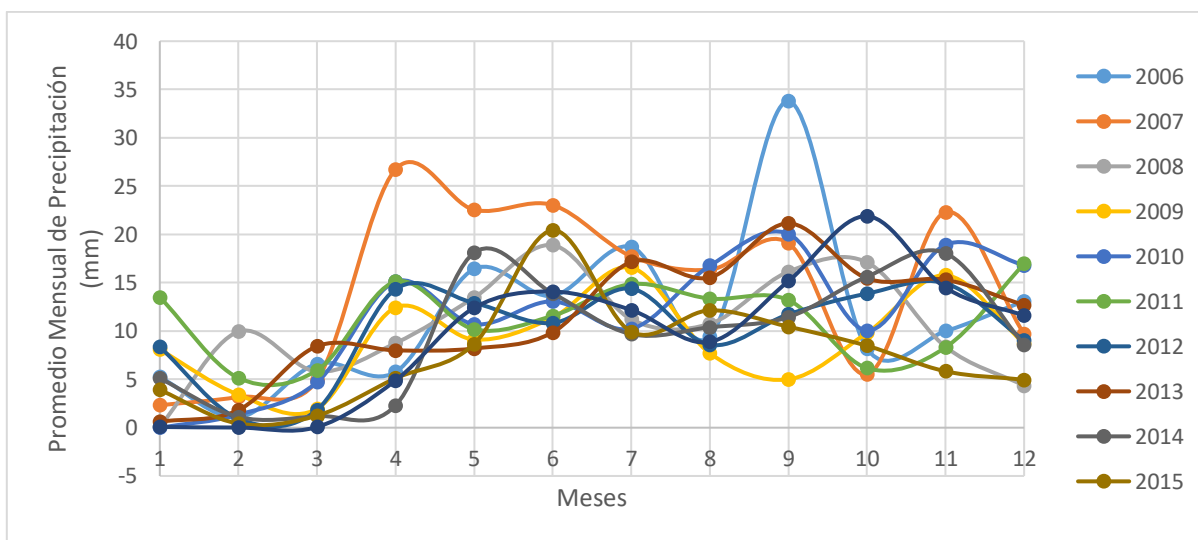


Figura 14. Relación de datos meteorológicos mensuales

En la Figura 14 se identifica un comportamiento de mayor precipitación para los meses de abril – noviembre, para observar mejor este comportamiento se realizó una media de los datos. En la Figura 15, se presenta la media de los años estudiados sesgados por meses:

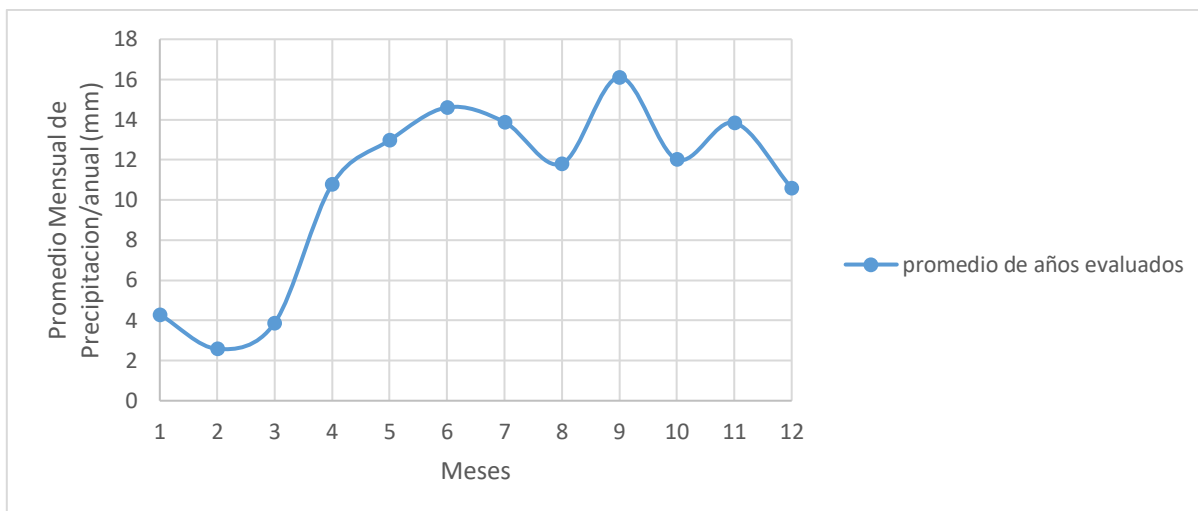


Figura 15. Promedio de Precipitación muestreado anualmente

En la Figura 15, se puede identificar de mejor manera el comportamiento antes mencionado, en el cual se observa que los meses con mayor precipitación son de abril a noviembre.

Partiendo del análisis de la información de precipitación la cual es escasa, se planteó estudiar el fenómeno para todo el año de 2017 para Sentinel-1 y, todo el año 2010 para ALOS, de acuerdo a la disponibilidad de información de ambos satélites, teniendo en cuenta que el análisis de la información de precipitación se realizó para determinar periodos húmedos y secos para la zona de estudio y así centrar de manera más detallada los meses a evaluar durante el año.

Siguiendo la metodología planteada, los productos de cada satélite fueron preparados de igual manera para mantener la homogeneidad en el procesamiento, y así no obtener variaciones atípicas entre productos; además para llegar a la clasificación de la denominada agua abierta excluyendo los cuerpos de agua fijos, se realizó la conversión de valores sigma a decibeles (dB) para así identificar de primera forma las inundaciones a cielo abierto y de esa manera tener un punto de partida para la clasificación y excluir zonas que no corresponden a inundación, a su vez esta conversión nos permite acotar más el análisis de la matriz de co-ocurrencia.

De acuerdo con el análisis hecho a los resultados de la matriz de co-ocurrencia, se realiza la clasificación con los umbrales estimados de retrodispersión para cada sensor. Se obtuvo una máscara binaria inundación / no inundación por cada producto analizado (Sentinel-1: 12 productos y ALOS Palsar: 4 productos), se incluye tanto las inundaciones a cielo abierto y bajo dosel. Las máscaras obtenidas de cada producto por sensor se solapan para de esa manera comprender el máximo de inundación captado por cada sensor, ya que cada uno comprende una longitud de onda diferente, lo cual hace que por separado identifiquen información y patrones diferentes en la cobertura; además como se evaluaron dos periodos

diferentes con características meteorológicas distintas (períodos de precipitación diferentes para 2010 y 2017) fue necesario fusionar los resultados obtenidos, para observar áreas que no fueron identificadas como inundación en la serie de tiempo de cada sensor y de esa manera obtener de manera precisa las áreas de inundación en la zona de estudio.

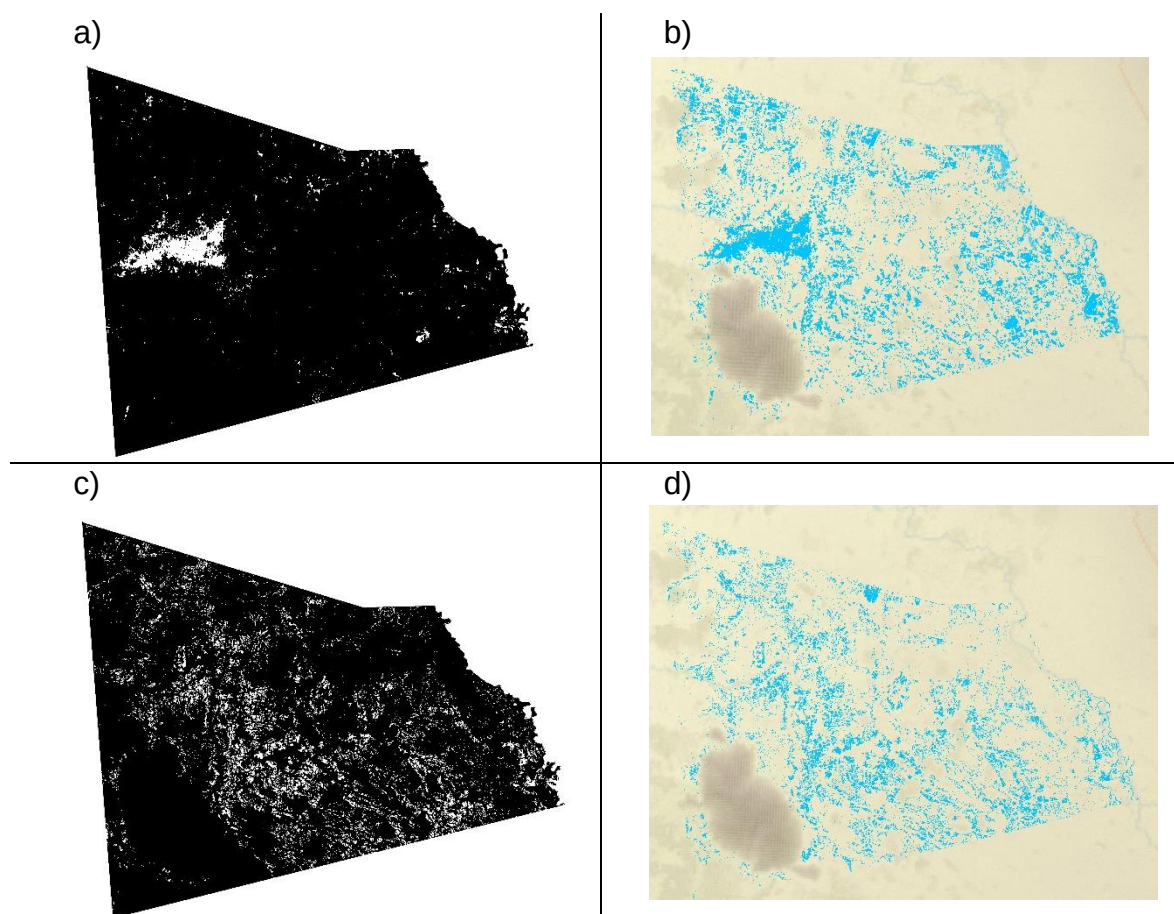


Figura 16 composiciones binarias. a) clasificación binaria Sentinel, b) solapamiento de imágenes binarias Sentinel, c) clasificación binaria ALOS Palsar y, d) solapamiento de imágenes binarias ALOS Palsar

El resultado que se obtuvo fueron las zonas de alta probabilidad de inundación. Se debe resaltar que para obtener el resultado se combinaron dos sensores de diferente longitud de onda y diferente polarización, la probabilidad de similitud y disimilitud en algunas zonas es alta. Por lo cual se realizó el solapamiento de los resultados obtenidos de cada sensor. Este resultado se analizó y se redujeron las incoherencias en áreas altas o fuera de la zona de estudio, para evitar errores en la fase de validación.

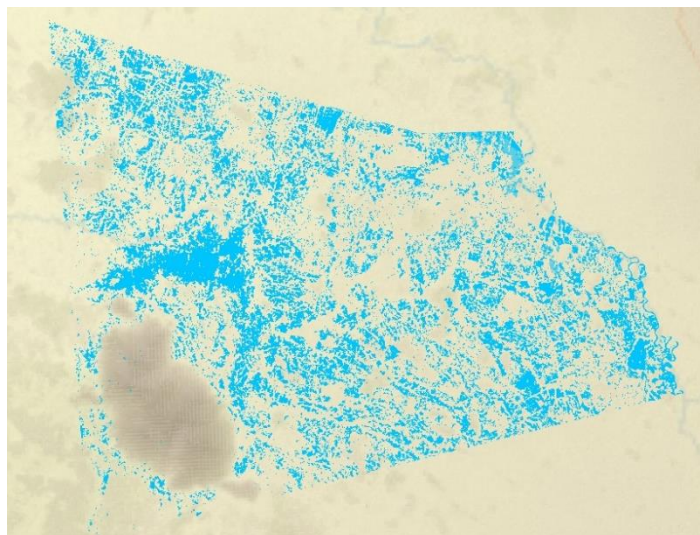


Figura 17. extensión total de inundación (solapamiento de sensores)

Como se puede observar en la Figura 17, la mayor concentración de áreas inundadas se encuentra en el Noroeste del área de estudio, zonas cercanas a los corregimientos de Blanquicet, Macondo y Bellavista. En esta zona de concentración es donde se juntan la mayoría de afluentes que desembocan al río Tumaradocito. Estos drenajes se ven afectados por las dinámicas agrícolas y asentamientos de la zona. Dichas dinámicas generan una baja capacidad de retención del cauce en los drenajes en la parte alta de la cuenca del río Tumaradocito, ocasionando así inundación fluvial en la confluencia de drenajes con el cauce principal. Sin embargo el área de protección del río León presenta una baja pendiente, un alto nivel freático y un mal drenaje por parte del tipo de suelo que en su mayoría es de tipo arcilloso. En temporada de alta precipitación se generan anegamientos en las partes Sur y Este del área de protección, cercano a los corregimientos de Puerto Rico y Nuevo Oriente.

En relación, los cambios de la mecánica hídrica e hidráulica, la geología y geomorfología y la alta precipitación en la reserva, generan un alto índice de susceptibilidad de inundación. Presentando amenaza en centros poblados y granjas dentro de la misma.

La reserva cuenta con un área de 389,38 Km². Y el máximo área de inundación identificada es de 94,50 Km², lo que corresponde al 24,27 % del total del área de reserva del río León.

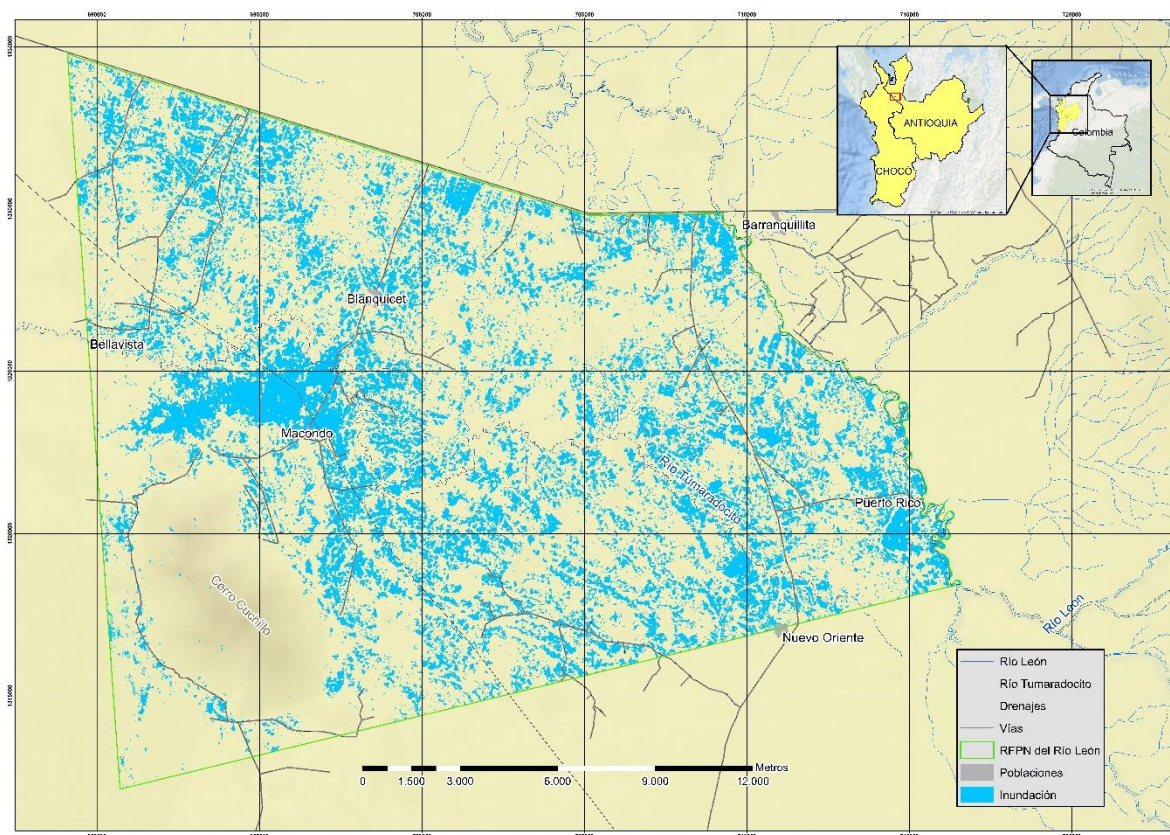


Figura 18 Mapa de áreas inundables

Para evaluar y validar la eficacia del análisis realizado, se realizaron una serie de tomas de campo en la zona de estudio, que abarcaron lugares específicos y diferentes tipos de coberturas. El muestreo abarcó 30 tomas, estas realizadas en los recorridos a corregimientos, veredas y centros poblados situados dentro de la zona de estudio. Dichas tomas en campo se realizaron por medio de un receptor GNSS en configuración dinámica, con el fin de optimizar el tiempo en cada toma y poder cubrir la mayor cantidad de área posible dentro de la zona de estudio, ya que los trayectos entre cada punto de visita fueron extensos.

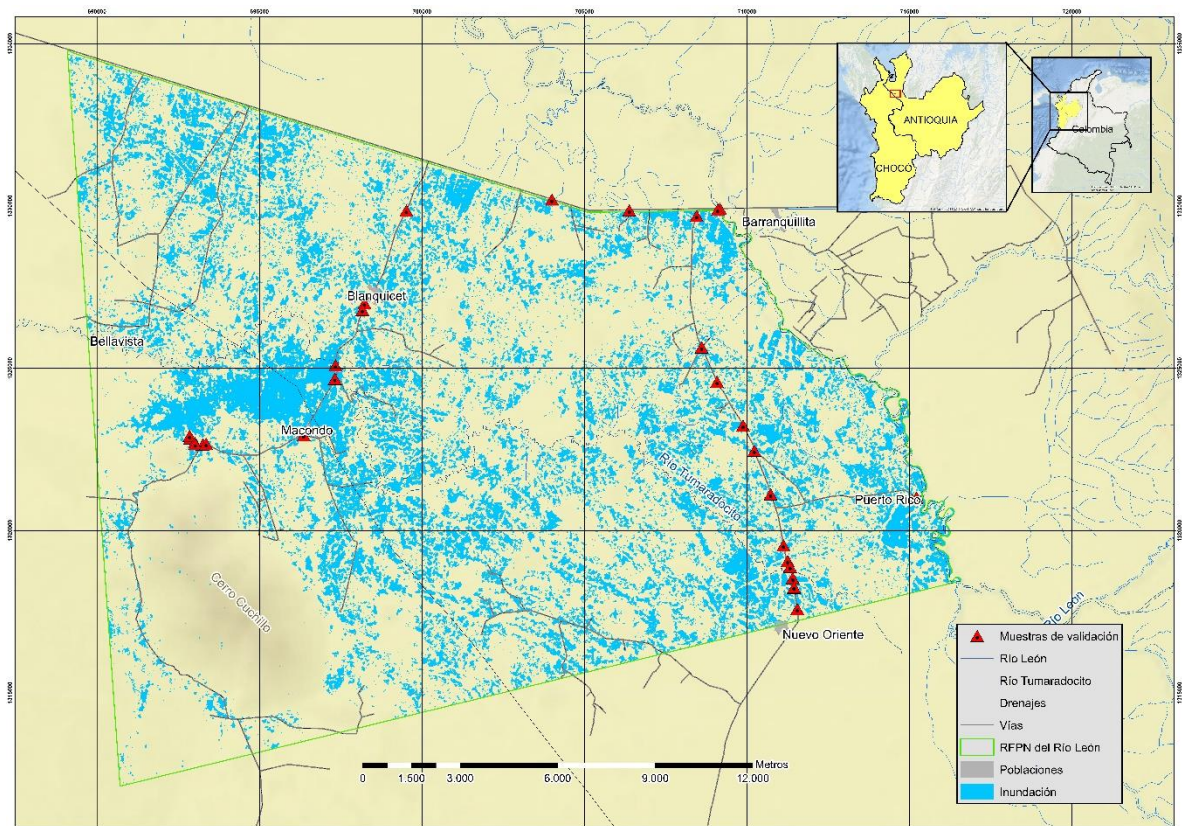


Figura 19 Mapa de distribución de muestras tomadas en campo

En la Figura 19, se presenta la distribución de las tomas hechas en campo en los recorridos realizados, se debe resaltar que la distribución de estas no es equitativa por toda la zona de estudio, debido al difícil acceso a ciertos puntos estratégicos, por condiciones climáticas, del terreno o de orden público.

Para realizar la validación de los resultados, se llevó a cabo un análisis de las tomas hechas en campo con respecto a los resultados obtenidos por medio de la metodología realizada, también se tuvo en cuenta referencias de la población y se elaboró una matriz de confusión a continuación, se muestra una tabla con el resultado de la matriz. Se especifica el punto, sus coordenadas, la descripción base y su cumplimiento como inundación.

Tabla 2 Datos de campo para comprobar áreas de inundación y no inundación

Punto	Latitud	Longitud	Descripción base	Inundación	
				si	no
1	7.571496508	-76.71196119	Rio León	x	
2	7.57126692	-76.71258616	Madre Vieja	x	
3	7.570942808	-76.73723993	potrero ganado drenaje rápido		x
4	7.573826222	-76.75879567	potrero inundado del caño, búfalo	x	
5	7.570494224	-76.79933341	limite departamental	x	
6	7.54461664	-76.81082587	caño	x	

7	7.542754828	-76.81137668	no inundable		x
8	7.527290576	-76.81880531	Rio Tumaradocito	x	
9	7.507832701	-76.8275233	caño Macondo	x	
10	7.50507408	-76.85557814	caño Cuchillo Negro	x	
11	7.506771098	-76.85902921	arroz	x	
12	7.507413089	-76.85928244	caño Cuchillo Negro	x	
13	7.505604415	-76.85786098	pasto alto inundable	x	
14	7.50510063	-76.85771303	pasto inundable	x	
15	7.505238706	-76.85468373	Cuchillo Negro	x	
16	7.523563577	-76.81896311	punto inundación Tumaradocito	x	
17	7.569498239	-76.71844587	caño bajo carro atascado	x	
18	7.532929685	-76.71685303	caño conexión Rio León	x	
19	7.523369152	-76.71249289	peaje	x	
20	7.511269547	-76.70518262	arroz	x	
21	7.504264271	-76.70200412	caño Micosolo conexión Rio León	x	
22	7.492142953	-76.6973759	pasto no inundado		x
23	7.477961506	-76.6937181	arroz	x	
24	7.473639282	-76.69252775	tekla	x	
25	7.471985922	-76.69185428	Rio Tumaradocito	x	
26	7.468851361	-76.69111883	pasto inundado	x	
27	7.466179812	-76.69073641	caño pequeño	x	
28	7.460261723	-76.68977699	estación ideam	x	
29	7.466369403	-76.69070696	caño Nuevo Oriente	x	
30	7.491468638	-76.656807	Puerto Rico	x	

La descripción base fue tomada como la referencia más relevante al momento de guardar el punto tomado, en algunos casos no corresponde con relación a lo tomado.

Estos puntos tomados se compararon con los resultados obtenidos, con lo cual se tuvo en cuenta los análisis realizados in situ con la población y personal de Corpouraba que acompañó parte del recorrido. La eficacia de la metodología aplicada para el análisis con respecto al muestreo fue de 90%, de lo cual el 27/30 de las muestras fueron reales, dejando un 10% de error.

Los puntos 3, 7 y 22 que no fueron positivos en la validación, no cumplían con los resultados, ya que in situ se evidenció otra característica; en dichos se encontró que para el punto 3 se evidenció un potrero con drenaje rápido y en los resultados por medio de la metodología no se evidenciaba inundación o agua aparente; para el punto 7 se tomó como zona sin agua o parcialmente seca (no inundable) que comparado con los resultados por medio de la metodología se identificó como área inundable; para el punto 22 se evidenció pasto no inundado, este punto al compararse con los resultados por medio de la metodología se identificó como zona inundada.

En la validación también se tuvo como referencia el mapa de humedales de Colombia publicado en 2014 por el instituto Humboldt.

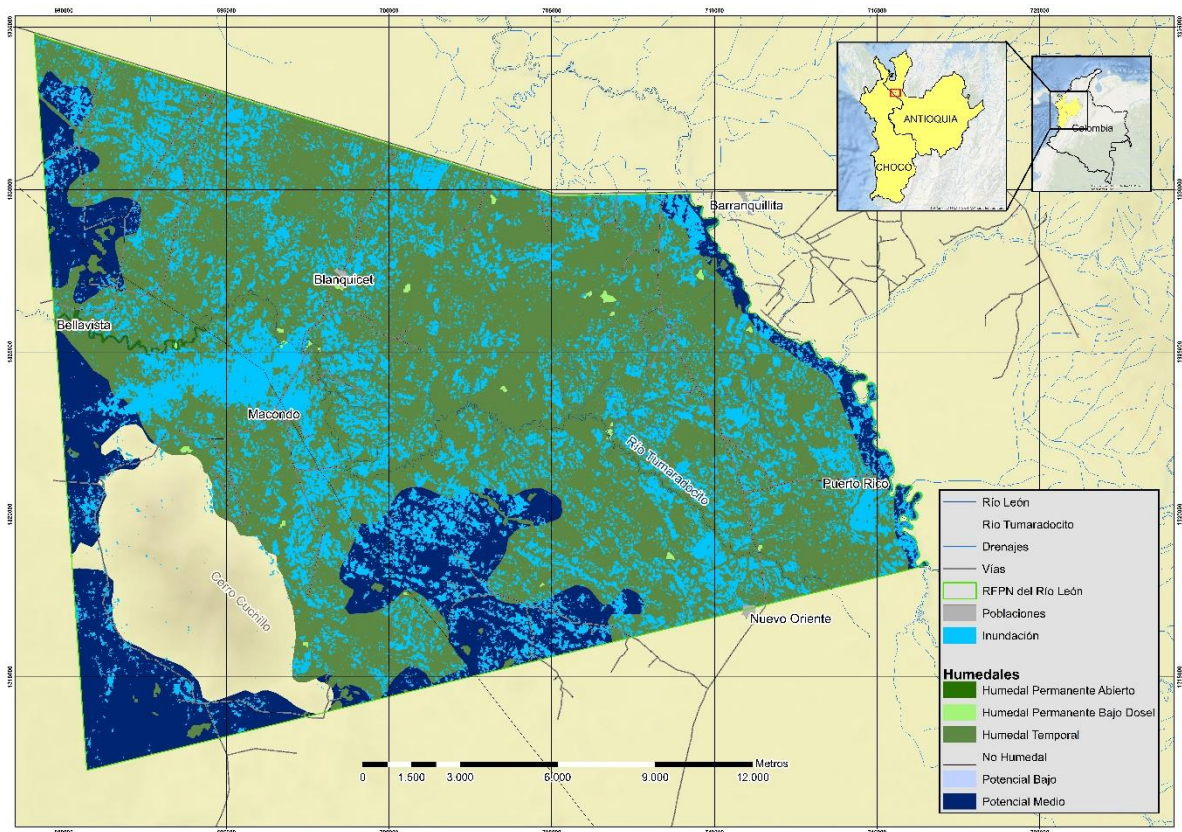


Figura 20 Mapa de comparación Humedales vs. Inundación

De acuerdo con (Instituto de Investigación de Recursos Biológicos, 2018), se pueden identificar 5 clases dentro de los humedales, que corresponden a Humedal permanente abierto, Humedal permanente bajo dosel, Humedal temporal, Potencial bajo, Potencial medio y no Humedal. Se sobrepuso el mapa de humedales con la capa de inundación generada por medio de la metodología propuesta, se identificó que en gran parte de la zona de estudio se presenta la clase de humedal temporal, lo que indica que, por su nivel freático, tipo de suelo o dinámica de drenado, se genera anegamiento temporal con respecto a temporadas del año (para este caso temporada de alta precipitación). También se identificó que gran parte de los resultados obtenidos se encuentran en la clase de humedal temporal, lo que concuerda con respecto a al análisis de inundaciones, ya que un humedal temporal es el comportamiento de inundación por medio de incremento del nivel freático o alta precipitación.

8. Discusión.

La determinación de áreas inundables en la reserva forestal protectora nacional del Río León se realizó, a partir de la metodología propuesta por (Song et al., 2007b) en conjunto a la metodología de la Agencia Espacial Europea (ESA) y la Administración Nacional de la

Aeronáutica y del Espacio (NASA) para la identificación de agua en la superficie (Castro-Gómez, 2015b; Podest, 2018b), dichas metodologías se fusionaron para obtener mejores resultados.

Castro-Gómez (2015) y Podest (2018), Song, Sohn, & Park (2007), coinciden en gran parte de la metodología y también consideran que la metodología puede ser combinada o mejorada para hacerla más robusta con el fin de obtener resultados más precisos y que puede ser tomada como insumo de primer impacto para el monitoreo de inundaciones y humedad aparente del suelo usando valores calibrados de retrodispersión.

Para efectuar este análisis, se tuvo en cuenta información meteorológica de la zona de estudio, se contaba con 4 estaciones que se encontraban cerca y dentro del área de estudio pero, al evaluar la información tan solo la estación que está ubicada en el corregimiento de Nuevo Oriente contaba con la mayor cantidad de información posible para llevar a cabo el análisis, con esta se determinó el comportamiento climático asociado al área de estudio por medio de promedios anuales (Ellis et al., 2012), lo que constituye en la primera aproximación de línea base para identificar el periodo de estudio.

La imagen de decibeles que fue la base de clasificación, fue calculada y debidamente corregida de acuerdo a la metodología de (Castro-Gómez, 2015b; Podest, 2018b; Song et al., 2007b) con el fin de eliminar efectos de la señal y ruido causado por algunas superficies y sombras en los valores de retrodispersión. Para realizar la calibración radiométrica de terreno ajustada, se realizó primeramente la reducción de ruido térmico antes del proceso de calibración radiométrica para disminuir la dificultad en la estimación precisa de reflectividad en las imágenes. (Song et al., 2007b) no realizó dicha reducción, ya que para su caso el sensor que utilizó para su análisis no genera ese tipo de ruido, en este caso se realizó ya que de acuerdo con (Castro-Gómez, 2015b; Podest, 2018b) dicha reducción podría mejorar los resultados de retrodispersión.

Para Colombia el sensor ALOS cuenta con polarización HH y HV, en algunos años solo cuenta con la polarización HH, por otro lado, el sensor Sentinel 1-a y 1-b cuenta con polarización VV y VH, para sus primeros años solo tiene disponible la polarización VV.

Song, Sohn, & Park (2007) Utilizó imágenes de Radarsat-1, que tan solo cuenta con la polarización, HH para la determinación de la inundación. En este proyecto se utilizó la información de los dos sensores para llevar a cabo un análisis más profundo siguiendo la metodología de (Castro-Gómez, 2015b; Chapman et al., 2015; Podest, 2018b; Song et al., 2007b). Se aprovechó la mejor característica de las imágenes del satélite ALOS y Sentinel para el estudio de inundación. En el caso de ALOS se cuenta con una longitud de onda más penetrante (23 cm) lo hace más sensible a la humedad aparente del suelo y, Sentinel tiene mejor resolución espacial y cuenta con mayor cobertura temporal anual, al combinar los resultados de ambos sensores se obtuvo el máximo de inundación tanto bajo dosel y a cielo abierto en la zona de estudio.

En este proyecto, la imagen resultante de la conversión de retrodispersión a decibeles cuenta con rangos de valores entre -140dB y 0dB que concuerdan con los valores calculados por (Castro-Gómez, 2015b; Podest, 2018b).

Las imágenes resultantes de la matriz de co-ocurrencia fueron utilizadas para determinar inundaciones bajo dosel, empleando el cruce de las imágenes de homogeneidad, disimilitud y ASM para la identificación de cambios en la respuesta de superficies y determinar el umbral adecuado de acuerdo a lo realizado por (Song et al., 2007b), que se diferencia de (Castro-Gómez, 2015b; Podest, 2018b) que determinaron un umbral base para cualquier tipo de inundación teniendo en cuenta solo los valores de máximo global y máximos locales del histograma de la imagen de decibeles.

Cuando se realiza la validación se encuentra con una precisión del 90% ya que por la combinación de los dos sensores fue posible tanto mejorar la precisión del análisis y también se pudo descartar áreas que generaban ruido.

9. Conclusiones.

El proyecto tuvo como objetivo determinar áreas susceptibles a inundación, por medio del uso de imágenes de Radar, ya que con estas se pueden evaluar métodos directos de estudio para la dinámica terrestre. Se estimaron valores de retrodispersión para clasificación, a partir de imágenes tomadas por los sensores seleccionados para el estudio. La matriz de co-ocurrencia permitió identificar los valores de retrodispersión para la clasificación de agua bajo dosel (inundación de vegetación y bosques). Los resultados obtenidos por medio de la metodología desarrollada, fueron evaluadas por medio de datos tomados in situ y comparándolos con el mapa de humedales de Colombia.

En este estudio se utilizaron datos de dos sensores, para ALOS-Palsar se evaluó todo el año 2010 y, para Sentinel-1 todo el año 2017. Debido a la falta de coincidencia temporal de los dos satélites se decidió realizar el análisis para un año identificado como significativo dentro de la temporalidad del sensor, con el fin de obtener el máximo área de inundación. Los resultados obtenidos en cada serie de tiempo por cada sensor se fusionaron para aprovechar la mejor característica de cada uno, lo que permitió identificar las zonas de alta probabilidad de inundación.

Se empleo la matriz de co-ocurrencia para determinar de umbrales asociados a las zonas inundadas a cielo abierto y bajo dosel y la exclusión de cuerpos de agua permanentes. En la identificación de umbrales de retrodispersión, se empleó la matriz de coocurrencia para posteriormente realizar el cruce con 3 imágenes de las 6 resultantes, que son la homogeneidad, disimilitud y ASM, estas tres imágenes materializan patrones de cambio con mayor eficacia que las demás restantes, para que el análisis de Stack o cruce funcione adecuadamente, se debe realizar corrección por sombras y se debe excluir centros poblados para no obtener confusión en el resultado, ya que para ambos casos se puede confundir las sombras con agua a cielo abierto y los centros poblados con inundación bajo dosel.

La identificación de zonas inundadas mediante la metodología propuesta tuvo eficacia del 90% con respecto a las muestras tomadas in situ. Esos mismos resultados se compararon con el mapa de humedales de Colombia y obtuvo que el 75% de la zona de estudio se encuentra clasificada como humedal temporal y el 25% restante está definido de la clase de potencial medio a humedal, teniendo en cuenta que el 85% del área determinada como inundación se encuentra dentro del 75% determinado como humedal temporal, lo que indica que el ecosistema de la reserva se define como humedal, por tanto probablemente la mayoría del tiempo durante el año haya agua superficial o inundaciones.

La implementación de imágenes de Radar facilita la identificación de humedad aparente del suelo, que comprende la identificación eficaz de áreas inundables, el análisis de dichas áreas empleando este tipo de imágenes reducen dificultades troposféricas y topográficas que se presentan en la zona de estudio al realizar determinación de humedad o inundaciones.

La reserva se ve influenciada por las zonas de convergencia tropical gran parte del año se encuentra nublado por lo que es difícil hacer uso de sensores ópticos; por otro lado, ya que la topografía de la zona es plana (4% de pendiente) no es posible utilizar el modelo digital de elevación proporcionado por la USGS y por la JAXA que cuentan con resolución de 30m y 12.5m respectivamente, teniendo en cuenta estas dificultades se llevó a cabo el análisis por medio de sensores activos Radar.

De acuerdo con el desarrollo del proyecto, se encontraron diferentes limitaciones. Una de ellas corresponde a la no disponibilidad de información espacial (Imágenes satelitales), ya que para ejecutar un análisis mucho más robusto se debe tener información con resolución temporal alta, o en su caso sensores con una mínima serie de tiempo coincidente. Otra de las limitaciones fue la toma de información en campo, ya que debido a problemas de orden público y de accesibilidad no fue posible realizar recorridos al menos en un 60% de la zona de estudio y, debido a esto no fue posible obtener un muestreo homogéneo entre áreas inundadas y no inundadas, también se debe resaltar el costo que conlleva la preparación de dicho muestreo.

10. Bibliografía

Amarante, V., & Caffera, M. (2003). Los factores determinantes de la formación de asentamientos irregulares. Un análisis económico. *Revista de la Facultad de Ciencias Empresariales y Economía, Universidad de Montevideo*, 2, 61-95.

Anaya, J. A., Escobar-Martínez, J. F., Massone, H., Booman, G., Quiroz-Londoño, O. M., Cañón-Barriga, C. C., ... Palomino-Ángel, S. (2017). Identification of wetland areas in the context of agricultural development using Remote Sensing and GIS. *DYNA*, 84(201), 186. <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n201.58600>

Basogain Olabe, X. (2008). Redes neuronales artificiales y sus aplicaciones. *Escuela Superior de Ingenieria de Bilbao, EHU*.

Caicedo B, E. F., & López S, J. A. (2009). *Una aproximación práctica a las redes neuronales artificiales* (1.ª ed.). <https://doi.org/10.25100/peu.64>

Castro-Gómez, M. (2015). Flood Mapping with Sentinel-1 | RUS Training. Recuperado 31 de agosto de 2018, de <https://rus-training.eu/training/flood-mapping-webinar>

Cazals, C., Rapinel, S., Frison, P.-L., Bonis, A., Mercier, G., Mallet, C., ... Rudant, J.-P. (2016). Mapping and Characterization of Hydrological Dynamics in a Coastal Marsh Using High Temporal Resolution Sentinel-1A Images. *Remote Sensing*, 8(7), 570. <https://doi.org/10.3390/rs8070570>

Chapman, B., McDonald, K., Shimada, M., Rosenqvist, A., Schroeder, R., & Hess, L. (2015). Mapping Regional Inundation with Spaceborne L-Band SAR. *Remote Sensing*, 7(5), 5440-5470. <https://doi.org/10.3390/rs70505440>

Čotar, K., Oštir, K., & Kokalj, Ž. (2016). RADAR SATELLITE IMAGERY AND AUTOMATIC DETECTION OF WATER BODIES. *Geodetski Glasnik*, 50, 5-15.

Ellis, E., Romero, J., Hernández, I., Gallo, C., & Alanís, J. (2012). Evaluación geográfica de áreas susceptibles a inundación en la cuenca del río Tuxpan, Veracruz. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 16(1).

ESA. (2018). Sentinel-1—Missions—Sentinel Online. Recuperado 5 de septiembre de 2019, de <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>

IDEAM (Ed.). (2001). *La difluencia del Río León hacia el Caño Tumaradó, región de Uraba: Informe técnico presentado a CORPOURABA*. Bogotá, D.C: IDEAM.

IDEAM. (2014). AMENAZAS INUNDACIÓN. Recuperado 11 de septiembre de 2018, de <http://www.ideam.gov.co/web/agua/amenazas-inundacion>

Instituto de Investigación de Recursos Biológicos. (2018, febrero). Primer mapa interactivo de humedales colombianos. Recuperado 17 de agosto de 2019, de

<http://www.humboldt.org.co/es/boletines-y-comunicados/item/1170-humboldt-presenta-primer-mapa-interactivo-humedales-colombianos>

Irwin, K., Beaulne, D., Braun, A., & Fotopoulos, G. (2017). Fusion of SAR, Optical Imagery and Airborne LiDAR for Surface Water Detection. *Remote Sensing*, 9(9), 890. <https://doi.org/10.3390/rs9090890>

Karszenbaum, H., Kandus, P., Martinez, J. M., Toan, T. L., Tiffenberg, J., & Parmuchi, G. (2000). *ERS-2, RADARSAT SAR BACKSCATTERING CHARACTERISTICS OF THE PARANA RIVER DELTA WETLAND, ARGENTINA*. 10.

Kwoun, O., & Lu, Z. (2009). Multi-temporal RADARSAT-1 and ERS Backscattering Signatures of Coastal Wetlands in Southeastern Louisiana. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 75(5), 607-617. <https://doi.org/10.14358/PERS.75.5.607>

Lee, J.-S. (1981). Speckle analysis and smoothing of synthetic aperture radar images. *Computer graphics and image processing*, 17(1), 24-32.

Manalili, M. A. (2018). *FLOOD DELINEATION OF SYNTHETIC APERTURE RADAR USING PYTHON*. Recuperado de http://www.academia.edu/30554178/FLOOD_DELINEATION_OF_SYNTHETIC_APERTURE_RADAR_USING_PYTHON

OEA. (1993). *Manual sobre el manejo de peligros naturales en la planificacion para el desarrollo regional integrado*. Recuperado de <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF2015034240>

Papantonopoulos, G., Takahashi, K., Bountis, T., & Loos, B. G. (2014). Artificial Neural Networks for the Diagnosis of Aggressive Periodontitis Trained by Immunologic Parameters. *PLOS ONE*, 9(3), e89757. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0089757>

Parques Nacionales Naturales De Colombia. (2015). Guía para la elaboración de planes de manejo de Reservas Naturales de la Sociedad Civil.

Pathak, B., & Barooah, D. (2013). *TEXTURE ANALYSIS BASED ON THE GRAY-LEVEL CO-OCCURRENCE MATRIX CONSIDERING POSSIBLE ORIENTATIONS*. 2(9), 7.

Podest, E. (2018). *SAR para el Mapeo de la Cobertura Terrestre*. 30.

Senado de la República de Colombia. (2007). *ORIGEN: _ Sd:84—DIVISION DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL/CARDEN DESTINO: _ SENADO DE LA REPUBLICA/TORO DILIAN ASUNTO: _ A/INFORME TECNICO Y ANEXOS SOLICITUD COMISION ACC OBS: LIZ*. 33.

Singh, P., Sinha, V. S. P., Vijhiani, A., & Pahuja, N. (2018). Vulnerability assessment of urban road network from urban flood. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 28, 237-250. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.03.017>

Sistema Departamental de Áreas Protegidas de Antioquia, SIDAP. (2010). *Atlas áreas protegidas departamento de Antioquia*. Medellín, Colombia.

Snoeij, P., Attema, E., Davidson, M., Duesmann, B., Floury, N., Levrini, G., ... Rosich, B. (2009). *The Sentinel-1 radar mission: Status and performance*. 6.

Song, Y.-S., Sohn, H.-G., & Park, C.-H. (2007). Efficient Water Area Classification Using Radarsat-1 SAR Imagery in a High Relief Mountainous Environment. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 73(3), 285-296. <https://doi.org/10.14358/PERS.73.3.285>

Taravat, A., Proud, S., Peronaci, S., Del Frate, F., & Oppelt, N. (2015). Multilayer Perceptron Neural Networks Model for Meteosat Second Generation SEVIRI Daytime Cloud Masking. *Remote Sensing*, 7(2), 1529-1539. <https://doi.org/10.3390/rs70201529>

Ulaby, F. T., Moore, R. K., & Fung, A. K. (1981). *Microwave remote sensing: Active and passive. Volume 1-microwave remote sensing fundamentals and radiometry*.

Wahlstrom, M., & Guha-Sapir, D. (2015). The human cost of weather-related disasters 1995-2015. *Geneva, Switzerland: UNISDR*.

Wegmüller, U. (1999). *Automated terrain corrected SAR geocoding*.

Widhalm, B., Bartsch, A., & Heim, B. (2015). A novel approach for the characterization of tundra wetland regions with C-band SAR satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 36(22), 5537-5556. <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1101505>

Yiannakoulis, N., Darlington, J. C., Elshorbagy, A., & Raja, B. (2018). Meta-analysis based predictions of flood insurance and flood vulnerability patterns in Calgary, Alberta. *Applied Geography*, 96, 41-50. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.05.007>