UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

SEGUIMIENTO A LA INUNDACIÓN OCURRIDA DURANTE LA OLA INVERNAL EN EL AÑO 2010 SOBRE LAS COBERTURAS VEGETALES IDENTIFICABLES EN EL MUNICIPIO DE SANTA CRUZ DE MOMPÓS UTILIZANDO IMÁGENES DEL SENSOR PALSAR DEL SATÉLITE ALOS

BRIAN STEVEN VALENCIA MORA

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROYECTO CURRICULAR DE INGENIERÍA CATASTRAL Y GEODESIA

BOGOTÁ D.C.

2019

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

SEGUIMIENTO A LA INUNDACIÓN OCURRIDA DURANTE LA OLA INVERNAL EN EL AÑO 2010 SOBRE LAS COBERTURAS VEGETALES IDENTIFICABLES EN EL MUNICIPIO DE SANTA CRUZ DE MOMPÓS UTILIZANDO IMÁGENES DEL SENSOR PALSAR DEL SATÉLITE ALOS

BRIAN STEVEN VALENCIA MORA

Proyecto de grado modalidad investigación – innovación como requisito para optar por el título de Ingeniero Catastral y Geodesta

DIRECTORA: PhD. ERIKA SOFÍA UPEGUI CARDONA

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROYECTO CURRICULAR DE INGENIERÍA CATASTRAL Y GEODESIA

BOGOTÁ D.C.

2019

Contenido.

1. Resumen ejecutivo. 9
2. Descripción del problema. 9
3. Objetivos. 11
3.1. General. 11
3.2. Específicos. 11
4. Marco Teórico. 12
4.1. Antecedentes. 12
4.2. Radar. 17
4.2.1. Radar de apertura sintética (SAR). 18
4.2.2. Parámetros de un sistema SAR. 19
4.2.3. Retrodispersión de la señal de radar. 23
4.3. Información derivada de las imágenes SAR. 26
4.3.1. Información polarimétrica. 26
4.3.2. Información textural. 33
4.4. Clasificación temática. 35
4.5. Validación Temática. 38
4.6. Algebra de mapas. 39
5. Zona de estudio. 39
5.1. Descripción general. 39
5.2. Hidrografía. 40
5.3. Precipitación y régimen de lluvias. 40
5.4. Clima. 41
6. Materiales y métodos. 43
6.1. Materiales. 43
6.1.1. Modelo digital de elevación. 43
6.1.2. Imágenes SAR. 44

6.1.3. Mapa de cobertura de la tierra periodo 2010 – 2012. 45
6.2. Metodología. 46
6.2.1. Pre procesamiento de los datos. 46
6.2.2. Ortorectificación de imágenes SAR. 48
6.2.3. Análisis polarimétrico. 48
6.2.4. Clasificación supervisada. 50
6.2.5. Fase de validación temática. 53
6.2.6. Análisis multitemporal. 53
6.2.7. Elaboración de los mapas donde se identifiquen los cambios. 54
6.2.8. Cuantificación de las áreas afectadas por la inundación. 54
7. Resultados y análisis de resultados. 55
7.1. Análisis polarimétrico. 55
7.1.1. Filtrado speckle polarimétrico. 55
7.1.2. Análisis polarimétrico. 56
7.2. Clasificación supervisada. 62
7.2.1. Filtrado speckle. 62
7.2.2. Segmentación. 63
7.2.3. Entrenamiento. 64
7.2.4. Selección del algoritmo de clasificación. 70
7.2.5. Post edición. 73
7.3. Fase de validación temática. 75
7.4. Análisis multitemporal. 76
7.5. Elaboración de los mapas donde se identifiquen los cambios. 79
7.6. Cuantificación de las áreas afectadas por la inundación. 84
8. Conclusiones. 92
9. Alcances e impactos. 93
10. Recomendaciones. 94
11. Bibliografía. 95
12. Anexos. 102

12.1. Anexo 1 – Filtrado speckle polarimetrico. 103

12.2. Anexo 2 – Filtrado speckle..... 109

12.3. Anexo 3 – Segmentacion..... 115

12.4. Anexo 4 – Validacion temática. 117

Índice de Ilustraciones.

Ilustración 1. Polarización lineal..... 20

Ilustración 2: Relación de la polarización lineal con algunos objetos. 21

Ilustración 3. Espacio o plano de clasificación H – $\boldsymbol{\alpha}$. 31

Ilustración 4: Hiperplano de separación óptimo. 37

Ilustración 5: Ubicación geográfica del municipio de Santa Cruz de Mompós. 42

Ilustración 6. Modelo digital de elevación..... 43

Ilustración 7. Mapa de cobertura de la tierra periodo 2010-2012. 45

Ilustración 8: Metodología propuesta. 46

Ilustración 9: Etapa de pre procesamiento de los datos. 47

Ilustración 10: Etapa de análisis polarimétrico. 49

Ilustración 11: Etapa de clasificación supervisada. 51

Ilustración 12. Mapa de cobertura de la tierra para el 13 de Junio de 2010. 70

Ilustración 13. Mapa de cobertura de la tierra para el 29 de Julio de 2010. 71

Ilustración 14. Mapa de cobertura de la tierra para el 29 de Octubre de 2010. 71

Ilustración 15. Mapa de coberturas totalmente inundadas entre el 13 de Junio y el 29 de Julio de 2010..... 80

Ilustración 16. Mapa de cambios de la cobertura de aguas continentales naturales entre el 13 de Junio y el 29 de Julio de 2010..... 80

Ilustración 17. Mapa de coberturas parcialmente inundadas entre el 13 de Junio y el 29 de Julio de 2010..... 81

Ilustración 18. Mapa de cambios de la cobertura de zonas pantanosas entre el 13 de Junio y el 29 de Julio de 2010. 81

Ilustración 19. Mapa de coberturas totalmente inundadas entre el 29 de Julio y el 29 de Octubre de 2010..... 82

Ilustración 20. Mapa de cambios de la cobertura de aguas continentales naturales entre el 29 de Julio y el 29 de Octubre de 2010. 82
Ilustración 21. Mapa de coberturas parcialmente inundadas entre el 29 de Julio y el 29 de Octubre de 2010. 83
Ilustración 22. Mapa de cambios de la cobertura de zonas pantanosas entre el 29 de Julio y el 29 de Octubre de 2010. 83

Índice de Tablas.

Tabla 1. Longitudes de onda comprendidas por los sistemas SAR. 19
Tabla 2. Descomposiciones polarimétricas. 27
Tabla 3. Zonas del plano H – $\boldsymbol{\alpha}$ 31
Tabla 4. Imágenes SAR utilizadas en el desarrollo del proyecto. 44
Tabla 5. Coordenadas Geográficas de la zona. 50
Tabla 6. Parámetro de entropía. 57
Tabla 7. Parámetro de anisotropía. 58
Tabla 8. Parámetro alpha. 59
Tabla 9. Planos H-α. 61
Tabla 10. Clases o coberturas de la tierra definidas para el desarrollo del proyecto. 65
Tabla 11. Cuantificación de áreas por cobertura y su participación dentro del municipio de Santa Cruz de Mompós. 72
Tabla 12. Ejemplos de identificación y edición de la cobertura de tejido urbano. 74
Tabla 13. Codificación para el multitemporal entre el 13 de Junio y el 29 de Julio de 2010. 76
Tabla 14. Codificación para el multitemporal entre el 29 de Julio y el 29 de Octubre de 2010... 76
Tabla 15. Tipo de cambios presentes en los multitemporales de acuerdo a su código. 77
Tabla 16. Coberturas afectadas por inundación total entre el 13 de Junio y el 29 de Julio de 2010. 84
Tabla 17. Retroceso de la cobertura de aguas continentales naturales entre el 13 de Junio y el 29 de Julio de 2010. 84
Tabla 18. Coberturas afectadas por inundación parcial entre el 13 de Junio y el 29 de Julio de 2010. 85

Tabla 19. Repliegue de la cobertura de zonas pantanosas entre el 13 de Junio y el 29 de Julio de 2010..... 85
Tabla 20. Permanencia de la cobertura de zonas pantanosas entre el 13 de Junio y el 29 de Julio de 2010..... 86
Tabla 21. Otros cambios presentes entre el 13 de Junio y el 29 de Julio de 2010..... 86
Tabla 22. Áreas inundadas del municipio de Santa Cruz de Mompós entre el 13 de Junio y el 29 de Julio de 2010. 87
Tabla 23. Coberturas afectadas por inundación total entre el 29 de Julio y el 29 de Octubre de 2010..... 87
Tabla 24. Retroceso de la cobertura de aguas continentales naturales entre el 29 de Julio y el 29 de Octubre de 2010. 88
Tabla 25. Coberturas afectadas por inundación parcial entre el 29 de Julio y el 29 de Octubre de 2010..... 89
Tabla 26. Repliegue de la cobertura de zonas pantanosas entre el 29 de Julio y el 29 de Octubre de 2010..... 89
Tabla 27. Permanencia de la cobertura de zonas pantanosas entre el 29 de Julio y el 29 de Octubre de 2010..... 89
Tabla 28. Otros cambios presentes entre el 29 de Julio y el 29 de Octubre de 2010..... 90
Tabla 29. Áreas inundadas del municipio de Santa Cruz de Mompós entre el 29 de Julio y el 29 de Octubre de 2010. 91
Tabla 30. Área de interés 1 para el ensayo de filtros speckle polarimétricos. 103
Tabla 31. Área de interés 2 para el ensayo de filtros speckle polarimétricos. 105
Tabla 32. Área de interés 1 en el canal de intensidad HH para el ensayo de filtros Speckle. 109
Tabla 33. Área de interés 2 en el canal de intensidad HV para el ensayo de filtros Speckle. 111
Tabla 34. Prueba de diferentes valores para los parámetros del subproceso de segmentación. . 115
Tabla 35. Estadísticos de exactitud para la clasificación temática del 13 de Junio de 2010. 117
Tabla 36. Matriz de confusión para la clasificación temática del 13 de Junio de 2010..... 118
Tabla 37. Estadísticos de exactitud para la clasificación temática del 29 de Julio de 2010. 120
Tabla 38. Matriz de confusión para la clasificación temática del 29 de Julio de 2010. 121
Tabla 39. Estadísticos de exactitud para la clasificación temática del 29 de Octubre de 2010. . 123
Tabla 40. Matriz de confusión para la clasificación temática del 29 de Octubre de 2010. 124

Índice de Ecuaciones.

Ecuación 1. Ecuación de radar. 18
Ecuación 2. Criterio modificado de Raleigh. 23
Ecuación 3. Campo eléctrico inducido. 24
Ecuación 4. Constante dieléctrica compleja. 24
Ecuación 5. Matriz de dispersión. 27
Ecuación 6. Matriz de covarianza. 28
Ecuación 7. Matriz de coherencia. 29
Ecuación 8. Matriz de covarianza para una imagen dual pol. 29
Ecuación 9. Entropía. 30
Ecuación 10. Anisotropía. 30
Ecuación 11. Alpha. 30
Ecuación 12. Probabilidad de co-ocurrencia de los valores de grises. 34
Ecuación 13. Algoritmo de textura de divergencia de speckle. 35

1. Resumen ejecutivo.

Las capacidades de los sistemas satelitales con sensores activos, como los son los radares de apertura sintética (SAR por sus siglas en ingles), de adquirir información de la superficie terrestre en casi cualquier condición climatológica y la observación continúa de un evento, permiten identificar inundaciones y realizarles seguimiento. Con estos datos se puede determinar el comportamiento de la inundación producto de la propagación de sus aguas a zonas no inundadas las cuales pueden ser obtenidas con el uso de imágenes SAR en diferentes periodos de tiempo. En este trabajo se identificaron las coberturas vegetales que se vieron afectadas producto de este desastre natural ocurrido en el municipio de Santa Cruz de Mompós ubicado en el departamento de Bolívar, Colombia, durante el segundo semestre del año 2010 en el cual se marcó el inicio del fenómeno de la niña, generando así 3 mapas temáticos de coberturas de la tierra en base a seis imágenes SAR del sensor PALSAR del satélite ALOS dual pol HH/HV, para las fechas del 13 de Junio, 29 de Julio y 29 de Octubre del 2010 mediante el uso de clasificaciones supervisadas utilizando procesamiento digital de imágenes aplicado en los software SNAP y PCI Geomatica. Posteriormente, se obtienen las zonas afectadas por la inundación empleando un enfoque de sistemas de información geográfica dentro del software ArcGIS basado en análisis multitemporales, con los que se determina la propagación de aguas de inundación y se cuantifican las áreas afectadas por cada cobertura vegetal entre cada periodo de observación.

2. Descripción del problema.

La inundación es uno de los desastres naturales más frecuentes, dominantes y devastadores en el mundo actualmente (Rahman & Thakur, 2017), tal como se observó en Colombia durante la ola invernal y la llegada del fenómeno de la niña en 2010-2011 que afecto a 2’350.207 personas en todo el país en 1.061 municipios (Jabba, 2014), este evento fue catalogado como el más fuerte en toda la historia de la nación por alcanzar con mayor rapidez sus niveles más bajos de temperatura (El Espectador, 2010). Uno de los municipios más perjudicados fue Santa Cruz de Mompós el cual se vio afectado en un 29,5% de su área total por este desastre natural (Salazar Duarte & Ruiz Morales, 2017), debido a que se encuentra ubicado dentro de la llamada Isla Margarita que se halla en la región de la Depresión Momposina, cuenca hidrográfica sedimentaria recorrida por

el rio Magdalena, bañada por los brazos de Loba, Mompós y Chicagua, además allí desembocan el rio Cauca, Cesar y San Jorge (Organización Colparques, 2018).

Este municipio históricamente se ha visto afectado por las inundaciones especialmente en época de invierno, teniendo como punto de partida los primeros relatos de las culturas amerindias de los Zenú que se asentaron en el sur-este de Santa Cruz de Mompós, dicha cultura utilizaba a su favor este fenómeno natural y por esta razón le realizaban seguimiento, para ello construyeron sistemas de canales con el fin de irrigar áreas más altas y también para controlar las inundaciones sobre sus poblados cuando llegaba la temporada de lluvias, por otro lado cuando el nivel del agua bajaba utilizaban el lodo resultante para enriquecer la tierra (Portillo, 2011), esto les permitió ser reconocidos como los principales productores agrícolas de alimentos de la región (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2017).

Actualmente, con la finalidad de realizar el seguimiento a la inundación sobre el municipio para estimar la relación entre el peligro y la evaluación de los daños en las áreas afectadas por este desastre natural es necesario comprender la distribución temporal y espacial de la inundación (Youngjoo, Shrestha, Yorozuya, & Sawano , 2015), esto es entender la propagación de las aguas de inundación sobre las demás coberturas de la tierra que normalmente no se encuentran cubiertas por el agua. Para poder determinar dichas afectaciones sobre las diferentes coberturas vegetales producto de este fenómeno natural sobre el municipio de Santa Cruz de Mompós durante el segundo semestre de 2010 es indispensable contar con información base, esto a través del uso de imágenes satelitales que tengan recubrimiento espacial y temporal sobre la zona, por lo que en principio se optó por adquirir imágenes de libre acceso tomadas por satélites con sensores pasivos debido a que su finalidad es el obtener datos de la cobertura terrestre y son muy útiles para la elaboración de mapas de uso y cobertura de la tierra (Fernández Coppel, 2016), por ello se habían escogido imágenes tomadas por el satélite Landsat 7 el cual cumplía con los requerimientos de cubrimiento espacial y temporal sobre la zona, sin embargo dadas las circunstancias meteorológicas que se presentaron durante el periodo de observación establecido, la gran cantidad de nubes percibidas en el área del municipio producto de las lluvias hizo inviable que con estos insumos se pudiera efectuar el seguimiento a la inundación, por lo que se decidió para este proyecto utilizar imágenes tomadas por el sensor PALSAR del satélite ALOS como insumo base, puesto que son de libre acceso y dadas sus capacidades de penetración a

través de las nubes y las condiciones atmosféricas, permiten realizar la identificación de las coberturas terrestres aún bajo estas limitaciones y por ende posibilitan efectuar el seguimiento a la inundación producto de la propagación de sus aguas.

3. Objetivos.

3.1. General.

Implementación de una metodología de análisis de imágenes SAR para el seguimiento de inundaciones que permita determinar los cambios sobre las diferentes coberturas vegetales y cuantificar las áreas afectadas.

3.2. Específicos.

- Elaborar la clasificación supervisada de las coberturas presentes en las imágenes SAR.
- Validar la exactitud temática de los mapas elaborados aplicando el estadístico Kappa.
- Realizar estudios multitemporales con los mapas temáticos obtenidos para la detección de cambios en las coberturas vegetales.
- Efectuar el seguimiento espacial de la propagación de aguas de inundación sobre las coberturas vegetales.
- Cuantificar las áreas afectadas por cobertura vegetal en diferentes periodos de toma, producto de los cambios percibidos durante la ola invernal.

4. Marco Teórico.

4.1. Antecedentes.

Hoy en día las imágenes satelitales obtenidas a través de sistemas con sensores activos como lo son los radares de apertura sintética (SAR por sus siglas en inglés) están siendo ampliamente utilizadas en la detección de inundaciones debido a la capacidad de penetración que tienen a través de las nubes y las condiciones atmosféricas neblinosas tales como la niebla, el smog, las lluvias ligeras, la neblina, etc. (Rahman & Thakur, 2017), lo cual presenta grandes ventajas con respecto a las imágenes obtenidas por sistemas con sensores pasivos que no tienen esta capacidad de penetración por la resolución radiométrica que manejan, además las inundaciones causadas por el aumento considerable de las precipitaciones en consecuencia del fenómeno de la niña, tal como ocurrió en los años 2010 y 2011 en Colombia (IDEAM) se presentan bajo condiciones de cielo nublado, por ende las imágenes SAR serían las más adecuadas para detectar de manera confiable y oportuna las áreas inundadas.

Por otro lado, los SAR tienen la capacidad de cubrir grandes áreas y adquirir información para todo tipo de clima, además pueden obtener información masiva en cortos períodos de tiempo (Sui & Xu, 2012) ya que las nuevas misiones satelitales suministran una gran cantidad de imágenes de radar adquiridas diariamente, caracterizadas por una alta resolución espacial, útiles en problemas de detección de inundaciones (D' Addabbo, Refice, Pasquariello, Lovergine., & Manfreda, 2016). A esto se suma la capacidad de observación continua de eventos de inundación para producir mapas de inundación precisos, de manera rápida y rentable (Rahman & Thakur, 2017).

Para determinar y cuantificar la propagación de aguas de inundación como insumo base se deben obtener mapas en los cuales se identifiquen las zonas o áreas inundadas en diferentes momentos. Lo anterior puede realizarse con series de tiempo de intervalos cortos con el fin de ayudar a mejorar la protección contra inundaciones y apoyar la prevención en áreas críticas en el futuro (Veljanovski, Lamovec, Pehani, & Oštir, 2011), o bien para permitir una mejor comprensión de la situación del desastre lo que puede ayudar a los organismos de socorro y de prevención a elaborar y gestionar los planes de contingencia para mitigar el impacto de la inundación (Younggi, Youkyung, & Taebyeong, 2015). Estos mapas también pueden hacerse en diferentes

fechas sin necesidad de utilizar intervalos de tiempo similares ya que pueden ser empleados como parámetros de control en simulación de inundaciones (Veljanovski, Lamovec, Pehani, & Oŝtir, 2011).

Existen diferentes metodologías, enfoques o técnicas para la elaboración de los mapas de inundación o de áreas inundadas con las que se busca extraer las zonas donde hay presencia de agua, así como de mapas de cobertura de la tierra que actualmente cuentan con un desarrollo progresivo y que han tomado importancia debido a la calidad de resultados que de ellas se obtienen, estas pueden ser semiautomáticas o automáticas, las cuales serán detalladas a continuación.

Las metodologías semiautomáticas consisten en la producción de mapas de inundación y de coberturas de la tierra que requieren una intervención manual por parte de un intérprete que faculta luego el funcionamiento automático de los procesos o algoritmos que se ejecutan en diferentes software especializados en el procesamiento digital de imágenes con el objetivo de extraer los cuerpos de agua presentes en la imagen (Veljanovski, Lamovec, Pehani, & Oŝtir, 2011), (Evans & Costa, 2012) y (Costa, Telmer, Silva, & Evans, 2010).

Dentro de las metodologías semiautomáticas más utilizadas en la detección de cuerpos de agua están las técnicas de umbralización debido a que agrupan los píxeles de una imagen pertenecientes a los diversos objetos de la misma diferenciándolos del fondo, es decir que extrae de la imagen aquellos píxeles que se encuentran dentro del umbral seleccionado y los diferencia del resto, permitiendo elegir así los píxeles de interés (Palomino & Concha, 2009). Esta metodología funciona muy bien cuando la imagen contiene objetos contrastados en su fondo, como lo es el caso de los cuerpos de agua debido al comportamiento espectral que tienen con las microondas porque como se cita en (Rahman & Thakur, 2017) las superficies planas del agua reflejan la señal lejos del sensor disminuyendo la cantidad de radiación que se devuelve al mismo y esto causa píxeles relativamente oscuros en la imagen de radar, los cuales se representan con valores de niveles digitales muy bajos. Luego de determinado el umbral en algunas metodologías se recurren a algoritmos de segmentación los cuales agruparán los píxeles que comparten similitudes espectrales. En (Veljanovski, Lamovec, Pehani, & Oŝtir, 2011) se puede apreciar que utilizan una técnica de umbralización denominada **“**Delineación de cuerpos de agua basada en píxeles” cuya principal ventaja es que a pesar de ser semiautomática, tiene un

alto nivel de automatización y autonomía y, por lo tanto, es idónea para un mapeo rápido. Otro ejemplo de técnica de umbralización son las que se trabajan en (Rahman & Thakur, 2017) y (Rahman M. R., 2006) en donde además de los umbrales, utilizan el método de segmentación "density slicing" para separar los cuerpos de agua el cual es ejecutado en un entorno de sistemas de información geográfica.

Por otro lado, para la elaboración de mapas de cobertura de la tierra también se tiene como metodología semiautomática aquellas que utilizan datos de polarimetría de los sensores SAR como bien se denota en (Lönnqvist, Rauste, Molinier, & Häme, 2010)**,** en cuyo estudio se contrastan los resultados obtenidos utilizando componentes polarimétricos como la entropía (H), alpha (α) y la anisotropía (A), y en donde concluyen que al utilizar estos datos se obtienen mapas con coeficientes kappa aceptables. Así mismo en (Klran & L, 2016) también se utiliza la descomposición polarimétrica incoherente en base a los parámetros H/A/Alpha sin embrago mediante el uso del clasificador de Wishart con el cual también obtienen muy buenos resultados para aplicaciones de clasificación de coberturas de la tierra. En (Kourgli, Ouarzeddine, Oukil, & Belhadj-Aissa, 2010) se utiliza tanto información polarimétrica como algoritmos de textura para poder aumentar la separabilidad de algunas clases como lo es la de bosques, debido a que la información en base a los parámetros de entropía anisotropía y alpha no fueron suficientes. Por otro lado existen estudios donde se utiliza información polarimétrica tanto coherente como incoherente para la clasificación de coberturas en un ámbito semi urbanizado, como lo es el caso de (Alberga, 2007), donde utilizan información derivada de los enfoques de Krogager, Cameron así como H/A/Alpha y hacen uso de los algoritmos de clasificación de mínima distancia y máxima verosimilitud, de este estudio concluyen que la clasificación de coberturas en este ámbito en base a información obtenida mediante las técnicas coherentes presenta resultados aceptables y comparables con las clasificaciones en base a la información polarimétrica obtenida a través de las técnicas incoherentes.

En (Juan, Zhen, Bangsen, & Zili, 2012) se propone para la clasificación de coberturas terrestres con la finalidad de realizar estudios ecológicos sobre el delta del rio Amarillo en China obtener un espacio de características conformado por información polarimétrica obtenida a partir de descomposiciones tanto coherentes como incoherentes como lo son las de Pauli, H/A/Alpha, Holm, Freeman-Durden y Krogager, así mismo utilizan información derivada de la técnica

denominada como interferometría polarimétrica (PolInSAR) y de algoritmos de textura como lo son la entropía, el contraste, la homogeneidad y la energía. Utilizan los algoritmos de clasificación por máquinas de soporte vectorial y el de Wishart, concluyendo que el primero presenta mejores resultados comparativamente en basa al mismo espacio de características.

Por otra parte en (Ali Zeeshan, Qazi, & Aslam, 2018) realizan una comparación de las clasificaciones temáticas resultantes en base a información de imágenes obtenidas por los satélites Landsat 8 y ALOS/PALSAR dual pol HH/HV, donde concluyen que para ambos se obtienen buenos resultados, cabe destacar que en el caso de la información en base al sensor SAR obtienen una tercera banda formada por el cociente de ambas polarizaciones. En las dos clasificaciones emplearon el algoritmo de clasificación por máxima verosimilitud. En el caso de (Mishra & Susaki, 2012) se propone mediante un modelo de regresión para una imagen SAR dual pol HH/HV obtener las polarizaciones VH/VV, y en base a estas y a los algoritmos de clasificación de Freeman-Wishart y las máquinas de soporte vectorial realizan el proceso de clasificación temática, generando mapas de cobertura de la tierra con coeficientes kappa mayores de 0.7 para cada una de las clases definidas tanto para la imagen dual pol como para la imagen quad pol obtenida mediante dichas regresiones.

El análisis de imágenes orientado a objetos es otra metodología semiautomática utilizada para la detección de cuerpos de agua en las imágenes SAR, así como para la clasificación de coberturas de la tierra, esta técnica implica la categorización de píxeles en función de la relación espacial con los píxeles circundantes, esto se debe a que se forman objetos que no son más que la agrupación de píxeles con atributos similares, ya que se basa en las características pictórico morfológicas como lo son la textura, el tono, el tamaño, la forma y el contexto espacial de dicho conjunto de píxeles (Humboldt State University, 2015), en este enfoque se tiene tres elementos principales los cuales son la segmentación de la imagen que consiste en dividirla en clases homogéneas, es decir que se agrupan los píxeles que comparten atributos similares en cuanto a las características anteriormente mencionadas, el segundo elemento es la extracción de características del objeto cuyo objetivo es capturar las formas, las texturas y las características espectrales en la imagen y el tercer elemento es la clasificación de objetos que consiste en asignar al sistema determinados píxeles u objetos como muestras de entrenamiento y clasificar píxeles u objetos según sus espacios de características a través de un modelo de clasificación

(Zerrouki & Bouchaffra, 2014). Un ejemplo de esta metodología se presenta en (Veljanovski, Lamovec, Pehani, & Oŝtir, 2011) donde se concluye que el análisis basado en objetos ofrece mejor precisión con respecto a la utilización de técnicas de umbralización debido a que los objetos al combinar diferentes propiedades de atributos conducen a un bajo grado de clasificaciones erróneas. En (Evans & Costa, 2012) y (Costa, Telmer, Silva, & Evans, 2010) también se utiliza este análisis con el fin de elaborar mapas de coberturas de la tierra, allí se discriminan los cuerpos de agua de las demás coberturas de la tierra que comprenden bosques, sabanas, pastizales, zonas de agricultura, etc.

Las metodologías automáticas consisten en su mayoría en algoritmos o códigos con los cuales se busca que el proceso de detección de cuerpos de agua en las imágenes SAR funcione con la mínima intervención humana y que permitan la detección de inundaciones en tiempo casi real, para ello se han desarrollado diversas metodologías como se muestra en (Mason, Davenport, Neal, Schumann, & Bates, 2012) donde se elaboró un algoritmo capaz de detectar zonas de inundación de manera automática tanto en zonas urbanas como rurales en imágenes SAR de alta resolución incluyendo datos de LiDAR (Light Detection and Ranging por sus siglas en inglés) y DEM (Digital Elevation Model por sus siglas en inglés). Así mismo se utilizan algoritmos de segmentación y de umbrales dentro de estas metodologías, como lo es el caso de (Sui & Xu, 2012) en donde se utiliza el algoritmo de umbralización de Otsu y configuraciones de nivel multiescala el cual considera tanto información global como local de toda la imagen para mejorar la precisión en la detección del agua mediante múltiples iteraciones.

Respecto al *Machine Learning* o aprendizaje automático actualmente es una metodología que también se utiliza en la detección de zonas de inundación, este enfoque es una subdivisión de la inteligencia artificial basada en el proceso de aprendizaje biológico y se refiere al diseño de algoritmos para aprender de datos legibles por máquina (Lary, Alavi, Gandomi, & Walker , 2015), esta metodología es utilizada en (Veljanovski, Lamovec, Pehani, & Oŝtir, 2011), donde debido a que este enfoque necesita de minería de datos, se incluyó información adicional como lo fueron datos de pendientes, alturas, distancia a las corrientes de agua y uso del suelo por lo que los autores concluyen que debido a la preparación de estos datos, este procedimiento exige demasiado tiempo, por ende no es apropiado para usarse en el mapeo rápido de inundaciones.

Por otro lado, existen metodologías que integran las imágenes de sistemas con sensores pasivos como recurso base, una de estas técnicas es la fusión de imágenes, como se puede apreciar en (Younggi, Youkyung, & Taebyeong, 2015) cuyo enfoque se basa en la distorsión espectral que se da durante el proceso de fusión el cual permite detectar cambios en las áreas afectadas por inundación, además existen metodologías de fusión de datos tanto de imágenes satelitales ópticas, imágenes de SAR y datos de Radares de apertura sintética interferométricos (InSAR) que contribuye a la elaboración de mapas de zonas de inundación y posibilitan realizar seguimiento a su dinámica tal como se observa en (D' Addabbo, Refice, Pasquariello, Lovergine., & Manfreda, 2016).

Luego de obtener los mapas de zonas inundadas en diferentes fechas, es posible determinar y cuantificar la propagación de aguas de inundación, esto se realiza mediante procesos de extracción y solapamiento entre estos mapas siguiendo el orden temporal, lo que permite establecer las zonas que se han visto inundadas por la dinámica de las aguas de inundación que se propagan a zonas no inundadas a través del tiempo, también se puede conocer cuáles son las áreas que se han visto más afectadas debido a la permanencia de estas aguas, establecer el patrón de la dinámica de inundación durante el periodo de observación y cuantificar las áreas afectadas (Rahman & Thakur, 2017) y (Rahman M. R., 2006).

4.2. Radar.

El Radar (Radio Detection and Ranging por sus siglas en inglés) es un método, sistema o técnica que hace uso de radiación electromagnética transmitida, reflejada y temporizada con el fin de detectar, localizar o rastrear objetivos, para medir altitud y distancias o para adquirir imágenes de terreno. Los radares cuentan con instrumentos de detección de radio que consisten en un transmisor que envía ondas de microondas o radio de alta frecuencia y un receptor que las recibe después de haber sido reflejadas por un objeto en dirección al radar, estos a su vez cuentan con antenas encargadas de la emisión y recepción de la energía, un equipo de manejo de datos y un procesador de imágenes en el caso de los sensores SAR (European Space Agency, 2014a) y (Applied Remote Sensing Training, 2017).

Los radares de acuerdo al número de antenas pueden ser monoestáticos los cuales cuentan con una única antena la cual se encarga tanto de emitir como de recibir la señal, biestáticos los cuales

cuentan con una antena para la transmisión de la señal y una para la recepción de la misma que normalmente se ubican en posiciones distantes, y los multiestáticos que poseen varias antenas y para cada una se procesa su respectiva información (Pérez Vega, 2010).

La ecuación del radar (ecuación 1) representa la relación entre la potencia transmitida y recibida producto de la retrodispersión de la señal en dirección al radar con un objeto ubicado a una distancia determinada, esta relación es una de las bases fundamentales en la teoría de los radares (Pérez Vega, 2010).

$$P_r = \frac{P_t G A \sigma}{(4\pi)^2 R^4} \quad \textbf{(1)}$$

Donde (P_r) hace referencia a la potencia recibida, (P_t) la potencia trasmitida, (G) la ganancia de la antena, (A) la apertura efectiva o área de la antena, (σ) la sección transversal individual del radar o el coeficiente individual de decaimiento del objetivo y (R) la distancia a la que se encuentra el objetivo.

4.2.1. Radar de apertura sintética (SAR).

Un radar de apertura sintética (SAR por sus siglas en inglés) es un sistema de radar capaz de generar imágenes digitales, el cual cuenta con un sensor activo que emite energía mediante pulsos en el intervalo de frecuencias de microondas y del radar en un período pequeño de tiempo y recibe los ecos provenientes de reflexiones de la señal en los objetos, dando lugar a una apertura sintética debido a la gran velocidad de desplazamiento del satélite simulando que la antena del dispositivo se convierte en una antena virtual de mayor tamaño, el blanco permanece en el haz de la antena durante unos instantes y está observado por el radar desde numerosos puntos a lo largo de la trayectoria del satélite, lo que es equivalente a prolongar la longitud real de la antena (Tesis Doctorales en Red) .

Estos radares generan imágenes digitales de la superficie terrestre las cuales se definen como un arreglo de filas y columnas compuestas por elementos unitarios denominados pixeles, los cuales se encuentran asociados con un área pequeña de la superficie terrestre, cada uno de estos pixeles representa un número complejo que se compone de información referente a la amplitud y la fase sobre el campo del microondas y del radar retrodispersado por todos los objetos en tierra que se

relacionan con el pixel correspondiente proyectado a tierra (Ferretti, Monti-Guarnieri, Prati, & Rocca, 2007).

4.2.2. Parámetros de un sistema SAR.

4.2.2.1. Longitud de onda.

La longitud de onda se define como la distancia entre dos puntos de la fase correspondiente en ciclos consecutivos o bien la distancia entre dos picos o dos valles de la onda (European Space Agency, 2014a) y es uno de los principales parámetros de los sistemas SAR, pues establece la resolución espectral de estos sensores activos, es decir en que franja del espectro electromagnético el sensor es capaz de emitir y recibir información. En cuanto a los sistemas SAR estos operan en las bandas que pueden visualizarse en la tabla 1 las cuales comprenden un rango específico de longitudes de onda pertenecientes al espectro del microondas y del radar, pues el primero comprende las longitudes de onda que se encuentran entre el intervalo de 1 mm hasta 10 cm y el segundo desde los 10 cm hasta 1 m (Universidad de Columbia).

Tabla 1. Longitudes de onda comprendidas por los sistemas SAR.

Banda	**Longitud de Onda (λ) en cm.**	**Frecuencia (*f*) en GHz.**	**Algunas aplicaciones**	**Sensores SAR**
Ka	0.8 a 1.1	40.0 a 26.5	Radares de alta resolución.	-
K	1.1 a 1.7	26.5 a 18.0	-	-
Ku	1.7 a 2.4	18.0 a 12.5	Glaciología y estudios de nieve.	-
X	2.4 a 3.8	12.5 a 8.0	Agricultura, océanos y cartografía.	TerraSAR X TanDEM X COSMO Skymed PAZ SAR
C	3.8 a 7.5	8.0 a 4.0	Agricultura y océanos.	Radarsat 1 y 2 ERS 1 y 2 Sentinel 1 y 2 ENVISAT
S	7.5 a 15.0	4.0 a 2.0	Aplicaciones meteorológicas y medición de lluvia.	-
L	15.0 a 30.0	2.0 a 1.0	Agricultura, vegetación, gestión forestal y humedad del suelo.	ALOS/PALSAR UAVSAR SeaSAT SAOCOM

				NISAR
P	30.0 a 100.0	1.0 a 0.3	Biomasa y humedad del suelo.	AIST-2 Biomass

Fuente: Adaptación propia con base en (Applied Remote Sensing Training, 2017)**.**

4.2.2.2. Polarizaciones.

La polarización se refiere al plano de propagación del campo eléctrico de una onda electromagnética relativo a la superficie de la tierra e independiente del tipo de longitud de onda, las señales de radar pueden ser emitidas y/o recibidas en diferentes polarizaciones utilizando filtros especiales (Applied Remote Sensing Training, 2017).

Existen tres tipos de polarizaciones en los sistemas SAR los cuales dependen de las componentes (Ex) y (Ey) del vector (E) que representa el campo eléctrico y la diferencia de fase que se presenta entre estos dos componentes (δ), el eje Z indica la dirección de propagación del campo eléctrico. Estas polarizaciones pueden ser lineales, circulares o compactas y elípticas.

La polarización lineal es la más utilizada para la elaboración de productos temáticos en base a información extraída a partir de imágenes SAR, y se da cuando los componentes (Ex) y (Ey) del campo eléctrico son equivalentes o cuando uno de ellos es igual a cero, a su vez la diferencia de fase entre dichos componentes corresponde a 0° o 180° (European Space Agency, 2014a), esto genera que el comportamiento de la propagación del campo eléctrico a través del eje Z sea una línea si se observa de frente (ilustración 1).

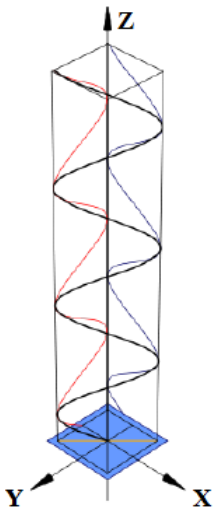


Ilustración 1. Polarización lineal.
Fuente: (Vasile & Besic, Research Gate, 2013).

Dado lo anterior se puede visualizar que el plano de propagación del campo eléctrico es lineal como lo representa la línea de color amarillo si las componentes (*Ex*) y (*Ey*) son iguales, en el caso de que la componente (*Ex*) sea igual a cero y (*Ey*) diferente de cero, se obtiene entonces un tipo de polarización lineal denominado como vertical (V), de lo contrario si la componente (*Ex*) es diferente de cero y (*Ey*) es cero resulta entonces la polarización lineal horizontal (H) (Vasile & Besic, Research Gate, 2013), (Domènech Olivié, 2015), (European Space Agency, 2014a) y (Fernández Ordóñez, Escalona Maurice, & Valdez Lazalde, 2015).

Estos dos tipos de polarización lineales (H y V) son ampliamente utilizadas en los sistemas SAR, pues prácticamente todos hacen uso de estas, su aplicación radica en que estos sistemas emiten la energía electromagnética en alguna de estas dos polarizaciones y son capaces de detectar la energía retrodispersada por los objetos que provee información relacionada a los componentes verticales y horizontales de la superficie dependiendo de la intensidad y del tipo de la polarización lineal de la señal retrodispersada por un objeto (ilustración 2).

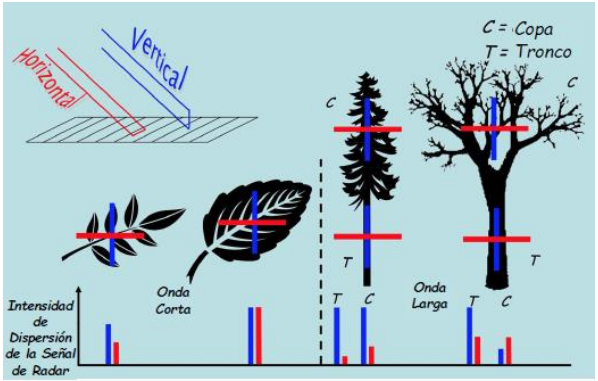


Ilustración 2: Relación de la polarización lineal con algunos objetos.
Fuente: (Applied Remote Sensing Training, 2017).

De la ilustración 2 se puede decir que las hojas de los arboles con área foliar pequeña en comparación con la longitud de onda del sistema SAR presentan una mayor dispersión de la onda polarizada verticalmente, por otro lado las hojas con área foliar grande presentan una intensidad de dispersión equivalente en ambas polarizaciones (Applied Remote Sensing Training, 2017). Así mismo respecto a los arboles específicamente en sus troncos, siempre va a primar la retrodispersión de la señal polarizada verticalmente debido a que su estructura natural es vertical en referencia a la superficie de la tierra, y referente a sus copas dependiendo de su

estructura y del tamaño de las hojas, estas pueden dispersar la señal en polarización tanto vertical como horizontal.

Los sistemas SAR cuentan con polarizaciones similares en las cuales el sensor emite la energía y la recibe en la misma polarización lineal siendo estas la HH en la cual el radar emite y recibe la señal horizontalmente polarizada y la VV donde se emite y se recibe la señal verticalmente polarizada. Además estos sistemas también cuentan con polarizaciones cruzadas donde el sensor emite la energía en una polarización lineal y la recibe en otra como lo son la HV en la cual el radar emite la señal horizontalmente polarizada y la recibe verticalmente polarizada y la VH donde se emite la señal verticalmente polarizada y se recibe horizontalmente polarizada.

Dependiendo del sistema SAR y de su modo de toma, es posible contar con imágenes tomadas en polarizaciones únicas o Single Pol, es decir que solo cuentan con un tipo de polarización siendo comúnmente las HH o las VV, con doble polarización o Dual Pol que incluyen dos polarizaciones que tienen en común el mismo tipo de polarización emitida como lo son las HH/HV o las VV/VH o finalmente con todas las polarizaciones lineales o Quad Pol que incorporan tanto las polarizaciones similares como las cruzadas, es decir que incluye las polarizaciones HH/HV/VV/VH.

4.2.2.3. Angulo de incidencia.

El ángulo de incidencia (Incidence Angle en inglés) es otro de los parámetros de los sistemas SAR más importantes, pues este determina la penetración de la señal y la retrodispersión del radar con la superficie producto de la interacción de la señal con los objetos en tierra representada en el brillo o el tono de pixel de las imágenes resultantes. Este se define como el ángulo que se forma por el haz incidente del radar y la vertical de la superficie de intercepción y se utiliza para describir la relación angular entre el haz del radar y el objetivo (European Space Agency, 2014b). El ángulo de incidencia varia en la franja de iluminación del radar, pues aumenta a medida de que el haz se mueve en dirección de desplazamiento, además depende de la altura a la que se encuentre el sensor (Applied Remote Sensing Training, 2017) y (Karszenbaum & Barrazza, 2019).

4.2.3. Retrodispersión de la señal de radar.

La retrodispersión de la señal del radar se da cuando el haz o energía incidente emitida por el sensor rebota con los objetos, esta interacción genera una dispersión de dicho haz en diferentes direcciones y magnitudes, y solo aquella energía que regrese en dirección al sensor será captada por la antena del mismo para así conformar las imágenes digitales (Applied Remote Sensing Training, 2017). La retrodispersión depende tanto de los parámetros del radar como lo son la longitud de onda, la polarización y el ángulo de incidencia como también de las características de la superficie que se asocian principalmente a su rugosidad, propiedades dieléctricas y el mecanismo de retrodispersión que esta presenta con la energía de radar.

4.2.3.1. Rugosidad de la superficie.

La rugosidad o aspereza son aquellas variaciones promedio en altura de una superficie en relación a una superficie plana, una superficie es considerada lisa o libre de aspereza si las variaciones en altura son mucho más pequeñas que la longitud de onda (Applied Remote Sensing Training, 2017). Existe una relación (ecuación 2) entre la longitud de onda del radar (λ), el ángulo de incidencia (θ) y la profundidad de la irregularidad o aspereza (h) denominado como criterio modificado de Raleigh que establece cuando una superficie semi áspera es reflejada como lisa (Fricker) y (Velazco Capacho, 2016).

$$cos\theta > \frac{\lambda}{8h} \qquad \textbf{(2)}$$

En relación con las imágenes obtenidas por los sensores SAR, las superficies ásperas se denotarán con tonalidades brillantes debido a que la señal presenta un mayor grado de dispersión puesto que las irregularidades de la superficie son detectadas y la señal interactúa con estas, en el caso contrario si la superficie es lisa la señal será reflejada en dirección opuesta al sensor y este no podrá captar la energía retrodispersada, por ello se visualizarán estas superficies en tonos oscuros. Adicionalmente la densidad de los objetos en tierra, su tamaño y orientación en dirección al sensor también interactúan con el haz del radar, y estas características son detectadas mediante las polarizaciones y la intensidad de la señal recibida (Applied Remote Sensing Training, 2017).

4.2.3.2. Propiedades dieléctricas de la superficie.

Cuando la señal interactúa con el objeto se inducen los campos eléctrico y magnético los cuales son los responsables de generar la onda o energía retrodispersada. Respecto al campo magnético este no presenta diferencias al interactuar con los objetos, pues la inmensa mayoría de estos en teledetección son no magnéticos al ser su permeabilidad magnética casi nula, por ello la variación de este campo antes y después de interactuar con el objeto es despreciable (Karszenbaum & Barrazza, 2019). Sin embargo la mayoría de los objetos en teledetección presentan propiedades dieléctricas relacionadas con la constante dieléctrica compleja la cual se define como una magnitud física compleja adimensional que describe como un campo eléctrico afecta a un objeto (UNICROM, 2018), el campo eléctrico inducido puede expresarse mediante la ecuación 3.

$$D = \varepsilon E \tag{3}$$

Donde (D) es el campo eléctrico inducido, (ε) la constante dieléctrica compleja y (E) el campo eléctrico en el caso que no hubiese algún objeto y hubiera vacío. Como puede percibirse de la ecuación 3 el valor de la constante dieléctrica compleja influye directamente en la energía retrodispersada por el objeto, dicha constante se expresa a continuación:

$$\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon'' \tag{4}$$

Dado lo anterior se tiene que entre mayor sea la constante dieléctrica compleja de un objeto, mayor será la energía del campo eléctrico inducido y por ello mayor será la intensidad de la energía retrodispersada. Dada esta premisa, en las imágenes SAR normalmente se establece que los objetos húmedos o con presencia de agua presentarán una mayor retrodispersión de la señal que se visualiza en tonos muy brillantes en las imágenes digitales, debido a que el agua tiene uno de los valores más altos de la constante dieléctrica compleja con cerca de 80 si se compara con los suelos secos cuya constante es menor que 5, por ende se puede concluir que entre mayor sea la humedad en el objeto, mayor será la respuesta del radar (Karszenbaum & Barrazza, 2019) y (Applied Remote Sensing Training, 2017).

4.2.3.3. Mecanismos de retrodispersión.

Dado a que la señal de radar es sensible a la estructura de los objetos, la intensidad de la señal recibida o retrodispersada dependerá principalmente de su interacción con estos, dicha interacción se da mediante un mecanismo de retrodispersión que indica como la señal reboto sobre el objeto y como fue dispersada o reflejada por este (Applied Remote Sensing Training, 2017). Algunos de los mecanismos más relevantes que se dan con la señal de radar son la reflexión especular, la reflexión difusa, la reflexión efecto esquina o por doble rebote y la reflexión por volumen.

4.2.3.4. Speckle.

El *Speckle* o efecto de sal y pimienta es un fenómeno de los sistemas SAR que resulta de la interacción entre el pulso de radar y las diferentes distribuciones de la dispersión en un objetivo, lo que reduce considerablemente la capacidad de interpretación de las imágenes (Rahman & Thakur, 2017) , esto se debe a que la señal emitida por el sensor se transmite en fase, de forma coherente sin producir interferencias hasta que interacciona con el objeto, entonces deja de estar en fase y las ondas producen interferencias que generan píxeles claros y oscuros (Garcia, Gonzáles, De la Vega, Valverde, & Sebem, 2003). Para corregir este fenómeno existen diversas técnicas que se agrupan en dos categorías, las no coherentes o integración multi-look, y las técnicas adaptativas de restauración de imágenes o filtros espaciales.

Técnicas no coherentes o integración multi-look: Consiste en dividir el ancho de banda del espectro azimutal de la imagen del radar en “L” segmentos llamados looks, con el cual se obtienen “L” imágenes independientes de este espectro las cuales finalmente se promedian (Gagnon & Jouan), si cada imagen es estadísticamente independiente una de otra, la relación señal-ruido mejora con la raíz cuadrada del número de looks, lo que reduce el ruido speckle (Divisão de Processamento de Imagens, 2019).

Técnicas adaptativas de restauración de imágenes o filtros espaciales: Estos filtros se aplican luego de que las imágenes hayan sido tomadas y funcionan mediante el movimiento de una ventana sobre cada píxel a lo largo de toda la imagen, la ventana se mueve y aplica un cálculo matemático cuyo resultado sustituye el valor del píxel central de la ventana, por ende se logra el efecto de suavizado y visualmente se percibe la reducción de ruido speckle (Wicaksono

Santoso, Bayuaji, Tien Sze, Lateh, & Mohamad Zain, 2016), sin embargo aunque se reduce de cierta forma el ruido, a su vez se degrada la resolución espacial de la imagen debido al tamaño de dicha ventana.

4.3. Información derivada de las imágenes SAR.

Las imágenes digitales obtenidas por los sistemas SAR es posible aplicarlas a estudios o áreas específicas teniendo en cuenta su nivel de procesamiento y los procedimientos o técnicas que es posible ejecutar sobre estas. El primer nivel de procesamiento después de la transformación de la señal en una imagen se denomina como datos complejos de aspecto único o *Single Look Complex* (SLC por sus siglas en inglés), en donde el valor de cada pixel se compone de un número complejo formado por una parte real (*I*) y una imaginaria (*Q*), estos datos son ampliamente utilizados y normalmente se aplican en polarimetría de radar, polarimetría compacta, interferometría (InSAR) o interferometría polarimétrica (PolInSAR). Por otro lado se encuentran los datos detectados en los que generalmente se combina la parte real e imaginaria del número complejo generando así un único valor en el pixel que representa la potencia o intensidad retrodispersada, estos datos al ser más fáciles de interpretar por el ojo humano se aplican a la elaboración de cartografía básica y temática (PCI Geomatics, 2018).

Para el desarrollo de este proyecto únicamente se tendrá en cuenta para el primer nivel de procesamiento la información obtenida por polarimetría de radar que se denomina como información polarimétrica, en cuanto al segundo nivel de procesamiento se considera la información textural.

4.3.1. Información polarimétrica.

La polarimetría es una técnica ampliamente usada para la derivación de información física, cualitativa y cuantitativa para aplicaciones terrestres, oceánicas, urbanas, etc. basada en la medición y exploración de las propiedades polarimétricas de dispersores artificiales y naturales, esta información se genera en base a la interacción del haz de radar polarizado de forma lineal en la mayoría de los casos con los objetos, los cuales lo dispersan y son capaces de mantener o hacer variar el tipo de polarización en el haz retrodispersado dependiendo de sus propiedades físicas, esta variación se conoce como despolarización que es una medida de cambio en el grado

de polarización de una onda parcialmente polarizada al dispersarse (Prats-Iraola, y otros, 2013) y (European Space Agency, 2014a).

Para poder sintetizar esta información se requiere de una técnica denominada como descomposición polarimétrica o de objetivos la cual es utilizada para generar discriminadores polarimétricos que pueden ser usados para el análisis, interpretación y clasificación de datos tomados por sistemas SAR y permiten la extracción de información de los procesos de dispersión que involucran un objetivo específico (Domènech Olivié, 2015). Existen dos tipos de descomposiciones polarimétricas las cuales pueden ser coherentes o incoherentes tal como describe la tabla 2, y algunas de sus metodologías serán detalladas en los apartados siguientes.

Tabla 2. Descomposiciones polarimétricas.

Descomposición polarimétrica coherente			**Descomposición polarimétrica incoherente**		
Mecanismos estándar		Algebraico	Estado de polarización	Mecanismos estándar	Algebraico
Matrices de Pauli	Enfoque de Krogager	Enfoque de Cameron	Enfoque de Huynen	Freeman	H/A/Alpha
				Yamaguchi	Touzi

Fuente: (Vasile, Grenoble Images Parole Signal Automatique (GIPSA))

4.3.1.1. Descomposición polarimétrica coherente.

La descomposición polarimétrica coherente fue desarrollada para caracterizar ondas dispersas completamente polarizadas en donde toda su información polarimétrica puede ser contenida en la matriz de dispersión. Esta técnica solo se puede utilizar para estudiar objetivos coherentes también conocidos como objetivos puntuales o puros o dispersores deterministas como por ejemplo los objetos hechos por el hombre (Turkar & Rao, 2011), además el objetivo de esta descomposición es expresar la matriz de dispersión $[S]$ medida por el radar como la combinacion de las respuestas de dispersión de los objetos más simples (European Space Agency, 2019), la matriz de dispersión se expresa como:

$$[S] = \sum_{i=1}^{k} c_i [S]_i \qquad \textbf{(5)}$$

Donde $[S]_i$ representa la respuesta de cada uno de los dispersores más simples, mientras que (c_i) indica el peso de $[S]_i$ en la combinación que conduce a la medida $[S]$. El término de combinación se refiere a la suma ponderada de las (k) matrices de dispersión.

La matriz de dispersión es capaz de describir completamente los dispersores deterministas que cambian la polarización de la onda incidente pero no describe la despolarización de la misma que generan los dispersores distribuidos, la matriz consiste entonces en la superposición coherente de las matrices de dispersión individuales de todos los centros de dispersión dentro del pixel y se mide emitiendo en dos polarizaciones ortogonales y recibiendo las ondas dispersadas en dos polarizaciones ortogonales (Prats-Iraola, y otros, 2013).

4.3.1.2. Descomposición polarimétrica incoherente.

La descomposición polarimétrica incoherente fue desarrollada para caracterizar dispersores distribuidos que se relacionan con los objetivos o dispersores naturales, estos dispersores están compuestos por un gran número de dispersores deterministas distribuidos aleatoriamente (Prats-Iraola, y otros, 2013). Este tipo de dispersores solo se pueden caracterizar estadísticamente debido a la presencia de ruido speckle y ya que este debe mitigarse, solo pueden emplearse representaciones polarimétricas de segundo orden para analizarlos, estas representaciones se denominan como las matrices de coherencia (T) y de covarianza (C), que aunque matemáticamente se obtienen de formas diferentes, estas dos representaciones de la información polarimétrica son equivalentes (European Space Agency, 2019).

La matrices de coherencia y covarianza son matrices hermitianas semi definidas positivas, que se definen como matrices cuadradas con entradas complejas que son equivalentes a su propia transpuesta conjugada y sus valores propios son no negativos (Domènech Olivié, 2015), (Marcus & Minc, 1988) y (Prats-Iraola, y otros, 2013) y (E. Szabo, 2015), estas matrices pueden modelarse de acuerdo a las ecuaciones 6 y 7.

$$\langle [C_n] \rangle = \sum_{i=1}^{k} p_i [C_n]_i \qquad \textbf{(6)}$$

$$\langle [T_n] \rangle = \sum_{i=1}^{k} q_i [T_n]_i \qquad \textbf{(7)}$$

Donde las respuestas canónicas son representadas como $[C_n]$ y $[T_n]$, y los coeficientes de sus componentes en $\langle [C_n] \rangle$ y $\langle [T_n] \rangle$ son p_i y q_i respectivamente.

El tamaño de estas matrices depende del número de polarizaciones con las que cuente la imagen SAR, si esta cuenta con dos polarizaciones, es decir si es una imagen Dual Pol, el tamaño de la matriz de coherencia o de covarianza será de 2x2, en el caso que dicha imagen cuente con todas las polarizaciones lineales, es decir es Quad Pol, entonces pueden construirse matrices de tamaño 3x3 y 4x4. Un ejemplo de una matriz de covarianza para una imagen con dos polarizaciones lineales (HH/HV) se puede observar a continuación:

$$\langle [C_{dual}] \rangle = \begin{bmatrix} \langle S_{HH} S_{HH}^* \rangle & \langle S_{HH} S_{HV}^* \rangle \\ \langle S_{HV} S_{HH}^* \rangle & \langle S_{HV} S_{HV}^* \rangle \end{bmatrix} \qquad \textbf{(8)}$$

Donde * indica una conjugación compleja y < > establece el promedio del conjunto lo que significa que para cada pixel se utiliza una ventana para calcular este valor. Los cuatro elementos de la matriz de covarianza se calculan para cada pixel en la imagen utilizando una ventana móvil y determinando el promedio. Cabe destacar que esta matriz contiene información sobre la intensidad y la fase (Applied Remote Sensing Training, 2017) y (Esmaeilzade, Jahani, & Amini, 2017).

Una de las descomposiciones polarimétricas incoherentes más utilizadas en la polarimetría de radar es la H/A/Alpha, también conocida como descomposición basada en valores o vectores propios, la cual es un método establecido en la hipótesis de que las características de dispersión de la polarización pueden representarse por el espacio de la entropía (H) y el ángulo de dispersión promedio ($\underline{\alpha}$) mediante el análisis de valores y vectores propios de las matrices de Hermit, este método tiene propiedades positivas como la invariación de rotación, la irrelevancia para distribuciones específicas de densidad de probabilidad y la cobertura de todo el espacio del

mecanismo de dispersión (Domènech Olivié, 2015). Para obtener los parámetros H/A/Alpha se deben aplicar las ecuaciones de la 9 a la 11.

$$H = \sum_{i=1}^{n} -p_i log_n(p_i) \quad con \quad p_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^{n} \lambda_k} \tag{9}$$

$$A = \frac{\lambda_{n-1} - \lambda_n}{\lambda_{n-1} + \lambda_n} \tag{10}$$

$$\underline{\alpha} = \sum_{i=1}^{n} p_i \alpha_i \tag{11}$$

Donde (n) indica el tamaño de la matriz de coherencia o de covarianza y (p_i) la probabilidad del valor propio (λ_i) el cual representa la importancia relativa de este valor con respecto a la potencia o intensidad total retrodispersada (European Space Agency, 2019).

El estudio de esta descomposición polarimétrica incoherente se realiza principalmente a través del ángulo de dispersión promedio ya que sus valores pueden relacionarse con la física detrás del proceso de dispersión, pues si ($\underline{\alpha}$) = 0°, entonces la dispersión corresponde a un único rebote producido por una superficie, si ($\underline{\alpha}$) = 45° se presenta una retrodispersión de volumen o dipolos y si ($\underline{\alpha}$) = 90° el mecanismo de dispersión corresponde a un doble rebote (Applied Remote Sensing Training, 2017).

Por otro lado se tiene la interpretación de los valores propios los cuales corresponden a la potencia o intensidad retrodispersada asociada al vector propio correspondiente, el cual se relaciona con el mecanismo de dispersión y se estudia de acuerdo a los parámetros de entropía y anisotropía (A). La entropía determina el grado de aleatoriedad del proceso de dispersión que también puede interpretarse como el grado de desorden estadístico, su valor es una media adimensional que oscila entre 0 y 1; si vale 0 indica una alta probabilidad de que el mecanismo de dispersión dominante del pixel sea uno solo, por el contrario si tiende a 1 significa que todos los mecanismos de retrodispersión tienen la misma probabilidad de ser encontrados en dicho pixel (Applied Remote Sensing Training, 2017) y (European Space Agency, 2019). La anisotropía es un parámetro complementario a la entropía cuyas unidades son adimensionales y

su valor se encuentra entre 0 y 1, puede utilizarse para detectar el retorno de objetivo único o múltiple (Lönnqvist, Rauste, Molinier, & Häme, 2010), desde un punto de vista práctico la anisotropía puede emplearse como fuente de discriminación solo cuando sea mayor que 0.7, pues a valores más bajos se ve muy afectada por el ruido de la imagen, por ende esta seria ruidosa (European Space Agency, 2019).

Las características de dispersión de la polarización pueden representarse por el espacio de la entropía y el ángulo de dispersión promedio, este espacio puede visualizarse en la ilustración 3.

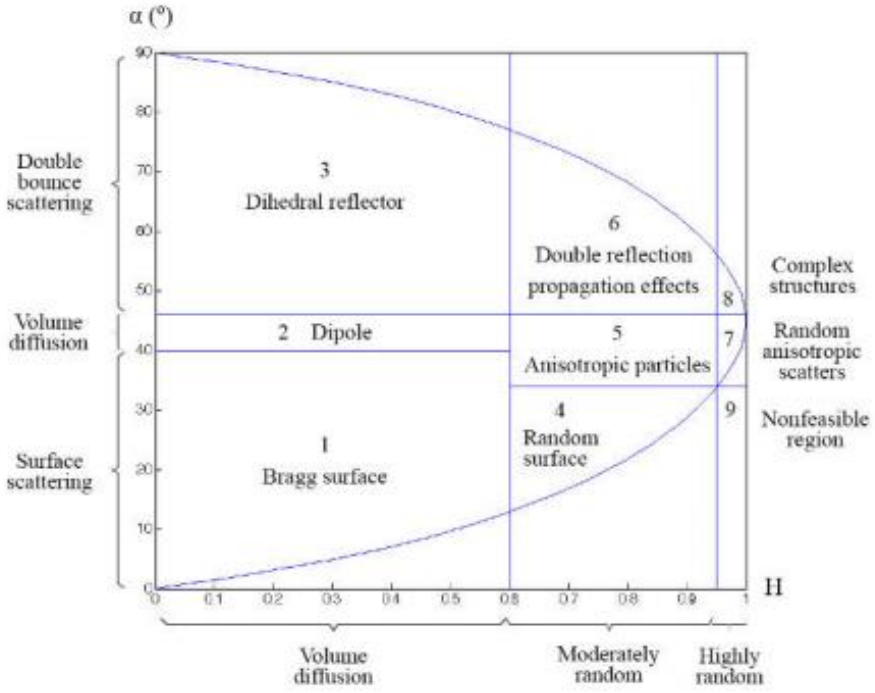


Ilustración 3. Espacio o plano de clasificación H – α.
Fuente: (Veci, 2016).

Como puede observarse en la ilustración anterior, el plano se encuentra dividido en 9 zonas que representan las características de dispersión presentes en la imagen, estas se interpretan de acuerdo a lo estipulado en la tabla 3.

Tabla 3. Zonas del plano H – $\boldsymbol{\alpha}$.

Zona	Limites	Mecanismos de retrodispersión
1	$\alpha \leq 40° \; y \; H \leq 0.6$	Baja entropía y dispersión de superficie, incluye la dispersión de superficies de bragg y el mecanismo de retrodispersión especular que no implican inversiones de fase de 180° entre HH y VV. Las coberturas cuyas superficies son lisas ante longitud de onda del

		radar como el agua, el hielo marino, las pistas de aeropuertos, las vías, etc. se encuentran dentro de esta categoría.
2	$40° < \alpha \leq 46° \; y \; H \leq 0.6$	Baja entropía y dispersión por volumen, en esta zona se producen mecanismos fuertemente correlacionados que tienen grandes desequilibrios entre HH y VV en amplitud, en esta zona aparecen los dispersores dipolo aislados, al igual que la dispersión de la vegetación con una orientación fuertemente correlacionada de los elementos de dispersión anisotrópicos, el ancho de esta zona depende de la capacidad del radar para medir la relación HH y VV, es decir la calidad de la calibración.
3	$\alpha > 46° \; y \; H \leq 0.6$	Corresponde a eventos de dispersión por doble rebote y baja entropía como los proporcionados por dispersores aislados dieléctricos y dihedricos metálicos.
4	$\alpha \leq 34° \; y \; 0.6 < \; H \leq 0.95$	Entropía media y dispersión por superficie, refleja un aumento de la entropía debido a los cambios en la rugosidad de la superficie y por los efectos de propagación de dosel, abarca cubiertas de superficies que comprenden dispersores esferoidales achatados como por ejemplo las hojas de los árboles o discos.
5	$34° < \alpha < 46° \; y \; 0.6 < H \leq 0.95$	Entropía media y dispersión por volumen, el aumento de la entropía se debe a una distribución estadística central del ángulo de orientación, esta zona incluye la dispersión de superficies con vegetación con dispersores anisotrópicos y una correlación moderada de las orientaciones del dispersor.
6	$\alpha \geq 46° \; y \; 0.6 < H \leq 0.95$	Entropía media y dispersión por doble rebote que ocurre en aplicaciones forestales donde se producen mecanismos de doble rebote en las bandas P y L después de la propagación a través de un dosel, el efecto de dosel aumenta la entropía del proceso de dispersión. Esto también ocurre en las áreas urbanas donde el agrupamiento denso de los centros de dispersión localizados puede generar el aumento de la entropía.
7	$34° < \alpha < 46° \; y \; H > 0.95$	Alta entropía y dispersión por volumen, se relaciona con la dispersión de las copas de los árboles en los bosques como también con algunos tipos de superficies con vegetación con alta probabilidad aleatoria. El comportamiento extremo de esta clase se debe al ruido aleatorio, es decir que es independiente de la polarización.
8	$\alpha > 46° \; y \; H > 0.95$	Alta entropía y dispersión por doble rebote, en esta región aún es posible distinguir mecanismos que pueden darse en aplicaciones forestales o en la dispersión de vegetación que posee una estructura de ramas y coronas bien desarrolladas.
9	$\alpha \leq 34° \; y \; H > 0.95$	Alta entropía y dispersión por superficie, es la región no factible o utilizable del plano H- $\boldsymbol{\alpha}$, en consecuencia de la incapacidad de clasificar los tipos de dispersión con entropía alta y se incluye únicamente para reforzar la idea de que al aumentar la entropía se limita la capacidad de usar el comportamiento polarimétrico para clasificar objetos, pues la polarimetría de radar se aplica con

		mayor éxito a los problemas de baja entropía.

Fuente: (Domènech Olivié, 2015), (PCI Geomatics, 2018) y (Boerner, 2019).

4.3.2. Información textural.

La textura es una característica espacial inherente de una imagen, (Pinto Leal, 2006) cita que R. Bernstein define la textura como "Un concepto relacionado con la distribución espacial de los tonos de gris y características tonales discretas. Cuando un área pequeña de la imagen tiene poca variación de las características tonales discretas, la propiedad dominante es el tono. Cuando un área pequeña tiene una amplia variación de las características tonales discretas, la propiedad dominante es la textura". Como seres humanos identificamos la textura según sus patrones como el tamaño el cual está determinado por la medida de un objeto y su resolución espacial, contraste que depende de la ampliación o reducción de la escala de grises en la imagen y rugosidad que indica si las superficies son suaves o ásperas.

En la teledetección óptica la textura se utilizan para extraer información significativa para diversos propósitos, sin embargo en las imágenes de radar esta es aún más útil debido a que la retrodispersón que obtiene el radar es sensible a la orientación, homogeneidad, estructura y la relación espacial de los objetos en tierra las cuales se ven reflejadas en las características de textura de la imagen (Luo, y otros, 2012).

Para obtener imágenes de medidas textural, que permitan realizar análisis sobre una imagen y que sean de utilidad para elaborar clasificaciones temáticas, existen diferentes métodos que se dividen en estadísticas de primer, segundo y tercer y más orden (Rios Diaz, Martinez Payá , & del Baño Aledo, 2009).

4.3.2.1. Estadísticas de primer orden.

Su cálculo se basa a partir del histograma de los niveles de gris de los píxeles tomados individualmente, en el que no se consideran las relaciones entre píxeles vecinos y se consideran parámetros tales como el valor medio de nivel de gris, la desviación típica, el máximo y el mínimo, apuntamiento y simetría del histograma de grises (Rios Diaz, Martinez Payá , & del Baño Aledo, 2009).

4.3.2.2. Estadísticas de segundo orden.

Se calculan a partir de la relación de co-ocurrencia entre grupos de dos pixeles de la imagen original y una distancia dada, el método más utilizado para medir matemáticamente la textura dentro de las estadísticas de segundo orden es el GLCM o Grey Level Co-occurrence Matrix por sus siglas en ingles (Presutti, 2004).

La matriz de co-ocurrencia normalizada es una matriz de frecuencias con la que un píxel con un nivel de gris (i) aparece en una relación de espacio específica con otro píxel de nivel de gris (j), en esta se consideran parejas de píxeles vecinos, separados una distancia (d) y en un determinado ángulo. Por tanto, las matrices de co-ocurrencia pueden revelar ciertas propiedades sobre la distribución espacial de los grises en la textura de la imagen (Rios Diaz, Martinez Payá , & del Baño Aledo, 2009).

Para obtener la matriz de co-ocurrencia se emplea la siguiente ecuación:

$$P_{i,j} = \frac{V_{i,j}}{\sum_{i,j=0}^{N-1} V_{ij}} \qquad \textbf{(12)}$$

Dónde:

- *i* es el número de filas y *j* es el número de columnas.
- *V* es el valor de la celda *i*,*j* en la ventana.
- $P_{i,j}$ es la probabilidad en la celda *i*,*j*.
- *N* es el número de filas y columnas.

4.3.2.3. Otros algoritmos de textura.

Existen algoritmos de textura con una finalidad establecida y que no requieren de la probabilidad de co-ocurrencia de los valores de grises, por ejemplo el algoritmo de textura de divergencia de speckle el cual permite identificar las áreas urbanas en una imagen SAR mediante la heterogeneidad local de la retrodispersión la cual difiere de los estadísticos de Speckle idealmente desarrollados lo que permite que sean visualizadas en tonos muy brillantes, además de la presencia de numerosas reflexiones de esquina que pueden identificarse en áreas como

puntos o líneas brillantes en los canales de intensidad (Esch, y otros, 2009). La divergencia de speckle puede expresarse matemáticamente de acuerdo a la ecuación 13.

$$\mathrm{D}_{x,y} = C_{x,y} - C \quad donde \quad C_{x,y} = s_{x,y}/m_{x,y} \tag{13}$$

Donde (C) denota la heterogeneidad teórica debido al speckle completamente desarrollado, ($C_{x,y}$) provee el coeficiente de variación local definido por la desviación estándar local ($s_{x,y}$) y la media local ($m_{x,y}$) calculada a través de la máxima verosimilitud estimada en un vecindario local definido (Wang & Sun, 2017).

4.4. Clasificación temática.

La clasificación temática busca generar e identificar agrupaciones o clústeres de pixeles en un espacio multidimensional de atributos donde dichos grupos correspondan a respuestas o patrones espectrales definidos y se espera que correspondan a coberturas sobre la superficie terrestre, para generar estos grupos se utiliza un proceso de agrupamiento de datos estadísticos en la que cada pixel es asignado a una categoría de acurdo a su respuesta espectral (Espejo Valero, 2016).

Los procesos de clasificación temática pueden ser supervisados o no supervisados, las clasificaciones supervisadas son una técnica semiautomática donde es el intérprete quien selecciona las muestras representativas para cada una de las clase o coberturas definidas y posteriormente dentro de un software especializado se ejecutan los algoritmos de clasificación que en base a la información extraída de dichas muestras agrupan los pixeles en un respectiva clase, las clasificaciones no supervisadas a su vez son técnicas básicas semiautomáticas donde se agrupan los pixeles en función de sus propiedades o de su información, el intérprete es quien selecciona el algoritmo de clasificación y determina la cantidad de clases en las que desea que se agrupen la totalidad de pixeles, una vez ejecutado dicho proceso de clasificación el intérprete asigna cada clase a una cobertura dependiendo de sus características (Zerrouki & Bouchaffra, 2014) y (GISGeography, 2019).

Un enfoque de clasificación supervisada que ha generado en los últimos años buenos resultados en base a información extraída de imágenes SAR es el orientado a objetos u OBIA (Object Based

Image Analysis por sus siglas en inglés), pues presenta diversas ventajas en comparación con los métodos de clasificación basados en pixeles, ya que permite analizar características estadísticas y espaciales de los objetos además de las relaciones espaciales entre estos (Zerrouki & Bouchaffra, 2014). Los objetos se definen como una agrupación de píxeles con atributos similares (GISGeography, 2019) y (Espejo Valero, 2016). Este enfoque se compone de las siguientes cinco etapas.

4.4.1.1. Segmentación.

En esta etapa se generan los objetos mediante la extracción de información de una imagen a partir de su división en diferentes regiones homogéneas, las cuales corresponden de forma aproximada con zonas de interés en la misma (Espejo Valero, 2016). Este algoritmo depende de tres parámetros, la escala que se refiere a un valor que representa el tamaño del objeto (entre más alto el valor más grandes serán los objetos), la forma cuyo valor varía entre 0 y 1 y determina el peso de la radiometría en comparación con la forma en la delineación de objetos en la imagen (entre menor sea este valor mayor será el énfasis en el color), y la compacidad que determina el grado de suavizado del borde de los objetos y su valor también oscila entre 0 y 1 (Costa, Telmer, Silva, & Evans, 2010) y (PCI Geomatics). Estos parámetros deben ser determinados por el intérprete de acuerdo a su conocimiento y experticia mediante ensayo y error con la finalidad de obtener la segmentación ideal que cumpla con sus expectativas (Evans & Costa, 2012).

4.4.1.2. Extracción de atributos.

El propósito de esta etapa consiste en capturar las formas, las texturas y las características espectrales de cada una de las capas de información que componen el espacio de características para cada uno de los objetos resultantes del proceso de segmentación (Zerrouki & Bouchaffra, 2014). Es posible obtener para cada capa información de carácter estadístico como el valor mínimo, máximo, la media y la desviación estándar en base a los valores de los pixeles que componen cada objeto, así como de carácter geométrico (PCI Geomatics, 2017).

4.4.1.3. Etapa de entrenamiento.

Esta fase consiste en que el intérprete asigne determinados objetos como muestras de entrenamiento y de evaluación de exactitud para las diferentes clases de interés estipuladas.

4.4.1.4. Selección del algoritmo de clasificación.

Una vez definidas las muestras de entrenamiento para cada una de las coberturas presentes en la imagen, se entrena el algoritmo de clasificación el cual agrega los pixeles de la imagen en los grupos de interés predefinidos de acuerdo con los datos de entrenamiento.

Un algoritmo empleado recientemente en la clasificación temática de imágenes SAR son las máquinas de soporte vectorial, las cuales son un algoritmo de *Machine Learning* y se definen como un clasificador discriminativo determinado formalmente por un hiperplano de separación, esto quiere decir que dados los datos de entrenamiento dentro de un grupo de interés, el algoritmo genera un hiperplano óptimo que clasifica los nuevos ejemplos (Patel, 2017). Como se cita en (Espejo Valero, 2016) este algoritmo permite obtener clasificaciones exactas a partir de un conjunto de muestras de entrenamiento reducidas, porque tiene la capacidad de minimizar los errores de clasificación a través de la creación de un hiperplano entre cada par de clases para maximizar la distancia entre los vectores de soporte de cada clase (ilustración 4).

El hiperplano es esencialmente un medio para dividir las dos clases entre sí, es una construcción matemática que pretende asegurar que se encuentre la separación más amplia entre dos clases (Eliot, 2018).

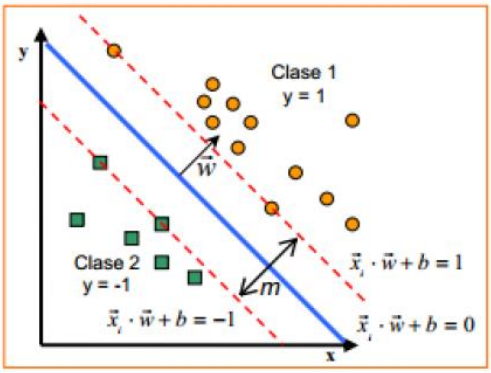


Ilustración 4: Hiperplano de separación óptimo.
Fuente: (Espejo Valero, 2016).

Este clasificador cuenta con cuatro parámetros de ajuste para mejorar su exactitud, estos son el Kernel que se define como una función de mapeo no lineal, la regularización o termino C que indica cuanto se desea evitar la clasificación errónea de cada ejemplo de entrenamiento, Gamma que define hasta donde llega la influencia de un solo ejemplo de entrenamiento y el Margen que es una separación de línea a los puntos de clase más cercanos (Patel, 2017).

4.4.1.5. Fase de post edición.

Luego de ejecutar el algoritmo de clasificación se obtendrá entonces una clasificación temática previa, sobre esta se desarrolla la fase de post edición que tiene como propósito refinar con la menor intervención posible el resultado obtenido eliminando y/o corrigiendo los posibles errores que se hayan detectado. Algunos tipos de post edición son la edición de clases en la que es posible reasignar un objeto de una clase a otra, la edición interactiva que permite realizar modificaciones a los objetos como cortarlos y unirlos, y la disolución automática en el que los objetos se disuelven mediante la unión de polígonos adyacentes teniendo en cuenta su pertenencia a cada clase definida.

4.5. Validación Temática.

Las clasificaciones temáticas suelen ser verificadas con la finalidad de validar su exactitud por ello en primera instancia se elabora un análisis cualitativo examinando visualmente el grado de correspondencia entre la clasificación realizada y las imágenes (Ardila, Espejo, & Herrera, 2005).

La matriz de confusión o contingencia es una tabla que se usa a para determinar el rendimiento de un modelo de clasificación o clasificador en un conjunto de datos de prueba para los cuales se conocen los valores verdaderos, en esta matriz las columnas corresponden a los datos de referencia, mientras que las filas las corresponden a las asignaciones del clasificador (Bellmonte & Caamaño , 2009). A partir de dicha matriz se derivan estadísticos de exactitud como lo son la exactitud del productor, la exactitud del usuario y el coeficiente Kappa.

La exactitud del productor indica el porcentaje de veces que un tipo de cobertura terrestre ha sido identificada en el mapa correctamente y establece lo bien que el intérprete identifico el tipo de cobertura a partir de los datos de la imagen satelital, por otro lado la exactitud del usuario indica el porcentaje de veces que un tipo de cobertura terrestre pertenece en realidad a ese tipo de cobertura en el terreno y expresa lo bien que una persona que utiliza el mapa encontrará ese tipo de cobertura en el terreno (Casco Verna, Arias del Puerto, Mareco Castellano, & Kindgard, 2016).

El coeficiente Kappa es una medida de exactitud que establece la diferencia entre lo real y lo esperado, es un valor numérico el cual si equivale a 1 o 100% indica una concordancia plena

entre la realidad y lo clasificado en las imágenes, mientras un valor cercano a 0 sugiere que la correspondencia observada es puramente debida al azar (Bellmonte & Caamaño , 2009).

4.6. Algebra de mapas.

El álgebra de mapas es una conjunto de herramientas de cálculo con matrices de datos, que incluye un amplio conjunto de operadores que se ejecutan sobre una o varias capas raster de entrada para producir una o varias capas raster de salida, por operador se entiende un algoritmo que realiza una misma operación en cada uno de los pixeles o celdas que conforman la capa raster y los cuales son definidos mediante ecuaciones (Universidad de Murcia, 2019).

Existen varios tipos de funciones en el álgebra de mapas, las cuales pueden categorizarse como locales o funciones de vecindad cuyo propósito es calcular un nuevo valor por celda de un raster directamente relacionado con la celda de la capa de entrada y se consideran operaciones no espaciales, focales o de ventana móvil o de filtro que permiten calcular un nuevo valor por celda incluyendo los valores de las celdas vecinas, zonales en donde la operación se centra sobre todas aquellas celdas que pertenecen a alguna clase o que contienen el mismo valor sean o no contiguas, y globales cuya función toma en consideración la totalidad de las celdas de un área definida para obtener un nuevo valor de celda para cada una (ESRI, 2019).

5. Zona de estudio.

5.1. Descripción general.

El desarrollo de esta metodología se aplica en el municipio de Santa Cruz de Mompós, ubicado en el centro del departamento de Bolívar, Colombia, colinda con los municipios de Magangué, Cicuco, Talaigua, Pinillos y San Fernando pertenecientes al departamento de Bolívar y con los municipios de San Zenón y San Sebastián de Buena Vista del departamento de Magdalena, cuenta con una extensión de aproximadamente 65214,92 Ha.

En la región predomina el bosque seco tropical a muy seco tropical de carácter húmedo, semi húmedo y seco, la vegetación es herbácea, de sabana, formada principalmente de pastos y propicia para el pastoreo de ganado (Franco Ossa, 2009).

5.2. Hidrografía.

Santa Cruz de Mompós se encuentra ubicado dentro de la llamada Isla Margarita que se halla en la región de la Depresión Momposina, cuenca hidrográfica sedimentaria recorrida por el rio Magdalena, bañada por los brazos de Loba, Mompós y Chicagua y la cual pertenece a la zonificación hidrográfica del Bajo Magdalena, además allí desembocan el rio Cauca, Cesar y San Jorge (Organización Colparques, 2018). El paisaje de este municipio se cataloga como de llanura aluvial y el ecosistema principal es la selva húmeda tropical que constituye un hito ecológico de alta biodiversidad y valor ambiental que se caracteriza por la existencia de múltiples ciénagas como Loba, Pajaral, Jovito Coroncoro, Caimanes y de varios caños que atraviesan esta isla como El Jagua, El Limón, El Peludo, La Cruz y Paloprieto, además dichas aguas presentan abundantes materiales vegetales que enriquecen los suelos de nutrientes y aseguran la abúndate vegetación y riqueza faunística (Franco Ossa, 2009). Cerca del 70% del área del municipio corresponde a estos cuerpos de agua y el único que cruza el área urbana es el rio Magdalena (Alcaldia Municipal de Santa Cruz de Mompox, 2008).

Como se cita en (Franco Ossa, 2009) la situación natural de la relación ciénaga – rio se establece en un proceso de llenado y vaciado de las ciénagas que ocurre en forma sincronizada durante las crecientes y el descenso de los niveles en los ríos, por ende las ciénagas normalmente se llenan antes de que el rio alcance su capacidad de descarga máxima sin desbordamiento, así mismo la evacuación de las aguas de estos cuerpos de agua es más lenta por la falta de capacidad de descarga de los caños al rio.

Según las variaciones del nivel del agua del rio Magdalena, el año hidrológico se divide en cuatro periodos, en marzo se tiene el mínimo nivel de agua, de abril a octubre se da un aumento progresivo del nivel de los ríos y las ciénagas, de noviembre a diciembre se presenta el máximo nivel de aguas debido a las crecientes y a las inundaciones, y finalmente en enero y febrero disminuye el caudal de los ríos hasta llegar a su nivel mínimo (De la Hoz, 2011).

5.3. Precipitación y régimen de lluvias.

La Depresión Momposina, donde se ubica el municipio de Santa Cruz de Mompós está sujeta a periodos de crecidas y de estiajes del rio Magdalena y sus derivaciones, durante el periodo de lluvias y crecientes el municipio puede inundarse hasta en un 80% de su territorio, lo

que genera que las actividades agrícolas y ganaderas disminuyan su actividad, pues los cultivos se ven muy afectados y el ganado tiene que ser trasladado a zonas altas del municipio mediante la actividad de trashumancia, por otro lado la pesca se incrementa (De la Hoz, 2011).

Respecto a la zona del Bajo Magdalena el régimen de precipitación en la margen occidental del rio Cesar y en la llanura caribe es de tipo bimodal, con periodos secos desde diciembre hasta marzo y el segundo tiene lugar durante el mes de Julio, los periodos de lluvia ocurren entre abril hasta junio y también desde agosto hasta diciembre, en esta zona la precipitación oscila entre los 1.000 y 1.500 mm anuales, por otro lado en la cuenca del rio San Jorge se manifiesta un régimen mono modal donde el periodo seco cubre los meses de diciembre y marzo y el lluvioso los que van de abril a noviembre con una precipitación media anual de cerca de 2.100 mm (Cormagdalena, 2009). Por otro lado la evapotranspiración potencial se mantiene uniforme en valores dentro del rango de 1.400 a 1.600 mm al año y la humedad relativa media en el Bajo Magdalena oscila entre el 71% y el 85% (Cormagdalena, 2001).

El municipio de Santa Cruz de Mompós es el municipio con la más alta frecuencia relativa de inundaciones súbitas para el Bajo Magdalena (Cormagdalena, 2009), esto contrasta con lo ocurrido en la ola invernal del 2008 en la cual cerca del 57% de la población del municipio se vio afectada por las inundaciones agravando las condiciones de pobreza de la población vulnerable, y dos años más tarde fue el municipio más afectado del departamento de Bolívar dado el acontecimiento de la ola invernal de 2010 la cual fue catalogada como el evento más destructivo de la historia reciente en Colombia (De la Hoz, 2011), (Cormagdalena, 2001) y (OCHA Colombia, 2010).

5.4. Clima.

En la zona del Bajo Magdalena los climas cálidos de tipo seco y húmedo son los dominantes y en menor proporción se presentan los muy secos al extremo noroccidental y los muy húmedos hacia el sur (Cormagdalena, 2001). La temperaturas medias mensuales en toda la Región Momposina sobrepasan los 25°C todo el año, los mínimos diarios rara vez son menores a 20°C, mientras que los máximos superan con frecuencia los 32°C (García Lozano, 2001).

El clima estacional presenta dos temporadas secas con un gradiente de pluviosidad negativo y de intensidad y duración del estiaje positivo determinantes para una vegetación típica de zonas de

vida húmedas (Franco Ossa, 2009), particularmente la Isla Margarita atenúa el efecto de la precipitación y de la estacionalidad sobre la vegetación natural y juega un papel determinante en la evolución de los patrones de usos del suelo (García Lozano, 2001).

En la ilustración 5 se observa la localización geográfica del municipio de Santa Cruz de Mompós.

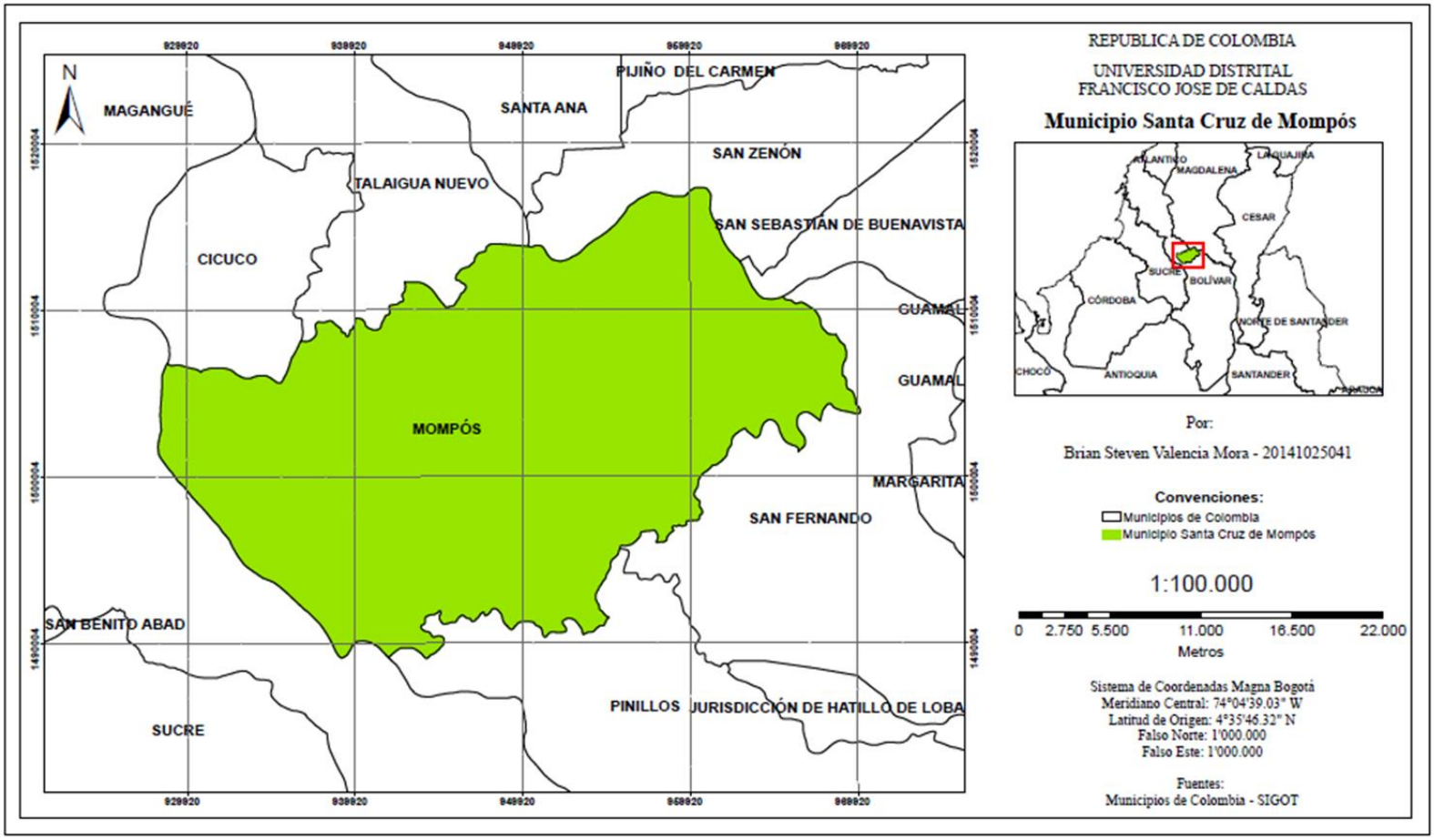


Ilustración 5: Ubicación geográfica del municipio de Santa Cruz de Mompós.
Fuente: Elaboración Propia.

6. Materiales y métodos.

6.1. Materiales.

Como insumos base se tiene para este proyecto información tomada por el sensor ALOS/PALSAR de la JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency por su acrónimo en inglés), la cual es de libre acceso y se obtuvo a través de la página web del Alaska Satellite Facility Vertex "https://search.asf.alaska.edu/#/", estos insumos hacen referencia a los modelos digitales de elevación y a las imágenes SAR necesarias para cubrir espacialmente la totalidad del municipio de Santa Cruz de Mompós en la temporalidad previamente definida.

6.1.1. Modelo digital de elevación.

De la página web se descargan dos imágenes en formato raster (.TIFF) que representan el DEM y que fueron tomadas por el sensor ALOS/PALSAR el 29 de Julio del año 2010 en Beam Mode FBD con nivel de procesamiento RTC, las cuales poseen una resolución espacial de 12,5 metros y se encuentran referenciadas geográficamente al sistema de coordenadas UTM Zona 18 norte en base al elipsoide WGS84. Este insumo puede visualizarse en la ilustración 6.

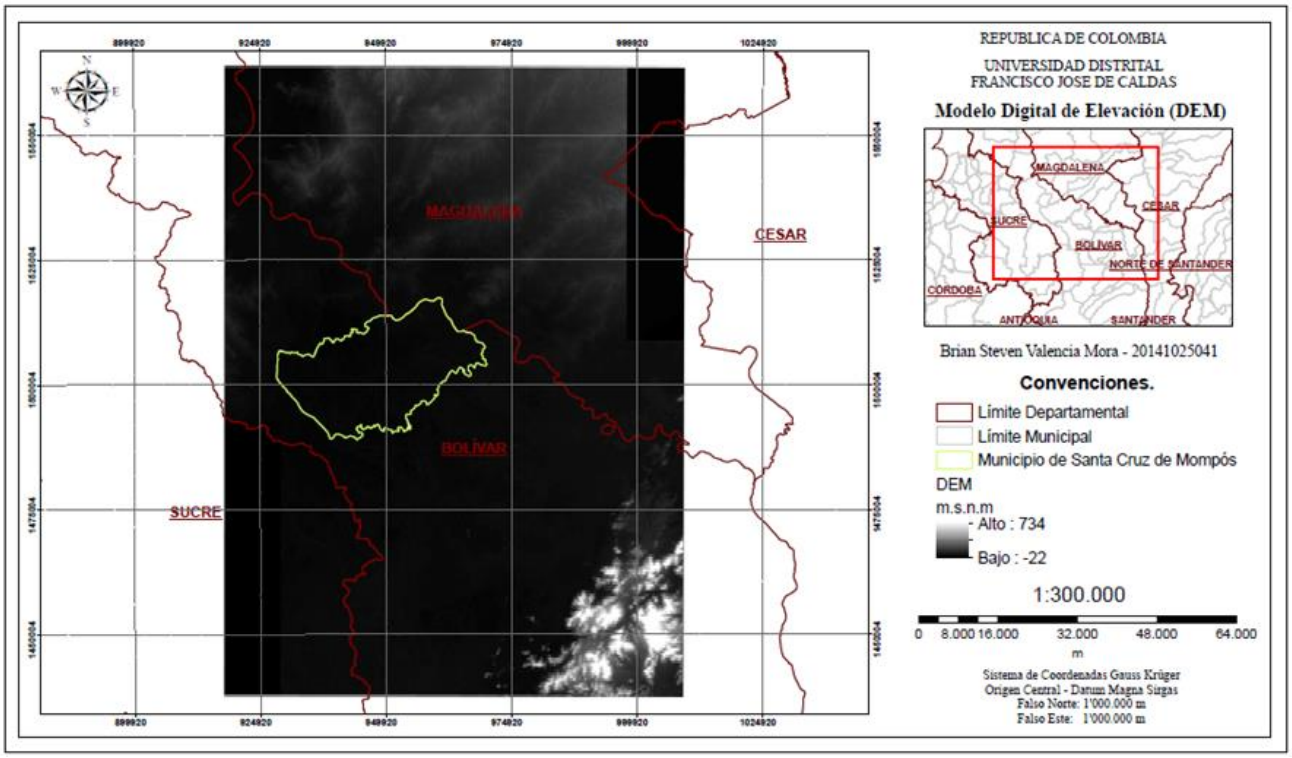
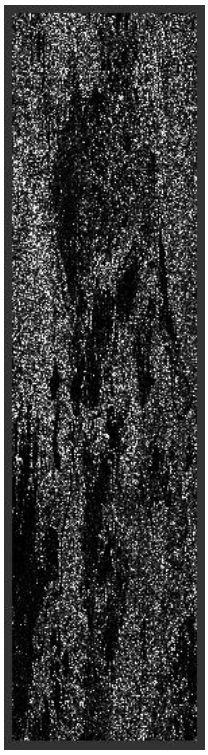
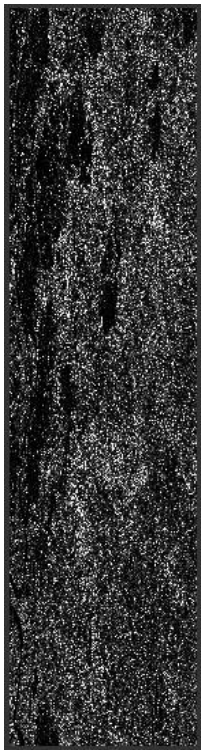
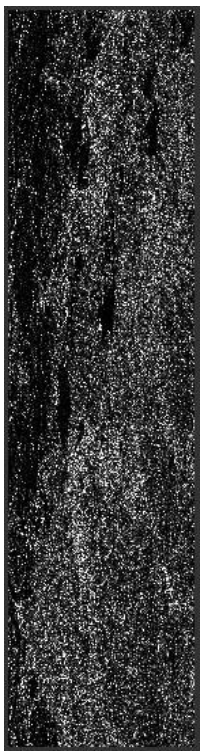
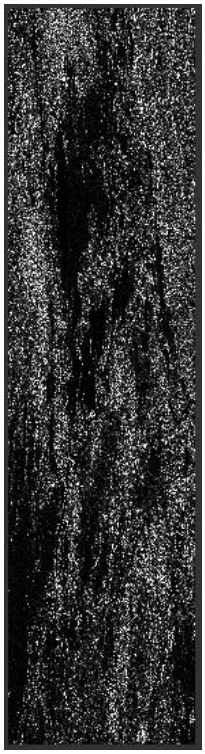
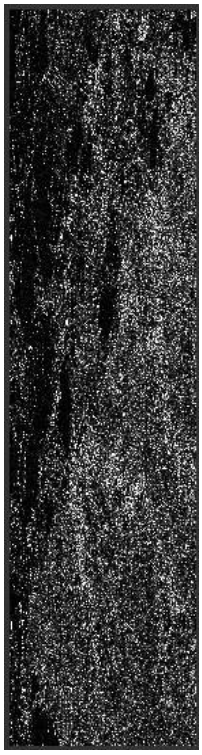


Ilustración 6. Modelo digital de elevación.
Fuente: Elaboración Propia.

6.1.2. Imágenes SAR.

Para el desarrollo de este proyecto se obtuvieron gratuitamente un total de seis imágenes SAR tomadas por el sensor ALOS/PALSAR las cuales cubren en mosaico para cada punto temporal la totalidad del municipio de Santa Cruz de Mompós el 13 de Junio, 29 de Julio y 29 de Octubre del año 2010, además cada una cuenta con polarización doble (Dual-Pol) HH/HV. En cuanto a las características técnicas estas fueron tomadas con *Beam Mode* FBD, con ángulos de incidencia entre los 8° y 60°, con ancho de franja de 70 Km y con nivel de procesamiento *Single Look Complex* (SLC) que permite realizar los diferentes procesamientos polarimétricos. Cabe mencionar que dado este nivel de procesamiento las imágenes se encuentran en un formato *Slant Range* cómo es posible observar en la tabla 4.

Tabla 4. Imágenes SAR utilizadas en el desarrollo del proyecto.

Imágenes	ALPSRP233550160 - L1.1	ALPSRP233550170-L1.1	ALPSRP240260160-L1.1	ALPSRP240260170-L1.1	ALPSRP253680160-L1.1	ALPSRP253680170-L1.1
	HH	HH	HH	HH	HH	HH
Visualización						
Fecha	13/06/2010		29/07/2010		29/10/2010	
Respecto a la inundación	Antes		Durante			

Fuente: Elaboración Propia.

6.1.3. Mapa de cobertura de la tierra periodo 2010 – 2012.

En el desarrollo de este proyecto se tuvo como guía el mapa de cobertura de la tierra periodo 2010-2012 elaborado mediante la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2019) que es utilizado como base para establecer las coberturas de la tierra que se encuentran en la zona de estudio. El mapa de coberturas de la tierra puede visualizarse en la ilustración 7.

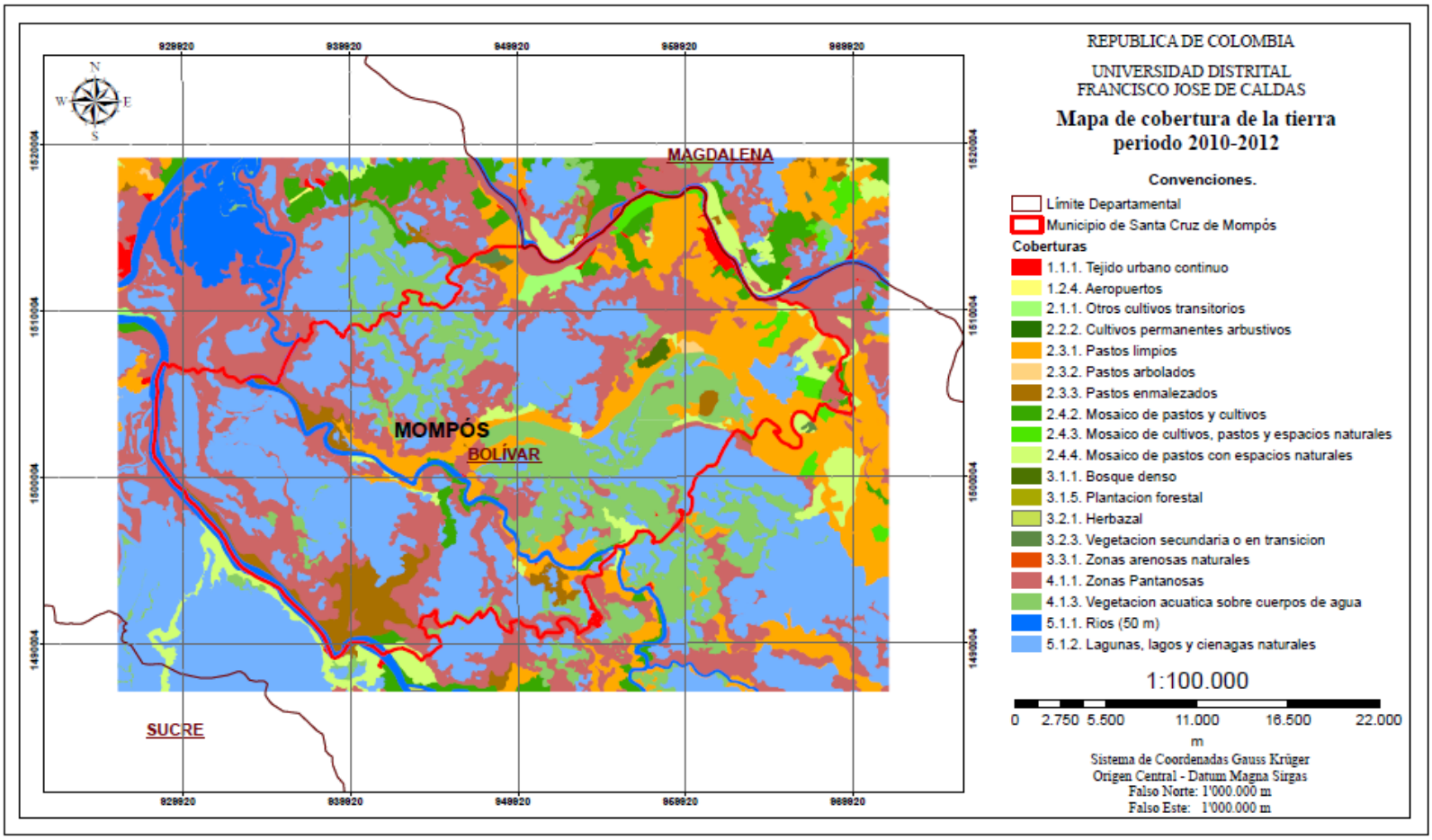


Ilustración 7. Mapa de cobertura de la tierra periodo 2010-2012.
Fuente: Elaboración Propia con base en (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2019).

6.2. Metodología.

La metodología que se propone para cumplir con los objetivos estipulados para el correcto desarrollo de este proyecto se resume en la ilustración 8, cuyos componentes se explican de forma general después de la ilustración.

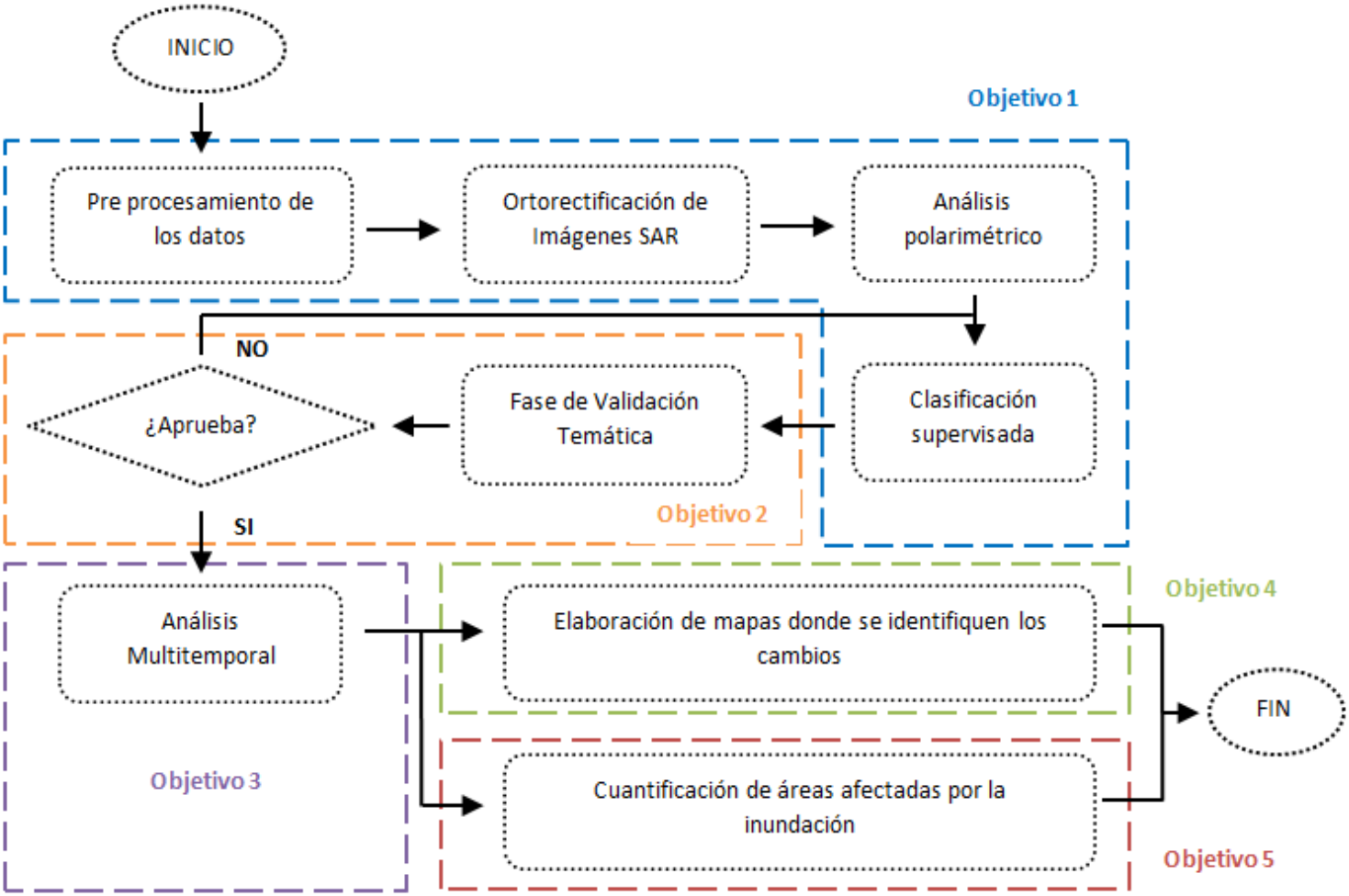


Ilustración 8: Metodología propuesta.
Fuente: Elaboración Propia.

El desarrollo de este proyecto de investigación se realiza en ocho etapas, las cuales son:

6.2.1. Pre procesamiento de los datos.

En esta etapa se realiza la obtención y preparación de los diferentes insumos que serán necesarios para poder dar cumplimiento a los objetivos planteados y se compone de acuerdo a los cinco subprocesos que pueden identificarse en la ilustración 9.

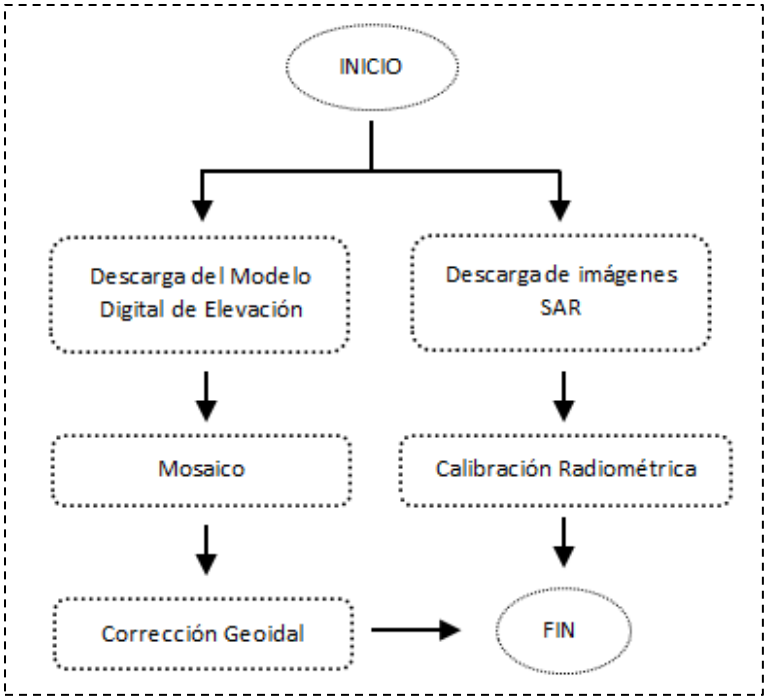


Ilustración 9: Etapa de pre procesamiento de los datos.
Fuente: Elaboración Propia.

Para la ortorectificación de las imágenes satelitales a utilizar es necesario contar con un modelo digital de elevación, pues permite eliminar las diferencias en los ángulos de incidencia y minimiza la desviación en las posiciones en terreno (Veljanovski, Lamovec, Pehani, & Oŝtir, 2011). Este insumo se descarga gratuitamente de la página web del Alaska Satellite Facility Vertex y puede visualizarse en la ilustración 6.

Una vez obtenidos ambos DEM que recubren espacialmente la totalidad de la zona de estudio, se procede a realizar el mosaico para unirlos y obtener una única imagen, a este resultado posteriormente se le aplica un procedimiento de corrección geoidal con el fin de obtener alturas ortométricas, ambos subprocesos se ejecutan en el software PCI Geomatica 2018.

Por otro lado para el desarrollo del proyecto se obtienen seis imágenes SAR del sensor ALOS/PALSAR descargadas de forma gratuita en la misma página web mencionada, con las que se obtienen 3 imágenes en mosaico que cubren la totalidad del municipio de Mompós y comprenden desde el 13 de Junio hasta el 29 de Octubre del año 2010 en intervalos de tiempo heterogéneos, por ende se espera realizar un total de 3 mapas de coberturas de la tierra. Estos insumos se visualizan en la tabla 4.

Luego de obtenidas las imágenes SAR, estas deben ser calibradas radiométricamente para poder realizar un análisis cuantitativo, pues el valor de píxel debe representar directamente la retrodispersión del radar de la superficie reflectante (Evans & Costa, 2012) y (Meenakshi & Punitham, 2011), este subproceso se ejecuta en el software SNAP mediante la aplicación del algoritmo de calibración radiométrica absoluta determinando como datos de salida datos complejos.

6.2.2. Ortorectificación de imágenes SAR.

Para llevar a cabo este proceso se requiere el DEM y las imágenes SAR obtenidas en la etapa de pre procesamiento de los datos, luego se ejecutan los procesos necesarios para corregir las imágenes de las distorsiones geométricas que presenten.

Esta etapa se realiza mediante el uso del software SNAP con la herramienta Range Doppler Terrain Correction la cual se ejecuta sobre cada una de las imágenes SAR obtenidas de la etapa anterior y se utiliza a su vez el DEM generado. En cuanto al algoritmo se definió como método de remuestreo tanto para el DEM como para las imágenes SAR la interpolación bilineal, además de un espaciado de píxeles de 12.5 metros dado que esta es la resolución espacial del DEM así como la de otros niveles de procesamiento de imágenes SAR tomadas por ALOS/PALSAR como el L1.5 y el RTC, finalmente se estipula como salida datos complejos.

6.2.3. Análisis polarimétrico.

En esta etapa se obtienen tres parámetros de información que representan características de la retrodispersión de la señal de radar en tierra que componen a las imágenes SAR, mediante la aplicación de la técnica de descomposición polarimétrica incoherente utilizando la metodología H/A/Alpha para imágenes SAR con polarización doble HH/HV, debido a la presencia de dispersores distribuidos que hacen referencia a las coberturas naturales de la zona de estudio. Esta etapa tiene la finalidad de robustecer el espacio de características para la etapa de clasificación supervisada y se compone de seis subprocesos las cuales se observan en la ilustración 10.

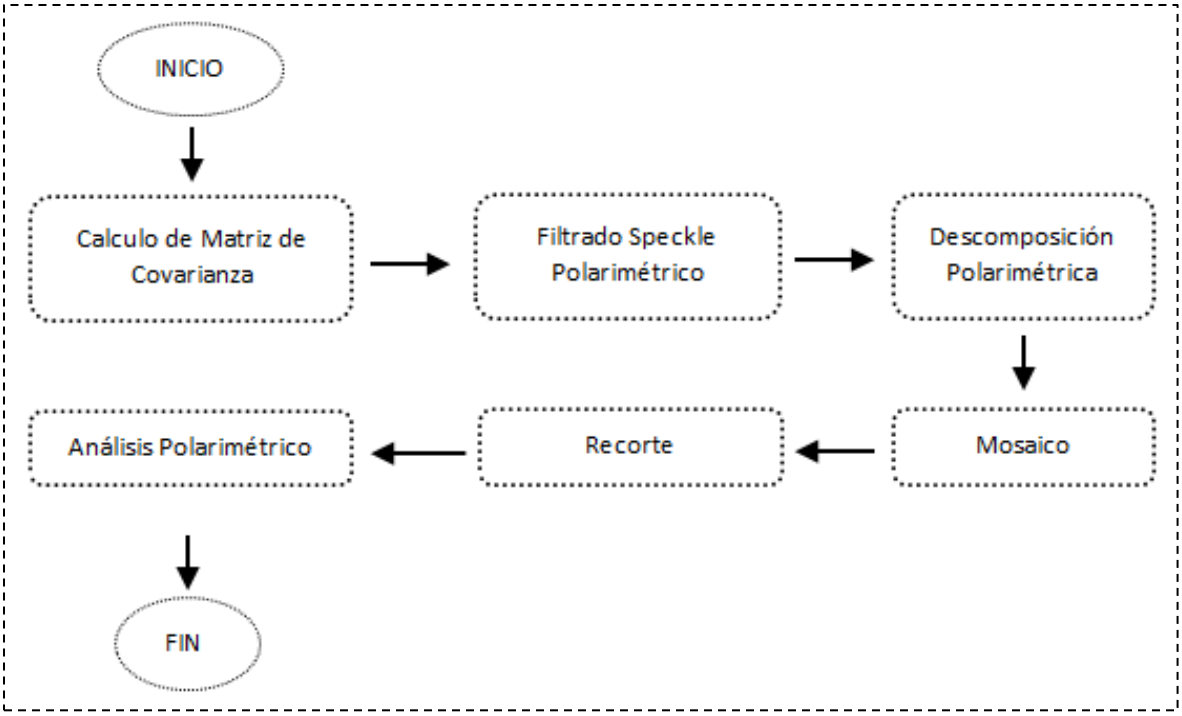


Ilustración 10: Etapa de análisis polarimétrico.
Fuente: Elaboración Propia.

Esta etapa inicia con el cálculo de la matriz de covarianza para cada una de las seis imágenes SAR, para dicha matriz se define un tamaño de 2x2, dado a que las imágenes SAR cuentan únicamente con dos polarizaciones lineales. Este proceso fue ejecutado en el software SNAP el cual permite obtener la matriz C2 o C_{dual} con la herramienta Polarimetric Covariance or Coherency Matrices Generation dentro del menú de Radar para cada una de las seis imágenes SAR.

Una vez obtenida la matriz de covarianza por cada imagen, se procede a aplicarle un filtro speckle polarimétrico con la finalidad de reducir este fenómeno, cabe mencionar que se aplica un filtro polarimétrico dado a que la información de la matriz es de esta índole, por ello se deben realizar promedios incoherentes dentro de una ventana de filtrado, para la cual se establece un tamaño estándar de 5x5 pixeles ya que por experiencia propia adquirida en el marco de la elaboración de la tesis doctoral titulada “Modelo para predicción de inundaciones mediante el uso de datos abiertos y técnicas de inteligencia computacional” (Parra Plazas, 2017) se tiene que para elaborar mapas a escala 1:25.000 esta permite una aceptable reducción del speckle sin alterar en gran medida la información de la imagen.

Posteriormente se obtienen los parámetros de información polarimétrica H/A/Alpha en base a las seis matrices de covarianza filtradas, para ello se hace uso de la herramienta Polarimetric Decomposition Operator que se encuentra dentro del menú de Radar en el software SNAP, en donde se estipula al algoritmo la obtención de la descomposición polarimétrica "H-Alpha Dual Pol Decomposition" con un tamaño de ventana de 5x5 pixeles (teniendo como referencia el estándar definido) para el cálculo de la media de los valores de la matriz de covarianza.

Luego de obtenidos los tres parámetros de información resultantes del subproceso anterior, se procede a realizar el mosaico de estas para los tres puntos temporales con el fin de obtener un único conjunto de capas para cada uno, después se realiza el recorte de los tres mosaicos teniendo en cuenta un área rectangular que abarque la totalidad del municipio de Santa Cruz de Mompós con el propósito **único** de facilitar la ejecución de este subproceso dentro del software SNAP, para ello se definieron en coordenadas geográficas en formato decimal los cuatro vértices que componen dicha figura los cuales se encuentran en la tabla 5, generando así un área que cuenta con aproximadamente 146865,69 ha.

Tabla 5. Coordenadas Geográficas de la zona.

ID PUNTO	LATITUD	LONGITUD
1	9,29	-74,75
2	9,29	-74,332
3	9,001	-74,75
4	9,001	-74,332

Fuente: Elaboración Propia.

Una vez obtenida y organizada la información polarimétrica resultante en una única imagen por punto temporal y que además cubra el municipio de Santa Cruz de Mompós, se procede a interpretarla mediante el uso de los parámetros de entropía, anisotropía y alpha resultantes y a partir de los planos H-α que se pueden elaborar a partir de estos.

6.2.4. Clasificación supervisada.

De esta etapa se obtendrán los mapas de coberturas de la tierra para cada uno de los tres puntos temporales, en las cuales se identifican ocho clases o coberturas básicas. Esta etapa se desarrolla en un enfoque de clasificación supervisada orientado a objetos con base en el espacio

de características que está conformado por los canales de intensidad de cada imagen HH/HV y por los tres parámetros entropía, anisotropía y alpha obtenidos a partir de la etapa de análisis polarimétrico.

La aplicación de esta esta técnica sobre las imágenes SAR permite reducir el fenómeno de speckle debido a que la señal de cada objetivo se aproxima promediando la retrodispersión en una vecindad de pixeles (Evans & Costa, 2012) y (Costa, Telmer, Silva, & Evans, 2010), lo cual es considerado como una ventaja ante la técnica de clasificación basada en pixeles. Esta etapa se compone de ocho subprocesos como se percibe en la ilustración 11, donde las etapas de filtrado speckle, mosaico y recorte se ejecutan en el software SNAP, mientras que las demás se efectúan en el software PCI Geomatica 2018.

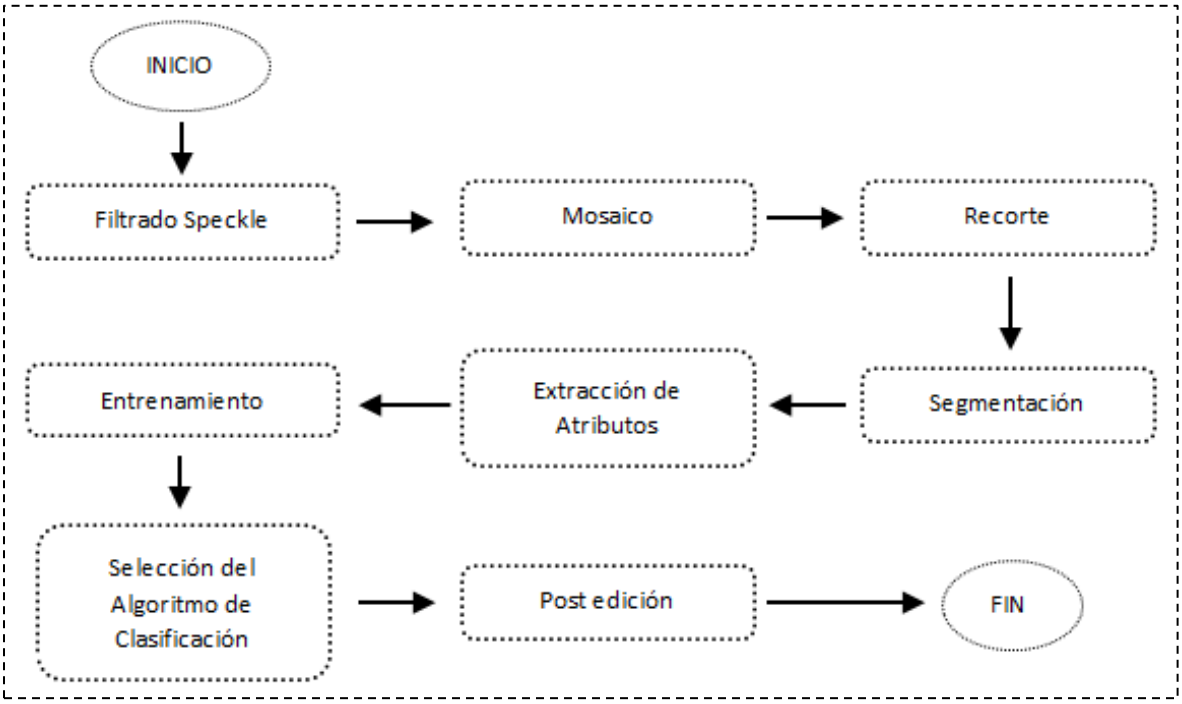


Ilustración 11: Etapa de clasificación supervisada.
Fuente: Elaboración Propia.

La etapa de clasificación supervisada inicia con el subproceso de filtrado speckle que se ejecuta sobre las imágenes SAR en sus respectivos canales de intensidad para ambas polarizaciones HH y HV con la finalidad de reducir este fenómeno, pues sobre estos canales se ejecuta la segmentación, cabe aclarar que no debe confundirse con el subproceso denominado como

filtrado speckle polarimétrico en la cual el algoritmo de filtrado se aplica sobre la matriz de covarianza.

Una vez obtenidas las seis imágenes SAR con sus respectivos canales de intensidad HH y HV filtrados se procede a replicar los procesos de mosaico y recorte con los mismos parámetros establecidos en la etapa de análisis polarimétrico, esto con el fin de obtener un único conjunto de capas para cada punto temporal. Posteriormente, se procede a ejecutar el subproceso de segmentación sobre ambos canales de intensidad para cada fecha.

Luego de la segmentación, se realiza la extracción de características o atributos de los objetos sobre el espacio de características definido, el cual para el desarrollo de este proyecto se compone de 5 capas de información, estas son los canales de intensidad HH y HV y las capas obtenidas en el proceso de descomposición polarimétrica las cuales son alpha (α), entropía (H) y anisotropía (A); el propósito consiste en capturar información estadística para cada una de estas, además de la geométrica. Cabe mencionar que dentro del software PCI Geomatica 2018 también es posible obtener información derivada de las imágenes SAR como lo son la textural y la polarimétrica, sin embargo estas no se tendrán en cuenta dentro del desarrollo del proyecto, pues en cuanto a la textura porque este proyecto se encuentra orientado al manejo único de información polarimétrica, y en cuanto a la información polarimétrica porque los algoritmos para extraerla dentro de este software se limitan únicamente a imágenes con cuatro polarizaciones lineales o Quad Pol.

En el subproceso de entrenamiento se determinan las clases o coberturas que serán identificadas a partir de la información extraída de las imágenes SAR y se seleccionan sus objetos de entrenamiento y validación. Para ello se realiza un análisis del insumo referente al mapa de coberturas de la tierra 2010-2012, y se identifica que algunas de estas no presentan áreas representativas o diferencias perceptibles referentes a su respuesta espectral en los canales de intensidad HH y HV para la zona de estudio en los tres puntos temporales definidos, por lo que se optó por agrupar aquellas coberturas similares entre si teniendo como referencia la leyenda nacional de coberturas de la tierra, el área y la respuesta espectral en los canales mencionados y el análisis polarimétrico realizado.

Ya definidas las coberturas y asignados los objetos de entrenamiento y validación, se procede a ejecutar el subproceso de entrenamiento y selección del algoritmo de clasificación, el cual asignará a cada objeto en alguna de las clases definidas con base en los datos de entrenamiento y sus respectivos atributos obtenidos a partir del espacio de características. Se escogió las máquinas de soporte vectorial o SVM's (por sus siglas en inglés) con función de base radial como algoritmo de clasificación, ya que ha sido ampliamente utilizado en minería de datos e incluido como un clasificador exitoso en teledetección tanto en sensores pasivos como en activos (Longepé, Rakwatin, Isoguchi, Shimada, & Uryu, 2010). La ejecución de este proceso da resultado como una clasificación temática previa, la cual en el subproceso denominado como post edición es refinada.

6.2.5. Fase de validación temática.

Una vez obtenidos los mapas que resultan de la ejecución de la etapa anterior, debe procederse a elaborar una evaluación cuantitativa mediante el uso de la matriz de confusión, de la cual se pueden extraer estadísticos de medidas de exactitud como lo son el coeficiente Kappa el cual determina si la exactitud de los mapas es la adecuada, si lo es se podrá continuar a la siguiente fase, de lo contrario es necesario mejorar y refinar la clasificación realizada. Para este proyecto dicho coeficiente se definió a partir de una revisión bibliográfica de los trabajos citados relacionados con polarimetría en base a imágenes SAR.

6.2.6. Análisis multitemporal.

Este análisis se realiza en el software ArcGIS 10.5 mediante procedimientos de algebra de mapas, iniciando con el mapa de cobertura más antiguo y continuando con los demás siguiendo el orden temporal, lo que indicará las zonas que se han visto afectadas por la dinámica de las aguas de inundación que se propagan a zonas no inundadas a través del tiempo.

En primera instancia ya que los resultados obtenidos de las clasificaciones temáticas se encuentran en formato vector, estas deben convertirse en formato raster para poder ejecutar los procedimientos de algebra de mapas, esto se efectuó en el software mencionado para cada clasificación. Posteriormente se asigna a cada cobertura un código para que con este se pueda establecer el tipo de cambio presente entre cada punto temporal realizando un proceso de adición entre el mapa de cobertura más antiguo y el que le sigue de acuerdo al orden temporal, por ello

se obtendrán en este proyecto dos análisis multitemporales, el primero comprende entre el 13 de Junio y el 29 de Julio de 2010, y el segundo entre el 29 de Julio y 29 de Octubre de 2010.

6.2.7. Elaboración de los mapas donde se identifiquen los cambios.

Este análisis se realiza con los datos obtenidos en la fase anterior, en donde se espacializan las zonas afectadas producto de la propagación de aguas de inundación mediante el seguimiento temporal de los cambios detectados en las diferentes coberturas.

Para ello los resultados de ambos multitemporales en principio fueron convertidos de formato raster a vector, posteriormente se editaron teniendo en cuenta dos etapas, la primera fue la eliminación de los polígonos que representan las áreas donde no hubo cambios en las coberturas (exceptuando la de zonas pantanosas) y también de aquellos cambios que no son objeto de estudio de este proyecto, la segunda consiste en calcular el área de los polígonos generados gracias a la conversión de formato vector de los multitemporales en unidades de metros cuadrados con la finalidad de depurar las áreas insignificantes. Para realizar la depuración se tuvo en cuenta lo citado en (Matoma Cardona & Cañas Torres, 2017), que establece que para un mapa de escala 1:25.000, que fue la definida para el desarrollo de este proyecto, el área mínima cartografiable es de 10.000 m^2 o 1 ha, por lo tanto los polígonos obtenidos del proceso de análisis multitemporal que abarquen un área menor a esta serán depurados. Esta etapa se ejecutó dentro del software ArcGIS 10.5 mediante el uso de la herramienta eliminate, la cual fusiona estos polígonos al polígono adyacente más grande.

6.2.8. Cuantificación de las áreas afectadas por la inundación.

Este estudio se realiza entre cada fecha de observación determinada por las imágenes SAR, con lo que se busca establecer el área afectada para cada cobertura entre cada observación producto de la propagación de aguas de inundación.

Para ambos multitemporales se calculan las áreas totales que se vieron afectadas por los dos tipos de inundación que se obtuvieron para este proyecto los cuales son inundación total y parcial, para la primera se realiza la resta entre el área total obtenida por las coberturas afectadas por inundación total con el área total producto del retroceso de la cobertura de aguas continentales naturales. Con el fin de obtener el área inundada parcialmente se realiza la resta entre el área total obtenida por las coberturas afectadas por inundación parcial con el área total resultante del

repliegue de la cobertura de zonas pantanosas y este resultado se suma con el área de las zonas pantanosas sin cambios. Con las dos áreas totales, tanto de la inundación total como la parcial se puede obtener entonces el área del municipio inundada para la temporalidad establecida.

7. Resultados y análisis de resultados.

En base a la metodología estipulada en el ítem anterior, dentro de este ítem se describirán, mostrarán y analizarán los resultados obtenidos producto de su aplicación.

7.1. Análisis polarimétrico.

7.1.1. Filtrado speckle polarimétrico.

Para poder elegir el filtro que se aplicará en la matriz de covarianza resultante para cada imagen SAR, se tuvo en cuenta la maximización en la diferenciación entre las coberturas perceptibles en los componentes de la matriz de covarianza, la suavización de sus límites (especialmente la cobertura de agua) y la homogeneización de las mismas evitando la excesiva pérdida de información sobre la imagen SAR ALPSRP233550170 la cual se utilizó como imagen de prueba.

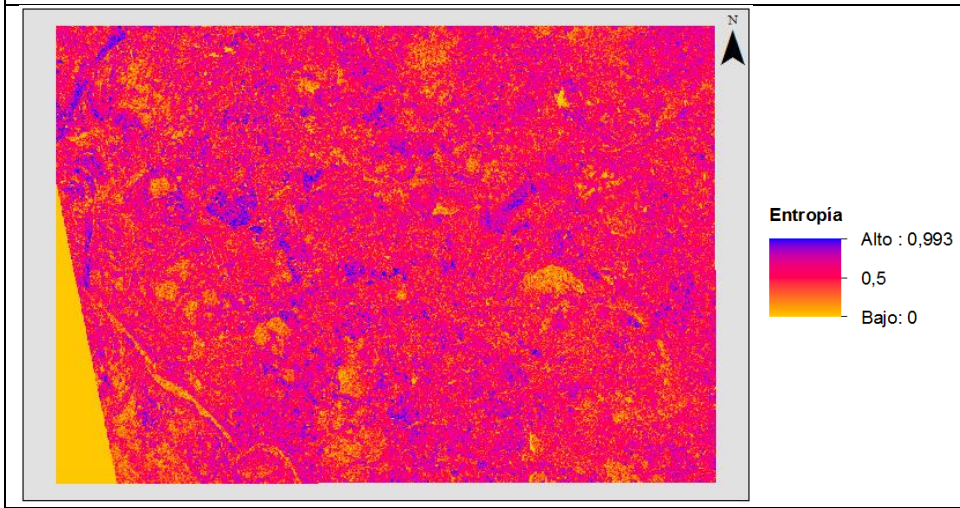
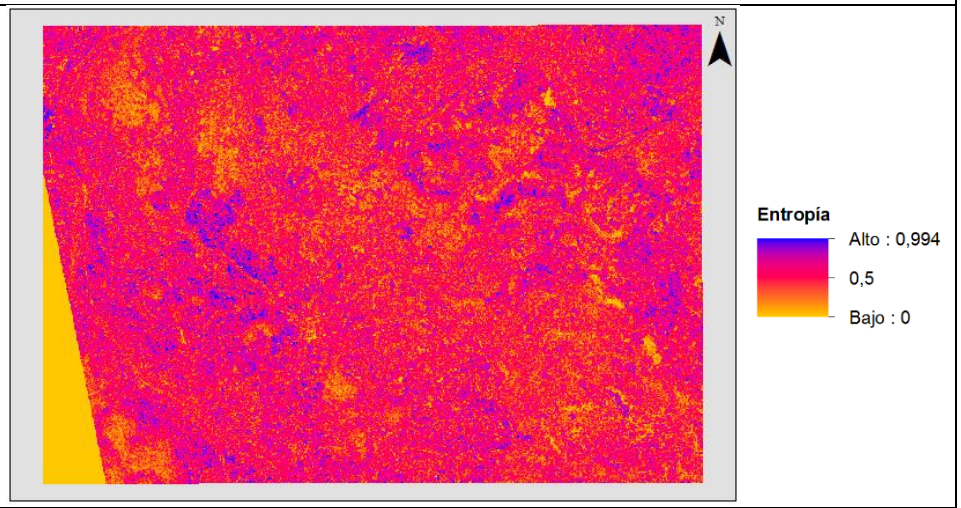
Se hace uso de la herramienta Polarimetric Speckle Filter Operator dentro del menú de Radar del software SNAP. En principio se realiza el ensayo de los filtros polarimétricos Box Car, Improved Lee Sigma, IDAN y Refined Lee sobre la matriz de covarianza C2 obtenida para la imagen SAR de prueba respecto a los componentes mencionados; En el anexo 1 se visualizan dos áreas que pertenecen al municipio de Santa Cruz de Mompós donde es posible apreciar los resultados generados para cada filtro. De esta prueba se define que filtro polarimétrico proporciona los mejores resultados y este será aplicado de forma individual a cada una de las matrices de covarianza obtenidas para las seis imágenes SAR utilizadas.

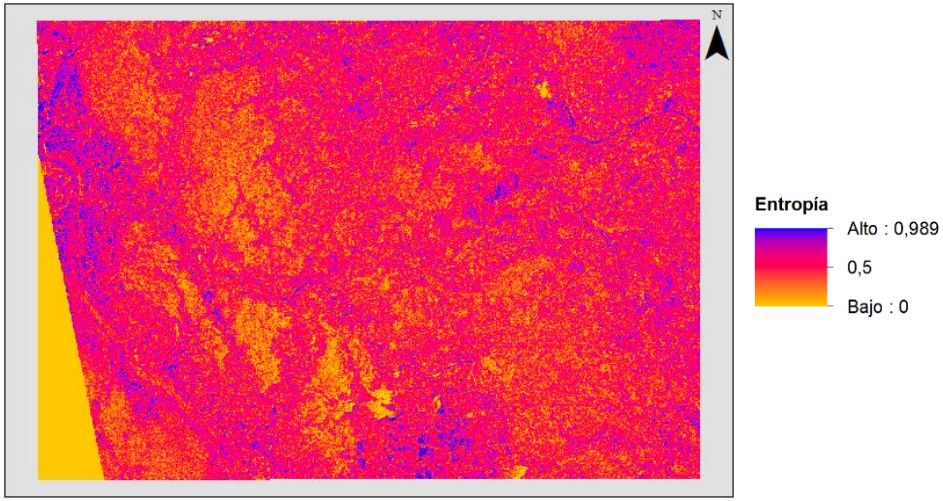
De las deducciones anteriores se puede establecer que el mejor filtro polarimétrico a aplicar para reducir el fenómeno de speckle sobre las matrices de covarianza C2 obtenidas para cada una de las seis imágenes SAR es el Refined Lee, teniendo en cuenta que aunque no es el mejor en la suavización de límites entre el agua y demás coberturas, aun así permite una delineación aceptable entre estas, además en términos generales se obtiene una mayor diferenciación de las coberturas identificables diferentes a la de cuerpos de agua en dichos componentes y se logra una mejor homogenización de áreas con tonalidades muy similares.

7.1.2. Análisis polarimétrico.

En las tablas 8, 9 y 10 se visualiza la información correspondiente a la descomposición polarimétrica.

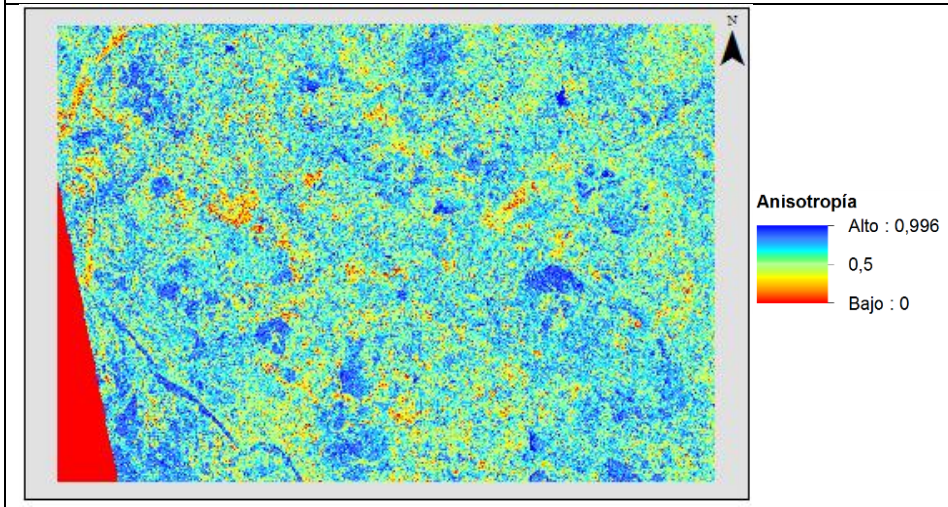
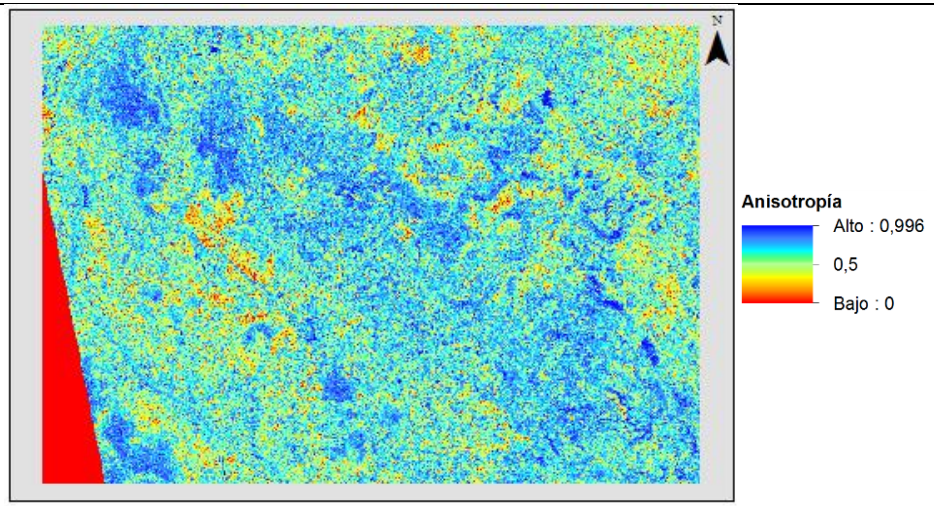
Tabla 6. Parámetro de entropía.

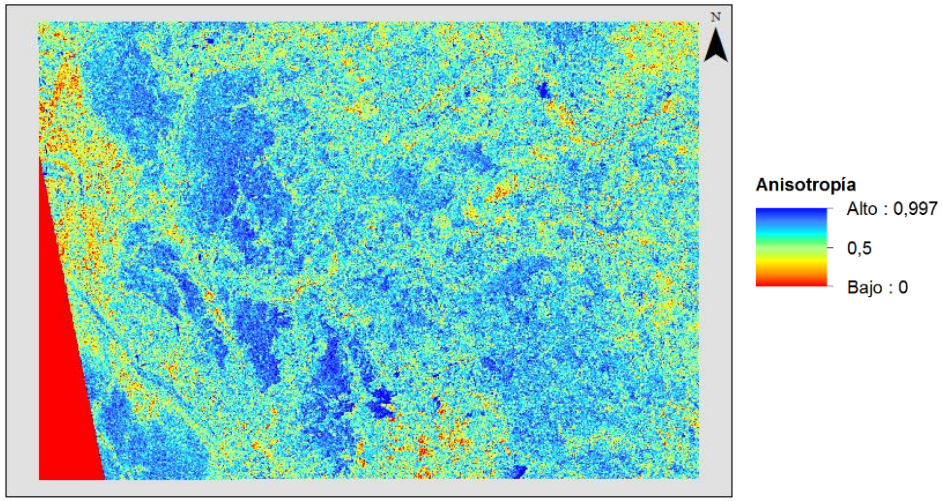
Parámetro de entropía para el 13 de Junio de 2010	Parámetro de entropía para el 29 de Julio de 2010
	

Parámetro de entropía para el 29 de Octubre de 2010


Fuente: Elaboración Propia.

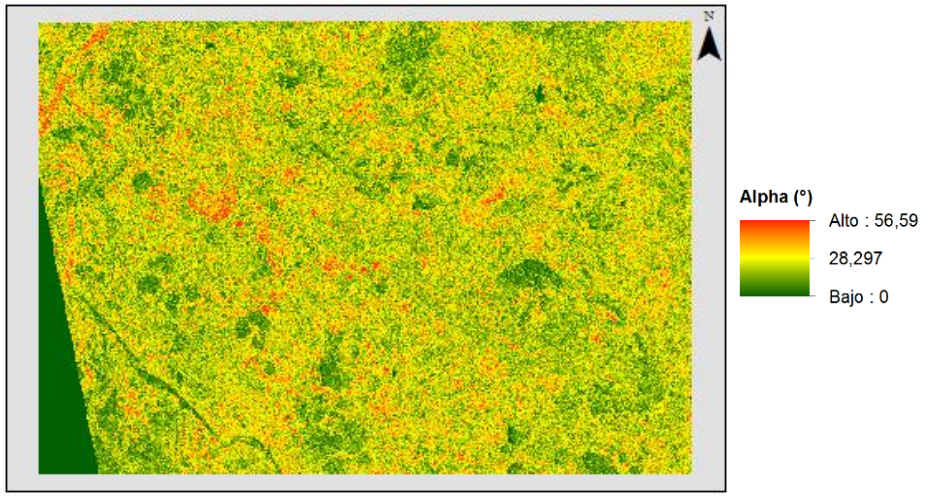
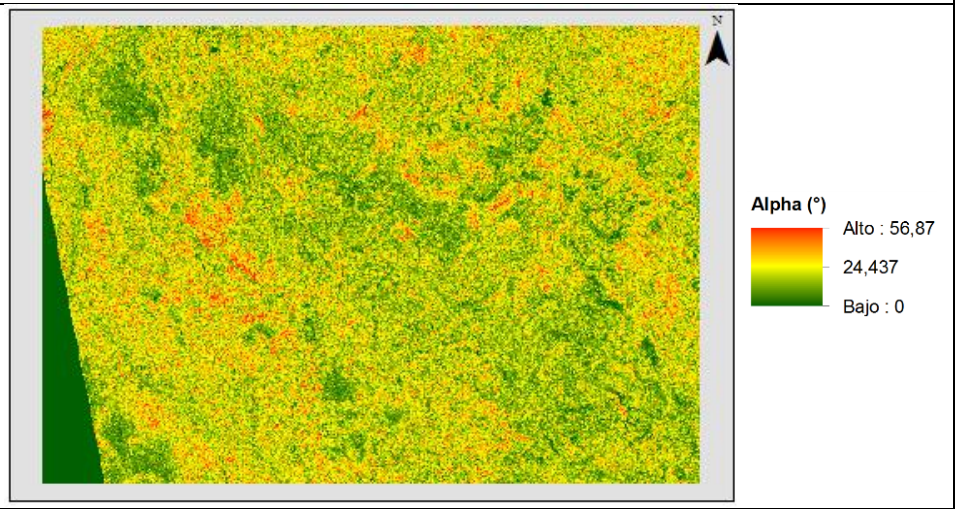
Tabla 7. Parámetro de anisotropía.

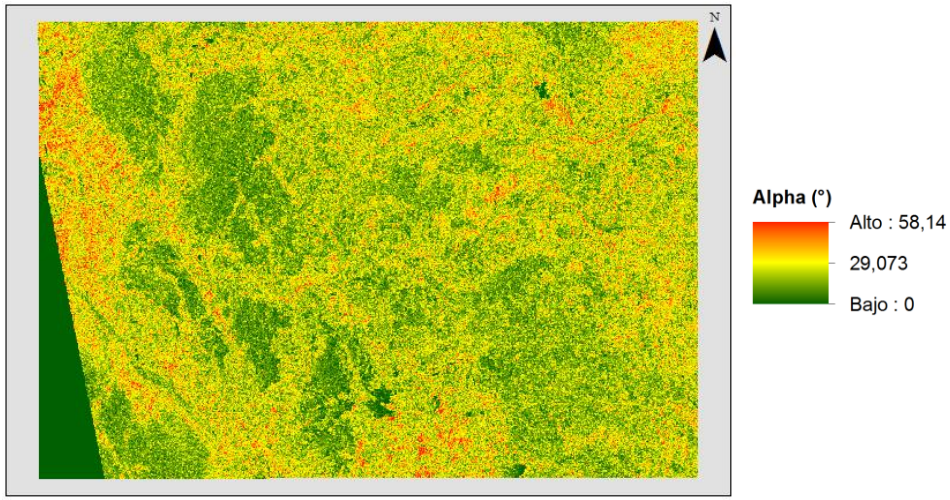
Parámetro de anisotropía para el 13 de Junio de 2010	Parámetro de anisotropía para el 29 de Julio de 2010
	

Parámetro de anisotropía para el 29 de Octubre de 2010


Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 8. Parámetro alpha.

Parámetro alpha para el 13 de Junio de 2010	Parámetro alpha para el 29 de Julio de 2010
	

Parámetro alpha para el 29 de Octubre de 2010


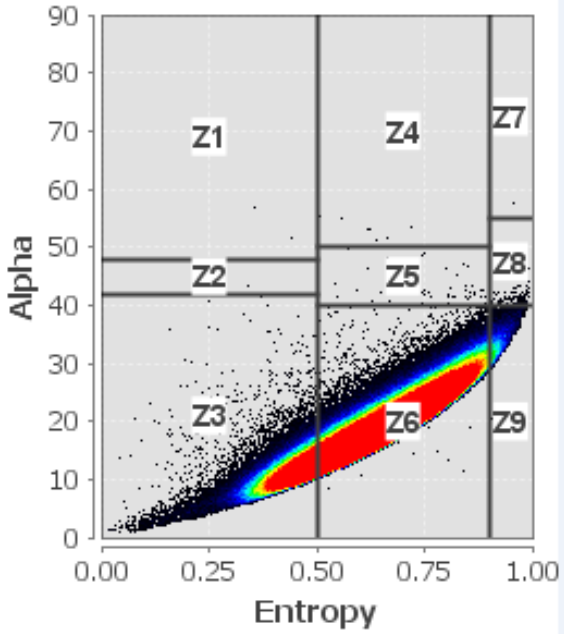
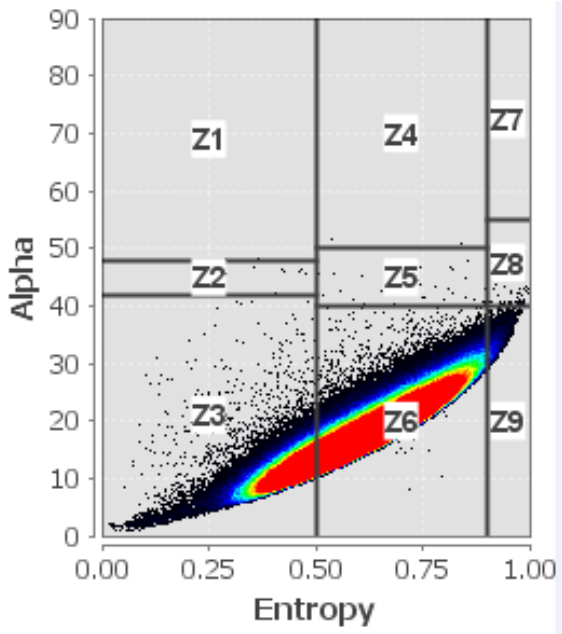
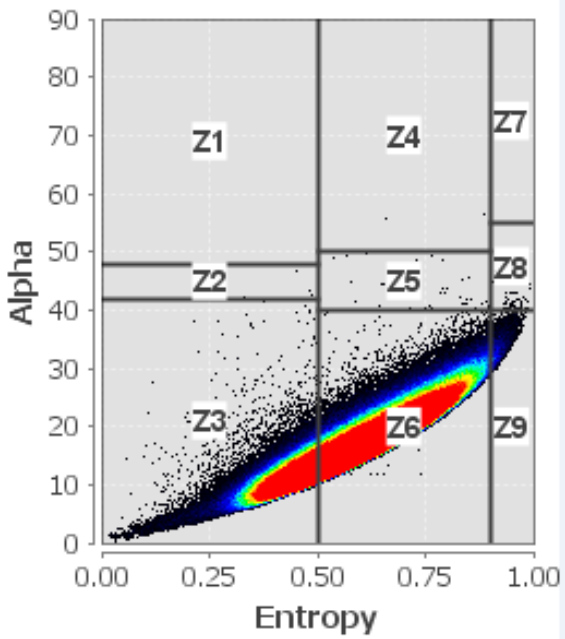
Fuente: Elaboración Propia.

Del parámetro de entropía puede percibirse que los tonos de color fucsia con aquellos que predominan en la mayor parte de la imagen indicando un valor de entropía mayor de 0.5, que significa que existe la probabilidad mayor del 50% de que en dichas áreas se presenten varios mecanismos de dispersión y posiblemente esté relacionado con la presencia de coberturas vegetales, pues espacialmente estas se ubican en dichas áreas. Por otro lado, los cuerpos de agua son aquellos que tienen los valores más bajos de entropía, pues las zonas de tonalidades amarillas y naranjas corresponden espacialmente a esta cobertura lo que indica que predomina un único mecanismo de dispersión el cual puede relacionarse con el de retrodispersión especular, sin embargo en los ríos relativamente pequeños se presentan tonalidades moradas así como en algunas zonas de pastos, por lo que se establece que existen diferentes mecanismos de dispersión en dichas áreas.

En cuanto a la anisotropía de acuerdo a la teoría de la descomposición polarimétrica incoherente, los valores mayores a 0.7 son útiles como fuente de discriminación de información, pues los valores menores se ven afectados por el ruido, y de acuerdo a la tabla 7, se puede deducir que una gran área de la zona definida presenta valores iguales o superiores a este parámetro que pueden visualizarse desde los tonos cian hasta los azules oscuros, por ello se define que este parámetro debe usarse en el proceso de clasificación supervisada. Cabe destacar que los valores más altos de este parámetro corresponden a cuerpos de agua o a vegetación acuática.

Respecto al ángulo de dispersión promedio alpha, se deduce que el mecanismo de dispersión por superficie o por único rebote es aquel que tiene una mayor influencia en la imagen, pues comprende aproximadamente los valores de 0° hasta cerca de los 45°, los mecanismos de retrodispersión por volumen y por doble rebote son aquellos que tienen una menor participación, pues aproximadamente para las tres fechas el valor más elevado para este ángulo es de casi 60°, por lo que se puede deducir que las coberturas de la superficie terrestre son lisas o muy poco rugosas ante la longitud de onda del radar, por ello se infiere que en la zona de estudio a partir de esta información y de lo observado en las imágenes SAR en sus canales de intensidad HH y HV hay presencia de coberturas de gran extensión relacionadas con espejos de agua, pastos limpios o uniformes con poca o nula presencia de vegetación densa y de vegetación acuática sobre cuerpos de agua. Con base en los parámetros anteriores, es posible determinar el plano H-α para cada una de las fechas cuyo análisis y visualización se presentan en la tabla 9.

Tabla 9. Planos H-α.

Fecha	13 de Junio de 2010	29 de Julio de 2010	29 de Octubre de 2010
Plano H-α.			

Fuente: Elaboración Propia.

Como puede observarse en los tres planos, las zonas donde se agrupa la mayor información son la 3 y la 6, de las cuales de acuerdo a los fundamentos teóricos, la zona 3 corresponde a una baja entropía y dispersión de superficie, donde se incluyen las coberturas cuyas superficies son lisas o muy poco rugosas ante longitud de onda del radar como el agua, las pistas de aeropuertos, las vías, etc., y presentan el mecanismo de retrodispersión especular o hay presencia de un único rebote, esto indica que una gran parte del área de estudio tiene estas características, lo cual contrasta con lo que se había inferido del parámetro alpha anteriormente, pues priman los valores con ángulos menores de aproximadamente 45° que se relacionan con la reflexión de superficie.

Por otro lado, se tiene la zona 6 que abarca la mayor cantidad de área de la zona y establece una entropía media y dispersión por superficie, lo que refleja cambios en la rugosidad y se presenta la propagación de dosel, por ende esta zona se asocia a la presencia de vegetación que comprende hojas, pues hay mayor probabilidad de que en cada pixel exista más de un mecanismo de retrodispersión lo que coincide con lo estipulado para el parámetro de entropía, pues la predominancia de sus valores se da en el rango de 0.6 a 1 aproximadamente. En adición la zona 9, donde también hay presencia de información, esta no puede interpretarse de acuerdo a lo estipulado teóricamente para el plano H-α, debido a la incapacidad de clasificar los tipos de dispersión con entropía alta.

Además, puede percibirse que en las zonas 2, 5 y 8 hay presencia de información, aunque comparativamente con las demás es escasa, sin embargo es acertado tenerla en cuenta. De la zona 2 se puede establecerse que existe en el área de estudio vegetación aislada, debido a la entropía media y dispersión por volumen, lo que señala que hay presencia de dispersores tipo dipolos aislados. Respecto a la zona 5 donde existe entropía media y dispersión por volumen indica la presencia de vegetación con hojas las cuales actúan como un dispersor anisotrópico en donde la onda incidente se refleja en su misma dirección pero en ángulos diferentes. Finalmente, en la zona 7 hay presencia de alta entropía y dispersión por volumen la cual se relaciona con la dispersión de las copas de los árboles en los bosques.

En términos de temporalidad, puede observarse un decrecimiento continuo de información concerniente a las zonas 6 y 9, mientras que se percibe un leve aumento también continuo en la zona 3, lo cual indicaría que a medida que el tiempo transcurre se presenta un aumento de dispersores con características de dispersión por único rebote o especular que puede relacionarse con el fenómeno de inundación, pues a priori puede deducirse que el agua ha aumentado su área en la zona de estudio a costa de las demás coberturas presentes.

7.2. Clasificación supervisada.

7.2.1. Filtrado speckle.

De forma similar al subproceso de Filtrado Speckle Polarimétrico, se hará un ensayo de los filtros de Speckle Lee Sigma, Box Car, Gamma MAP, Lee, Refined Lee, Mediana, Frost e IDAN con los mismos parámetros para cada uno sobre los canales de intensidad HH y HV de la

imagen SAR ALPSRP233550170 en dos zonas diferentes para contrastar los resultados obtenidos y así elegir el filtro que mejores resultados genere en cuanto a la maximización en la diferenciación entre las coberturas perceptibles, la suavización de sus límites (especialmente la cobertura de agua) y la homogeneización de las mismas evitando la excesiva pérdida de información, los resultados pueden denotarse en el anexo 2.

Como resultado de lo anterior se establece que el mejor filtro para reducir el fenómeno Speckle es el filtro IDAN, cabe destacar que aunque presenta un fenómeno de ruido producto de la aparición de pixeles de coloraciones negras en las zonas de tonos homogéneos este no afectara el subproceso de segmentación dado a que se hará uso del enfoque de clasificación OBIA, por ende la influencia de este ruido será mínima para la creación de los objetos ya que es aleatorio y no se concentra en áreas específicas. Este filtro será aplicado a los dos canales de intensidad HH y HV que conforman cada una de las seis imágenes SAR.

7.2.2. Segmentación.

Se procede a ejecutar el subproceso de segmentación sobre los canales de intensidad HH y HV para el área definida en la tabla 5 en la fecha del 13 de Junio de 2010, para realizar la prueba del algoritmo teniendo en cuenta diferentes valores en los parámetros de tamaño del objeto, forma y compacidad con el fin de determinar los valores que permitan obtener objetos que cumplan con una buena separación entre coberturas, definición de límites claros y una aceptable agrupación de pixeles con tonalidades similares, estos resultados se muestran en el anexo 3.

De la prueba del algoritmo se puede deducir que todos los resultados cuentan con valores en el parámetro tamaño del objeto que oscilan entre 15 y 25 debido a que estos son los que mejores resultados generan porque permiten una agrupación de pixeles adecuada teniendo en cuenta la respuesta espectral y/o las tonalidades observadas para los canales de intensidad HH y HV, sobre estos valores variaron los parámetros de forma y compacidad. Los valores en cuanto a forma que generan resultados aceptables son muy bajos, pues la moda del valor es de 0.1, esto debido a que valores altos generan que las coberturas no sean claramente definidas aun cuando se presentan variaciones de tonos significativas, como lo es el caso de la cobertura de cuerpos de agua con la de pastos, por ello se asignaron valores muy bajos con la finalidad de agregar un mayor peso a la

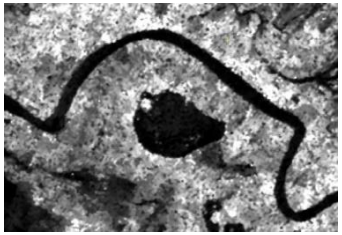
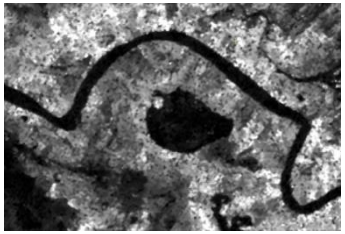
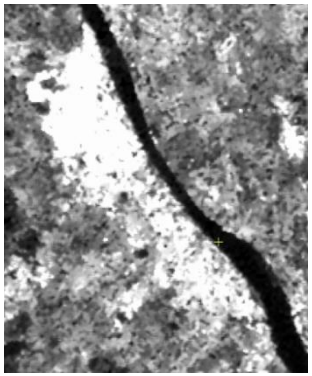
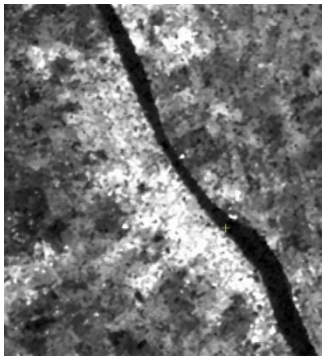
coloración para la formación de los objetos, lo cual genera buenos resultados para la delimitación de coberturas y agregación de los pixeles con tonos similares. Respecto a los valores del parámetro de compacidad estos al igual que el anterior son bajos ya que no se requiere que los límites de los objetos sean muy suavizados, pues esto provocaría que los objetos sean menos irregulares y por ello se perdería definición en la delimitación de las coberturas que no cuentan con patrones geométricos muy marcados como lo es principalmente el caso de los cuerpos de agua.

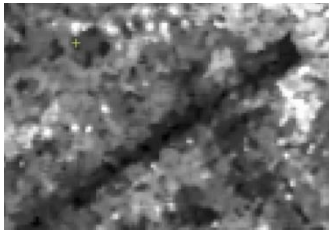
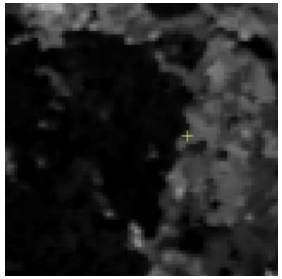
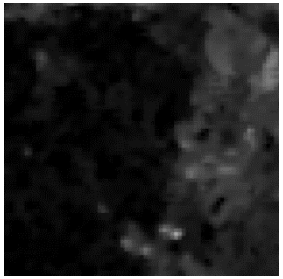
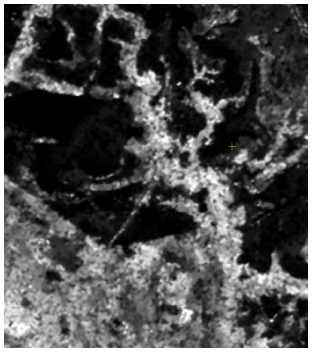
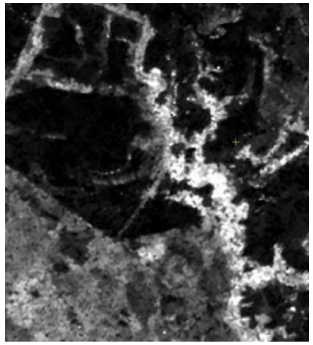
Teniendo en cuenta lo anterior, se determina que los valores de los parámetros de Tamaño del Objeto, Forma y Compacidad que mejores resultados generan en base a los canales de intensidad HH y HV de la zona de estudio para el 13 de Junio de 2010 son de 15, 0.1 y 0.3 respectivamente, teniendo como fundamento que estos permiten comparativamente la mejor agrupación de pixeles con tonos homogéneos para la formación de los objetos, con una buena delimitación entre estos y una separación marcada entre las diferentes coberturas de acuerdo a sus tonalidades. Estos valores también se utilizan para realizar el subproceso de segmentación para las otras dos fechas establecidas.

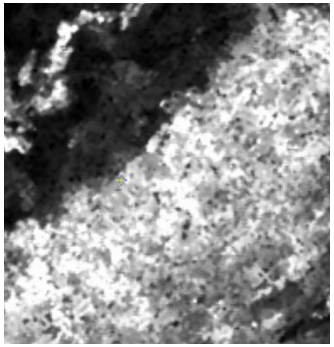
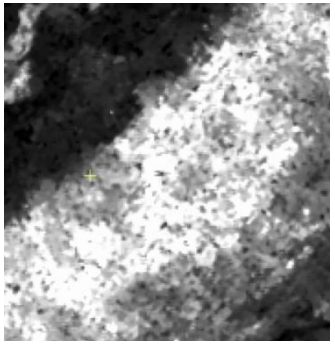
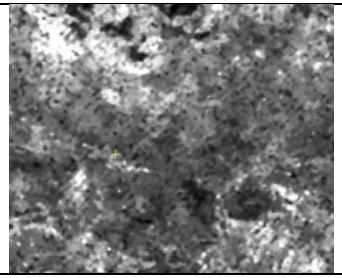
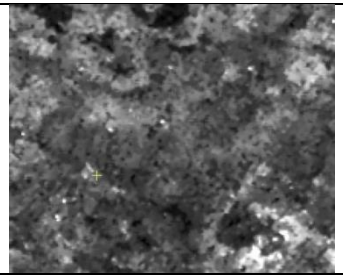
7.2.3. Entrenamiento.

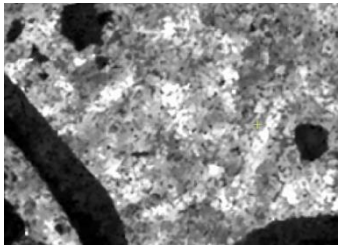
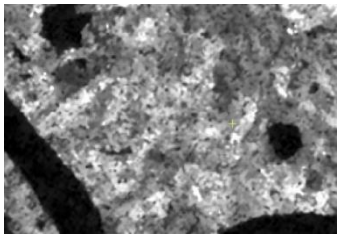
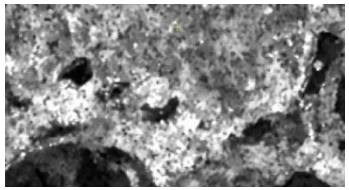
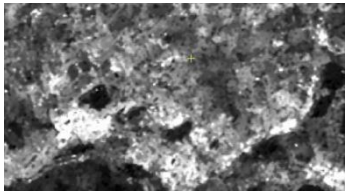
En la tabla 10 se determinan las clases o coberturas a identificar para el desarrollo de este proyecto definidas en base a las coberturas de la tierra presentes en la zona de estudio de acuerdo a la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia, el análisis polarimétrico realizado y la visualización en los canales de intensidad HH y HV para el 13 de Junio de 2010 como ayuda para su identificación, además cuentan con una descripción que describe las características pictórico morfológicas y polarimétricas más relevantes para la interpretación de las clases establecidas.

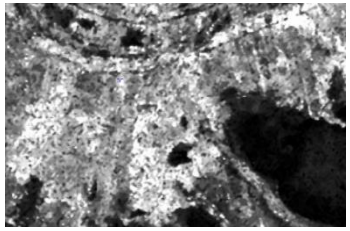
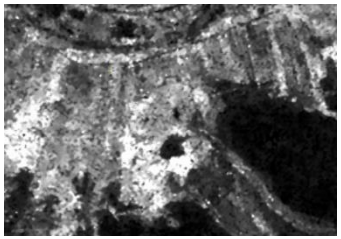
Tabla 10. Clases o coberturas de la tierra definidas para el desarrollo del proyecto.

Clase definida	Coberturas de la tierra según Corine Land Cover adaptada para Colombia	Visualización en los canales de intensidad para el 13/06/2010		Descripción
		HH	HV	
Aguas continentales naturales	Ríos (50m)			Esta cobertura se visualiza en los canales de intensidad con tonalidades muy oscuras casi negras, poseen texturas muy finas debido a la presencia del mecanismo de dispersión especular que generan estos cuerpos ante la señal del radar, además presentan formas irregulares, esta cobertura se relaciona con la zona del plano H-α donde se presenta baja entropía y dispersión por superficie De acuerdo a la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia para escalas 1:25.000 se tienen como unidad mínima cartografiable aquellos ríos que cuenta con un ancho del cauce mayor o igual a 50 metros y en cuanto a las lagunas, lagos y ciénagas naturales un área mayor o igual a 25 hectáreas.
	Lagunas, lagos y ciénagas naturales			
Tejido Urbano	Tejido urbano continuo			El tejido urbano continuo es perceptible en tonalidades muy brillantes y coloraciones blanquecinas (especialmente en el canal de intensidad HH) producto del mecanismo de dispersión por doble rebote, presenta texturas muy gruesas y formas regulares en el caso del casco urbano del municipio de Santa Cruz de Mompós e irregulares en los centros poblados. Los aeropuertos por el contrario presentan tonos oscuros, texturas finas y formas regulares porque únicamente son perceptibles las pistas de despegue y aterrizaje que los componen,

	Aeropuertos			sin embargo en la zona de estudio el área que representa esta cobertura es insignificante (32.48 ha con el 0.02% de participación) por lo que se tomó la decisión de agregarla junto con la de tejido urbano continuo en una sola clase, además en términos prácticos esta puede extraerse fácilmente en procesos de post edición.
Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	Vegetación acuática sobre cuerpos de agua			Esta cobertura se mantiene en una sola clase debido a que en la zona de estudio tiene una presencia apreciable, es posible interpretarla dado a sus tonos grisáceos oscuros, texturas medias y formas irregulares, además espacialmente se ubica contigua a la clase de aguas continentales naturales, puede relacionarse con una baja y media entropía y un tipo de dispersión de superficie que comprenden las zonas 3 y 6 respectivamente del plano H-α.
Zonas pantanosas	Zonas pantanosas			Al igual que la clase anterior, esta se mantiene dada su gran extensión. Se visualiza con tonos blanquecinos brillantes debido a que son zonas de vegetación que permanecen inundadas la mayor parte del año, esta respuesta de color se relaciona con la presencia de agua en la vegetación y por el mecanismo de dispersión por doble rebote en el caso que la señal de radar logre penetrar la vegetación o por volumen si únicamente interactúa con el dosel de los árboles, puede relacionarse con entropía media, se visualiza en formas irregulares y con texturas gruesas.

Bosques y áreas seminaturales	Bosque denso Plantación forestal Herbazal Vegetación secundaria o en transición Zonas arenosas naturales			Es una de las clases con mayor número de coberturas agrupadas, esto se realizó teniendo en cuenta la jerarquía de la leyenda nacional de coberturas de la tierra. En principio se estableció que el área total entre plantaciones forestales, herbazales y zonas arenosas naturales era mínima en la zona de estudio porque se ubican en los límites, por ello se optó por agruparlas a esta clase. Finalmente las coberturas de bosque denso y vegetación secundaria o en transición presentan una respuesta espectral muy similar en los canales de intensidad y no es posible denotar una diferencia remarcable, pues ambas pueden identificarse con tonos grises brillantes, texturas medias y con formas irregulares, además espacialmente se ubican en zonas aledañas a las clases de pastos y cultivos. Respecto a la polarimetría se pueden relacionar con las zonas 2, 5 y 8, pues aunque tienen poca participación en la imagen, se pueden relacionar con estas coberturas dada la presencia del mecanismo de retrodispersión por volumen, que indica la presencia de vegetación asilada con hojas que actúan como dipolos y dispersores anisotrópicos además de que se incluyen los bosques, lo anterior teniendo en cuenta una entropía media, baja y alta respectivamente.
Pastos limpios	Pastos limpios			Esta dos coberturas fueron agrupadas debido a su similitud en la respuesta espectral en los canales de intensidad, pues teniendo en cuenta las áreas que estas ocupan de acuerdo al mapa de coberturas de la tierra se pueden interpretar con tonalidades grisáceas oscuras con una ligera mezcla de tonos brillantes, presenta texturas finas y en mayor medida con formas

	Mosaico de pastos y cultivos			irregulares, aunque en algunas zonas es posible observar patrones con formas regulares. Estas áreas pueden considerarse poco ásperas debido a sus tonalidades, por ello pueden relacionarse por una baja entropía y una dispersión por superficie o por único rebote que caracteriza a la zona 3 del plano H-α obtenido para las imágenes. Esta clase lleva el nombre de pastos limpios debido a que comparativamente presenta un área significativamente mayor a la cobertura de mosaico de pastos y cultivos, además es una de las coberturas con mayor predominancia en la zona de estudio según el mapa de coberturas de la tierra.
Área de pastos heterogéneas	Pastos arbolados			Las coberturas que conforman esta clase no presentan entre si alguna diferencia perceptible en cuanto a su respuesta espectral en ambos canales de intensidad, por ello fueron agrupadas. Respecto a las coberturas de pastos arbolados y enmalezados dentro de la definición dada por la metodología Corine Land Cover aun con sensores pasivos se presenta confusión en su interpretación visual, por ello se requiere de información adicional para poder separarlas, estas puede observare en los canales con una mezcla entre tonos grisáceos claros y oscuros, con una textura de fina a media y con formas irregulares. En cuanto a las coberturas de áreas agrícolas heterogéneas, que son los mosaicos, se pueden interpretar dada estas mismas características como puede observarse en las imágenes para los canales de intensidad HH y HV. Respecto al plano H-α esta clase puede considerarse dentro de la zona 6 que comprende una entropía media y dispersión por superficie, esto debido a la presencia de vegetación que comprende hojas que puede denotarse con tonos
	Pastos enmalezados			
	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales			
	Mosaico de pastos con espacios naturales			

				más brillantes debido a la presencia de varios mecanismos de retrodispersión.
Cultivos	Otros cultivos transitorios			La cobertura de cultivos permanentes arbustivos no representa un área determinante en la zona de estudio, por ello fueron agregadas junto con la de otros cultivos transitorios a una única clase. La clase de cultivos puede interpretarse por la presencia de tonalidades entre grises claros y brillantes, con texturas medias y algunos patrones geométricos con formas regulares. Esta se ubica únicamente en la zona norte del municipio de Santa Cruz de Mompós de acuerdo al mapa de coberturas de la tierra periodo 2010-2012.
	Cultivos permanentes arbustivos			

Fuente: Elaboración Propia.

7.2.4. Selección del algoritmo de clasificación.

Luego de ejecutar el subproceso referente al algoritmo de clasificación se obtienen tres clasificaciones temáticas que representan la distribución espacial de cada una de las ocho coberturas definidas para el desarrollo de este proyecto sobre el área establecida en la tabla 5 en las fechas del 13 de junio, 29 de julio y 29 de octubre del año 2010. A estas clasificaciones se les elabora una salida grafica con lo que finalmente se obtienen los mapas de coberturas de la tierra para cada punto temporal mencionado, estos se muestran en las ilustraciones 12, 13 y 14 respectivamente.

En la tabla 11 se encuentran cuantificadas las áreas en hectáreas de cada cobertura y su participación en cada mapa de cobertura de la tierra resultante para las tres fechas, cabe mencionar que únicamente comprenden el área del municipio de Santa Cruz de Mompós.

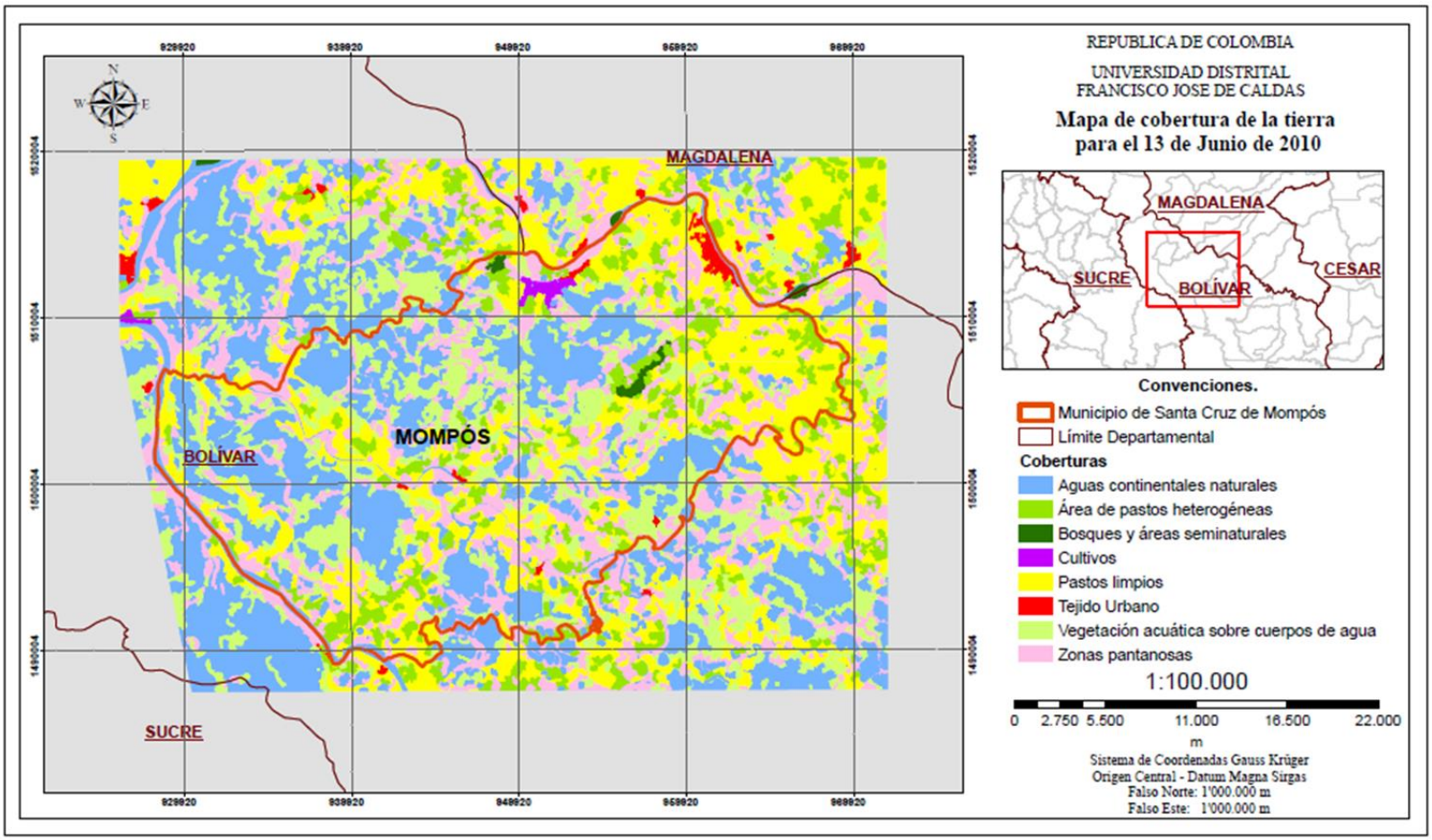


Ilustración 12. Mapa de cobertura de la tierra para el 13 de junio de 2010.
Fuente: Elaboración Propia.

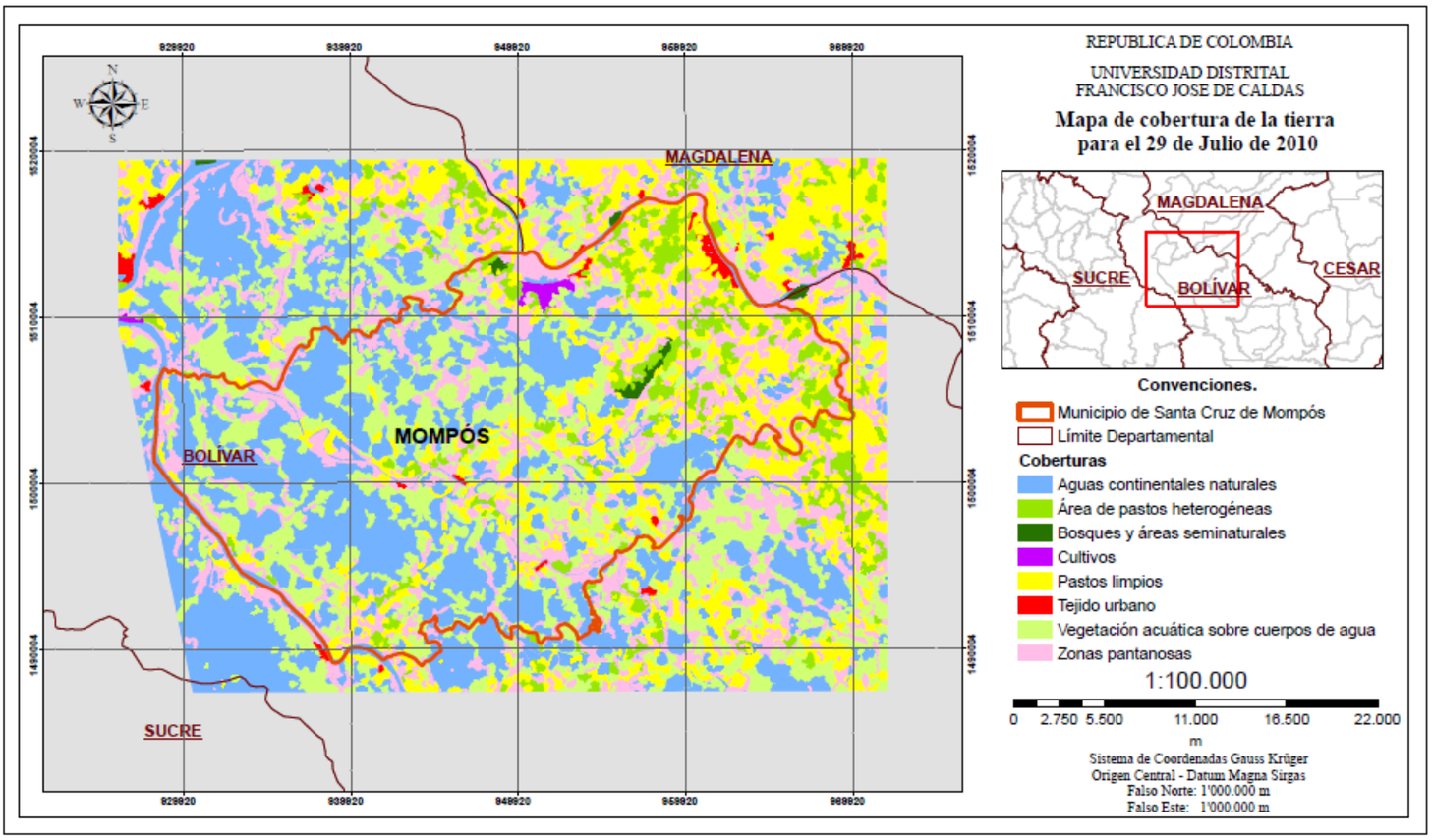


Ilustración 13. Mapa de cobertura de la tierra para el 29 de julio de 2010.
Fuente: Elaboración Propia.

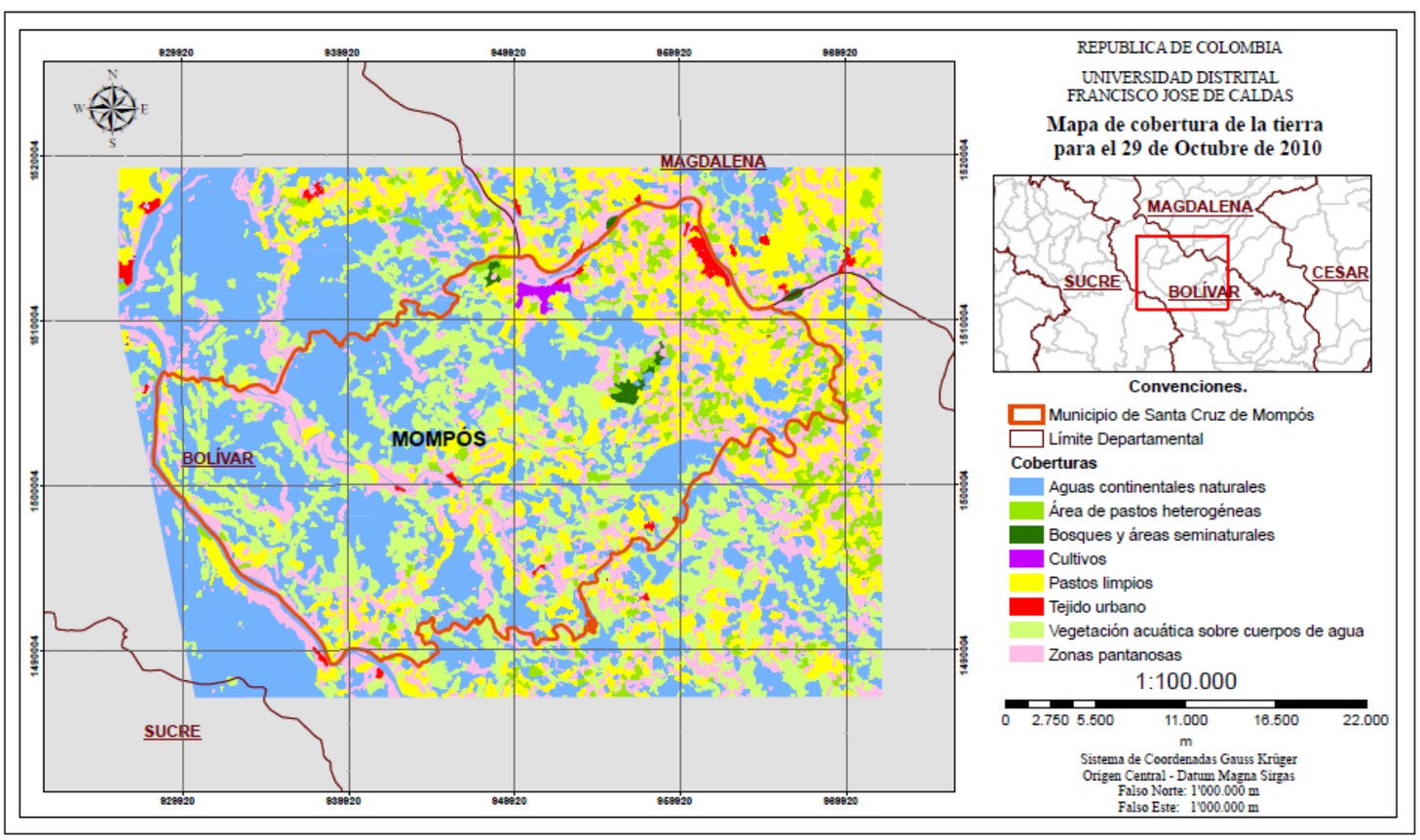


Ilustración 14. Mapa de cobertura de la tierra para el 29 de octubre de 2010.
Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 11. Cuantificación de áreas por cobertura y su participación dentro del municipio de Santa Cruz de Mompós.

Cobertura	13 de Junio de 2010		29 de Julio de 2010		29 de Octubre de 2010	
	Área (Ha)	**Participación (%)**	**Área (Ha)**	**Participación (%)**	**Área (Ha)**	**Participación (%)**
Aguas continentales naturales	19769,32	30,31	21913,61	33,60	25501,76	39,10
Área de pastos heterogéneas	4772,54	7,31	3383,88	5,18	1764,50	2,70
Bosques y áreas seminaturales	365,42	0,56	381,19	0,58	421,01	0,64
Cultivos	387,33	0,59	384,05	0,58	376,81	0,57
Pastos limpios	17064,09	26,16	11437,64	17,53	13642,07	20,91
Tejido urbano	424,62	0,65	406,51	0,62	385,72	0,59
Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	10088,76	15,47	16172,09	24,79	14363,60	22,02
Zonas pantanosas	12342,81	18,92	11135,92	17,07	8759,41	13,43
Total	**65214,92**	**100**	**65214,92**	**100**	**65214,92**	**100**

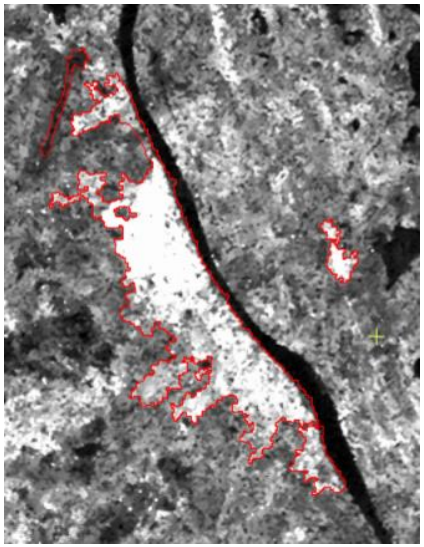
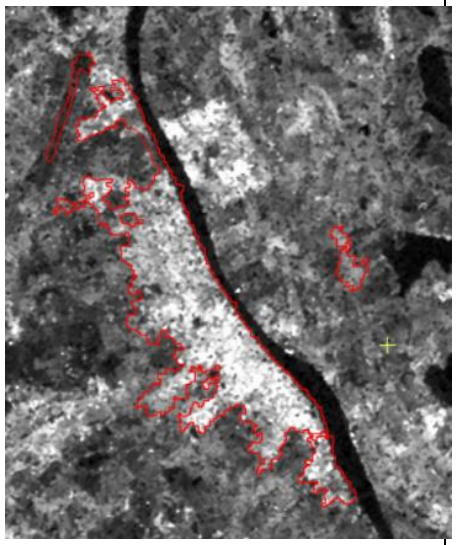
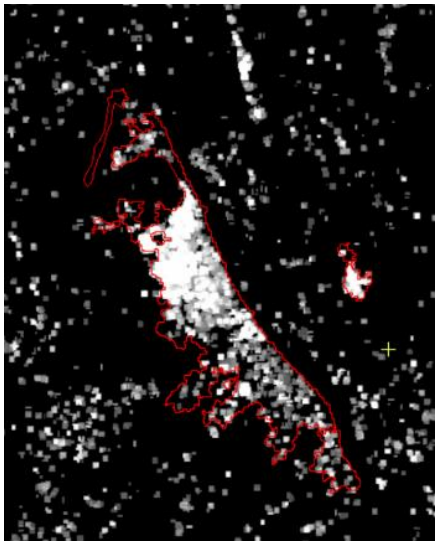
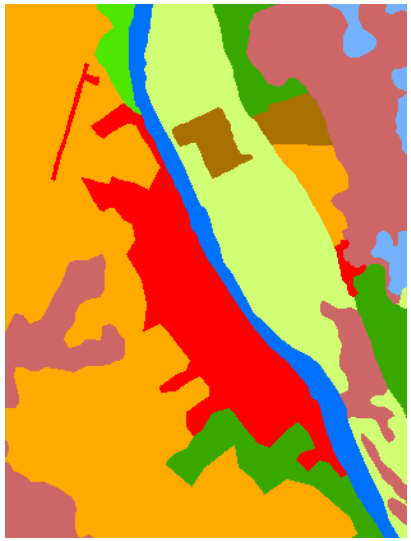
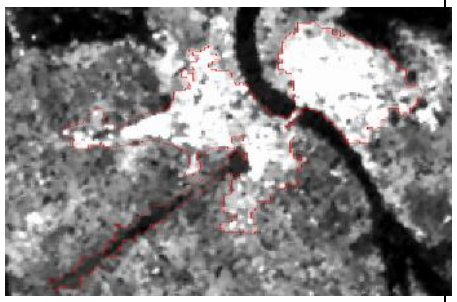
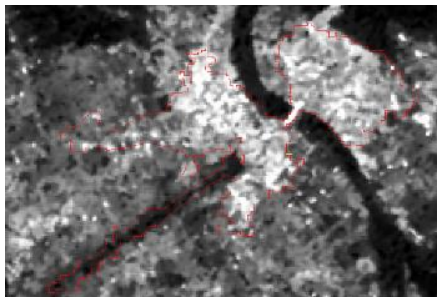
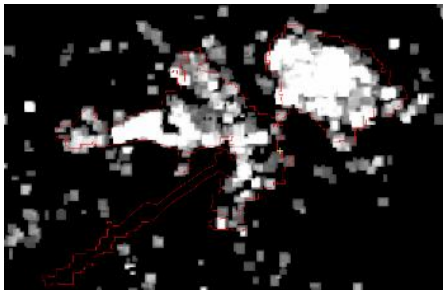
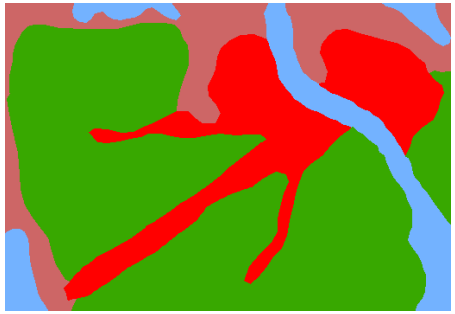
Fuente: Elaboración Propia.

7.2.5. Post edición.

Una vez realizada la post edición sobre las clasificaciones temáticas en cada una de las fechas se puede concluir que las coberturas con una mayor intervención por parte del intérprete fueron las de tejido urbano, vegetación sobre cuerpos de agua y zonas pantanosas. Respecto a las zonas urbanas presentes en la imagen, estas se mezclan con clases como zonas pantanosas y pastos limpios, con la primera posiblemente a una respuesta espectral similar y con la segunda porque esta clase es contigua al tejido urbano. Para mitigar este inconveniente se realizó un proceso de edición riguroso en esta cobertura con el que se buscó mejorar la identificación del tejido urbano mediante el uso de una capa de textura denominada divergencia de Speckle. Como insumo adicional se utilizó el mapa de cobertura de la tierra periodo 2010-2012 dado a que si bien dicho algoritmo de textura es útil para identificar el tejido urbano aún se requiere refinar el resultado. Unos ejemplos de la visualización e identificación de esta clase con base en los canales de intensidad HH y HV, la capa de textura de divergencia de speckle y el mapa de cobertura se muestra en la tabla 12 sobre el casco urbano del municipio de Santa Cruz de Mompós y del municipio de Cicuco en tonos rojizos.

Las coberturas de vegetación sobre cuerpos de agua y zonas pantanosas a comparación de la de tejido urbano no requirieron una edición tan laboriosa, pues los objetos que hacían parte de estas se mezclaban con las clases de pastos limpios y aguas continentales naturales luego de ejecutar el algoritmo de clasificación, por ello la edición consistió prácticamente en reasignar aquellos objetos detectables que fueron mal clasificados a su respectiva clase de acuerdo a sus características pictórico morfológicas establecidas en la tabla 10 y en el caso que dichos objetos incluyeran varias clases, estos fueron cortados mediante el tipo de edición interactiva y sus partes asignadas a la clase correspondiente.

Tabla 12. Ejemplos de identificación y edición de la cobertura de tejido urbano.

Municipio	Visualización en el canal de intensidad HH	Visualización en el canal de intensidad HV	Visualización en la capa de textura de divergencia de Speckle	Mapa de cobertura de la tierra periodo 2010-2012
Santa Cruz de Mompós				
Cicuco				

Fuente: Elaboración Propia.

7.3. Fase de validación temática.

El coeficiente Kappa con el cual se establece si la clasificación temática cumple con una exactitud aceptable, fue determinado de acuerdo a la bibliografía teniendo en cuenta los mayores Kappa obtenidos por los autores en cada uno de los trabajos citados relacionados con polarimetría en base a imágenes SAR, de los cuales se obtiene que en (Alberga, 2007) se presenta el coeficiente más bajo con cerca de 0.58, debido a que es el resultado de ejecutar un tipo de clasificación no supervisada, empleando información polarimétrica obtenida por la metodología H/A/Alpha, luego en (Lönnqvist, Rauste, Molinier, & Häme, 2010) obtienen un coeficiente Kappa de 0.67 utilizando una clasificación supervisada en base a esa misma información polarimétrica. Por otro lado en (Mishra & Susaki, 2012) y (Juan, Zhen, Bangsen, & Zili, 2012) obtienen los mayores valores Kappa con 0.81 y 0.89 respectivamente, ambos emplearon la técnica de clasificación supervisada utilizando el algoritmo de máquinas de soporte vectorial, además contaban con información polarimétrica base obtenida por las metodologías de H/A/Alpha y Pauli para el primer trabajo y Freeman and Durden para el segundo.

Todos los trabajos mencionados hicieron uso de información polarimétrica extraída de las cuatro polarizaciones lineales HH/HV/VH/VV de las imágenes SAR. Dado lo anterior se estipula un coeficiente Kappa minino para el desarrollo de este proyecto de **0.7375** el cual corresponde a la media aritmética de los cuatro coeficientes mencionados en el párrafo anterior, por ello las clasificaciones temáticas finales para cada una de las fechas deben lograr un valor igual o superior a este para continuar con el flujo de trabajo determinado.

El coeficiente kappa general para la clasificación resultante en la fecha del 13 de Junio de 2010 es válido ya que su valor es de 0.793, siendo este mayor al kappa mínimo definido para verificar y aprobar las clasificaciones temáticas, por ende esta clasificación es apta para continuar con el flujo de trabajo establecido, cabe destacar que este coeficiente es el más bajo obtenido en las clasificaciones temáticas. En contraparte el coeficiente kappa general para el 29 de Julio de 2010 es el mayor de las tres clasificaciones temáticas resultantes con un valor de 0.826, además para el 29 de Octubre de 2010 el coeficiente kappa general equivale a 0.820, los mapas temáticos correspondientes a estas dos fechas también superan el mínimo permisible que equivale a 0.7375, por ello pueden continuar con el flujo de trabajo.

Como conclusión del proceso de validación temática, se tiene que las clasificaciones resultantes para cada fecha superan el valor mínimo del kappa definido y por ende cumplen con la exactitud idónea estipulada, además estos coeficientes son más cercanos a los obtenidos por los autores que utilizaron como algoritmo de clasificación las máquinas de soporte vectorial el cual fue el mismo que se aplicó para el desarrollo de este proyecto, por lo tanto se deduce que este algoritmo es muy útil para realizar clasificaciones supervisadas en base a información de imágenes SAR bajo un enfoque OBIA. En el anexo 4 se encuentra desagregado el análisis de la validación temática para cada uno de los tres mapas temáticos resultantes.

7.4. Análisis multitemporal.

Para esta etapa se define la codificación de los análisis multitemporales, la cual se encuentra en las tablas 13 y 14, además la explicación del tipo de cambio de cobertura para cada código resultante puede verse en la tabla 15.

Tabla 13. Codificación para el multitemporal entre el 13 de junio y el 29 de julio de 2010.

Codificación para el multitemporal entre el 13 de Junio y el 29 de Julio de 2010		29 de Julio de 2010								
		Cobertura	Aguas continentales naturales	Area de pastos heterogéneas	Bosques y áreas seminaturales	Cultivos	Pastos limpios	Tejido urbano	Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	Zonas pantanosas
13 de Junio de 2010	Cobertura	Código	10	20	30	40	50	60	70	80
	Aguas continentales naturales	1	11	21	31	41	51	61	71	81
	Area de pastos heterogéneas	2	12	22	32	42	52	62	72	82
	Bosques y áreas seminaturales	3	13	23	33	43	53	63	73	83
	Cultivos	4	14	24	34	44	54	64	74	84
	Pastos limpios	5	15	25	35	45	55	65	75	85
	Tejido urbano	6	16	26	36	46	56	66	76	86
	Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	7	17	27	37	47	57	67	77	87
	Zonas pantanosas	8	18	28	38	48	58	68	78	88

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 14. Codificación para el multitemporal entre el 29 de julio y el 29 de octubre de 2010.

Codificación para el multitemporal entre el 29 de Julio y el 29 de Octubre de 2010		29 de Octubre de 2010								
		Cobertura	Aguas continentales naturales	Area de pastos heterogéneas	Bosques y áreas seminaturales	Cultivos	Pastos limpios	Tejido urbano	Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	Zonas pantanosas
29 de Julio de 2010	Cobertura	Código	10	20	30	40	50	60	70	80
	Aguas continentales naturales	1	11	21	31	41	51	61	71	81
	Area de pastos heterogéneas	2	12	22	32	42	52	62	72	82
	Bosques y áreas seminaturales	3	13	23	33	43	53	63	73	83
	Cultivos	4	14	24	34	44	54	64	74	84
	Pastos limpios	5	15	25	35	45	55	65	75	85
	Tejido urbano	6	16	26	36	46	56	66	76	86
	Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	7	17	27	37	47	57	67	77	87
	Zonas pantanosas	8	18	28	38	48	58	68	78	88

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 15. Tipo de cambios presentes en los multitemporales de acuerdo a su código.

Cambio	Código
Se mantuvo la cobertura de Aguas continentales naturales	**11**
Area de pastos heterogéneas totalmente inundadas	12
Bosques y áreas seminaturales totalmente inundados	13
Cultivos totalmente inundados	14
Pastos limpios totalmente inundados	15
Tejido urbano totalmente inundado	16
Movimiento de la Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	17
Zonas pantanosas totalmente inundadas	18
De Aguas continentales naturales a Area de pastos heterogéneas	21
Se mantuvo la cobertura de Area de pastos heterogéneas	**22**
De Bosques y áreas seminaturales a Area de pastos heterogéneas	23
De Cultivos a Area de pastos heterogéneas	24
De Pastos limpios a Area de pastos heterogéneas	25
De Tejido urbano a Area de pastos heterogéneas	26
De Vegetación acuática sobre cuerpos de agua a Area de pastos heterogéneas	27
De Zonas pantanosas a Area de pastos heterogéneas	28
De Aguas continentales naturales a Bosques y áreas seminaturales	31
De Area de pastos heterogéneas a Bosques y áreas seminaturales	32
Se mantuvo la cobertura de Bosques y áreas seminaturales	**33**
De Cultivos a Bosques y áreas seminaturales	34
De Pastos limpios a Bosques y áreas seminaturales	35
De Tejido urbano a Bosques y áreas seminaturales	36
De Vegetación acuática sobre cuerpos de agua a Bosques y áreas seminaturales	37
De Zonas pantanosas a Bosques y áreas seminaturales	38
De Aguas continentales naturales a Cultivos	41
De Area de pastos heterogéneas a Cultivos	42
De Bosques y áreas seminaturales a Cultivos	43
Se mantuvo la cobertura de Cultivos	**44**
De Pastos limpios a Cultivos	45
De Tejido urbano a Cultivos	46
De Vegetación acuática sobre cuerpos de agua a Cultivos	47
De Zonas pantanosas a Cultivos	48

Cambio	Código
De Aguas continentales naturales a Pastos limpios	51
De Area de pastos heterogéneas a Pastos limpios	52
De Bosques y áreas seminaturales a Pastos limpios	53
De Cultivos a Pastos limpios	54
Se mantuvo la cobertura de Pastos limpios	**55**
De Tejido urbano a Pastos limpios	56
De Vegetación acuática sobre cuerpos de agua a Pastos limpios	57
De Zonas pantanosas a Pastos limpios	58
De Aguas continentales naturales a Tejido urbano	61
De Area de pastos heterogéneas a Tejido urbano	62
De Bosques y áreas seminaturales a Tejido urbano	63
De Cultivos a Tejido urbano	64
De Pastos limpios a Tejido urbano	65
Se mantuvo la cobertura de Area de Tejido urbano	**66**
De Vegetación acuática sobre cuerpos de agua a Tejido urbano	67
De Zonas pantanosas a Tejido urbano	68
Movimiento de la Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	71
De Area de pastos heterogéneas a Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	72
De Bosques y áreas seminaturales a Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	73
De Cultivos a Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	74
De Pastos limpios a Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	75
De Tejido urbano a Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	76
Se mantuvo la cobertura de Vegetación sobre cuerpos de agua	**77**
De Zonas pantanosas a Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	78
De Aguas continentales naturales a Zonas pantanosas	81
Area de pastos heterogéneas parcialmente inundadas	82
Bosques y áreas seminaturales parcialmente inundados	83
Cultivos parcialmente inundados	84
Pastos limpios parcialmente inundados	85
Tejido urbano parcialmente inundado	86
De Vegetación acuática sobre cuerpos de agua a Zonas pantanosas	87
Se mantuvo la cobertura de Zonas pantanosas	**88**

Fuente: Elaboración Propia.

Como puede observarse en las tres tablas 13, 14 y 15, hay tres colores que indican lo siguiente, el color amarillo establece que no se presenta algún cambio en cuanto a la cobertura del punto temporal más antiguo y esta se mantiene en el más reciente, el color verde implica todos los cambios que serán tenidos en cuenta para la elaboración de los multitemporales debido a que dan cumplimiento a los objetivos establecidos para este proyecto, pues señalan las coberturas afectadas producto de la propagación de las aguas de inundación las cuales se relacionan directamente con las coberturas de aguas continentales naturales (inundación total) y zonas pantanosas (inundación parcial), finalmente el color rojo indica los cambios que no serán tenidos en cuenta en los multitemporales ya que no son motivo de estudio para este proyecto. Cabe destacar que el código 88 el cual indica que la cobertura de zonas pantanosas se mantiene en los dos puntos temporales, será tenida en cuenta debido a que como bien se mencionó en la tabla 10, esta representa a la vegetación que permanece inundada y por ello hace parte del análisis en la etapa de post proceso.

Los términos de inundación total y parcial que son mencionados en la tabla 15 hacen alusión al tipo de inundación que se presenta sobre las coberturas de área de pastos heterogéneas, bosques y áreas seminaturales, cultivos, pastos limpios, tejido urbano y zonas pantanosas identificadas dentro del municipio de Santa Cruz de Mompós de acuerdo al cambio percibido, la inundación total indica el cambio de cualquiera de estas coberturas a la de aguas continentales naturales por lo que se infiere que fue totalmente cubierta por esta, la inundación parcial implica el cambio de cualquiera de las cinco primeras coberturas mencionadas al principio de este párrafo (área de pastos heterogéneas, bosques y áreas seminaturales, cultivos, pastos limpios y tejido urbano) a la de zonas pantanosas, esto debido a que si bien la cobertura aún permanece, el nivel de agua aumento en el tiempo lo que conllevo a un aumento en la constante dieléctrica en términos de retrodispersión de la señal y en la presencia del mecanismo de dispersión por doble rebote, por lo tanto su respuesta en el espacio de características definido para el proceso de clasificación supervisada se comportará de forma similar a la cobertura de zonas pantanosas la que por definición indica presencia de vegetación inundada.

Por otro lado, los cambios que se presentan entre las coberturas de aguas continentales naturales y la de vegetación acuática sobre cuerpos de agua que pueden identificarse con los códigos 17 y 71 se refieren al movimiento de esta última, ya que dicha cobertura es flotante y “presenta

cambios drásticos en su área, debido a las variaciones del nivel de las aguas de acuerdo con el período de ocurrencia de lluvias" (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales., 2010), y es esto justamente lo que sucede dentro de la temporalidad establecida para este proyecto, pues las precipitaciones fueron intensas en consecuencia de la llegada del fenómeno de la niña (IDEAM), por ello se esperan variaciones importantes tanto en área como en distribución espacial de estas dos coberturas.

7.5. Elaboración de los mapas donde se identifiquen los cambios.

Una vez ejecutadas la etapas de depuración descritas en la metodología para esta etapa, se obtienen las salidas graficas que representan espacialmente sobre el municipio de Santa Cruz de Mompós las áreas de las coberturas que sufrieron algún cambio relacionado con la inundación total o parcial en las fechas del 13 de Junio al 29 de Julio del 2010 y del 29 de Julio al 29 de Octubre del mismo año, producto de la propagación de las aguas de inundación relacionadas con las cobertura de aguas continentales naturales y zonas pantanosas respectivamente. Estas salidas graficas pueden visualizarse desde la ilustración 15 hasta la 22.

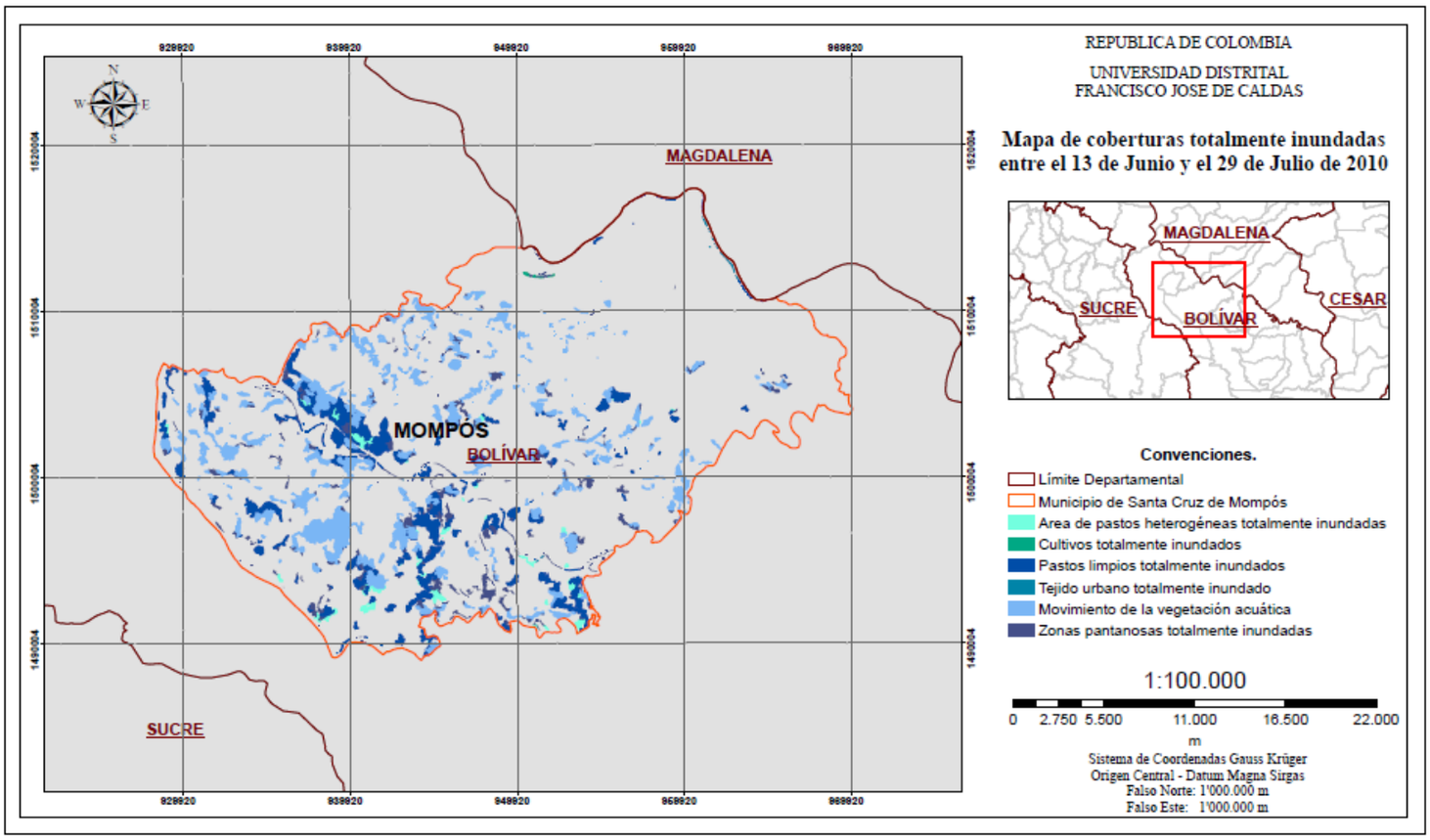


Ilustración 15. Mapa de coberturas totalmente inundadas entre el 13 de junio y el 29 de julio de 2010.
Fuente: Elaboración Propia.

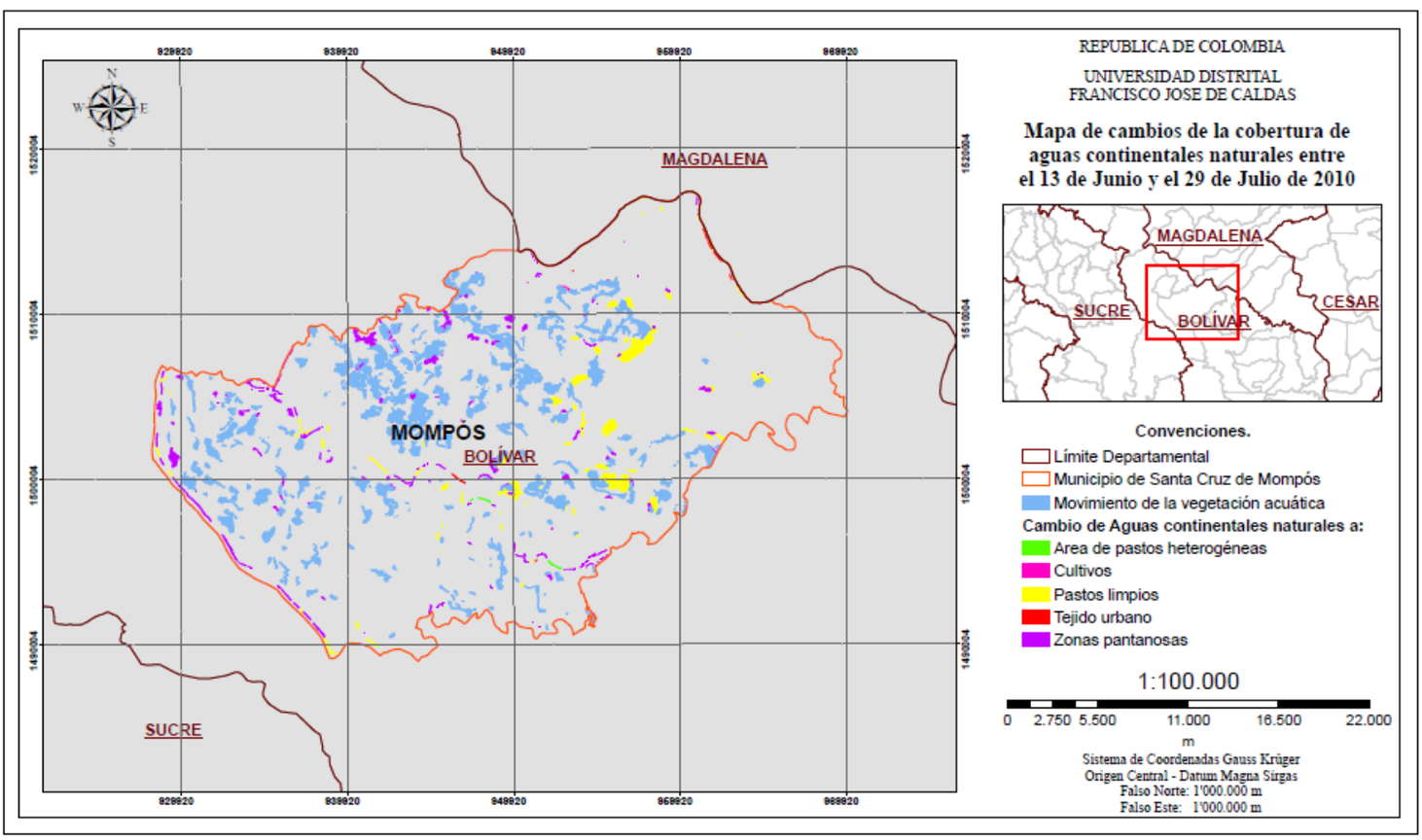


Ilustración 16. Mapa de cambios de la cobertura de aguas continentales naturales entre el 13 de junio y el 29 de julio de 2010.
Fuente: Elaboración Propia.

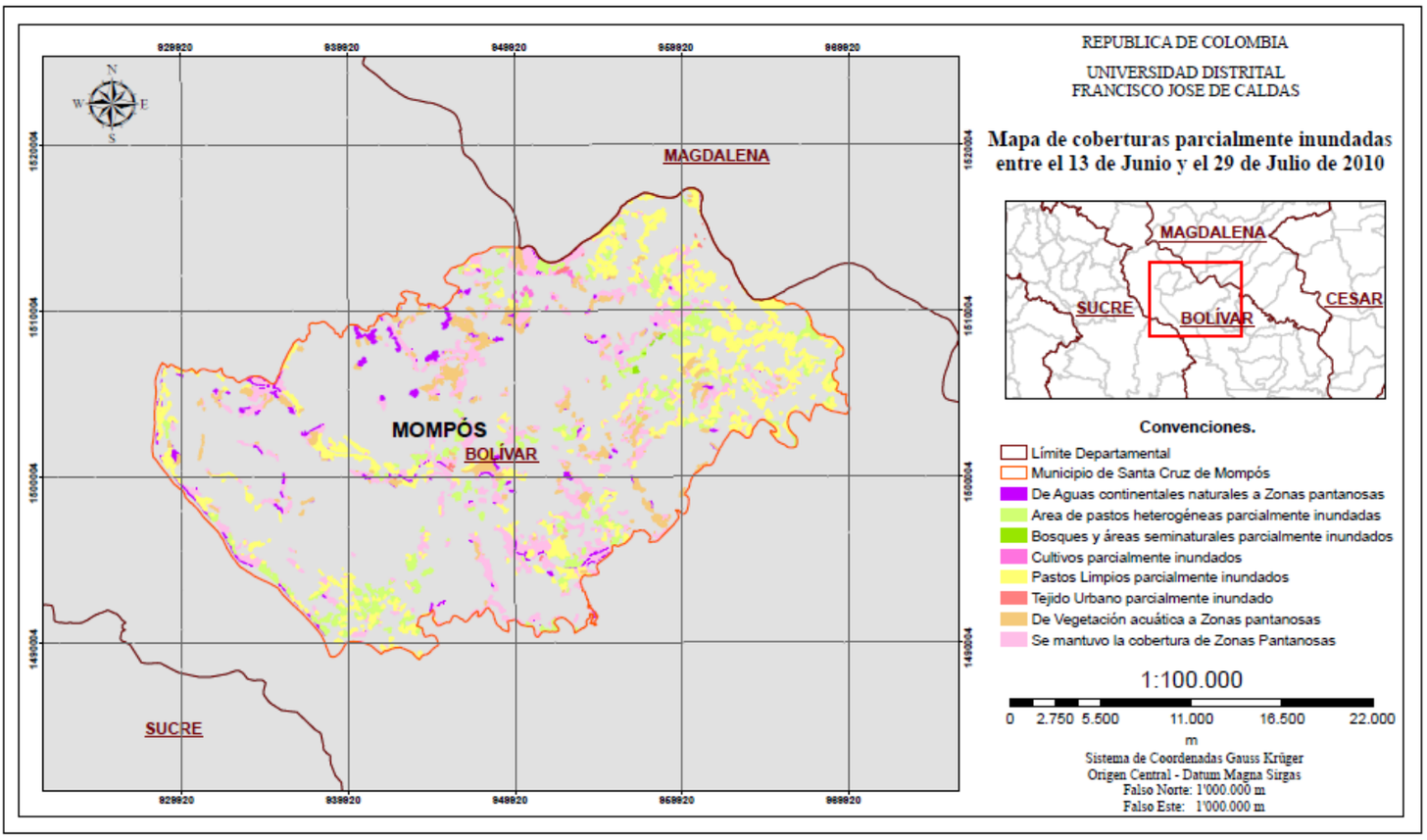


Ilustración 17. Mapa de coberturas parcialmente inundadas entre el 13 de junio y el 29 de julio de 2010.
Fuente: Elaboración Propia.

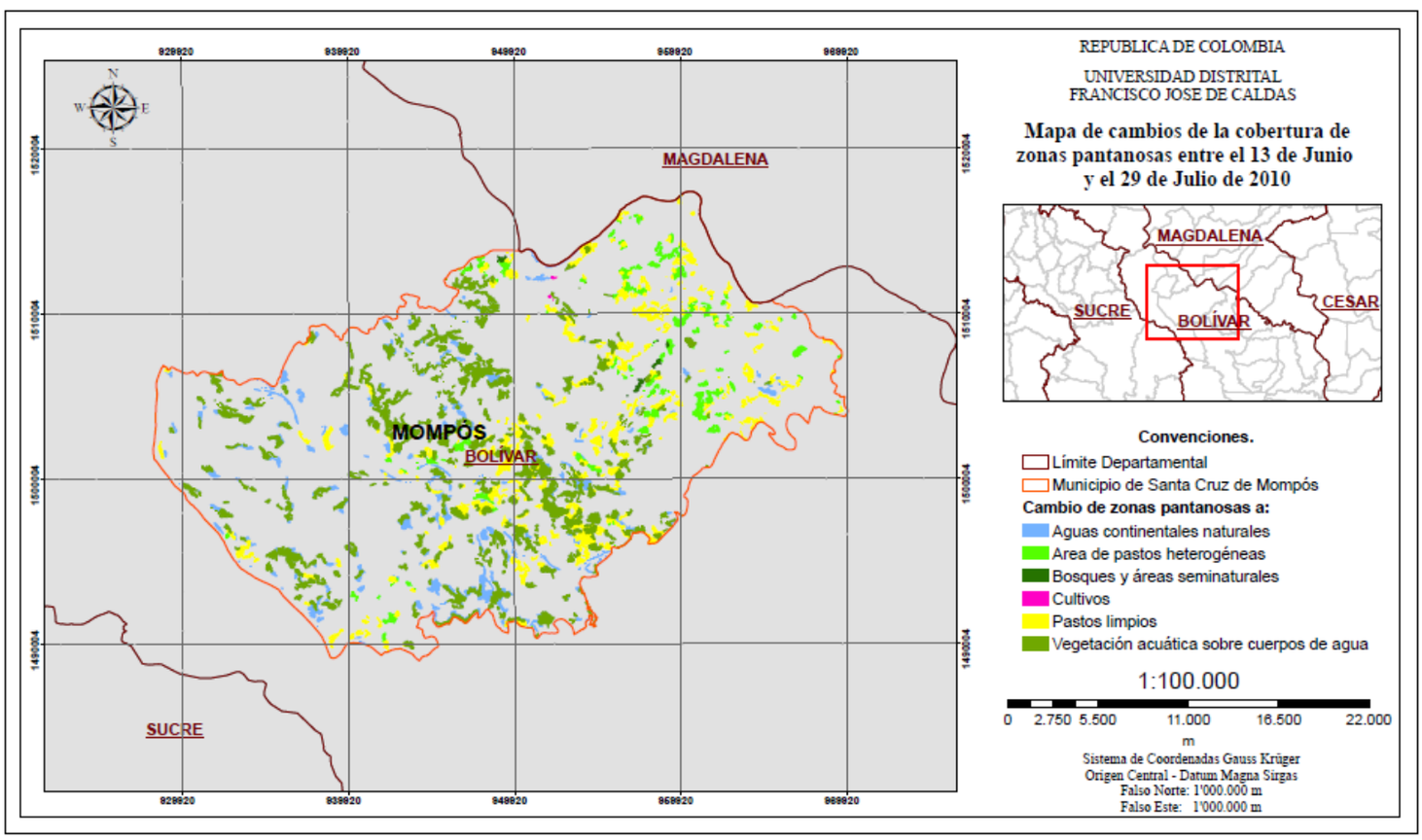


Ilustración 18. Mapa de cambios de la cobertura de zonas pantanosas entre el 13 de junio y el 29 de julio de 2010.
Fuente: Elaboración Propia.

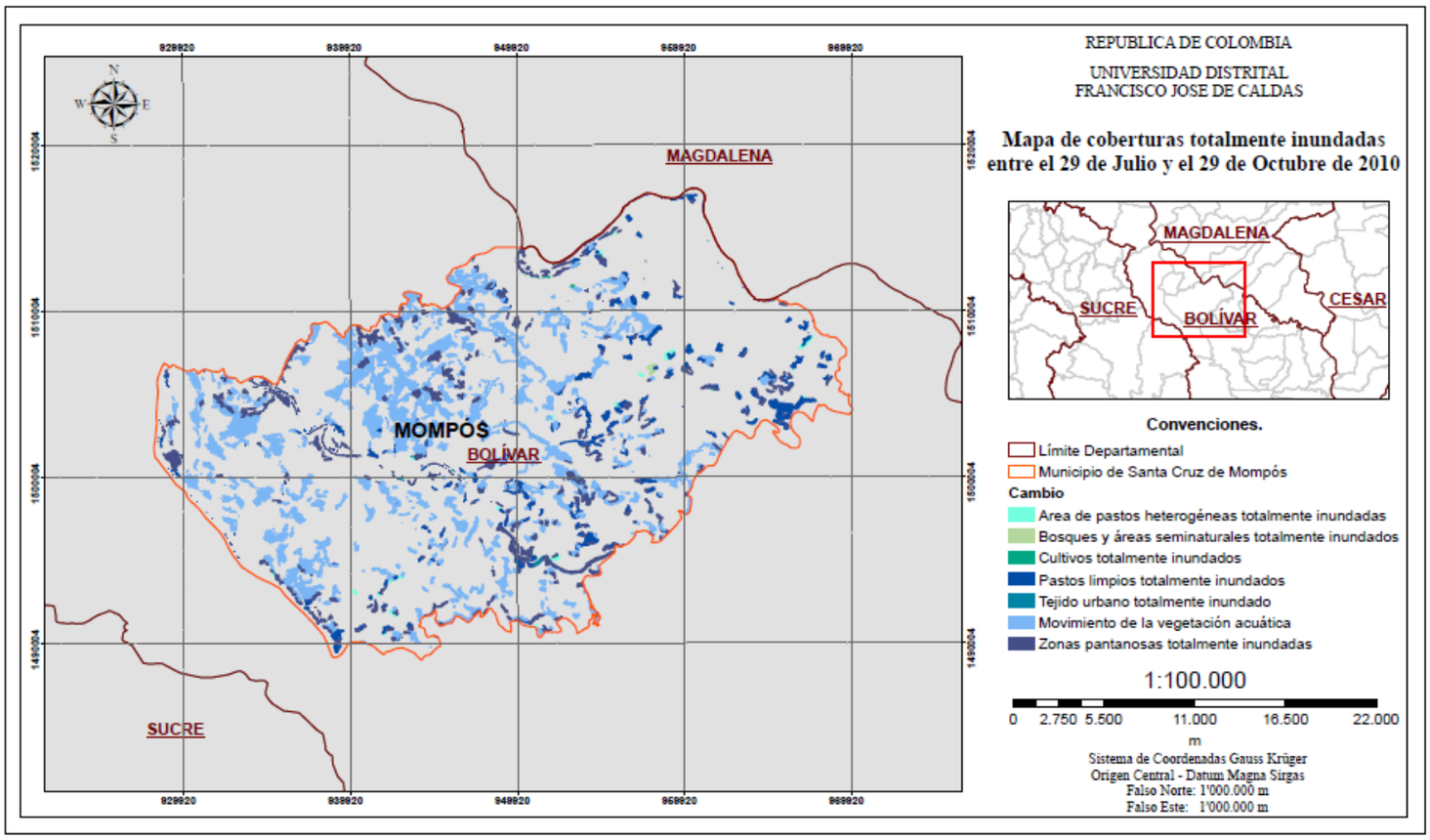


Ilustración 19. Mapa de coberturas totalmente inundadas entre el 29 de julio y el 29 de octubre de 2010.
Fuente: Elaboración Propia.

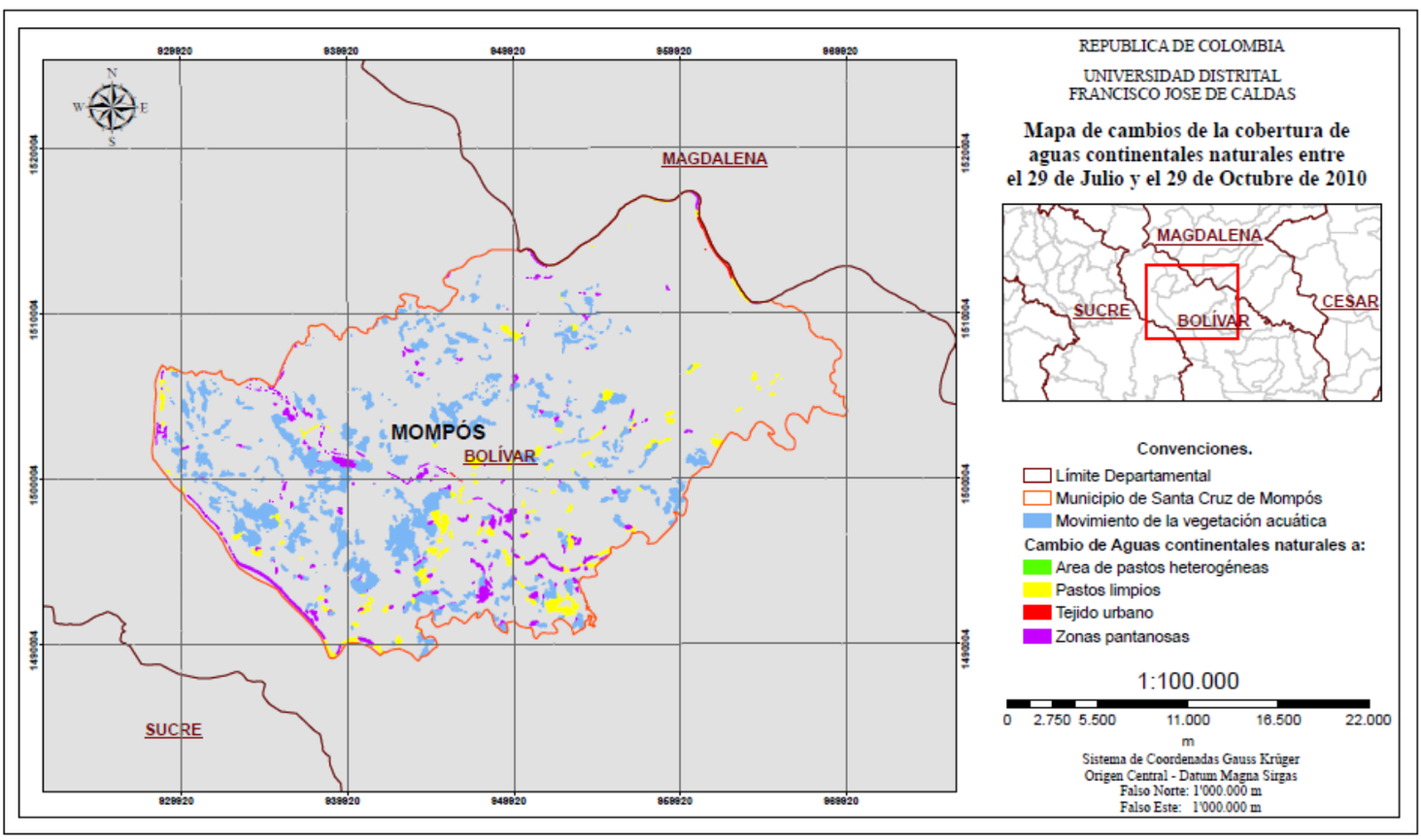


Ilustración 20. Mapa de cambios de la cobertura de aguas continentales naturales entre el 29 de julio y el 29 de octubre de 2010.
Fuente: Elaboración Propia.

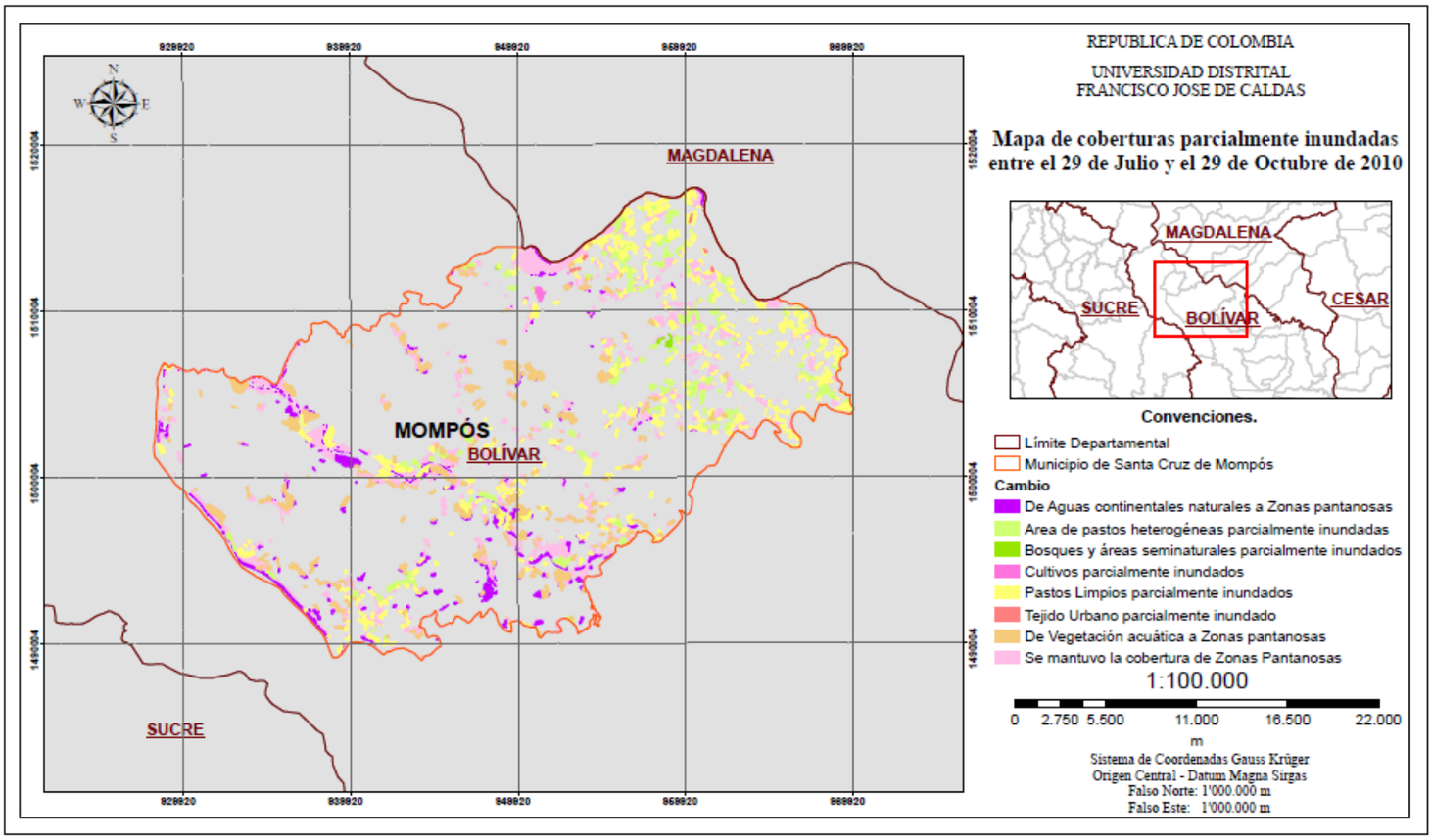


Ilustración 21. Mapa de coberturas parcialmente inundadas entre el 29 de julio y el 29 de octubre de 2010.
Fuente: Elaboración Propia.

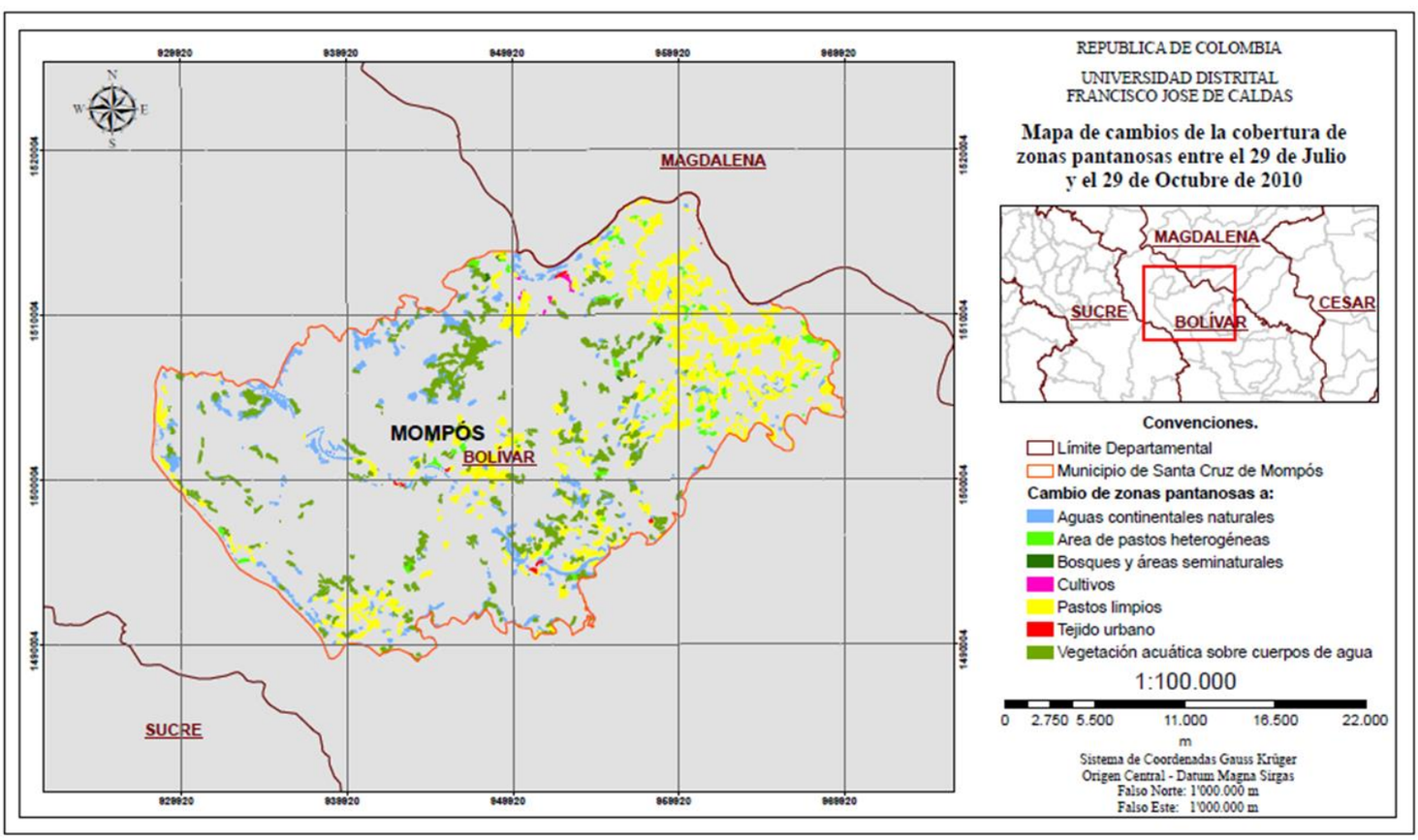


Ilustración 22. Mapa de cambios de la cobertura de zonas pantanosas entre el 29 de julio y el 29 de octubre de 2010.
Fuente: Elaboración Propia.

7.6. Cuantificación de las áreas afectadas por la inundación.

Para el primer periodo de observación que comprende del 13 de Junio al 29 de Julio del año 2010 se obtienen en las tablas 16 y 17 información que cuantifican los cambios producto de la propagación de las aguas de inundación que afectaron totalmente las coberturas presentes en el municipio de Santa Cruz de Mompós, es decir que indican los cambios que produjo el aumento y el retroceso de la cobertura de aguas continentales naturales sobre las demás lo que provoco que estas fueran totalmente inundadas.

Tabla 16. Coberturas afectadas por inundación total entre el 13 de junio y el 29 de julio de 2010.

Coberturas afectadas por inundación total		
Cobertura	**Área afectada (Ha)**	**Participación (%)**
Área de pastos heterogéneas	348,03	8,69
Bosques y áreas seminaturales	0	0
Cultivos	9,43	0,23
Pastos limpios	2587,17	64,62
Tejido urbano	3,93	0,09
Zonas pantanosas	1054,62	26,34
Total	**4003,20**	**100**

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 17. Retroceso de la cobertura de aguas continentales naturales entre el 13 de junio y el 29 de julio de 2010.

Retroceso de la cobertura de aguas continentales naturales		
Cobertura	**Área (Ha)**	**Participación (%)**
Área de pastos heterogéneas	6,12	0,50
Bosques y áreas seminaturales	0	0
Cultivos	6,92	0,57
Pastos limpios	677,66	56,21
Tejido urbano	5,80	0,48
Zonas pantanosas	508,93	42,21
Total	**1205,46**	**100**

Fuente: Elaboración Propia.

De la tabla 16 se puede deducir que las coberturas que durante este periodo sufrieron un mayor impacto por inundación total con respecto a las demás son la de pastos limpios, zonas pantanosas y área de pastos heterogéneas las cuales en conjunto presentan una participación mayor del 99%.

En cuanto al retroceso de la cobertura de aguas continentales naturales, este beneficia a las coberturas de pastos limpios y zonas pantanosas con cerca de 1186.60 ha en conjunto, lo que representa cerca del 98.43%. Por otro lado, la cobertura de bosques y áreas seminaturales no se vio afectada por inundación total ni tampoco percibió un aumento en su área producto del retroceso de las aguas continentales naturales.

Así mismo en las tablas 18, 19 y 20 se exponen las áreas producto de los cambios causados por la propagación de las aguas de inundación que afectaron parcialmente las coberturas, es decir que indica los cambios que produjo el aumento y el repliegue de la cobertura de zonas pantanosas sobre las demás, así como también su permanencia en el tiempo.

Tabla 18. Coberturas afectadas por inundación parcial entre el 13 de junio y el 29 de julio de 2010.

Coberturas afectadas por inundación parcial		
Cobertura	**Área afectada (Ha)**	**Participación (%)**
Área de pastos heterogéneas	1662,59	34,53
Bosques y áreas seminaturales	14,46	0,30
Cultivos	40,64	0,84
Pastos limpios	3078,92	63,94
Tejido urbano	18,24	0,37
Total	**4814,86**	**100**

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 19. Repliegue de la cobertura de zonas pantanosas entre el 13 de Junio y el 29 de Julio de 2010.

Repliegue de la cobertura de zonas pantanosas		
Cobertura	**Área (Ha)**	**Participación (%)**
Área de pastos heterogéneas	838,48	28,46
Bosques y áreas seminaturales	33,33	1,13
Cultivos	3,91	0,13
Pastos limpios	2070,14	70,27
Tejido urbano	0	0
Total	**2945,87**	**100**

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 20. Permanencia de la cobertura de zonas pantanosas entre el 13 de junio y el 29 de julio de 2010.

Sin cambios	
Cobertura	**Área (Ha)**
Zonas pantanosas	4623,55

Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo a la tabla 18, las coberturas que tuvieron una afectación mayor producto de la inundación parcial de sus áreas son la de área de pastos heterogéneas y pastos limpios, a su vez también son aquellas que ganan más área dado a que la cobertura de zonas pantanosas se repliega. Comparativamente las coberturas de bosques y áreas seminaturales, cultivos y tejido urbano presentan un área considerablemente mayor afectada por la inundación parcial que por inundación total, y la cobertura de tejido urbano es la única que no se beneficia en área a causa del repliegue de las zonas pantanosas. Finalmente, se tiene que cerca de 4623,55 ha de zonas pantanosas se mantienen entre los dos puntos temporales siendo esta área muy relevante, pues por si sola es equiparable al área total afectada tanto por inundación total como por inundación parcial sobre las coberturas en el municipio de Santa Cruz de Mompós.

Existen a su vez otros cambios que si bien no son objeto de este estudio, pues no implican la inundación de alguna cobertura, sus áreas si son bastante relevantes comparándolas con las resultantes obtenidas en las tablas de la 16 a la 20, por lo que es pertinentes mostrar sus resultados en la tabla 21 ya que pueden relacionarse con el fenómeno de inundación presente en el municipio en la temporalidad del 13 de Junio al 29 de Julio de 2010.

Tabla 21. Otros cambios presentes entre el 13 de junio y el 29 de julio de 2010.

Otros cambios	Área (Ha)
Movimiento de la vegetación acuática sobre cuerpos de agua	7297,42
De vegetación acuática sobre cuerpos de agua a zonas pantanosas	1093,50
De zonas pantanosas a vegetación acuática sobre cuerpos de agua	3691,68

Fuente: Elaboración Propia.

En la tabla anterior, se muestra la cuantificación de los cambios de aguas continentales naturales a vegetación acuática sobre cuerpos de agua y viceversa denominados como movimiento de la vegetación acuática sobre cuerpos de agua, pues como se estipulo en el proceso de análisis multitemporal dichos cambios se deben a las variaciones de los niveles del agua producto de la

precipitación. Como área total de este movimiento se tienen cerca de 7297.42 ha que en comparación con los totales obtenidos por las coberturas afectadas por inundación total y parcial es mucho mayor, cabe recordar que ambas coberturas tienen una presencia importante en la zona de estudio como se puede ver en la tabla 11. Los otros dos cambios relacionados con la vegetación acuática sobre cuerpos de agua y las zonas pantanosas también pueden deberse al aumento y disminución del nivel del agua que posiblemente generan procesos de anegación y desagüe respectivamente.

Tabla 22. Áreas inundadas del municipio de Santa Cruz de Mompós entre el 13 de junio y el 29 de julio de 2010.

Inundación entre el 13 de Junio y el 29 de Julio de 2010	
Área inundada totalmente (Ha)	2797,73
Área inundada parcialmente (Ha)	6492,55
Área total del municipio inundada (Ha)	**9290,29**
Porcentaje del municipio inundado	**14,24**

Fuente: Elaboración Propia.

Como puede observarse en la tabla 22, el área total del municipio de Santa Cruz de Mompós que fue afectada por el fenómeno natural de inundación entre el 13 de Junio y el 29 de Julio fue de aproximadamente 9290.29 ha que representan cerca del 14.24% del área total del municipio.

Posteriormente, se realiza este mismo análisis pero ahora en la temporalidad del 29 de Julio al 29 de Octubre del año 2010, obteniendo en principio la información que cuantifica los cambios producto de inundación total sobre las coberturas presentes en el municipio debido a la propagación de aguas de inundación que se relacionan directamente con la cobertura de aguas continentales naturales.

Tabla 23. Coberturas afectadas por inundación total entre el 29 de julio y el 29 de octubre de 2010.

Coberturas afectadas por inundación total		
Cobertura	**Área afectada (Ha)**	**Participación (%)**
Área de pastos heterogéneas	93,99	3,10
Bosques y áreas seminaturales	16,30	0,53
Cultivos	4,09	0,13
Pastos limpios	1306,39	43,15
Tejido urbano	17,73	0,58

Zonas pantanosas	1588,64	52,47
Total	**3027,17**	**100**

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 24. Retroceso de la cobertura de aguas continentales naturales entre el 29 de julio y el 29 de octubre de 2010.

Retroceso de la cobertura de aguas continentales naturales		
Cobertura	**Área (Ha)**	**Participación (%)**
Área de pastos heterogéneas	4,37	0,25
Bosques y áreas seminaturales	0	0
Cultivos	0	0
Pastos limpios	905,08	52,86
Tejido urbano	26,35	1,53
Zonas pantanosas	776,39	45,34
Total	**1712,21**	**100**

Fuente: Elaboración Propia.

De forma similar a como ocurrió en la temporalidad anterior, entre el 29 de Julio y el 29 de Octubre de 2010 las coberturas de aérea de pastos heterogéneas, pastos limpios y zonas pantanosas fueron las más afectadas por la inundación total de sus áreas, cabe destacar que para este periodo es la cobertura de zonas pantanosas la más perjudicada con cerca del 52.48% del total de área inundada, además durante estas fechas se vieron damnificadas la totalidad de coberturas. En lo que respecta al retroceso de las aguas continentales naturales son los pastos limpios y las zonas pantanosas las coberturas que aumentan en mayor medida su área, sin embargo los bosques y áreas seminaturales y los cultivos no se benefician de este retroceso. A su vez se infiere que el área total afectada por inundación total disminuye un 24.38% y el área total producto del retroceso de las aguas continentales naturales aumenta en este periodo un 29.59% si se compara con el anterior.

A continuación, en las tablas 25, 26 y 27 se muestran los resultados de la cuantificación del área afectada de las coberturas producto de su inundación parcial relacionada con la propagación de aguas dadas las variaciones de las zonas pantanosas y de su permanencia en el tiempo.

Tabla 25. Coberturas afectadas por inundación parcial entre el 29 de julio y el 29 de octubre de 2010.

Coberturas afectadas por inundación parcial		
Cobertura	**Área afectada (Ha)**	**Participación (%)**
Área de pastos heterogéneas	991,13	34,50
Bosques y áreas seminaturales	20,13	0,70
Cultivos	26,03	0,90
Pastos limpios	1819,29	63,33
Tejido urbano	16,08	0,56
Total	**2872,68**	**100**

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 26. Repliegue de la cobertura de zonas pantanosas entre el 29 de Julio y el 29 de Octubre de 2010.

Repliegue de la cobertura de zonas pantanosas		
Cobertura	**Área (Ha)**	**Participación (%)**
Área de pastos heterogéneas	462,82	11,86
Bosques y áreas seminaturales	27,70	0,71
Cultivos	28,63	0,73
Pastos limpios	3353,58	85,98
Tejido urbano	27,25	0,69
Total	**3900**	**100**

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 27. Permanencia de la cobertura de zonas pantanosas entre el 29 de julio y el 29 de octubre de 2010.

Sin cambios	
Cobertura	**Área (Ha)**
Zonas pantanosas	3622,85

Fuente: Elaboración Propia.

Teniendo en cuenta lo presentado en las tablas 25 y 26, las coberturas de área de pastos heterogéneas y los pastos limpios son las que presentan un mayor dinamismo con las zonas pantanosas, esto quiere decir que son las que mayor cantidad de área afectada por inundación parcial tienen y por ende las que mayor participación poseen en este tipo de inundación, así como también son las que mayor área recuperan debido al repliegue de las zonas pantanosas con cerca de 3816,41 ha en conjunto. De forma similar a como ocurre con la inundación total, en la inundación parcial para el periodo de observación comprendido entre el 29 de Julio y el 29 de

Octubre se presenta una disminución de cerca del 44,33% con respecto a la del periodo de observación anterior mientras que el repliegue de las zonas pantanosas aumenta aproximadamente un 24.46%. Por otro lado el área que permanece constante de la cobertura de zonas pantanosas entre Julio y Octubre disminuyo cerca de un 21.64% en referencia al área percibida en el periodo transcurrido entre Junio y Julio. Dado lo anterior se puede inferir que la intensidad de la ola invernal fue menor en el segundo periodo de observación.

Al igual que en la temporalidad comprendida entre 13 de Junio y el 29 de Julio de 2010, para el segundo periodo de observación se presentan cambios que aunque no son objeto de estudio en este proyecto, sus áreas si son relevantes y pueden relacionarse con el fenómeno natural ocurrido en el municipio, estos cambios pueden denotarse en la tabla 28.

Tabla 28. Otros cambios presentes entre el 29 de julio y el 29 de octubre de 2010.

Otros cambios	Área (Ha)
Movimiento de la vegetación acuática sobre cuerpos de agua	9561,46
De vegetación acuática sobre cuerpos de agua a zonas pantanosas	1374,54
De zonas pantanosas a vegetación acuática sobre cuerpos de agua	2027,07

Fuente: Elaboración Propia.

De la tabla anterior se puede evidenciar el área correspondiente al movimiento de la vegetación acuática sobre cuerpos de agua, con un área aproximada de 9561.458 ha que es más que el triple que el área total obtenida para ambos tipos de inundación durante Julio y Octubre, y que en comparación con el movimiento percibido entre Junio y Julio el cual era de 7297.42 Ha, aumento en un 23.67% lo que indica que hubo una mayor variación o cambios entre las coberturas de aguas continentales naturales y la de vegetación acuática sobre cuerpos de agua posiblemente a una mayor frecuencia de las lluvias en ese periodo de tiempo. Así mismo se tiene que el cambio de vegetación acuática sobre cuerpos de agua a zonas pantanosas aumento aproximadamente un 20.44% con cerca de 281.04 ha en comparación al periodo anterior, mientras que el cambio de zonas pantanosas a vegetación acuática sobre cuerpos de agua disminuyo 1664.61 ha que representan un 45.09%.

Con el fin de concluir el análisis de cuantificación de áreas afectadas por inundación en el municipio de Santa Cruz de Mompós entre el 29 de julio y el 29 de octubre de 2010, se calculó las áreas totales que se vieron afectadas por los dos tipos de inundación.

Tabla 29. Áreas inundadas del municipio de Santa Cruz de Mompós entre el 29 de julio y el 29 de octubre de 2010.

Inundación entre el 29 de Julio y el 29 de Octubre de 2010	
Área inundada totalmente (Ha)	1314,96
Área inundada parcialmente (Ha)	2595,53
Área del municipio inundada (Ha)	**3910,49**
Porcentaje del municipio inundado	**5,99**

Fuente: Elaboración Propia.

El área total del municipio de Santa Cruz de Mompós que fue afectada por el fenómeno de la ola invernal entre el 29 de Julio y el 29 de Octubre de 2010 fue de aproximadamente 3910.49 ha que representan cerca del 5,99% del área total del municipio, esto finalmente indica que durante este intervalo de tiempo la afectación producto de la inundación fue menor que la registrada entre el 17 de Junio al 29 de Julio del mismo año.

Respecto al fenómeno de inundación se establece que el municipio de Santa Cruz de Mompós fue mayormente afectado durante el intervalo comprendido entre el 13 de Junio y el 29 de Julio de 2010 en comparación con la temporalidad del 29 de Julio hasta el 29 de Octubre durante el mismo año, dado a que una mayor cantidad de las áreas de las coberturas presentes en su territorio fueron perjudicadas. Las coberturas de pastos limpios, zonas pantanosas y área de pastos heterogéneas son aquellas que más dinamismo presentan con la de aguas continentales naturales, por ello son objeto de presentar una mayor inundación total y de aumentar sus áreas producto del repliegue de esta última cobertura. Estas interacciones se deben a que espacialmente las coberturas de pastos limpios, zonas pantanosas y en menor medida la de área de pastos heterogéneas son aledañas o cercanas a la de aguas continentales naturales como bien puede observarse en los mapas de coberturas de la tierra obtenidos para las tres fechas estipuladas, por ello un aumento o decremento del nivel del agua genera este tipo de cambios percibidos.

Por otra parte, son las coberturas de pastos limpios y área de pastos heterogéneas las que durante la totalidad del periodo de observación se ven mayormente afectadas por la inundación parcial así como también las que mayor área recuperan dado al repliegue de las zonas pantanosas, esto quiere decir que son más propensas a que en sus áreas aumente y disminuya el nivel del agua sin que las cubra totalmente, lo cual puede deberse a que estas coberturas son contiguas y el movimiento de agua oscila entre sus áreas, por otro lado también se puede deducir que los

terrenos donde estas se ubican son propensos a la retención de agua producto del empozamiento de la misma y este efecto es muy variable en el tiempo. Así mismo cabe destacar que la interacción entre las coberturas de zonas pantanosas y la de área de pastos heterogéneas puede deberse a su vez a que son las que mayor dificultad en su clasificación presentan ya que se mezclan entre ellas tal como se concluyó en la etapa de validación temática.

Las coberturas de bosques y áreas seminaturales, cultivos y tejido urbano al ser aquellas que menor área ocupan en el municipio como consta en la tabla 11, son las que en términos de área menores afectaciones presentan por inundación durante el 13 de junio y el 29 de octubre de 2010. Caso contrario a lo que se percibe de la cobertura de vegetación acuática sobre cuerpos de agua, pues dado a que es la tercera que mayor área representa sobre el municipio sus cambios son bastante relevantes, tal como se puedo evidenciar con su movimiento que se relaciona con las cambios efectuados con la cobertura de aguas continentales naturales el cual en área es mucho mayor a las afectaciones totales por inundación total y parcial en ambos periodos de observación.

8. Conclusiones.

El presente trabajo ofreció insumos conceptuales y teóricos que permiten obtener y utilizar información derivada de las imágenes SAR, como lo es el caso de la información polarimétrica, con el propósito de elaborar clasificaciones supervisadas bajo un enfoque orientado a objetos, empleando a su vez algoritmos de *Machine Learning* como lo es el caso de las máquinas de soporte vectorial, generando buenos resultados en cuanto a la clasificación de coberturas de la tierra y la elaboración de mapas temáticos.

Los resultados obtenidos respecto al proceso de validación temática fueron positivos, pues los estadísticos de exactitud logrados, como lo es el caso del coeficiente Kappa, superaron en gran medida el definido para el desarrollo de este proyecto, evidenciando buenos resultados en la elaboración de los mapas de cobertura de la tierra para las fechas del 13 de Junio, 29 de Julio y 29 de Octubre del año 2010.

Se identificaron 64 cambios entre las coberturas del municipio de Santa Cruz de Mompós durante el periodo de observación, de los cuales 27 se encuentran relacionados con el fenómeno

de inundación producto de la propagación de las aguas de inundación, las cuales corresponden con las coberturas de aguas continentales naturales y zonas pantanosas.

Respecto a la espacialización de las zonas afectadas producto del fenómeno de inundación, estas se identificaron geográficamente para cada una de las diferentes coberturas de la tierra presentes en el municipio en los periodos comprendidos entre el 13 de Junio y el 29 de Julio del 2010 y entre el 29 de Julio y el 29 de Octubre del mismo año, estableciendo así el seguimiento espacial de la propagación de las aguas de inundación que afectaron total o parcialmente dichas coberturas.

Se determinó que las coberturas vegetales como lo son los pastos, la zonas pantanosas y las áreas de pastos heterogéneas fueron las más afectadas por el fenómeno de inundación debido a la ola invernal registrada durante el segundo semestre del año 2010, pues en conjunto sumaron más del 90% de las áreas afectadas durante los dos periodos de observación establecidos y para ambos tipos de inundación, total y parcial.

9. Alcances e impactos.

El uso de la información de los canales de intensidad, así como la información polarimétrica extraída, el uso del enfoque de clasificación supervisada orientada a objetos y la aplicación del algoritmo de máquinas de soporte vectorial permiten generan mapas de cobertura de la tierra con muy buenos resultados a pesar de las limitaciones con las que cuentan las imágenes tomadas por sistemas SAR ante este tipo de aplicaciones, pues comparativamente son menos eficientes que las imágenes tomadas con sensores pasivos, por ello se destaca la capacidad de utilizar las imágenes SAR como insumo base con la finalidad de elaborar mapas de uso y cobertura de la tierra, así como de realizar seguimiento a diferentes tipos de cambios de coberturas producidos por fenómenos naturales o acciones antrópicas, empleando el flujo metodológico desarrollado para este proyecto en áreas y temporalidades diferentes a las planteadas en el mismo, donde por la presencia de condiciones atmosféricas adversas los sensores pasivos no son capaces de obtener información.

10.Recomendaciones.

Como se desarrolló teóricamente, las imágenes SAR que cuentan con las cuatro polarizaciones lineales o Quad Pol proveen una mayor cantidad de información polarimétrica referente a las características de la dispersión de la señal de radar con los objetos, por ello pueden obtenerse a través de las descomposiciones polarimétricas coherentes o incoherentes un mayor número de parámetros o capas de información que pueden ser útiles para robustecer aún más el espacio de características con la finalidad de elaborar clasificaciones temáticas, tal como se pudo identificar en el apartado de antecedentes, por lo tanto se recomienda aplicar el flujo metodológico estipulado en este proyecto empleando imágenes SAR Quad Pol y obteniendo información polarimétrica de diferentes enfoques.

En relación con la idea anterior, también puede utilizarse información derivada de las técnicas de descomposición polarimétrica coherente para el mapeo de coberturas de la tierra en áreas naturales, con la finalidad de que esta información sea empleada para la identificación y discriminación de las coberturas urbanas o antrópicas, lo anterior con el objeto de poder comparar resultados en cuanto a la identificación de estas coberturas, por ejemplo con el algoritmo de textura de divergencia de speckle, para determinar si es posible eliminar o disminuir la edición manual que debe realizarse en el proceso de clasificación supervisada para identificar las zonas urbanas.

Además se propone utilizar la metodología planteada en este proyecto, pero aplicada a diferentes tipos de cambios de cobertura, como por ejemplo lo puede ser los procesos de deforestación y reforestación, o de crecimiento de las zonas urbanas, empleando no solo información polarimétrica, sino también textural, siempre que las imágenes SAR lo permitan de acuerdo a su nivel de procesamiento.

Si se desea mantener la metodología y el enfoque propuesto de este proyecto para el análisis de inundaciones, se propone entonces utilizar imágenes tomadas por diferentes sistemas SAR con parámetros distintos (longitud de onda, ángulos de incidencia, polarizaciones) a los aquí trabajados, con la finalidad de comparar los resultados obtenidos y establecer las ventajas o desventajas de utilizar las imágenes de un sistema u otro para este tipo de análisis.

11.Bibliografía.

Alberga, V. (2007). A study of land cover classification using polarimetric SAR parameters. *International Journal of Remote Sensing, 28*(17), 3851-3870.

Alcaldia Municipal de Santa Cruz de Mompox. (30 de Mayo de 2008). *Centro de Documentación e Información Municipal.* Obtenido de http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/mompos%20-%20bolivar%20pd%202008%20-%202011.pdf

Ali Zeeshan, M., Qazi, W., & Aslam, N. (2018). A comparative study of ALOS-2 PALSAR and landsat-8 imagery for land cover classification using maximum likelihood classifier. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 1-7.

Applied Remote Sensing Training. (2017). *ARSET.* Obtenido de https://arset.gsfc.nasa.gov/disasters/webinars/intro-SAR

Ardila, J. P., Espejo, O. J., & Herrera, J. L. (2005). Validación de una Metodologia de Clasificacion de Imagenes Satelitales en un entorno Orientado a Objetos. *Ingeniería*, 61-69.

Bellmonte, L., & Caamaño , S. (Septiembre de 2009). Una aplicación basada en imágenes SAR para el monitoreo y prevención de inundaciones en Argentina. Córdoba, Argentina.

Boerner, W. M. (2019). *CiteSeerX.* Recuperado el 01 de Junio de 2019, de http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.452.8390&rep=rep1&type=pdf

Casco Verna, G., Arias del Puerto, L., Mareco Castellano, H., & Kindgard, A. (Mayo de 2016). *Instituto Forestal Nacional Paraguayo.* Recuperado el 02 de Junio de 2019, de http://www.infona.gov.py/application/files/6514/7405/3096/Evaluacion_exactitud_Mapas_000511_160516.pdf

Cormagdalena. (2001). *IDEAM.* Obtenido de http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/000051/EstudioAmbientalCMagdalena-Cauca.pdf

Cormagdalena. (2009). *Cormagdalena.* Obtenido de https://wiki.ead.pucv.cl/images/1/1b/Atlas_cuenca_del_rio_magdalena_version_final.pdf

Costa, M., Telmer, K., Silva, T., & Evans, T. (2010). Using ALOS/PALSAR and RADARSAT 2 to map land cover and seasonal inundation in the Brazilian Pantanal. *IEEE Journal of selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 560-575.

D' Addabbo, A., Refice, A., Pasquariello, G., Lovergine., F., & Manfreda, S. (2016). Following Flood Dynamics by SAR/Optical Data Fusion. *IEEE*.

De la Hoz, J. V. (Julio de 2011). *Banco de la República de Colombia*. Obtenido de http://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/DTSER-148.pdf

Divisão de Processamento de Imagens. (2019). *DPI*. Obtenido de http://www.dpi.inpe.br/spring/teoria/radar/radareng.htm

Domènech Olivié, J. (2015). H-α decomposition and unsupervised Wishart classification for dual-polarized polarimetric SAR data. Barcelona: Universitat Autònoma de Barcelona. Recuperado el 2019 de Junio de 13, de https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2015/hdl_2072_252351/TFM_JoanDomenechOlivie_part01.pdf

E. Szabo, F. (2015). *Science Direct*. Recuperado el 12 de Junio de 2019, de https://www.sciencedirect.com/topics/mathematics/hermitian-matrix

El Espectador. (2010). El peor invierno en la historia de Colombia. El Espectador.

Eliot, L. (19 de Enero de 2018). *Aitrends*. Obtenido de https://aitrends.com/ai-insider/support-vector-machines-svm-ai-self-driving-cars/

Esch, T., Dech, S., Roth, A., Schmidt, M., Taubenböck, H., Heldens, W., . . . Klein, D. (2009). Monitoring and assessment of urban environments using space-borne earth observation data. *Urban and Regional Data Management*, 385-398.

Esmaeilzade, M., Jahani, F., & Amini, J. (2017). Using covariance matrix for change detection of polarimetric SAR data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII*, 69-76.

Espejo Valero, O. (Junio de 2016). Desarrollo de una metodología para estimación de deforestación mediante análisis multitemporal de imágenes multiespectrales en un entorno de análisis basado en objetos geográficos (GEOBIA). Bogota, Colombia.

ESRI. (23 de Julio de 2019). *Desktop Arcgis*. Obtenido de http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/extensions/spatial-analyst/performing-analysis/the-types-of-operations-in-spatial-analyst.htm

European Space Agency. (24 de Julio de 2014a). *Earth ESA*. Recuperado el 24 de Mayo de 2019, de https://earth.esa.int/handbooks/asar/CNTR5-2.html#eph.asar.gloss.radsar:RADAR

European Space Agency. (24 de Julio de 2014b). *Earth ESA*. Recuperado el 26 de Mayo de 2019, de https://earth.esa.int/handbooks/asar/CNTR5-5.html#eph.asar.gloss.geo:INCIDENCE

European Space Agency. (2019). *Earth ESA*. Recuperado el 01 de Junio de 2019, de https://earth.esa.int/documents/653194/656796/Polarimetric_Decompositions.pdf

Evans, T. L., & Costa, M. (2012). Landcover classification of the lower Nhecoländia subregion of the Brazilian Pantanal Wetlands using ALOS/PALSAR, RADARSAT 2 and ENVISAT/ASAR imagery. *Remote Sensing of Environment*, 118-137.

Fernández Coppel, I. (2016). *Analisis visual de imágenes obtenidas del sensor ETM+ del satelite Landsat.* Valladolid: Universidad de Valladolid.

Fernández Ordóñez, Y. M., Escalona Maurice, M. J., & Valdez Lazalde, J. R. (2015). *Research Gate.* Recuperado el 25 de Mayo de 2019, de https://www.researchgate.net/publication/301247047_Imagenes_SAR_y_Conceptos_Basicos_de_Polarimetria

Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., & Rocca, F. (Febrero de 2007). *European Space Agency.* Recuperado el 24 de Mayo de 2019, de https://www.esa.int/esapub/tm/tm19/TM-19_ptA.pdf

Franco Ossa, L. V. (23 de Noviembre de 2009). *Universidad Nacional de Colombia.* Obtenido de http://www.bdigital.unal.edu.co/27510/1/25367-89223-1-PB.pdf

Fricker, H. A. (s.f.). *Topex*. Recuperado el 26 de Mayo de 2019, de https://topex.ucsd.edu/rs/Lec07.pdf

Gagnon, L., & Jouan, A. (s.f.). Speckle Filtering of SAR images - A comparative study between Complex-Wavelet-Based and Standard Filters. Quebec, Canada.

García Lozano, L. C. (Noviembre de 2001). *Neotropicos.* Obtenido de http://www.neotropicos.org/Informes/Sintesis_Momposina_070102.pdf

Garcia, R., Gonzáles, C., De la Vega, R., Valverde, A., & Sebem, E. (2003). Análisis del comportamiento de filtros de reducción de Speckle en imágenes ERS2-SAR. *X Congreso de Teledetección.* Cáceres, España.

GISGeography. (30 de Junio de 2019). *GIS Geography*. Recuperado el 15 de Julio de 2019, de https://gisgeography.com/image-classification-techniques-remote-sensing/

Humboldt State University. (2015). Recuperado el 15 de Febrero de 2018, de http://gsp.humboldt.edu/olm_2015/Courses/GSP_216_Online/lesson6-1/object.html

IDEAM. (s.f.). *Análisis del impacto del Fenómeno "La Niña" 2010-2011 en la Hidroclimatología del País.* Bogotá D.C.: IDEAM.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2017). *Guía metodológica para la elaboración de mapas de inundación.* Bogotá D.C.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2019). *IDEAM*. Recuperado el 02 de Mayo de 2019, de http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/coberturas-nacionales

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2010). *Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia escala 1:100.000.* Bogotá D.C.

Jabba, A. S. (2014). *Análisis de la respuesta del Estado colombiano frente al Fenómeno de La Niña 2010-2011: El caso de Santa Lucía.* Cartagena: Banco de la República.

Juan, X., Zhen, L., Bangsen, T., & Zili, S. (2012). Land Cover Classification of Polarimetric SAR Images for the Yellow River Delta Based on Support Vector Machine. *IEEE*, 256-261.

Karszenbaum, H., & Barrazza, V. (07 de Junio de 2019). *Instituto de Astronomia y Fisica del Espacio (IAFE).* Recuperado el 24 de Mayo de 2019, de http://files.especializacion-tig.webnode.com/200000033-14b7315b3e/6.-Radar.pdf

Klran, D., & L, A. (2016). Eigen Value and Eigen Vector Based Decomposition and Wishart Supervised Classification on Fully Polarimetric SAR Data. *Indian Journal of Science and Technology, 9*(51), 1-6.

Kourgli, A., Ouarzeddine, M., Oukil, Y., & Belhadj-Aissa, A. (2010). Land Cover Identification Using Polarimetric SAR Images. *ISPRS, 38*, 106-111.

Lary, D. J., Alavi, A. H., Gandomi, A. H., & Walker , A. L. (2015). Machine learning in geosciences and remote sensing. *Geoscience Frontiers*, 3-10.

Longepé, N., Rakwatin, P., Isoguchi, O., Shimada, M., & Uryu, Y. (2010). On the use of support vector machines for land cover analysis with L-Band SAR data. *IGARSS.*

Lönnqvist, A., Rauste, Y., Molinier, M., & Häme, T. (2010). Polarimetric SAR Data in Land Cover Mapping in Boreal Zone. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 3652 - 3662.

Luo, Y., Zhao, S., Zhou, H., Wang, A., He, K., & Tan, L. (2012). A novel classification method based on texture analysis using high resolution SAR and optical data. *Second International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications* (págs. 1 - 5). Nanjing: Nanjing University.

Marcus, M., & Minc, H. (1988). *Introduction to Linear Algebra.* New York.

Mason, D. C., Davenport, I. J., Neal, J. C., Schumann, G., & Bates, P. D. (2012). Near Real Time Flood Detection in Urban and Rural Areas Using High-Resolution Synthetic

Aperture Radar Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 3041-3052.

Matoma Cardona, J. M., & Cañas Torres, J. A. (2017). *Interpretación de coberturas de la tierra y análisis multitemporal para el área de compensación ambiental del proyecto hidroeléctrico de El Quimbo.* Recuperado el 12 de Julio de 2019, de file:///C:/Users/user/Downloads/MatomaCardonaJefersonMauricio2017.pdf

Meenakshi, A. V., & Punitham, v. (2011). Performance of speckle noise reduction filters on Active Radar and SAR images. *International Journal of Technology And Engineering System*, 111-114.

Mishra, B., & Susaki, J. (2012). Generation of Pseudo-fully Polarimetric Data from Dual Polarimetric Data for Land Cover Classification. *IEEE*, 262-267.

OCHA Colombia. (11 de Noviembre de 2010). *Pan American Health Organization.* Obtenido de https://www.paho.org/disasters/index.php?option=com_docman&view=download&category_slug=colombia&alias=1630-informe-ocha-colombia-ola-invernal&Itemid=1179&lang=en

Organización Colparques. (03 de Diciembre de 2018). *Colparques*. Recuperado el 24 de 03 de 2019, de http://www.colparques.net/MOMPOX

Palomino, N. L., & Concha, U. R. (2009). Técnicas de Segmentación en Procesamiento Digital de Imagenes. Lima.

Parra Plazas, J. A. (26 de Octubre de 2017). Modelo para predicción de inundaciones mediante el uso de datos abiertos y técnicas de inteligencia computacional. Bogotá, Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Patel, S. (3 de Mayo de 2017). *Medium*. Obtenido de https://medium.com/machine-learning-101/chapter-2-svm-support-vector-machine-theory-f0812effc72

PCI Geomatics. (2017). *PCI Geomatics.* Recuperado el 16 de 05 de 2019, de http://www.pcigeomatics.com/pdf/geomatica/techspecs/2017/Object-Analyst.pdf

PCI Geomatics. (2018). *PCI Geomatics.* Recuperado el 31 de Mayo de 2019, de http://www.pcigeomatics.com/pdf/training-guides/TrainingGuide-SAR-processing-with-Geomatica.pdf

PCI Geomatics. (s.f.). *PCI Geomatics*. Recuperado el 28 de 05 de 2019, de http://www.pcigeomatics.com/geomatica-help/tasks/focus_t/oa_segmntn_proc.html

Pérez Vega, C. (Julio de 2010). *Universidad de Cantabria*. Recuperado el 24 de Mayo de 2019, de https://personales.unican.es/perezvr/pdf/Introduccion%20al%20Radar.pdf

Pinto Leal, A. (2006). Segmentación de Imágenes por Textura. 1 - 19.

Portillo, L. (13 de Diciembre de 2011). *Historia de los pueblos*. Recuperado el 24 de Marzo de 2019, de https://www.historiacultural.com/2011/12/cultura-zenu-sinu.html?m=1

Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., Papathanassiou, K., & Moreira, A. (2013). A tutorial on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Microwaves and Radar Institute of the German Aerospace Center.

Presutti, M. (2004). La matriz de co-ocurrencia en la clasificación multiespectral: Tutorial para la enseñanza de medidas texturales en cursos de grado universitario. *4ª Jornada de Educação em Sensoriamento Remoto no Âmbito do Mercosul*, (págs. 1 - 9). São Leopoldo.

Rahman, M. R. (2006). Flood Inundation Mapping and Damage Assessment Using Multi-temporal Radarsat and IRS 1C LISS III Image. *Asian Journal of Geoinformatics.*, 1-11.

Rahman, M. R., & Thakur, P. K. (2017). Detecting, mapping and analysing of flood water propagation using synthetic aperture radar (SAR) satellite data and GIS: A case of study from the Kendrapa District of Orissa State of India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences.*, 1-5.

Rios Diaz, J., Martinez Payá , J., & del Baño Aledo, M. (2009). *El analisis textural mediante matrices de co-ocurrencia (GLCM) sobre imágen ecográfica del tendón rotuliano es de utilidad para la detección de cambios histológicos tras un entrenamiento con plataforma de vibración.* Murcia: Universidad Católica San Antonio de Murcia.

Salazar Duarte, L. V., & Ruiz Morales, T. L. (2017). Determinación de posibles zonas en amenaza por inundación en el municipio de Mompós-Bolívar, mediante el uso de procesamiento digital de imágenes y herramientas SIG y su posterior publicación como datos abiertos (Open Data). Bogotá D.C.: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Sui, H. G., & Xu, C. (2012). Automatic Extraction of Water in High Resolution SAR Images Based on Multi-Scale Level Set Method and OTSU Algorithm. *International Archieves of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*.

Tesis Doctorales en Red. (s.f.). *Tesis Doctorales en Red.* Obtenido de https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6380/2_3_Satelites_con_SAR.pdf?sequence=10&isAllowed=y

Turkar, V., & Rao, Y. (2011). Applying Coherent and Incoherent Target Decomposition Techniques to Polarimetric SAR data. *International Conference on Technology Systems and Management.* Mumbai.

UNICROM. (26 de Noviembre de 2018). *UNICROM*. Recuperado el 29 de Mayo de 2019, de https://unicrom.com/constante-dielectrica/

Universidad de Columbia. (s.f.). *Columbia*. Recuperado el 25 de Mayo de 2019, de http://www.columbia.edu/~vjd1/electromag_spectrum.htm

Universidad de Murcia. (07 de Agosto de 2019). *Universidad de Murcia*. Obtenido de https: //www.um.es/temario_5

Vasile, G. (s.f.). *Grenoble Images Parole Signal Automatique (GIPSA).* Recuperado el 31 de Mayo de 2019, de http://www.gipsa-lab.fr/~gabriel.vasile/Cours/cours_SAR_part3.pdf

Vasile, G., & Besic, N. (24 de Junio de 2013). *Research Gate.* Recuperado el 25 de Mayo de 2019, de https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:hDpmgS0NSQoJ:https://www.researchgate.net/profile/Mohamed_Mourad_Lafifi/post/How_to_generate_a_Coherency_matrix_in_SAR_Polarimetry/attachment/59d648ac79197b80779a353d/AS%253A467837111279619%25401488552

Veci, L. (2016). *Science Toolbox Exploitation Platform - ESA*. Recuperado el 11 de Junio de 2019, de http://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20Polarimetry%20Tutorial.pdf

Velazco Capacho, D. A. (2016). *Radio enlaces, propagación de ondas electromagnéticas.* Recuperado el 26 de Mayo de 2019, de https://slideplayer.es/slide/12878041/

Veljanovski, T., Lamovec, P., Pehani, P., & Oštir, K. (2011). Comparison of three techniques for detection of flooded areas on Envisat and Radarsat-2 satellite images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*.

Wang, S., & Sun, Z. C. (2017). Extracting built-up areas from TerraSAR-X data using object-oriented classification method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.*

Wicaksono Santoso, A., Bayuaji, L., Tien Sze, L., Lateh, H., & Mohamad Zain, J. (2016). Comparison of various Speckle Noise Reduction Filters on Synthetic Aperture Radar Image. *International Journal of Applied Engineering Research*, 8760 - 8767.

Younggi, B., Youkyung, H., & Taebyeong, C. (2015). Image Fusion-Based Change Detection for Flood Extent Extraction Using Bi-Temporal Very High Resolution Satellite Images. *Remote Sensing*, 10347-10363.

Youngjoo, K., Shrestha, B. B., Yorozuya, A., & Sawano , H. (2015). Rapid Damage Assessment of Rice Crop After Large-Scale Flood in the Cambodian Floodplain Using Temporal Spatial Data. *IEEE Journal of Selected Topics in applied Earth Observations And Remote Sensing*, 3700-3709.

Zerrouki, N., & Bouchaffra, D. (2014). Pixel Based or Object Based Which Approach is More Appropiate for Remote Sensing Image Classification? *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics.* San Diego, USA.

12. Anexos.