



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA SUPERFICIE DEL COMPLEJO CENAGOSO DEL BAJO SINÚ PARA LAS TEMPORADAS ESTACIONALES DEL AÑO 2021 A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES PLANETSCOPE



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"



FABIÁN ENRIQUE PAYARES NARVÁEZ

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
MONTERÍA – CÓRDOBA**

2023



Certificado GP 134-1



Certificado SC 5278-1



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA SUPERFICIE DEL COMPLEJO CENAGOSO DEL BAJO SINÚ PARA LAS TEMPORADAS ESTACIONALES DEL AÑO 2021 A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES PLANETSCOPE



FABIÁN ENRIQUE PAYARES NARVÁEZ

*Trabajo de grado presentado, en la modalidad de proyecto de Investigación y/o
Extensión, como parte de los requisitos para optar al Título de Ingeniero Ambiental.*

Director (es):

DIRECTORA: Ph.D. DORIS MEJÍA ÁVILA

CO – DIRECTORA: M.Sc. ZORAYA MARTÍNEZ LARA

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
MONTERÍA – CÓRDOBA**

2023



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



La responsabilidad ética, legal y científica, de las ideas, conceptos, y resultados del proyecto de investigación, serán responsabilidad de los autores.

Artículo 59, Acuerdo N° 022 del 21 de febrero de 2018 del Consejo Superior.

Tener en cuenta los Artículos y directrices establecidos la Resolución 1775, del 21 de agosto de 2019. En donde se establecen las directrices y las políticas de funcionamiento del repositorio institucional de la Universidad de Córdoba (Artículos tercero, octavo, once, entre otros).

“11 – BUENA FE: La universidad considera que la producción intelectual que, los profesores, funcionarios administrativos y estudiantes le presenten, es realizada por éstos, y que no han transgredido los derechos de otras personas. En consecuencia la aceptará, protegerá, publicará y explotará, según corresponda y lo considere pertinente”. Artículo 1, Acuerdo N° 045 del 25 de mayo de 2018 del Consejo Superior.



Certificado GP 134-1



Certificado SC 5278-1



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

Nota de aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado



Certificado GP 134-1



Certificado SC 5278-1



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



A mis padres Fabio Payares y Sandra Narvaez por su sacrificio y apoyo constante, indispensable en toda esta etapa de formación académica

También quiero dedicar este trabajo de grado a mis segundos padres Edilma Narvaez y Alberto Mendoza por su cariño y apoyo incondicional



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



Agradecimientos especiales a:

A mi directora de trabajo de grado, Doris Mejía Ávila por haberme guiado en la elaboración de este proyecto, sus consejos, recomendaciones y su firme compromiso hicieron realidad el poder finalizar esta etapa académica.

Agradecimientos:

A mis familiares quienes siempre han apostado por mí, brindándome su apoyo incondicional, su infinito cariño y sus consejos, sin duda han sido fundamentales en esta etapa de mi vida.

Por último, quiero agradecer a mis amigos y compañeros de estudio, por su amistad y apoyo durante este proceso, con los que compartí momentos difíciles y buenas experiencias en estos años de crecimiento profesional.



Certificado GP 134-1



Certificado SC 5278-1



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2010, vigencia: 4 años

"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	10
ABSTRACT	11
1. INTRODUCCIÓN.....	12
2. OBJETIVOS.....	14
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	15
4. ESTADO DEL ARTE	28
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	31
6. RESULTADOS Y DISCUSIONES	41
7. CONCLUSIONES.....	60
8. RECOMENDACIONES	61
9. BIBLIOGRAFÍA.....	63
ANEXOS	69



Certificado GP 134-1



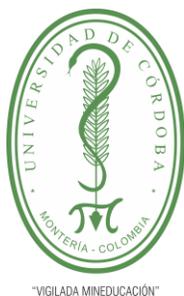
Certificado SC 5278-1



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación generalizada de humedales continentales y marinos y costeros.....	15
Tabla 2. Tipos de instrumentos PlanetScope.....	25
Tabla 3. Imágenes seleccionadas para la época seca del CCBS.....	43
Tabla 4. Imágenes seleccionadas para la época lluviosa del CCBS.....	44
Tabla 5. Ecuaciones índices espectrales.....	48
Tabla 6. Rangos espectrales de las coberturas de análisis para índice.....	49

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Alternativas para el diseño de la ruta de la variante al centro poblado de Lorica.....	18
Figura 2. Espectro electromagnético.....	20
Figura 3. Firmas espectrales de algunas coberturas.....	21
Figura 4. Elementos de un sistema de teledetección.....	22
Figura 5. Tipos de teledetección.....	23
Figura 6. Localización geográfica del complejo cenagoso del bajo Sinú.....	32
Figura 7. Diseño Metodológico por objetivos.....	34
Figura 8. Ubicación estaciones meteorológicas asociadas al CCBS.....	36
Figura 9. Polígonos de Thiessen.....	41
Figura 10. Conversión a valores de reflectancia.....	44
Figura 11. Coberturas del complejo cenagoso del bajo Sinú.....	45
Figura 12. Visualización de zonas de vegetación acuática sumergida mediante combinaciones de bandas y su comparación con la imagen en color verdadero.....	46



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



Figura 13. Cartografía asociada al CCBS para su época de lluvias.	55
Figura 14. Cartografía asociada al CCBS para su época seca.	56
Figura 15. Cuerpos de agua del CCBS para sus épocas estacionales.....	58

LISTADO DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Rangos espectrales para los diferentes sensores de Planet.....	27
Gráfico 2. Precipitaciones mensuales para el complejo cenagoso del bajo Sinú.....	42
Gráfico 3. Firmas espectrales coberturas del suelo CCSB.	47
Gráfico 4. Rangos espectrales para las coberturas del CCBS mediante ENDVI.....	50
Gráfico 5. Rangos espectrales para las coberturas del CCBS mediante GNDVI.	51
Gráfico 6. Rangos espectrales para las coberturas del CCBS mediante NDAVI.	51
Gráfico 7. Rangos espectrales para las coberturas del CCBS mediante NDVI.	52
Gráfico 8. Rangos espectrales para las coberturas del CCBS mediante WAVI.	53
Gráfico 9. Áreas de las coberturas de análisis del CCBS para sus épocas estacionales.....	57
Gráfico 10. Área de los cuerpos de aguas del CCBS para sus épocas estacionales.....	58



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



RESUMEN

La degradación de los humedales impacta en los servicios ecosistémicos que prestan, especialmente en la capacidad de regulación hídrica y control de inundaciones, la cual es considerada por Ricaurte, y otros (2017) como uno de los servicios más importantes brindados por estos ecosistemas. A raíz de esta problemática, se han adelantado estudios en los ya mencionados ecosistemas, para conocer la ubicación de los humedales y apoyar las políticas de ordenamiento territorial y prevención de desastres en los departamentos y municipios del País (Patiño, 2016). En consecuencia a la degradación que sufren estos ecosistemas en Colombia y la falta de un inventario actualizado y preciso, diversos autores están de acuerdo en que la delimitación a escala precisa y detallada de los humedales es una herramienta fundamental y necesaria para establecer estrategias de preservación, protección y conservación de sus servicios ecosistémicos; en especial para la preservación de sus condiciones de regulación hídrica (Baker, C. y otros, 2006), (Brena, Castillo, y Wagner, 2016), (Patiño, 2016). Por lo anterior, el objetivo general de este trabajo es conocer la variación espacial del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú durante sus periodos estacionales para el año 2021. La metodología emplea imágenes satelitales PlanetScope a través de índices espectrales, con la finalidad de establecer una categorización de los rangos espectrales de las diferentes coberturas de análisis presentes en el complejo cenagoso del bajo Sinú y de esta forma, lograr verificar la capacidad de individualización de dichas clases de estudio. En respuesta a la metodología utilizada y los resultados conseguidos, se pudo generar una cartografía de las diferentes coberturas asociadas al CCBS a un nivel de detalle superior al que habitualmente se ha venido trabajando (1:10 000) al igual que el cálculo de las áreas totales de los humedales correspondientes al complejo incluyendo sus coberturas de vegetación acuática flotante.

Palabras Clave: CCBS, Humedales, SIG, PlanetScope, Separabilidad espectral



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



ABSTRACT

The degradation of wetlands impacts the ecosystem services they provide, especially the capacity for water regulation and flood control, which is considered by Ricaurte, et al. (2017) as one of the most important services provided by these ecosystems. As a result of this problem, studies have been carried out in the aforementioned ecosystems, in order to know the location of wetlands and support land-use planning and disaster prevention policies in the departments and municipalities of the country (Patiño, 2016). As a consequence of the degradation suffered by these ecosystems in Colombia and the lack of an updated and accurate inventory, several authors agree that the delimitation at a precise and detailed scale of wetlands is a fundamental and necessary tool to establish strategies for the preservation, protection and conservation of their ecosystem services; especially for the preservation of their water regulation conditions (Baker, C. et al., 2006), (Brena, Castillo, and Wagner, 2016), (Patiño, 2016). Therefore, the general objective of this work is to know the spatial variation of the Bajo Sinú Cenotage Complex during its seasonal periods for the year 2021. The methodology employs the use of PlanetScope satellite images through spectral indices, with the purpose of establishing a categorization of the spectral ranges of the different analysis coverages present in the Lower Sinú swamp complex and, in this way, to verify the individualization capacity of these study classes. In response to the methodology used and the results obtained, it was possible to generate a cartography of the different coverages associated to the CCBS at a higher level of detail than the one usually used (1:10 000), as well as the calculation of the total areas of the wetlands corresponding to the complex, including their floating aquatic vegetation coverages.

Keywords: CCBS, Wetlands, GIS, PlanetScope, Spectral Separability.



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



1. INTRODUCCIÓN

Los humedales a nivel global han sido descritos como uno de los ecosistemas con mayor diversidad biológica, productivos y con la más alta oferta de bienes y servicios (Quintana, 2018). No obstante, a pesar del elevado valor de los servicios ecosistémicos que ofrecen los humedales, se está presentando la degradación y destrucción de estos a lo largo de todo el planeta (ten Brink, y otros, 2013). Desde el año 1970 se ha disminuido en promedio un 35% de la superficie total de humedales en todo el mundo, donde se ha estimado que la tasa anual de pérdida se ha acelerado desde los años 2000, en algunas regiones llegando incluso hasta pérdidas de 1.6% de su superficie total al año (Convención de Ramsar sobre los Humedales, 2018).

En Colombia, desde mediados del siglo XX y con la premisa de desarrollo económico, estos ecosistemas han sufrido una pérdida importante de sus superficies y calidad ambiental (Camargo, 2012), dando hasta la fecha un aproximado del 24% de pérdida de área total. La costa caribe se ubica como la región con las cifras más altas en pérdidas de su superficie de humedales y Córdoba, el tercer departamento con la mayor degradación de sus humedales (Patiño, 2016), siendo el Complejo Cenagoso del Bajo Sinú (CCBS) el más afectado, con una pérdida alarmante del 33% de su extensión desde los años 90, de las cuales desde los años 2000 hasta 2019 se presentó el 29% de la disminución total (Espitia, 2019). Resultados similares fueron hallados por (Mejía, Soto, & Martínez, 2019) quienes encontraron que, desde 1991 a 2015, el tamaño promedio de los cuerpos de agua del CCBS se redujo en un 41%, el número de estos disminuyó en aproximadamente 25% y su capacidad asociada de almacenamiento de agua se perdió en más del 50%. Estas cifras estarían asociadas a diversas intervenciones antrópicas como la expansión de las frontera agrícola, ganadera y urbana, junto con la construcción de carreteras y la puesta en marcha de la hidroeléctrica Urrá, las cuales han alterado la dinámica natural de estos ecosistemas.

No obstante, aunque es de conocimiento público la actual problemática ambiental dentro del complejo, se prevé la construcción de la variante nacional en Lórica, dicha mega obra



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



atravesaría el CCBS y se presume que esta ocasión serían serias repercusiones negativas a la dinámica hídrica del ecosistema (ANLA, 2015) y alteraciones a los procesos habituales de colonización y cambios de cobertura del suelo dentro del área de influencia de la vía, lo cual coincidiría con el aumento de las poblaciones de los municipios dentro de la jurisdicción del complejo que exhibe cifras promedios de un 30 % en los últimos años (Ballesteros, 2012). Esta demanda por una mayor cantidad de terreno le ejerce al CCBS una mayor presión antrópica, generando una ocupación cada vez más alta de sus zonas de inundación y un cambio en su cobertura natural asociada, lo que genera la degradación y reducción del complejo (Espitia, 2019).

Por lo anterior, se vuelve fundamental generar una cartografía con un nivel de detalle superior al que habitualmente se ha venido trabajando en este ecosistema ya que esto ayudaría a conocer detalladamente el comportamiento estacional de sus superficies de agua, distinguiendo de este modo sus zonas de influencia, de tal manera que sería de gran utilidad en el desarrollo de mejores políticas de gestión de dicho ecosistema, al igual que en el mejoramiento de las estrategias relacionadas a las problemáticas de inundación, que año a año son sufridas por los habitantes de los municipios que tienen jurisdicción en estos humedales, y que se reflejan mayormente en pérdidas económicas.

Las técnicas de percepción remota y herramientas SIG han mostrado ser una alternativa con una relación costo-beneficio muy favorable en el monitoreo de las dinámicas y características de humedales como las ciénagas (Toyra & Pietroniro, 2005). De esta forma, a través de este estudio se buscará generar una cartografía reciente y con una alta resolución espacial del complejo cenagoso del bajo Sinú, previo a la construcción de la variante nacional en Lorica. Se utilizarán imágenes satelitales PlanetScope con un tamaño de pixel de 3.125m y se probarán índices espectrales para identificar aquellos que sean eficientes en la separación de las coberturas asociadas al CCBS y especialmente a los cuerpos de agua y cubiertas de vegetación acuática flotante, esta última mostrándose como un factor primordial de delimitación, ya que enmascara los espejos de agua, conduciendo a



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



subestimaciones al momento de calcular las áreas totales de las zonas correspondientes a los humedales.

En consecuencia, por medio de este estudio se propone como objetivo principal, llevar a cabo la delimitación de los cuerpos de agua correspondientes a los humedales del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú durante sus épocas estacionales, a través de imágenes satelitales PlanetScope (PS) de sus sensores más recientes y su implementación mediante Sistemas de Información Geográficas (SIG) para el año 2021.

2. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Evaluar la variación espacial de las ciénagas del complejo cenagoso del bajo Sinú, para la época seca y de lluvias del año 2021 a escala 1:10'000, mediante imágenes satelitales PlanetScope.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Establecer las fechas representativas de la estacionalidad del complejo cenagoso del bajo Sinú de acuerdo con la tendencia de los aportes de aguas al mismo, para la selección de las imágenes satelitales.
- Evaluar índices espectrales disponibles para las imágenes PlanetScope seleccionadas que presenten las mejores potencialidades para delimitar superficies de agua y cubiertas de vegetación acuáticas.
- Espacializar las superficies de aguas y coberturas vegetales acuáticas asociadas a las ciénagas del CCBS a partir de cinco índices espectrales, para las temporadas de análisis.



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Humedales

Los humedales han sido objeto de diferentes definiciones, sin embargo, el término acuñado por la comunidad científica es el planteado por Scott & Carbonell (1986), el cual establece que *“son humedales aquellas extensiones de marismas, pantanos, turberas o aguas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluyendo las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros”* citado en (Ambiente, 2002), abarcando un aproximado de 1280 millones de hectáreas a nivel global (Ramos, 2018), además de ser catalogados como ecosistemas vitales y altamente productivos (Villamil, 2021) debido a la gran cantidad de recursos naturales que estos pueden poseer y a los diversos servicios ecosistémicos que pueden llegar a brindar.

Clasificación de los humedales

Los humedales se clasifican según el tipo de ambiente en los que se encuentren (Ibañez, 2016) (Tabla 1), organizándose en tres categorías: humedales marinos y costeros, humedales continentales y humedales artificiales, en donde se recogen los 42 tipos de humedales reconocidos en la convención de Ramsar (2018). Existe una clasificación generalizada para los humedales continentales y los humedales marinos y costeros.

Tabla 1. Clasificación generalizada de humedales continentales y marinos y costeros.

Clasificación de los humedales	Tipo de humedal
Continental	ríos y arroyos, lagos naturales, turberas no arboladas, turberas arboladas, marisma y pantanos, humedales arbolados
Marinos y costeros	llanuras mareales sin vegetación, marismas saladas, deltas costeros, manglares, praderas de pastos marinos, arrecifes de coral

Tomado de: Ramsar, Perspectiva mundial sobre los humedales 2018



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



Por su parte los humedales artificiales están conformados por estanques piscícolas, estanques de granjas, cultivos de regadíos, embalses, estanques de gravas, lagunas de oxidación, entre otros (Estrada, 2010).

Servicios ecosistémicos de los humedales

La interacción de los componentes físicos, químicos y biológicos particulares de los humedales, generan una serie de funciones y valores para los seres humanos denominados servicios ecosistémicos (UICN, 1992), los cuales se clasifican en cuatro grandes grupos; servicios de regulación, aprovisionamiento, sostenimiento y culturales (WWF, 2018), destacándose la obtención de alimentos y materias primas, la regulación hidrológica, prevención de desastres, contribución en los ciclos de los nutrientes, mejoras a la calidad del agua, captura de dióxido de carbono y aportes recreativos. Por lo que a nivel mundial se reconoce ampliamente el valor económico y ambiental de mantener las condiciones naturales de estos ecosistemas.

Estado de los humedales a nivel mundial

En las últimas décadas se ha recopilado información que indica un progresivo deterioro de los humedales, representado en la disminución e incluso perdida de sus servicios ecosistémicos, que históricamente han sido fundamentales para el desarrollo de la sociedad (Lopez, Vasquez, & Gomez, 2010), a un ritmo mayor que al de otras clases de ecosistemas (Diaz, de Jesus, & Burguillo, 2018). De esta forma se registran datos que indican que desde comienzos del siglo XX se ha perdido el 64% de los humedales del planeta (Ramos, 2018), recalcando además que en algunas regiones altamente pobladas se exhiben cifras alarmantes del 70% a 90% de pérdida total (Martinez, Rodriguez, & Cabrera, 2014).

Los humedales como ecosistemas llegan a ser el reflejo de las condiciones ambientales de sus entornos, siendo altamente sensibles a los cambios climáticos e hidrológicos (SAG, 2006), factores que en los últimos años muestran una tendencia negativa, los cuales se han



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



visto reflejados en cuatro tipos de afectaciones en los humedales (MITECO, 2003): alteración de la estructura física, alteración del régimen hidrológico o de la cantidad de agua del humedal, alteración de la calidad del agua, alteración de las comunidades biológicas asociadas.

Estas alteraciones principalmente son resultado de actividades productivas como la agricultura, la industria, la construcción de infraestructura e incluso actividades como el turismo, son prácticas que representan gran parte del deterioro sufrido por los humedales en las últimas décadas. Adicionalmente a nivel mundial se registra la disminución del área de los humedales continentales en contraste con el aumento de los humedales artificiales que actualmente crecen en áreas constantemente.

Construcción de la variante de Lorica

Se prevé la construcción de la variante al centro poblado de Lorica la cual iniciaría sobre la vía que conduce de Cereté a Lorica (Ruta Nacional 21 – INVIAS) y finalizaría en la vía Lorica – Coveñas – Tolú (Ruta Nacional 90 INVIAS) (ANLA, 2015). Esta obra civil atravesaría el CCBS y su puesta en marcha no estaría excepta de las diferentes afectaciones ambientales representativas de este tipo de proyecto como lo pueden ser la dispersión de especies de fauna y flora, fragmentación de los ecosistemas, cambios en los ciclos hidrológicos, entre otras, por lo que dichas afectaciones deberían ser identificadas y evaluadas con el fin de diseñar estrategias que eviten, mitiguen o compensen estos impactos (Arroyave, y otros, 2006).

El complejo cenagoso del bajo del Sinú se encuentra categorizado como Distrito Regional de Manejo Integrado (DRMI) por lo que figura como un área protegida bajo el principio de desarrollo sostenible, donde todas las actividades que se realicen dentro de esta zona deben haber sido planificada de tal forma que se garantice la regulación y uso adecuado de los recursos renovables. Es por esto que para llevar a cabo la construcción de la variante es necesario la sustracción de 21.87 hectáreas de DRMI correspondientes al complejo, lo que



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co

ha generado una serie de inconformidades en poblaciones aledañas al CCBS pues manifiestan una presunta violación a los derechos constitucionales colectivos a la moralidad administrativa y al goce de un ambiente sano (CVS, 2021).

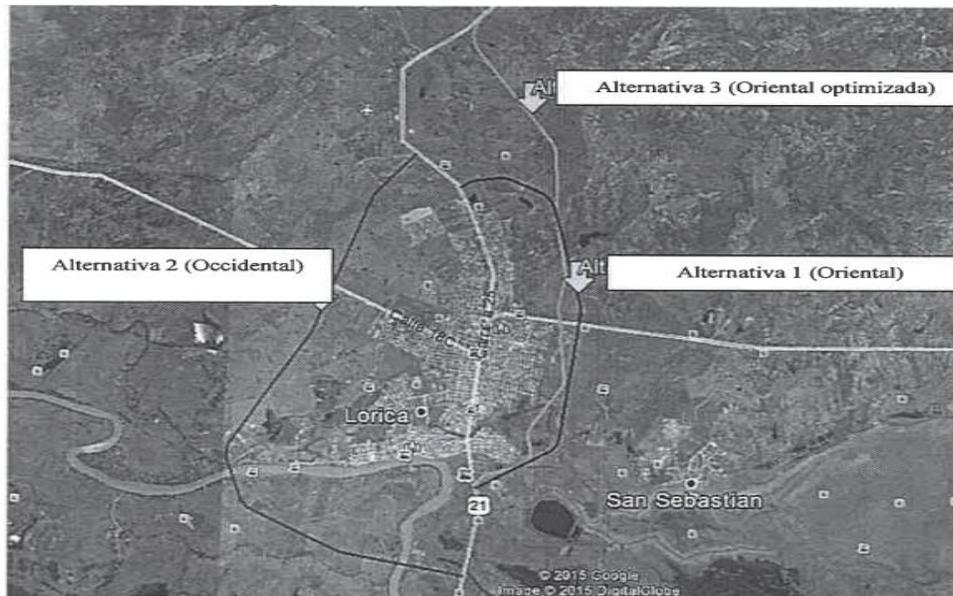


Figura 1. Alternativas para el diseño de la ruta de la variante al centro poblado de Lórica.

Tomado de. ANLA, AUTO N° 2697 (2015).

Para el trazado de la vía se plantearon tres posibles rutas siendo la última de estas la seleccionada (alternativa oriental optimizada) (Figura 1) en la cual se argumenta mayor viabilidad debido al menor cruce con cuerpos de aguas (ANLA, 2015). Aun así se contemplaría la implementación de terraplenes y rellenos, que no son compatibles y no son permitidos dentro del CCBS puesto que generaría afectaciones en su dinámica hídrica, por lo que entes gubernamentales del departamento ordenaron como medida cautelar la suspensión del proyecto en los tramos comprendidos dentro del complejo, hasta que se garantice que el diseño vial represente las menores afectaciones ambientales posibles, todo esto sin dejar a un lado la importancia de este proyecto para la región.



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



Teledetección ambiental

La disminución de los recursos naturales, así como la degradación de un amplio porcentaje de los ecosistemas a nivel mundial a causa de actividades humanas, ha generado la necesidad de contar con un inventario actualizado del estado de las riquezas naturales a nivel mundial con el fin de monitorear las condiciones de los ecosistemas en el tiempo.

La recolección de datos de la superficie terrestre mediante técnicas de percepción remota, es una de las fuentes de información más importantes a la hora de alcanzar objetivos relacionados con el monitoreo ambiental (Sacristán, 2007). Esta consiste en la adquisición de información de objetos y/o fenómenos a pequeña o gran escala, utilizando instrumentos de escaneo que no están en contacto directo con dichos objetos de análisis como lo pueden ser plataformas aéreas o espaciales a través del flujo de la radiación electromagnética entre los cuerpos de la superficie terrestre y las plataformas de observación.

Espectro electromagnético

La emisión de ondas electromagnéticas desde un flujo saliente de energía se conoce como radiación electromagnética, pudiendo ser de origen natural o artificial (Luque, 2012). La distribución de la energía de todas las ondas electromagnéticas se denomina espectro electromagnético, este se divide en diferentes regiones según su longitud de onda (λ , que se mide en micrómetros, μm) y frecuencia (n , que se mide en Hertz, Hz), el cual se extiende desde longitudes de ondas amplias como las de radio, pasando por la luz ultravioleta, la luz visible y los rayos infrarrojos, hasta ondas electromagnéticas de menor longitud como los rayos gamma y los rayos X, (Marzá, 2015)



Certificado GP 134-1



Certificado SC 5278-1



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co

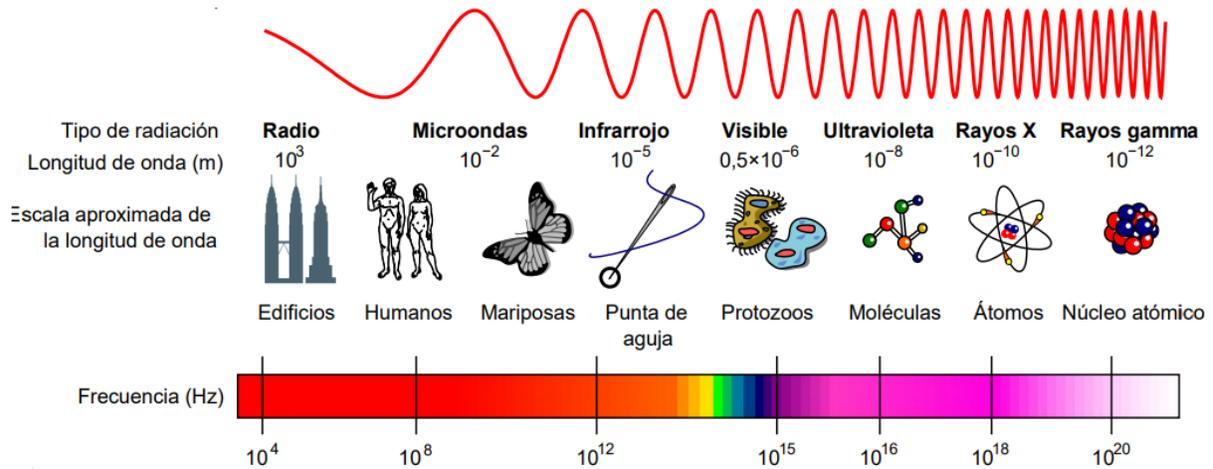


Figura 2. Espectro electromagnético.

Tomado de. Luque, Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico (2012)

Cada región del espectro posee comportamientos y propiedades diferentes, es por ello que se ha generado su separación en segmentos o bandas de frecuencia, por consiguiente la cantidad de energía que refleja, transmite o absorbe un objeto difiere para cada longitud de onda, lo que representa el sustento teórico básico de la percepción remota (Bautista, Delfin, Palacio, & Delgado, 2004) puesto que la proporción del flujo radiante que incidente en los elementos de la superficie terrestre permite clasificarlos según sus respuestas espectrales, estableciendo la identidad de cada objeto (Figura 3).

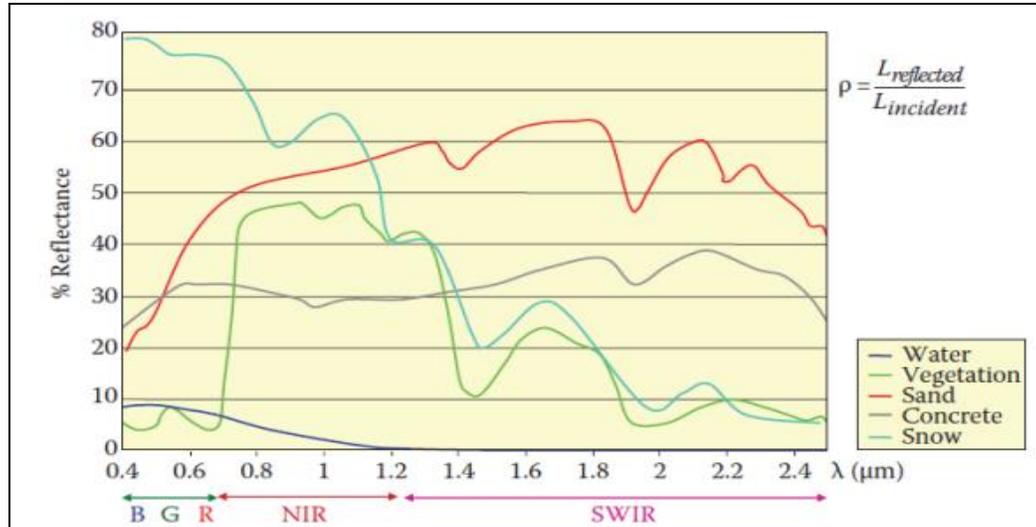


Figura 3. Firmas espectrales de algunas coberturas
Tomado de. Quillupangui, Determinación del comportamiento espectral de coberturas y usos de la tierra de la subcuenca del río San Pedro. (2019)

Fundamentos de teledetección

El principio base de la teledetección es parecido a la de la visión: un ente físico, la luz emanada por una fuente emisora es recibida por un sensor, los ojos y procesada por el cerebro, la interacción de estos tres elementos fundamentales supone la adquisición de información mediante técnicas de percepción remota. Así pues, un sistema de teleobservación espacial consta de los siguientes elementos (Villegas, 2008):

- Una fuente de energía**, que representa el origen del flujo energético que posteriormente será detectado por el sensor
- La superficie terrestre**, que constituye el foco de observación de los sistemas de percepción remota
- Un sensor**, encargado de captar la energía procedente de los cuerpos de estudios, para luego grabarla o enviarla directamente a los sistemas de recepción terrestre
- Un sistema de recepción-comercialización**, aquí se reciben los datos provenientes de los sensores y posteriormente son ajustados,

- **Un procesador**, encargado de manipular la información recibida y ajustada a los diferentes formatos, para generar imágenes analógicas o digitales constituidas por datos temáticos y cuantitativos
- **Un intérprete**, capaz de analizar los productos generados por el procesador, para originar cartografía a través de procesos de fotointerpretación
- **Un usuario final**, el cual recibe el producto temático resultado de la interpretación y procesamiento de los elementos anteriores

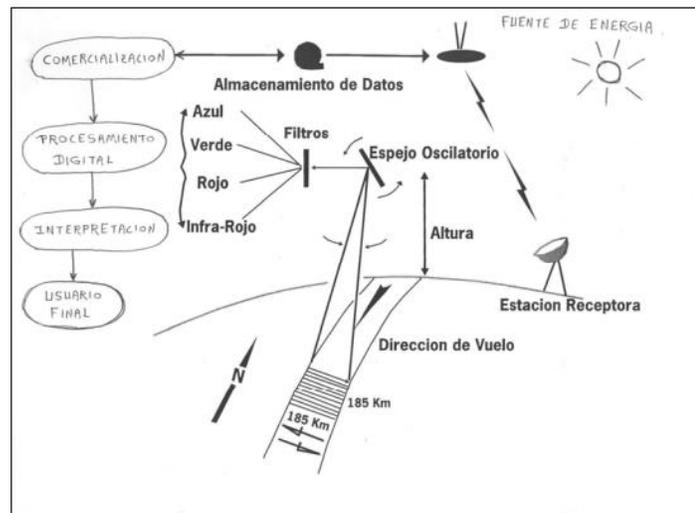


Figura 4.Elementos de un sistema de teledetección
Tomado de. Villegas, Introducción a la percepción remota y sus aplicaciones geológicas (2008)

Los tipos de teledetección se definen de acuerdo al origen del flujo de la energía que parte desde los objetos, esta puede ser de tres tipos, radiación solar reflejada por los objetos (luz visible e infrarrojo cercano), radiación terrestre emitida por los objetos (infrarrojo cercano) y radiación emitida por el sensor y reflejada por los objetos (radar) (Lopez M. C., 2020), denominándose a las dos primeras como teledetección pasiva y la última como teledetección activa

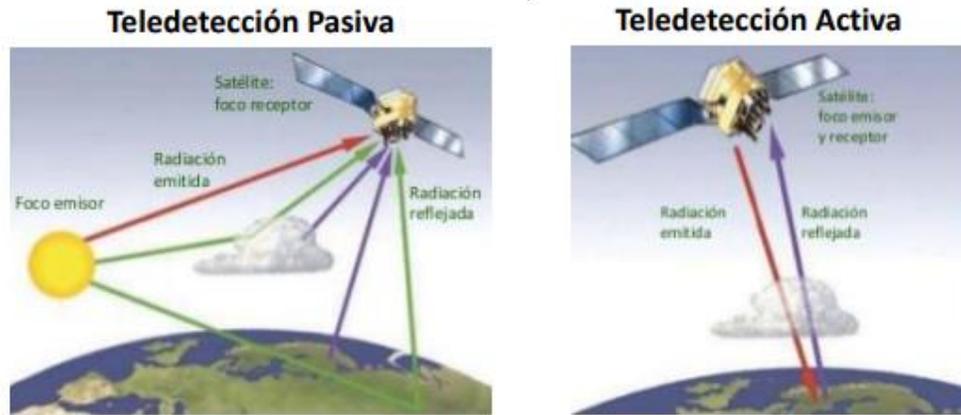


Figura 5.Tipos de teledetección
Tomado de. López, Fundamentos básicos de teledetección (2020)

- **Teledetección pasiva**, este modo de obtención de información mediante percepción remota es implementada cuando la fuente de energía es el sol y el sensor solo mide la radiación reflejada, por lo cual esta modalidad no es aplicable en horas nocturnas además que la presencia de altos porcentajes de nubes dificulta las observaciones por lo que en zonas tropicales llega a ser inviable su utilización, al igual que en las regiones polares debido la poca luz solar que reciben, no obstante, esta técnica es muy útil a la hora de evaluar aspectos como la topografía del terreno
- **Teledetección activa**, en este caso el sensor está equipado con un radar el cual sería la fuente de energía que incide en los objetos de estudio en la superficie terrestre midiendo el eco producido. Esta técnica a diferencia de la teledetección pasiva es capaz de atravesar las coberturas de nubes, por lo que las condiciones meteorológicas no le representan un limitante y su uso se puede dar tanto de día como de noche, sin embargo, las imágenes producto de esta técnica son más difíciles de analizar, de modo que muchas veces son utilizada para complementar datos recopilados mediante teledetección pasiva.



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



Una vez recopilada toda la información por parte de los sensores sus productos son mayormente dispuestos mediante imágenes multispectrales las cuales organizan sus datos dentro de rangos de longitud de onda específicos a través del espectro electromagnético, estas imágenes dividen la luz en bandas espectrales que por lo general varían de 3 a 15 bandas por imagen (Kanaan & Ventura, 2018), así mismo la cantidad y calidad de sus datos variará en función de la resolución de los sensores o plataformas de observación (espacial, temporal, espectral y radiométrica)

Finalmente, en muchas ocasiones es necesario llevar a cabo determinadas transformaciones de los datos espectrales originales para mejorar la capacidad de distinción de los elementos de la superficie terrestre, por medio de operaciones aritméticas llamadas índices espectrales, que se calculan para cada pixel utilizando las bandas de reflectancias espectral de dos o más longitudes de onda, pasando de una imagen multibanda a monobanda. A partir de los índices espectrales es posible inferir diferentes variables biofísicas y se clasifican según su cobertura de análisis (cuerpos de aguas, vegetación, suelo)

Planet Labs

Planet Labs, Inc. es una compañía de observación de la tierra a través de satélites privados los cuales almacenan y automatizan la información, dando acceso a un conjunto de datos completos y diarios capturados por sus diferentes sensores (Planet, 2022). Incluyen imágenes de su catálogo (PlanetScope, SkySat y RapidEye) además de imágenes públicas de Sentinel-2 y Landsat 8.

Las imágenes PlanetScope son obtenidas a la fecha por aproximadamente 130 satélites llamados "Doves" capaces de recopilar datos de toda la superficie terrestre de manera diaria (200 millones de Km²/día) con una resolución espacial cercana a 3 metros por pixel (Planet, 2022). Los satélites cuentan con dimensiones de (10x10x30) cm³ y desde su primer lanzamiento en 2016 han venido mejorando constantemente en capacidad y cantidad, contando con tres tipos de instrumentos (Tabla 2).



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



Tabla 2. Tipos de instrumentos PlanetScope.

Satélite	Sensor	Descripción
Dove Classic	PS2	Captura información en los canales del rojo, verde, azul e infrarrojo cercano, sus escenas cuentan con dimensiones aproximadas de (25 x 11.5) Km ² . La disponibilidad de imágenes se ubica desde julio de 2014 hasta el 29 de abril de 2022
Dove-R	PS2.SD	Cuenta con el mismo sensor "PS2", pero con patrones actualizados y filtros de banda de paso, captura información en los canales del rojo, verde, azul e infrarrojo cercano, sus escenas cuentan con dimensiones aproximadas de (25 x 23) Km ² . La disponibilidad de imágenes se ubica desde marzo de 2019 al 22 de abril de 2022
SuperDove	PSB.SD	Posee un nuevo sensor llamado PSB y el mismo filtro del instrumento PS2.SD, captura información en el espectro visible RGB e infrarrojo cercano NIR, incluyendo además nuevos canales red edge, green I, coastal blue, and yellow, sus escenas cuentan con dimensiones aproximadas de (32.5 x 19.6) Km ² . La disponibilidad de imágenes se ubica desde marzo de 2020 a la actualidad

Tomado de: Planet, Planet imagery product specifications, (2022).

Tipos de productos PlanetScope

PlanetScope dispone de varios tipos de productos, los cuales varían según su nivel de procesamiento y/o calibraciones radiométricas (Frazier & Hemingway, 2021), de este modo sus usos están limitados a las características particulares de cada tipo de producto (Planet, 2022).

- PlanetScope Basic Scene (basic_analytic):** corresponden a imágenes multispectrales calibradas y no ortorrectificadas, estos productos están destinados para usuarios con capacidades avanzadas de procesamientos de imágenes y correcciones geométricas.



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



- PlanetScope Ortho Scene Analytic (analytic):** son imágenes multispectrales ortorrectificadas y calibradas, este tipo de producto es aplicable en estudio que requieren imágenes con geolocalización precisa y proyecciones cartográficas.
- PlanetScope Ortho Scene Visual (visual):** imágenes RGB ortorrectificadas, con correcciones de color optimizadas para el ojo humano, estos productos tienen como finalidad la inspección visual simple y directa, pueden usarse directamente en SIG.
- PlanetScope Ortho Tile (analytic_sr):** cuentan con correcciones radiométricas que garantizan la consistencia en las condiciones atmosféricas minimizando incertidumbres en las respuestas espectrales, además de haber sido ortorrectificadas lo que eliminaría distorsiones del terreno, estas imágenes están diseñadas para aplicaciones relacionadas al monitoreo ambiental y su análisis temporal.

Características espectrales de los diferentes sensores PlanetScope:

Actualmente Planet cuenta con 3 generaciones de satélites: Dove Classic, Dove-R y SuperDoves, los cuales han venido evolucionando, mostrando mejoras en sus características radiométricas. Los sensores Dove Classic para las bandas RGB cuentan con una deficiente separación de sus respuestas espectrales por lo que es muy complejo realizar análisis espectrales precisos a partir de los productos de esta generación más antigua.

Por su parte la segunda generación Dove-R representó mejoras en la definición y separación de bandas de los productos ya existente, ya que ambas generaciones comparten el mismo sensor "PS2" por lo que de igual forma mantienen la misma resolución espectral (RGB-NIR). Los últimos sensores SuperDoves capturan información en las bandas (RGB-NIR) que son en términos generales compatibles con las de Dove-R y cuatro bandas adicionales (Coastal Blue, Green, Yellow, Red-Edge), del mismo modo estos productos más actualizados presentan una adecuada separación en los rangos espectrales de sus bandas por lo que representarían las mejores características para usos analíticos. (Gráfico 1).



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co

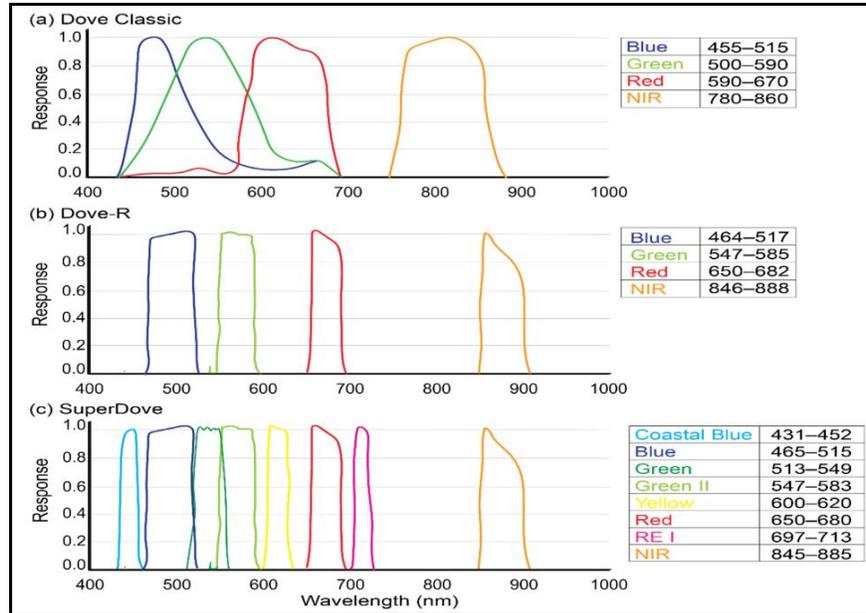


Gráfico 2. Rangos espectrales para los diferentes sensores de Planet.

Tomado de. Frazier & Hemingway, una revisión técnica de los datos de Planet Smallsat: consideraciones prácticas para el procesamiento y uso de imágenes de PlanetScope (2021).

A razón de las áreas que cubren las escenas de PlanetScope en muchas ocasiones se hace necesario la construcción de mosaicos que requieren combinaciones de varias generaciones de sensores, para abarcar la totalidad de las zonas de estudios, no obstante, las diferencias en sus características espectrales implican limitaciones a la hora de generar análisis confiables de las condiciones de la superficie terrestre (Huang & Roy, 2021), sumado a la deficiente separabilidad de las bandas de las imágenes de los primeros sensores (Houborg & McCabe, 2016) que muchas veces son necesarias especialmente cuando se requieren mosaicos que constan de imágenes del mismo día.

Para los casos en los que se hace necesario el uso de productos de sensores Dove Classic junto con Dove-R o SuperDove, Planet proporciona archivos en los metadatos de las imágenes con coeficientes para ajustar los valores de radiancia de estos dos últimos sensores y que estos coincidan con los de Dove Classic, sin embargo al realizar estos



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



preprocesamientos la calidad de las imágenes de los instrumentos de las últimas generaciones es degradada (Frazier & Hemingway, 2021), desaprovechando la mejora espectral de los sensores más recientes.

4. ESTADO DEL ARTE

En los últimos años las técnicas de teledetección se han convertido en una importante herramienta para el monitoreo y delimitación de los cuerpos de aguas superficiales del planeta, al igual que para el análisis de sus dinámicas (Klein, y otros, 2014). Sumado a esto la creciente necesidad de establecer los límites y áreas de influencias de ecosistemas como los humedales, con el fin de obtener datos aplicables a la toma de decisiones relacionadas a políticas ambientales (de Moel, van Alphen, & Aerts, 2009), ha dado como resultado el adelanto de un gran número de investigaciones relacionadas a esta temática y que además son afines a la nuestra.

Mishra et al (2020) mediante imágenes satelitales PlanetScope (3m) e índices espectrales generaron una delimitación espaciotemporal de pequeños cuerpos de agua en la región semiárida africana del Sahel, de gran importancia para el abastecimiento de agua de esta región. Los resultados obtenidos mostraron la excelente capacidad de los productos PS para detectar los cuerpos hídricos de interés, logrando identificar el 95% de estos, en contraste con el 32% obtenido a partir de imágenes Landsat-8, demostrando las mejoras espaciales de estos nuevos sensores en comparación con las plataformas de observación tradicionales.

Por su parte, de la Fuente, Meruane, & Suares (2021) en su estudio “*Variabilidad espaciotemporal a largo plazo en humedales altoandinos del norte de Chile*” realizaron un análisis de la dinámica natural a largo plazo de estos humedales, a través de un total de 533 imágenes Landsat 5 y 8 (30m x 30m) entre 1984 a 2013 y de 2015 a 2019 e implementando el índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI), determinaron la variación espaciotemporal de 10 humedales altoandinos ubicados en el altiplano de Chile, como resultados se



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



observó el crecimiento y contracción de las masas de aguas estudiadas, denotando una alta variabilidad espacial atribuida a los fenómenos de precipitaciones y evaporación.

En Colombia luego de las severas inundaciones de los años 2010 y 2011, se empezó a destacar la importancia de los humedales en los procesos de regulación hidrológica, además de que se reconoció la vulnerabilidad de nuestro territorio a eventos climáticos extremos y la relevancia de estos ecosistemas (Ricaurte, y otros, 2017), de esta forma a nivel nacional se han llevado a cabo diversos estudios con el fin de delimitar humedales de importancia para nuestro país.

Tal es el caso de Parra & Hernández (2010) los cuales identificaron y delimitaron los humedales lenticos naturales en el valle alto del río Cauca, mediante el tratamiento digital de imágenes del satélite Quickbird (2.44 m), generando una cartografía a escala 1:10000 de dichos humedales. Para diferenciar las masas de agua de las coberturas vegetales se utilizó el Índice Normalizado de Diferencia de Vegetación (NDVI), obteniendo los espejos de agua para cada humedal e identificando tres tipos de vegetación acuática asociada a estos ecosistemas, finalmente al comparar los resultados con cartografías existentes que datan del año 1998 se pudo concluir que de los 6 humedales identificados la mayoría de ellos presentan una disminución en sus áreas aproximada del 50% e incluso dos de ellos desaparecieron completamente.

Atencia, Contreras, & Vergara (2008) delimitaron el complejo Bajo San Jorge margen izquierda (B13) ubicado al sur del departamento de Sucre, mediante el uso de imágenes satelitales multiespectrales Landsat, tanto para aguas bajas como para altas. La metodología implementada fue un análisis visual de las imágenes a través de combinaciones de bandas a diferentes tonalidades y saturación, con el fin de realzar y hacer más visible los cuerpos de agua objetivo y los distintos tipos de cobertura dentro de la zona de estudio. La clasificación de coberturas fue: cultivos, pastos, rastrojos y suelos desnudos. La validación



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



de la información obtenida se hizo mediante información en campo y el apoyo de otras imágenes como Google Earth.

Por medio de imágenes Landsat se llevó a cabo el trabajo “*Análisis Multitemporal del Espejo de Agua en la Laguna de Funeque para el periodo 1985 – 2015*” en el cual se establecieron las superficies de agua de este humedal, así como las coberturas de vegetación asociadas, mediante realce y mejoramiento de las imágenes a través de ERDAS para luego generar una clasificación supervisada y aplicar la metodología de Corine Land Cover. González & González (2015) obtuvieron en sus resultados una reducción de más del 70% de la superficie de agua y el cambio de coberturas, con un aumento sustancial de coberturas de sedimentos y vegetación acuática.

Por otro lado, a nivel local en Córdoba se puede destacar el trabajo de Torres (2020) quien estudio la variación espacial y temporal del espejo de agua correspondiente a la ciénaga de Ayapel-Córdoba durante el periodo 2000-2018, al igual que planteo los posibles factores que se podrían asociar a los cambios del recurso hídrico, por lo cual dispuso de imágenes satelitales obtenidas de los sensores Landsat 5 TM, 7ETM y 8 OLI (30 x 30) m, para dos años lluviosos (2000 y 2017) y dos años secos (2001 y 2018) utilizando los índices (NDWI) y (NDVI) respectivamente, para la identificación de las coberturas de interés, de esta forma se logró concluir que el año 2017 fue donde mayor área abarco el espejo de agua de la ciénaga de Ayapel y uno de los años donde más se presentó el crecimiento de tierras desnudas o degradadas y una disminución en las coberturas de bosques fragmentados, cifras solamente superadas por las del 2018 donde además fue el año que mayor disminución de la superficies de agua se exhibieron, finalmente estos cambios fueron atribuidos a la actividad minera, la expansión de las tierras agrícolas y la ganadería.

Así mismo, Cárdenas (2020) utilizo el Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI) para realizar un análisis multitemporal del espejo de agua de la ciénaga de Betancí para los años 1985, 2001, 2015 y 2020 mediante imágenes Landsat, notando una **tendencia al**



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



aumento en el área superficial del cuerpo hídrico (el área para el año 1985 era de 494,17 Ha mientras que para el año 2020 fue de 2192,45 Ha), comportamiento atribuido a la construcción de obras de infraestructura dentro de este ecosistema, por lo que la ciénaga de Betancí ha pasado de ser un humedal natural a uno artificial.

Mientras tanto Torres & Yances, (2016) en su tesis de pregrado analizaron la alteración de la dinámica de inundación del CCBS luego de la puesta en marcha de la hidroeléctrica Urra y de construcciones de obras de ingeniería dentro del complejo, en su metodología tomaron como referencia tres periodos de tiempo 1991 (año control), 2003 y 2015 de donde obtuvieron imágenes Landsat para las épocas estacionales de cada año, teniendo como resultado que existe una tendencia a la disminución de la superficie de inundación del conjunto de ciénagas del bajo Sinú, argumento reforzado por (Mejia, Soto, & Martinez, 2019) y (Acosta & Morales, 2021).

Lo anterior representa en cifras una reducción porcentual para el año 2015 del 21% en época seca y del 56% en época lluviosa, de igual manera también se logró notar el desplazamiento de los cuerpos de agua desde la parte sur a la parte norte de la cuenca, fenómeno atribuido a la construcción de camellones. Para la delimitación de las masas de aguas se utilizó el índice de agua ICEDEX debido a ser poco sensible a la presencia de vegetación o materiales en suspensión.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se llevó a cabo en el complejo cenagoso del bajo Sinú, ubicado entre las coordenadas 1.440.000 a 1.527.000 Norte y 800.000 a 855.000 Este, de origen Bogotá (Figura 6), abarcando seis municipios del departamento de Córdoba (Luque, 2013). Se forma debido a la dinámica hídrica facilitada por un conjunto de caños que conecta al río Sinú con el complejo de lagunas ubicado en la zona baja del valle del mismo río, antes de



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



planas pertenecientes al área de inundación, temporalmente cubiertas de agua (IDEAM, 1998) citado en (Valle, 2020).

Dentro de los servicios ecosistémicos brindados por el CCSB se destaca su función amortiguadora del nivel del río, al mismo tiempo que sirven como hábitat de un gran número de especies de fauna y flora, además de controlar microclimas locales evitando cambios fuertes de temperatura y aumentando la humedad relativa, finalmente las actividades económicas de las zonas colindantes al complejo están directamente relacionadas a la presencia de este ecosistema (Barrios, Cardenas, & Rios, 2015)

El desarrollo de actividades económicas y sociales en la cuenca del río Sinú especialmente en su parte baja ha generado daños en los ecosistemas naturales ubicados dentro del complejo, modificando su ecología y el equilibrio de los servicios ecosistémicos (Sepulveda, Taborda, & Fuentes, 2020). Se identifican cuatro grandes factores principales responsables del deterioro del CCBS: ampliación de las fronteras ganaderas y agrícolas, la construcción de la carretera Montería-Lorica y de la hidroeléctrica Urrea y la disposición de residuos sólidos y vertimientos de aguas residuales al CCBS.

El presente proyecto de investigación tiene como finalidad el estudio de la dinámica de la superficie del complejo cenagoso del bajo Sinú, en sus dos periodos estacionales para lo cual se dispuso de imágenes satelitales de alta resolución (PlanetScope) del año 2021. En la Figura 7, se sintetiza gráficamente la metodología:



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co

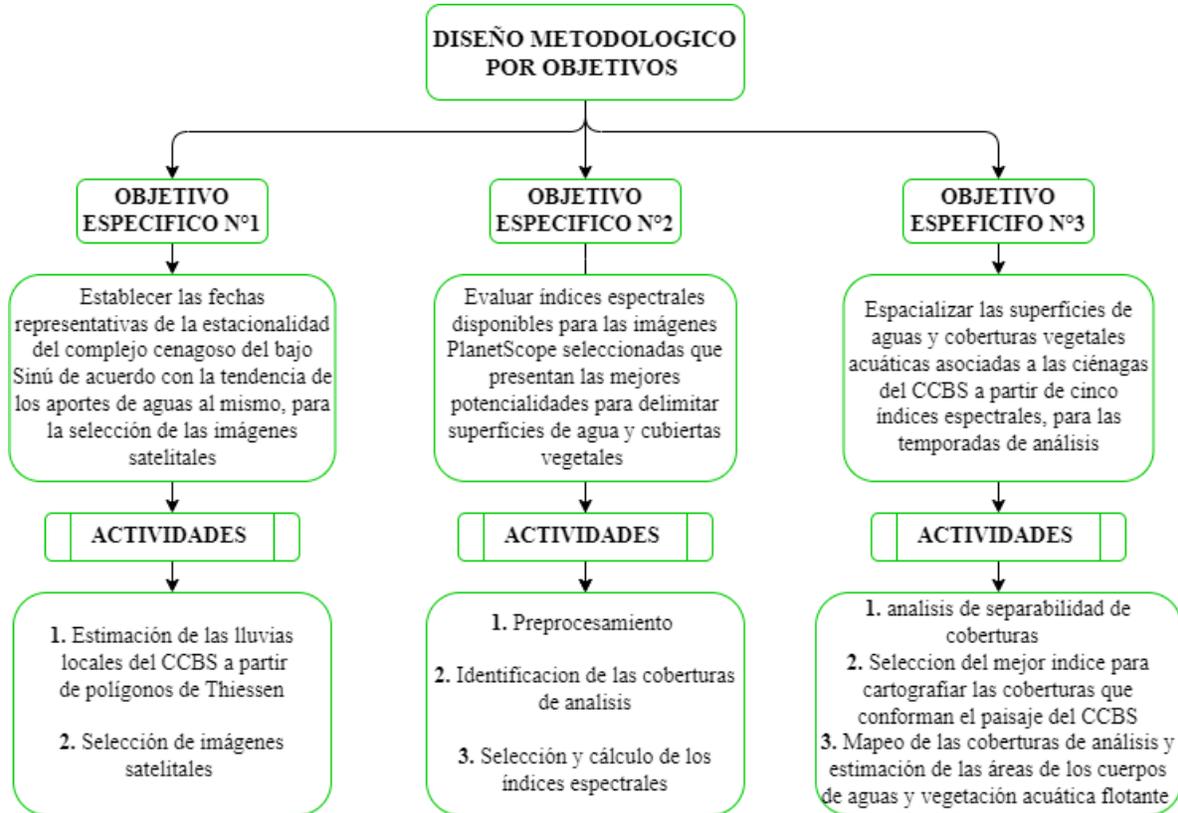


Figura 7. Diseño Metodológico por objetivos.

Objetivo 1: Establecer las fechas representativas de la estacionalidad del complejo cenagoso del bajo Sinú de acuerdo con la tendencia de los aportes de aguas al mismo, para la selección de las imágenes satelitales.

La variación de las superficies del conjunto de ciénagas que conforman el complejo cenagoso del bajo Sinú, está asociada a fenómenos hidrológicos que determinan sus entradas y salidas de aguas, dichas entradas se encuentran representadas por las precipitaciones que se depositan directamente en los cuerpos de aguas, la escorrentía superficial que se genera dentro de su propia cuenca y los aportes provenientes del río Sinú a través de diversos caños, por su lado las salidas corresponden a la evapotranspiración generada en el área del complejo, los flujos de caudales hacia el río Sinú y el agua



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



destinada para actividades productivas como la ganadería o la agricultura (Correa, y otros, 2006).

Para los efectos de este estudio solo se consideraron las entradas de agua al sistema pues estas superarían a las salidas en los meses de lluvias y viceversa en los más secos además de tomar como parámetro de análisis las lluvias locales que se reflejan en los aportes directos de aguas a los humedales y la escorrentía que se genera dentro de la propia cuenca del complejo, debido a su mayor representatividad al momento de establecer las fechas que evidencien de mejor forma la estacionalidad del CCBS.

Las entradas de aguas al complejo correspondientes a las lluvias locales en estudios posteriores a la puesta en marcha de la hidroeléctrica Urra muestran cifras del 61 % y el 39 % restante provenientes del río Sinú, por medio del caño Bugre (33%) y Aguas Prietas (6%) (CVS, 2018). No obstante, estas dinámicas hídricas originales se han alterado por procesos como el inicio de obras de la ya mencionada hidroeléctrica, modificando los volúmenes de aguas aportados al CCBS además de la frecuencia y duración de los pulsos de inundación de sus humedales (Espitia, 2019).

Del mismo modo, el descenso continuo de los caudales transportados por el caño Bugre que anteriormente representaba la tercera parte de las aguas que llegaban al CCBS, a consecuencia de factores como la sedimentación y demás actividades antrópicas, ha generado que este drenaje pierda su representatividad con respecto al aporte de aguas al complejo a tal punto que entre los años 2014 y 2015 se registraron datos que para caudales del río Sinú de 600 m³/s se derivan al caño caudales en un rango de 8 a 11 m³/s, donde originalmente se derivaban entre 22 y 32 m³/s e incluso en este mismo periodo se presentaron momentos donde el flujo de agua hacia el caño fue nulo, esperando además una disminución anual de caudales del caño en cuestión de 1.82 m³/s por lo que se presume que la conectividad del caño desaparezca y que solo se conduzca agua durante épocas de caudales picos (de Leon & Llain, 2017).



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co

El intercambio de aguas por medio del caño Aguas Prietas exhibe un comportamiento bidireccional, el cual se da mayormente en sentido hacia el río y en menor medida hacia el complejo por reflujos, sin embargo, no se contó con información continua de los caudales del caño para el periodo de estudio que permitieran un adecuado análisis, al igual que los niveles que favorecen los reflujos de agua hacia el CCSB. Por lo anterior se esperaría la mayor relevancia de las lluvias locales a la hora de establecer las épocas estacionales del área de estudio.

➤ **Estimación de las lluvias locales del CCBS a partir de polígonos de Thiessen**

Para el cálculo de las lluvias locales se dispuso de datos de precipitaciones diarias de estaciones adyacentes al complejo obtenidos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), organizados de forma mensual entre los años 2015 y 2021 ya que estas podrían resumir las condiciones de las precipitaciones del complejo (Figura 8).

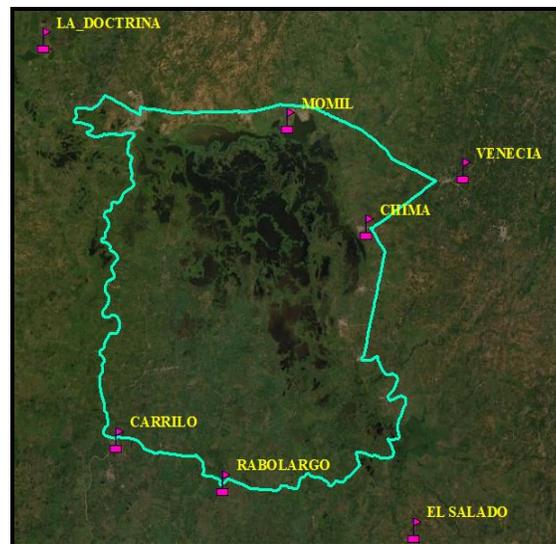


Figura 8. Ubicación estaciones meteorológicas asociadas al CCBS.

Finalmente, a partir de las estaciones seleccionadas se calcularon las precipitaciones promedio del CCBS mediante polígonos de Thiessen.



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i * A_i}{\sum A_i} \quad (1)$$

Donde:

P_i = precipitación puntual de la estación i

A_i = área de cada polígono de Thiessen

Los polígonos fueron calculados directamente, mediante ArcMap utilizando la herramienta “Create Thiessen Polygons”. Por otro lado, los datos de precipitaciones de fechas que no presentaron registro de mediciones fueron estimadas mediante el método de la razón, el cual consiste en obtener la razón q a partir de dos estaciones adyacentes (A y B), una vez seleccionadas ambas estaciones se calculó “ q ” como el coeficiente de la sumatoria de los datos de las dos estaciones.

$$q = \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{\sum_{i=1}^n a_i} \quad (2)$$

Donde:

b_i = precipitaciones i de la estación B (estación con datos faltantes)

a_i = precipitaciones i de la estación A (estación con todos los datos)

n = número de registros de cada estación

Luego, el valor estimado para los datos faltantes de la estación B se calcula como:

$$b_j = q a_j \quad (3)$$

Donde:

b_j = precipitación estimada para el momento j



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



a_j = precipitación registrada para el momento j en la estación de referencia (A)

➤ Selección de imágenes

Una vez identificadas las épocas estacionales se efectuó la descarga de imágenes satelitales PlanetScope con una resolución espacial de 3.125m para las fechas seleccionadas las cuales estuvieron sujetas a la disponibilidad de imágenes que cubran el total del área de estudio y bajos porcentajes de nubosidad, además de que estas pertenecieran a la última generación de sensores dispuesto por Planet (SuperDoves).

Objetivo 2: Evaluar índices espectrales disponibles para las imágenes PlanetScope seleccionadas que presenten las mejores potencialidades para delimitar superficies de agua y cubiertas vegetales

➤ Preprocesamiento

Los sensores satelitales recopilan sus datos a partir de la intensidad de la radiación electromagnética reflejada por las diferentes coberturas de la tierra, conocida como radiancia, dichos datos son representados mediante un valor numérico discreto llamado Nivel o Números Digitales (ND) (Galindo, Espejo, Rubiano, Vergara, & Cabrera, 2014) los cuales varían en función de las características del sensor y las condiciones ambientales al momento de la captura de las imágenes (Aguilar, Mora, & Vargas, 2014) por lo que para relacionar el conjunto de imágenes seleccionadas fue necesario ajustar los (ND) a valores de reflectancia, mediante la siguiente fórmula matemática establecida para los datos de las imágenes PlanetScope:

$$REF(i) = DN_s(i) * reflectanceCoefficient(i) \quad (1)$$

Donde:

$REF(i)$: Reflectancia para una banda específica

$DN_s(i)$: Nivel Digital para una banda específica

$reflectanceCoefficient(i)$: Coeficiente de reflectancia para una banda específica



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



La conversión de los datos de las imágenes a valores de reflectancia se llevó a cabo mediante la “Calculadora Ráster” de Qgis multiplicando cada una de las bandas por el coeficiente incluido en la metadata suministrada por la plataforma de descarga. El tipo de producto utilizado en esta investigación (PlanetScope Ortho Tile_analytic_sr) previamente ha sido objeto de diferentes procesos de calibración donde se ortorrectifican, es decir se eliminan distorsiones del terreno, además de ser corregidas radiométricamente lo que minimizaría incertidumbres en sus respuestas espectrales, permitiendo ser utilizadas directamente ya que no requieren procesos de corrección atmosférica adicionales.

➤ **Identificación de las coberturas de análisis**

Con base a una combinación infrarrojo color (R-Nir G-Green- B-Blue) y la buena resolución espacial de las imágenes PlanetScope más reciente, además del nivel de referencia obtenido a partir de trabajo en campo, se identificaron las coberturas que conforman el paisaje del CCBS. De esta forma se trazaron los polígonos ROI o semillas espectrales, las cuales sirvieron de base para identificar el comportamiento espectral de las coberturas en cada una de las bandas dispuestas.

➤ **Selección y cálculo de los índices espectrales**

La selección de los índices espectrales a utilizar se llevó a cabo mediante una revisión bibliográfica en la cual se tuvo como parámetro de selección aquellas investigaciones relacionadas, en las que su objeto de estudio fuera la delimitación y separabilidad de las diferentes coberturas de la tierra, principalmente especies de vegetación acuática flotante que enmascaran los cuerpos de aguas y conllevan a desestimaciones a la hora del cálculo de sus áreas, todo esto mediante índices espectrales adaptados a las cuatro bandas disponibles en las imágenes satelitales PlanetScope adquiridas (Blue, Red, Green, Nir), Una vez identificados los índices espectrales se procedió a su cálculo por medio de la calculadora ráster de Qgis, utilizando las ecuaciones matemáticas establecidas para cada uno de estos índices espectrales escogidos.



Certificado GP 134-1



Certificado SC 5278-1



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



Objetivo 3: Espacializar las superficies de aguas y coberturas vegetales acuáticas asociadas a las ciénagas del CCBS a partir de cinco índices espectrales, para las temporadas de análisis

➤ **Análisis de separabilidad de coberturas**

A partir de los puntos de referencia tomados para cada una de las coberturas de análisis dentro del complejo, se procedió a realizar sobre la imagen el muestreo espectral de manera individual para cada índice. A través del método de clasificación supervisada, usando el estadístico de mínima distancia (Wacker, 1972).

➤ **Selección del mejor índice para cartografiar las coberturas que conforman el paisaje del CCBS**

Obtenidos los datos estadísticos correspondientes al muestreo generado en la clasificación supervisada, para cada índice se establecieron los rangos espectrales de las clases asociadas al CCBS, siendo representados mediante gráficos de cajas y bigotes, con el fin de identificar aquellos que lograran separar todas las coberturas que constituyen el paisaje del CCBS.

➤ **Mapeo de las coberturas de análisis y estimación de las áreas de los cuerpos de aguas y vegetación acuática flotante**

La cartografía representativa de las épocas estacionales del CCBS se llevó a cabo luego de la unión de las clasificaciones generada en las diferentes escenas correspondientes a cada clase de estudio, en el índice espectral seleccionado, construyendo de este modo los mosaicos de la época seca y de lluvias a partir del perímetro del complejo. Los mosaicos posteriormente fueron vectorizados, generando los mapas temáticos. El nivel de detalle de la cartografía se estableció a partir de la metodología de Nagi (2012) quien lo representa como el tamaño del pixel (3.125 m) multiplicado por 2000 sin embargo, para efectos prácticos esta fue considerada como 1:10000.



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co

6. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Objetivo 1: Identificar las épocas estacionales del complejo cenagoso del bajo Sinú de acuerdo con la tendencia de los aportes de aguas al mismo, para la selección de las imágenes satelitales

➤ **Estimación de las lluvias locales del CCBS a partir de polígonos de Thiessen**

Las áreas de los polígonos de Thiessen asociados a cada estación estuvieron entre las 20286.78 Ha y las 398.47 Ha destacándose la mayor influencia de las estaciones Momil y Chima en el cálculo de las precipitaciones promedios (Anexo 1).

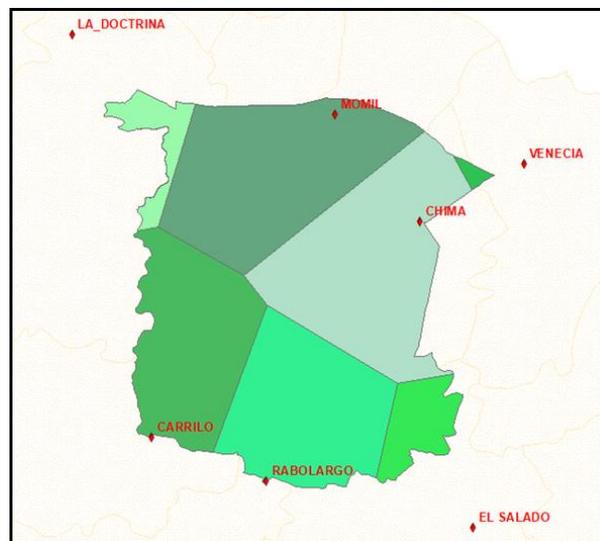


Figura 9. Polígonos de Thiessen.

De esta forma las precipitaciones promedias mensuales entre los años 2015 y 2021 correspondientes al complejo cenagoso del bajo Sinú se resumen en el (Gráfico 3) (Anexo 2).

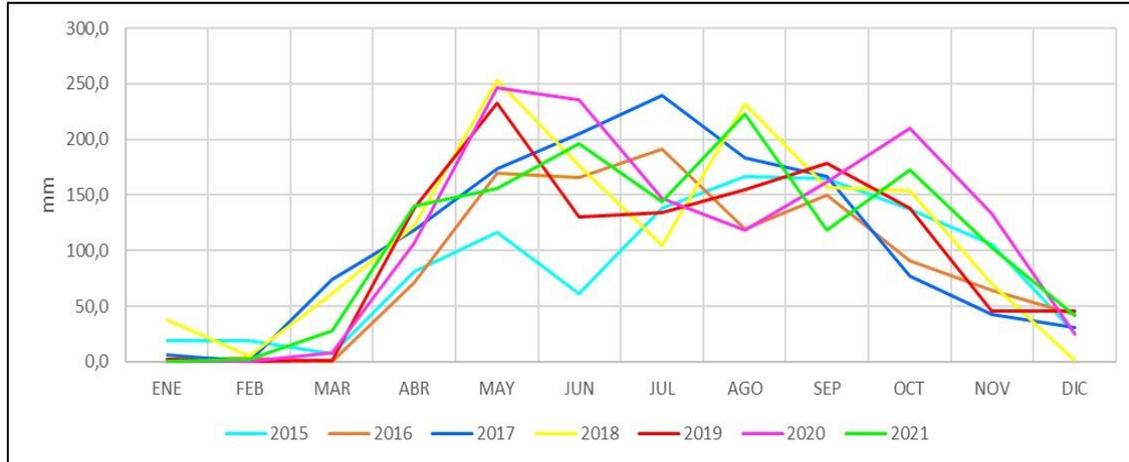


Gráfico 4. Precipitaciones mensuales para el complejo cenagoso del bajo Sinú.

De estos resultados se puede observar que los meses más secos estuvieron comprendidos de diciembre a marzo y posteriormente la aparición de las lluvias en el mes de abril, las cuales se mantienen hasta septiembre y luego empiezan a disminuir en el mes de octubre hasta final de año, lo que coincide con datos del IDEAM (2015), sin embargo, para los años 2017 y 2018 la época seca se redujo, dando inicio a las lluvias desde marzo, luego para el 2020 y 2021 las precipitaciones presentaron valores altos hasta noviembre. El promedio anual de lluvias locales correspondientes al CCBS durante este periodo (2015-2021) fueron de 1247.2 mm, presentándose el valor más alto en 2020 con 1394.8 mm en contraste con los 1043.3 mm del año 2015 el cual tuvo valor más bajo.

Los picos de precipitaciones para cada año se encontraron en los meses de mayo, julio y agosto mientras que los registros más bajos estuvieron en febrero, marzo y diciembre, por lo que fechas dentro de estos meses o cercanas a ellos representarían la estacionalidad del complejo y por tanto los periodos de almacenamiento de aguas permanentes y máxima inundación

➤ **Selección de imágenes:**



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



A partir de la identificación de las épocas de máxima inundación y almacenamiento de aguas permanentes representativas de la estacionalidad del complejo, se escogieron dos fechas de descarga correspondientes a una época seca y otra lluviosa.

La fecha escogida para la época seca fue el día 28 de marzo de 2021, la cual se ubicó dentro de un mes que registro un total de precipitaciones de 28 mm (Anexo 2) que si bien no fue el mes con menor cantidad de lluvias, los dos meses anteriores enero y febrero si fueron los más secos del año con precipitaciones totales de 0.7 mm y 1.9 mm respectivamente, incluso el mes de diciembre del año anterior estuvo marcado con registros de 25.3 mm, todo esto propicio que para la fecha escogida el CCBS estaría expuesto a una marcada época de sequía por lo que este momento sería adecuado para estimar las condiciones características del complejo durante su época seca. Las escenas que cumplieron con todos los factores de selección se resumen en la (Tabla 3).

Tabla 3. Imágenes seleccionadas para la época seca del CCBS.

ID	IMAGEN	FECHA	RES (m)
1	4314951_1843211_2021-03-28_2428_BGRN_Analytic	28/03/2021	3.125
2	4314951_1843212_2021-03-28_2428_BGRN_Analytic	28/03/2021	3.125
3	4314951_1843311_2021-03-28_2428_BGRN_Analytic	28/03/2021	3.125
4	4314951_1843312_2021-03-28_2428_BGRN_Analytic	28/03/2021	3.125

Por su parte la fecha seleccionada para la época de lluvias tuvo lugar el 20 de noviembre de 2021 con un total de precipitaciones promedio registradas para ese mes de 103 mm que representaron el valor más bajo entre los meses de abril hasta noviembre es decir lo meses húmedos (Anexo 2) por lo que para este momento el estado del complejo no llegaría a alcanzar sus condiciones de máximas inundación, no obstante, si bien fue el mes con menores precipitaciones, durante ese periodo de tiempo la constante afluencia de aguas hacia el complejo en menor y mayor medida ocasionó que las entradas de aguas superan la mayor parte del tiempo a sus salidas originando su acumulación, lo cual se refleja en la extensión de los cuerpos hídricos y la predominancia de las especies de vegetación



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co

flotante, generando las condiciones para un adecuado análisis de esta época estacional (Tabla 4).

Tabla 4. Imágenes seleccionadas para la época lluviosa del CCBS.

ID	IMAGEN	FECHA	RES (m)
1	5113338_1843211_2021-11-20_2430_BGRN_Analytic	20/11/2021	3.125
2	5113338_1843311_2021-11-20_2430_BGRN_Analytic	20/11/2021	3.125
3	5113706_1843211_2021-11-20_2406_BGRN_Analytic	20/11/2021	3.125
4	5113706_1843212_2021-11-20_2406_BGRN_Analytic	20/11/2021	3.125
5	5113706_1843311_2021-11-20_2406_BGRN_Analytic	20/11/2021	3.125
6	5113706_1843312_2021-11-20_2406_BGRN_Analytic	20/11/2021	3.125

Objetivo 2: Evaluar índices espectrales disponibles para las imágenes PlanetScope seleccionadas que presenten las mejores potencialidades para delimitar superficies de agua y cubiertas vegetales

➤ Preprocesamiento

La conversión de los datos de las imágenes satelitales de Niveles Digitales (ND) a valores de reflectancia, mostro una mejoría en la calidad de las imágenes puesto que con este proceso se logra la remoción de aerosoles y materia particulado propio del ambiente, reflejándose en el aumento del contraste de las imágenes.



a) Imagen en Niveles digitales



b) Imagen en valores de reflectancia

Figura 10. Conversión a valores de reflectancia.

➤ Identificación de las coberturas de análisis

	<p>Superficies de aguas libre</p> <p>Masas o extensiones de aguas sobre la superficie terrestre, en este caso el conjunto de humedales que conforman el CCBS como ciénagas y/o lagos además de los caños que generan sus conexiones</p>
	<p>Vegetación acuática sumergida</p> <p>Especies de vegetación acuáticas arraigadas o que no llegan a fijarse al suelo saturado y que no alcanzan a sobresalir a la superficie del agua</p>
	<p>Vegetación acuática flotante</p> <p>Plantas acuáticas que cuentan con raíces ancladas al fondo (flotantes arraigadas) o desprovistas de órganos de fijación, (flotantes libre) y que además sus hojas sobresalen hasta la superficie de las masas de aguas</p>
	<p>Vegetación acuática-terrestre</p> <p>Zonas con presencia de plantas acuáticas que debido a la desecación natural de las ciénagas son desplazadas hasta el sedimento húmedo del fondo de los humedales que no se alcanza a saturar completamente</p>
	<p>Vegetación terrestre</p> <p>Agrupación de especies de vegetación ubicadas en tierra firme y que su desarrollo no involucra a los entornos acuáticos</p>
	<p>Pantanos</p> <p>Suelos húmedos que no se alcanzan a saturar completamente y que carecen de presencia de vegetación de cualquier tipo</p>
	<p>Bancos de arenas</p> <p>Zonas de acumulación de sedimentos de tamaño relativamente grueso adyacentes a los cuerpos de aguas durante su desecación en época seca.</p>

Figura 11. Coberturas del complejo cenagoso del bajo Sinú.

Un recorrido en campo, en época seca, permitió identificar las coberturas que conforman el paisaje del CCBS (Figura 11): cuerpos de aguas, bancos de arenas, construcciones urbanas,

y diferentes tipos de vegetación tanto acuática como terrestre, las cuales fueron tomadas como nivel de referencia, localizándolas sobre una combinación de infrarrojo color (R-Nir G-Green- B-Blue) derivada de la imagen de época seca, referenciando de este modo los pixeles correspondientes a cada cobertura.

Cabe resaltar que la identificación de la vegetación acuática sumergida dentro de las imágenes, fue posible al introducir el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en la banda del rojo en la combinación infrarrojo color (R-Nir – G-Green – B-Blue), logrando visualizar zonas con tonalidades rojas propia de las especies de vegetación y al comparar estas mismas áreas con la imagen en color verdadero no se llega a visualizar que estas cubran los cuerpos hídricos por lo que a simple vista se tomaría como espejos de aguas (Figura 12).

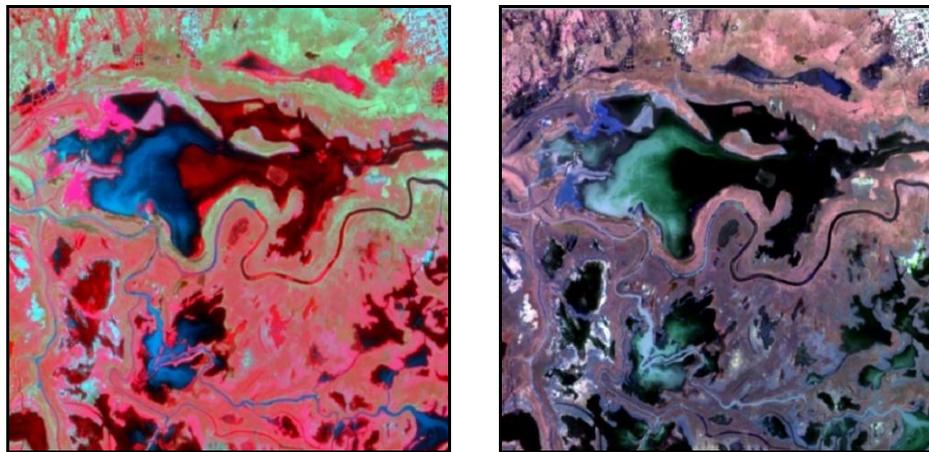


Figura 12. Visualización de zonas de vegetación acuática sumergida mediante combinaciones de bandas y su comparación con la imagen en color verdadero.

Adicionalmente se calcularon las firmas espectrales para cada cobertura, con el fin de identificar su comportamiento en las distintas regiones del espectro electromagnético, es decir la variación de los valores de reflectancia en cada una de las bandas de la imagen (Gráfico 5).

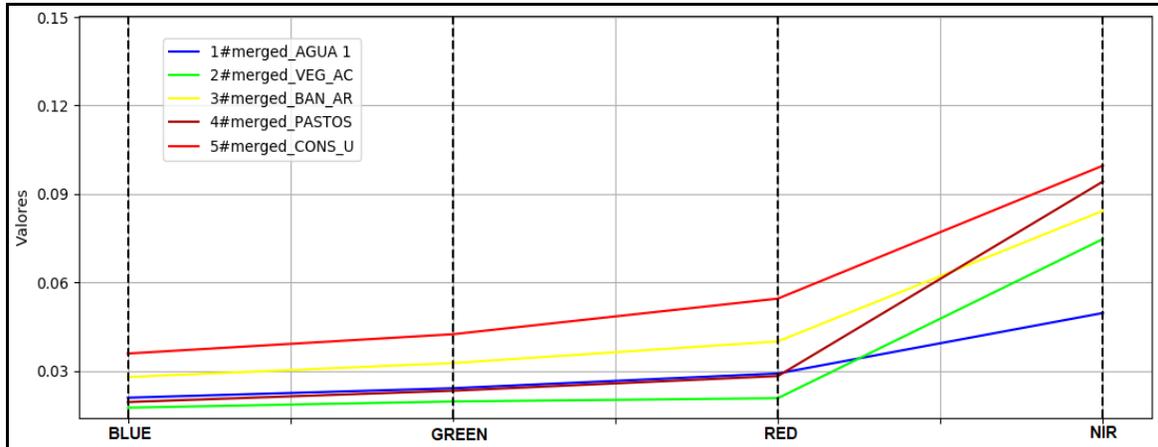


Gráfico 6. Firmas espectrales coberturas del suelo CCSB.

El agua mostro un ligero aumento en sus valores de reflectancia en el espectro visible, desde la banda azul a la roja, atribuido a su excelente propiedad de transmisión de la energía electromagnética en esta región espectral (Sarria, 2006), mientras que en el infrarrojo cercano contrario a lo esperado, se presentó un mayor aumento del porcentaje de reflectancia, aun cuando en esta región espectral la mayor parte de la energía es absorbida, esta variación estaría atribuida a elementos presentes en los cuerpos de aguas, como sedimentos y especialmente a las diferente especies de vegetación acuática sumergidas propias de los humedales del complejo arraigadas al fondo y/o en suspensión. No obstante, el agua fue la cobertura que menores valores de reflectancia mostro en esta última banda (NIR).

La vegetación acuática mantuvo valores muy bajos en la región del visible, solo variando ligeramente, resultados característicos de la vegetación sana, en contraste con el notable aumento presentado en el infrarrojo cercano debido a la alta actividad fotosintética de este tipo de vegetación. Ahora bien, se hubiese esperado mayores porcentajes de reflectancia en esta banda sin embargo los altos contenidos de humedad presentes en la vegetación disminuirían la reflectividad debido a la absorción de la radiación por parte del agua almacenada en las plantas (Sarria, 2006).



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



Por su parte la vegetación terrestre mostro una firma espectral con valores de reflectancia en la región del visible mayores a la vegetación acuática, ya que el muestreo se habría generado durante un periodo seco por lo que la pérdida de cloroplastos (lo que ocasiona la tonalidad pardo-amarillenta de las plantas en esta época) disminuiría la absorción de la radiación, mientras que en el infrarrojo cercano se obtuvieron porcentaje de reflectancia mayores precisamente debido a la disminución de la humedad almacenada en las plantas.

Los bancos de arenas mantuvieron respuestas espectrales relativamente simples ya que el suelo solo tiene la característica de absorber o reflejar la energía con una transmisión nula, los resultados mostraron altos valores en las longitudes de ondas de las tres primeras bandas, para luego alcanzar su pico en la región del infrarrojo cercano a razón de su clase textural. Finalmente, las áreas urbanas fueron las coberturas con mayor reflectividad en todas las regiones del espectro electromagnético, debido a la pobre capacidad de absorción de los materiales que componen a estas construcciones.

➤ Selección y cálculo de los índices espectrales

Por medio de los resultados de las investigaciones científicas consultadas fue posible discriminar los índices espectrales más adecuados para realizar la separabilidad de las coberturas de análisis, tomando a la vegetación acuática como la principal referencia a la hora de escoger dichos índices y luego calculados mediante la calculadora ráster de Qgis. Los índices se resumen en la Tabla 5:

Tabla 5. Ecuaciones índices espectrales.

INDICE	ECUACION	FUENTE
ENDVI	$(NIR+GREEN-2*BLUE)/(NIR+GREEN+2*BLUE)$	Song & Park (2020)
GNDVI	$(NIR-GREEN)/(NIR+GREEN)$	Taddeo, Dronova, & Depsky (2019)
NDVI	$(NIR-RED)/(NIR+RED)$	Carlson & Ripley (1997)



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



NDAVI	$(\text{NIR-BLUE}) / (\text{NIR+BLUE})$	Damtew, et al (2021)
WAVI	$(1+L) * (\text{NIR-BLUE}) / (\text{NIR+BLUE+L})$	Villa, et al (2014)

Objetivo 3: Espacializar las superficies de aguas y coberturas vegetales acuáticas asociadas a las ciénagas del CCBS a partir de cinco índices espectrales, para las temporadas de análisis

➤ **Análisis de separabilidad de coberturas**

Las semillas espectrales tomadas dentro de cada una de las coberturas establecidas fueron ocupadas como datos de entrada y posteriormente procesadas en Erdas Imagine, generando la clasificación supervisada y por tanto identificando los rangos espectrales de cada clase de estudio, como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Rangos espectrales de las coberturas de análisis para índice.

COBERTURA	RANGOS DE VALORES ESPECTRALES									
	ENDVI		GNDVI		NDAVI		NDVI		WAVI	
AGUA	0.083	0.454	-0.217	0.426	-0.035	0.552	0.197	0.481	-0.003	0.06
VEG_ACU_SUM	0.016	0.763	0.105	0.727	0.144	0.852	-0.004	0.755	0.039	0.166
VEG_ACU_FLO	0.806	0.919	0.774	0.896	0.888	0.956	0.777	0.934	0.362	0.499
VEG_ACU-TERR	0.324	0.905	0.386	0.888	0.473	0.948	0.28	0.918	0.289	0.398
VEG_TERR	0.364	0.83	0.483	0.831	0.532	0.903	0.378	0.825	0.238	0.287
PANTANO	0.547	0.836	0.58	0.813	0.689	0.906	0.438	0.827	0.204	0.236
B_ARENAS	0.442	0.783	0.455	0.8	0.581	0.869	0.324	0.759	0.167	0.202

➤ **Selección del mejor índice para cartografiar las coberturas que conforman el paisaje del CCBS**

La individualización de las clases de estudios mediante los índices ENDVI, GNDVI, NDAVI y NDVI exhibió resultados deficientes, a razón del amplio rango espectral abarcado por la vegetación acuática sumergida en cada uno de estos índices (Tabla 6), coincidiendo parcial y completamente con las demás coberturas, solo la vegetación acuática flotante logro estar por fuera de dicho rango. El análisis estadístico permite inferir que no



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co

sería posible la delimitación total de los cuerpos de aguas puesto que sus respuestas espectrales se interceptan con coberturas terrestres, así como la diferenciación de los tipos de vegetación analizadas y las zonas carentes de estas como los pantanos y bancos de arenas.

Hay que tener muy en cuenta, las diferentes limitantes que pudieron haber influido en estos resultados o que en su defecto habrían generado alguna mejoría, como la referenciación de las coberturas con un trabajo en campo más amplio y detallado o la disposición de un mayor número de bandas espectrales que pudiesen ser aplicadas en los índices.

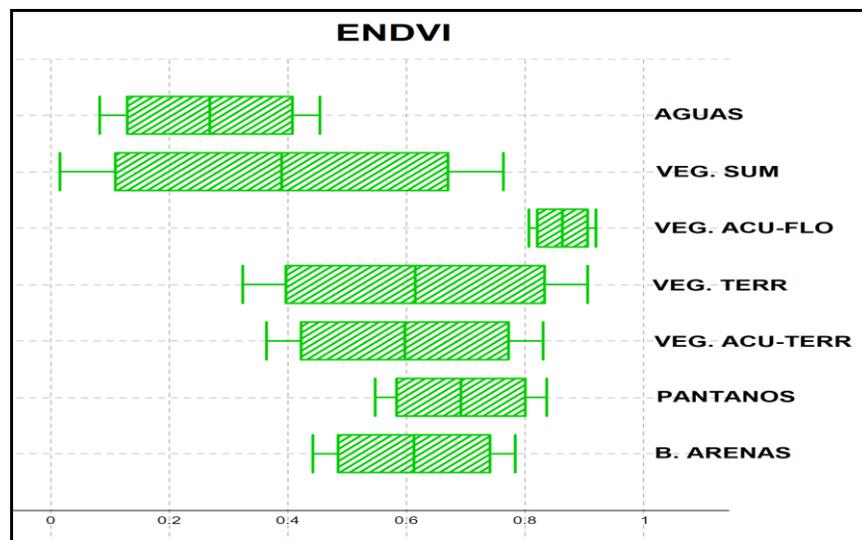


Gráfico 7. Rangos espectrales para las coberturas del CCBS mediante ENDVI.



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

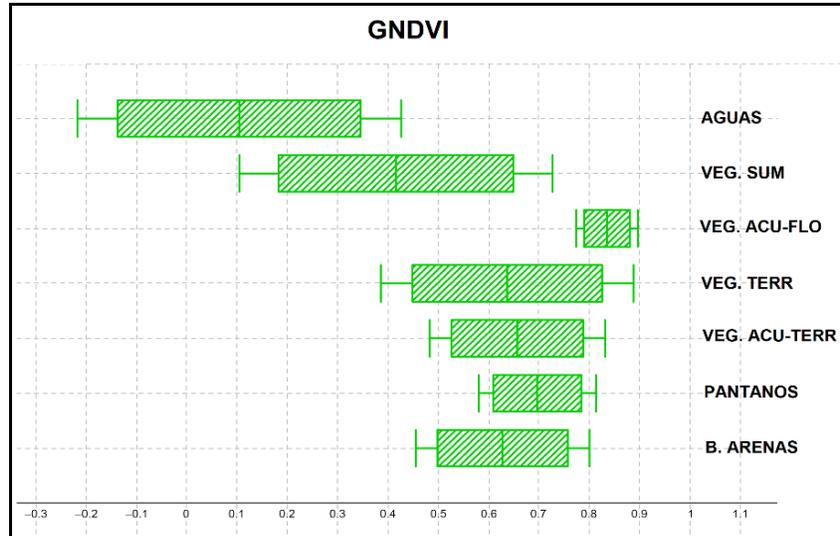


Gráfico 8. Rangos espectrales para las coberturas del CCBS mediante GNDVI.

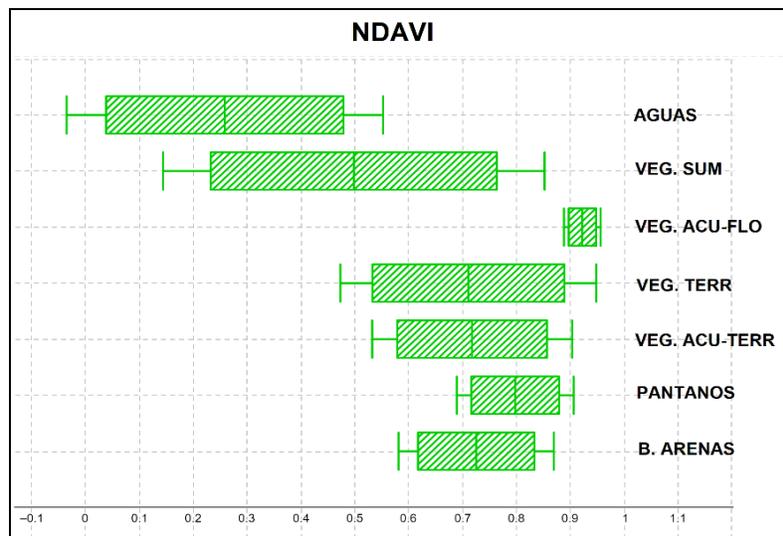


Gráfico 9. Rangos espectrales para las coberturas del CCBS mediante NDAVI.



Certificado GP 134-1



Certificado SC 5278-1



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co

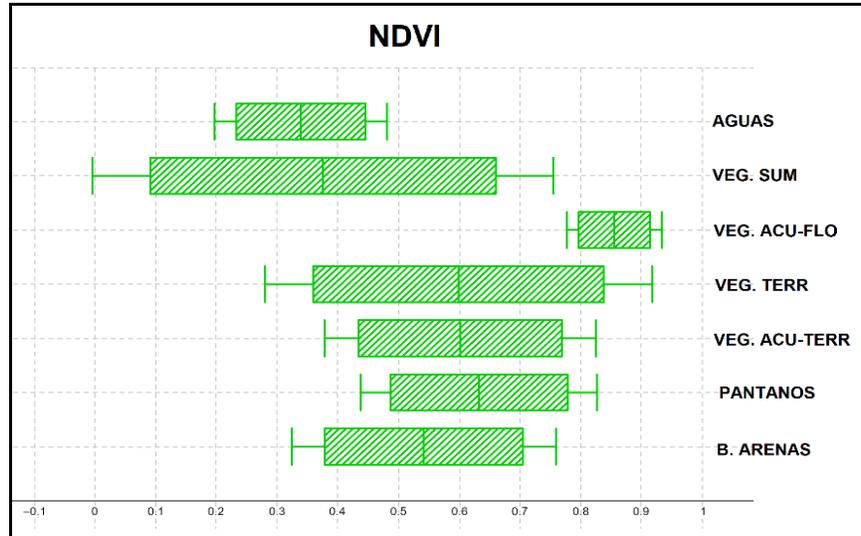


Gráfico 10. Rangos espectrales para las coberturas del CCBS mediante NDVI.

El índice de vegetación ajustada por agua (WAVI) contó con una notable mejoría con respecto a la separabilidad de las coberturas. Los cuerpos de agua junto con sus zonas de vegetación acuática sumergida, lograron individualizarse por completo de las demás coberturas (Gráfico 11), no obstante, sus rangos espectrales coincidieron parcialmente, lo que no supondría un limitante para que mediante este índice se llegase a delimitar los espejos de aguas ya que estarían conformados por estas dos clases, que junto con la vegetación acuática flotante conforman las áreas de los humedales.

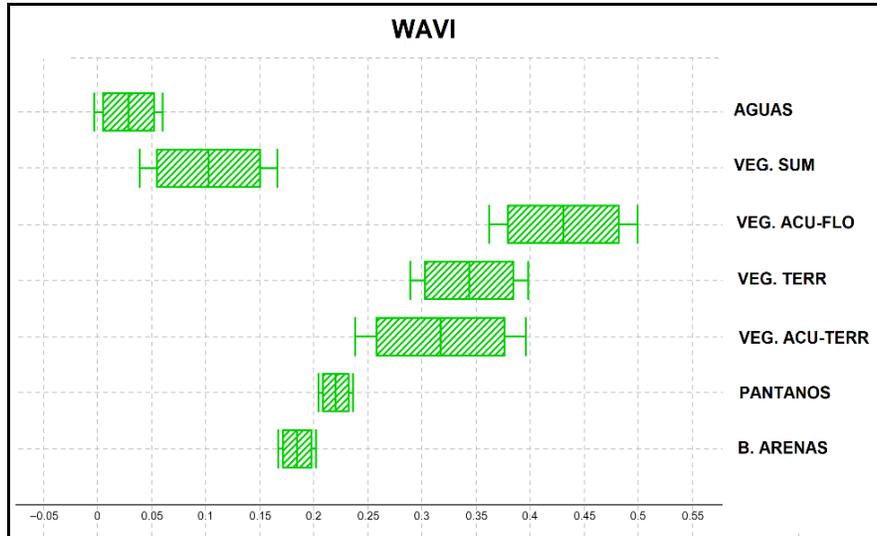


Gráfico 12. Rangos espectrales para las coberturas del CCBS mediante WAVI.

Por su parte la vegetación flotante, terrestre y acuática-terrestre en sus respuestas espectrales tomaron rangos con valores que coincidieron, aunque su separación de las demás coberturas fue completa. Esto ocasionó que no fuera posible establecer los límites reales de los humedales del complejo ya que la vegetación acuática emergente (flotante) al establecerse dentro de los cuerpos de aguas, debía ser individualizada completamente de los tipos de vegetación terrestre. Finalmente, los pantanos y bancos de arenas tuvieron resultados que quedaron por fuera de los rangos espectrales de las demás coberturas estableciendo una excelente capacidad para su separabilidad.

Por lo anterior, el índice de vegetación ajustada por agua (WAVI) fue el índice escogido para la clasificación de las coberturas del CCBS en sus épocas estacionales, debido a fue el que presentó los mejores resultados de separabilidad, a pesar de no haber categorizado completamente los diferentes tipos de vegetación ubicadas sobre la superficie del complejo, por lo que junto con la clasificación generada a partir de WAVI sería necesario implementar procesos de clasificación adicionales para lograr establecer las zonas correspondientes a los humedales.



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



➤ Mapeo de las coberturas de análisis y estimación de las áreas de los cuerpos de aguas y vegetación acuática flotante

Las escenas de Planet a razón de su resolución espacial, llegan a ser muy reducidas en sus áreas, por lo que en muchas ocasiones es necesario el uso de varias imágenes para lograr abarcar el total de las zonas de estudios, no obstante estas escenas pueden llegar a divergir en sus características, debido a cambios atmosféricos ya que no alcanzan a ser capturadas en el mismo momento o por diferencias entre los sensores, lo que puede generar diferencias de tonalidad de grises entre escenas homologas vecinas (Anexo 3). En este orden de ideas las clasificaciones obtenidas luego de aplicar WAVI se llevaron a cabo para cada escena individual y posteriormente fueron emparejadas construyendo los mosaicos para las épocas estacionales del CCBS, obteniendo el archivo ráster el cual fue reclasificado y vectorizado finalmente.

Existieron zonas o pixeles con valores que no corresponden al tipo de cobertura que representarían, a razón de la coincidencia de los rangos espectrales de algunas coberturas, por lo que para establecer con exactitud las áreas de las coberturas se identificaron estas zonas apoyados principalmente de la buena resolución espacial de las imágenes y luego fueron eliminadas manualmente, una vez removidos estos polígonos descritos como “Zonas Problemáticas” (Anexo 4, Anexo 5 y Anexo 6) se pudo proceder con la generación de la cartografía (Figura 13 y Figura 14).

Cabe destacar que para el agua y la vegetación acuática sumergida se tomó la clasificación original generada por (WAVI) a pesar de la intercepción de sus rangos espectrales ya que al generar el análisis visual se notó que las zonas de coincidencia eran mínimas, y ambas clases representarían espejos de aguas.



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

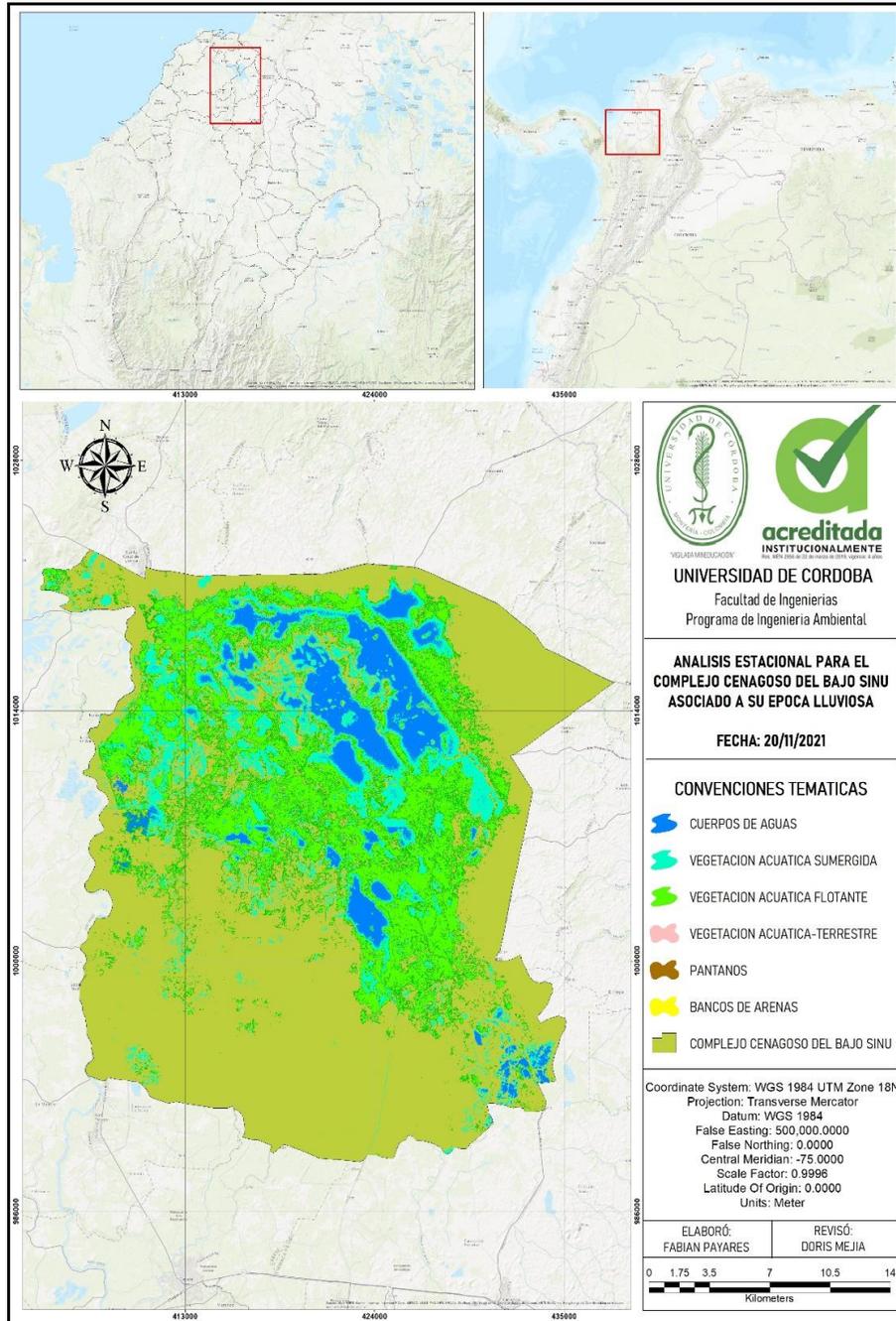


Figura 13. Cartografía asociada al CCBS para su época de lluvias



Certificado GP 134-1



Certificado SC 5278-1



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

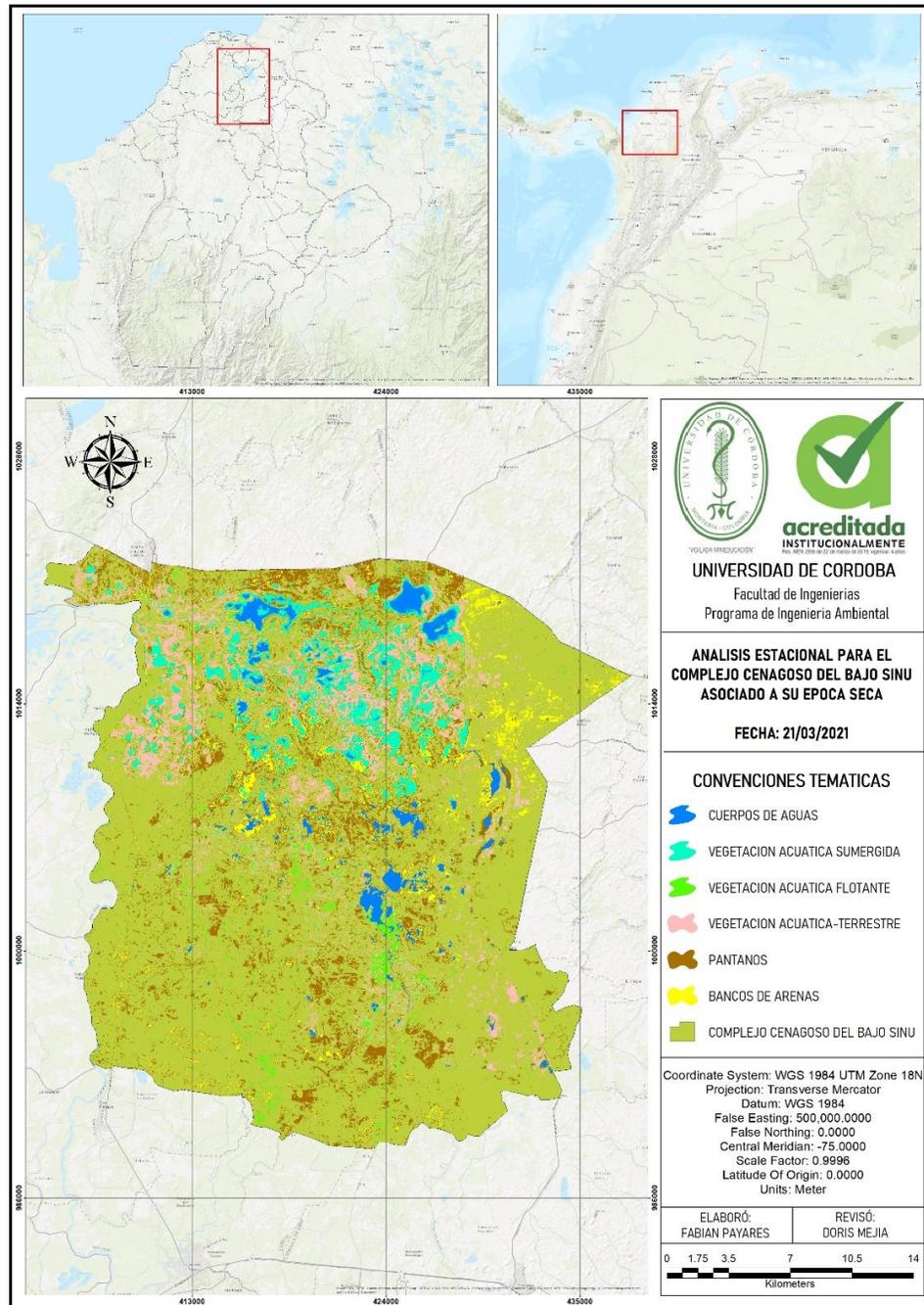


Figura 14. Cartografía asociada al CCBS para su época seca.



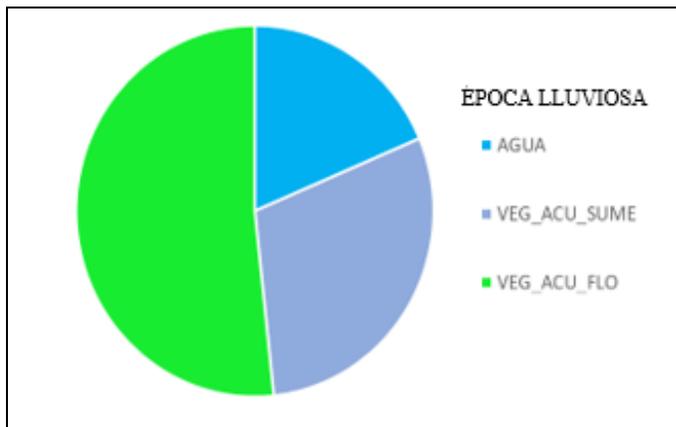
Certificado GP 134-1



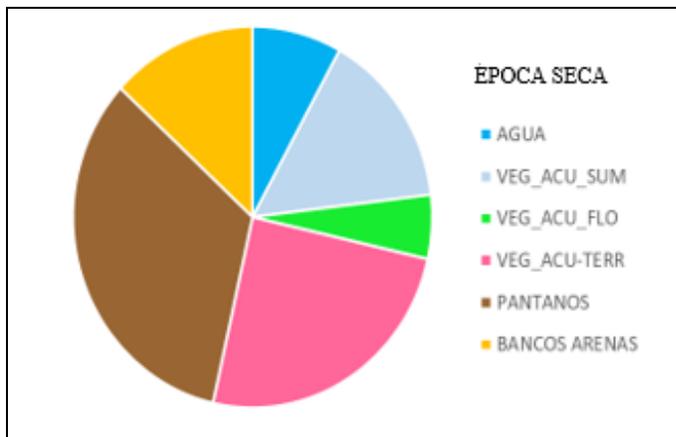
Certificado SC 5278-1



Los humedales del complejo cenagoso del bajo Sinú conformados por los cuerpos de aguas libre, vegetación acuática sumergida y la vegetación acuática flotante, al igual que las diferentes coberturas terrestres mostraron importantes cambios en su extensión, luego de la disminución natural de las precipitaciones durante la época seca.



COBERTURA	AREA(Ha)
AGUA	5257.2
VEG_ACU_SUM	8389.37
VEG_ACU_FLO	14601.83



COBERTURA	AREA(Ha)
AGUA	1999.2
VEG_ACU_SUM	3743.93
VEG_ACU_FLO	1347.64
VEG_ACU-TERR	6211.21
PANTANOS	8271.41
BANCOS ARENAS	3269.93

Gráfico 13. Áreas de las coberturas de análisis del CCBS para sus épocas estacionales.

Los humedales, conformados por los cuerpos de agua libre, vegetación acuática sumergidas y la vegetación acuática flotante, durante la época seca presentaron una extensión total de 7090.77 Ha, estos resultados al compararlos con los obtenidos durante la época de lluvias, 28248.4 Ha, representaría un aumento de casi cuatro veces con respecto al área de los



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



acreditada INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

humedales en el periodo de bajas precipitaciones, denotando la capacidad de expansión de estos ecosistemas y la importancia de preservar sus zonas de inundación.

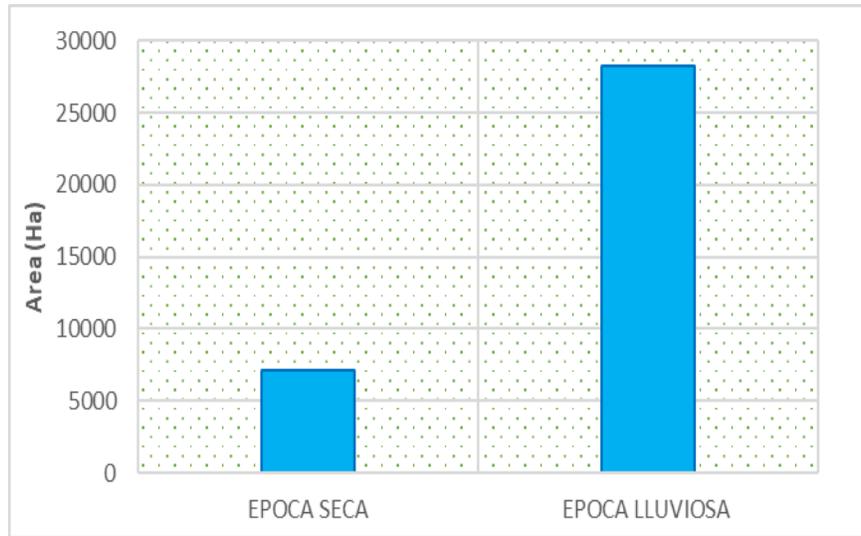
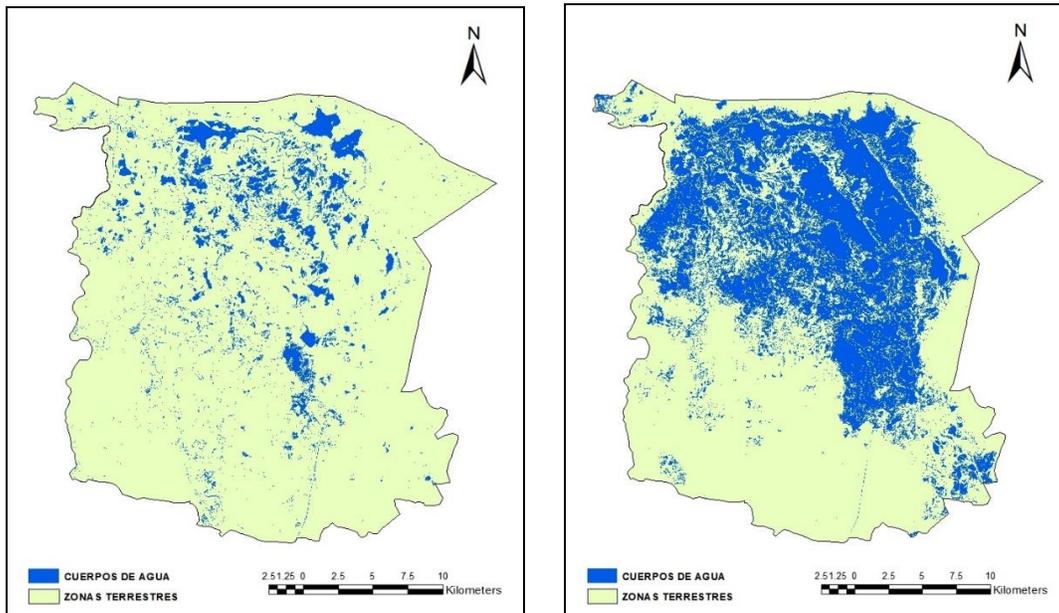


Gráfico 14. Área de los cuerpos de aguas del CCBS para sus épocas estacionales.



a) Época seca

b) Época de lluvias

Figura 15. Cuerpos de agua del CCBS para sus épocas estacionales.



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



Acosta & Morales (2021) determinaron el área total de los espejos de agua de tres épocas secas del CCBS (2014, 2017, 2020), en sus resultados se puede apreciar que la extensión de las áreas de los humedales en todos los periodos de estudios mantuvieron valores inferiores a los obtenidos en esta investigación, que si bien esto podría corresponder a menores incidencias de entradas de aguas al complejo hay que tener muy en cuenta que en este trabajo solo se calcularon los cuerpos de agua libre, sin considerar las áreas de vegetación acuática flotante, las cuales podrían llegar a generar desestimaciones al momento de calcular la extensión total de los humedales, especialmente en época de lluvias donde la proliferación de este de tipo de cobertura es altamente notable.

Por su parte los resultados obtenidos por Mejía et al (2019) presentaron las mismas similitudes, extensiones totales de humedales inferiores a las encontradas con los productos de Planet, incluso en periodos de estudios anteriores a la puesta en marcha de la hidroeléctrica de Urra, donde se indica que los patrones de inundación del complejo eran mayores, radicando aquí la importancia de establecer las zonas correspondientes a las especies de vegetación acuática. Así mismo la mayor resolución espacial de las imágenes PlanetScope facilitarían la identificación de pequeños cuerpos de aguas que quedarían exceptos en otros productos de menor resolución espacial.



Certificado GP 134-1



Certificado SC 5278-1



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



7. CONCLUSIONES

El complejo cenagoso del bajo Sinú expuesto a diversos tensores antrópicos ha sufrido un cambio notable en sus dinámicas de inundaciones, convirtiendo a los aportes directos de sus precipitaciones locales y la escorrentía generada en su propia cuenca como los factores más representativos a la hora de establecer sus épocas estacionales.

A lo largo de este trabajo se planteó la identificación de ciertas coberturas característica de dicha estacionalidad, por medio del uso de imágenes satelitales PlanetScope que tienen una alta resolución espacial y temporal al igual que la implementación de diferentes índices espectrales, con el fin de generar una cartografía reciente, previa a la construcción de la variante nacional en Loricá la cual supondría serias afectaciones a las dinámicas naturales del ecosistema en cuestión.

Así las cosas, si bien es cierto que este tipo de imágenes se exhibía como un producto capacitado para generar una representativa clasificación de las coberturas de estudio, debido a sus características espaciotemporales, los resultados obtenidos no permitieron generar la individualización total de las clases de análisis, por lo que se tuvo que recurrir a procesos de corrección manuales. De este modo los índices espectrales seleccionados no fueron capaces de establecer una categorización de los rangos espectrales de las coberturas del CCBS para sus épocas estacionales. No obstante, no se puede dejar de mencionar las restricciones con respecto a la disponibilidad del total de bandas para los productos de los instrumentos PSB.SD (SuperDoves) ya que el uso de bandas adicionales a la hora de calcular los índices podrían haber mejorado los resultados.

Las diferentes generaciones de sensores disponibles para el tipo de producto utilizado, a la fecha cuenta con muy poco desarrollo a comparación de las plataformas tradicionales como Landsat con siete décadas en funcionamiento, esto ocasiona que la periodicidad de captura de datos y la alta resolución espacial principales características de este tipo de imágenes no



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



puedan ser aprovechadas plenamente, por lo que dichas imágenes al momento tendrían mejores usos en investigaciones que involucren interpretaciones visuales en contraste con los procesamientos para flujos de trabajo analíticos como los utilizados en esta investigación.

8. RECOMENDACIONES

Las presiones ambientales a las cuales se ha sometido al complejo cenagoso del bajo Sinú han generado una notable alteración de sus dinámicas ecosistémicas naturales, aun así, se prevé la implementación de nuevas obras de infraestructuras totalmente ajenas a su entorno como la variante nacional en Loricá, que acrecentaría las condiciones críticas denotadas actualmente por el complejo cenagoso.

En consecuencia, se recomienda continuar con la realización de investigaciones asociadas al monitoreo de este ecosistema con el fin de contribuir en la gestión de políticas ambientales que se adecuen a los escenarios actuales, impidiendo o minimizando los impactos ocasionados por las diversas actividades antrópicas.

Es por esto que a razón de los resultados obtenidos se aconsejaría para la caracterización y delimitación de los humedales y las demás coberturas del complejo cenagoso del bajo Sinú, a partir de las imágenes satelitales PlanetScope disponibles hasta la fecha y sus usos mediante índices espectrales, dirigir estos estudios a zonas más locales reduciendo de este modo la cantidad y los tipos de las coberturas presentes para el análisis, ya que al momento de generalizar estas clases de estudio aumentaría su representatividad, puesto que al agrupar sus muestras la variación de sus respuestas espectrales llegaría a ser menor, facilitando su categorización. Además de esto sería recomendable acompañar estos proyectos de investigación con un trabajo en campo capaz de identificar subcategorías dentro de cada cobertura, como por ejemplo las diferentes especies de vegetación acuática.



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



flotante ubicadas en los cuerpos de aguas verificando de este modo cuales serían las clases o especies incapaces de ser individualizadas.

Finalmente, es muy importante aprovechar al máximo los reducidos intervalos de recolección de datos y resolución espacial de las imágenes satelitales PlanetScope en comparación con los productos de las plataformas de observación tradicionales, aplicando sus usos a análisis visuales, además de potenciar sus usos analíticos mediante técnicas de correlación existentes capaces de ajustar los datos radiométricos de las imágenes PlanetScope a partir de los valores de productos más potentes como Landsat o Sentinel las cuales estuvieron por encima de los alcances de este trabajo, todo esto mientras Planet continua con la evolución de sus productos y la comunidad científica desarrolle nuevos algoritmos y software para sus procesamientos.



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



9. BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, J. G., & Morales, C. (2021). *ANÁLISIS ESPACIAL Y TEMPORAL DEL COMPLEJO CENAGOSO DEL BAJO SINÚ EN ÉPOCAS SECAS DURANTE LOS PERIODOS 2014-2017-2020 EN EL DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA COLOMBIA*. Universidad Antonio Nariño, Bogotá.
- Acosta, K. (2013). *La economía de las aguas del río Sinu*. Banco de la republica: Documentos de Trabajo Sobre Economía Regional, Cartagena .
- Acosta, R. J., & Morales, F. C. (2021). *ANÁLISIS ESPACIAL Y TEMPORAL DEL COMPLEJO CENAGOSO DEL BAJO SINÚ EN ÉPOCAS SECAS DURANTE LOS PERIODOS 2014-2017-2020 EN EL DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA COLOMBIA*. UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO, Bogotá.
- Aguilar, A. H., Mora, Z. R., & Vargas, B. C. (2014). Atmospheric correction methodology for aster, rapideye, spot 2 and landsat 8 images with envi flaash module software. *Revista Geográfica de América Central*, 39*59.
- Ambiente, M. d. (2002). *Politica Nacional para Humedales Interiores de Colombia*. Bogota D.C.
- ANLA, A. N. (10 de Julio de 2015). *AUTO N° 2697*.
- ANLA, A. N. (19 de Mayo de 2015). *AUTO N° 1935*.
- ANLA, A. N. (2015). *AUTO N° 2697 SUBDIRECTORA DE EVALUACION Y SEGUIMIENTO DE LA AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES-ANLA*.
- Arroyave, M. d., Gomez, C., Gutierrez, M. E., Munera, D. P., Zapata, P. A., Cristina, V. I., . . . Ramos, k. C. (2006). Impactos de las carreteras sobre la fauna silvestre y sus principales medidas de manejo. *EIA técnico-científica Escuela de Ingeniería de Antioquia*.
- Atencia, V. A., Contreras, J. J., & Vergara, D. M. (2008). *Estudio multitemporal de imágenes satelitales con fines de delimitación del Complejo Bajo San Jorge Margen Izquierdo (B13) y diagnóstico de zonas intervenidas intervenidas antrópicamente (agricultura y ganadería)*. Sincelejo: Universidad de Sucre.
- Ballesteros, E. (2012). *Análisis de la adaptación de poblaciones a un territorio caracterizado por sistemas hídricos, teniendo como centro de atención las actividades productivas del municipio de Lorica y su región y su incidencia en la planificación territorial*. Bogotá D.C.
- Barrios, G. E., Cardenas, d. l., & Rios, K. J. (2015). *Cambios y afectaciones en los medios de vida asociados a las dinámicas ambientales de pobladores rurales del Bajo Sinu. Caso: Comunidad de el Playon, municipio de Lorica, Cordoba, Periodo 1992-2012*. Universidad Tecnológica de Bolívar, Facultad de Economía y Negocios, Cartagena.



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



Camacho, C. X. (2020). *Análisis de las dinámicas socioambientales que influyen en la transformación de la cobertura terrestre-ciénaga grande del bajo Sinu*. Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá.

Camargo, A. (2012). Landscapes of Fear: Water Grabbing, Wetland Conservation, and the Violence of Property in Colombia. *International Conference on Global Land Grabbing II. Land Deals Politics Initiative*.

Cardenas, A. C. (2020). *Análisis de la Dinámica Espacial de la Ciénaga de Betancí durante los años 1985, 2001, 2015 y 2020 mediante imágenes satelitales Landsat*. Montería: Universidad de Córdoba.

Carlson, T. N., & Ripley, D. A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote sensing of Environment*.

Casarrubio, R. J., Ballesteros, C. J., Gil, N., Ruiz, O., & Reyes, K. (2008). Avifauna asociada al complejo cenagoso del bajo Sinu, departamento de Córdoba, Colombia. *Biología, Ciencias, ACCB, biológicas*.

Convención de Ramsar sobre los Humedales. (2018). *PERSPECTIVA MUNDIAL SOBRE LOS HUMEDALES: estado de los humedales del mundo y de los servicios que prestan a las personas*. Gland (Suiza): Secretaría de la Convención de Ramsar.

Correa, P. L., Velez, J. I., Smith, R. A., Velez, A. J., Barrientos, A. E., & Jesus, D. G. (2006). Metodología de balance hídrico y de sedimentos como herramienta de apoyo para la gestión integral del complejo lagunar del bajo Sinu. *Avances en Recursos Hidráulicos*(14), 71-86.

CVS, C. A. (2018). *Acuerdo Consejo Directivo NO 362 "Por el cual se resuelve una solicitud de sustracción del Distrito Regional de Manejo Integrado, del complejo Cenagoso del Bajo Sinú"*.

CVS, C. A. (21 de Julio de 2021). Proyecto variante de Lorica y trámite de sustracción del DRMI del complejo cenagoso del bajo Sinú. *Boletín de Prensa*. Montería.

Damtew, Y. T., Verbeiren, B., Awoke, A., & Triest, L. (2021). Satellite Imagery and Field Data of Macrophytes Reveal a Regime Shift of a Tropical Lake (Lake Ziway, Ethiopia). *Water*.

de la Fuente, A., Meruane, C., & Soares, F. (20 de February de 2021). Long-term spatiotemporal variability in high Andean wetlands in northern Chile. *Science of The Total Environment*, 756.

de Leon, O. F., & Llain, T. N. (2017). *Evaluación de alteración de la conectividad hidráulica entre el río Sinu y el complejo de ciénagas de Lorica a través del caño Bugre por medio de un modelamiento en hecras*. Bogotá D.C.

de Moel, H., van Alphen, J., & Aerts, J. C. (2009). Flood maps in Europe – methods, availability and use. *Natural Hazards and Earth System Sciences*.



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



- Díaz, C. I., de Jesús, S. L., & Burguillo, C. M. (2018). *Servicios Ecosistémicos En Humedales*. Ciudad de México .
- Espitia, L. (2019). *Efectos de la ampliación de las fronteras agropecuarias en el complejo cenagoso del bajo Sinú para los años 1970 - 2019*. Montería.
- Estrada, G. Y. (2010). *Monografía sobre humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS) para remoción de metales pesados en aguas residuales*. Universidad Tecnológica de Pereira .
- Frazier, A. E., & Hemingway, B. L. (2021). A Technical Review of Planet Smallsat Data: Practical Considerations for Processing and Using PlanetScope Imagery. (A. Kokhanovsky, & J. Vazquez, Edits.) *Remote Sensing*.
- Galindo, G., Espejo, O. J., Rubiano, J. C., Vergara, L. K., & Cabrera, E. (2014). *Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación en Colombia*. Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, Bogotá D.C.
- González, N. E., & González, A. L. (2015). *Análisis multitemporal del espejo de agua en la laguna de Funequé para el periodo de 1985 - 2015*. Manizales: Universidad de Manizales.
- Houborg, R., & McCabe, M. F. (2016). High-Resolution NDVI from Planet's Constellation of Earth Observing Nano-Satellites: A New Data Source for Precision Agriculture. *Remote Sens*.
- Huang, H., & Roy, D. (2021). Characterization of PlanetScope-0 PlanetScope-1 surface reflectance and normalized difference vegetation index continuity. *Science of Remote Sensing*, 3.
- Ibañez, J. J. (6 de junio de 2016). *Fundación para el conocimiento Madrid*. Obtenido de Humedales y suelos hidricos: Aspectos básicos y necesidad de investigación: <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2016/06/06/147080>
- IDEAM, I. d. (1998). *Humedal del valle del río Sinú*. Ministerio de Ambiente .
- IDEAM, I. d. (2015). *Atlas Climatológico de Colombia-Interactivo*. (IDEAM, Editor) Obtenido de http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/cordoba_texto.pdf
- Klein, I., Dietz, A. J., Gessner, U., Galayeva, A., Myrzakhmetov, A., & Kuenzer, C. (2014). Evaluation of seasonal water body extents in Central Asia over the past 27 years derived from medium-resolution remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 26, 335-349.
- Lopez, P. J., Vasquez, R. V., & Gomez, A. L. (2010). Humedales.
- Luque, V. O. (2013). *Propuesta de ordenamiento territorial de la zona inundable del municipio de Momil-Cordoba*. Universidad del Norte, Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Barranquilla.



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



- Martinez, A. A., Rodriguez, J. M., & Cabrera, H. A. (2014). Los paisajes de humedales, Marco conceptual y aspectos metodologicos para su estudio y ordenamiento . *Mercator* .
- Mejia, A. D., Soto, B. V., & Martinez, L. Z. (2019). Spatio-temporal modelling of wetland ecosystems using Landsat time series: case of the Bajo Sinú Wetlands Complex (BSWC)– Córdoba– Colombia. *Annals of GIS*, 231-245.
- Mishra, V., S. Limaye, A., Muench, R. E., Cherrington, E. A., & Markert, K. N. (2020). Evaluating the performance of high-resolution satellite imagery in detecting ephemeral water bodies over West Africa,. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 93.
- MITECO, M. p. (2003). Plan Estratégico Español para la Conservación y el Uso Racional de los Humedales, en el marco de los ecosistemas acuáticos de que dependen.
- Parra, A., & Hernández, F. (Diciembre de 2010). IDENTIFICACIÓN Y DELIMITACIÓN DE HUMEDALES LÉNTICOS EN EL VALLE ALTO DEL RÍO CAUCA MEDIANTE EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES DE SATÉLITE. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, 77-88.
- Patiño, J. E. (julio de 2016). Análisis espacial cuantitativo de la transformación de humedales continentales en Colombia. *Biota Colombiana*, 17(1).
- Planet, L. P. (2022). *PLANET*. Obtenido de <https://www.planet.com/products/platform/>
- Planet. (2022). *Planet imagery product specifications*. Obtenido de https://assets.planet.com/docs/Planet_Combined_Imagery_Product_Specs_letter_screen.pdf
- Quintana, R. D. (junio de 2018). Humedales, biodiversidad y servicios eco sistémicos. ¿Hacia dónde vamos? *Universidad Nacional de San Martín y Fundación Innovación Tecnológica (FUNINTEC)*.
- Ramos, M. C. (2018). *Variacion espacio-temporal de los ecosistemas de humedales altoandinos en el anexo de Chalhuanca del distrito de Yanque (Caylloma, Arequipa) entre los años 1986-2016*. Arequipa .
- Ramsar, c. s. (2018). Perspectiva mundial sobre los humedales: estados de los humedales del mundo y de los servicios que prestan a las personas 2018. Ramsar : Secretaría de la Convención de Ramsar 2018.
- Ricaurte, L. F., Olaya-Rodríguez, M. H., Cepeda-Valencia, J., Lara, D., Arroyave-Suárez, J., Finlayson, M., & Palomo, I. (Mayo de 2017). Future impacts of drivers of change on wetland ecosystem services in Colombia. *Global Environmental Change*, 44, 158-169.
- SAG, S. A. (2006). *Conceptos y criterios para la evaluacion ambiental de humedales*. Gobierno de Chile.



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CORDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



- Salazar, M. I. (2008). *Lugar encantado de las aguas: Aspectos economicos de la cienaga Grande del bajo Sinu*. Banco de la republica: Documentos de Trabajo Sobre Economia Regional, Cartagena.
- Sarria, F. A. (2006). *Sistemas de informacion geografica*. Murcia: Universidad de Murcia.
- Scott, D. A., & Carbonell, M. c. (1986). *Inventario de humedales de la región neotropical*. (R. U. Slimbridge, Ed.)
- Sepulveda, V. R. (2015). Conflictos socioambientales en la cuenca baja del rio Sinu, Colombia. *REDESG/ Revista Direito Emergentes na Sociedade Global*.
- Sepulveda, V. R., Taborda, C. M., & Fuentes, D. D. (2020). Conflictos por el agua y resiliencia comunitaria en el Bajo Sinú: evidencias. *UTOPIA Y PRAXIS LATINOAMERICANA*.
- Song, B., & Park, K. (2020). Detection of Aquatic Plants Using Multispectral UAV Imagery and Vegetation Index. *remote sensing*.
- Taddeo, S., Dronova, I., & Depsky, N. (2019). Spectral vegetation indices of wetland greenness: Responses to vegetation structure, composition, and spatial distribution. *Remote Sensing of Environment*.
- ten Brink, P., Russi, D., Farmer, A., T, B., Coates, D., Förster, J., . . . Davidson, N. (2013). La Economía de los Ecosistemas y la Biodiversidad relativa al agua y los humedales. Resumen ejecutivo.
- Torres, A. A., & Yances, Q. A. (2016). *EFFECTOS AMBIENTALES OCASIONADOS POR LA REDUCCION DE LA SUPERFICIE INUNDABLE DEL COMPLEJO CENAGOSO DEL BAJO SINU*. Monteria: Universidad de Cordoba.
- Torres, P. L. (2020). *VARIACION ESPACIAL Y TEMPORAL DEL COMPLEJO DE AGUA CORRESPONDIENTE A LA CIENAGA DE AYAPEL-CORDOBA DURANTE EL PERIODO 2000-2018*. Universidad de Cordoba.
- Toyra, J., & Pietroniro, A. (2005). Towards operational monitoring of a northern wetland using geomatics-based techniques. *Remote Sens. Environ*, 174-191.
- UICN, U. M. (1992). *Conservacion de humedales. Un analisis de temas de actualidad y acciones necesarias*. (P. J. Dugan, Ed.) Gland, Suiza.
- Valle, M. D. (2020). *Analisis multitemporal de los espejos de agua en la margen izquierda del rio Sinu en el Municipio del Loricá para los años 1973-2020*. Universidad de Cordoba, Departamento de geografia y medio ambiente , Monteria.
- Villa, P., Bresciani, M., Braga, F., & Bolpagni, R. (2014). Comparative Assessment of Broadband Vegetation Indices Over Aquatic Vegetation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*.



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



Villamil, M. A. (2021). Cambios en la cobertura vegetal y red hidrica del complejo cenagosos de Ayapel (Cordoba), en relacion a las actividades extractivas no renovables y aspectos socioeconomicos de la poblacion pesquera 1991-2021. *Universidad de Cordoba*.

Wacker, A. G. (1972). *Minimum distance approach to classification*. Purdue University.

WWF, F. M. (6 de Marzo de 2018). *WWF, Fondo Mundial para la Naturaleza*. Obtenido de Glosario ambiental: servicios ecosistemicos ¿que?: <https://www.wwf.org.co/?324210/Glosario-ambiental-Servicios-ecosis-que>



Certificado GP 134-1



Certificado SC 5278-1



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



ANEXOS

Anexo 1. Área Polígonos de Thiessen.

ESTACION	LAT	LONG	AREA_Ha
CARRILLO	8.98444	-75.83178	14907.12384
CHIMA	9.15075	-75.62208	20855.52146
LA_DOCTRINA	9.29722	-75.89278	2857.918592
MOMIL	9.23444	-75.68806	20286.78303
RABOLARGO	8.95061	-75.74247	15790.9619
EL SALADO	8.91389	-75.58222	3984.546378
VENECIA	9.19528	-75.54111	398.4794225
		TOTAL	79081.3346

Anexo 2. Precipitaciones promedio mensuales para el complejo cenagoso del bajo Sinú 2015-2021.

PRECIPITACIONES MEDIAS PARA EL COMPLEJO CENAGOSO DEL BAJO SINU (mm)													
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PP ANUAL
2015	19.4	19.3	7.7	81.0	116.4	61.2	138.1	166.8	164.7	137.6	105.4	25.8	1043.4
2016	2.4	3.1	0.0	71.0	169.2	165.5	191.2	119.1	150.4	90.9	64.4	43.1	1070.4
2017	6.5	0.2	74.2	118.5	173.6	205.2	239.2	183.4	166.6	77.5	42.3	31.3	1318.5
2018	38.2	5.4	61.2	122.7	253.5	176.0	104.9	231.4	156.7	153.7	70.3	1.2	1375.2
2019	2.7	0.8	1.7	138.4	232.8	130.0	134.1	154.7	178.4	138.2	45.9	45.7	1203.4
2020	0.6	0.4	8.7	107.1	246.1	235.5	147.3	118.4	161.7	209.8	133.7	25.3	1394.8
2021	0.7	1.9	28.0	139.9	155.5	196.0	144.4	222.5	118.1	172.8	103.0	41.6	1324.5



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

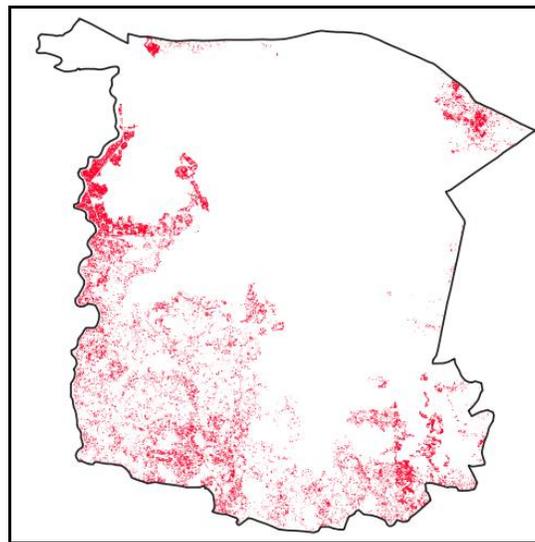
Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



Anexo 3. Comparación de escenas capturadas para dos imágenes satelitales PlanetScope obtenidas para una misma fecha pertenecientes de tipos y sensores diferentes (izquierda: Dove-R, derecha: Superdoves).



Anexo 4. Zonas problemáticas vegetación acuática terrestre y vegetación terrestre para la época seca del CCBS (21/03/2021).



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

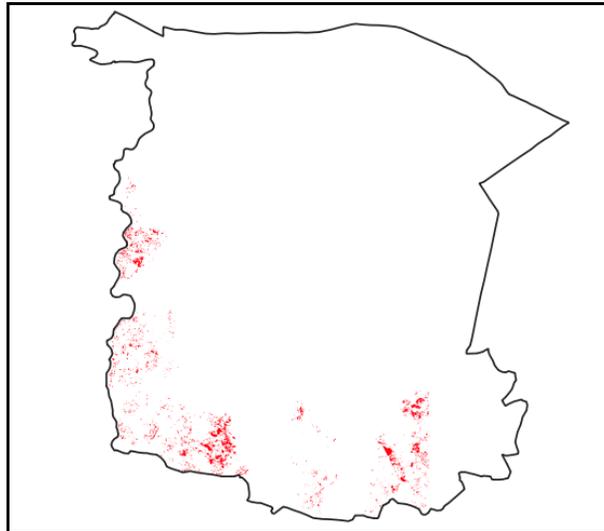
INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías

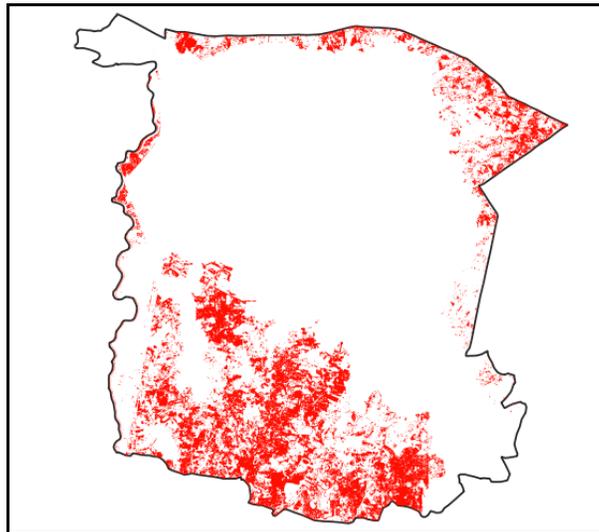


acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

Anexo 5. Zonas problemáticas vegetación acuática flotante y vegetación terrestre para la época seca del CCBS (21/03/2021).



Anexo 6. Zonas problemáticas vegetación acuática flotante y vegetación terrestre para la época lluviosa del CCBS (20/11/2021).



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co