



Imagen tomada de Pixabay.com

Capítulo 6

Análisis multitemporal del comportamiento de las áreas húmedas y las plumas de sedimentos de la subregión La Mojana entre 1982 y 2022

Multi-Temporal Analysis of the Behavior of Wet Areas and Sediment Plumes of La Mojana Subregion between 1982 and 2022

Mendoza-Atencio, M. A.¹, Herrera-Arango, J.¹, Rosso-Pinto, M. J.¹, Marrugo-Negrete, J. L.¹, Paternina-Urbe, R.¹

¹ Grupo de Investigación en Agua, Química Aplicada y Ambiental, Departamento de Química, Facultad de Ciencias Básicas de la Universidad de Córdoba, Sede Montería, Córdoba, Colombia.

* Autor de correspondencia: mariangelica-12@hotmail.com

Resumen

Un análisis multitemporal espacial compara las coberturas a través de la interpretación de información obtenida mediante sensores remotos de un mismo lugar en diferentes fechas. Asimismo, la combinación de diferentes bandas espectrales permite la visualización de diversas características que a simple vista pueden ser indetectables, como presencia de vegetación, cambios en la superficie del agua, concentración de sedimentos y demás. La subregión La Mojana, distribuida en cuatro departamentos al norte de Colombia, ha sufrido impactos climáticos considerables en diferentes periodos, derivados de los efectos del fenómeno El Niño Oscilación del Sur. Teniendo en cuenta que, la región es una zona de almacenamiento hídrico temporal y depósito de los sedimentos vertidos por los ríos Magdalena, Cauca y San Jorge, la investigación, tuvo como objetivo realizar un análisis multitemporal para estimar el comportamiento de las áreas húmedas y las plumas de sedimentos de la subregión La Mojana durante un periodo de cuarenta años (1982-2022). Los cuerpos de agua de la región se identificaron a partir del Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI, por su sigla en inglés); y las plumas de sedimentos mediante la combinación de bandas espectrales *Roja + Verde*. Durante el periodo evaluado, se determinó que las ciénagas de estudio, dependiendo del evento climático ocurrido, pueden experimentar una expansión o contracción de hasta un 30 % en su superficie, llegando incluso, en condiciones de precipitación extremas, a unirse y formar un gran cuerpo de agua que alcanza los 4.900 km², aproximadamente. En cuanto a las plumas de sedimentos, el comportamiento observado mostró una tendencia general hacia los rangos de turbidez entre bajo y moderado en la mayoría de las ciénagas de la región, lo cual denota su efecto como sedimentador, a medida que el agua ingresa al sistema cenagoso.

Palabras clave: bandas espectrales, fenómenos climáticos extremos, Landsat, NDWI, sólidos suspendidos.

Introducción

Un análisis multitemporal, es aquel de tipo espacial donde se comparan las coberturas a través de la interpretación de información obtenida mediante sensores remotos, como imágenes satelitales o mapas, fotografías aéreas e imágenes de radar de un mismo lugar en diferentes fechas, permitiendo evaluar los cambios en la situación de las coberturas que han sido clasificadas (1).

Entre los diferentes satélites de observación disponibles, el programa Landsat de la NASA y el Servicio Geológico de EE. UU. (USGS, por sus siglas en inglés), proporciona el registro espacial continuo más largo que existe de la Tierra (2). Este recopila datos e imágenes de la superficie terrestre en distintos rangos de longitud de onda a lo largo del espectro electromagnético, que se almacenan en una banda espectral y son útiles para el mapeo de diferentes características, tales como agua cargada de sedimentos, áreas de aguas poco profundas, límites de vegetación entre tierra y agua, entre otras (3,4).

Asimismo, la combinación de diferentes bandas espectrales puede mejorar la visualización de diversas características que, a simple vista, pueden ser indetectables, como color natural, falso color, presencia de vegetación, cambios en la superficie del agua, concentración de sedimentos y demás (5–9). En el recurso hídrico, de manera particular, la percepción remota permite la detección y el monitoreo de la calidad del agua, la contaminación, las sequías y el impacto del cambio en la cobertura del suelo (10).

Diferentes estudios han señalado de qué manera el agua es un fuerte absorbente de la radiación infrarroja cercana, por lo que solo las longitudes de onda de las bandas en el espectro visible e infrarrojo cercano tienen una penetración eficaz de la luz solar que incide en la misma (11,12). Mientras que la banda azul, empleada con frecuencia en ecosistemas acuáticos, se utiliza para monitorear los sedimentos en el agua, la banda verde se encarga de enfatizar la vegetación; por su parte, la banda roja resulta útil para la distinción entre vegetación y suelo, y el monitoreo de salud de la primera, y la banda del infrarrojo

cercano, donde el agua absorbe casi toda la luz, es buena para definir la interfaz agua/tierra (13). Al mismo tiempo, las imágenes satelitales de resolución alta a moderada, como la serie Landsat a 30 m, pueden proporcionar un contorno claro de los sedimentos brillantes (14).

Por su parte, el análisis de la dinámica de cuerpos de agua, así como de sólidos en suspensión a través de imágenes satelitales, se ha abordado en numerosos estudios alrededor del mundo (7,15–21). Como la investigación realizada por Rokni *et al.* (2014), quienes modelaron los cambios espaciotemporales del lago Urmia en Irán, durante los años 2000-2013, utilizando imágenes Landsat. En el análisis de resultados se identificaron cuatro periodos en los que el cuerpo de agua estudiado sufrió una contracción de 2.805 km² (22). Además, se destacó la efectividad del Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI, por sus siglas en inglés) propuesto por McFeeters (1996), con enfoque en Componentes Principales (PC en inglés), desarrollado en este estudio con base en el método sugerido por Phua *et al.* (2012), para la detección de cambios en agua superficial (23,24). Dicho enfoque se realizó mediante la técnica de análisis estadístico de igual nombre para transformar la imagen compuesta —a partir de datos Landsat multitemporales— en un nuevo conjunto de variables; los resultados obtenidos demostraron un alto rendimiento para la identificación de cambios entre dos y tres fechas diferentes simultáneamente.

Otros estudios que revisaron la temática de sedimentos en cuerpos de agua, fueron los realizados por Fernandez *et al.* (2014) y Sutari *et al.* (2020); el primero monitoreó el comportamiento de la pluma de turbidez en el embalse Los Molinos en Argentina en el año 2003, y el segundo, estimó las concentraciones de sólidos suspendidos (CSS) en el río Rin en Europa durante el periodo 1995-2016, ambos, a partir del uso de imágenes Landsat, considerando a su vez los datos *in situ* disponibles. En los dos casos se evidenciaron resultados satisfactorios con una precisión aceptable de acuerdo con la información satelital adquirida, teniendo en cuenta, en el caso de la pluma, la evaluación de los mecanismos de dispersión observados, calculados mediante un conjunto de parámetros —caudal, sólidos suspendidos, excedente— basados en las condiciones de desembocadura del río, y, en el caso de las CSS, las mediciones adquiridas (6,20).

Este tipo de investigaciones demuestra la importancia del registro periódico de información multiespectral, y cómo la metodología de análisis multitemporal permite determinar los cambios y los impactos ambientales a través del tiempo. Esto hace posible la planificación del territorio, y ayuda a la comprensión de las problemáticas asociadas al suelo, su evolución y usos—tales como minería aurífera, deforestación, procesos erosivos—, que pueden afectar el recurso hídrico, por lo que se busca, mediante procesos planificados, la solución de estas (25).

Lo anterior, evidencia que promover este tipo de estudios a escala nacional, especialmente aquellos asociados al comportamiento de cuerpos de agua y sedimentos, puede contribuir como una herramienta de análisis —de fácil acceso y aplicación— para la gestión del recurso. En tanto que muchas zonas hídricas del país, con el paso del tiempo, han sufrido cambios considerables al ser afectadas por factores naturales, como fenómenos meteorológicos, geológicos y geomorfológicos, y antrópicos, como actividades industriales, procesos de crecimiento urbano y problemas de contaminación, este proceso de análisis resulta provechoso.

La subregión La Mojana, de acuerdo con el Plan de Gestión Ambiental Regional, ha sufrido impactos climáticos considerables en diferentes periodos, derivados de los efectos del fenómeno El Niño – Oscilación del Sur en sus fases fría, La Niña, y cálida, El Niño, como los dos casos que se citan a continuación. Durante el evento ocurrido entre los años 2010 y 2012 —fenómeno La Niña—, se afectaron alrededor de 47.000 hectáreas adicionales a las que normalmente se inundan en la jurisdicción como resultado del papel regulador de sus ciénagas, lo cual provocó la pérdida de especies arbóreas, así como el desplazamiento de población humana. En el transcurso del evento correspondiente a los años

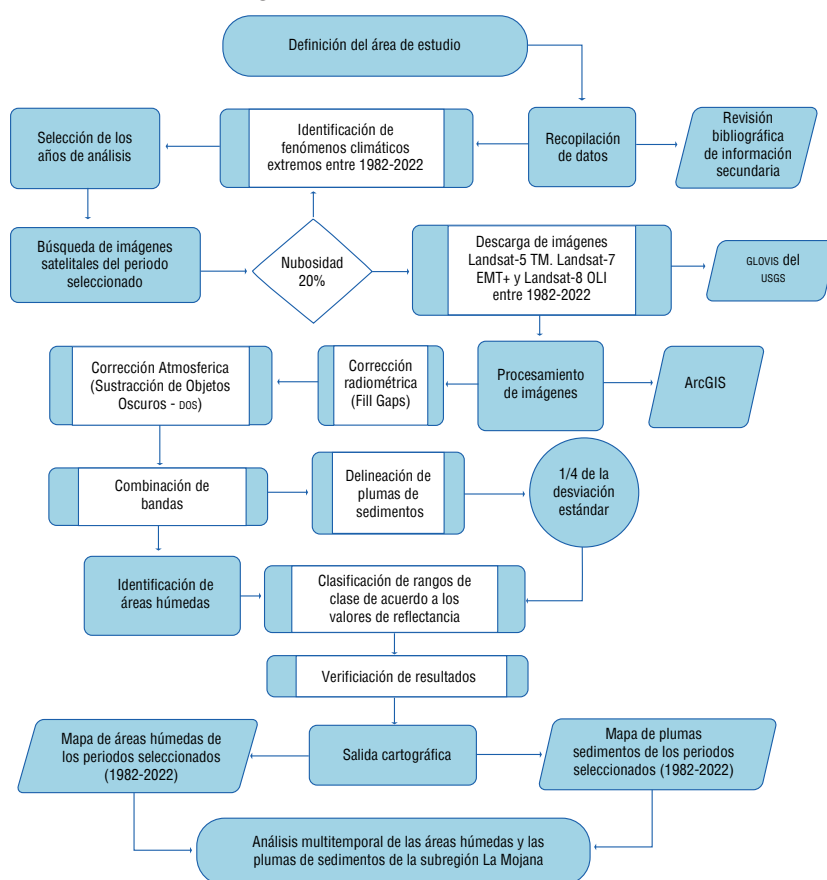
2014-2015 –fenómeno El Niño–, hubo reducciones de hasta el 70 % en los espejos de agua de los humedales, además de incendios en relictos boscosos, zapales y pastizales (26).

Sumado a lo anterior, La Mojana –como se indicó en el capítulo de Introducción al Sistema Acuífero La Mojana– actúa como una zona de depósito sedimentario de los ríos Magdalena, Cauca y San Jorge. Por tanto, el objetivo de esta investigación fue realizar un análisis multitemporal para estimar el comportamiento de las áreas húmedas y las plumas de sedimentos de esta subregión durante un periodo de cuarenta años (1982-2022). Para esto, se utilizaron diferentes combinaciones de bandas espectrales de imágenes Landsat 5 (TM), 7 (ETM+) y 8 (OLI).

Metodología

Con el fin de realizar el análisis multiespectral de la zona de estudio para un periodo de cuarenta años (1982-2022), se llevaron a cabo los procedimientos descritos en la **Figura 6-1**: definición del área de estudio, recopilación de datos, procesamiento de imágenes satelitales, identificación de las áreas húmedas, delineación de las plumas de sedimentos y ejecución del análisis multitemporal de la subregión La Mojana.

Figura 6-1. Diseño metodológico



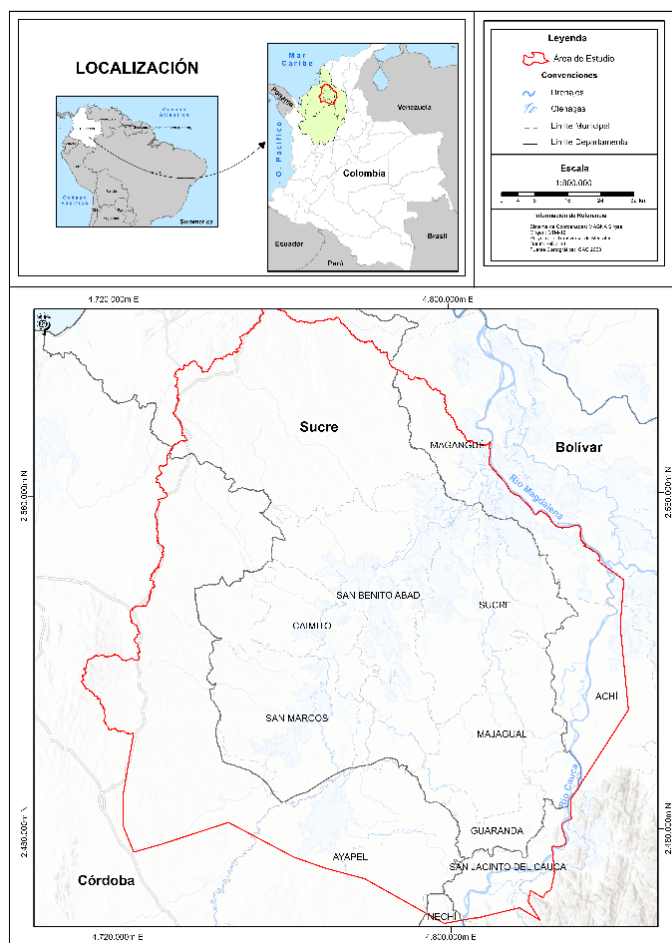
Fuente: Construcción equipo de trabajo – Proyecto Código BPIN: 2020000100361.

Definición del área de estudio

La región de La Mojana, como se indicó en el capítulo de introducción al Sistema Acuífero La Mojana, forma parte de la depresión momposina y cuenta con un área total de 9.097 km², estimada a partir

de los límites establecidos con base en su ubicación al sur del Brazo de Loba; al oeste de la Llanura de inundación del río San Jorge, entre el límite occidental; al este de las estribaciones de la serranía de San Lucas; y al sur de las serranías de Ayapel y Sacramento (**Figura 6-2**). Esta abarca un total de veintidós municipios, distribuidos en cuatro departamentos al norte de Colombia, correspondientes a Sucre, Bolívar, Córdoba y Antioquia, los cuales comprenden un 50,9 %, 32,2 %, 16,2 % y 0,7 % del territorio, respectivamente.

Figura 6-2. Área de estudio



Fuente: Construcción equipo de trabajo – Proyecto Código BPIN: 2020000100361.

La Mojana cuenta con gran variedad de ecosistemas acuáticos, tales como sistemas lóticos, ambientes lénticos, cuerpos de aguas permanentes, variados sistemas temporales, y ecosistemas cambiantes entre léntico y lótico, los cuales, al integrarse con los sistemas terrestres la convierten en una región de alta complejidad ecológica e hidrológica (27).

En épocas de invierno, los planos de inundación formados junto a las ciénagas se anegan, por lo que favorece la acumulación de sedimentos heterométricos con abundancia de materiales finos (28).

Recopilación de datos y descarga de imágenes satelitales

Desde la plataforma de acceso libre Global Visualization Viewer (GLOVIS) del USGS, se adquirieron imágenes satelitales Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+ y Landsat-8 OLI de nivel 1 para el periodo 1982-2022 (**Tabla 6-1**), coincidentes con años afectados por eventos climáticos extremos (**Tabla 6-2**) y una nubosidad inferior al 20 %.

Tabla 6-1. Imágenes Landsat adquiridas

N.º	Fecha	Satélite - Sensor	Resolución	Época	Evento climatológico registrado durante la fecha de la imagen
1	24/01/1985	Landsat-5 TM	30 m	Seca	Fenómeno La Niña (moderado)
2	30/01/1987			Seca	Fenómeno El Niño (moderado)
3	20/05/1998			Húmeda	Fenómeno El Niño (fuerte)
4	12/01/2001	Landsat-7 ETM+	30 m	Seca	Fenómeno La Niña (moderado)
5	23/10/2011			Transición	Periodo normal posterior a un fenómeno La Niña (fuerte), finalizado en mayo de 2011
6	07/09/2012			Húmeda	Periodo normal posterior a un fenómeno La Niña (moderado), finalizado en mayo de 2012
7	18/12/2017	Landsat-8 OLI	30 m	Seca	Fenómeno La Niña (débil)
8	17/07/2019			Húmeda	Periodo normal
9	09/01/2020			Seca	Periodo normal previo a un fenómeno La Niña (moderado) iniciado en agosto de 2020
10	28/02/2021			Seca	Fenómeno La Niña (moderado)

Fuente: Construcción equipo de trabajo – Proyecto Código BPIN: 2020000100361 a partir de GLOVIS (consultado el 25 de julio de 2022), IDEAM (2012, 2017), UNGRD (2016, 2021) y Montealegre (2007) (29–33).

Tabla 6-2. Eventos climatológicos de impacto considerable en La Mojana entre 1982-2022

Año	Evento	Referencia	Descripción
May. 1982 – ago. 1983	Fenómeno El Niño	(31)	Evento catalogado como fuerte, sin embargo, no se observaron mayores alteraciones en la precipitación.
1984-1985	Fenómeno La Niña	(34)	El evento de La Niña ocurrido, contrario a lo esperado, registró afectaciones por sequía durante el 67 % de los meses reportados, donde la causa probable de este comportamiento fue que la señal captada fue muy débil.
Oct. 1986 – dic. 1987	Fenómeno El Niño	(31)	Evento catalogado como moderado con una duración de quince meses. Las alteraciones pluviométricas durante este periodo fueron prácticamente imperceptibles.
May. 1988 – mar. 1989	Fenómeno La Niña y huracán Joan	(35)	En 1988 el huracán Joan pasó por el archipiélago de San Andrés y Providencia, con unos vientos de hasta 194 km/h, y llegó a ser denominado tormenta tropical al llegar al Pacífico, se le llamó Miriam. En su recorrido por la costa norte colombiana causó muchos estragos materiales. Este evento, además, coincidió o incidió con un periodo de aparición del fenómeno La Niña, siendo así un año de intensas lluvias e inundaciones en la región.
Oct. 1991 – may. 1992	Fenómeno El Niño	(31)	Catalogado como moderado. Se observaron condiciones de déficit hídrico, las cuales abarcaron extensas áreas en las regiones Andina, Caribe, Pacífico y Orinoquia.
Sep. 1995 – mar. 1996	Fenómeno La Niña y huracán César	(31,36–39)	Este evento tuvo una duración de siete meses. Por otra parte, el 26 julio de 1996, se formó una depresión tropical en el Caribe, la cual posteriormente se convirtió en el huracán César de categoría 4. Este fue notable porque pasó muy cerca de la península de La Guajira.
May. 1997 – may. 1998	Fenómeno El Niño	(32)	Fue uno de los eventos más fuertes del último siglo. Se observaron deficiencias de precipitación en gran parte del país, así como registros históricos de temperaturas máximas, sequías, incendios de cobertura vegetal, y disminuciones de caudal a niveles bajos históricos para los principales ríos de las regiones Andina y Caribe.
Ago. 1999 – feb. 2000	Fenómeno La Niña	(40)	Las inundaciones de este periodo en La Mojana tienen una correlación positiva con la ocurrencia de los eventos del fenómeno de La Niña presentados en estas fechas. En 1999 se registraron un total de 132 eventos de inundación, los cuales dejaron grandes pérdidas para el país.
2000–2001	Fenómeno La Niña	(31)	Evento de categoría débil.
2006–2007	Fenómeno El Niño (tardío)	(32)	Alcanzó la categoría de moderado; no se evidenciaron mayores impactos.
2007–2008	Fenómeno La Niña	(41)	Se presentaron inundaciones severas en La Mojana.
2009	Fenómeno La Niña	(42)	En junio de 2009, ocurrió una transición de un fenómeno de La Niña a El Niño, el cual, a mediados del 2010, retornó a un evento de La Niña. A pesar de su corta duración en el año 2009, este tuvo un fuerte impacto en los patrones de convección y vientos tropicales en el norte de Suramérica; se registraron en el país excesos de precipitación, entre 40-70 %, durante el primer trimestre de este periodo.
Jun. 2009 – may. 2010	Fenómeno El Niño (tardío)	(32)	Provocó una ola de incendios forestales durante la principal temporada seca del país (primer trimestre del 2010); se reportaron un total de 1.878 eventos, los cuales afectaron 83.270 hectáreas.

Año	Evento	Referencia	Descripción
Jul. 2010 – may. 2011	Fenómeno La Niña	(43)	Aumento en el promedio de lluvias hasta en un 300 %, presentándose desbordamientos en los principales ríos del país.
Dic. 2011 – may. 2012	Fenómeno La Niña	(30)	Evento de categoría entre débil y moderado. Se evidenciaron excesos de lluvia, así como crecientes súbitas en la cuenca alta del río Cauca.
2014–2016	Fenómeno El Niño	(32)	Se registró un déficit de lluvia mayor que en el evento 97-98, con un promedio de 37 % para la región Caribe. De igual manera, se observaron temperaturas elevadas, sequías, incendios y disminución en los caudales de los ríos. Además, se reportaron un total de 358 calamidades públicas, de las cuales, 187 fueron por desabastecimiento parcial y racionamiento de agua.
Nov. 2017 – mar. 2018	Fenómeno La Niña	(29)	En noviembre del año 2017, se confirmó el desarrollo de un fenómeno La Niña de características débiles y corta duración. Durante este periodo se registraron excesos de lluvia en los departamentos de Magdalena, Cesar, Sucre, Atlántico, Bolívar, Meta, Chocó, Valle del Cauca, Tolima, Cundinamarca y Norte de Santander.
Ago. 2020 – ene. 2023	Fenómeno La Niña	(33,44,45)	De acuerdo con el IDEAM, este fenómeno inició desde agosto de 2020. Fue catalogado como de intensidad moderada, con niveles excesivos de precipitación en diversas zonas del país entre noviembre y diciembre (>40 %) de 2020, este comportamiento continuó hasta febrero de 2021. Durante el transcurso de este periodo, se presentó un evento triple del fenómeno La Niña, el cual abarcó tres años consecutivos; finalizó en enero de 2023.

Fuente: Construcción equipo de trabajo – Proyecto Código BPIN: 2020000100361.

Procesamiento de imágenes satelitales

Para ejecutar las mejoras radiométricas se utilizó la extensión Fill Gaps de ArcGIS. Los sensores satelitales capturan información de la cobertura terrestre a partir de la intensidad de radiación electromagnética —proveniente de la luz solar que se refleja sobre la superficie de la Tierra—, y la energía dispersada y reflejada por la atmósfera, definida como radiancia. Esta información es transformada y almacenada en una representación discreta de números digitales con una escala artificial determinada, dependiendo de las características específicas de almacenamiento de cada sensor, las cuales pueden estar compuestas por 8 bits, 12 bits y 16 bits (46).

Es decir, la resolución radiométrica hace referencia a la capacidad del sensor para discriminar niveles o intensidades de radiancia espectral. En los sistemas ópticos-electrónicos, esta radiancia se registra en forma matricial mediante un arreglo de celdas, las cuales reportan un nivel digital (ND) proporcional a la cantidad de energía electromagnética recibida. Los sensores existentes pueden distinguir entre 128 y 1024 niveles diferentes (47). A mayor resolución radiométrica, mejor será la capacidad para interpretar la imagen (48).

En consecuencia, los mejoramientos o realces radiométricos se ejecutan para disminuir las distorsiones que afectan los niveles digitales (ND) de una imagen. Este proceso permite convertir la información bruta de cada pixel, de ND a niveles de reflectancia captada por el sensor en el tope de la atmósfera, ayudando a disminuir los efectos de dispersión o absorción generados por la presencia de partículas en la misma. Adicionalmente, busca remover el efecto de incidencia de la energía solar y de la distancia de la Tierra al Sol, producidos como resultado de la diferencia temporal en la adquisición de imágenes (46,47).

De esta manera, se corrigieron los errores en el bandeamiento, sustituyendo los niveles digitales de las líneas con anomalías por el de sus vecinos inmediatos. Esto permite una mejor representación visual de las imágenes defectuosas con información perdida; dichas líneas se restablecen a partir de autocorrelación espacial, tomando como base los valores de los píxeles individuales más cercanos (46).

En cuanto a la corrección atmosférica, se empleó el método de sustracción de objetos oscuros (DOS, por sus siglas en inglés) para normalizar los valores de neblina en las bandas espectrales, este se basa estrictamente en la imagen digital y no requiere de mediciones *in situ*, lo que lo hace relativamente fácil de aplicar (Chávez, 1988, 1996).

Posterior a estos procesos, se evaluaron diferentes combinaciones de bandas espectrales dependiendo del objetivo establecido, como se describe a continuación.

Identificación de las áreas húmedas

Para detectar los cambios presentados en las ciénagas y los canales de La Mojana durante el periodo 1982–2022 y desarrollar el análisis multitemporal propuesto, se extrajeron las áreas húmedas de la zona mediante el cálculo de cuatro índices espectrales: Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI, por sus siglas en inglés) (23), Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado (MNDWI, por sus siglas en inglés) (50), Índice Normalizado de la Diferencia de Humedad (NDMI, por sus siglas en inglés) (51) e Índice de Vegetación Normalizado (NDVI, por sus siglas en inglés) (52), los cuales combinan diferentes pares de bandas espectrales, como se puede observar en las siguientes expresiones:

$NDWI = \frac{\rho_{verde} - \rho_{NIR}}{\rho_{verde} + \rho_{NIR}}$	Ecuación 1
$MNDWI = \frac{\rho_{rojo} - \rho_{SWIR}}{\rho_{rojo} + \rho_{SWIR}}$	Ecuación 2
$VDMI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR}}$	Ecuación 3
$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{rojo}}{\rho_{NIR} + \rho_{rojo}}$	Ecuación 4

Siendo, ρ_{verde} la banda de reflectancia del verde, ρ_{NIR} la del infrarrojo cercano, ρ_{rojo} la del rojo y ρ_{SWIR} la del infrarrojo de onda corta.

Aunque el NDVI fue inicialmente desarrollado para identificar la distribución de la vegetación, su aplicación ha resultado de gran utilidad en la detección de aguas superficiales (5,22). En el presente estudio, se encontró que este índice muestra resultados óptimos para la distinción de cambios en agua superficial, por lo que se implementó en la metodología planteada.

Posteriormente, con el objetivo de identificar los cuerpos de agua de la región para los diferentes años seleccionados, se compararon los índices de humedad y vegetación descritos con anterioridad.

Los índices NDWI, NDVI y MNDWI demostraron un desempeño adecuado para la identificación de las áreas húmedas de la zona de estudio, caso que no se evidenció para el NDMI. Estos resultados, son similares a los observados en el estudio de Rokni *et al.* (2014), quienes destacaron la precisión de los dos primeros, así como la superioridad del NDWI para la extracción de agua superficial de datos Landsat (22).

Como se ha mencionado previamente, este índice hace uso de la radiación infrarroja cercana, fuertemente absorbida por el agua, y la verde, mejorando la presencia de dichas características mientras elimina las del suelo y la vegetación terrestre (11,23). Por tanto, fue el seleccionado para la detección de los cambios —aumento, permanencia o disminución— en la superficie de los cuerpos de agua que conforman La Mojana.

Delineación de las plumas de sedimentos

Con el propósito de detectar y mapear los patrones de distribución espacial de la turbidez en el área de estudio, se delinearon las plumas de sedimentos de las imágenes satelitales adquiridas. Para tal fin, se analizaron diferentes combinaciones de bandas —Landsat-5 TM y Landsat-8 OLI— en el espectro visible e infrarrojo cercano, cuyos valores de reflectancia superficial, comparados con perfiles espectrales *in situ*, han demostrado ser más sensibles a los cambios de concentración de sólidos suspendidos (css) en la superficie del agua (11,53,54).

La combinación de bandas *Roja + Verde* (55) permite observar la css, reflejando diferentes rangos de reflectancia, distribuidos entre valores altos y bajos.

La combinación $\frac{Roja}{Verde}$ (56) no refleja de manera adecuada la css. Esta presenta un rango entre 0-1, donde la mayoría de los valores observados corresponden al rango de reflectancia más bajo.

La combinación *Roja + NIR* (57) deja apreciar la css. La mayoría de los rangos presentados se agrupan en valores cercanos.

La combinación $\frac{Roja + NIR}{2}$ (17) permite observar la css. Al igual que la anterior, la mayoría de los rangos contemplados se agrupan en valores cercanos.

Por último, la combinación $(Roja + Verde) * (Verde + Azul)$ (55) permite observar moderadamente la css. Presenta valores de reflectancia más elevados (≈ 10 veces) comparado con el resto. Se evidencian diferentes rangos distribuidos entre valores altos y bajos.

Para la cualificación de las combinaciones de bandas, se utilizaron intervalos basados en 1/4 de la desviación estándar. Obteniendo resultados coincidentes en la aplicación de las ecuaciones $(Roja + Verde) * (Verde + Azul)$, $\frac{Roja + NIR}{2}$ y *Roja + NIR*, las cuales mostraron rangos de reflectancia similares tanto en contraste como en distribución por la pluma, además, las combinaciones que incluyeron la banda del infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés), presentaron una reflectancia mayor en diferentes zonas del área de estudio.

Una mayor reflectancia en la radiación infrarroja cercana es un indicativo de vegetación densa y sana. De igual manera, dicha banda es útil para la distinción entre tierra y agua debido a la baja reflectividad de esta última en el NIR, por lo que la diferencia, con respecto al resto de áreas, puede estar influenciada por la cantidad y estado de la vegetación presente en las mismas.

En el caso de la ecuación *Roja + Verde*, el contraste obtenido entre las áreas con diferentes cargas de sedimentos es notoriamente mayor. La combinación planteada por Wang *et al.* (2007), en comparación con las demás, presenta diferencias marcadas más notables a lo largo de la pluma, especialmente en aquellas zonas donde el espectro de reflectancia es mayor (55).

Teniendo en cuenta lo anterior, se utilizó la ecuación correspondiente a la suma de las bandas verde —Banda 2 para Landsat 5 y 7, Banda 3 para Landsat 8— y roja —Banda 3 para Landsat 5 y 7, Banda 4 para Landsat 8— (4). Dicha combinación, mostró mayores contrastes en comparación con las otras, resaltando áreas de acumulación de sedimentos que las demás no señalaron, y definiendo la dispersión de sólidos suspendidos dentro de las ciénagas con mayor detalle (55,58–60).

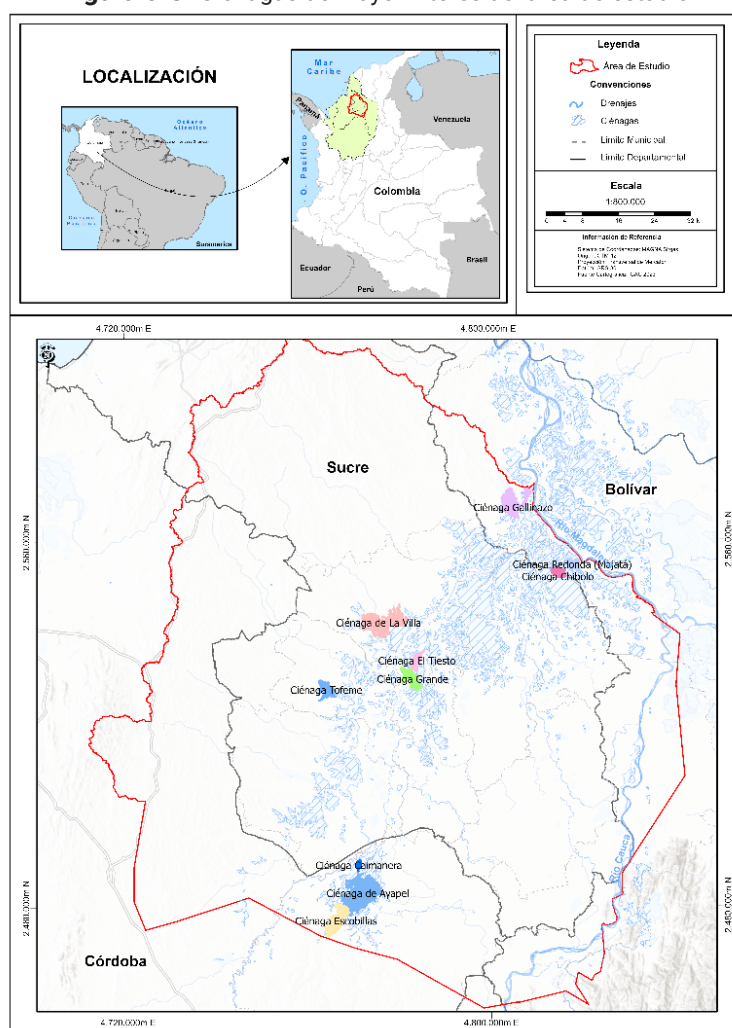
Para identificar las diversas concentraciones de sedimentos en suspensión, se dividió el espectro de reflectancia en diferentes intervalos. Los resultados se categorizaron a partir de rangos de desviación estándar —en este caso $\frac{1}{4}$ — ya que, de esta forma, la comparación de las plumas de sedimentos entre los diferentes periodos resultó más adecuada. Los rangos de reflectancia seleccionados se clasificaron de acuerdo con la concentración de sólidos suspendidos en muy bajo, bajo, moderado, alto y muy alto.

Más adelante, se realizó una comparación entre los rangos de reflectancia obtenidos y la imagen satelital de color natural, la cual muestra detalles de turbidez, así como de procesos de transporte de plumas de sedimentos en aguas poco profundas. Esto dio paso a la ejecución del análisis multianual del comportamiento de los sólidos suspendidos de la zona de estudio.

Ejecución del análisis multitemporal de la subregión La Mojana

Para el desarrollo del análisis multitemporal planteado, se tomaron como enfoque aquellas ciénagas donde se evidenciaron los cambios más significativos de áreas húmedas y plumas de sedimentos de la zona de estudio durante el periodo evaluado. Las ciénagas seleccionadas fueron (**Figura 6-3**): La Villa, El Tiesto y Ciénaga Grande del municipio San Benito Abad (Sucre); Ayapel, Escobillas y Caimanera del municipio de Ayapel (Córdoba); Ciénaga Redonda –Majatá– y Gallinazo del municipio de Magangué (Bolívar); Tofeme del municipio de Caimito (Sucre); y Chibolo del municipio de Sucre (Sucre).

Figura 6-3. Ciénagas de mayor interés del área de estudio



Fuente: Construcción equipo de trabajo – Proyecto Código BPIN: 2020000100361.

Las áreas húmedas (**Figura 6-4**) se identificaron a partir del uso del índice NDWI. El análisis de su comportamiento se realizó mediante la comparación de la superficie de los cuerpos de agua detectados, en aquellos periodos donde se presentaron eventos climáticos extremos que impactaron de manera considerable las ciénagas de La Mojana (**Tabla 6-2**).

El análisis multianual (**Figura 6-5**) de las plumas de sedimentos, se llevó cabo comparando las concentraciones de sólidos en suspensión obtenidas; en primer lugar, entre el año inicial y final de estudio, correspondientes al periodo de 40 años (1982-2022) propuesto, para después continuar con la evaluación de los cambios más representativos que se evidenciaron en el transcurso del periodo definido.

Finalizada la observación general del área de estudio, se tomaron las ciénagas La Villa y Ayapel para el desarrollo de un análisis multianual más específico, ya que estas presentaron un comportamiento particular respecto a las CSS y no mostraron una tendencia definida de acuerdo con los eventos climáticos extremos ocurridos, evidenciándose rangos desde muy bajos hasta muy altos, tanto en la fase fría, como en la fase cálida del fenómeno El Niño – Oscilación del Sur.

Resultados y discusión

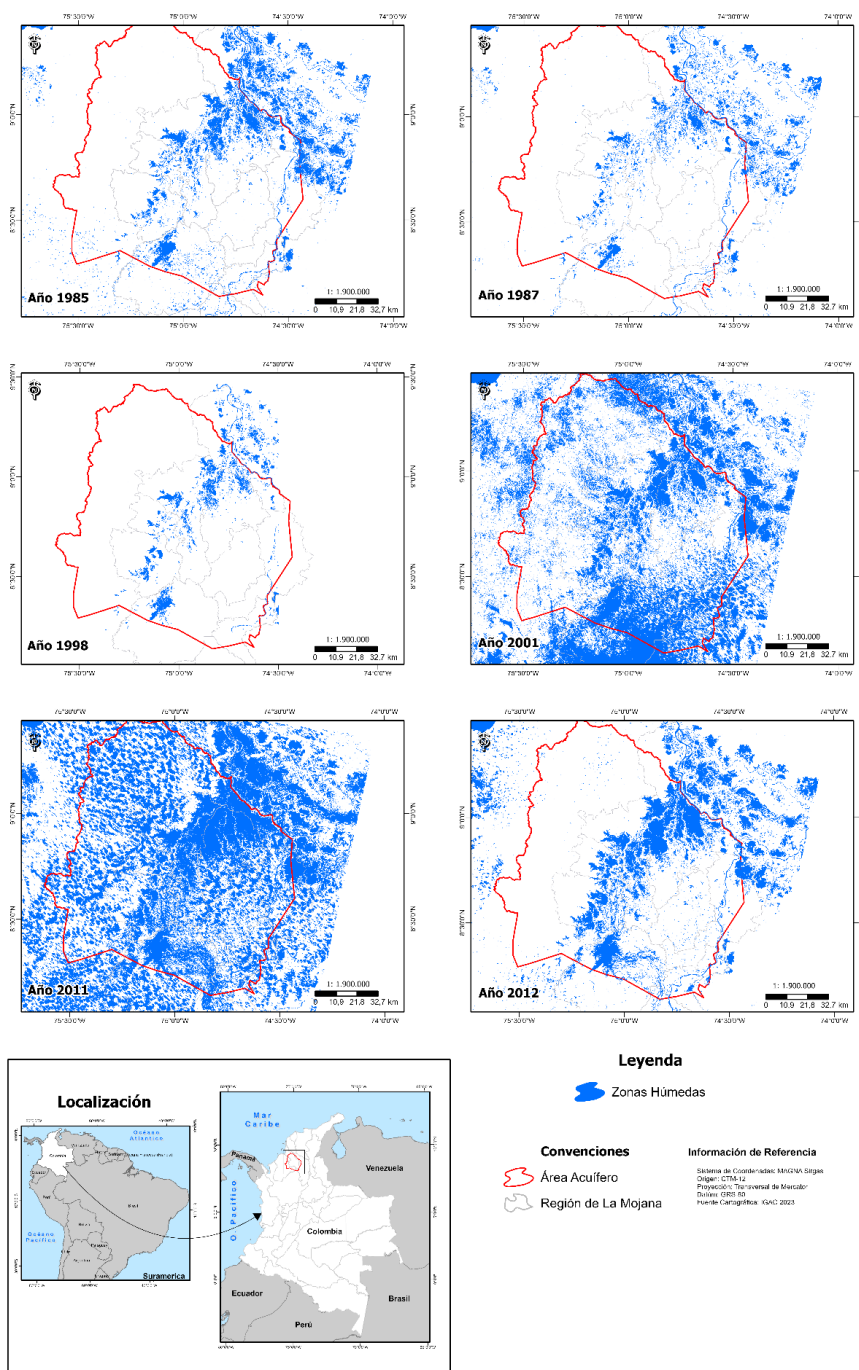
Áreas húmedas

Como se observa en la **Figura 6-4**, los primeros tres escenarios climáticos revelan diferentes comportamientos —estabilidad, disminución y aumento—, respecto a las ciénagas que conforman la región de La Mojana.

Durante el mes de enero del año 1985, correspondiente a un periodo del fenómeno La Niña moderado, se puede observar que el área superficial de las ciénagas no demuestra condiciones de inundación o sequía, comparado con el resto de años evaluados. En el caso de enero de 1987, en el cual se registró un evento del fenómeno El Niño —moderado— se puede evidenciar una clara disminución con respecto al periodo anterior en la superficie de las ciénagas El Tiesto, Ciénaga Grande, Caimanera y Gallinazo, así como en aquellas localizadas al noreste del municipio de San Benito Abad y noroeste del municipio de Sucre, las cuales limitan entre sí.

Para el mes de mayo de 1998, donde se registró uno de los eventos del fenómeno El Niño más fuerte de las últimas décadas, contrario al periodo anterior, se reflejó un aumento en la superficie de las áreas húmedas de las ciénagas mencionadas previamente, así como una leve disminución en la parte baja del conjunto de ciénagas localizadas al noreste del municipio de Sucre. Este aumento pudo deberse a las secuelas derivadas del fenómeno La Niña y el huracán César, ocurridos entre 1995 y 1996; en comparación, durante los años anteriores —1984 y 1985— con el periodo 1987, el evento de La Niña registrado fue de categoría débil, donde se dieron, además, condiciones de sequía en más del 60 % de los meses reportados (**Tabla 6-2**).

Figura 6-4. Áreas húmedas periodos (a) 1985 – fenómeno La Niña moderado; (b) 1987 – fenómeno El Niño moderado; (c) 1998 – fenómeno El Niño fuerte; (d) 2001 – fenómeno La Niña moderado; (e) 2011 – climático normal; (f) 2012 – climático normal



Fuente: Construcción equipo de trabajo – Proyecto Código BPIN: 2020000100361 a partir de imágenes Landsat-5 TM del 24 de enero de 1985; Landsat-5 TM del 30 de enero de 1987, Landsat-5 TM del 20 de mayo de 1998; Landsat-7 ETM+ del 12 de enero de 2001; Landsat-7 ETM+ del 23 de octubre de 2011 y Landsat-7 ETM+ del 07 de septiembre de 2012.

Para enero del año 2001, donde se presentó un fenómeno La Niña de categoría moderado, se reveló un notable aumento –con respecto al periodo 1998– en la superficie de las ciénagas de estudio. No obstante, al ser un año con múltiples eventos de precipitación, la nubosidad presentada era bastante elevada, lo que dificultó la identificación de los cuerpos de agua de estudio, para su eliminación se empleó una metodología empírica de interpretación visual.

Para el mes de octubre de 2011, periodo climático normal posterior a la ocurrencia de un fenómeno La Niña de categoría fuerte —finalizado en mayo de ese mismo año— donde se registró un aumento excesivo en el promedio de lluvias, así como diferentes eventos de desbordamiento de los principales ríos del país. Se pueden evidenciar los efectos derivados en la superficie de las áreas húmedas de la región de La Mojana, especialmente en las ciénagas de Ayapel (Ayapel) en su margen derecho y La Villa (San Benito Abad) en su margen derecho, tanto superior como inferior. Al igual que el 2001, este fue un año con numerosos eventos de precipitación y alta nubosidad, por lo que se aplicó la misma metodología de eliminación para identificar los cuerpos de agua de estudio.

Por último, para el periodo correspondiente a septiembre de 2012 —climático normal posterior a un fenómeno La Niña moderado—, se puede observar una clara disminución en las áreas inundadas alrededor de las ciénagas de estudio, así como en aquellas zonas donde se presentaron desbordamientos, como al este de la ciénaga de Ayapel y al norte de la ciénaga Caimanera.

La superficie total calculada para las áreas húmedas de la región de estudio durante los periodos evaluados fue de aproximadamente 2.965,25 km² para 1985; 1.858,95 km² para 1987; 2.459,45 km² para 1998; 7.396,21 km² para 2001; 6.857,58 km² para 2011; y 4.803,92 km² para 2012.

Entre 1985 y 1987 el sistema cenagoso se contrajo alrededor de un 37,3 % (1.106,30 km²), debido al fenómeno El Niño registrado desde oct-86 hasta dic-87; entre 1987 y 1998 sufrió una expansión de 32,3 % (600,50 km²); entre 1998 y 2001, a causa del fenómeno La Niña presentado en el periodo 2000-2001 las áreas húmedas se extendieron 4.936,76 km² triplicando su tamaño; entre 2001 y 2011, por la intensidad del fenómeno La Niña 2010 (julio) - 2011 (mayo), las ciénagas se expandieron hasta unirse y formar un gran cuerpo de agua, no obstante, comparado con el periodo anterior se reflejó una disminución de 7,3 % (538,63 km²).

A finales del 2011, inició un nuevo evento del fenómeno La Niña de categoría moderado, el cual se mantuvo hasta mayo de 2012. Para septiembre de ese mismo año, se presentó una contracción de 29,9 % (2.053,66 km²) respecto al periodo anterior. Esto, comparado con el primer año evaluado —enero de 1985—, corresponde a una expansión del 60 % (1.838,67 km²) de las superficies inundadas. Por otro lado, las mayores contracciones para mayo de 2012 se observaron en las ciénagas de San Benito Abad, hacia el sur y en el sector noreste; Sucre, hacia el noroeste; y Ayapel, hacia el norte y en los extremos este y oeste.

Resultados similares se produjeron en la investigación desarrollada por Mejia *et al.* (2019), donde se utilizaron imágenes Landsat de tres periodos específicos —1991, 2003 y 2005—, tanto en época seca como húmeda, junto con la aplicación de siete índices hídricos —identificando el NDWI como es el más adecuado— para delimitar los cuerpos de agua del Complejo de Humedales del Bajo Sinú (Colombia) y compararlos durante diferentes periodos estacionales e interanuales. Se hallaron disminuciones de un 56,2 % en la capacidad de almacenamiento de agua, un 24,7 % en el número de cuerpos de agua y un 41 % en el tamaño promedio de estos últimos durante los 25 años de estudio (64). Flórez *et al.* (2018), por su parte, desarrollaron un análisis multitemporal sobre la degradación de humedales altoandinos, localizados en una zona de páramo entre los municipios de Villamaría y Manizales, Colombia, mediante imágenes satelitales e imágenes de radar. En él identifican una pérdida del 67,9 % del espejo de agua durante 2007 y 2016, así como una relación directa entre la pérdida de humedales y la reducción de las precipitaciones (65).

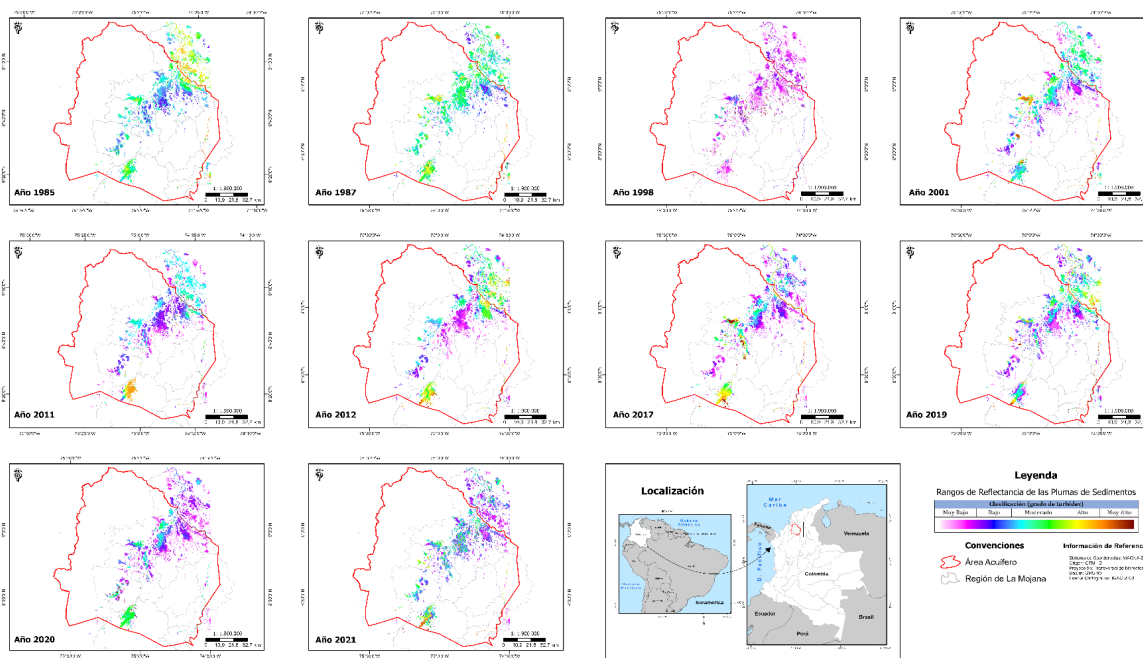
Plumas de sedimentos

La aplicación de la ecuación multiespectral seleccionada (*Roja + Verde*) permitió la identificación del comportamiento de las plumas de sedimentos a lo largo de la zona de humedales de La Mojana durante

los diferentes periodos seleccionados: 1985, 1987, 1998, 2001, 2011, 2012, 2017, 2019, 2020 y 2021. Estos resultados (**Figura 6 - 5**) resaltan zonas de alta concentración, principalmente en las ciénagas de San Benito Abad, Ayapel y Magangué.

Durante enero del año 1985, la pluma se desplazó a lo largo del área de estudio con concentraciones entre bajas y moderadas, principalmente, enfocándose en las zonas con mayor rango –alto– en las ciénagas La Villa (parte central), Ayapel (noroeste), Gallinazo (suroeste) y Redonda (Majatá). Para febrero del 2021, los rangos observados oscilaron entre bajo y moderado en la mayoría de la pluma; no obstante, se puede mostrar que, entre un periodo y otro, la concentración aumentó en diversas partes de los cuerpos de agua estudiados, presentándose rangos de altos a muy altos en las ciénagas Escobillas, Ayapel y Caimanera del municipio de Ayapel, Tofeme del municipio de Caimito y zonas puntuales de las ciénagas La Villa (margen superior derecho), El Tiesto (margen central inferior) y Ciénaga Grande (margen superior e inferior) del municipio de San Benito Abad. Aunque ambas imágenes fueron tomadas en época seca, enero y febrero respectivamente, y corresponden a un mes donde se presentó un evento del fenómeno La Niña de categoría moderado, las concentraciones reflejadas en el 2021 fueron superiores; esto puede deberse a un mayor registro en los niveles precipitación, los cuales provocaron un aumento en el transporte de sedimentos, y, por consiguiente, un incremento en la presencia de sólidos suspendidos en la región de La Mojana.

Figura 6-5. Plumitas de sedimentos (a) año 1985; (b) año 1987; (c) año 1998; (d) año 2001; (e) año 2011; (f) año 2012; (g) año 2017; (h) año 2019; (i) año 2020; (j) año 2021



Fuente: Construcción equipo de trabajo – Proyecto Código BPIN: 2020000100361 a partir de imágenes Landsat-5 TM del 24 de enero de 1985; Landsat-5 TM del 30 de enero de 1987; Landsat-5 TM del 20 de mayo de 1998; Landsat-7 ETM+ del 12 de enero de 2001; Landsat-7 ETM+ del 23 de octubre de 2011; Landsat-7 ETM+ del 07 de septiembre de 2012; Landsat-8 OLI del 18 de diciembre de 2017; Landsat-8 OLI del 17 de julio de 2019; Landsat-8 OLI del 09 de enero de 2020 y Landsat-8 OLI del 28 de febrero de 2021.

En el transcurso de los periodos siguientes (**Figura 6-5**), se registraron cuatro eventos del fenómeno El Niño – Oscilación del Sur: dos en su fase cálida, El Niño, correspondientes a 1987 –categoría moderado– y 1998 –categoría fuerte–, y dos en su fase fría, La Niña, relativos a 2001 –moderado– y 2011 –fuerte–.

Se puede constatar que para los meses influenciados por el fenómeno El Niño, la pluma se desplaza hacia el norte de la región de estudio con rangos de concentración entre bajo y moderado –principalmente– para enero del año 1987, y muy bajo –en su mayoría– y moderado para mayo del año 1998.

Respecto al fenómeno La Niña, los rangos oscilaron, principalmente, entre bajo y moderado. Se concentró en las zonas con presencia de sedimentos entre rangos altos a muy altos en las ciénagas La Villa de San Benito Abad, La Cruz de San Marcos y Caimanera de Ayapel, para el caso de enero de 2001; y en las ciénagas de Ayapel (zona este) y Caimanera del municipio de Ayapel, para el caso de octubre de 2011, periodo posterior al evento finalizado en mayo de ese mismo año.

Comparando ambos escenarios, se puede observar que, durante la fase fría de este evento, las concentraciones observadas llegan hasta rangos muy altos y que los cambios más notables se evidencian en las ciénagas La Villa, Escobillas, Ayapel y Caimanera, así como en las ciénagas que limitan entre los municipios de Sucre –(noroeste) y San Benito Abad (noreste) junto con aquellas localizadas al noreste del primero, como la ciénaga Chibolo.

El comportamiento observado para la pluma durante los últimos cuatro periodos –2012, 2017, 2019 y 2020– (**Figura 6-5**) fue bastante similar en el conjunto de ciénagas localizadas aguas abajo de San Marcos, con excepción de La Villa, Ciénaga Grande y El Tiesto para 2017, las cuales reflejaron rangos de menor CSS que oscilaron, en su mayoría, entre muy bajo y moderado en el departamento de Sucre, y entre bajo y moderado en el departamento de Bolívar, exceptuando el periodo respectivo a enero de 2020, que para estas últimas presentó rangos, principalmente, muy bajos; en el caso de las ciénagas ubicadas aguas arriba de este municipio en Ayapel (Córdoba), las concentraciones contempladas fueron, en general, mayores.

Las áreas donde se evidenciaron rangos entre altos y muy altos corresponden a las ciénagas Escobillas, Ayapel, Caimanera y Redonda (Majatá) para septiembre del año 2012; las ciénagas Escobillas y Ayapel, así como algunas zonas de La Villa, (mayormente en la parte central), y Ciénaga Grande (este y oeste hacia el sur) para diciembre del año 2017; las ciénagas Escobillas (sur), Caimanera (norte), Tofeme y La Villa (norte) para julio del año 2019; y unos cuantos sectores de las ciénagas que hacen parte de los municipios de San Marcos y Ayapel para enero del año 2020.

En términos climáticos, septiembre de 2012, julio de 2019 y enero de 2020 corresponden a periodos normales, y diciembre de 2017 a un evento del fenómeno El Niño – Oscilación del Sur en su fase fría, La Niña, de categoría débil. De manera general, los rangos de concentración reflejados oscilaron entre bajo y moderado. Con excepción, principalmente, de las ciénagas La Villa de San Benito Abad, Escobillas, Ayapel y Caimanera de Ayapel, y aquellas localizadas al noreste de Sucre, como Chibolo, las cuales han presentado un comportamiento variable –tanto en rangos de concentración de sólidos suspendidos, como en distribución por la pluma– a lo largo del periodo evaluado. Dicha dinámica se describe en la **Tabla 6-3**.

Tabla 6-3. Concentración de plumas de sedimentos en cuerpos de agua de acuerdo con el periodo analizado

Rangos de concentración de plumas de sedimentos		fecha analizada	condición climática observada
Ciénaga La Villa	Ciénaga de Ayapel		
Moderado, alto	Moderado, alto	Enero de 1985	Fenómeno La Niña moderado
Moderado y muy alto	Moderado y muy alto	Enero de 1987	Fenómeno El Niño moderado
Muy bajo y moderado	Muy bajo y bajo	Mayo de 1998	Fenómeno El Niño fuerte
Moderado y muy alto	Bajo y moderado	Enero de 2001	Fenómeno La Niña moderado
Bajo y moderado	Moderado y muy alto	Octubre de 2011	Climático normal posterior a un fenómeno La Niña fuerte
Bajo y moderado	Moderado y muy alto	Septiembre de 2012	Climático normal posterior a un fenómeno La Niña fuerte
Moderado y muy alto	alto y muy alto	Diciembre de 2017	Fenómeno La Niña débil
Bajo y alto	Muy bajo y moderado	Julio de 2019	climático normal
Bajo y moderado	Muy bajo y moderado	Enero de 2020	Climático normal previo a un fenómeno La Niña moderado
Bajo y moderado	Muy bajo y muy alto	Febrero de 2021	Fenómeno La Niña moderado

Fuente: Construcción equipo de trabajo – Proyecto Código BPIN: 2020000100361.

Los resultados obtenidos en la mayoría de la subregión La Mojana presentan similitudes con el estudio realizado por Cerón *et al.* (2021), quienes analizaron, de forma espacio-temporal (1950-2019), la influencia de El Niño – Oscilación del Sur (ENOS) en la hidrología de la cuenca alta del río Cauca, evidenciando que las descargas de agua bajas se amplifican durante los eventos de El Niño, y las altas durante los eventos de La Niña, consistentes con una disminución e incremento, respectivamente, en la precipitación (66). De igual manera, Salas (2020) señala cómo la hidroclimatología de Colombia está notablemente afectada por el fenómeno ENOS, el cual condiciona la respuesta hidrológica en el país al incrementar o disminuir tanto la lluvia, como los caudales durante La Niña o El Niño, según la región correspondiente (67). Particularmente en América del Sur tropical, el ENOS afecta las condiciones climáticas e hidrológicas en escalas de tiempo que van desde estaciones hasta décadas. Con algunas diferencias regionales en cuanto a sincronización y amplitud. Esta región presenta anomalías negativas de precipitación y caudal con El Niño, y anomalías positivas con La Niña. Al respecto, observaciones del efecto de ENOS muestran que las descargas de los ríos ocurren gradualmente más tarde en los ríos ubicados hacia el este de Colombia y el norte de América del Sur, donde son más pronunciados los impactos de La Niña (68).

En cuanto al flujo de agua y desplazamiento de sólidos suspendidos, el estudio de Restrepo y Kjerfve (2000) relacionó la variabilidad de la descarga de agua y la carga de sedimentos del río Magdalena con el ciclo ENOS. La regresión de la descarga de agua en el Índice de Oscilación del Sur (SOI, por sus siglas en inglés), utilizado para evaluar la fase y la intensidad del ENOS, mostró que el 69 % de la variabilidad del río Magdalena puede ser explicada por el SOI, asociando las descargas altas a la fase de La Niña, y las bajas a la fase de El Niño.

El análisis de las series temporales de carga de sedimentos de 1975-1995 indicó que el evento de La Niña se caracterizó por una carga de sedimentos de $1.600 \times 10^3 \text{ t día}^{-1}$. Correlacionándose de forma positiva con el SOI ($R^2 = 0,54$). Demostrando que tanto la descarga de agua, como la carga de sedimentos están estrechamente vinculadas al ciclo de El Niño-La Niña (69). Resultados similares fueron reportados por Ávila y Gallo (2021), cuya investigación reveló que el delta del río Magdalena presenta condiciones de sedimentación –descargas negativas– durante los años de El Niño, y de erosión –descargas positivas– durante los años de La Niña. En cuanto a las escalas intra-anales, los periodos secos (enero-abril) mostraron tendencias de sedimentación y los periodos húmedos (septiembre-diciembre) de erosión (70).

Ruano (2017) también, de manera particular, analizó el tamaño y direccionalidad de la pluma de sedimentos del río Magdalena en la desembocadura de Bocas de Ceniza, durante el periodo 2000-2017, mediante imágenes satelitales Landsat. La clasificó en zonas de alta (ACS) y baja (BCS) concentración de sedimentos, las cuales se correlacionaron posteriormente con el fenómeno El Niño – Oscilación del Sur a través del ONI. Se identificó que el área promedio de la pluma fue de 954,3 km² y que esta se dispersa principalmente hacia el noroeste. Los resultados además revelaron que el menor aporte de sedimentos se observó durante la segunda temporada seca del año y que el área de ACS (cuya ocupación promedio fue del 19,2 %) presentó una correlación negativa con el ONI (-0,57). Así, se demuestra que a partir del sensoramiento remoto es posible analizar de manera espacial y temporal las plumas de sedimentos, lo que evidencia la posible influencia del fenómeno ENOS (71).

En este sentido, el análisis planteado en el presente estudio muestra elementos de gran importancia sobre la hidrodinámica de las ciénagas de la región. Entre ellos el desplazamiento de las plumas de sedimentos a lo largo de la zona de humedales de La Mojana, y su comportamiento frente a la ocurrencia de fenómenos climáticos extremos a través de diferentes periodos.

Conclusiones

Los mejores resultados para la identificación de las áreas húmedas se lograron con la aplicación del índice NDWI propuesto por McFeeters (1996) (23). Durante el periodo evaluado, se observó que las ciénagas de estudio, dependiendo del evento climático ocurrido –fenómeno La Niña o El Niño– pueden experimentar una expansión o contracción de hasta un 30 % en su superficie, llegando incluso, en condiciones de precipitación extremas, a unirse y formar un gran cuerpo de agua que alcanza los 4.900 km², aproximadamente.

De igual manera, el estudio realizado por Hernández *et al.* (2016), donde se analizaron los patrones de inundación interanual (1993-2008) e intra-anual (2006-2008) del río San Pedro (México), mediante imágenes satelitales y datos de precipitación y flujo, presenta la teledetección y el análisis de imágenes Landsat como una forma práctica y económica de obtener información espacial sobre el comportamiento de grandes sistemas dinámicos de y monitorear eventos climáticos en sistemas fluviales durante un tiempo prolongado (72).

Por otro lado, la metodología propuesta mostró grandes bondades para la investigación de la distribución de sedimentos a lo largo de la zona de humedales de estudio. Esto permitió la observación de las áreas tanto de mayor, como de menor acumulación de sólidos suspendidos, así como su desplazamiento a través del conjunto de ciénagas que conforman la región, junto con el análisis de su comportamiento ante la ocurrencia de eventos climáticos extremos. La combinación de bandas *Roja + Verde* ofreció los mejores resultados, en comparación con las demás analizadas, para una región de planicies extensas inundables como las de La Mojana.

El comportamiento observado en las plumas de sedimentos durante los años seleccionados mostró una tendencia general hacia los rangos de turbidez entre bajo y moderado en la mayoría de las ciénagas de la región, lo que denota su efecto como sedimentador, a medida que el agua avanza en el sistema cenagoso.

Las ciénagas que exhibieron mayores variaciones espectrales respecto a los eventos climáticos extremos ocurridos entre 1982 y 2022, fueron La Villa en San Benito Abad (Sucre) y Escobillas, Ayapel y Caimanera en el municipio de Ayapel (Córdoba); estas reflejaron concentraciones de sedimentos en suspensión desde muy bajas hasta muy altas, que demostraron un comportamiento particular al actuar como zonas receptoras de los sólidos suspendidos procedentes de los desbordamientos del río Cauca. En ellas se dan procesos de acumulación –alta o baja– de sedimentos, independiente a las condiciones –registradas en cada periodo– del fenómeno El Niño – Oscilación del Sur.

La ciénaga de Ayapel y los cuerpos de agua que la circundan reciben grandes cargas de sedimentos durante los desbordamientos del río Cauca, los cuales son transitados a través de la conexión de brazos que llegan a este núcleo cenagoso. Las mayores concentraciones se reúnen principalmente hacia las zonas sur y este de las ciénagas observadas.

El estudio de Dolan *et al.* (2024), realizado en el delta del río Mackenzie en Canadá, evalúa el traslado de material suspendido, donde los lagos con frecuencia actúan como trampas de agua y sedimentos, limitando o retrasando el movimiento de material hacia el océano costero. En él, se identificó, mediante teledetección con imágenes Landsat, la conectividad funcional de lago a canal —correspondiente a la facilidad con la que el agua cargada de sedimentos se transporta desde los canales distributivos hacia los lagos deltaicos— de 10.362 lagos durante el verano, entre 1984 y 2022. Se encontraron niveles de agua críticos que desencadenan el movimiento de agua de río con alta carga de sedimentos en 5.989 lagos (73).

Por otro lado, en el orden nacional, Carillo (2016) elaboró un modelo aplicado a imágenes de sensores remotos para detectar la cantidad, así como la distribución de la sedimentación en el golfo de Urabá, partiendo de un análisis multitemporal de cinco años (2011–2015) y mediciones *in situ*. El modelo brindó evidencia suficiente para entender la dinámica de sedimentación mensual, anual y por temporada en la zona. Asimismo, demostró cómo, con el uso de imágenes satelitales, es posible realizar un seguimiento del estado de diferentes ecosistemas, cuya información es escasa, teniendo como fin último su preservación y cuidado (74).

Este tipo de investigaciones, que son de fácil acceso y aplicación, pueden contribuir en la estimación del comportamiento de cuerpos de agua superficial y demás factores asociados, como presencia de sólidos suspendidos, transporte de sedimentos y concentración de estos. A su vez, se considera la influencia de eventos climáticos extremos, así como los efectos derivados de estos últimos. Además, dado que la extensión de humedales colombianos, su diversidad y complejidad requiere amplios esfuerzos, tanto humanos como tecnológicos, para la generación de información adecuada que permita la toma de decisiones, los productos derivados de la teledetección se convierten en insumo valioso para el manejo de los cuerpos de agua, las estrategias de conservación y la gestión de riesgos (75).

Para finalizar, la mayor dificultad en este tipo de técnica de análisis se presenta en 1) la consecución de imágenes con baja nubosidad, 2) la corrección del bandeamiento, 3) la identificación y el cálculo de la superficie de áreas húmedas en imágenes con alta nubosidad y 4) la falta de mediciones o de datos de campo para validar los resultados obtenidos con teledetección y análisis multiespectral.

Agradecimientos

El presente trabajo se financió a través del Fondo Ciencia Tecnología e Innovación del Sistema General de Regalías como parte del proyecto “Implementación de estrategias de gestión de riesgo en el manejo integral de zonas de recarga de los acuíferos utilizados como fuente de abastecimiento de las comunidades de la subregión Mojana, departamento de Sucre”, código BPIN 2020000100361.

Referencias

1. Chuvieco E. Fundamentos de teledetección espacial. Madrid: Rialp. S.A; 1990. 453 p.
2. NASA Landsat Science. About Landsat [Internet]. 2022 [citado 13 de agosto de 2022]. Disponible en: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>
3. Landsat Missions. USGS science for a changing world. 2022 [citado 8 de agosto de 2022]. Landsat Satellite Missions. Disponible en: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-satellite-missions>

4. USGS. USGS science for a changing world. 2022 [citado 18 de julio de 2022]. What are the best Landsat spectral bands for use in my research? Disponible en: <https://www.usgs.gov/faqs/what-are-best-landsat-spectral-bands-use-my-research>
5. CONAE. Índices Espectrales derivados de imágenes satelitales Landsat 8 Sensor OLI [Internet]. 2016. Disponible en: <https://catalogos.conae.gov.ar/landsat8/Docs/IndicesEspectralesDerivadosDeLandsat8.pdf>
6. Fernández RL, Bonansea M, Marques M. Monitoring Turbid Plume Behavior from Landsat Imagery. *Water Resour Manage*. 2014;28(10):3255-69.
7. Kavan J, Wiczorek I, Tallentire G, Demidionov M, Uher J, Strzelecki MC. Estimating Suspended Sediment Fluxes from the Largest Glacial Lake in Svalbard to Fjord System Using Sentinel-2 Data: Trebrevatnet Case Study. *Water*. 2022;14(12):1840.
8. Landsat Missions. USGS science for a changing world. 2021 [citado 8 de agosto de 2022]. Common Landsat Band Combinations. Disponible en: <https://www.usgs.gov/media/images/common-landsat-band-combinations>
9. Rokni K, Ahmad A, Solaimani K, Hazini S. A New Approach for Detection of Surface Water Changes Based on Principal Component Analysis of Multitemporal Normalized Difference Water Index. *Journal of Coastal Research*. 2016;32(2):443-51.
10. USGS NASA. Sharing our Understanding and Engaging with Geosciences through Landsat and Earth Observations. 2019.
11. Baban SMJ. The use of Landsat imagery to map fluvial sediment discharge into coastal waters. *Marine Geology*. 1995;123(3):263-70.
12. Vargas G. Determination of the relative sediment concentration in water bodies using remote sensing methodology. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*. 2017;26(1):11-24.
13. Center for Biodiversity and Conservation (CBC). Landsat Spectral Band Information [Internet]. Practical Guides to Remote Sensing - American Museum of Natural History; Disponible en: https://ibis.geog.ubc.ca/courses/geob373/lectures/Handouts/CBC_landsat_band_info.pdf
14. Barnes BB, Hu C, Kovach C, Silverstein RN. Sediment plumes induced by the Port of Miami dredging: Analysis and interpretation using Landsat and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*. 2015;170:328-39.
15. Chu VW, Smith LC, Rennermalm AK, Forster RR, Box JE. Hydrologic controls on coastal suspended sediment plumes around the Greenland Ice Sheet. *The Cryosphere*. 2012;6(1):1-19.
16. González LC, Torres FM, Torregroza AC, Hansen IR, Rodríguez HB. Use of LANDSAT 8 images for depth and water quality assessment of El Guájaro reservoir, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*. 2018;82:231-8.
17. Hughes KE, Wild A, Kwoil E, Geertsema M, Perry A, Harrison KD. Remote Sensing of Landslide-Generated Sediment Plumes, Peace River, British Columbia. *Remote Sensing*. 2021;13(23):4901.
18. Manzo C, Braga F, Zaggia L, Brando VE, Giardino C, Bresciani M, *et al.* Spatio-temporal analysis of prodelta dynamics by means of new satellite generation: the case of Po river by Landsat-8 data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2018;66:210-25.
19. Ouillon S, Douillet P, Andréfouët S. Coupling satellite data with in situ measurements and numerical modeling to study fine suspended-sediment transport: A study for the lagoon of New Caledonia. *Coral Reefs*. 2004;23:109-22.

20. Sutari CAT, Perk MV der, Middelkoop H. Estimation of suspended sediment concentrations in the Rhine River using Landsat Satellite Images. *IOP Conf Ser: Earth Environ Sci.* 2020;451(1):012079.
21. Waxter M. Analysis of Landsat Satellite Data to Monitor Water Quality Parameters in Tenmile Lake, Oregon [Internet] [Master Thesis]. Portland State University; 2014 [citado 13 de julio de 2022]. Disponible en: <http://archives.pdx.edu/ds/psu/12014>
22. Rokni K, Ahmad A, Selamat A, Hazini S. Water Feature Extraction and Change Detection Using Multitemporal Landsat Imagery. *Remote Sensing.* 2014;6(5):4173-89.
23. McFeeters SK. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing.* 1996;17(7):1425-32.
24. Phua MH, Tsuyuki S, Lee J, Ghani M. Simultaneous detection of burned areas of multiple fires in the tropics using multisensor remote-sensing data. *International Journal of Remote Sensing.* 2012;33:4312-33.
25. Flórez GY, Rincon A, Cardona PS, Alzate AM. Análisis multitemporal de las coberturas vegetales en el área de influencia de las minas de oro ubicadas en la parte alta del sector de Maltería en Manizales, Colombia. *DYNA.* 2017;84(201):95-101.
26. Corporación para el Desarrollo Sostenible de La Mojana y el San Jorge (Corpomojana). Plan de Gestión Ambiental Regional 2016 - 2026 [Internet]. 2016. Disponible en: <http://www.corpomojana.gov.co/web2/jdownloads/extranetcorpomojana/planeacion/pgar/pgar-2016-2026-corpomojana.pdf>
27. Torres J, Pinilla G. Revisión de las características limnológicas de los sistemas acuáticos de la región de La Mojana. Informe final. Estudios, análisis y recomendaciones para el ordenamiento ambiental y el desarrollo territorial de La Mojana [Internet]. Departamento Nacional de Planeación - Universidad Nacional de Colombia; 2011. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/9310/gabrielpinilla.2011.pdf?sequence=1&isAllowed>
28. Mosquera L. Estudio general de suelos de los municipios de Caimito, la Unión de Sucre, Majagual, San Benito Abad, San Marcos y Sucre (departamento de Sucre). Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC; 1986.
29. IDEAM. Boletín informativo sobre el monitoreo de los Fenómenos de variabilidad climática «El Niño» y «La Niña». Boletín número 113 [Internet]. 2017. Disponible en: http://www.ideam.gov.co/documents/21021/93551518/12_IFN_DIC_21_2017.pdf/8ce5a750-cafb-4171-bdd8-7f370c532bbf?version=1.0
30. IDEAM. Boletín de monitoreo fenómeno El Niño y La Niña 2012 [Internet]. 2012 [citado 22 de agosto de 2022]. Disponible en: t.ly/5W9UC
31. Montealegre E. Modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia [Internet]. IDEAM; 2007. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/440517/Modelo+Institucional+El+Ni%C3%B1o+La+Ni%C3%B1a.pdf/232c8740-c6ee-4a73-a8f7-17e49c5edda0>
32. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD). Fenómeno El Niño: Análisis Comparativo 1997-1998//2014-2016 [Internet]. Bogotá; 2016. 144 p. Disponible en: https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/20564/Fenomeno_nino-2016.pdf?sequence=3&isAllowed=y#:~:text=La%20variabilidad%20clim%C3%A1tica%20expresada%20en,en%20el%20segundo%20caso%2C%20con
33. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD). La presencia del Fenómeno La Niña (2020-2021) y su influencia en el clima reciente del país [Internet]. 2021. Disponible en: <http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Documents/Conocimiento/LA-PRESENCIA-DEL-FENOMENO-LA-NINA-2020-2021-Y-SU-INFLUENCIA-EN-EL-CLIMA-RECIENTE-DEL-PAIS.pdf>

34. Hurtado G, González O. Evaluación de la afectación territorial de los fenómenos El Niño/La Niña y análisis de la confiabilidad de la predicción climática basada en la presencia de un evento. IDEAM-Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Internet]. 2011; Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/440517/Evaluaci%C3%B3n+de+la+Afectaci%C3%B3n+Territorial.pdf>
35. Hernández H, Rincón A. Análisis estadístico de los eventos potencialmente catastróficos de origen natural, ocurridos en Colombia entre 1970 y 1990, mediante la utilización del sistema de información sobre desastres, hidrometeorología y medio ambiente Sidhma [Internet]. 2010. Disponible en: https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1105&context=ing_ambiental_sanitaria
36. Bernal G, Osorio AF, Urrego L, Peláez D, Molina E, Zea S, *et al.* Occurrence of energetic extreme oceanic events in the Colombian Caribbean coasts and some approaches to assess their impact on ecosystems. *Journal of Marine Systems*. 2016;164:85-100.
37. Enríquez O, Guzmán A, Narváez G. Análisis del comportamiento de la precipitación en el municipio de Buenaventura (Valle del Cauca, Colombia) en condiciones de desarrollo de los fenómenos El Niño y La Niña. *Cuad geogr rev colomb geogr*. 2014;23(1):165-78.
38. Otero LJ, Ortiz JC, Ruiz JK, Higgins AE, Henríquez SA. Storms or cold fronts: what is really responsible for the extreme waves regime in the Colombian Caribbean coastal region? *Nat Hazards Earth Syst Sci*. 2016;16(2):391-401.
39. Wahlström M, Weber G. Central America: Hurricane Cesar. appeal no: 11/96; 1996.
40. Rodríguez A, Ramírez L. Análisis estadístico de los eventos catastróficos de origen natural ocurridos en Colombia entre los años 1990 y 1999, soportado en el sistema de información SIDHMA Unisalle [Internet]. 2014. Disponible en: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/957
41. Muñoz L. Assessment of ecological and socio-economic impacts of meteorological and hydrological drought in Colombian Mojana region. 2018; Disponible en: <https://repositorioinstitucional.uaslp.mx/xmlui/handle/i/4546>
42. Aristizábal GL. Aspectos de la circulación atmosférica de gran escala sobre el noroccidente de Suramérica asociada al ciclo ENOS 2009-2010 y sus consecuencias en el régimen de precipitación en Colombia. 2010; Disponible en: http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418818/Circulaci%C3%B3n+Atmosf%C3%A9rica+ENOS++2009-2010_GloriaLeon.pdf/b4345abd-fcef-461d-8053-44614dc67d07
43. Villegas P. Caracterización territorial y de inundaciones en la región de La Mojana. 2013; Disponible en: <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/911>
44. IDEAM. Seguimiento al ciclo ENOS El Niño – Oscilación del Sur. Boletín No. 177 [Internet]. 2023. Disponible en: http://www.ideam.gov.co/documents/21021/125559305/04_ENSO_IFN_ABR_21_2023.pdf/db1846b7-0eb6-4e5d-ae26-338b618c9760?version=1.1
45. Organización Meteorológica Mundial (OMM). El episodio triple de La Niña continúa y prolonga la sequía y las inundaciones [Internet]. 2022 [citado 23 de julio de 2023]. Disponible en: <https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/el-episodio-triple-de-la-ni%C3%B1a-contin%C3%BAa-y-prolonga-la-sequ%C3%ADa-y-las>
46. Aguilar H, Mora R, Vargas C. Metodología para la corrección atmosférica de imágenes Aster, RapidEye, Spot 2 y Landsat 8 con el módulo FLAASH del software ENVI. *REVGEO*. 2015;2(53):39-59.
47. Tristán P, Wainschenker R, Doorn JH. Normalización de imágenes satelitales en el análisis multi-temporal. En 2008 [citado 20 de junio de 2024]. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/20582>

48. Rodríguez OE, Arredondo HA. Manual para el manejo de procesamiento de imágenes satelitales obtenidas del sensor remoto MODIS de la NASA, aplicado en estudios de ingeniería civil [Internet]. [Bogotá, Colombia]: Pontificia Universidad Javeriana; 2005. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10554/7050>
49. Posada E, Ramírez H, Espejo N. Manual de prácticas de percepción remota con el programa ERDAS IMAGINE 2011 [Internet]. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC): Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica - CIAF; 2021. Disponible en: https://www.un-spider.org/sites/default/files/ManualERDAS_web.pdf
50. Cabrera E, Vargas D, Galindo G, García M, Ordoñez M. Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación Nivel Subnacional Escala gruesa y fina. Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales-IDEAM-. Bogotá D. C. Colombia: IDEAM; 2011. 46 p.
51. Chavez P. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment*. 1988; 24(3):459-79.
52. Chavez P. Image-based atmospheric corrections-revisited and improved. *Photogrammetric engineering and remote sensing*. 1996;62(9):1025-35.
53. Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 2006;27(14):3025-33.
54. Jin S, Sader S. Comparison of time series tasseled cap wetness and the normalized difference moisture index in detecting forest disturbances. *Remote Sensing of Environment*. 2005;94(3):364-72.
55. Rouse J, Hass R, Schell J, Deering D. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. Third Earth Resources Technology Satellite (ERTS) Symposium, 1. En Greenbelt, ON, Canada; 1973. p. 309-17.
56. Mertes LAK, Hickman M, Waltenberger B, Bortman AL, Inlander E, McKenzie C, *et al.* Synoptic views of sediment plumes and coastal geography of the Santa Barbara Channel, California. *Hydrological Processes*. 1998;12(6):967-79.
57. Yépez S, Laraque A, Martínez JM, De Sa J, Carrera JM, Castellanos B, *et al.* Retrieval of suspended sediment concentrations using Landsat-8 OLI satellite images in the Orinoco River (Venezuela). *Comptes Rendus Geoscience*. 2018;350(1):20-30.
58. Wang LW, Smith C, Reddy S, Lewis A, Smith A. Evaluation of satellite remote sensing for operational monitoring of sediment plumes produced by dredging at Hay Point, Queensland, Australia. *Journal of Applied Remote Sensing*. 2007;1.
59. Peterson KT, Sagan V, Sidike P, Cox AL, Martinez M. Suspended Sediment Concentration Estimation from Landsat Imagery along the Lower Missouri and Middle Mississippi Rivers Using an Extreme Learning Machine. *Remote Sensing*. 2018;10(10):1503.
60. Schild KM, Hawley RL, Chipman JW, Benn DI. Quantifying suspended sediment concentration in subglacial sediment plumes discharging from two Svalbard tidewater glaciers using Landsat-8 and in situ measurements. *International Journal of Remote Sensing*. 2017;38(23):6865-81.
61. Flores J, Wu J, Stöckle C, Ewing R, Yang X. Estimating River Sediment Discharge in the Upper Mississippi River Using Landsat Imagery. *Remote Sensing*. 2020;12(15):2370.
62. Hernández B, Canet C, Molina J, Vásquez M. Algorithm to calculate suspended sediment concentration using Landsat 8 imagery. *Applied Ecology and Environmental Research*. 2019;13:6549-62.
63. Hossain A, Mathias C, Blanton R. Remote Sensing of Turbidity in the Tennessee River Using Landsat 8 Satellite. *Remote Sensing*. 21 de septiembre de 2021;2021:3785.

64. Mejía D, Soto VC, Martínez Z. Spatio-temporal modelling of wetland ecosystems using Landsat time series: case of the Bajo Sinú Wetlands Complex (BSWC)– Córdoba– Colombia. *Annals of GIS*. 2019; 25(3):231-45.
65. Flórez GY, Betancur JF, Monterroso MF, Londoño JM. Temporary wetland evolution in the upper Chinchiná river basin and its relationship with ecosystem dynamics. *DYNA*. 2018;85(207):351-9.
66. Cerón WL, Kayano MT, Ocampo C, Canchala T, Rivera IA, Avila A, *et al.* Spatio-Temporal Variability of Hydroclimatology in the Upper Cauca River Basin in Southwestern Colombia: Pre- and Post-Salvajina Dam Perspective. *Atmosphere*. 2021;12(11):1527.
67. Salas H. Synchronization and interdependence between the cycles of Colombia's hydroclimatology and El Niño-Southern Oscillation [Internet] [Trabajo de grado - Maestría]. [Medellín, Colombia]: Universidad Nacional de Colombia; 2020 [citado 21 de junio de 2024]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/78420>
68. Poveda G, Mesa OJ. Feedbacks between Hydrological Processes in Tropical South America and Large-Scale Ocean–Atmospheric Phenomena. 1997 [citado 21 de junio de 2024]; Disponible en: https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/10/10/1520-0442_1997_010_2690_fbhpit_2.0.co_2.xml
69. Restrepo JD, Kjerfve B. Magdalena river: interannual variability (1975–1995) and revised water discharge and sediment load estimates. *Journal of Hydrology*. 2000;235(1-2):137-49.
70. Ávila B, Gallo MN. Morphological behavior of the Magdalena River delta (Colombia) due to intra and interannual variations in river discharge. *Journal of South American Earth Sciences*. 2021;108:103215.
71. Ruano DM. Análisis de la variación espacio-temporal de la pluma de sedimentos del río Magdalena [Internet] [Maestría]. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano; 2017 [citado 21 de junio de 2024]. Disponible en: <https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/handle/20.500.12010/18914>
72. Hernández R, Ruiz A, Berlanga CA, Ponce JT. Analysis of flood pulse dynamics in the lower basin of the San Pedro River (northwestern Mexico) using remote sensing. *IJAR*. 2016;44(2):293-304.
73. Dolan W, Pavelsky TM, Piliouras A. Remote Sensing of Multitemporal Functional Lake-To-Channel Connectivity and Implications for Water Movement Through the Mackenzie River Delta, Canada. *Water Resources Research*. 2024;60(4):e2023WR036614.
74. Carrillo ID. Elaboración de un Modelo Aplicado a Imágenes Modis para la Estimación de los Sólidos Suspendidos Totales en la Desembocadura del Río Atrato [Internet]. 2016 [citado 21 de junio de 2024]. Disponible en: <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/3825>
75. Estupiñán LM, Flórez C, Quiñones MJ, Pacheco AM, Santos AC. Detection and characterization of Colombian wetlands using ALOS PALSAR and MODIS imagery. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci*. 2015;XL-7/W3:375-82.