RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	Diego Fernando Ballesteros León Yeider Alfonso Santiago Rojas
FACULTAD	Ingenierías
PLAN DE ESTUDIOS	Ingeniería Civil
DIRECTOR	Ing. Agustín Armando McGregor T.
CODIRECTOR (si aplica)	No Aplica
TÍTULO DE LA TESIS	Evaluación de recursos hídricos en la zona de Catatumbo mediante el procesamiento de imágenes satelitales
TITULO EN INGLES	Water resource assessment in the Catatumbo area using satellite image processing

RESUMEN
(70 palabras)

Se analizó la dinámica de los recursos hídricos mediante imágenes satelitales para evaluar las variaciones de las aguas superficiales entre 2004 y 2024. Se desarrolló una metodología para recopilar y filtrar imágenes, calcular el Índice de Agua de Diferencia Normalizada y estimar la superficie de las aguas superficiales, comparando anualmente los cambios temporales. Con base en los hallazgos, se propusieron recomendaciones para apoyar la restauración fluvial, la conservación y la gestión sostenible de los recursos hídricos.

RESUMEN EN INGLES

The dynamics of water resources were analyzed using satellite imagery to assess surface water variations between 2004 and 2024. A methodology was developed to collect and filter images, calculate the Normalized Difference Water Index, and estimate surface water area, comparing changes over time annually. Based on the findings, recommendations were proposed to support river restoration, conservation, and sustainable water resource management.

PALABRAS CLAVES	Recursos hídricos, imágenes satelitales, superficie de las aguas, restauración fluvial
PALABRAS CLAVES EN INGLES	Water resources, satellite imagery, water surface area, river restoration

CARACTERÍSTICAS

PÁGINAS:	PLANOS:	ILUSTRACIONES:	CD-ROM:

Evaluación de recursos hídricos en la zona de Catatumbo mediante el procesamiento de imágenes satelitales.

Diego Fernando Ballesteros León

Yeider Alfonso Santiago Rojas

Facultad de Ingenierías, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña

Ingeniería Civil

Ing. Agustín Armando McGregor T.

Marzo, 2026

Índice

1. Evaluación de recursos hídricos en la zona de Catatumbo mediante el procesamiento de imágenes satelitales. 12

1.1 Planteamiento del Problema 12

1.2 Formulación del Problema 14

1.3 Objetivos 14

1.3.1 Objetivo General 14

1.3.2 Objetivo Específicos 14

1.4 Justificación Del Problema 15

1.5 Delimitaciones 17

1.5.1 Delimitación Geográfica 17

1.5.1.1 Ubicación Geográfica. 17

1.5.1.2 Límites Físicos y Geográficos de la Cuenca del Catatumbo. 18

1.5.2 Delimitación Temporal 18

1.5.3 Delimitación Conceptual 19

1.5.3.1 Recursos hídricos. 19

1.5.3.2 Ríos y lagos. 19

1.5.3.3 Aguas subterráneas. 19

1.5.3.4 Imágenes satelitales. 19

1.5.3.5 Cambio climático. 20

1.5.3.6 Deforestación. 20

1.5.3.7 Cuenca hidrográfica. 20

1.5.3.8 Gestión sostenible. 20

1.5.4 Delimitación operativa 21

1.5.4.1 Google Earth Engine (GEE). 21

1.5.4.2 Base de datos del IDEAM 21

1.5.4.3 Google Earth Pro 22

1.5.4.4 QGIS. 22

2. Marco referencial 23

2.1 Marco Histórico 23

2.2 Marco Contextual 26

2.3 Marco Conceptual 28

2.3.1 Percepción remota 28

2.3.2 Cuerpos de agua superficiales 28

2.3.3 Variaciones espaciales y temporales 29

2.3.4 Imágenes Satelitales 29

2.3.5 Landsat 29

2.3.6 Lenguaje de Programación y API 29

2.3.7 Monitoreo de Cuerpos de Agua 29

2.3.8 Gestión de Cuencas Hidrográficas 30

2.4 Marco Teórico 30

2.4.1 Ciclo hidrológico 30

2.4.2 Recursos hídricos 31

2.4.3 Gestión integrada de recursos hídricos (GIRH) 32

2.4.4 Teledetección 32

2.4.5 Google Earth Engine (GEE) 33

2.4.6 Índices espectrales 34

2.4.6.1. Índice Diferencial Normalizado de Vegetación (NDVI). 34

2.4.6.2. El Índice Diferencial Normalizado de Nieve (NDSI). 34

2.4.6.3. Índice De Agua De Diferencia Normalizada (NDWI). 35

2.4.7 Análisis coeficiente de Pearson 36

2.5 Marco legal 37

2.5.1 Constitución política de Colombia 37

2.5.2 Leyes para la gestión de recursos hídricos 38

2.5.3 Normas que rigen las tecnologías de información y observación de la tierra . 38

2.5.4 Acuerdos internacionales 39

3. Diseño Metodológico 40

3.1 Tipo de Investigación 40

3.2 Población y Muestra 40

3.2.1 Población..... 40

3.2.2 Muestra 40

3.3 Procedimiento Metodológico..... 41

3.3.1 Obtención y “Depuración” de Datos Satelitales 41

3.3.2 Calculo de Índice NDWI 42

3.3.2.1 Proceso para generar umbrales adaptativos. 43

3.3.3 Estimación del área superficie hídrica doble enfoque metodológico 45

3.3.3.1 Cálculo por píxeles. 45

3.3.3.2 Técnica de polígonos. 45

3.3.4 Análisis sobre la variación del río..... 45

3.3.5 Relación de la variación de área con la precipitación anual 46

3.3.6 Esquema metodológico..... 47

3.3.7 Limitaciones del estudio 47

4. Resultados..... 49

4.1 Análisis actual del rio Catatumbo (sector la gabarra)..... 50

4.1.1 Análisis visual e interpretación hídrica..... 51

4.1.1.1 Análisis del cauce principal del rio..... 52

4.1.1.2 Áreas en los márgenes del rio. 53

4.1.1.3 Fragmentación Interna del rio. 54

4.1.1.4 Afluentes secundarios. 55

4.2 Evaluación del Río Catatumbo en el año 2007 56

4.2.1 Inspección Visual de los Recursos Hídricos – NDWI 2007 56

4.2.1.1 Descripción del cauce principal. 57

4.2.1.2 Análisis de Márgenes del Río.. 59

4.2.1.3 Afluentes externos. 60

4.3 Análisis de la variación en el área y morfología del río entre 2007 y 2024 60

4.3.1 Cambio en la Superficie del Área 61

4.3.1.1 Sedimentación. 65

4.3.1.2 Impacto Morfo-Dinámico. 65

4.3.1.3 Modificación en el ciclo hidrológico. 66

4.3.2 Cambio en la morfología del rio 66

4.4 Análisis de la variación temporal del área superficial del rio 68

4.4.1 Identificación de los Períodos Críticos de Pérdida 70

4.4.1.1 Período (2007-2013) 72

4.4.1.2 Período (2013-2015). 75

4.5 Correlación Perdida de Área con Temperatura 78

4.5.1 Relevancia del Estudio de la Relación entre Precipitación y Superficie Terrestre 78

4.5.1.1 Estación Quince Letras (Serie 2001-2023). 79

4.5.1.2 Estación Puerto Barco (Serie 2008-2017) 79

4.5.2 Provisión y Detalle de Datos..... 79

4.5.2.1 Datos de agua superficial. 79

4.5.2.2 Datos de lluvia.. 79

4.5.2.3 Datos Disponibles en Tablas. 80

4.5.3 Análisis de la correlación entre la variación de la superficie del rio y la precipitación anual. 81

4.5.3.1 Análisis Cualitativo de la Progresión Temporal. 82

4.5.3.2 Relación entre la Superficie Hídrica Total y la Precipitación Anual. 85

4.5.3.3 Relación entre la tasa promedio de pérdida anual y la Precipitación. 88

4.5.3.4 Comportamiento y respuesta Hídrica a la Variabilidad Pluviométrica. 91

4.5.3.5 Desacoplamiento estructural del forzante climático inmediato. 91

4.5.3.6 Sensibilidad dinámica a los extremos pluviométricos. 91

4.5.3.7 La discrepancia explicativa detectada. 92

4.6 Elaboración de Recomendaciones para la Gestión y Mitigación..... 92

4.6.1 Dragado selectivo..... 93

4.6.2 Reconexión del meandro..... 94

4.6.3 Repoblación vegetal ribereña..... 95

4.6.4 Bioingeniería de riberas 97

4.6.5 Delimitación de zonas de riesgo 98

5. Conclusiones 100

6. Recomendaciones 102

Referencias..... 103

Lista de Tablas

Tabla 1 Bandas Green y NIR para Landsat 5 y 8 35

Tabla 2 Rangos de valores NDWI 36

Tabla 3 Designación anual de umbrales de clasificación 44

Tabla 4 Áreas de superficie hídrica y boscosa en hectáreas 49

Tabla 5 Clasificación de Rangos y Colores 51

Tabla 6 Cambios en la Configuración Hídrica (2007-2024) 62

Tabla 7 Variación Temporal del Área Superficial del Rio 69

Tabla 8 Períodos Críticos de Pérdida Acelerada..... 71

Tabla 9 Precipitación Anual en Puerto Barco (2008-2017)..... 80

Tabla 10 Precipitación Anual en Quince Letras (2001-2023) 80

Tabla 11 Tendencia entre la Superficie Anual del Rio y la Precipitación 85

Tabla 12 Resultados de la Correlación de Pearson entre Área anual y Precipitación anual 85

Lista de Figuras

Figura 1 Recorrido del rio Catatumbo 17

Figura 2 Mapa región del Catatumbo 18

Figura 3 Coeficiente de correlación de Pearson 37

Figura 4 Diagrama de flujo del proceso metodológico..... 47

Figura 5 Áreas de superficie hídrica 49

Figura 6 Rio Catatumbo 2024..... 52

Figura 7 Márgenes del río..... 53

Figura 8 Fragmentación interna..... 54

Figura 9 Afluentes secundarios al cauce principal 55

Figura 10 Zona la Gabarra..... 58

Figura 11 Borde del Río..... 59

Figura 12 Afluentes secundarios al cauce principal 60

Figura 13 Cambios en el cauce principal..... 63

Figura 14 Área por Polígono perdida en el cauce..... 64

Figura 15 Cambio en la morfología del río..... 67

Figura 16 Pérdida total de Área por Periodo Critico 71

Figura 17 Variación del cauce entre 2007 y 2013 72

Figura 18 Zona con mayor cambio en el cauce 73

Figura 19 Perdida de área 74

Figura 20 Perdida de márgenes del río 76

Figura 21 Reducción del meandro..... 77

Figura 22 Comparación de la Precipitación Anual 81

Figura 23 Relación Completa Área-Precipitación (2013-2017) 82

Figura 24 Área y Precipitación en el sector Quince letras 83

Figura 25 Tendencia entre la Superficie Anual y la Precipitación 86

Figura 26 Tasa Promedio Anual de perdida 89

1. Evaluación de recursos hídricos en la zona de Catatumbo mediante el procesamiento de imágenes satelitales.

1.1 Planteamiento del Problema

A nivel global, la reducción en los cuerpos de agua superficiales en diferentes lugares del mundo y en nuestra región se ha convertido en un problema crítico el cual afecta la disponibilidad de recursos hídricos fundamentales para la vida y el desarrollo. Esta situación se intensifica en regiones donde por factores como las condiciones climáticas, la complejidad topográfica del terreno y el aumento de los grupos ilegales que dificultan el acceso presencial a las zonas para realizar las inspecciones y recolección de datos in situ. En este contexto lo que más han afectado la disponibilidad de los recursos hídricos ha sido la expansión hacia terrenos que deberían ser protegidos para la preservación de los recursos naturales, Según el World Resources Institute, la deforestación global ha tenido impactos significativos, con la pérdida de 83.0 millones de hectáreas (Mha) de bosque primario húmedo entre 2002 y 2024, representando el 16% de la pérdida total de cobertura arbórea y una disminución del 8.1% en el área total de bosque primario húmedo a nivel mundial. (Universidad de Maryland e Instituto de Recursos mu, 2025, pág. 1).Abordando la región del Catatumbo, que se caracteriza por su compleja hidrografía y rica biodiversidad, posee reservas de importantes recursos entre los que se cuenta el agua, afectado por situaciones problemáticas tales como los derrames de crudo, la presencia de cultivos ilícitos, las fumigaciones y la presencia de desplazados y refugiados. (Medina de perez, 2006, pág. 208)

“Debido a la explotación de recursos ha dejado una pérdida de más de 200.000 ha de bosque en la región, generando una variación en el uso del suelo y alteración en los ciclos hidrológicos” (DEFENSORÍA DEL PUEBLO, 2006, pág. 6) Esta tendencia se refleja de manera alarmante, donde, solo en 2019, se reportó la deforestación de 9,851 hectáreas, una cifra superior a las 7,338 hectáreas registradas en 2018, con la mayoría de las áreas deforestadas concentradas en esta región. (VÉLEZ ZUAZO & MORA, 2020) Esto ha llevado a desequilibrar los ciclos naturales y acelerar los cambios en el clima, por lo tanto, “la variación de la temperatura media, la precipitación anual, la humedad relativa y la escorrentía, llevaran a cambios del ciclo hidrológico siendo más compleja la gestión de los recursos hídricos”. (Menzel, Bürger, & Muzik, 2002, págs. 53-64)

Además la región del Catatumbo por su ubicación geográfica y su complejo relieve la hace una zona vulnerable para las operaciones de los grupos armados ilegales donde llevan a cabo direcciones acciones y consecuencias que terminan afectando la conservación de los recursos hídricos. En este caso específico vamos analizar cómo es la cuenca del Catatumbo donde se presentan las anteriores situaciones se convierten en un obstáculo para realizar los seguimientos, monitoreo y registro de información correspondientes de manera presencial para evaluar la variación real en los cuerpos superficiales de agua, por este motivo, surge como una solución la utilización de tecnologías de observación remota, es decir la obtención y el análisis a partir de imágenes satelitales gracias a Google Earth Engine (GEE), la cual se muestra como una herramienta práctica para conocer el cambio en el área de los cuerpos de agua en entornos de difícil acceso. Google Earth Engine integra un extenso set de imágenes satelitales del pasado con potenciales de análisis geoespacial de la escala global; se trata de una herramienta central

para científicos, investigadores y desarrolladores en el monitoreo de cambios de la superficie terrestre. (Matellanes, 2020)

1.2 Formulación del Problema

¿Cómo han cambiado los cuerpos de agua en la región del Catatumbo en el periodo 2004 a 2024?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evaluar los cambios y el estado actual de los recursos hídricos en la región del Catatumbo mediante el análisis y procesamiento de imágenes satelitales, determinando cambios en la extensión de los cuerpos de agua a lo largo del tiempo y proporcionando información relevante para el manejo sostenible de los recursos naturales en la zona.

1.3.2 Objetivo Específicos

Implementar una metodología sistemática para la gestión y recopilación de datos espaciales y temporales utilizando base de datos, enfocándose en las variables que afectan las cuencas hídricas del Catatumbo.

Desarrollar un análisis detallado y comparativo de las imágenes satelitales a través de Google Earth Engine para la identificación de tendencias y cambios en las cuencas hídricas del Catatumbo.

Formular un conjunto de recomendaciones y estrategias dirigidas a la solución de los problemas diagnosticados en las cuencas hídricas del Catatumbo.

1.4 Justificación Del Problema

El presente proyecto de investigación resulta clave para el avance del conocimiento científico y tecnológico aplicado a la gestión sostenible de los recursos hídricos en la región del Catatumbo. La implementación de tecnologías de análisis geoespacial como Google Earth Engine (GEE) permite recopilar, procesar y analizar grandes volúmenes de información satelital de manera eficiente, facilitando evaluaciones multi-temporales precisas sobre la dinámica de los cuerpos de agua (Gis&Beers, 2017). Este enfoque constituye un aporte relevante al generar información científica actualizada que supera las limitaciones de los métodos tradicionales de monitoreo hidrológico (Ramos López, 2022).

Esta investigación se sustenta de evidencias regionales que han documentado cambios drásticos en el comportamiento del río Catatumbo. En el sector de La Gabarra se reportó una reducción cercana al 70 % del caudal en un periodo de pocos meses, evidenciando la disminución de la extensión superficial del río y la aparición de bancos de arena en su lecho (Sánchez, 2016). Esta situación coincide temporalmente con el fenómeno de El Niño 2014–2016,

el cual fue caracterizado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) como un evento severo de sequía con amplia cobertura espacial y efectos prolongados en múltiples zonas hidrográficas del país. (IDEAM, 2022)

Adicionalmente, estudios sobre el impacto del cambio climático en los recursos hídricos en Colombia han evidenciado que alteraciones en precipitación y temperatura pueden traducirse en modificaciones del régimen de escorrentía y de los sistemas fluviales, lo cual contribuye a explicar variaciones observadas en los cuerpos de agua de la zona de estudio. (Alarcón, Zafra, & Echeverri, 2019)

En este contexto, resulta técnicamente pertinente analizar si la reducción reportada en el río Catatumbo se relaciona con dicho evento climático y determinar si durante este periodo se presentó una aceleración en la pérdida de superficie hídrica. El análisis multi-temporal mediante imágenes satelitales e índices espectrales permite cuantificar objetivamente la variación del área del cuerpo de agua, identificar zonas críticas y establecer patrones de cambio asociados tanto a factores climáticos como antrópicos. Adicionalmente, el estudio permitirá generar cartografía de cambio en la cobertura hídrica y vegetal, aportando información técnica útil para la planificación territorial, la gestión del riesgo por sequía y la toma de decisiones en infraestructura hidráulica y manejo ambiental en la cuenca del río Catatumbo.

Finalmente, el desarrollo del proyecto fortalece la formación académica en el uso de herramientas tecnológicas aplicadas al análisis hidrológico y ambiental, consolidando

competencias en investigación aplicada y gestión de información geoespacial orientadas a la ingeniería civil.

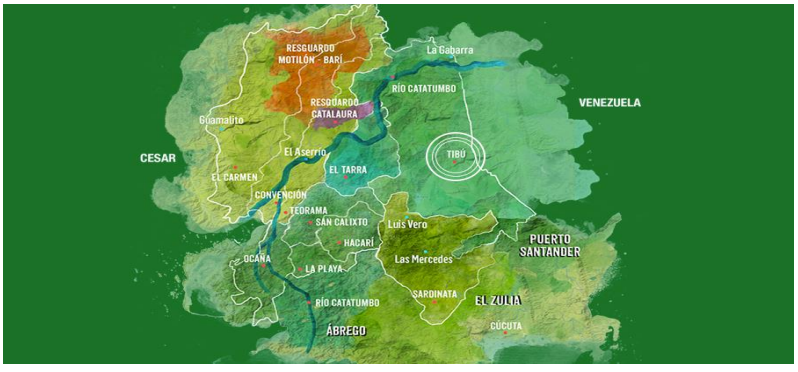
1.5 Delimitaciones

1.5.1 Delimitación Geográfica

1.5.1.1 Ubicación Geográfica. El río Catatumbo nace en el Cerro Jurisdicciones, que se encuentra ubicado en el municipio de Ábrego, Norte de Santander, Colombia. Este río no solo es un recurso natural clave, sino también un elemento de identidad para los habitantes de la región, ya que recorre prácticamente todos los municipios de la región. La cuenca del río Catatumbo es un sistema binacional, ya que atraviesa tanto Colombia como Venezuela. Este río, que se origina en Colombia, fluye hacia el Lago de Maracaibo en Venezuela, lo que lo convierte en un río internacional. “El Catatumbo es un río que posee dos nacionalidades, ya que se origina en el país colombiano y termina su recorrido en el país venezolano” (Jácome Ramírez, 2016). “Como se muestra en la figura 1”

Figura 1

Recorrido del rio Catatumbo

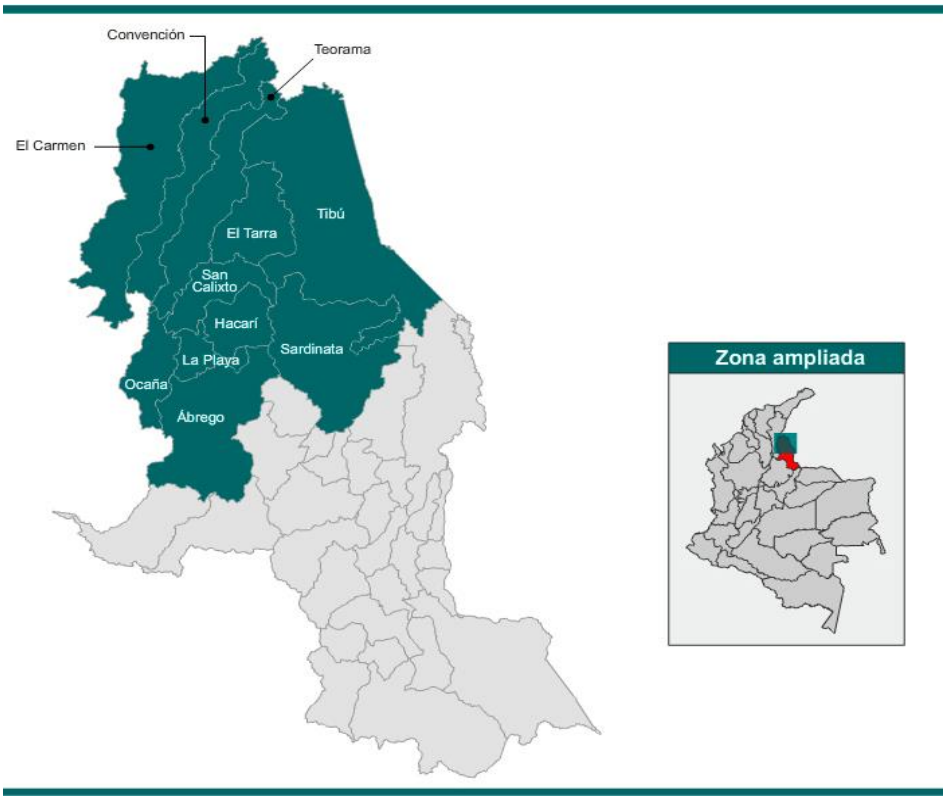


Nota. Zona del Catatumbo. (Sanabria, 2016)

1.5.1.2 Límites Físicos y Geográficos de la Cuenca del Catatumbo. "La cuenca del Catatumbo se localiza al NE del territorio nacional, en el departamento de Norte de Santander en límites con Venezuela; limita al W con el macizo de Santander, al N con la serranía del Perijá" (Lozano & Zamora, 2014, pág. 5)

Figura 2

Mapa región del Catatumbo



Nota. Municipios que conforman el Catatumbo (ubicación geográfica) tomado de (VerdadAbierta.com, 2017)

1.5.2 Delimitación Temporal

Este proyecto de investigación se realizará en un lapso de tiempo de seis 6 meses.

1.5.3 Delimitación Conceptual

Estos conceptos son fundamentales para orientar la investigación como tal (recursos hídricos, análisis geoespacial, Google Earth Engine) que nos proporciona imágenes satelitales de alta resolución, precipitación, fuentes hídricas, periodo de retorno,

1.5.3.1 Recursos hídricos. Los recursos hídricos de una nación o una región son cuerpos o masas donde se concentran volúmenes de agua que forman diferentes ecosistemas. (Equipo editorial, Etece., 2020)

1.5.3.2 Ríos y lagos. Acumulaciones de agua dulce estancada o que fluye, y que irrigan la plataforma continental. Los ríos nacen en el hielo que se derrite en la cumbre de las montañas, y los lagos son estancamientos de dichas aguas. (Equipo editorial, Etecé., 2020)

1.5.3.3 Aguas subterráneas. Depósitos de agua dulce bajo tierra, formados durante largos períodos de tiempo y con un mayor o menor grado de pureza, dependiendo del entorno subterráneo en el que se encuentren. (Equipo editorial, Etece., 2020)

1.5.3.4 Imágenes satelitales. Las imágenes satelitales son la representación visual de la información capturada por un sensor montado en un satélite artificial. Estos sensores recogen la información reflejada por la superficie de la Tierra que luego es enviada de regreso a ésta y procesada convenientemente. (UCH Universidad de ciencias y humanidades, 2018, pág. 1).

1.5.3.5 Cambio climático. Se denomina cambio climático a la variación global del clima de la Tierra debido a causas naturales, pero principalmente a la acción humana, que se traduce en quema de combustibles fósiles, pérdida de bosques y otras actividades producidas en el ámbito industrial, agrícola y transporte, entre otros, como consecuencia de una retención del calor del Sol en la atmósfera. (CEPAL, Naciones Unidas., 1984)

1.5.3.6 Deforestación. La deforestación es la destrucción o agotamiento de la superficie forestal (bosques naturales), habitualmente debido a la acción humana mediante la tala o la quema de árboles, con el objetivo de ganar insumos industriales (como la industria maderera y papelera, entre otras) o bien superficie cultivable para las labores agropecuarias. (Equipo editorial, Etecé., 2020, pág. 1).

1.5.3.7 Cuenca hidrográfica. Una cuenca hidrográfica es todo el territorio drenado por un río y sus afluentes, delimitado por la línea de cumbres, llamada divisora de aguas, la cual marca la división entre dos cuencas, la cuenca drena sus aguas al mar u otro cuerpo de agua a través de diferentes cauces que convergen en un cauce principal, el cual le da nombre a la cuenca. (Escenarios hidricos 2030., 2021, pág. 1).

1.5.3.8 Gestión sostenible. Es la manera de promover el manejo y el desarrollo coordinado del agua, la tierra y los recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico resultante de manera equitativa, sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales. (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2025, pág. 1)

1.5.4 Delimitación operativa

Google Earth Engine (GEE). El banco de imágenes suministro datos de los cuales en particular se analizará la variación en el aumento o disminución del área superficial de los cuerpos de agua en la zona del Catatumbo, lo que facilita la toma de datos en tiempo real en áreas de difícil acceso por sus condiciones. De esta manera se espera contar con información clara para entender el comportamiento de los recursos hídrico y tomar acciones para su gestión y conservación de las aguas.

1.5.4.1 Google Earth Engine (GEE). Es una plataforma de análisis geoespacial que ofrece una solución innovadora para el procesamiento de grandes volúmenes de datos relacionados con la observación de la Tierra, Al mismo tiempo, GEE está ligado directamente a varios programas satelitales que permiten integrar en las bases de datos las imágenes que acaban de ser tomadas. GEE es, por lo tanto, una solución innovadora para el manejo de los datos masivos (“Big Data”), que permite afrontar problemas globales, dando resultados velozmente. De esta manera, permite proponer y actuar en soluciones para dichos problemas de forma ágil. (Perilla & Francois Mas, 2020, pág. 1)

1.5.4.2 Base de datos del IDEAM. Es una institución pública de apoyo técnico y científico al Sistema Nacional Ambiental, que genera conocimiento, produce información confiable, consistente y oportuna, sobre el estado y las dinámicas de los recursos naturales y del medio ambiente, que facilite la definición y ajustes de las políticas ambientales y la toma de decisiones por parte de los sectores públicos, privados y la ciudadanía en general. (IDEAM, s.f.)

1.5.4.3 Google Earth Pro. Google Earth es una aplicación virtual que nos facilidad para explorar nuestro planeta, fundamentado a partir de datos cartográficos e imágenes satelitales. Earth resalta entre las demás aplicaciones parecidas por ofrecer imágenes por satélite de alta calidad, “Se trata de un software gratuito, que cuenta con distintas versiones disponibles para la mayoría de plataformas populares, ya sean móviles o de escritorio. También es posible usar Google Earth online sin necesidad de instalar nada en los dispositivos”. (Collado, 2021, pág. 1).

1.5.4.4 QGIS. Es un Sistema de Información Geográfica gratuito y de código abierto, ideal para crear mapas compuestos por múltiples capas, trabajar con datos vectoriales (como puntos, líneas y polígonos), realizar análisis espaciales complejos como análisis de redes, modelos hidrológicos o modelado de terreno, así como para aplicar simbología avanzada, etiquetado, y proyecciones bajo demanda. (Polimetro, 2026, pág. 1)

2. Marco referencial

2.1 Marco Histórico

La gestión y conservación de los recursos hídricos han cobrado una importancia creciente en las últimas décadas, particularmente debido a la influencia de actividades humanas y los cambios climáticos que han modificado sustancialmente la disponibilidad y la distribución de estas valiosas reservas. La reducción en los cuerpos de agua superficiales representa un problema crítico a nivel mundial; entre 1984 y 2015, se determinó una disminución aproximada de 90 mil kilómetros cuadrados en los cuerpos de agua en todo el planeta, una variación donde la causa principal se atribuye a las actividades humanas que afectan los ciclos de la naturaleza. (Mota, Aguiar, Mateus, & Adamatti, 2020, pág. 2) Este problema se hace más evidente en zonas de difícil acceso donde las condiciones topográficas no son favorables, la presencia de grupos ilegales restringe más el ingreso a estas zonas dificultando el monitoreo y la recolección de datos. Como bien lo advierte Brigitte Baptiste, ahí donde hay coca, deforestación y minería criminal es más complicado investigar. Sobre todo, donde hay minería. Las áreas con maquinaria en el Chocó, por ejemplo, se vuelven completamente inaccesibles. (Baptiste, 2018)

En el siglo XIX la tecnología satelital surge como una solución alternativa impulsada inicialmente por necesidades militares, la cual ha estado evolucionando con el tiempo, siendo una herramienta poderosa para observar el planeta desde el espacio. Todo comienza con el registro de las primeras fotografías aéreas desde globos aerostáticos. Luego de haber sido puesto en órbita el primer satélite Sputnik 1, lanzado al espacio por la Unión Soviética en 1957, cuando

esta tecnología empezó a tener mayor relevancia en la investigación científica. Marcando un hito con el lanzamiento del Landsat 1 por Estados Unidos en 1972, uno de los primeros satélites de observación y análisis de las superficies del planeta. Con tecnología integrada como el RBV (Return Beam Vidicon) y el MSS (Multispectral Scanner System), obteniendo imágenes con una resolución de 80 metros y un ancho de barrido de 185 km, siendo un punto de partida para la evolución de la teledetección satelital. (Flypix, 2023)

Partiendo de lo anterior surge una herramienta de análisis geoespacial como Google Earth Engine, una plataforma con la capacidad de procesar grandes cantidades de datos satelitales. Debido a su función para analizar de manera temporal y espacial, se convierte hoy en una solución para hacerle seguimiento al comportamiento de las diferentes superficies del planeta, afianzándose como una alternativa eficiente para superar las limitaciones por el difícil acceso al territorio. (Perilla & François Mas, 2020) El estudio de McCullough et al. (2013) ilustra la capacidad de los satélites MODIS para monitorear los cuerpos de agua con una resolución de 250 metros, facilitando la observación de cambios a largo plazo en lagos de regiones como Maine, Estados Unidos. (Mota, Aguiar, Mateus, & Adamatti, 2020, pág. 3) En este análisis es importante para comprender los comportamientos de las aguas superficies acuáticas y saber responder a sus variaciones de manera informada y oportuna. De una manera global, la investigación de Pekel “llevo estas observaciones al emplear la plataforma Google Earth Engine para analizar las masas de agua superficiales de todo el mundo desde 1984 hasta 2015”. (Mota, Aguiar, Mateus, & Adamatti, 2020, pág. 2) El manejo y conocimiento del comportamiento temporal de los recursos hídricos superficiales se ha vuelto aún más utilizado (Pekel et al., 2014). “identificar cómo y dónde se movilizan los cuerpos de agua como ríos, arroyos y manantiales es

esencial para determinar diferentes planes para la gestión que busque mitigar los impactos negativos y los cambios ambientales en estos recursos". (Cavaller Riva, Ortega Yubro, Dueñas, Sosa, & Villodas, 2020, pág. 2)

El uso de herramientas como Google Earth Engine en Colombia ha tomado importancia en el análisis de los comportamientos de las diferentes superficies como es el caso del estudio realizado en la Amazonia, en específico el proyecto MapBiomas Agua Colombia, que fue realizado con esta tecnología para determinar las variaciones del agua superficial en Amazonía de 1985 a 2023. Gracias a la metodología aplicada en el proyecto se logró tener los mapas del agua superficial de forma mensual y anual, lo que permite determinar los cambios producidos en los últimos 39 años. Estos proyectos evidencian la importancia y capacidad de la teledetección para hacer frente a problemas ambientales a gran escala, reforzando la necesidad de contar con plataformas eficientes para realizar monitoreo y comprender de la transformación de los ecosistemas hídricos a lo largo del tiempo. (MapBiomas Agua Colombia , 2024, pág. 4)

Otro caso que representa lo esencial que es el empleo de estas herramientas es el ejemplo concreto del estudio de David Hernández Vargas (2024) realizado en la región del Chocó entre San Isidro, Villa Conto, Paimadó y Quibdó. Esta investigación se centró en el uso de imágenes satelitales de 2017 y 2023 para determinar los índices NDVI y NDWI que permitieron identificar las variaciones en la superficie del suelo y cuerpos de agua. Los análisis mostraron que las áreas cercanas a ríos como el Atrato y el Quito presentaron niveles altos de humedad entre ambos años, los resultados de los índices de humedad superficial mostró un aumento del valor máximo del NDWI (de 0.199892 en 2017 a 0.22583 en 2023), dejando como evidencia una mayor

presencia de agua superficial en algunos sectores; pero este estudio también identifico el aumento de los lugares donde se registró bajos valores del índice asociado a pérdida de humedad y posible degradación del suelo, lo que podría estar muy relacionado con la deforestación o el uso del suelo para fines agrícolas. (Hernández Vargas, 2024)

El uso de teledetección como tecnología innovadora, mediante la herramienta Google Earth Engine, se convierte en una plataforma esencial para el monitoreo de los recursos hídricos, en especial regiones de difícil acceso como la cuenca del Catatumbo en Colombia. Específicamente en el sector de La Gabarra, se ha presentado una notable reducción en un 70% del área superficial del rio Catatumbo, (Sánchez, 2016) su aplicación es primordial para realizar un estudio y seguimiento para dejar un registro de datos que contribuya a la elaboración de estrategias de gestión y conservación. Esta investigación se alinea con el avance tecnológico, centrándose en contribuir a una gestión sostenible con base en informacion en tiempo real de los cuerpos de agua.

2.2 Marco Contextual

El Catatumbo, es una zona del departamento de Norte de Santander, es un territorio con una extensa riqueza en biodiversidad, hidrocarburos y actividades agrícolas. Su principal fuente hídrica es el río Catatumbo que lleva el mismo nombre de la región, su punto de nacimiento son las montañas en el municipio de Ábrego, haciendo un reocorrido por varios municipios como La Playa, Ocaña, Teorama, Convención, Hacarí, San Calixto, El Carmen, Sardinata, El Tarra, Tibú y La Gabarra, para luego terminar desembocando en el Lago de Maracaibo, en Venezuela. (

Rincón & Santisteban, 2020) Esta región se encuentra ubicada en las zonas de transicion montañosa de las serranías de Los Motilones, Tibú y de Oro. Con excepción de la planicie aluvial, que es plana a ligeramente plana, el resto del área es quebrada y ondulada. (Neglia & Hernández, 2022)

La región del Catatumbo abarca una extensión de 1.136.137 hectáreas, de las cuales 397.779 son aptas para la agricultura, 59.827 para el aprovechamiento pecuario y 149.073 son de uso agropecuario mixto (cultivo y ganadería) (García J. J., 2016) para la producción agrícola, el 8% para el desarrollo agroforestal y solo un 3% es apto para inversión agropecuaria. En términos económicos, sectores como la agricultura, ganadería, silvicultura, pesca y minería representa el 42,6% del valor agregado de la subregión, con un aporte de 681 mil millones de pesos siendo el sector primario, el sector secundario (industria manufacturera) con el 8,2% y 131 mil millones de pesos, y luuego encontramos el sector terciario (comercio, transporte, servicios) con un 49,2% y 787 mil millones lo que muestran que los recursos naturales y los servicios son la fuente principal de la economía. (Agencia de renovación del territorio, 2023)

La presente investigación tiene como objetivo analizar el aumento o disminución del área de los cuerpos de agua en la zona del Catatumbo, en un periodo tiempo comprendido entre (2004-2024). Para lograr este análisis utilizamos Google Earth Engine (GEE) para extraer datos e imágenes. Para abordar esta problemática, se utilizarán imágenes satelitales procesadas mediante la plataforma Google Earth Engine (GEE), una herramienta poderosa que permite observar año tras año cómo han cambiado los cuerpos de agua en la zona. Este enfoque facilitará la identificación de patrones de disminución, zonas más vulnerables y áreas donde la pérdida ha

sido más evidente. A partir del análisis satelital, se pretende no solo entender sino también generar información clave que sirva como base para proponer estrategias de gestión y conservación del recurso hídrico. El estudio busca aportar evidencia técnica y visual que apoye la toma de decisiones en un territorio históricamente afectado por el conflicto, la falta de planeación ambiental y el abandono institucional.

2.3 Marco Conceptual

En el siguiente proyecto de investigación abordaremos los siguientes conceptos fundamentales para el desarrollo y comprensión más precisa.

2.3.1 Percepción remota

La percepción remota también conocida como teledetección es la ciencia de adquirir, procesar e interpretar imágenes y/o datos, capturados desde aeronaves o satélites. (Cenicaña, 2015)

2.3.2 Cuerpos de agua superficiales

Son extensiones de agua que están en la superficie o de manera subterránea, abarcando desde grandes océanos, arroyos, ríos y lagos. (Portillo, 2024)

2.3.3 Variaciones espaciales y temporales

Es un concepto crucial en el mundo de la analítica, que permite a las empresas comprender y analizar los cambios en los datos durante diferentes períodos de tiempo. (Bizmanualz, 2020)

2.3.4 Imágenes Satelitales

Se puede definir como la representación visual de la información capturada por un sensor montado en un satélite artificial. (Gobierno de Mexico, 2024)

2.3.5 Landsat

Misión satelital de observación de la Tierra más antigua en operación, generando imágenes desde 1972 hasta la actualidad, capturando imágenes en 12 bandas distintas con una resolución máxima de 15m. (INEGI, 2018)

2.3.6 Lenguaje de Programación y API

La API de Google Earth javascript y python son los lenguajes de la API de Google Earth plataforma que proporciona a los investigadores una herramienta para crear scripts personalizados mediante los datos satelitales, con un editor de código en línea para crear scripts. (Ramos lopez, 2022)

2.3.7 Monitoreo de Cuerpos de Agua

Análisis de la variación de las áreas y volúmenes de los ríos, lagos etc. en diferentes periodos.

2.3.8 Gestión de Cuencas Hidrográficas

Análisis de la dinámica de cuencas hidrográficas para la planificación y gestión sostenible de los recursos hídricos.

2.4 Marco Teórico

La base teórica de esta investigación se basa en la integración de teorías, modelos y conceptos claves para la evaluación de los recursos hídricos utilizando imágenes satelitales y herramientas de análisis geoespacial. Este marco teórico no sólo proporciona una base sólida para la construcción del estudio, sino que también ayuda a ubicar el trabajo dentro del contexto de la literatura existente, definiendo términos clave, estableciendo las bases para las hipótesis y los objetivos, y proporcionando un marco teórico para interpretar los resultados del estudio.

2.4.1 Ciclo hidrológico

Es el ciclo natural en el que se explica el flujo continuo que recibe el agua en toda la superficie del planeta, inicia con la evaporación del agua de superficies como océanos, ríos, lagos, etc., donde el calor del sol transforma el agua líquida en vapor. A medida que este vapor de agua va subiendo se enfría gradualmente y se convierte en gotas de agua que se agrupan en las nubes; lo que conocemos como condensación. Cuando las gotas de agua han logrado cierto tamaño, caen hacia la superficie en forma de precipitación lo que puede ser lluvia, nieve, granizo, etc., dependiendo de las características de la atmósfera. Una parte de esta agua permanece en la superficie terrestre para la absorción de los seres vivos, mientras que otra parte fluye para ir a los cuerpos de agua más grandes lo que denominamos escorrentía, y luego otra

parte se infiltra en el suelo, para ir a los acuíferos subterráneos. Finalmente, el agua vuelve a la atmósfera concluyendo el ciclo. (OROMAPAS, 2022)

2.4.2 Recursos hídricos

Son el conjunto de aguas dulces y aguas saladas que se extienden por toda la superficie, así como en el subsuelo, es decir, los cuerpos de agua continentales como ríos, lagos, lagunas y embalses, acuíferos. El análisis para evaluar y gestionar estos recursos se realiza mediante monitoreo, mediciones directas y realización de modelos hidrológicos, para determinar su estado actual y su variación temporal. (CEPAL, 2024)

Las aguas superficiales forman una de las partes más importantes de los recursos hídricos, ya que estos son aquellos cuerpos de agua que existen en la superficie de la tierra y en contacto con la atmósfera. Estos cuerpos de agua pueden ser, ríos, lagunas, lagos o embalses, y también arroyos; son las únicas que se pueden observar a simple vista, a diferencia de las aguas subterráneas que existen ocultas bajo la superficie del suelo. Su origen se da mediante la precipitación directa, también por el nacimiento natural que están en la misma superficie terrestre, y del escurrimiento de las cuencas limítrofes, su ciclo está influenciado por el clima, el relieve o el uso del suelo. La clasificación de las aguas superficiales para realizar una mejor gestión se dan en agrícola, doméstico, pecuario, industrial, recreativo o energético, a su vez, puede ser consuntivo el volumen de agua varía según su uso, o puede ser no consuntivo cuando el recurso permanece en condiciones similares luego ser utilizado. (Rothschuh, 2022)

2.4.3 Gestión integrada de recursos hídricos (GIRH)

Es un proceso de gestión que se centra en el desarrollo coordinado planificado e integral donde involucra las autoridades del gobierno, comunidades y usuarios, para el manejo del agua, la tierra y de los recursos relacionados, con el propósito mejorar los beneficios sociales y económicos llevando un equilibrio con el medio ambiente es decir sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas. Esta nueva forma de gestionar los recursos parte de la necesidad de transformar la manera en que se venían gestionando estos recursos los cuales no dieron los resultados esperados llevando a un servicios pobres e inadecuados. La GIRH se fundamenta en principios que surgieron en la Conferencia internacional sobre agua y medio ambiente celebrada en Dublín en el año 1992, donde mencionan que "el agua dulce es un recurso vulnerable y limitado, de la vida y del desarrollo sostenible." La GIRH percibe el recurso del agua como un bien público que tiene valor, y es por esto que ha ser utilizada, gestionada de una manera equitativa, eficiente y sostenible. (Global Water Partnership-GWP, 2022)

2.4.4 Teledetección

Es una tecnología que nos permite obtener información de las diferentes superficies del planeta de manera remota sin la necesidad de toma de datos in situ. Esta recolección de datos se realiza mediante sensores ubicados en satélites que están en órbita alrededor de la tierra. Toman lectura de la energía electromagnética reflejada de la superficie del planeta, Mediante la relación existente entre la radiación solar, el sensor y la relación con el tipo de superficie, ejemplo: vegetación, agua, suelo, nieve, construcciones, etc.

Cada superficie tiene una manera diferente de interactuar con la energía ya que pude ser absorbida o reflejada, permitiendo identificar los diferentes tipos de cobertura y condiciones ambientales. Con los datos registrados se procesan para obtener imágenes con herramientas digitales donde su análisis permite determinar patrones de variación y características concretas de una zona específica. Por su capacidad para analizar grandes extensiones y volúmenes de datos se convierte en una herramienta fundamental para sectores como la agricultura, la gestión hídrica, ordenamiento territorial, el estudio del cambio climático, la evaluación en zonas de desastres naturales, etc. (Instituto Geográfico Nacional, s.f.)

2.4.5 Google Earth Engine (GEE)

Es una plataforma que opera en la nube la cual procesa datos geoespaciales, diseñada para visualizar y analizar grandes volúmenes de datos que provienen de los sensores remotos. Esta herramienta permite trabajar con imágenes satelitales con la ventaja de acceder a bases de datos sin necesidad de almacenarlas de manera local lo que hace más fácil el procesamiento y análisis. En los últimos años, GEE se ha consolidado como una solución poderosa para estudios ambientales a escala global, permitiendo monitorear diferentes fenómenos en el territorio como la cobertura vegetal, cuerpos de agua, áreas afectadas por incendios, entre otros. Su estructura basada en la nube posibilita realizar análisis espaciales complejos, utilizando scripts en JavaScript o Python, lo que amplía su aplicabilidad en ámbitos como la agricultura, la gestión del agua, la planificación territorial y la conservación ambiental. (Perilla & François Mas, Instituto de Geografía UNAM, 2020)

2.4.6 Índices espectrales

Son indicadores que permiten obtener diferentes características de la superficie del planeta mediante el procesamiento de información obtenida por los sensores en los satélites. Los índices espectrales soy muy importantes para los estudios ambientales y la gestión territorial ya que se pueden identificar las extensiones vegetales, la presencia de cuerpos de agua, entre otras variables. A partir de imágenes satelitales capturadas por Landsat se obtienen los índices, como el NDVI (vegetación), el NDWI (agua) o el NDSI (nieve). (EOS Data Analytics,Inc., 2023)

2.4.6.1. Índice Diferencial Normalizado de Vegetación (NDVI). Indica la densidad relativa o la cantidad de la vegetación verde presente en la imagen. Este índice utiliza la reflectancia de una banda roja alrededor de 0,66 μm y una banda del infrarrojo cercano alrededor de 0,86 μm. La banda roja corresponde a la zona de la planta encargada de la absorción de clorofila, mientras que la banda cercana al infrarrojo corresponde a las zonas de alta reflectancia, normalmente en la parte superior de la vegetación. Estas dos bandas detectan diferentes niveles de profundidad en la vegetación. (EOS Data Analytics,Inc., 2023)

2.4.6.2. El Índice Diferencial Normalizado de Nieve (NDSI). Se utiliza para definir la presencia de nieve/hielo. Es la relación (ratio) estándar entre la diferencia en la reflectancia en las bandas únicas y la diferencia espectral para identificar la nieve entre el resto de características de la imagen, incluidas las nubes. La capa de nieve es tan brillante como las nubes, y esto hace que sea difícil diferenciarla de ellas. Sin embargo, a 1,6 mm, la capa de nieve absorbe la luz solar y por esa razón aparece representada más oscura que las nubes. (EOS Data Analytics,Inc., 2023)

2.4.6.3. Índice De Agua De Diferencia Normalizada (NDWI). Se utiliza para resaltar el aspecto de las masas de agua en una imagen de satélite. Para ello, se reduce considerablemente la reflectancia del suelo y la vegetación, lo que permite que dichas masas de agua "destaquen" en la imagen. (EOS Data Analytics,Inc., 2023)

En 1996 McFeeters propone Normalized Difference Wáter Índex (NDWI) el índice espectral más usado en el análisis de los cuerpos superficiales de agua. En este proceso el NDWI combina las bandas espectrales del verde visible (GREEN) y del infrarrojo cercano (NIR) dando como resultados valores que permiten la identificación y variación de superficies con agua, convirtiéndola en una herramienta principal para el monitoreo y seguimiento de ríos, lagos, humedales, etc. (EOS Data Analytics,Inc., 2023) .

Este indicador es determinando con la fórmula del NDWI es la siguiente:

$$NDWI = \frac{(Green - NIR)}{(Green + NIR)}$$

Tabla 1

Bandas Green y NIR para Landsat 5 y 8

Satélite	Sensor	Banda Verde (Green)	Banda Infrarrojo Cercano (NIR)	Resolución espacial
Landsat 5	TM (Thematic Mapper)	Banda 2 (0.52–0.60 µm)	Banda 4 (0.76–0.90 µm)	30 m
Landsat 8	OLI (Operational Land Imager)	Banda 3 (0.53–0.59 µm)	Banda 5 (0.85–0.88 µm)	30 m

Nota. Bandas utilizadas para el cálculo del NDWI se derivan directamente de los sensores ópticos

Los valores de los cuerpos de agua son superiores a 0,5, mientras que la vegetación tiene valores mucho más pequeños, lo que permite identificar más fácilmente la vegetación de estas. Los elementos construidos tienen valores positivos entre cero y 0,2. Los valores del NDWI corresponden a los siguientes rangos.

Tabla 2

Rangos de valores NDWI

Rangos	Descripción
0,2 – 1	Superficie del agua
0,0 – 0,2	Inundación, humedad
-0,3 – 0,0	Sequía moderada, superficies sin agua
-1 – -0,3	Sequía, superficies sin agua

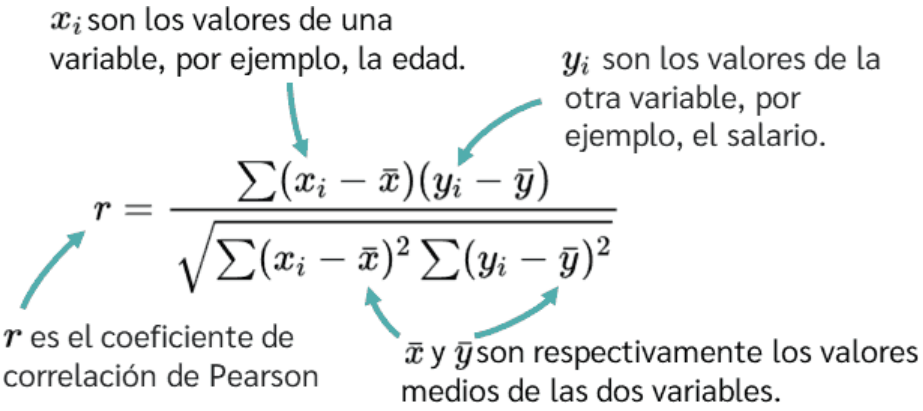
Nota. Interpretación de los índices

2.4.7 Análisis coeficiente de Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson se calcula mediante la siguiente ecuación. Aquí r es el coeficiente de correlación de Pearson, x_i son los valores individuales de una variable, por ejemplo la edad, y_i son los valores individuales de la otra variable, por ejemplo el salario, y $\bar{x}$ e $\bar{y}$ son los valores medios de las dos variables respectivamente. (numiqo e.U. Graz, 2025)

Figura 3

Coeficiente de correlación de Pearson



Nota. Fórmula para el cálculo. (numiqo e.U. Graz, 2025)

2.5 Marco legal

2.5.1 Constitución política de Colombia

Artículo 79. Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines. (Asamblea Nacional Costituyente, 1991, Articulo 79, 2026).

Artículo 80. El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados. Así mismo, cooperará con otras naciones en

la protección de los ecosistemas situados en las zonas fronterizas. (Asamblea Nacional Costituyente, 1991, Articulo 80, s,f)

2.5.2 Leyes para la gestión de recursos hídricos

LEY 99 DE 1993 (diciembre 22). Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones. (Congreso de la república de Colombia,1993, Ley 99, 1993)

DECRETO 3930 DE 2010 (octubre 25) Compilado por el Decreto 1076 de 2015. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones. (Presidencia de la Republica de colombia 2010, Decreto 3930, 2010)

2.5.3 Normas que rigen las tecnologías de información y observación de la tierra

Resolución 2182 de 2016 diciembre 23 de 2016. "Por el cual se modifica y consolida el Modelo de Almacenamiento Geográfico contenido en la Metodología General para presentación de Estudios Ambientales y en el Manual de Seguimiento Ambiental de Proyectos" (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016, Resolución 2182, 2016)

2.5.4 Acuerdos internacionales

La Convención Ramsar sobre Humedales de Importancia Internacional fue adoptada en 1971 y tiene por objetivo promover acciones nacionales y la cooperación internacional para la conservación y el uso racional de los humedales y sus recursos. Es el único tratado global relativo al medio ambiente que se ocupa de un tipo de ecosistema en particular. (Ministerio de Relaciones Exteriores de Colombia, 1971, Acuerdo Ramsar, 2026)

3. Diseño Metodológico

3.1 Tipo de Investigación

La presente investigación es de tipo aplicada y descriptiva, con un enfoque cuantitativo. Su objetivo principal es analizar la variación temporal en los cuerpos de agua de la región del Catatumbo durante un periodo entre 2004 y 2024. Estos análisis se realizarán mediante el uso de imágenes satelitales y herramientas de teledetección. El enfoque cuantitativo permitirá medir, calcular y comparar áreas de cuerpos de agua a lo largo del tiempo permitiendo la identificación de patrones en el cambio.

3.2 Población y Muestra

3.2.1 Población

La población objetivo de esta investigación está compuesta por todos los datos satelitales disponibles para la región del Catatumbo en el periodo de estudio como lo es específicamente en el sector de la Gabarra, identificables mediante imágenes satelitales de las misiones Landsat 5, 7 y 8.

3.2.2 Muestra

La muestra seleccionada consiste en imágenes satelitales anuales correspondientes a los años 2004 a 2024. Estas imágenes serán obtenidas exclusivamente de las misiones Landsat 5, 7 y

8. Se priorizarán aquellas imágenes con la mejor calidad visual, menor cobertura nubosa y óptima resolución espacial.

3.3 Procedimiento Metodológico

Esta investigación mediante el análisis de imágenes satelitales se centra en evaluar y entender la variación del río Catatumbo entre 2007 y 2024. Se empleó un enfoque mixto, combinando el análisis cuantitativo en la evaluación de áreas con una interpretación cualitativa de la dinámica del rio y su conexión con las condiciones climáticas de la zona. El procedimiento se planea en cinco etapas prácticas y sucesivas, destinadas a asegurar la consistencia del análisis y la robustez de los resultados.

3.3.1 Obtención y "Depuración" de Datos Satelitales

Esta fase inicial consistió en la elaboración del recurso fundamental del estudio, las imágenes, utilizando satélites Landsat 5 TM (correspondientes al periodo 2004–2011) y Landsat 8 OLI (para 2013–2024). Todo el análisis se llevó a cabo en Google Earth Engine (GEE), una plataforma que facilita la gestión de grandes cantidades de datos en la nube, sin depender del poder de un ordenador local.

Para garantizar la confiabilidad radiométrica y espectral de los resultados, se aplicaron criterios de depuración y selección de imágenes satelitales basados en dos condiciones fundamentales: baja cobertura nubosa y homogeneidad climática estacional. Se seleccionaron imágenes con cobertura de nubes inferior al 20 %, ya que la nubosidad y sus sombras generan

interferencias espectrales que afectan la reflectancia registrada por el sensor, impidiendo una correcta discriminación entre superficies hídricas y no hídricas. Las nubes, al estar compuestas por vapor de agua y micro gotas en suspensión, presentan firmas espectrales similares a superficies húmedas o cuerpos de agua, lo que produce errores de clasificación y distorsiones en los índices espectrales. Por esta razón, se realizó un proceso de enmascaramiento de nubes y depuración radiométrica de las imágenes, asegurando que la señal captada por el sensor corresponda exclusivamente a la superficie de agua. Luego se seleccionaron imágenes correspondientes al mismo periodo climático seco (enero–marzo), con el fin de reducir la variabilidad hidrológica temporal asociada a eventos de precipitación, crecientes e inundaciones estacionales, garantizando así la comparación multitemporal de los resultados y la consistencia del análisis espacial.

3.3.2 Calculo de Índice NDWI

Con las imágenes nítidas de cada año, el paso siguiente consistió en medir el agua que existía en el cauce. Se utilizó el Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI) en GEE, que facilita la identificación de cuerpos de agua y la distinción entre el río, la vegetación y el suelo. La definición del límite (la línea de separación NDWI produce valores que oscilan entre -1 y 1. Para cada año se estableció un umbral adaptativo, definido a través del análisis del histograma de valores y la comparación visual con la imagen original. Este ajuste anual fue imprescindible, ya que las condiciones atmosféricas y el sensor presentan leves variaciones. El resultado fue una capa binaria, donde los valores 1 indican agua y los 0 representan áreas sin agua. La clasificación final fue realizada y verificada en QGIS.

3.3.2.1 Proceso para generar umbrales adaptativos. Para la delimitación de las superficies hídricas se empleó un umbral adaptativo, criterio de clasificación dinámico que se ajusta automáticamente a las condiciones espectrales, ambientales y espaciales de cada imagen satelital analizada. Permite que el valor de separación entre las clases “agua” y “no agua” no sea fijo, sino que varíe en función de la distribución de los valores del índice espectral, la estacionalidad, la precipitación, las condiciones atmosféricas y la dinámica propia del sistema fluvial.

Primero se calcula el NDWI para cada imagen satelital, generando una imagen de valores continuos:

Valores positivos → mayor probabilidad de agua

Valores negativos → suelo, vegetación, superficies secas

Se realizó el análisis del histograma de los valores NDWI de cada imagen donde se puede observar: (Picos de valores, Concentración de clases, Separación entre agua y no agua, Variabilidad entre escenas y años). Cada imagen tiene una distribución diferente. Luego Se busca el punto de separación espectral (Agua-no agua). Esto se puede hacer de varias formas:

Método estadístico (Media, Mediana, Percentiles, Desviación estándar, Punto de mínima densidad del histograma). Ejemplo:

Umbral = percentil 75 del NDWI

Umbral = valor medio entre dos picos del histograma

Método automático (clasificación, Algoritmos de clustering (K-means), Segmentación, Clasificación no supervisada). Sistema que detecta grupos espectrales automáticamente.

Método empírico adaptativo (Ajuste visual por imagen, Comparación con imagen real, Validación espacial, Ajuste dinámico por escena).

Cada imagen obtiene su propio valor de corte, luego se aplicó el umbral generando el mapa binario:

NDWI > umbral → Agua

NDWI ≤ umbral → No agua

Por último se validaron las imágenes con (Imágenes RGB, Comparación visual, Coherencia espacial, Continuidad fluvial, Realismo geomorfológico)

***Tabla** 3*

Designación anual de umbrales de clasificación

Año	Rango (umbral)
2007	0.05
2013	-0.35
2014	-0.34
2015	-0.36
2016	-0.36
2017	-0.25
2018	-0.3
2019	-0.25
2020	-0.33
2021	-0.15
2022	-0.29
2023	-0.38
2024	-0.27

Nota. Ajustes para la delimitación de áreas de agua

3.3.3 Estimación del área superficie hídrica doble enfoque metodológico

Con las capas binarias preparadas, se llevó a cabo el cálculo del área hídrica anual del río en hectáreas (ha).Se utilizaron dos métodos diferentes y se confrontaron los resultados para corroborar su coherencia

3.3.3.1 Cálculo por píxeles. Conteo de los píxeles clasificados como agua (valor = 1) dentro del Ráster binario. Cada píxel equivale a 0.09 ha aproximadamente, por lo que el área de agua se obtuvo como:

$$N° \, píxeles \, de \, agua \, \times 0.09 = Área \, de \, agua$$

3.3.3.2 Técnica de polígonos. La capa binaria fue convertida en polígonos (Shapefile) y se calculó automáticamente el área de cada polígono en QGIS. Se creó un timelapse utilizando las capas de NDWI para visualizar de manera dinámica las alteraciones y movimientos del cauce durante los 17 años estudiados.

Área agua: Área hídrica

Área total: Área total del Ráster (constante)

Área bosque: Superficie restante no hídrica (Área total – Área agua)

3.3.4 Análisis sobre la variación del río

Establecer si el río aumentó o disminuyó su superficie y en qué áreas sucedió, se calculó cuántas hectáreas el río ganó o perdió cada año en promedio, se determinó la variación porcentual de la superficie de agua desde el comienzo hasta el final del periodo, se analizaron los cambios en la forma del cauce (rectificación, curvatura, fragmentación o pérdida de conectividad

fluvial).

3.3.5 Relación de la variación de área con la precipitación anual

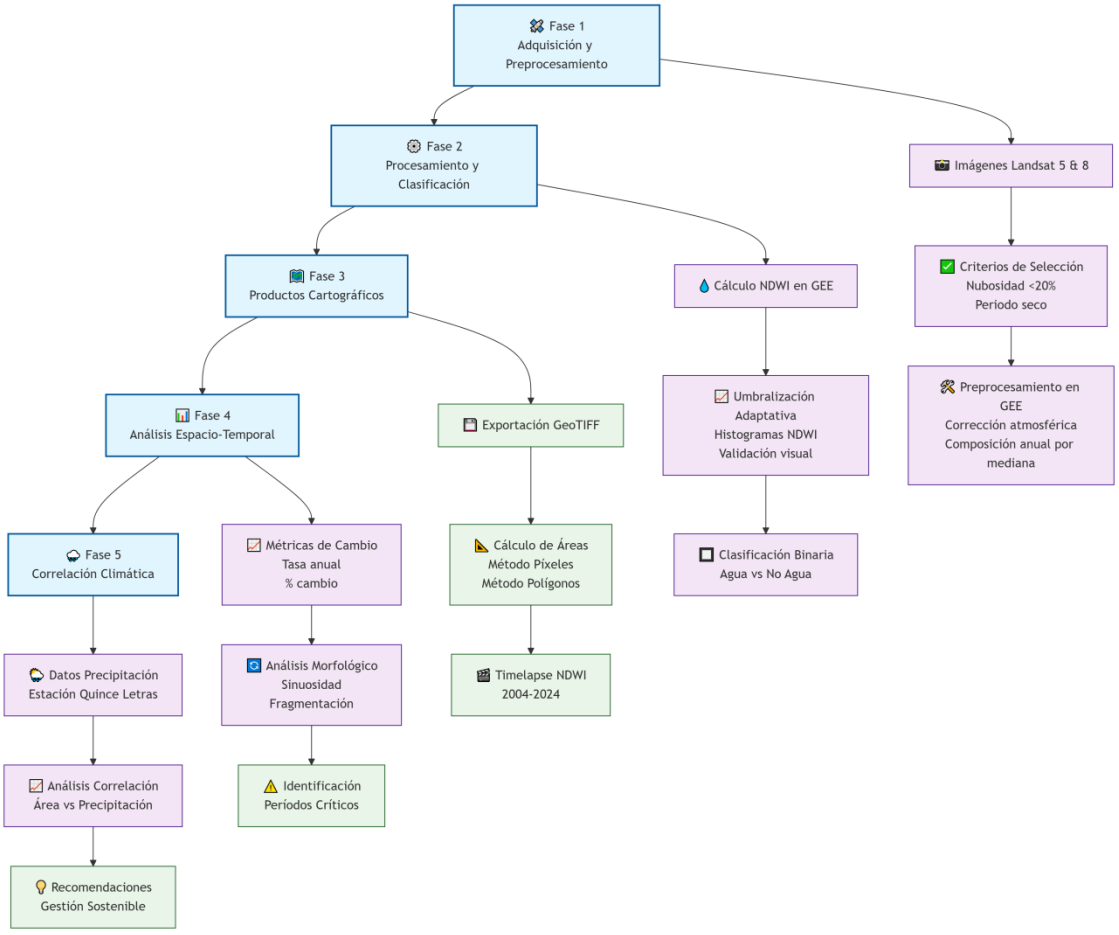
Finalmente, se realizó el análisis de la relación entre las variaciones del cauce del río y las condiciones meteorológicas. Para ello, se utilizaron los datos de precipitación anual de la estación IDEAM Quince Letras correspondientes al periodo 2007–2023, seleccionada por su proximidad al área de estudio y la continuidad de su registro temporal.

Se llevó a cabo un estudio de correlación mediante la aplicación del coeficiente de Pearson, con el fin de analizar la relación entre la precipitación anual y la variación del área superficial de los cuerpos de agua. Adicionalmente, se identificaron los años caracterizados por sequías severas y se compararon con los periodos de mayor pérdida de superficie hídrica, con el propósito de establecer posibles relaciones entre la variabilidad climática y la dinámica espacial del cauce.

3.3.6 Esquema metodológico

Figura 4

Diagrama de flujo del proceso metodológico



Nota. El diagrama resume las etapas utilizadas en el estudio

3.3.7 Limitaciones del estudio

La disponibilidad limitada de imágenes satelitales entre 2004 y 2011 es una restricción metodológica del estudio. Durante este tiempo, solo se tuvo una imagen válida del año 2007. La

falta involuntaria de datos intermedios impide construir una serie temporal continua. Esto afecta directamente la interpretación de la tendencia, ya que no se puede identificar si el comportamiento del recurso hídrico fue lineal, progresivo, fluctuante o resultado de eventos puntuales. En este contexto, la pérdida estimada de 58 hectáreas entre 2007 y 2012 debe verse como una variación neta acumulada y no como una tendencia definida con precisión en términos de ritmo o estabilidad del cambio. La ausencia de registros intermedios puede simplificar la comprensión real de la dinámica del sistema. Esto reduce la capacidad de diferenciar períodos de mayor o menor intensidad de transformación. Sin embargo, las imágenes utilizadas cumplen con buenos criterios de calidad radiométrica y baja interferencia atmosférica. Esto asegura la confiabilidad espacial de los resultados obtenidos en los períodos analizados.

4. Resultados

Tabla 4

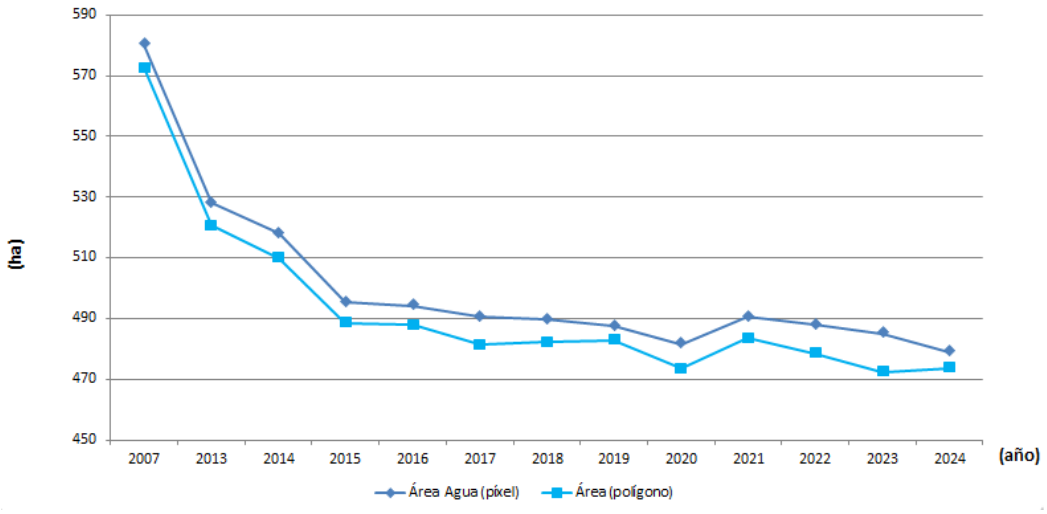
Áreas de superficie hídrica y boscosa en hectáreas

Año	Área Agua (píxel)	Área (polígono)		
	N° de píxel	Área Agua (ha)	Área Agua (ha)	Área Bosque (ha)
2007	6446	580,14	572,45	39.472,03
2013	5868	528,12	520,7	39.523,78
2014	5756	518,04	509,84	39.534,64
2015	5504	495,36	488,51	39.555,97
2016	5492	494,28	487,81	39.556,67
2017	5451	490,59	481,4	39.563,08
2018	5440	489,6	482,31	39.562,17
2019	5415	487,35	482,79	39.561,69
2020	5350	481,5	473,5	39.570,98
2021	5451	490,59	483,43	39.561,05
2022	5420	487,8	478,44	39.566,04
2023	5389	485,01	472,38	39.572,09
2024	5321	478,89	473,69	39.570,79

Nota. Resultados obtenidos por método pixeles y polígonos

Figura 5

Áreas de superficie hídrica



Nota. Grafica área por pixel y área por polígono

4.1 Análisis actual del rio Catatumbo (sector la gabarra)

El estudio que se realizó utilizando el Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI) para el año 2024 muestra una situación compleja en el estado de los recursos hídricos superficiales en la zona de La Gabarra, cuenca del Catatumbo. Los resultados obtenidos mediante el procesamiento de las imágenes satelitales muestran una un área hídrica total de 478.89 hectáreas calculadas por el método de cálculo por píxeles y 473.69 hectáreas con el método de polígonos, lo que muestra coherencia metodológica con una diferencia de 5.20 hectáreas entre las dos técnicas.

El valor del umbral dinámico −0.27 no es un valor arbitrario ni fijo, sino que se obtuvo a partir de un proceso de ajuste espectral adaptativo previo al polígono del cauce. Primero se calculó el NDWI de la imagen del año 2024, obteniendo una distribución continua de valores entre −1 y 1. Posteriormente, se realizó el análisis del histograma de dichos valores para identificar la zona de transición espectral entre superficies hídricas y no hídricas. A partir de esta distribución, se realizó un proceso de ajuste progresivo del umbral mediante prueba y validación espacial, comparando diferentes valores de corte (por ejemplo 0.05, 0.01, 0.00, valores negativos), hasta identificar el valor que mejor delimitaba el cauce real sin incluir humedad del suelo, vegetación ni superficies saturadas.

El valor −0.27 corresponde al punto de separación espectral que permitió una delimitación más coherente del cuerpo hídrico real, validada mediante comparación visual con la imagen original y coherencia geomorfológica del cauce. Este procedimiento se repitió para cada

año, ya que las condiciones ambientales, hidrológicas y espectrales del río varían temporalmente, lo que hace que el umbral óptimo no sea constante, sino dinámico.

4.1.1 Análisis visual e interpretación hídrica.

Para el análisis visual, se inició con la clasificación de rangos y colores como lo muestra la Tabla 5.

Tabla 5

Clasificación de Rangos y Colores

Clasificación de Rangos y Colores		
Rango NDWI	**Color aproximado**	**Interpretación**
≤ –0.8249 a –0.6984	Verde oscuro	Superficie sin humedad, cobertura vegetal densa o suelo seco.
–0.6984 a –0.5718	Verde medio	Área seca con escasa humedad superficial o vegetación moderada.
–0.5718 a –0.4453	Verde oliva a marrón oscuro	Zona con bajo contenido de humedad; posible transición entre vegetación y suelo desnudo.
–0.4453 a –0.3389	Marrón rojizo	Superficie seca, posiblemente compactada o con poca infiltración.
–0.3389 a –0.27	Rojo oscuro	Humedad superficial, considerados sin presencia de agua.
–0.27 a –0.1711	Naranja	Superficies próximas al umbral; bordes del cauce o áreas con humedad residual.
–0.1711 a –0.1078	Amarillo	Sectores con mezcla de suelo húmedo y escurrimiento superficial.
–0.1078 a –0.0234	Amarillo claro	Transición entre suelo y agua; presencia de saturación o alta turbidez.
–0.0234 a 0.0398	Verde claro	Agua con sedimentos o material en suspensión; flujo de baja profundidad.
0.0398 a 0.1242	Azul verdoso	Agua con buena reflectancia, caudal estable o espejo de agua definido.
0.1242 a 0.2086	Azul	Cuerpo de agua consolidado, con caudal continuo y baja turbidez.
> 0.2296	Azul intenso	Sectores con alta presencia de agua o máxima saturación superficial.

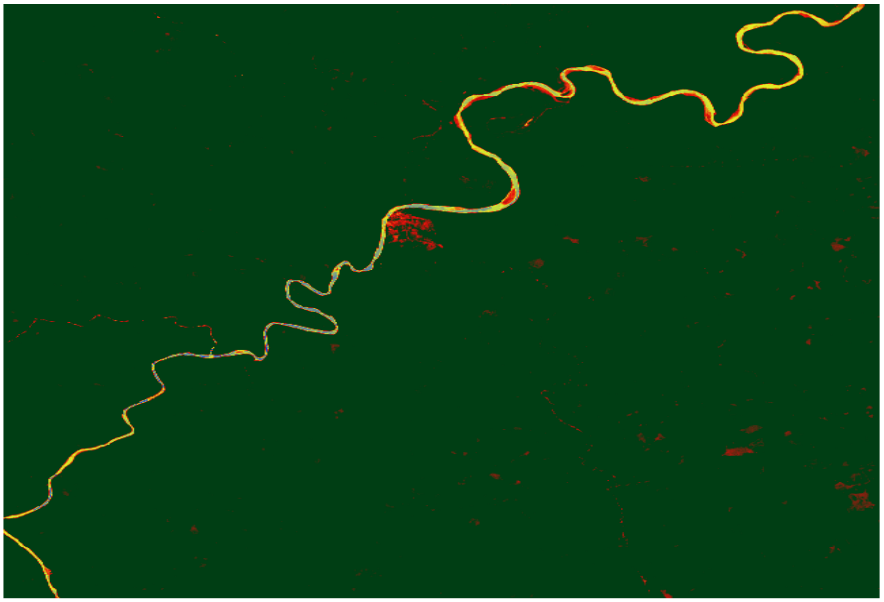
Nota. Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI) y Nomenclatura

La representación cartográfica del NDWI para el año 2024 en la figura 6, clasificada con una escala de colores en la tabla 5 que refleja el rango total de valores, muestra un patrón espacial que refleja el estado crítico del rio.

4.1.1.1 Análisis del cauce principal del rio. Gran sección del cauce central del río muestra rasgos amarillos, relacionados con valores entre –0.19 y –0.02. Estos valores, a pesar de ser superiores al umbral de –0.27, sugieren la existencia de agua con baja reflectancia en el infrarrojo cercano, lo cual es típico de aguas turbias o con una alta cantidad de sedimentos en suspensión. Esta situación indica que el río preserva su flujo, aunque con niveles moderados de turbidez y posible transporte de partículas, reflejando un estado hídrico intermedio y una calidad del agua que podría estar influenciada por procesos de erosión o la entrada de suelos.

Figura 6

Rio Catatumbo 2024

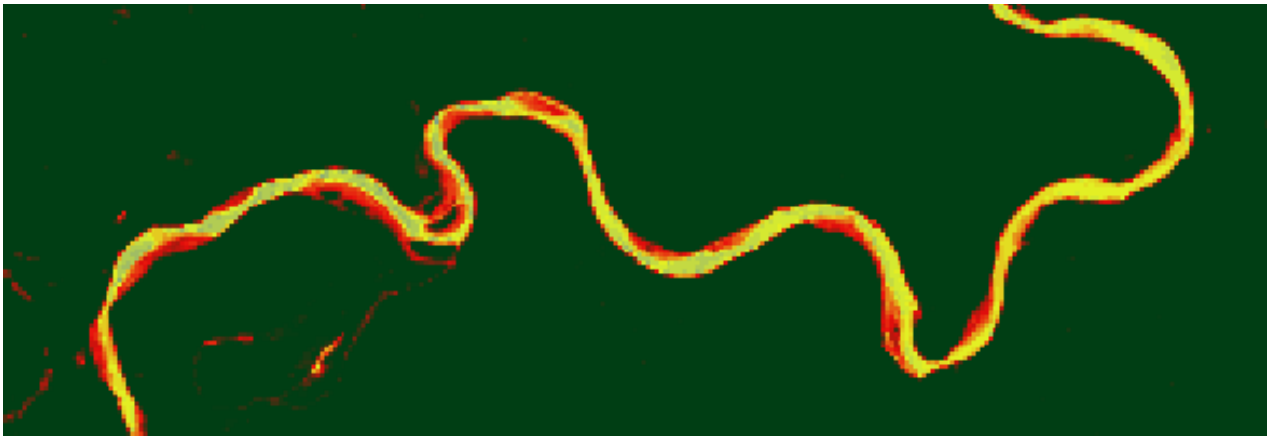


Nota. Condiciones actuales del río. (Google Earth Engine, imagenes satelitales obtenidas por landsat 5 y 8)

4.1.1.2 Áreas en los márgenes del rio. A lo largo de los márgenes del lecho, se pueden apreciar coloraciones rojas y marrones (figura 7) que se asocian a valores entre –0.45 y –0.27. Estas áreas están relacionadas con suelos húmedos al descubierto, bancos de arena, vegetación deteriorada o zonas de intervención humana, lo que puede reflejar procesos de sequía, erosión o disminución de la cobertura vegetal en las orillas del río. La presencia de estas tonalidades sugiere que una parte del lecho está expuesta, en lugar de tener agua de forma continua.

Figura 7

Márgenes del río

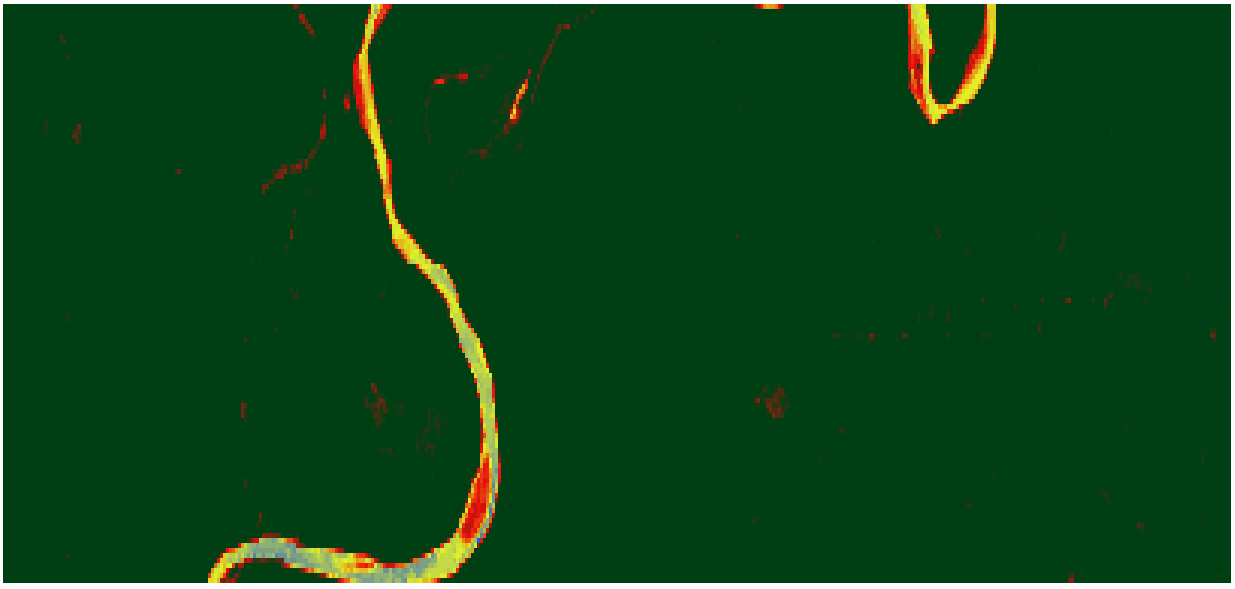


Nota. Deterioro en los bordes del río. (Google Earth Engine, imagenes satelitales obtenidas por landsat 5 y 8)

4.1.1.3 Fragmentación Interna del rio. En el mismo cauce principal se observan pequeñas zonas rojas (figura 8), lo que es relevante, ya que indican valores negativos en una zona que debería exhibir indicadores positivos de humedad. Estas zonas pueden ser islotes, depósitos de sedimentos, vegetación en superficie o partes con niveles bajos de agua superficial, mostrando fragmentación en la superficie acuática y posibles cambios en la profundidad del lecho fluvial.

Figura 8

Fragmentación interna

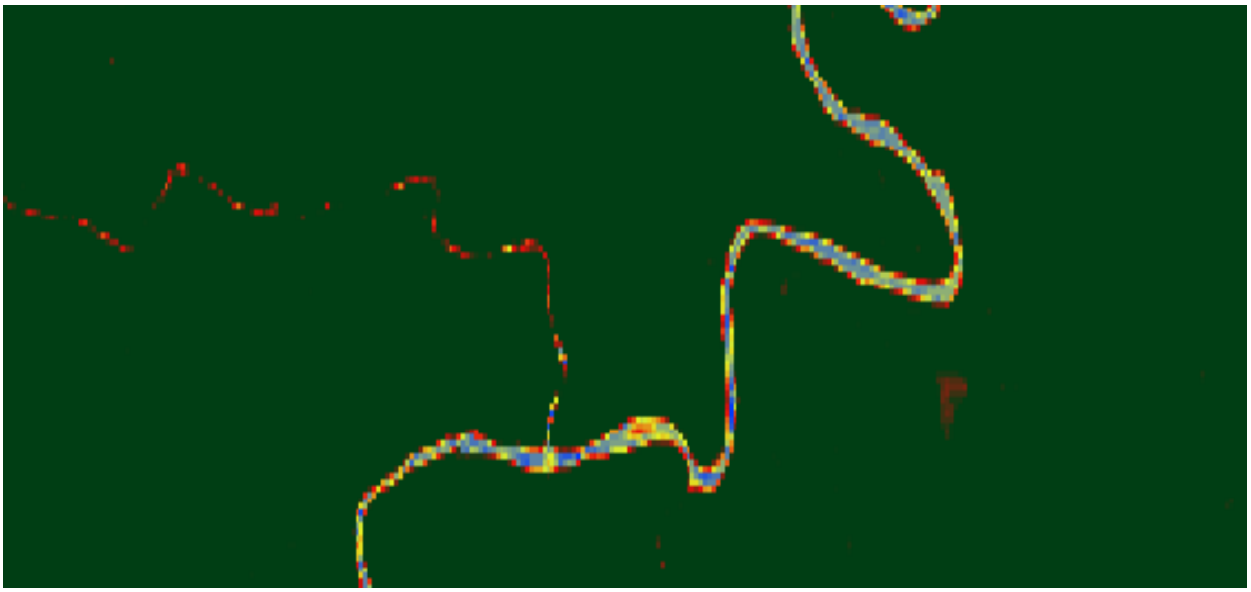


Nota. Banco de Sedimentos en el interior del río. (Google Earth Engine, imagenes satelitales obtenidas por landsat 5 y 8)

4.1.1.4 Afluentes secundarios. Respecto a los afluentes secundarios (figura 9), se aprecia una quebrada que nutre el río principal, la cual se percibe en tonalidad rojo a lo largo de su recorrido, lo que sugiere un bajo contenido de agua o un lecho parcialmente árido. Sin embargo, en el lugar donde converge el río se observa un leve tono azul, que corresponde a valores del NDWI superiores a 0.02, lo que indica una mayor concentración de agua y un efecto de acumulación en la zona de unión. Este contraste implica que la quebrada proporciona un flujo reducido, posiblemente limitado.

Figura 9

Afluentes secundarios al cauce principal



Nota. Zona de Confluencia 2024. (Google Earth Engine, imagenes satelitales obtenidas por landsat 5 y 8)

4.2 Evaluación del Río Catatumbo en el año 2007

La medición de la superficie de agua para el año 2007 a través de procesamiento digital determinó una extensión total de 580,14 hectáreas utilizando el método de píxeles y 572,45 hectáreas mediante el método de polígonos, evidenciando una notable consistencia metodológica con una diferencia de solo 7,69 hectáreas entre los dos métodos. Esta área fue definida utilizando un umbral NDWI de 0,05, un valor que indica condiciones ideales de reflectancia espectral y favoreció una identificación exacta de los cuerpos de agua en la fase inicial del estudio

4.2.1 Inspección Visual de los Recursos Hídricos – NDWI 2007

El análisis del Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI) correspondiente al año 2007 presenta valores que oscilan entre −0.8249 y 0.2296, lo que permite caracterizar el comportamiento hídrico y delimitar los cuerpos de agua superficiales en la zona de estudio.

El umbral de referencia 0.05 fue definido mediante un proceso de ajuste espectral adaptativo, basado en el análisis del histograma de valores NDWI y en la validación espacial mediante comparación con la imagen original. A través de una calibración progresiva del valor de corte, se identificó este valor como el punto de separación espectral que permitía una delimitación coherente del cuerpo hídrico real, excluyendo superficies con humedad del suelo, vegetación y zonas saturadas. Adicionalmente, los valores positivos más altos registrados en este año reflejan condiciones asociadas a una mayor presencia y continuidad de la lámina de agua, lo cual sugiere un sistema fluvial con mayor profundidad media y mayor volumen hídrico superficial, en comparación con años recientes como 2024. Desde el punto de vista espectral,

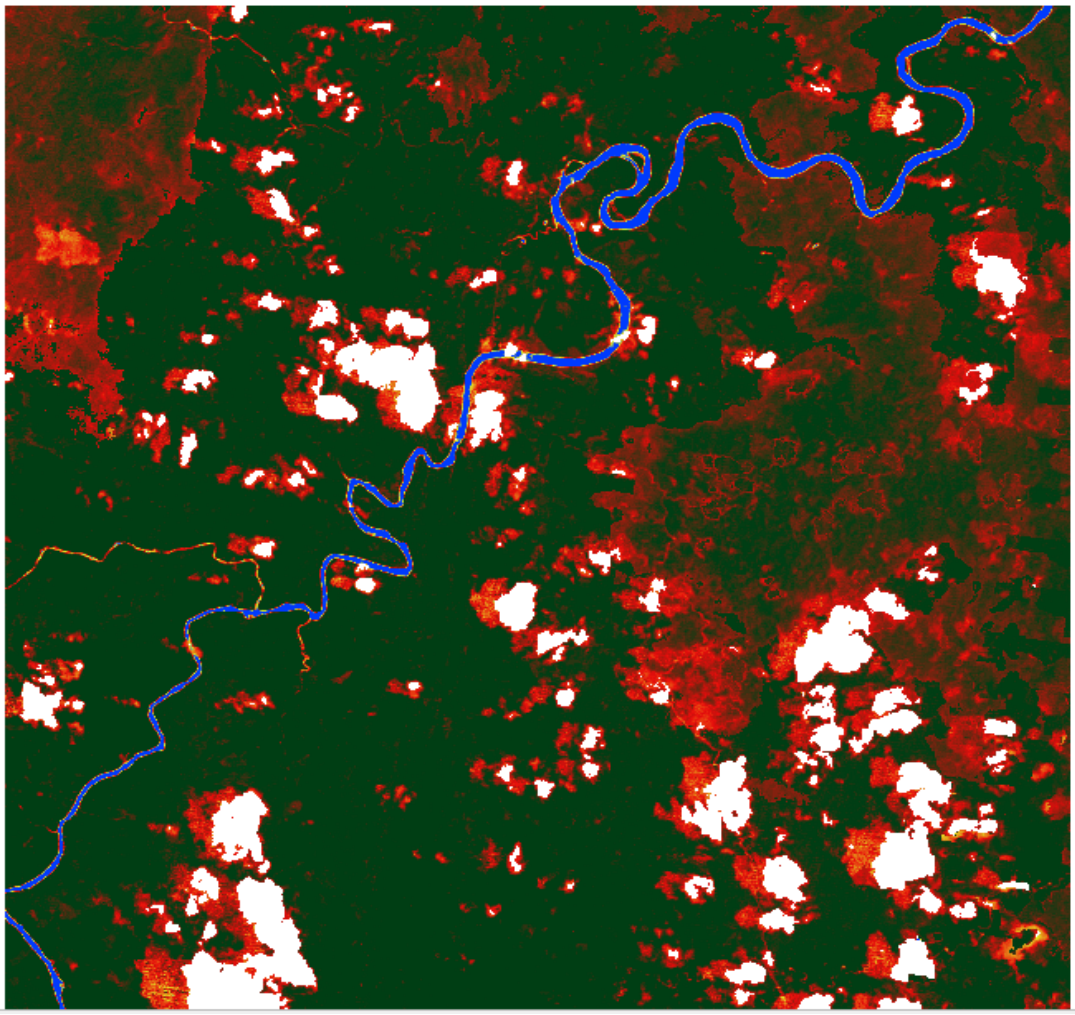
esta respuesta también indica una mejor calidad óptica del agua, caracterizada por menor turbidez y menor carga de sedimentos en suspensión, lo que favorece una mayor reflectancia en el rango del verde y una absorción más eficiente en el infrarrojo cercano, produciendo valores NDWI más estables y definidos.

En conjunto, estos resultados evidencian que durante el año 2007 el río presentaba condiciones hidrológicas más favorables, tanto en términos de cantidad de agua superficial como de calidad espectral del cuerpo hídrico, lo que se traduce en una delimitación más clara del cauce y una mayor continuidad espacial del sistema fluvial.

4.2.1.1 Descripción del cauce principal El río muestra una tonalidad azul profunda y constante (valores entre 0.1242 y 0.2296), lo que señala un cuerpo de agua firme, con flujo ininterrumpido y poco turbio. La uniformidad del color a lo largo de todo el segmento estudiado indica una capa de agua continua con una clara delimitación hidráulica, lo que refleja un estado de las condiciones hidrológicas consistente como se observa en la figura 10.

Figura 10

Zona la Gabarra

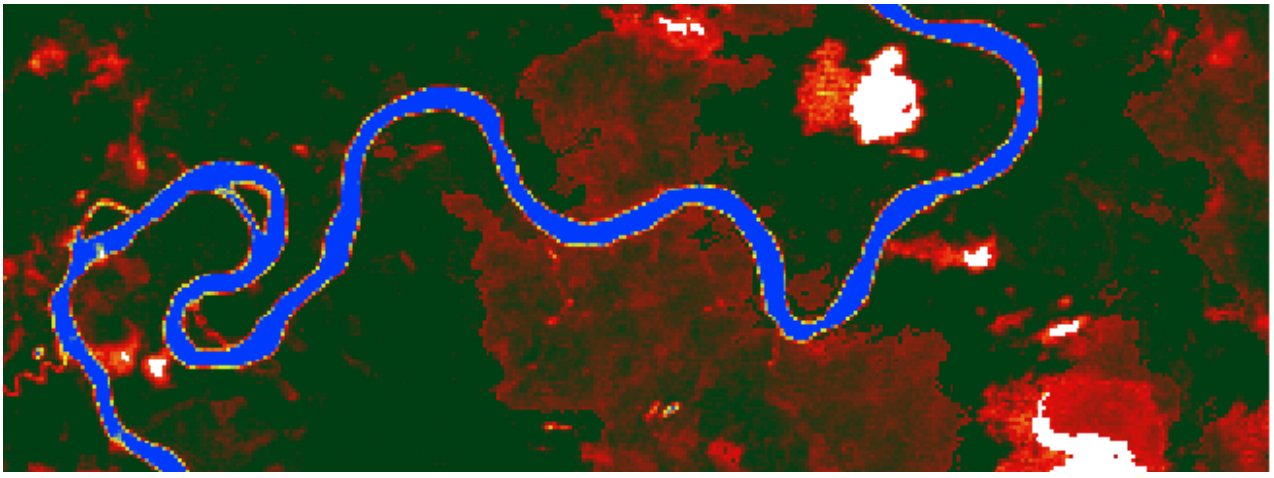


Nota. Cauce principal y Morfología en el año 2007. (Google Earth Engine, imagenes satelitales obtenidas por landsat 5 y 8)

4.2.1.2 Análisis de Márgenes del Río. Las zonas cercanas al cauce (figura 11) exhiben trazos sutiles que varían de amarillos a rojos (valores entre –0.27 y –0.1078), que corresponden a, bordes del lecho con humedad remanente, superficies cercanas al límite de detección de agua, también se puede considerar que hace parte de lo que llaman playas fluviales, o bordes del rio el cual han sufrido erosión por el mismo rio.

Figura 11

Borde del Río

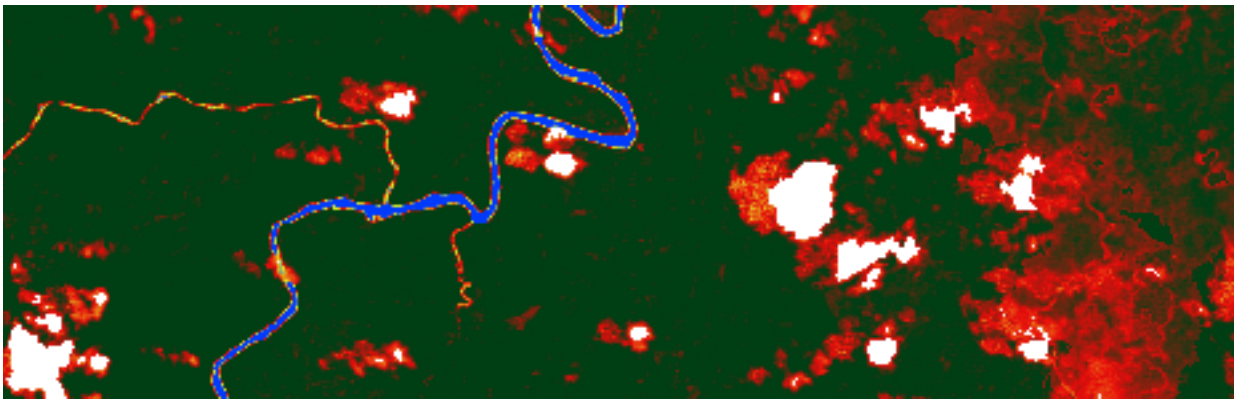


Nota. Humedad retenida en las márgenes del río (Google Earth Engine, imagenes satelitales obtenidas por landsat 5 y 8)

4.2.1.3 Afluentes externos. En las figura 12 se observa lo que corresponde a dos afluentes secundarios que muestran tonalidades amarillas cada una, asociadas a valores NDWI entre -0.1078 y -0.0234. Esta específica paleta de colores señala la existencia de corrientes de poca profundidad con condiciones cambiantes de saturación de agua o notable turbidez en el cuerpo de agua. La presencia visual de estos patrones de color amarillo indica que se presenta una conexión entre quebradas o arroyos con el cauce principal

Figura 12

Afluentes secundarios al cauce principal



Nota. Zona de Confluencia 2007. (Google Earth Engine, imagenes satelitales obtenidas por landsat 5 y 8)

4.3 Análisis de la variación en el área y morfología del río entre 2007 y 2024

Para el análisis comparativo entre los años 2007 y 2024 se utilizaron los resultados del Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI), para identificar y cuantificar los cambios en la superficie del cauce en el sector de la gabarra y su morfología. Este enfoque permite reconocer

las tendencias de cambio del área superficial del rio durante un periodo de 17 años, abarcando tanto datos cuantitativos de disminución de área como cualitativos en su cambio morfológico.

Se establecieron umbrales de clasificación específicos para cada periodo, lo que permitió identificar las áreas donde hay agua superficial en contraste con las zonas de baja humedad o cobertura del suelo. En 2007, se definió un umbral NDWI de 0.05, un valor positivo que indicaba condiciones ideales. Facilitando la identificación de cuerpos de agua delimitados, que presentaban alta reflectancia en la banda verde y baja reflectancia en el infrarrojo cercano. En contraste, para el año 2024 se tuvo que utilizar un umbral NDWI de -0.27, un valor negativo que indica un deterioro en las condiciones de reflectancia del agua, probablemente relacionado con aumentos en la turbidez, sedimentación en suspensión.

La elección de estos umbrales diferenciales se basó en el análisis detallado de la respuesta espectral específica de cada imagen de Landsat y del comportamiento óptico particular del agua en cada intervalo, asegurando una delimitación exacta y coherente del cauce a lo largo de la serie temporal.

4.3.1 Cambio en la Superficie del Área

El análisis cuantitativo mostró una reducción considerable de la superficie de agua en la zona analizada. Desde 2007 hasta 2024, se documentó una pérdida neta de 101.25 hectáreas, lo que representa un descenso del 17.45% en la cobertura superficial del rio, lo que representa que se produjo a un ritmo promedio de -6.33 hectáreas anuales.

***Tabla** 6*

Cambios en la Configuración Hídrica (2007-2024)

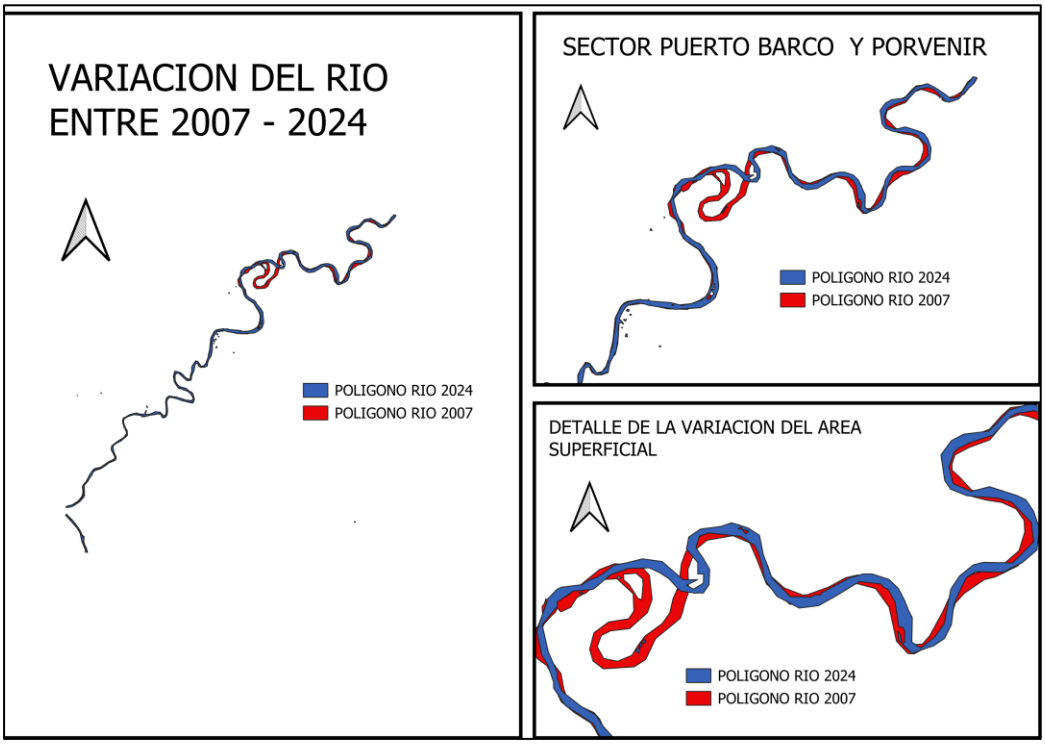
Año	2007	2024	Cambio	Porcentaje
Área Total (ha)	580,14	478,89	-101,25	-17,45%
Umbral NDWI	0,05	-0,27	-0,32	

Nota. Variación del Área y Umbrales

La delimitación a través de polígonos facilita una visualización exacta de la dinámica de esta regresión. La superposición del polígono del cauce de 2007 con el de 2024 como lo vemos en la figura 13 revela un patrón espacial evidente de reducción. El polígono de 2007, que abarca 580.14 hectáreas, presenta un sistema fluvial más amplio y sólido, con una llanura de inundación bien definida y diversas conexiones con cuerpos de agua secundarios. A diferencia, el polígono de 2024, limitado a 478.89 hectáreas, muestra una reducción generalizada de 101 hectáreas (figura 14), especialmente notable en los bordes y las áreas de inundación temporal como entre puerto barco y el porvenir. El área de polígono perdido, derivada de la diferencia entre los dos, crea una franja extensa pero discontinua que rodea el cauce actual, lo que evidencia que la pérdida no ocurrió de forma uniforme, sino que se concentró en las zonas poco profundas y susceptibles.

Figura 13

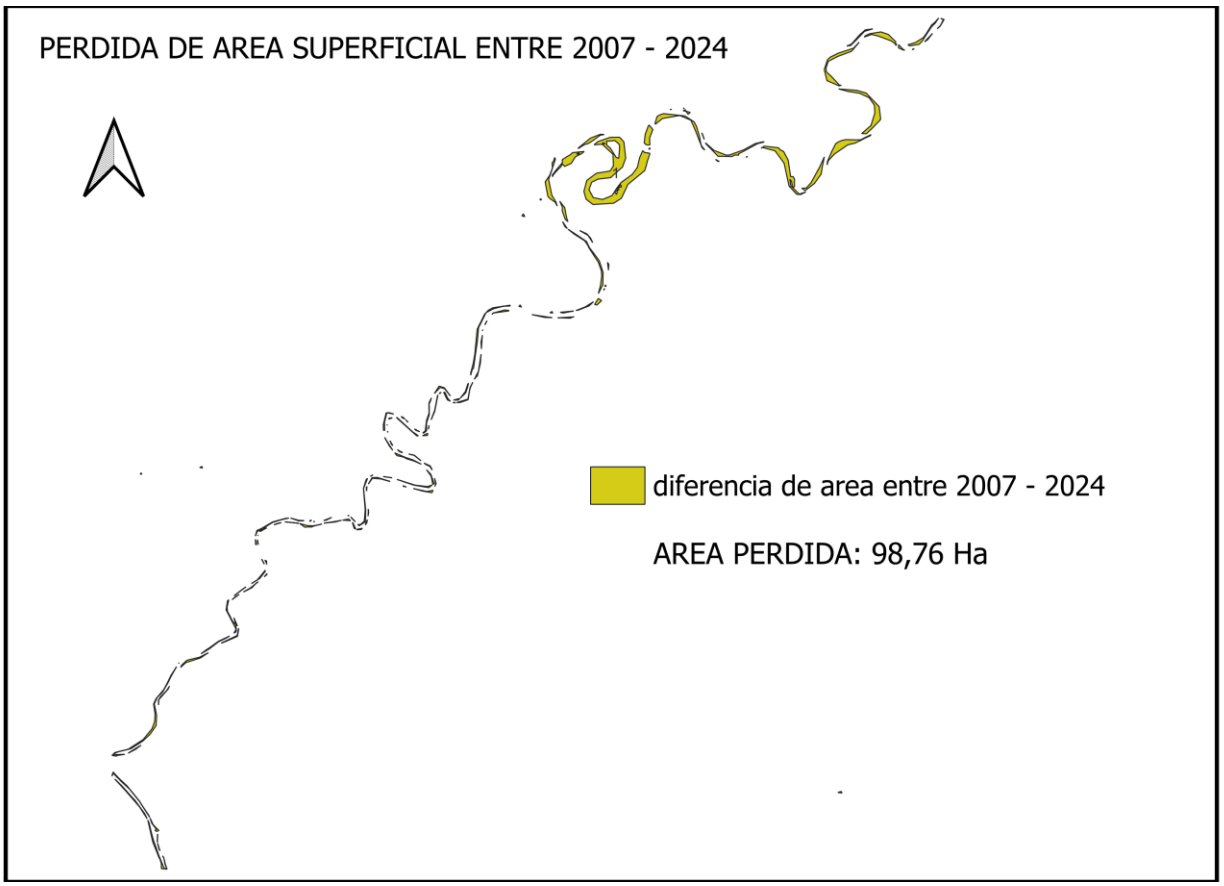
Cambios en el cauce principal



Nota. Superposición de las imágenes para identificar cambios en el río. (Google Earth Engine, imagenes satelitales obtenidas por landsat 5 y 8)

Figura 14

Área por Polígono perdida en el cauce



Nota. Reducción en el área entre los años 2007 y 2024. (Google Earth Engine, imagenes satelitales obtenidas por landsat 5 y 8)

En un análisis cualitativo se logra percibir en la figura 14 el área que se ha perdido desde en los años evaluados, estas corresponden principalmente a zonas del margen del rio es decir las orillas y así un punto crítico de perdida de área en la zona superior entre puerto barco y el porvenir donde concentro la mayor pérdida.

La notable disminución del espejo de agua está directamente relacionada con un deterioro en su calidad, lo cual se evidencia claramente por la variación en la firma espectral del agua. La necesidad de modificar el umbral del NDWI de 0.05 en 2007 a -0.27 en 2024 (una diferencia de -0.32 unidades) es un reflejo de la alteración de las características ópticas del cuerpo de agua. Este movimiento del umbral hacia cifras negativas es una evidencia clara del aumento significativo en la turbidez y la carga de sedimentos.

Entre las posibles causas en la variación del área del rio y el ajuste en los umbrales podemos encontrar los siguientes factores:

4.3.1.1 Sedimentación. El incremento considerable de sedimentos no es un evento aislado. Se relaciona directamente con transformaciones drásticas en el uso del suelo en la cuenca alta y media del Catatumbo, probablemente conectadas a la deforestación para la expansión de las zonas agropecuaria, métodos agrícolas insostenibles y procesos de erosión. Los sedimentos, tras ser movilizados, son llevados por la escorrentía hasta el río principal.

4.3.1.2 Impacto Morfo-Dinámico. La elevada cantidad de sedimentos ejerce un efecto doble. Por un lado, disminuye la profundidad del lecho mediante la acumulación de sedimentos, transformando zonas que solían ser profundas en bancos de arena o limo, lo que directamente explica la disminución del área identificada como agua lo que lleva a modificar la geometría del río.

4.3.1.3 Modificación en el ciclo hidrológico. Es posible que se presenten cambios en los caudales, posiblemente vinculados a la variación climática o actividades aguas arriba. Periodos

de sequía más intensos o una variación temporal de las lluvias pueden estar aumentando la concentración de sedimentos y obstaculizando la habilidad del río para transportarlos, favoreciendo su acumulación en el área de estudio

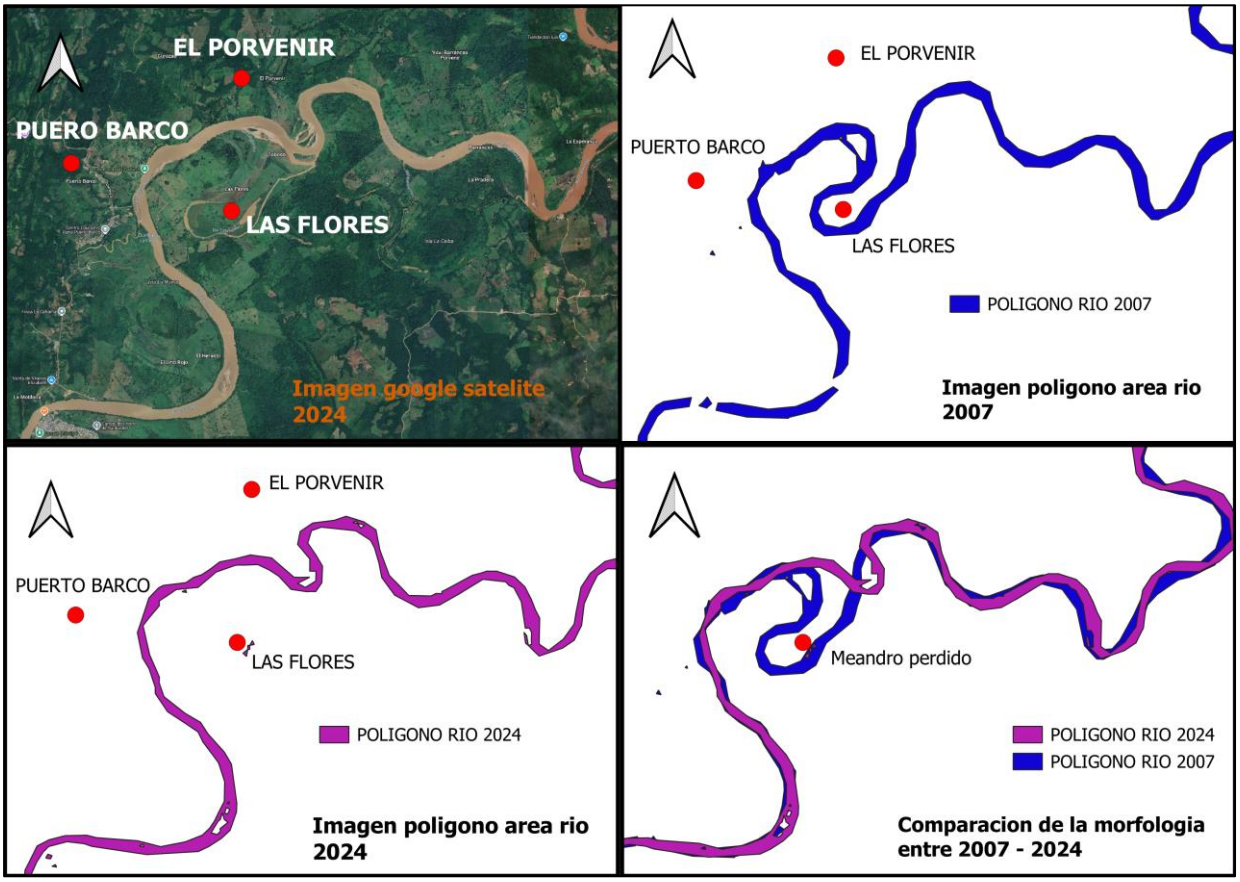
4.3.2 Cambio en la morfología del rio

El análisis espacial de la evaluación morfológica descubrió cambios igualmente importantes en la estructura física del lecho, que muestran el estado crítico del cauce perdiendo zonas importantes para mantener su cauce. El cambio más notable se notó en el segmento entre Puerto Barco y El Porvenir.

En esta zona, el análisis multi-temporal como lo muestra la figura 15 ayudó a registrar un proceso de corte de meandro de gran escala. Hasta 2007, el río formaba una curva acentuada hacia el interior, creando un meandro claramente definido. No obstante, para 2024, la corriente del río había dejado totalmente esta ruta, el curso del río se modificó, estableciendo una nueva trayectoria más directa y eliminando el meandro previo.

Figura 15

Cambio en la morfología del río



Nota. Perdida del meandro en el sector de las flores. (Google Earth Engine, imagenes satelitales obtenidas por landsat 5 y 8)

Esta transición de una morfología curva a una más recta conlleva una importante reducción de la conectividad hidráulica longitudinal y un cambio esencial en los patrones de flujo y transporte de sedimentos. La modificación del cauce incrementa la energía del flujo, lo que puede intensificar la erosión en las orillas y profundizar el lecho, dando inicio a un ciclo de inestabilidad geomorfológica. La curva antigua, actualmente desactivada, es un claro ejemplo de

la fragmentación gradual del sistema y la desaparición de hábitats fluviales vinculados a los meandros

4.4 Análisis de la variación temporal del área superficial del rio

Además de analizar el cambio neto entre 2007 y 2024, es crucial entender la evolución temporal que definió esta transformación. El sistema fluvial no ha tenido una respuesta uniforme en estas casi dos décadas, sino que ha pasado por etapas claramente diferenciadas de estrés y resiliencia. Este estudio desglosado en intervalos anuales posibilita descubrir la complicada evolución del recurso hídrico, superando la perspectiva estática de un simple "antes y después".

La finalidad de esta parte es reconocer y describir con exactitud los instantes decisivos de pérdida acelerada, las fases de estabilidad y los episodios específicos de recuperación. Esta metodología posibilita identificar la vulnerabilidad del sistema ante acciones naturales o humanas, y establecer si las tendencias detectadas son consecuencia de una degradación continua o de eventos extremos específicos. La Tabla 7 resume esta dinámica temporal, cuantificando la magnitud, el porcentaje y la tasa de cambio anual para cada intervalo del estudio, ofreciendo una base sólida para entender los mecanismos que influyen en la reducción del área.

Tabla 7

Variación Temporal del Área Superficial del Rio

Período	Duración (años)	Área Inicial (ha)	Área Final (ha)	Pérdida Neta (ha)	Porcentaje Perdido	Tasa Promedio Anual (ha/año)
2007–2013	6	580,14	528,12	-52,02	-8,97%	-8,67
2013–2014	1	528,12	518,04	-10,08	-1,91%	-10,08
2014–2015	1	518,04	495,36	-22,68	-4,38%	-22,68
2015–2016	1	495,36	494,28	-1,08	-0,22%	-1,08
2016–2017	1	494,28	490,59	-3,69	-0,75%	-3,69
2017–2018	1	490,59	489,6	-0,99	-0,20%	-0,99
2018–2019	1	489,6	487,35	-2,25	-0,46%	-2,25
2019–2020	1	487,35	481,5	-5,85	-1,20%	-5,85
2020–2021	1	481,5	490,59	9,09	1,89%	9,09
2021–2022	1	490,59	487,8	-2,79	-0,57%	-2,79
2022–2023	1	487,8	485,01	-2,79	-0,57%	-2,79
2023–2024	1	485,01	478,89	-6,12	-1,26%	-6,12

Nota. Tasa Promedio anual de Perdidas

Aparte de la pérdida total de superficie hídrica observada a largo plazo (2007-2024), el análisis por periodos muestra que el río no se deterioró de forma uniforme, sino que atravesó fases disímiles de presión y recuperación. Entre 2007 y 2013, la pérdida total fue considerable (-52,02 ha); al analizarla en seis años, la disminución promedio anual resultó ser de -8.67 ha/año. Sin embargo, al revisar los años individualmente, se evidencia que la crisis más aguda se presentó entre 2014 y 2015, cuando la pérdida anual alcanzó -22.68 ha/año lo que indica que el ritmo de reducción del río fue más de dos veces más veloz en ese solo año que en el promedio anterior, sugiriendo una posible sequía grave. Otro periodo donde presento una pérdida considerable fue entre 2019- 2020 con un deterioro del 1.20% es decir una pérdida de 5,85 ha, así el periodo entre 2023 y 2024 presento una pérdida de 6,12% representando un porcentaje de 1,26% muy similar el periodo anterior reflejando el estado crítico a causa del deterioro constante del rio aunque se puede destacar el periodo de recuperación que obtuvo el rio entre 2020 y 2021 el cual recupero un 1.89% del área perdida es decir 9,09 ha de agua superficial lo que resulta un

periodo interesante para analizar los factores que influyeron para marcar esta considerable recuperación.

4.4.1 Identificación de los Períodos Críticos de Pérdida

Para comprender la evolución temporal en la disminución de la superficie del rio, fue clave examinar las tasas de variación anuales. Por la falta de datos anuales de 2008 a 2012, se utilizó como referencia la tasa estimada para el periodo 2007-2013 (-8.67 hectáreas por año). Este promedio indica la tendencia general de un deterioro constante durante los primeros 6 años de evaluación.

El análisis de las tasas anuales, obtenidas para los intervalos con datos disponibles, permitió reconocer los periodos críticos en los que el deterioro se agravó. Este análisis indica que la alteración del sistema fluvial se caracterizó por instantes clave de pérdida que ponen de manifiesto su vulnerabilidad. Los periodos considerados fundamentales, que se detallan en la Tabla 8, son: el primer periodo 2007-2013, que estableció la tendencia general; el segundo ciclo 2013-2015, que abarca dos episodios desastrosos consecutivos (2013-2014 y 2014-2015); así como los recientes impulsos 2019-2020 y 2023-2024.

Tabla 8

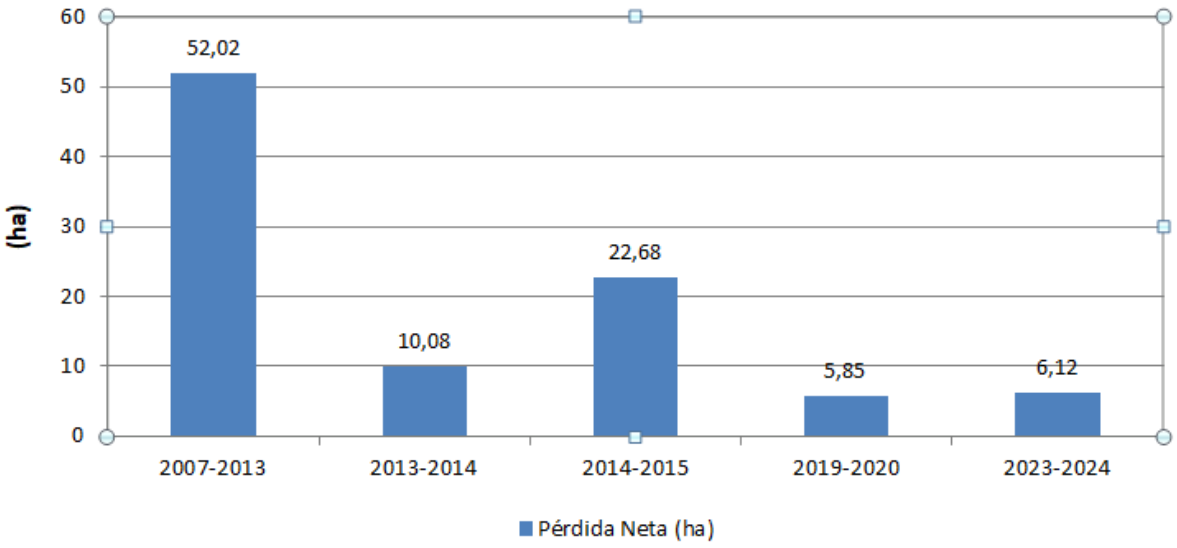
Períodos Críticos de Pérdida Acelerada

Periodo	Duración (años)	Área Inicial (ha)	Área Final (ha)	Pérdida Neta (ha)	Porcentaje Perdido	Tasa Promedio Anual (ha/año)
2007-2013	6	580,14	528,12	52,02	8,97%	8,67
2013-2014	1	528,12	518,04	10,08	1,91%	10,08
2014-2015	1	518,04	495,36	22,68	4,38%	22,68
2019-2020	1	487,35	481,5	5,85	1,20%	5,85
2023-2024	1	485,01	478,89	6,12	1,26%	6,12

Nota. Variación Anual promedio del cauce principal

Figura 16

Pérdida total de Área por Periodo Critico

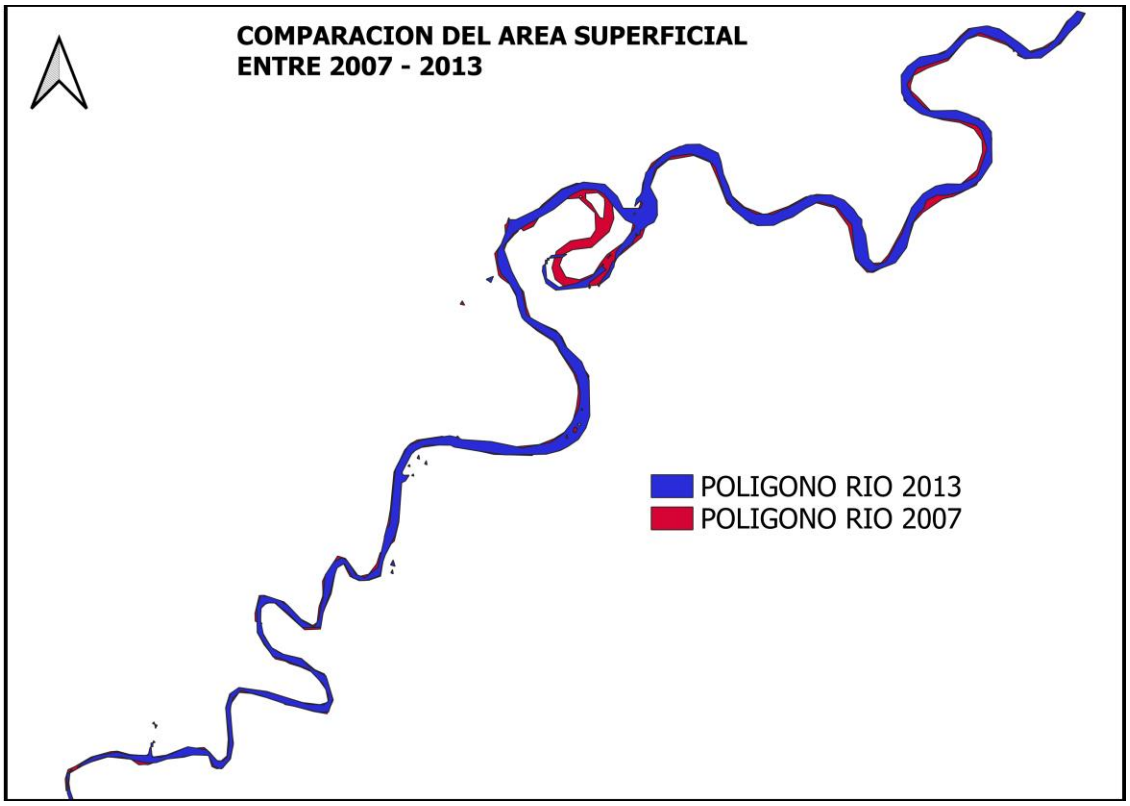


Nota. Periodos de mayor Pérdida

4.4.1.1 **Período (2007-2013): Crisis Duradera del Sistema de Agua.** Como se observa en la figura 16, este intervalo de seis años representa la etapa de erosión más amplia del sistema acuático, marcada por una disminución total de 51.75 hectáreas, lo que equivale al 9.04% de la superficie original. La tasa promedio anual de 8.63 hectáreas por año marcó un ritmo de pérdida constante que impactó notablemente la configuración espacial del río Catatumbo. En este período se evidencia una disminución significativa entre cuerpos de agua (figura 17), reflejada en una fragmentación creciente del espejo de agua.

Figura 17

Variación del cauce entre 2007 y 2013

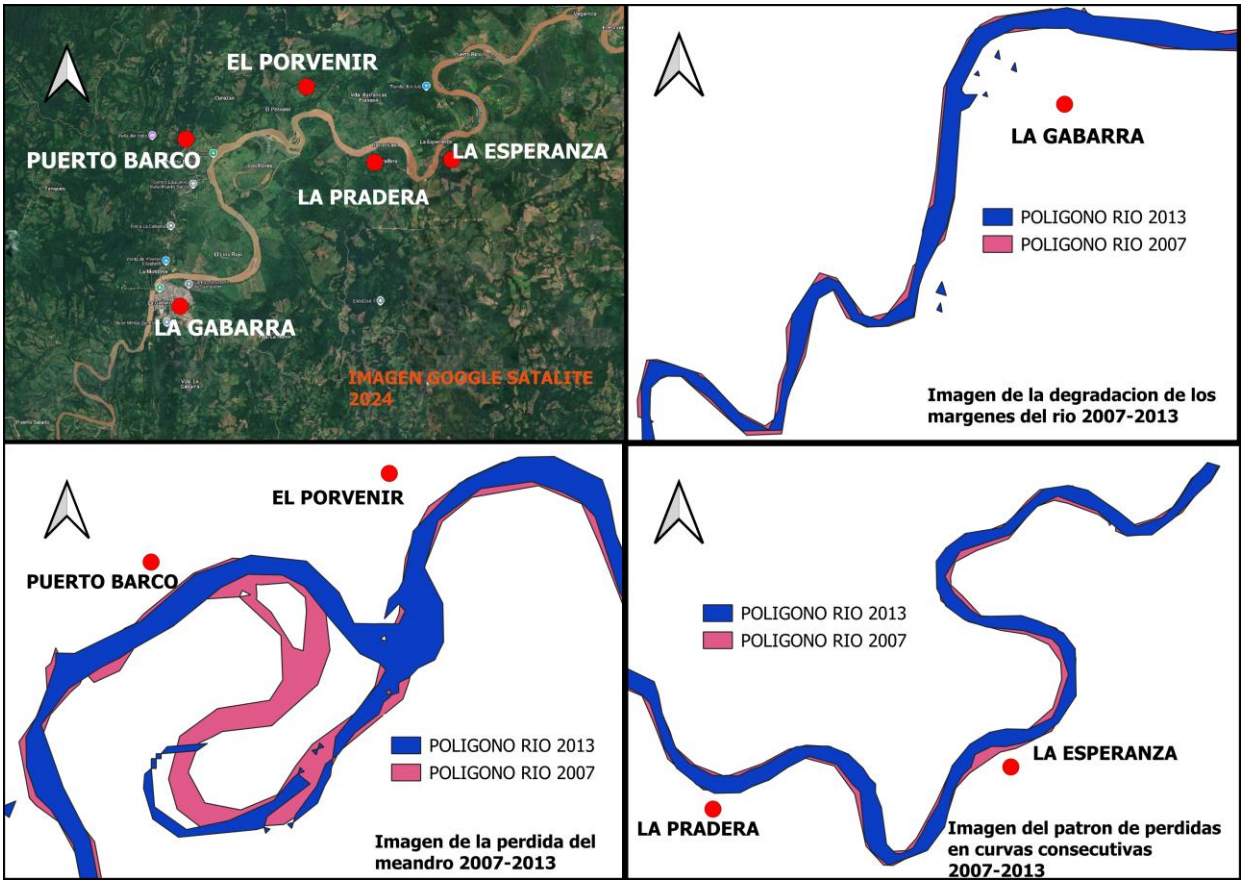


Nota. Cambio en la superficie hídrica del río. (Google Earth Engine, imagenes satelitales obtenidas por landsat 5 y 8)

La figura 17 y 18 muestra un mapa comparativo para representar las variaciones en la extensión superficial del río Catatumbo entre 2007 y 2013. La representación visual resalta en un azul intenso las zonas que conservaron su estado de cuerpo de agua en ambos años, ilustrando la superficie del rio continua que se mantuvo durante el transcurso de seis años. De forma opuesta, las áreas marcadas en rojo señalan la región que existió en 2007 pero que dejó de existir en 2013, mostrando espacialmente la magnitud de las pérdidas.

Figura 18

Zona con mayor cambio en el cauce

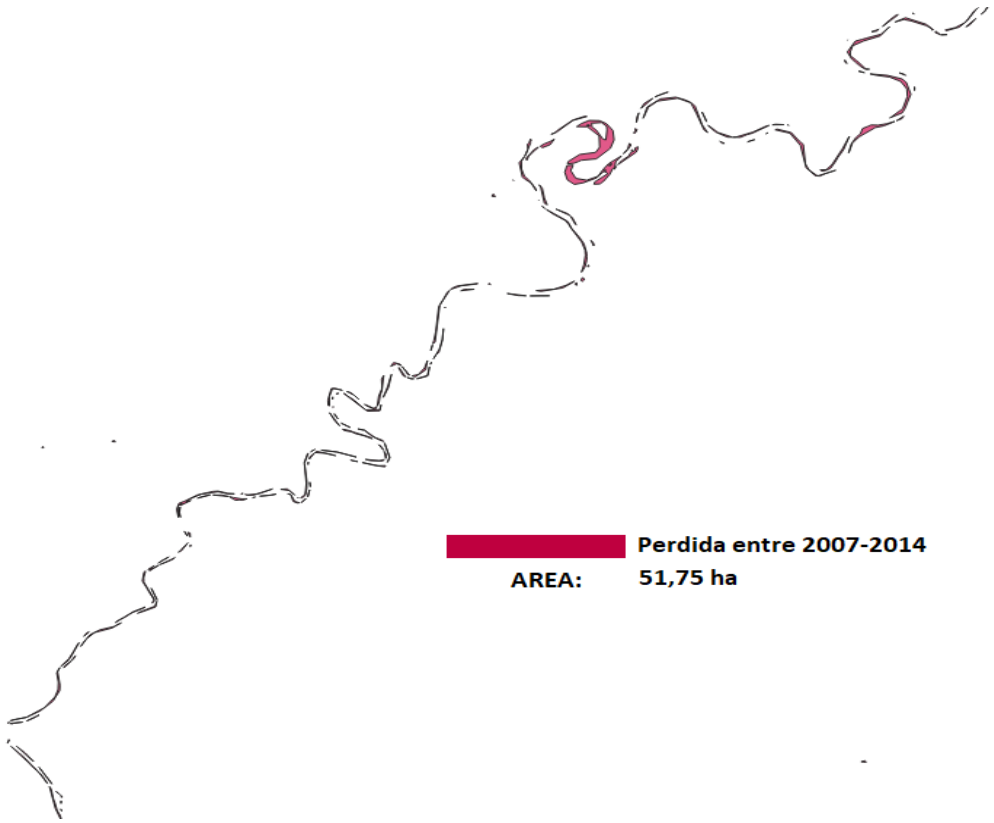


Nota. Sector con mayor cambio morfológico. (Google Earth Engine, imagenes satelitales obtenidas por landsat 5 y 8)

Esta representación cartográfica (figura 18) facilita la identificación visual de los patrones de fragmentación y reducción del espejo de agua, donde las áreas rojas dominan en las zonas periféricas del cauce principal y en los cuerpos de agua más pequeños, mientras que el azul se concentra en el canal principal y los núcleos de mayor profundidad. La superposición de colores como lo muestra la figura 19 proporciona una visualización instantánea de la transformación del sistema, donde la expansión de las áreas rojas resalta la gravedad de la pérdida acumulada de 51.75 hectáreas, que representa el 9.04% de la superficie inicial

Figura 19

Perdida de área



Nota. Reducción del espejo de agua. (Google Earth Engine, imagenes satelitales obtenidas por landsat 5 y 8)

4.4.1.2 Período (2013-2015): Colapso Acelerado. El período 2013-2015 se considera el episodio clave dentro de la serie temporal examinada, señalando un giro en la degradación del sistema fluvial. La comparación de las tasas medias de pérdida es clara: mientras el intervalo 2007-2013 mostró una tasa de -8.67 ha/año, este periodo logró una tasa promedio de -16.38 ha/año. Esto implica que la velocidad a la que se pierde agua casi se duplicó en este breve periodo, concentrando una pérdida considerable de 32.76 hectáreas que cambiaron la forma y el alcance del recurso hídrico.

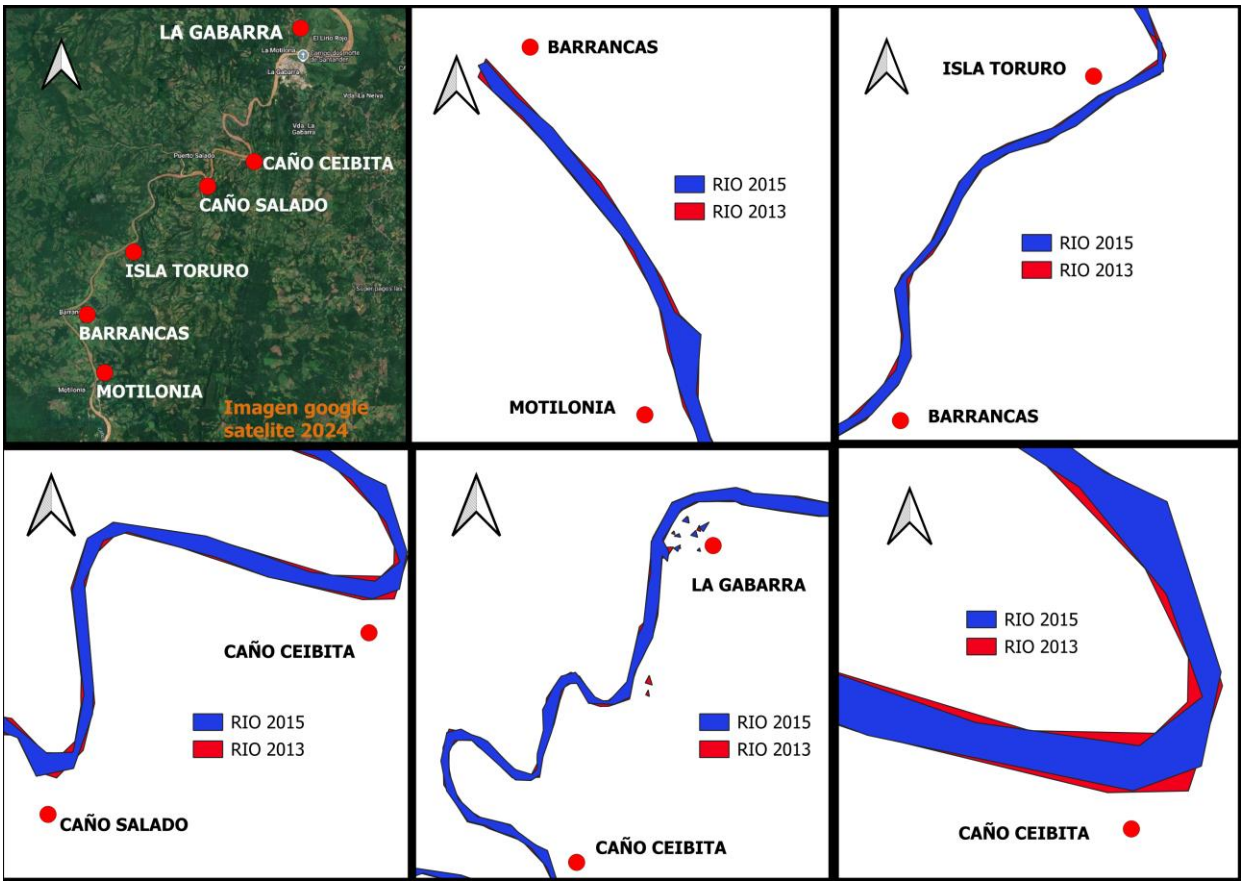
La magnitud de esta crisis, caracterizada por dos años seguidos de pérdidas aceleradas, se vuelve aún más clara al compararla con la etapa inmediatamente siguiente. Luego de este acontecimiento crucial, la dinámica de pérdida evidenció una clara desaceleración, con tasas anuales que permanecieron debajo de 1 hectárea anualmente durante el lapso 2015-2019. Esta notable disminución en la velocidad de deterioro subraya la naturaleza excepcional y radical del episodio concentrado que tuvo lugar entre 2013 y 2015.

La detección de este punto de crisis es fundamental, ya que nos lleva a analizar las causas subyacentes particulares que influyeron en este período tan determinado. Elementos como fenómenos climáticos severos (sequías extensas o lluvias intensas concentradas) y presiones humanas intensas (como alteraciones evidentes en el uso del suelo o modificaciones en el cauce) en la cuenca durante ese periodo crucial, deben ser contemplados como los posibles activadores de esta rápida transformación del cauce. No sería hasta el intervalo 2019-2020, con una caída del 1.2%, que se anotaría otra vez una tasa notable de deterioro. Para entender completamente la

dinámica de este colapso, se analizarán por separado los dos sub-periodos que lo integran: (2013-2014) y (2014-2015).

Figura 20

Perdida de márgenes del río



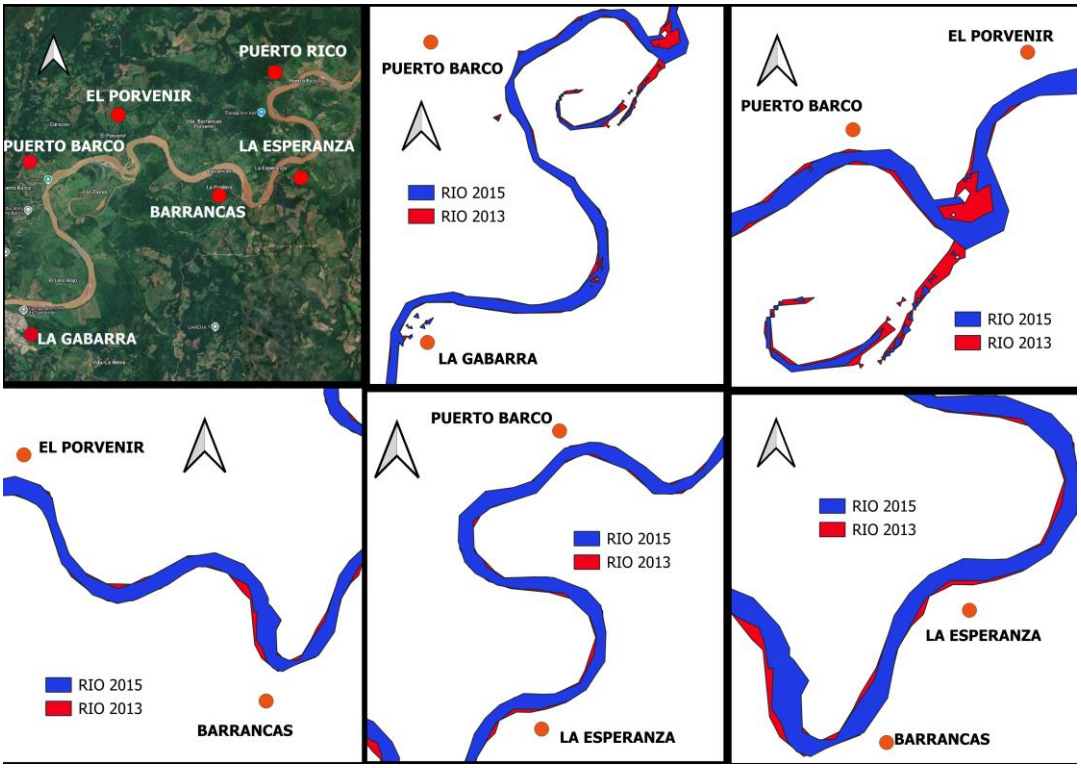
Nota. Disminución de Área entre Motilona y Gamarra. (Google Earth Engine, imagenes satelitales obtenidas por landsat 5 y 8)

La en la figura 20 se observa la perdida de área entre motilona y La Gabarra, se observa como en las márgenes del rio como en el caño la ceibita se ha perdido zonas del rio lo que pudo ser ocasionado por lo que se denominan playas fluviales donde la sedimentación de va

acumulando en las curvas, orillas lo que reduce el ancho del rio así como se observa en la figura 21 el tramo entre puerto barco y puerto rico siendo el sector más crítico donde en el sector de las flores se perdió el meandro, la figura muestra cómo queda una retención de humedad donde antes era área del rio.

Figura 21

Reducción del meandro



Nota. Disminución de Área en el sector el Porvenir. (Google Earth Engine, imagenes satelitales obtenidas por landsat 5 y 8)

El primer año del periodo entre 2013 y 2014 ya evidenció una aceleración preocupante, con una disminución de 10.08 hectáreas (-1.91%) a una tasa de -10.08 ha/año. Esta tasa, mayor

que la del periodo anterior, señalaba que el sistema empezaba a perder su habilidad de compensación y se acercaba a un umbral crítico.

La Gran Recesión El periodo 2014-2015 marca el episodio más grave registrado, con una pérdida neta de 22.68 hectáreas (-4.38%) a una tasa histórica de -22.68 ha/año. La intensidad y rapidez de esta reducción indican la posibilidad de la ocurrencia de eventos extremos encadenados, probablemente una sequía severa seguida de fuertes lluvias que trasladaron grandes volúmenes de sedimentos, obstruyendo áreas superficiales y desconectando de manera significativa brazos laterales.

4.5 Correlación Perdida de Área con Temperatura

4.5.1 Relevancia del Estudio de la Relación entre Precipitación y Superficie Terrestre

La descripción de la relación operativa entre la precipitación y la dinámica del área superficial del sistema fluvial es esencial para entender los cambios observados en la zona de La Gabarra. Este estudio tiene como objetivo determinar hasta qué punto las fluctuaciones anuales en la cobertura de agua son atribuibles a la variabilidad climática natural en particular, a fases de déficit de lluvia o si, en cambio, se deben principalmente a las presiones humanas que han modificado la resiliencia hídrica de la cuenca, incrementando la vulnerabilidad del sistema incluso en condiciones climáticas normales. Para resolver esta incógnita, se utilizaron los datos de dos estaciones meteorológicas clave:

4.5.1.1 Estación Quince Letras (Serie 2001-2023). Situada río arriba del área de estudio en el municipio de Teorema, en una región por la que el río fluye antes de alcanzar La Gabarra. Su serie de larga duración ofrece un amplio contexto climático regional, facilitando la identificación de tendencias, ciclos y anomalías en la precipitación a lo largo del tiempo.

4.5.1.2 Estación Puerto Barco (Serie 2008-2017). Representa una fuente de datos importante para un periodo concreto en la investigación. A pesar de que su serie es más breve, proporciona un referente espacial para analizar la distribución de las precipitaciones en la cuenca. La combinación de estas fuentes de información, junto con la serie temporal de áreas obtenida a través de imágenes satelitales, posibilita un análisis sólido que diferencia entre factores climáticos y antrópicos en la regresión observada del espejo de agua, proporcionando así una base objetiva para la priorización de acciones de gestión y restauración.

4.5.2 Provisión y Detalle de Datos

Para el estudio de la conexión entre el agua superficial y la precipitación en el área de interés, se emplearon datos de fuentes oficiales, que se detallan a continuación:

4.5.2.1 Datos de agua superficial. Conseguido a través del procesamiento digital de imágenes satelitales Landsat para la zona de Quince letras, periodo 2007-2024.

4.5.2.2 Datos de lluvia. *Proporcionados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) para dos estaciones meteorológicas de la región.*

4.5.2.3 Datos Disponibles en Tablas.

***Tabla** 9*

Precipitación Anual en Puerto Barco (2008-2017)

Año	Precipitación Puerto Barco (mm)
2008	5070
2009	4849
2010	3004
2012	4028
2013	3029
2014	3594
2015	2666
2016	4076
2017	3032

Nota. Valores de precipitación registrados en puerto Barco

Tabla 10

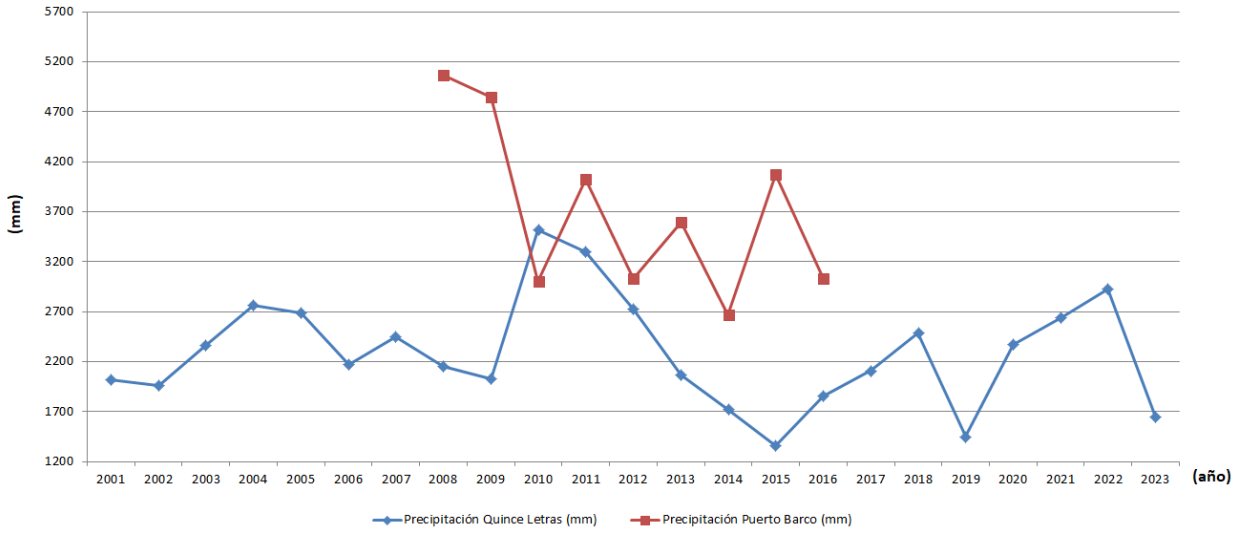
Precipitación Anual en Quince Letras (2001-2023)

Año	Precipitación Quince Letras (mm)
2001	2017
2002	1964
2003	2362
2004	2765
2005	2685
2006	2174
2007	2446
2008	2149
2009	2028
2010	3523
2011	3298
2012	2724
2013	2067
2014	1722
2015	1362
2016	1861
2017	2110
2018	2490
2019	1451
2020	2373
2021	2639
2022	2925
2023	1644

Nota. Datos correspondientes a la precipitación

Figura 22

Comparación de la Precipitación Anual



Nota. Comportamiento de la precipitación en Quince letras y puerto Barco

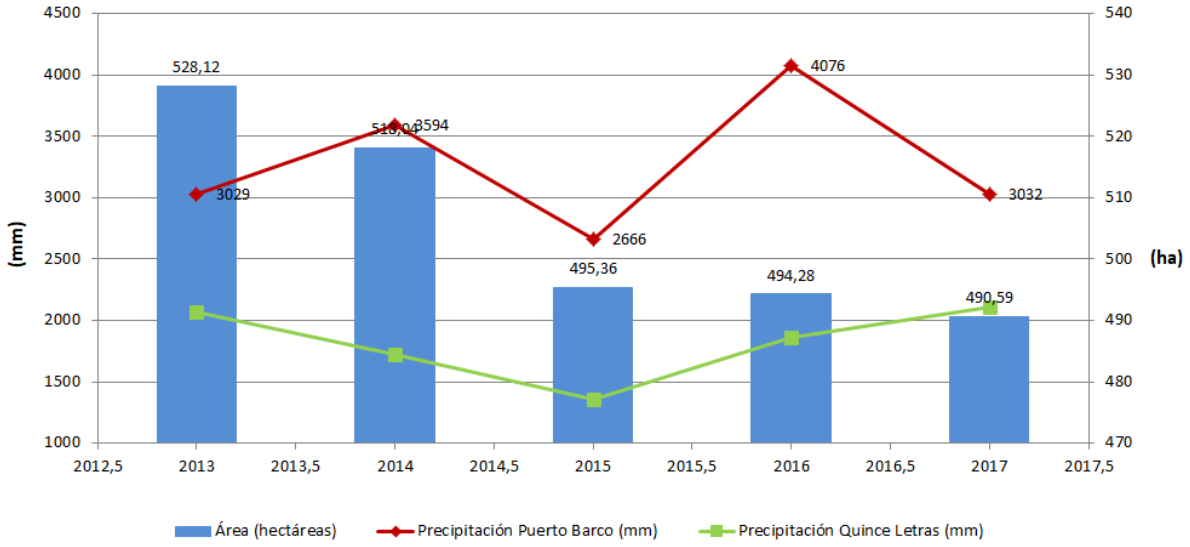
4.5.3 Análisis de la correlación entre la variación de la superficie del rio y la precipitación anual.

Para establecer la conexión entre el agua superficial y la precipitación, se utilizó el método de correlación de Pearson, examinando dos tipos de relaciones; relación directa entre la superficie anual y la lluvia del mismo año y relación con la tasa de cambio entre la variación anual de la superficie y la lluvia. Se eligió la estación Quince letras debido a su mayor disponibilidad de datos.

4.5.3.1 Análisis Cualitativo de la Progresión Temporal. El análisis cualitativo se enfoca en la observación visual de patrones y comportamientos dentro de las series temporales, lo que facilita una comprensión preliminar de la relación entre las variables antes de realizar el análisis estadístico.

Figura 23

Relación Completa Área-Precipitación (2013-2017)



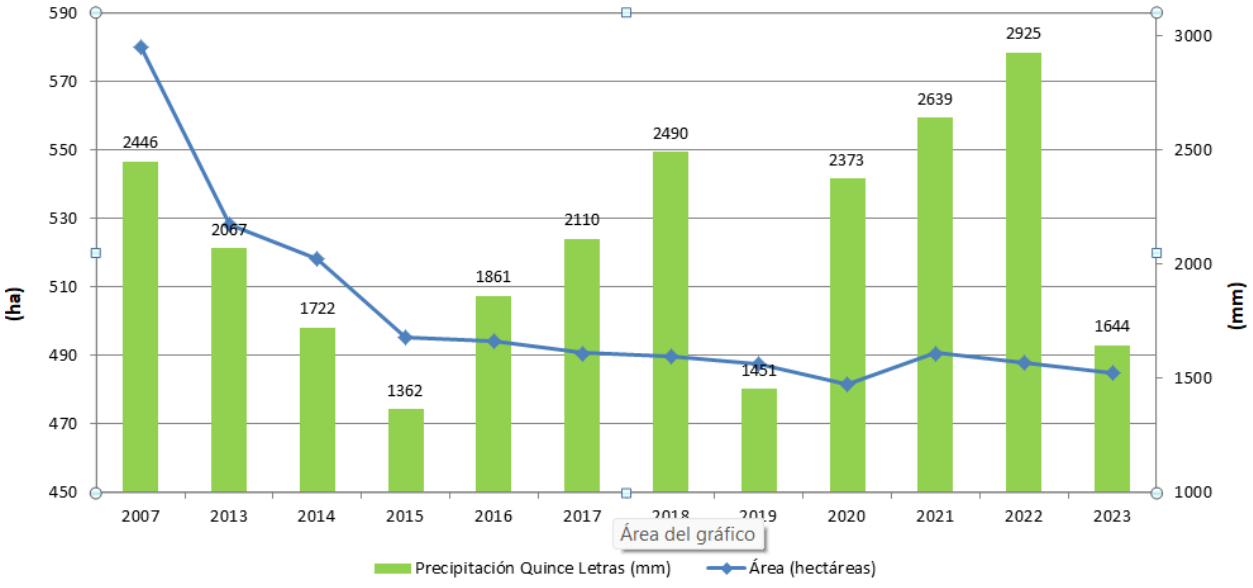
Nota. Comportamiento de la precipitación anual en Quince letras y Puerto Barco

En el sector Puerto Barco, el análisis de la relación entre la lluvia y la variación de la superficie de agua presenta una gran limitación. Esto se debe a la baja disponibilidad de datos de lluvia. La serie analizada tiene información parcial, lo que limita la capacidad de establecer tendencias estadísticas sólidas. Sin embargo, entre los datos disponibles, se observa que durante los años 2013, 2014 y 2015 se registraron lluvias relativamente bajas. Esto coincide con un periodo de reducción significativa del área superficial del cauce en este sector. Este

comportamiento sugiere que la disminución del suministro de agua pudo haber contribuido a la contracción del sistema fluvial. Esto es especialmente relevante en un tramo que ya había sufrido degradación y pérdida de conectividad lateral. Luego, entre 2016 y 2017, hay un ligero aumento en las lluvias. Aunque este aumento pudo haber ayudado a estabilizar temporalmente la pérdida, no se ve una recuperación considerable del área de agua. Esto indica que el sistema pudo haber entrado en una fase de ajuste morfológico. Factores como la sedimentación acumulada, los cambios en la sección hidráulica y los procesos erosivos anteriores probablemente afectaron su capacidad de respuesta ante mayores aportes de lluvia. Por lo tanto, aunque se nota una coincidencia temporal entre las bajas lluvias y la reducción del área de agua, la información disponible no permite confirmar una relación causal directa. Es necesario complementar este análisis con registros de lluvia más completos y verificaciones en el campo.

Figura 24

Área y Precipitación en el sector Quince letras



Nota. Relación entre Superficie Hídrica y Precipitación Anual (2007-2023)

El análisis comparativo entre la precipitación anual y la variación de la superficie hídrica mostró una relación parcialmente coincidente durante el periodo 2012 a 2015. En esos años, la precipitación disminuyó de aproximadamente 2446 mm a 1362 mm al año. Esto ocurrió durante el tiempo de mayor pérdida de área superficial del cauce. Este comportamiento sugiere que la reducción en los aportes de agua pudo haber contribuido a la disminución de la superficie acuática. Esto podría haber reducido los caudales medios y la capacidad del sistema para mantener su extensión lateral activa. Sin embargo, a partir de 2016, se observa un aumento en la precipitación anual. A pesar de esto, el cauce no mostró una recuperación proporcional de su superficie y continuó perdiendo área, aunque en menor medida. Esto indica que el sistema pudo haber llegado a un umbral de ajuste morfológico. Procesos como colmatación, sedimentación acumulada o desconexión de brazos secundarios limitaron su capacidad de recuperación inmediata. Asimismo, entre 2020 y 2021, se registró un nuevo aumento en las precipitaciones, pero la recuperación del área hídrica no fue significativa. Posteriormente, se observó nuevamente una tendencia a la disminución. Esto sugiere que la pérdida de superficie no depende solo de la variabilidad de la lluvia, sino también de factores morfológicos y sedimentológicos que afectan la respuesta del sistema fluvial. En conjunto, los resultados indican que, aunque hay cierta coincidencia entre la disminución de las precipitaciones y una mayor pérdida de área, la recuperación del cauce no se relaciona de manera directa con el aumento de la lluvia. Esto revela una dinámica más compleja, posiblemente influenciada por procesos estructurales acumulativos.

4.5.3.2 Relación entre la Superficie Hídrica Total y la Precipitación Anual.

Tabla 11

Tendencia entre la Superficie Anual del Rio y la Precipitación

	Yi	Xi	$\bar{Y}$	$\bar{x}$	dy	dx	dy*dx	dy^2	dx^2
	580,14	2446	502,365	2090,833	77,775	355,167	27623,088	6048,951	126143,361
	528,12	2067	502,365	2090,833	25,755	-23,833	-613,828	663,320	568,028
	518,04	1722	502,365	2090,833	15,675	-368,833	-5781,462	245,706	136038,028
	495,36	1362	502,365	2090,833	-7,005	-728,833	5105,478	49,070	531198,028
	494,28	1861	502,365	2090,833	-8,085	-229,833	1858,203	65,367	52823,361
	490,59	2110	502,365	2090,833	-11,775	19,167	-225,687	138,651	367,361
	489,6	2490	502,365	2090,833	-12,765	399,167	-5095,362	162,945	159334,028
	487,35	1451	502,365	2090,833	-15,015	-639,833	9607,097	225,450	409386,694
	481,5	2373	502,365	2090,833	-20,865	282,167	-5887,408	435,348	79618,028
	490,59	2639	502,365	2090,833	-11,775	548,167	-6454,663	138,651	300486,694
	487,8	2925	502,365	2090,833	-14,565	834,167	-12149,638	212,139	695834,028
	485,01	1644	502,365	2090,833	-17,355	-446,833	7754,793	301,196	199660,028
Σ	6028,38	25090					15740,610	8686,794	2691457,667

R
0,10294329

Nota. Calculo de coeficiente de Pearson

Tabla 12

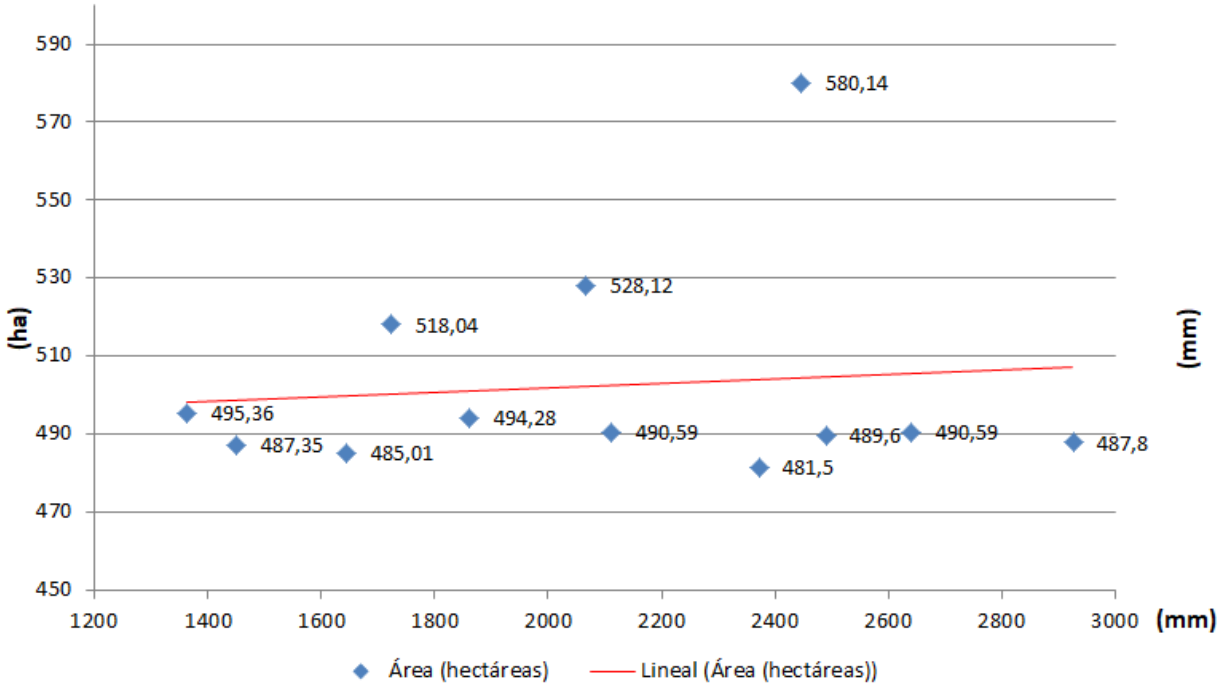
Resultados de la Correlación de Pearson entre Área anual y Precipitación anual

Parámetro	Valor	Interpretación
Coeficiente de Pearson (r)	0,10294	Correlación positiva debil
Coeficiente de determinación (R^2)	0,01060	1.1% de variabilidad explicada

Nota. Valor obtenido del coeficiente de Pearson para su análisis

Figura 25

Tendencia entre la Superficie Anual y la Precipitación



Nota. Comportamiento de la relación entre las variables

El análisis de dispersión entre el agua superficial anual y la precipitación media anual produce un coeficiente de correlación de Pearson de r = 0.106, lo que indica una débil relación lineal positiva. De forma adyacente, el coeficiente de determinación ($r^2 = 0.011$) señala que la precipitación solo explica el 1.1% de la variabilidad total del área superficial en el periodo examinado (2007–2024).Este hallazgo verifica que no hay una relación lineal relevante entre el aumento de la precipitación y la expansión de la superficie acuática.

La tendencia detectada indica que, si bien los años de menor lluvia suelen correlacionarse con disminuciones del área, los lapsos de gran precipitación no consiguen reflejarse en una recuperación proporcional del cuerpo de agua. En otras palabras, cuando las lluvias bajan, la

superficie de agua responde con disminución, pero cuando las precipitaciones aumentan, el sistema solo puede estabilizarse o disminuir la tasa de disminución, sin volver a los niveles de extensión previos. Este comportamiento pone de manifiesto un fenómeno de asimetría en la respuesta hidrológica, en el que el sistema muestra mayor sensibilidad durante los periodos secos y una capacidad de recuperación limitada en los periodos húmedos.

Esto puede ser resultado de la compactación del suelo, acumulación de sedimentos, pérdida de conectividad en el agua, o acciones humanas en las áreas de recarga, que evitan que el incremento de la lluvia se convierta directamente en un aumento de la zona inundada. En resumen, la baja correlación indica que la precipitación no es el único elemento que influye en el comportamiento superficial del cuerpo de agua. En realidad, el sistema parece estar en un proceso de deterioro continuo, donde las lluvias intensas solo logran estabilizar temporalmente la superficie, sin poder invertir la tendencia de reducción vista a lo largo de los años.

4.5.3.3 Relación entre la tasa promedio de pérdida anual y la Precipitación.

Tabla 10

Tendencia entre la tasa promedio de anual de perdidas Rio y la Precipitación

	Yi	Xi	$\bar{Y}$	$\bar{x}$	dy	dx	dy*dx	dy^2	dx^2
	-8,67	2067	-4,707	2058,545	-3,963	8,455	-33,503	15,703	71,479
	-10,08	1722	-4,707	2058,545	-5,373	-336,545	1808,167	28,866	113262,843
	-22,68	1362	-4,707	2058,545	-17,973	-696,545	12518,821	323,019	485175,570
	-1,08	1861	-4,707	2058,545	3,627	-197,545	-716,551	13,157	39024,207
	-3,69	2110	-4,707	2058,545	1,017	51,455	52,343	1,035	2647,570
	-0,99	2490	-4,707	2058,545	3,717	431,455	1603,834	13,818	186153,025
	-2,25	1451	-4,707	2058,545	2,457	-607,545	-1492,905	6,038	369111,479
	-5,85	2373	-4,707	2058,545	-1,143	314,455	-359,336	1,306	98881,661
	9,09	2639	-4,707	2058,545	13,797	580,455	8008,690	190,365	336927,479
	-2,79	2925	-4,707	2058,545	1,917	866,455	1661,230	3,676	750743,479
	-2,79	1644	-4,707	2058,545	1,917	-414,545	-794,797	3,676	171847,934
Σ	-51,78	22644					22255,994	600,659	2553846,727

R
0,56824493

Nota. Calculo de coeficiente de Pearson

Tabla 11

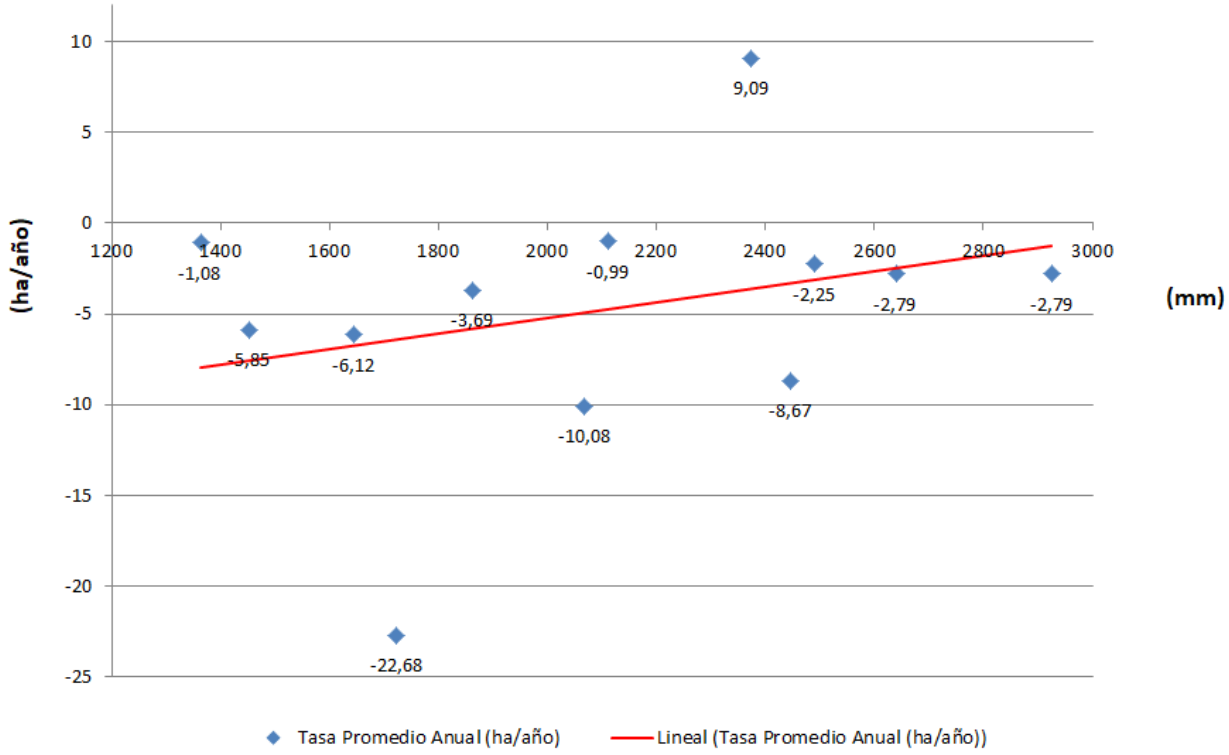
Resultados de la Correlación de Pearson entre tasa de variación y precipitación anual

Parámetro	Valor	Interpretación
Coeficiente de Pearson (r)	0,56824493	Correlación positiva moderada
Coeficiente de determinación (R^2)	0.314	31.4% de variabilidad explicada

Nota. Valor obtenido del coeficiente de Pearson para su análisis

Figura 26

Tasa Promedio Anual de perdida



Nota. Análisis de la correlación de la tasa promedio de pérdida anual

El examen de correlación entre la tasa de cambio anual de la superficie hídrica y la precipitación anual dio como resultado un coeficiente de Pearson de r = 0.56, lo que indica una correlación positiva moderada. Este hallazgo demuestra que los años con valores más altos de precipitación suelen mostrar tasas menores de pérdida de superficie acuática y, en ciertos casos, una leve recuperación del área. En comparación, en los intervalos de escasa lluvia, la reducción de la superficie hídrica se intensifica, mostrando una reacción hidrológica más inmediata a las condiciones climáticas.

El coeficiente de determinación ($r^2 = 0.31$) sugiere que cerca del 31% de la variabilidad en la tasa de cambio del área hídrica puede ser atribuida a las fluctuaciones en la precipitación anual. Este porcentaje es notablemente superior al obtenido al examinar el área total, lo que indica que la precipitación tiene un papel más influyente en la dinámica del cambio anual que en el tamaño absoluto del cuerpo de agua. A diferencia del análisis previo ($r = 0.106$), en esta relación se observa un patrón de respuesta hidrológica más consistente cuando la lluvia disminuye, se observa una mayor tasa de pérdida de superficie, mientras que en los años con fuertes precipitaciones, el sistema disminuye su deterioro o conserva su área, llegando incluso a presentar un momento específico de recuperación.

La existencia de esta correlación moderada indica que la precipitación funciona como un regulador a corto plazo, afectando la magnitud de la pérdida o ganancia de superficie, aunque no sea suficiente para revertir del todo la tendencia general de disminución observada durante el periodo. Esto significa que las precipitaciones más fuertes mitigan la pérdida, pero no consiguen restaurar de manera continua las zonas deterioradas. En resumen, la correlación positiva lograda confirma que la tasa de cambio anual es una variable más reactiva y pertinente para analizar la influencia del clima en el cuerpo de agua, pues refleja con mayor exactitud las variaciones hidrológicas entre años y la reacción rápida del sistema ante las diferencias en la precipitación.

4.5.3.4 comportamiento y respuesta Hídrica a la Variabilidad Pluviométrica. La integración sistemática de las evidencias cualitativas y cuantitativas permite elucidar los mecanismos que gobiernan la respuesta del sistema hídrico ante la variabilidad pluviométrica. El análisis revela un comportamiento dual donde coexisten procesos de resiliencia estructural y sensibilidad dinámica, manifestados a través de los siguientes patrones consistentes:

4.5.3.5 Desacoplamiento estructural del forzante climático inmediato. La marcada discordancia temporal observada entre la evolución del área superficial (Gráfico 2) y el régimen pluviométrico (Gráfico 1) encuentra su validación cuantitativa en el coeficiente de determinación marginal ($R^2 = 0.011$). Esta disociación sugiere la predominancia de mecanismos de compensación a largo plazo —posiblemente relacionados con la capacidad de almacenamiento subterráneo, procesos geomorfológicos o regulación antrópica— que amortiguan el impacto inmediato de la precipitación anual sobre la configuración a real del cuerpo de agua.

4.5.3.6 Sensibilidad dinámica a los extremos pluviométricos. Contrariamente al comportamiento estructural, la dinámica interanual expresada a través de las tasas de cambio manifiesta una respuesta moderadamente sensible a la variabilidad de precipitaciones ($R^2 = 0.314$). La correlación positiva identificada sugiere que, si bien la precipitación no determina el estado basal del sistema, sí modula significativamente sus fluctuaciones interanuales, actuando como regulador de los procesos de contracción y recuperación del espejo de agua.

4.5.3.7 La discrepancia explicativa detectada. En particular en las tasas de cambio donde se mantiene un 68.6% de variabilidad no explicada— revela la naturaleza multifacética de la dinámica hídrica. Esta complejidad indica la participación de variables adicionales que no se han tenido en cuenta en el modelo actual, como patrones de uso del suelo, alteraciones en la evapotranspiración o efectos acumulativos de lluvias en períodos anteriores.

Las Consecuencias para la administración adaptativa Estos resultados apoyan la necesidad de llevar a cabo estrategias de gestión diferenciadas que reconozcan la dualidad del sistema: Intervenciones estructurales para preservar la resiliencia básica del cuerpo de agua, y medidas operativas adaptadas a la variabilidad interanual de la lluvia para reducir procesos de degradación acelerada en momentos cruciales.

4.6 Elaboración de Recomendaciones para la Gestión y Mitigación

Las recomendaciones formuladas para la conservación y restauración del sector analizado en la cuenca del río Catatumbo se basan en un diagnóstico obtenido a partir del análisis de imágenes satelitales. Este análisis nos permite identificar patrones y cambios en la zona, lo que es útil para la planificación y gestión de recursos hídricos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que este enfoque es general siendo importante fortalecer con estudios detallados en el terreno.

Por lo tanto, la implementación de medidas de manejo, restauración o intervención debe ir acompañada de visitas técnicas y evaluaciones en el terreno. Esto nos permitirá validar y

ajustar las acciones propuestas según las condiciones específicas del lugar. Las recomendaciones que se presentan aquí son lineamientos generales derivados del análisis geoespacial y no deben considerarse como diseños finales de intervención.

4.6.1 Dragado selectivo

El análisis morfológico del cauce del río permitió identificar sectores con procesos significativos de acumulación de sedimentos mediante técnicas de teledetección y análisis multi-espectral. En zonas como Puerto Barco y Puerto Rico, la sedimentación progresiva ha reducido de manera notable la sección hidráulica efectiva, disminuyendo la capacidad de conducción del flujo y aumentando la susceptibilidad a desbordamientos durante eventos de alta precipitación. Esta condición evidencia un desequilibrio en la relación natural entre transporte sólido y capacidad hidráulica, lo que justifica la necesidad de intervenciones orientadas a restablecer la funcionalidad hidráulica del sistema fluvial.

En este contexto, se propone la implementación de un dragado selectivo en los puntos críticos previamente delimitados, sujeto a una fase de verificación en campo mediante visitas técnicas especializadas que permitan confirmar el grado de colmatación, la granulometría del material y su influencia real sobre el régimen hidráulico. El dragado constituye una medida de manejo fluvial ampliamente utilizada, considerando que las dragas y bombas de dragado son equipos fundamentales para la construcción, modificación y mantenimiento de ríos y canales, ya que permiten restablecer la navegabilidad, mantener la profundidad de los cursos de agua y contribuir a la restauración de las riberas mediante la remoción controlada de sedimentos acumulados.

La intervención se concibe como una acción puntual y controlada, enfocada exclusivamente en la extracción del material excedente depositado en el lecho, evitando alteraciones en la geometría natural del cauce o en tramos funcionales del sistema. Su finalidad es recuperar parcialmente la capacidad hidráulica, favorecer el transporte natural de sedimentos durante crecientes y reducir el riesgo de inundación en áreas adyacentes. Bajo este enfoque, el dragado selectivo se plantea como una medida técnica de mitigación coherente con los principios de gestión fluvial, al actuar directamente sobre la causa física del problema, la colmatación, sin generar impactos significativos sobre la dinámica general del río.

4.6.2 Reconexión del meandro

El análisis multi-temporal de imágenes satelitales permitió identificar el proceso progresivo de desconexión de un antiguo meandro en el sector Las Flores, lo cual generó una pérdida significativa de superficie hídrica y una simplificación de la morfología del cauce. La desconexión del meandro ha reducido la complejidad hidráulica del sistema fluvial, disminuyendo su capacidad de almacenamiento temporal durante eventos de creciente, así como la interacción entre el flujo principal y las zonas de inundación natural, lo que repercute en la estabilidad geomorfológica y en la funcionalidad ecológica del entorno ribereño.

En respuesta a este diagnóstico, se propone la reconexión parcial del meandro abandonado mediante el restablecimiento controlado del trazado histórico del cauce en el sector Las Flores, con el objetivo de recuperar aproximadamente entre 4 y 5 hectáreas de superficie acuática. Esta medida se sustenta en estrategias de restauración fluvial basadas en la reconexión de antiguos meandros, considerando que la recanalización de estos tramos incrementa la longitud

del recorrido del río, lo que contribuye a disminuir la velocidad del flujo, favorecer la disipación de energía hidráulica y aumentar los procesos de infiltración en el terreno, fortaleciendo la regulación natural del sistema.

La delimitación del trazado potencial se realizó a partir de la interpretación multi-temporal de imágenes satelitales, lo que permite orientar espacialmente la intervención; sin embargo, su ejecución deberá estar condicionada a estudios técnicos en campo que evalúen la viabilidad hidráulica y geomorfológica, la estabilidad de las márgenes y la compatibilidad con el régimen actual del río. Desde la perspectiva de la ingeniería de restauración fluvial, la reconexión del meandro representa una intervención de carácter morfológico que busca restituir parcialmente la dinámica natural del sistema, incrementando la complejidad del cauce, mejorando la retención temporal del agua y reduciendo la energía del flujo en el canal principal, lo que a su vez favorece la recuperación de los ecosistemas asociados y contribuye a la resiliencia hidráulica del río.

4.6.3 Repoblación vegetal ribereña

La revegetación de cuencas y riberas constituye una estrategia fundamental de restauración fluvial orientada a recuperar los procesos hidrológicos y geomorfológicos naturales del sistema. El incremento de la cobertura vegetal y la recuperación de las franjas de vegetación de ribera contribuyen a la regulación de los caudales al favorecer la infiltración en el suelo, laminar las avenidas y reducir la velocidad del flujo, al tiempo que facilitan la retención de sedimentos y la estabilización de las márgenes. De manera complementaria, esta medida

promueve la generación de hábitats y el fortalecimiento de la biodiversidad asociada al ecosistema ribereño.

Como acción de restauración, se plantea la implementación de un programa de repoblación vegetal orientado a la conformación de un corredor ecológico continuo a lo largo del cauce. Para ello, se propone el establecimiento de una franja de protección ribereña con un ancho de referencia de 50 metros en total, distribuidos en 25 metros a cada margen del río, ajustable de acuerdo con la disponibilidad del terreno y las condiciones biofísicas locales, priorizando los sectores con mayor grado de degradación identificados en el análisis espacial.

La intervención se fundamenta en el uso de especies nativas adaptadas a condiciones hidrológicas ribereñas, seleccionadas por su capacidad de estabilización del suelo mediante sistemas radiculares profundos, su tolerancia a periodos de inundación y su aporte a la estructura ecológica del paisaje. Desde la perspectiva de la ingeniería de restauración, esta estrategia permite disminuir los procesos erosivos y la carga de sedimentos hacia el cauce, regular la temperatura del agua mediante sombreado natural y mejorar la conectividad ecológica longitudinal y transversal del sistema. A diferencia de las intervenciones estructurales, la revegetación ribereña se concibe como una medida preventiva y de largo plazo, orientada a restituir la función protectora natural del bosque de ribera y a incrementar la resiliencia hidráulica y ambiental del río frente a eventos hidro-meteorológicos extremos, consolidándose como un componente clave dentro de un enfoque integral de gestión y restauración fluvial.

Desde el marco normativo, esta medida se sustenta en lo establecido en el Artículo 80 de la Constitución Política de Colombia, el cual señala que el Estado debe planificar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales para garantizar su desarrollo sostenible, conservación y restauración, así como prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental. En este sentido, la implementación de programas de revegetación ribereña se alinea con el cumplimiento de este mandato constitucional al contribuir a la protección y recuperación de los ecosistemas hídricos y sus funciones ambientales.

4.6.4 Bioingeniería de riberas

El análisis del terreno permitió identificar sectores con alto riesgo de erosión lateral, particularmente en zonas donde la pérdida de cobertura vegetal ha dejado el suelo expuesto a la acción directa del flujo durante eventos de creciente. Esta condición ha favorecido la inestabilidad de las márgenes, el retroceso progresivo de los taludes y el incremento del aporte de sedimentos al cauce principal, afectando la sección hidráulica y la dinámica morfológica del río.

Como medida de intervención, se propone la estabilización de riberas mediante técnicas de bioingeniería en los tramos previamente identificados como críticos. La estrategia combina la siembra de especies vegetales nativas con la instalación de mantas o geotextiles biodegradables, los cuales actúan como elementos de protección superficial del suelo mientras se consolida la cobertura vegetal. Este sistema permite reducir la velocidad del flujo en contacto con la ribera, disipar la energía hidráulica y favorecer la cohesión del suelo a través del desarrollo radicular, logrando una estabilización progresiva sin rigidizar el cauce ni alterar su comportamiento natural. Previo a su implementación, se requiere una verificación técnica en campo orientada a

caracterizar variables como la pendiente de las márgenes, la tipología y granulometría del suelo, el grado de degradación estructural y la intensidad de los procesos erosivos activos. Esta evaluación permitirá ajustar el diseño de la intervención y garantizar su eficiencia hidráulica y geomorfológica.

El objetivo principal de la medida es disminuir la erosión lateral activa, estabilizar los taludes y reducir el aporte adicional de sedimentos al sistema fluvial, manteniendo la funcionalidad hidromorfológica del río. En contraste con soluciones de ingeniería rígida, como revestimientos en concreto o muros de contención, la bioingeniería ofrece una respuesta más flexible y adaptable a la variabilidad del régimen hidráulico, consolidándose como una alternativa técnica sostenible y coherente con los principios de manejo y restauración fluvial.

4.6.5 Delimitación de zonas de riesgo

El análisis hidrológico y geomorfológico permitió identificar sectores ubicados dentro de la llanura de inundación activa, particularmente en el área de Las Flores, con alta susceptibilidad a afectaciones por eventos de creciente y procesos de migración lateral del cauce propios de la dinámica fluvial. Estas zonas presentan una condición de riesgo elevada debido a su cercanía al río y a la reducción de la sección hidráulica efectiva en algunos tramos, lo que incrementa la probabilidad de desbordamientos. La ocupación actual y las proyecciones de uso del suelo en estos sectores aumentan la vulnerabilidad de la población y reducen el espacio disponible para la movilidad natural del río, generando conflictos entre los procesos hidro-morfológicos y las actividades antrópicas.

Como medida de gestión territorial, se propone la delimitación técnica de zonas de riesgo por inundación mediante la elaboración de cartografía temática derivada de los análisis multi-temporales realizados en el estudio. Esta zonificación permitirá identificar áreas de amenaza alta, media y baja, estableciendo criterios para su incorporación en instrumentos de planificación territorial y orientando la definición de suelos no urbanizables en las franjas de mayor exposición. La medida se concibe como una herramienta preventiva que facilita la toma de decisiones en materia de ordenamiento del territorio y gestión del riesgo.

El objetivo principal es reducir la exposición de la población y de la infraestructura a eventos hidro-meteorológicos extremos, permitir la expansión controlada del río durante periodos de creciente y preservar la funcionalidad natural de la llanura de inundación. Asimismo, la delimitación de estas zonas contribuye a disminuir la necesidad futura de obras estructurales de alto costo y favorece la sostenibilidad a largo plazo del sistema fluvial, al armonizar la planificación territorial con la dinámica natural del río.

5. Conclusiones

Se implementó una forma sistemática de recopilar y procesar datos que varían en el espacio y en el tiempo. Esto se hizo posible gracias al uso de bases de datos con herramientas de análisis geoespacial. La metodología permitió combinar información de diferentes periodos para estudiar cómo varia el río Catatumbo. Esto garantizó que los datos sobre la cobertura del agua, los cambios en la forma del río se tratarán de manera consistente. El estudio encontró una limitación, entre 2004 y 2011, la calidad de las imágenes estuvo acondicionada por la alta nubosidad propia de la zona. Esto significó que hubo menos observaciones en ese período, esto podría haber limitado el seguimiento de algunos cambios específicos en la forma de la zona estudiada. A pesar de esta restricción, la aplicación del enfoque metodológico permitió establecer tendencias espaciales consistentes y detectar transformaciones significativas en la cuenca estudiada, demostrando la solidez y adaptabilidad del procedimiento implementado frente a condiciones de disponibilidad variable de información.

Lo resultados obtenidos en el monitoreo donde se utilizó Google Earth Engine para comparar imágenes satelitales permitió ver cambios importantes en la forma del río durante el tiempo que se estudió. Los resultados mostraron que el río perdió alrededor de 101 hectáreas de agua. Esto indica que el río se está degradando de manera progresiva. De manera particular, se confirma la pérdida del meandro en el sector Las Flores, fenómeno asociado a procesos de sedimentación y reconfiguración del cauce que redujeron la complejidad hidráulica del sistema. Asimismo, se identifican procesos de erosión lateral y fragmentación del cauce, especialmente en el tramo comprendido entre Barrancas y Puerto Rico, donde se observa una disminución del

ancho activo del río. Los resultados obtenidos confirman que el sistema fluvial estudiado presenta procesos activos de ajuste morfológico que requieren medidas de gestión y restauración fundamentadas en evidencia técnica.

Se crearon planes para gestionar la cuenca de manera sostenible donde se priorizaron acciones que pueden hacerse, como dragado selectivo en tramos colmatados, reconectar el meandro en el sector Las Flores, estabilizar riberas con bioingeniería, repoblar vegetación en las riberas y delimitar zonas de riesgo donde no se puede construir. Estas propuestas se fundamentan directamente en la evidencia observada en las imágenes satelitales y en el análisis hidro-morfológico desarrollado, garantizando coherencia entre los problemas identificados y las soluciones planteadas. No obstante, si bien el estudio proporciona una base técnica sólida para la toma de decisiones, se reconoce la necesidad de complementar estos resultados mediante visitas de campo e inspecciones técnicas detalladas en los puntos críticos identificados, con el fin de validar las condiciones actuales y ajustar las intervenciones a la realidad físico-ambiental del territorio.

6. Recomendaciones

Se recomienda que los análisis se complementen con inspecciones in situ, a pesar de las dificultades de acceso que presenta la zona del Catatumbo. Esto permitirá validar y enriquecer la información obtenida de los modelos, evitando posibles sesgos por la limitada disposición de algunos datos y la visibilidad por el clima.

Se recomienda la actualización y la instalación de nuevas estaciones meteorológicas, que registren diferentes variables climáticas, tales como precipitación, temperatura, humedad y caudal de ríos, lo que permitirá obtener una información de los diferentes factores. Además, mediante la aplicación de métodos estadísticos y de correlación entre más de dos variables, se podrá establecer relaciones más sólidas y confiables entre los distintos factores que afectan la dinámica hídrica y climática.

Implementar estas recomendaciones contribuirá a generar series de datos más representativas, fortalecerá la precisión de los resultados y permitirá que futuras investigaciones dispongan de información más completa y confiable para la formulación de estrategias de 97 gestión de recursos hídricos en la zona del Catatumbo y otras regiones con características similares.

Referencias

Agencia de renovación del territorio. (2023). *Renovacion territorio*. Obtenido de https://centralpdet.renovacionterritorio.gov.co/wp-content/uploads/2022/02/Catatumbo-Documento-subregional-2023.pdf

Alarcón, H., Zafra, M., & Echeverri, P. (2019). *Cambio climático y recursos hídricos en Colombia. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica.* Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/337377731_Climate_change_and_water_resources_in_Colombia?utm_source

Alegsa, L. (06 de 12 de 2023). *ALEGSA.com.ar*. Obtenido de https://www.alegsa.com.ar/Dic/arcgis.php#gsc.tab=0

Andersen , I. (23 de Marzo de 2023). *WWF*. Obtenido de https://www.wwf.org.co/?381932/La-mayor-iniciativa-de-restauracion-de-rios-y-humedales-de-la-historia

Asamblea Nacional Costituyente, 1991, Articulo 79. (9 de 2 de 2026). Obtenido de http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/constitucion_politica_1991_pr002.html

Asamblea Nacional Costituyente, 1991, Articulo 80. (s,f). Obtenido de https://www.constitucioncolombia.com/titulo-2/capitulo-3/articulo-80

Baeza G, E. (2023). *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile* . Obtenido de https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/34442/1/Minuta_embancamiento_de_rios_F.pdf

Baptiste, B. (26 de 9 de 2018). *o7o Podcasts*. Obtenido de https://cerosetenta.uniandes.edu.co/brigitte-baptiste-ciencia-peligro/

Bizmanualz. (2020). *Bizmanualz*. Obtenido de https://www.bizmanualz.com/about-bizmanualz

Cavaller Riva, D., Ortega Yubro, C., Dueñas, E., Sosa, H., & Villodas, R. (2020). *Ciencia de datos en la optimización de recursos hídricos, una aplicación para Irrigación*. Obtenido de https://49jaiio.sadio.org.ar/pdfs/sie/SIE-11.pdf

Cenicaña. (17 de marzo de 2015). *Cenicaña*. Obtenido de https://www.cenicana.org/percepcion-remota/

Centro Nacional de Memoria Histórica. (1 de 1 de 2017). *Catatumbo: memorias de vida y dignidad*. Obtenido de Centro Nacional de Memoria Histórica: https://centrodememoriahistorica.gov.co/micrositios/catatumbo/#:~:text=La%20regi%C3%B3n%20del%20Catatumbo%20es,comunitarias%20para%20habitar%20sus%20territorios.

CEPAL. (9 de octubre de 2024). *Biblioteca CEPAL*. Obtenido de https://biblioguias.cepal.org/c.php?g=934230&p=6736670

CEPAL, Naciones Unidas. (17 de 07 de 1984). *La Comisión Económica para América Latina (CEPAL)*. Obtenido de https://www.cepal.org/es/temas/cambio-climatico/acerca-cambio-climatico

Collado, C. (2021). Google Earth, guía completa: qué es, cómo usarlo y 4 cosas geniales que puedes hacer. *LA VANGUARDIA.* Obtenido de

https://www.lavanguardia.com/andro4all/google-maps/google-earth-guia-completa-que-es-como-usarlo-y-4-cosas-geniales-que-puedes-hacer-2021-03-08

Congreso de la república de Colombia,1993, Ley 99. (22 de 12 de 1993). Obtenido de https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=297

Copernicus. (14 de 04 de 2018). *Fundamentos de teledetección aplicada.* Obtenido de El programa Copernicus aplicado a la producción y gestión de la información geoespacial: https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/actividades/OBS/Programa_Marco_Copernicus_User_Uptake/2_Fundamentos_teledeteccion_aplicada.pdf

Defensoría del Pueblo. (11 de diciembre de 2006). *MamaCoca.* Obtenido de SITUACIÓN SOCIAL Y AMBIENTAL DE LA REGIÓN DEL CATATUMBO – NORTE DE SANTANDER: http://www.mamacoca.org/docs_de_base/Fumigas/defensorial46_Catatumbo_2009.pdf

DE REMENTERÍA, I. (2001). *La guerra de las drogas. Cultivos ilícitos y desarrollo alternativo.* Bogota: Planeta Colombiana.

EOS Data Analytics,Inc. (7 de noviembre de 2023). *EOS Data Analytics,Inc.* Obtenido de https://eos.com/es/make-an-analysis/ndwi/

EOS Data Analytics,Inc. (6 de Noviembre de 2023). *EOS Data Analytics,Inc.* Obtenido de https://eos.com/es/make-an-analysis/index-stack/

Equipo editorial, Etece. (10 de 08 de 2020). *concepto*. Obtenido de concepto aguas subterraneas: https://concepto.de/deforestacion/

Equipo editorial, Etecé. (10 de 08 de 2020). *Concepto*. Obtenido de Concepto de glaciales.: https://concepto.de/deforestacion/

Escenarios hidricos 2030. (25 de 05 de 2021). *Esecenarios hidricos 2030 Chile.* Obtenido de https://escenarioshidricos.cl/noticia/cuenca-hidrografica-la-unidad-territorial-optima-para-gestionar-recursos-hidricos/

España, S. m. (2023). *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*. Obtenido de https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/agua/temas/delimitacion-y-restauracion-del-dominio-publico-hidraulico/estrategia-nacional-restauracion-rios/pdfs/ENRR-2022-2030.pdf

Flypix. (28 de 4 de 2023). *FlyPixAI*. Obtenido de https://flypix.ai/es/blog/from-balloons-to-satellites-a-journey-through-the-evolution-of-remote-sensing-and-satellite-imagery-resolution/#:~:text=La%20historia%20de%20la%20teledetecci%C3%B3n%20se%20remonta,papel%20m%C3%A1s%20significativo%20en%20la%20inve

García, J. (23 de Marzo de 2023). *WWF Colombia*. Obtenido de https://www.wwf.org.co/?381932/La-mayor-iniciativa-de-restauracion-de-rios-y-humedales-de-la-historia

García, J. J. (14 de mayo de 2016). *La Opinion*. Obtenido de www.laopinion.co/region/elaboran-mapa-para-saber-que-sembrar-en-el-catatumbo

Garcia, P. (2021). ¿Qué es un SIG, GIS o Sistema de Información Geográfica? *Geoinnova*, 1. Obtenido de https://geoinnova.org/blog-territorio/que-es-un-sig-gis-o-sistema-de-informacion-geografica/

Gis&Beers. (31 de 10 de 2017). Obtenido de Google Earth Engine: www.gisandbeers.com/google-earth-engine-script-teledeteccion

Global Water Partnership-GWP. (27 de julio de 2022). *Global Water Partnership-GWP*. Obtenido de https://www.gwp.org/fr/GWP-Sud-America/ACERCA/como/Que-es-la-GIRH/#:~:text=GWP%20basa%20su%20accionar%20en,desarrollo%20y%20el%20medio%20ambiente.

Gobierno de Mexico. (2024). *Gobierno de Mexico*. Obtenido de https://smn.conagua.gob.mx/es/animacion-imagenes-de-satelite?satelite=GOES%20Este&nombre=Golfo%20de%20M%C3%A9xico&tipo=Tope%20de%20Nubes

Google Earth Engine, imagenes satelitales obtenidas por landsat 5 y 8. (s.f.). *Google Earth Engine*. Obtenido de https://earthengine.google.com/

Hernández Vargas, D. (2024). *Universidad de Antioquia.* . Obtenido de https://bibliotecadigital.udea.edu.co/entities/publication/64610f1e-3b0f-459f-bdd8-803de0f1539a

IDEAM. (2022). *Estudio nacional de aguas 2022*. Obtenido de https://www.ideam.gov.co/sites/default/files/prensa/boletines/2024-08-23/resumen_ejecutivo_estudio_nacional_del_agua_2022_0.pdf?utm_source

IDEAM, m. d. (s.f.). *IDEAM*. Obtenido de https://www.ideam.gov.co/transparencia/informacion-de-la-entidad/mision-vision-funciones-y-deberes

INEGI. (2018). *INEGI*. Obtenido de Geografia y Medio Ambiente: https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/imglandsat/

Instituto Geográfico Nacional. (s.f.). *Instituto Geográfico Nacional*. Obtenido de https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/OBS-Teledeteccion.pdf

Jácome Ramírez, J. J. (16 de 10 de 2016). *RECORRIDO POR LOS PAISAJES DE LA VIOLENCIA EN COLOMBIA*. Obtenido de El Bajo Catatumbo: https://centrodememoriahistorica.gov.co/micrositios/recorridos-por-paisajes-de-la-violencia/bajo-catatumbo-dia-3.html

Kogut, P. (2021). Teledetección Satelital: Tipos, Usos Y Aplicaciones. *EOS Data Analytics,Inc*, 1. Obtenido de https://eos.com/es/blog/teledeteccion/

Lozano, E., & Zamora, N. (DICIEMBRE de 2014). *SERVICIO ECOLÓGICO COLOMBIANO*. Obtenido de ANEXO D COMPILACIÓN DE LA CUENCA DE CATATUMBO: https://recordcenter.sgc.gov.co/B20/23008100024725/Documento/Pdf/2105247251104000.pdf

Matellanes, R. (28 de 02 de 2020). *Geoinnova*. Obtenido de https://geoinnova.org/blog-territorio/google-earth-engine-una-herramienta-mas-de-descarga-de-imagenes-satelites/

MapBiomas Agua Colombia . (2024). *Gaia Amazonas*. Obtenido de https://colombia.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/3/2024/11/ATBD-AGUA-COLOMBIA-Col2-Rev-03.pdf)

Medina de perez, M. (2 de julio de 2006). *GEOENSEÑANZA*. Obtenido de https://www.redalyc.org/pdf/360/36012425006.pdf

Menzel, L., Bürger, G. G., & Muzik. (1 de octubre de 2002). *Escenarios de cambio climático y respuesta a la escorrentía en la cuenca de Mulde (sur del Elba, Alemania)*. Obtenido de http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v22n2/0123-4226-rudca-22-02-e1368.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016, Resolución 2182. (23 de 12 de 2016). Obtenido de https://www.minambiente.gov.co/documento-entidad/resolucion-2182-de-2016/

Ministerio de Relaciones Exteriores de Colombia, 1971, Acuerdo Ramsar. (02 de 12 de 2026). Obtenido de https://www.cancilleria.gov.co/convencion-ramsar-sobre-humedales-importancia-internacional

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (16 de 09 de 2025). *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*. Obtenido de https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/sistema-espaniol-gestion-agua/gestion_sostenible.html

Morales, A. (12 de 2021). *MappingGIS*. Obtenido de https://mappinggis.com/2021/12/motivos-para-comenzar-a-trabajar-con-google-earth-engine

Mota, F. P., Aguiar, M. S., Mateus, M. G., & Adamatti, D. F. (30 de 6 de 2020). *Google Earth Engine e sua aplicabilidade na gestão de recursos hídricos*. Obtenido de https://sol.sbc.org.br/index.php/wcama/article/view/11030

Mota, F., Mateus, M., Aguiar, M., & Adamatti, D. (2017). *Google Earth Engine e sua aplicabilidade na gestão de recursos hídricos.* Rio Grande - Brasil.

Mota, F., Mateus , M., Aguiar, M., & Adamatti, D. (30 de 6 de 2017). *Google Earth Engine e sua aplicabilidade na gestão de recursos hídricos*. Obtenido de https://sol.sbc.org.br/index.php/wcama/article/view/11030

Neglia, Á., & Hernández, F. (2022). *Corporación Minuto de Dios*. Obtenido de https://repository.uniminuto.edu/server/api/core/bitstreams/6f7647e3-7135-4447-bb2b-61271641df77/content

numiqo e.U. Graz, A. (2025). *numiqo Team* . Obtenido de https://numiqo.es/tutorial/pearson-correlation

OROMAPAS. (2022). *OROMAPAS*. Obtenido de https://www.oromapas.gob.mx/cultura-del-agua/ciclo-hidrologico/

Orr, S. (23 de marzo de 2023). *WWF*. Obtenido de https://www.wwf.org.co/?381932/La-mayor-iniciativa-de-restauracion-de-rios-y-humedales-de-la-historia

Perilla, G. A., & Francois Mas, j. (04 de 2020). Obtenido de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112020000100111#B18

Perilla, G. A., & François Mas, J. (11 de 3 de 2020). *Instituto de Geografía UNAM*. Obtenido de https://www.investigacionesgeograficas.unam.mx/index.php/rig/article/view/59929/53447

Perilla, G. A., & Mas, J.-F. (2020). Google Earth Engine (GEE): una poderosa herramienta que vincula el potencial de los datos masivos y la eficacia del procesamiento en la nube. *SCIELO*. Obtenido de

https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112020000100111#:~:text=Google%20Earth%20Engine%20(GEE%2C%20https,la%20ciencia%20en%20percepci%C3%B3n%20remota.

Polimetro. (2026). *Polimetro Software y herramientas de Ingeniería*. Obtenido de https://www.polimetro.com/que-es-qgis/

Portillo, G. (21 de agosto de 2024). *Ecología Verde*. Obtenido de https://www.ecologiaverde.com/cuerpos-de-agua-que-son-tipos-y-ejemplos-5092.html

Presidencia de la Republica de colombia 2010, Decreto 3930. (25 de 10 de 2010). Obtenido de https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=40620

Ramos lopez, b. (2 de 3 de 2022). *Cursosteledeteccion*. Obtenido de https://www.cursosteledeteccion.com/google-earth-engine-gee-y-su-aplicacion-en-diferentes-ambitos-de-estudio/

Ramos López, B. (2022). Tipos de fuentes de datos con los que puedes trabajar en Google Earth Engine (GEE): GEDI. *Cursosteledeteccion.com pertenece al Grupo de TYC GIS Formación*, 1. Obtenido de https://www.cursosteledeteccion.com/tipos-de-fuentes-de-datos-con-los-que-puedes-trabajar-en-google-earth-engine-gee-gedi/

Rincón, L., & Santisteban, G. (diciembre de 2020). *Catatumbo*. Obtenido de https://rutasdelconflicto.com/especiales/catatumbo/index.html

Rothschuh, U. (10 de junio de 2022). *Ecologia Verde*. Obtenido de https://www.ecologiaverde.com/que-son-las-aguas-superficiales-definicion-y-ejemplos-3944.html

SAGA, sistema de analisis de grupos armados. (2022). *agresores a defensores del medio ambiente: la otra alerta roja en la region del catatumbo.* Obtenido de http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v22n2/0123-4226-rudca-22-02-e1368.pdf

Sanabria, J. S. (2016). *CNMH*. Obtenido de https://centrodememoriahistorica.gov.co/micrositios/recorridos-por-paisajes-de-la-violencia/bajo-catatumbo.html

Sánchez, H. (7 de 4 de 2016). *Ambiente y Sociedad*. Obtenido de http://www.ambienteysociedad.org.co/el-rio-catatumbo-agoniza-por-la-sequia-y-la-deforestacion

TYC GIS Formación. (2018). ¿Qué es Google Earth Engine? *CursosGIS.com pertenece al Grupo TYC GIS Formación*, 1. Obtenido de https://www.cursosgis.com/que-es-google-earth-engine/

UCH Universidad de ciencias y humanidades. (6 de 04 de 2018). *UCH Universidad de ciencias y humanidades*. Obtenido de https://blog.uch.edu.pe/ingenieria-electronica-con-mencion-en-telecomunicaciones/que-son-las-imagenes-satelitales/

Universidad de Maryland e Instituto de Recursos mu. (16 de 06 de 2025). *Global Forest Watch*. Obtenido de https://www.globalforestwatch.org/dashboards/global/

UNIVERSIDAD SERGIO ARBOLEDA. (2020). ¿QUÉ ES GEOMÁTICA Y PARA QUÉ SIRVE? *UNIVERSIDAD SERGIO ARBOLEDA*, 1. Obtenido de https://www.usergioarboleda.edu.co/noticias/que-es-geomatica-y-para-que-sirve/

VÉLEZ ZUAZO, A., & MORA, R. (2 de diciembre de 2020). *MONGABAY*. Obtenido de https://es.mongabay.com/2020/12/cultivos-ilegales-y-deforestacion-asfixian-al-parque-nacional-catatumbo-bari-en-colombia/

VerdadAbierta.com. (2017). *VerdadAbierta.com*. Obtenido de https://verdadabierta.com/el-catatumbo-de-espaldas-al-estado-y-de-cara-a-la-guerra/mapa-catatumbo/