



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

Estudio de los patrones de flujo hídrico entre el Complejo Cenagoso del Bajo Sinú y el Río Sinú, Colombia, mediante modelación hidrodinámica.

TESIS

Que para obtener el grado de:

Maestro en Tecnología y Gestión del Agua

Presenta:

Adrian Blancas Islas

Asesor:

Dr. Clemente Rodríguez Cuevas

Co-asesor:

Dr. Franklin Manuel Torres Bejarano.





19 de junio de 2025

**ING. ADRIÁN BLANCAS ISLAS
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dres. Clemente Rodríguez Cuevas y Franklin Manuel Torres Bejarano**, Asesor y Coasesor del Trabajo de Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Tecnología y Gestión del Agua**. Me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 19 de junio del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

"Estudio de los patrones de flujo hídrico entre el complejo cenagoso del Bajo Sinú y el Río Sinú, Colombia, mediante modelación hidrodinámica"

Introducción.

- I. La importancia de la regulación hídrica en los humedales.
 - II. Descripción del área de estudio.
 - III. Análisis hidrológico de la cuenca del complejo cenagoso del Bajo Sinú.
 - IV. La modelación numérica como herramienta para la determinación de la hidrodinámica en cuerpos de agua superficiales.
 - V. Campañas de medición para la obtención de parámetros hidrodinámicos.
 - VI. Modelación numérica del complejo cenagoso del Bajo Sinú.
- Conclusiones.**
Referencias.

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

ATENTAMENTE

DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN

www.uaslp.mx

Av. Manuel Álava 8
Zona Universitaria • CP 76200
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al 39
fax (444) 826 2336

Ccp. Archivo
-bvg

"1945-2025: 80 años formando profesionales de la Ingeniería en beneficio de la sociedad"



UASLP
Universidad Autónoma
de San Luis Potosí



FACULTAD DE
INGENIERÍA



CENTRO DE
**INVESTIGACIÓN
Y ESTUDIOS
DE POSGRADO**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
Área de Investigación y Estudios de Posgrado

DECLARACIÓN

El presente trabajo que lleva por título:

Estudio de los patrones de flujo hídrico entre el Complejo Cenagoso del Bajo Sinú y el Río Sinú,
Colombia, mediante modelación hidrodinámica.

se realizó en el periodo Febrero de 2024 a Febrero de 2026 bajo la dirección del Dr. Clemente Rodríguez Cuevas y Dr. Franklin Manuel Torres Bejarano.

Originalidad

Por este medio aseguro que he realizado el trabajo reportado, y la escritura de este documento de tesis. para fines académicos sin ayuda indebida de terceros y sin utilizar otros medios más que los indicados.

Las referencias e información tomadas directa o indirectamente de otras fuentes se han definido en el texto como tales y se ha dado el debido crédito a las mismas.

El autor exime a la UASLP de las opiniones vertidas en este trabajo escrito y asume la responsabilidad total del mismo.

Este trabajo no ha sido sometido como tesis o trabajo terminal a ninguna otra institución nacional o internacional en forma parcial o total, exceptuando el caso cuando existe un convenio específico de doble titulación celebrado entre ambas instituciones.

Se autoriza a la UASLP para que divulgue este documento para fines académicos.

El autor del trabajo escrito, Adrian Blancas Islas

-

Dedicatorias.

A mi prometida, Karen Adyadeth Sánchez Garcés,

por su amor, paciencia y apoyo constante durante cada etapa de este proceso. Gracias por acompañarme en los momentos de mayor exigencia, por escucharme cuando las dudas aparecían y por recordarme siempre que la constancia y el esfuerzo valen la pena. Este logro también es reflejo de tu compañía y confianza en mí. Gracias por ser mi mayor impulso y mi mayor tranquilidad al mismo tiempo.

A mi madre Nora Claudia Islas López,

por su apoyo emocional incansable y por sus palabras de aliento que nunca me permitieron dejar de creer en mí mismo. Tu confianza, tu fe y tu fortaleza han sido un pilar fundamental en mi formación personal y profesional.

A mi padre Juan Gabriel Blancas Hernández,

por su ejemplo, carácter, fortaleza y todo el apoyo que siempre me ha brindado. Gracias por impulsarme cada día a superarme, por exigirme crecer y por enseñarme que la disciplina y la determinación son la base para alcanzar cualquier meta.

Agradecimientos

A Dios, por concederme la fortaleza, la constancia y la sabiduría necesarias para culminar esta etapa de mi formación académica.

Expreso mi profundo agradecimiento a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo financiero otorgado a través de la beca de posgrado, el cual hizo posible la realización de esta investigación.

Agradezco de manera especial a mi asesor, el Dr. Clemente Rodríguez Cuevas, por su orientación académica, rigor científico y acompañamiento constante durante el desarrollo de este trabajo.

Extiendo mi reconocimiento a los miembros de mi comité evaluador, el Dr. Hermann Rocha Escalante y el Dr. Rodolfo Cisneros Almazán, por sus observaciones, comentarios críticos y recomendaciones, que contribuyeron significativamente a fortalecer la calidad y profundidad del estudio.

Mi sincero agradecimiento al Dr. Franklin Manuel Torres Bejarano, por recibirme en Colombia y brindarme las facilidades necesarias durante mi estancia académica, así como a su equipo de trabajo, al Ing. Gabriel, Ing. Javier, Ing. Junior e Ing. Cristina; por su apoyo técnico y colaboración en las actividades de campo. A la Universidad de Córdoba, por las facilidades académicas y el apoyo logístico otorgado durante mi visita.

A mis profesores de la maestría, por su formación académica y aportaciones durante el programa. Asimismo, agradezco a la Dra. María Guadalupe Galindo Mendoza y a su equipo de laboratorio, por su apoyo y capacitación en el análisis de información geoespacial.

Finalmente, a mis compañeras y compañeros de maestría, por el compañerismo constante; en especial a Sisley, quien siempre me brindó su apoyo y amistad.

Resumen

El presente estudio analiza la dinámica hídrica entre el río Sinú y el Complejo Cenagoso del Bajo Sinú, Colombia, mediante la implementación de un modelo hidrodinámico bidimensional en el software EFDC Explorer. Se caracterizaron los parámetros geomorfológicos e hidroclimáticos de la cuenca y se evaluó el intercambio hídrico a través del caño Aguas Prietas bajo distintos escenarios hidrológicos, incluyendo condiciones húmedas, secas y proyecciones de cambio climático.

El modelo fue calibrado y validado con información hidrométrica disponible, ajustando parámetros como la rugosidad de fondo y coeficientes de difusión horizontal. Los resultados evidencian un comportamiento bidireccional del flujo en la zona de conexión, controlado principalmente por las variaciones en el caudal del río Sinú. Se identificó un gradiente espacial de energía hidráulica que regula la intensidad y dirección del intercambio hídrico hacia las ciénagas internas, particularmente hacia Guartinaja.

Los escenarios extremos proyectados muestran una amplificación tanto de los pulsos de recarga como de los periodos de aislamiento hidráulico, lo cual podría afectar la estabilidad ecológica del sistema bajo condiciones futuras de variabilidad climática.

La modelación desarrollada constituye una herramienta técnica útil para comprender la conectividad hídrica del sistema y apoyar la toma de decisiones en la gestión del recurso hídrico regional.

Palabras clave: conectividad hídrica, modelación hidrodinámica, EFDC, río Sinú, humedales, cambio climático.

Abstract

This study analyzes the hydrodynamic interaction between the Sinú River and the Bajo Sinú Wetland Complex, Colombia, through the implementation of a two-dimensional hydrodynamic model using EFDC Explorer. Geomorphological and hydroclimatic parameters of the basin were characterized, and water exchange through Caño Aguas Prietas was evaluated under different hydrological scenarios, including wet, dry, and climate change projections.

The model was calibrated and validated using available hydrometric data, adjusting parameters such as bottom roughness and horizontal diffusion coefficients. Results demonstrate a bidirectional flow pattern in the connection zone, primarily controlled by variations in Sinú River discharge. A spatial hydraulic energy gradient was identified as the main regulator of flow intensity and direction toward the internal wetlands, particularly Guartinaja.

Extreme projected scenarios indicate an amplification of both recharge pulses and hydraulic isolation periods, potentially affecting the ecological stability of the system under future climate variability.

The developed hydrodynamic model represents a valuable technical tool for understanding hydrological connectivity and supporting regional water management decisions.

Keywords: hydrological connectivity, hydrodynamic modeling, EFDC, Sinú River, wetlands, climate change.

Índice General

Introducción	1
Justificación	2
Objetivos	5
Objetivo General	5
Objetivos específicos	6
Hipótesis y preguntas de investigación	6
I. La importancia de la regulación hídrica en los humedales	7
1.1 La regulación hídrica en ecosistemas de humedal	8
1.2 Funciones ecológicas e hidrológicas y su papel frente al cambio climático	10
1.3 Procesos de intercambio entre ríos y humedales	12
1.4 Importancia de comprender los procesos hidrodinámicos para su conservación y manejo.	16
1.5 Los humedales en el Caribe Colombiano	17
1.6 Relevancia científica y ambiental del estudio de la hidrodinámica en humedales tropicales.	19
Contribución a la comprensión de la hidrodinámica de humedales tropicales regulados.	19
II. Descripción del área de estudio	21
2.1 Antecedentes	21
2.1.1 Estudios previos sobre la dinámica hídrica del Bajo Sinú	22
2.2 Localización y extensión del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú	25
2.3 Características geológicas y fisiográficas de la cuenca.	27
2.4 Hidrografía de la cuenca	29
2.5 Clima y aspectos ambientales relevantes	31
2.6 Aspectos socioeconómicos del área	33
2.7 Marco institucional y de gestión del recurso hídrico en Colombia	34
III. Análisis hidrológico.	36
3.1 Recopilación y procesamiento de datos meteorológicos e hidrométricos.	36
3.1.1 Precipitación media anual y temperatura por el método de Polígonos de Thiessen	36
3.1.2 Climograma	41
3.2 Balance Hídrico del sistema	43
3.2.1 Localización y límites de la cuenca hidrográfica el complejo cenagoso	44

3.2.2 Características morfométricas de la cuenca	44
3.2.3 Análisis altitudinal y pendiente	62
3.2.4 Curva hipsométrica	63
3.2.5 Pendiente del cauce principal.....	64
3.2.6 Evapotranspiración real.	66
3.2.7 Método de Turc	66
3.2.8 Infiltración.....	68
3.3 Estimación de aportes superficiales	69
3.3.1 Relación precipitación-Escorrentamiento	69
3.3.2 Coeficiente de escorrentamiento (C).....	70
3.3.3 Avenida máxima probable (AMP)	78
3.4 Identificación de periodos hidrológicos característicos (lluvia-sequía).....	82
IV. La modelación numérica como herramienta para la determinación de la hidrodinámica en cuerpos de agua superficiales	87
4.1 Principios básicos de la modelación hidrodinámica 2D y 3D	87
4.2 Selección del modelo hidrodinámico.....	90
4.3 Diseño de malla conceptual y condiciones de frontera.....	92
4.4 Parámetros físicos e hidráulicos utilizados	97
4.6 Calibración del modelo y validación del modelo.	98
4.7 Análisis de sensibilidad.....	105
4.8 Escenarios de simulación.	107
V. Campañas de medición para la obtención de parámetros hidrodinámico.	110
5.1 Batimetría, medición de niveles, caudales y velocidades.	112
5.2 Recopilación de datos.	121
5.3 Procesamiento de información y análisis de incertidumbre.	122
VI. Modelación numérica del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú.	124
6.1 Comportamiento espacial y temporal de los niveles y velocidades.....	124
6.2 Intercambio de flujo entre el río Sinú y los cuerpos del complejo.	136
6.3 Efecto de las variaciones de caudal del río sobre los humedales.....	142
6.4 Implicaciones para la gestión de recurso hídrico.....	144

Conclusiones y recomendaciones.	147
Referencias bibliográficas.....	152

Índice de figuras

Figura 1.1 Clasificación de los tipos de humedales.....	7
Figura 1.2 Movimiento del agua en los sistemas fluviales.....	13
Figura 1.3 Tipos de conexiones hidrológicas entre humedales no asociados a planicies de inundación y arroyos o ríos.....	15
Figura 2.1 Mapa de ubicación del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú.....	25
Figura 2.2 Mapa de la división territorial correspondiente a cada municipio que conforma el Complejo Cenagoso del Bajo Sinú (CCBS).	26
Figura 2.3 Mapa de ubicación del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú	28
Figura 2.4 Precipitación promedio anual en la cuenca del río Sinú.....	32
Figura 3.1 Polígonos de Thiessen de las estaciones en la cuenca del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú.....	38
Figura 3.2 Climograma de la cuenca del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú para 1968-2023.....	42
Figura 3.3 Balance hídrico del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú (1968- 2023).....	43
Figura 3.4 Ubicación de la cuenca del río Sinú, la represa Urrá y el Complejo Cenagoso del Bajo Sinú..	45
Figura 3. 5 Diagrama para delimitación de una cuenca a partir de un DEM en ArcMap 10.8.....	46
Figura 3.6 Cuenca del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú.	48
Figura 3.7 Cauce principal de la cuenca del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú.....	50
Figura 3. 8 Orden de corrientes del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú.	58
Figura 3.9 Clasificación de la curva hipsométrica.....	63
Figura 3.10 Curva hipsométrica de la cuenca del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú.....	64
Figura 3. 11 Cobertura de Uso de Suelo de la cuenca del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú.	71

Figura 3.12 Edafología de la cuenca del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú.....	74
Figura 3.13 Imagen satelital Sentinel con NDWI aplicado sobre el Complejo Cenagoso del Bajo Sinú en abril del 2024..	83
Figura 3.14 Imagen satelital Sentinel con NDWI aplicado sobre el Complejo Cenagoso del Bajo Sinú en noviembre del 2024.....	83
Figura 3.15 Código en Google Earth Engine para obtener imágenes satelitales.	84
Figura 3.16 Imágenes obtenidas del Complejo Cenagoso del bajo Sinú con el filtro NDWI	85
Figura 3.17 Procesamiento de imagen satelital para cuantificar la superficie de agua del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú (secas).	85
Figura 3.18 Procesamiento de imagen satelital para cuantificar la superficie de agua del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú (lluvias).	86
Figura 4.1 Malla utilizada para el modelo.....	93
Figura 4.2 Configuración de nivel de fondo de la malla.....	95
Figura 4.3 Ubicación de fronteras de entrada y salida de flujo de agua.....	96
Figura 4.4 Nivel de fondo y nivel inicial de agua en el modelo.....	96
Figura 4.5 Gráfica de los resultados de calibración para caudales en el caño Aguas Prietas.....	101
Figura 4.7 Gráfica de los resultados de calibración para velocidades en el caño Aguas Prietas.....	102
Figura 4.8 Gráfica de los resultados de validación para caudales en el caño Aguas Prietas.....	103
Figura 4.9 Gráfica de los resultados de validación de dirección para en el caño Aguas Prietas.	104
Figura 4.10 Gráfica de los resultados de validación de velocidades para en el caño Aguas Prietas.	104
Figura 4.11 Las cinco vías socioeconómicas compartida	108
Figura 5.1 Ubicación estaciones de medición de la zona de estudio.....	111
Figura 5.2 Estaciones limnimétricas.....	115

Figura 5.3 Proceso de instalación de las estaciones limnimétricas.....	116
Figura 5.4 Estadal y Nivel Óptico South SOUTH NL-C32.....	117
Figura 5.5 Nivelación Topográfica con Sistema GPS. Equipo South GPS Satelital	117
Figura 5.6 Instrumentos de medición en campo.	118
Figura 5.7 Uso del ADCP y WinRiver.	119
Figura 5.8 Perfil de medición del ADCP en una sección del caño Aguas Prietas.	119
Figura 6.1 Ubicación de puntos de interés para comparación de datos hidrodinámicos.....	124
Figura 6.2 Gráfica de niveles punto a (conexión Sinú - Aguas Prietas). Escenarios de lluvias.....	126
Figura 6.3 Gráfica de niveles punto a (conexión Sinú - Aguas Prietas). Escenarios de secas.....	126
Figura 6.4 Gráfica de niveles punto b (hermano). Escenarios de lluvias.....	127
Figura 6.5 Gráfica de niveles punto b (hermano). Escenarios de secas.....	128
Figura 6.6 Gráfica de niveles punto C (Ciénaga de Guartinaja). Escenarios de lluvias.....	129
Figura 6.7 Gráfica de niveles punto c (Ciénaga de Guartinaja). Escenarios de secas.....	130
Figura 6.8 Gráfica de velocidades punto a (conexión). Escenarios de lluvias.....	131
Figura 6.9 Gráfica de velocidades punto a (conexión). Escenarios de secas.....	131
Figura 6.10 Gráfica de velocidades punto b (hermano). Escenarios de lluvias.....	132
Figura 6.11 Gráfica de velocidades punto b (hermano). Escenarios de secas.....	133
Figura 6.12 Gráfica de velocidades punto c (Ciénaga). Escenarios de secas.....	134
Figura 6.13 Gráfica de velocidades punto c (Ciénaga). Escenarios de lluvias.....	134
Figura 6.14 Gráfica de caudales punto a (conexión)... Escenarios de secas.....	136
Figura 6.15 Gráfica de caudales punto a (conexión). Escenarios de lluvias.....	137
Figura 6.16 Gráfica de dirección del flujo punto a (conexión). Escenarios de lluvias.....	138
Figura 6.17 Gráfica de dirección del flujo punto a (conexión). Escenarios de secas.....	139

Figura 6. 18 Gráfica de caudales punto b (hermano). Escenarios de lluvias.	140
Figura 6. 19 Gráfica de caudales punto b (hermano). Escenarios de secas.	140
Figura 6. 20 Gráfica de dirección del flujo punto b (hermano). Escenarios de lluvias.	141
Figura 6. 21 Gráfica de dirección de flujo punto b (hermano). Escenarios de secas.	142

Índice de tablas

Tabla 1.1 Clasificación de conexiones ríos y humedales.....	14
Tabla 2. 1 Población y superficie correspondiente al Complejo Cenagoso por municipio	27
Tabla 3.1 Precipitación y temperatura media anual en estaciones de la cuenca del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú (1968-2023).....	37
Tabla 3.2 Cálculo de la precipitación y temperatura media anual, método de Thiessen (1968–2023).....	39
Tabla 3.3 Precipitación y temperatura media anual.....	41
Tabla 3. 4 Clasificación tamaño de la cuenca.....	47
Tabla 3. 5 Clasificación de forma de cuenca.....	52
Tabla 3. 6 Clasificación de la cuenca de acuerdo factor forma.....	53
Tabla 3. 7 Clasificación de densidad de drenaje (Dd).....	56
Tabla 3.8 Parámetros morfológicos de la cuenca del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú.	61
Tabla 3. 9 Distribución del área de la cuenca por intervalos.	62
Tabla 3. 10 Cobertura de tipo de suelo por área en Km ² del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú.	72
Tabla 3. 11 Edafología por área en Km ² del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú.	73
Tabla 3. 12 Coeficientes de escurrimiento según tipo de cobertura o uso de suelo.....	75

Tabla 3. 13 Coeficiente C por grupo de cobertura de suelo.....	76
Tabla 3. 14 Valores obtenidos para coeficiente de escurrimiento según cobertura de suelo.	77
Tabla 3. 15 Valores obtenidos de avenida máxima probable	81
Tabla 3. 16 Superficie de inundación del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú	86
Tabla 4. 1 Características de la malla creada para el modelo en GRID +.....	94
Tabla 4. 2 Clasificación del desempeño del modelo según los valores del NSE.....	100
Tabla 4. 3 Resultados de la calibración del modelo para velocidad, flujo y dirección.	101
Tabla 4. 4 Resultados de validación.....	103
Tabla 4. 5 Escenarios de simulación.	109
Tabla 5. 1 Instrumentos de medición.....	114
Tabla 6. 1 Coordenadas de los puntos de interés.....	125

Introducción

Los humedales son ecosistemas de gran importancia por sus funciones ecológicas y su capacidad de amortiguación frente a inundaciones. Además, son una fuente de agua dulce, albergan una gran biodiversidad de especies de flora y fauna, permiten el almacenamiento de carbono y aportan un gran valor económico, cultural y recreativo para las comunidades alrededor. (McInnes *et al.*, 2017). En este contexto, su gestión y el manejo adecuado de estos ecosistemas se ha convertido en una prioridad a nivel global. Desde un enfoque ecológico, se puede definir un humedal como áreas donde el nivel freático se sitúa cerca de la superficie terrestre o bien el suelo permanece saturado o cubierto de agua poca profunda durante largos periodos, de forma estacional o permanente (Mitsch & Gosselink, 2015).

Los humedales, aun siendo vitales para la humanidad, se enfrentan una degradación acelerada a nivel mundial con consecuencias importantes. Algunas causas principales de esta pérdida es el cambio en el uso de suelo por la expansión agrícola y el desarrollo urbano, lo que conlleva a la destrucción de hábitats naturales (Corrales-Chaves L., 2025). A esto se le pueden sumar otros factores como la contaminación por descarga de aguas residuales, el desvío de agua dulce para cultivos, la intensificación de cultivos, la conversión de cuerpos de agua para acuicultura, la extracción de madera y el cambio climático que agrava la vulnerabilidad de estos ecosistemas, trayendo como consecuencia la fragmentación de los cuerpos de agua, y perdiendo así la conectividad hidráulica de estos sistemas, afectando el flujo de especies y nutrientes. (Corrales-Chaves L., 2025).

En regiones tropicales, muchos humedales se desarrollan en asociación directa con ríos de planicie aluvial, conformando sistemas altamente dinámicos en los que la conectividad hidrológica entre el cauce principal y los cuerpos de agua adyacentes resulta fundamental. A través de caños, brazos secundarios y zonas inundables, se establece un intercambio estacional de agua, sedimentos y nutrientes que controla los niveles de inundación, el almacenamiento temporal del agua y la renovación hídrica de las ciénagas.

Estos sistemas río–humedal funcionan como unidades integradas, cuya dinámica depende tanto del régimen hidrológico natural como de las condiciones geomorfológicas de la planicie aluvial (Junk et al., 1989; Mitsch & Gosselink, 2015; Tockner et al., 2000).

En este contexto, el Complejo Cenagoso del Bajo Sinú se localiza en la cuenca baja del Río Sinú, en el departamento de Córdoba, Colombia, y constituye uno de los sistemas de humedales más extensos e importantes de la región Caribe colombiana. Este complejo está conformado por un conjunto interconectado de ciénagas, caños y zonas inundables, cuya dinámica hidrológica depende en gran medida de las variaciones estacionales del caudal del río Sinú y de los procesos de intercambio hídrico que se establecen a través de su planicie aluvial. Además de su relevancia ecológica, el complejo desempeña un papel fundamental en el sostenimiento de actividades productivas como la pesca y la agricultura, así como en la regulación de inundaciones y el mantenimiento de la biodiversidad regional, lo que lo convierte en un sistema estratégico desde el punto de vista ambiental, social y económico (Aguilera-Díaz, 2011; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019a).

Si bien se han realizado estudios para entender la variabilidad del nivel del agua del Complejo Cenagoso, existe una falta de conocimiento científico sobre los mecanismos e intercambio hídrico entre el Río Sinú y las ciénagas, así como la respuesta del sistema ante condiciones hidrológicas extremas. Así mismo, se carece de información cuantitativa e integradora que identifique los procesos físicos que controlan la dinámica del flujo superficial.

Justificación

Ante el desafío que implica una gestión apropiada de recursos hídricos, es indispensable tener conocimiento del comportamiento de los cuerpos de agua clave para la salud del medio ambiente y para el desarrollo de las actividades humanas. Los modelos hidrodinámicos permiten comprender el comportamiento de sistemas de agua complejos, posicionándolos como una herramienta indispensable en

la gestión de recursos hídricos para garantizar cuidado al medio ambiente y desarrollo económico de una región (Torres-Bejarano *et al.*, 2016).

Los humedales han sido muy relevantes por su valor ecológico, económico y social, su aporte como regulador de picos de corrientes de agua, su riqueza en vegetación y condiciones de hábitat a diferentes especies, y las tierras que aporta para ganadería y agricultura. En este caso, la Ciénaga Grande de Lorica desempeña un papel fundamental como amortiguador de las aguas de lluvias presentadas cuando el Río Sinú se ve sobrepasado, además de las funciones socioeconómicas que brinda a las comunidades asentadas a su alrededor y por último por su importancia ecológica para el medio ambiente (Salazar-Mejía, 2011).

El Complejo Cenagoso del Bajo Sinú en Colombia, representa un ecosistema sumamente importante a nivel ecológico como socioeconómico por la diversidad de flora y fauna que alberga dentro su área. Sin embargo, al estar compuesto de diversos cuerpos de agua como ciénagas, y pantanos interconectados a través de canales naturales, representa una complejidad comprender el funcionamiento hidrodinámico y gestionar de forma efectiva sus recursos. Además, la interconexión existente entre el río Sinú y el complejo cenagoso, a través del caño aguas prietas, da lugar a un fenómeno peculiar de un flujo hídrico bidireccional, que varía en multitud de factores climáticos y antropogénicos.

Además, el complejo enfrenta una serie de problemáticas ambientales y de gestión del agua, en las últimas tres décadas, la cuenca baja del río Sinú, ha sido afectada por la expansión agropecuaria, el crecimiento urbano no planificado, la deforestación y la construcción de canales artificiales. Particularmente, obras de infraestructura de gran escala como la represa Urrá I, han modificado la dinámica hídrica del sistema, cambiando patrones de esorrentía y desconexión en cuerpos de agua (Aguilera-Díaz, 2011). Estas alteraciones han causado cambios en la conectividad entre los caños y

ciénagas, interrumpiendo los ciclos naturales de inundación y afectando la biodiversidad, la pesca y la productividad agrícola de la zona.

A partir del 25 de octubre del 2007, se declaró al Complejo Cenagoso del Bajo Sinú como un Distrito de Manejo Integrado de los Recursos Naturales Renovables (DMI), por parte de la Corporación Autónoma del Valle del Sinú y San Jorge. Los DMI, se definen como un espacio geográfico donde los paisajes y ecosistemas mantienen su función y composición, aunque hayan sufrido modificaciones en su estructura y cuyos valores naturales y culturales se ponen al alcance de una población para destinarlos a un uso sostenible, preservación, restauración y disfrute. (CVS, 2016b).

En la actualidad, la ausencia de un modelo que simule con precisión la dinámica del flujo de agua en el Complejo Cenagoso del Bajo Sinú representa una carencia significativa de información. Esta falta de herramientas, dificulta la implementación de estrategias efectivas para una gestión óptima del agua en la cuenca. Dada la creciente preocupación ante los desafíos asociados a la escasez y la degradación de la calidad de agua, es necesario hacer un esfuerzo para abordar los temas relacionados con el manejo del recurso hídrico.

La implementación de un modelo hidrodinámico permite conocer y analizar los patrones de flujo hídrico en el humedal en respuesta a diversas condiciones ambientales, antropogénica y climatológicas. Desarrollar un modelo hidrodinámico que reproduzca la complejidad del flujo hídrico en el Caño Aguas Prietas, proporcionará información valiosa para la toma de decisiones en la gestión y conservación del ecosistema.

La comprensión de los procesos hidrodinámicos en humedales tropicales regulados aporta información esencial para evaluar los efectos de la intervención humana y orientar estrategias de manejo sostenible. Este estudio ofrece herramientas que contribuyen a la gestión integrada de los recursos hídricos

en regiones donde los ecosistemas acuáticos cumplen funciones clave en la regulación hídrica y la provisión de servicios ecosistémicos. La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH), promueve la planificación y administración del agua considerando sus dimensiones sociales, económicas y ambientales, bajo principios de participación y sostenibilidad (Agarwal *et al.*, 2000).

En este marco, el estudio de los procesos hidrodinámicos, aporta a la implementación de GIRH en regiones con alta dependencia ecológica y económica de los humedales, al proporcionar una base científica que respalda la formulación de estrategias de manejo basadas en evidencia. La modelación hidrodinámica ofrece información cuantitativa sobre los flujos de agua, los intercambios entre cuerpos interconectados y las variaciones del nivel superficial durante eventos extremos, elementos fundamentales para la planificación de medidas de adaptación frente a inundaciones o sequías.

Este tipo de análisis es relevante por que posee un alto potencial de aplicación en la planificación y gestión ambiental a escala local y regional. La información obtenida sobre los patrones de flujo, los niveles de agua y la conectividad entre las ciénagas y ríos puede servir como insumo técnico para la formulación de Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA) y para el diseño de programas de restauración hídrica promovidas por la Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge (CVS).

Objetivos

Objetivo General

Evaluar mediante modelación hidrodinámica, los patrones de flujo hídrico entre el río Sinú y el Complejo Cenagoso del Bajo Sinú, a través del caño Aguas Prietas, con el fin de generar insumos técnicos para la gestión sostenible del recurso hídrico.

Objetivos específicos

- Caracterizar los parámetros geomorfológicos e hidro climáticos de la cuenca del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú.
- Estimar un balance hídrico para comprender el intercambio de agua entre el río Sinú y el Complejo Cenagoso del Bajo Sinú.
- Implementar un modelo hidrodinámico que represente los patrones de flujo entre el río Sinú y el Complejo Cenagoso del Bajo Sinú, utilizando el software EFDC Explorer.
- Evaluar la dinámica hídrica del modelo bajo escenarios climáticos extremos, analizando los patrones de flujo, la distribución del agua y las zonas inundables.

Hipótesis y preguntas de investigación

La conectividad hídrica entre el río Sinú y el Complejo Cenagoso del Bajo Sinú está controlada principalmente por las variaciones del caudal del río, generando un patrón bidireccional de flujo cuya magnitud y extensión espacial dependen de los escenarios hidro climáticos.

Preguntas de investigación

1. ¿Como varían los patrones de flujo hídrico entre el río Sinú y el Complejo Cenagoso del Bajo Sinú?
2. ¿Cómo influye el caudal del río Sinú en la conectividad del Complejo Cenagoso?
3. ¿Qué escenarios extremos generan mayor afectación en la distribución del agua?

1. La importancia de la regulación hídrica en los humedales

Según la Convención Ramsar (1971, actualizado 2021), se entiende por humedal “extensiones de marismas, pantanos y turberas o superficies de agua cubiertas de agua, de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o salinas, incluyendo extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda los seis metros”.

La clasificación de los humedales dependerá de diversos factores como su origen, régimen hidrológico, salinidad y vegetación dominante. En este contexto, la Convención de Ramsar (2016) agrupa los humedales en 6 categorías: palustres, marinos, artificiales, ribereños, estuarinos y lacustres; algunos ejemplos se pueden ver en la figura 1.1. Esta enorme diversidad refleja la amplitud de las funciones que desempeñan estos cuerpos de agua, además de su adaptabilidad a distintas condiciones climáticas (Mitsch & Gosselink, 2015).

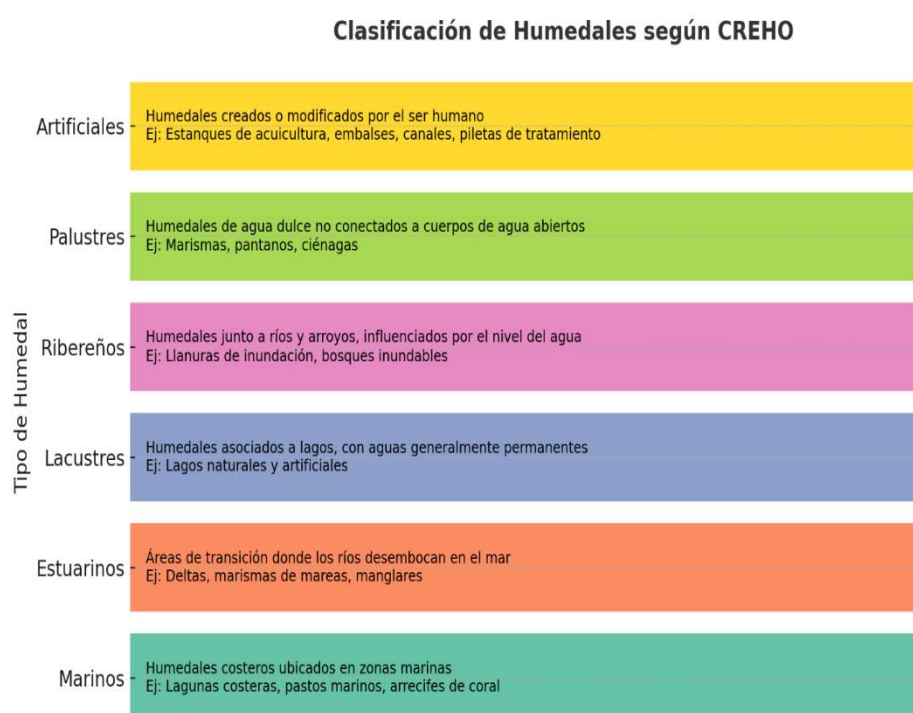


Figura 1. 1 Clasificación de los tipos de humedales según el Manual #1 del Curso de Inducción sobre Humedales. Adaptado de CREHO (2010).

Los humedales funcionan como reguladores del flujo de agua, actuando como esponjas que amortiguan inundaciones y sequías; además, filtran contaminantes, permiten la recarga de acuíferos subterráneos y almacenan carbono (Millennium Ecosystem Assessment (MEA, 2005). Estas características, los convierten en ecosistemas estratégicos para el equilibrio ambiental, además, les permite albergar una amplia biodiversidad de especies endémicas como migratorias. (Mitsch & Gosselink, 2015). Adicionalmente, sustentan actividades humanas como la pesca, la agricultura, abastecimiento de agua y turismo ecológico.

1.1 La regulación hídrica en ecosistemas de humedal

Los humedales actúan como amortiguadores naturales frente a eventos extremos al regular el caudal de un río durante el periodo de lluvias y al retener agua durante los periodos de secas. (MEA, 2005). Para su buen funcionamiento es fundamental mantener una regulación hídrica apropiada, esto implica el equilibrio hidrológico de los procesos de entrada, almacenamiento y salida del agua en estos ecosistemas, ya que esto determina la capacidad del humedal para cumplir con sus funciones como la retención de sedimentos, purificación del agua y la recarga de los mantos freáticos (Mitsch & Gosselink, 2015). Por lo tanto, la dinámica hídrica es uno de los factores más determinantes para su funcionamiento ecológico y su estabilidad a largo plazo.

La dinámica del agua en los humedales regula procesos ecológicos fundamentales y termina su estructura física. Esta permite mantener la conectividad entre los cuerpos de agua que componen al sistema, el transporte de sedimentos y las condiciones óptimas la regeneración natural de la vegetación. Para otras especies la alternancia de zonas inundadas y secas es esencial para completar sus ciclos biológicos. Cualquier alteración en la dinámica hídrica de un humedal desestabilizaría los procesos de regulación interna, teniendo consecuencias profundas sobre su integridad ecológica. (Wolfgang *et al.*, 2013; Mitsch & Gosselink, 2015).

Una regulación deficiente, ya sea por un exceso de control o por abandono, interrumpe los procesos que sustentan la biodiversidad, productividad y la conectividad hidrológica, provocando pérdida de hábitats para especies acuáticas y terrestres, la reducción de la cobertura vegetal adaptada a ciclos de inundación, y la proliferación de especies invasoras.(Davidson, 2014). Con una regulación deficiente, los humedales, también pierden su capacidad de amortiguar eventos extremos al no tener la capacidad de retener agua eficientemente, aumenta el riesgo de sequías en periodos de secas y de inundaciones en época de lluvias (MEA, 2005).

Actualmente los humedales se enfrentan a múltiples amenazas que comprometen su dinámica hídrica y los servicios ecosistémicos que proporcionan. Algunas de las principales amenazas a las que se enfrentan son la conversión de tierras para agricultura y urbanización, la contaminación por actividades agrícolas y la construcción de infraestructura que altera los regímenes hidrológicos naturales(MEA, 2005). Además, el cambio climático intensifica el impacto de estos problemas, provocando variaciones de precipitación y temperatura, así como la frecuencia de eventos extremos como sequías e inundaciones. Según estimaciones globales, se han perdido alrededor del 64% de humedales desde 1900, principalmente por actividades humanas (Davidson, 2014).

Las intervenciones antrópicas en humedales tales como represas, canales de drenaje, carreteras, entre otras obras de ingeniería, fragmentan el ecosistema y la conectividad hidrológica natural del sistema, alterando el flujo de agua superficial y subterráneas, convirtiéndose en una de las principales causas de degradación de humedales en el mundo (Junk *et al.*, 2013). Estas intervenciones provocan cambios en los patrones de inundación, alteración en la salinidad de suelo y agua, además de la pérdida de hábitats para especies endémicas. Lo anterior empeora si, se le suma la contaminación proveniente de la agricultura y la descarga de aguas residuales sin tratamiento previo, lo que provoca eutrofización, pérdida de oxígeno disuelto y aumenta la mortalidad de organismo acuáticos.(Adhya & Banerjee, 2022; Xu *et al.*, 2019).

Las alteraciones antrópicas, la contaminación y el cambio climático han acelerado la degradación de los humedales en diversas partes del mundo, afectando la biodiversidad y la capacidad de estos ecosistemas para brindar servicios a las comunidades humanas. Desde mediados del siglo XX, esto generó la preocupación de diversas naciones, que, frente a este panorama, determinaron crear marcos institucionales y legales con el objetivo de proteger y restaurar los humedales. La Convención de Ramsar, sirvió para establecer políticas ambientales a cada país para promover el uso racional y garantizar su conservación. Particularmente Colombia, cuenta con importantes humedales continentales y costeros, para los que se han implementado estrategias de gestión que buscan un equilibrio en la conservación ecológica con las necesidades sociales y productivas.

1.2 Funciones ecológicas e hidrológicas y su papel frente al cambio climático.

Las funciones ecosistémicas son los procesos y mecanismos mediante los distintos componentes bióticos y abióticos de un ecosistema interactúan entre sí, sosteniendo su organización estructural, dinámica y capacidad de autorregulación (Monterroso–Rivas *et al.*, 2009; Westman, 1977).

Una función ecosistémica puede entenderse como la manera en que distintos componentes de un ecosistema actúan y se relacionan entre sí, trazando procesos que mantienen su dinámica y funcionamiento. Tales funciones incluyen procesos demográficos ecológicos, genéticos y alteraciones que inciden en el medio. Muchas de estas funciones han sido reconocidas como servicios ambientales (Westman, 1977).

En este contexto, los humedales y sus funciones, destacan como uno de los ecosistemas terrestres con mayor relevancia hidrológica y ecológica a nivel mundial, por su gran capacidad de albergar carbono. Desde el punto de vista hidrológico, los humedales actúan como reguladores naturales del ciclo del agua, amortiguando grandes volúmenes de agua durante inundaciones durante periodos húmedos, estabilizando caudales superficiales y contribuyendo a la recarga de los acuíferos (Secretaría

de la Convención Ramsar, 2016). Esta característica permite reducir los daños en zonas pobladas aguas abajo y atenuando los efectos de crecidas extremas. Por otro lado, durante los periodos de sequias, son los humedales donde se puede encontrar una fuente de agua almacenada manteniendo la humedad del entorno y garantizar la disponibilidad hídrica para los ecosistemas y comunidades locales (UNESCO, 2020).

Desde el punto de vista ecológico, son destacados reservorios de biodiversidad, ya que son el hábitat de reproducción, alimentación y refugio para numerosas las especies de flora y fauna (Secretaría de la Convención Ramsar, 2016). Su heterogeneidad les permite sostener complejas cadenas tróficas, mantener el equilibrio ecológico y favorecer la diversidad genética de las especies. Además, estos ecosistemas son fundamentales para la conectividad ecológica, actuando como corredores ecológicos que facilitan el desplazamiento y migración de especies, especialmente de aves acuáticas (Secretaría de la Convención Ramsar, 2016).

Otra función esencial de los humedales es su papel en la regulación del clima, ya que almacenan carbono en cantidades muy superiores a otros ecosistemas terrestres, incluso duplicando la capacidad de almacenamiento que ofrecen los bosques (UNESCO, 2020). Los humedales, tienen esta capacidad por la presencia de los suelos anegados y con baja descomposición, lo que facilita la acumulación de materia orgánica durante largos periodos de tiempo, funcionando como sumideros de carbono. De esta forma, capturan dióxido de carbono de la atmósfera y mantenerlo en forma de carbono secuestrado, contribuyendo a la mitigación del cambio climático. Sin embargo, cuando estos entornos son alterados, el carbono se libera a la atmósfera, aumentando la emisión de gases de efecto invernadero (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

Asimismo, los humedales actúan como filtros biogeoquímicos que retienen sedimentos, nutrientes y contaminantes, mejorando la calidad del agua que fluye hacia ríos, algos y acuíferos aguas abajo

(UNESCO, 2020). Todas las funciones mencionadas anteriormente convierten a los humedales en ecosistemas de alto valor ambiental y aliados estratégicos frente al cambio climático. Por ello su conservación y manejo son esenciales para asegurar los beneficios que proporcionan a la naturaleza como a las comunidades humanas en su entorno.

1.3 Procesos de intercambio entre ríos y humedales

Los ríos y humedales son elementos interdependientes dentro de un continuo grupo hidrológico que permite el movimiento del agua, energía, sedimentos y nutrientes entre distintos ecosistemas acuáticos (Leibowitz *et al.*, 2018; Woessner, 2020). La interacción entre ambos sistemas ocurre a través de procesos de intercambio de flujos de agua superficial y subterránea, los cuales dependen de factores hidrológicos, geomorfológicos, y climáticos, esenciales para la estabilidad ecológica y funcional de los humedales. De acuerdo Leibowitz (Leibowitz *et al.*, 2018), estos intercambios hidrológicos permiten que los humedales actúen como reguladores naturales del ciclo del agua, modulando los flujos superficiales, almacenando agua durante periodos húmedos y liberándola gradualmente en épocas secas. Woessner (2020) destaca que la conexión río-humedal, posibilita la recarga y descarga de acuíferos, así como el transporte de nutrientes y materia orgánica.

Desde una perspectiva superficial, los humedales pueden conectarse a los ríos mediante canales, caños o escurrimientos, permitiendo el transporte directo de agua, sedimentos, materia orgánica y organismos acuáticos (Leibowitz *et al.*, 2018). Sin embargo, gran parte de estas interacciones ocurren subterráneamente y están controladas por diferencias en los niveles freáticos entre el humedal, el río y el acuífero lo que determina si el flujo es influente (cuando el río descarga hacia el humedal), el efluente (cuando el humedal aporta agua al río) o bidireccional, cuando las condiciones cambian estacionalmente o incluso diariamente, se pueden visualizar con mayor claridad en la figura 1.2 (Woessner, 2020).

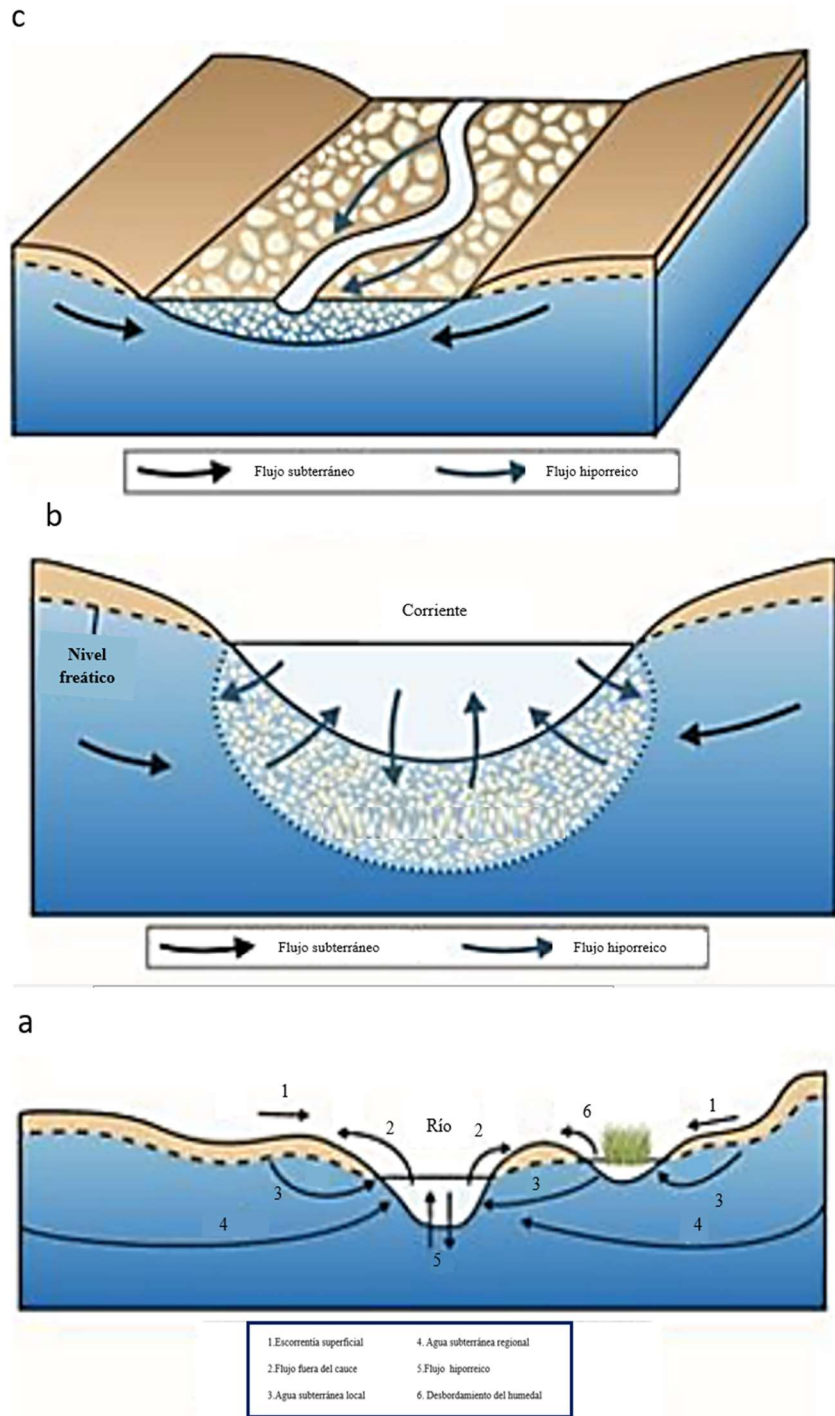


Figura 1.3 Movimiento del agua en los sistemas fluviales. (a) Rutas hidrológicas comunes por las cuales el agua fluye entre cuencas y ríos. (b) Representación lateral del proceso del flujo hiporreico desde un río hacia los aluviones y luego de regreso (c) vista longitudinal. Fuente U.S EPA 2015, modificado y traducido de (Winter (1998)).

En esta dinámica, la zona hiporreica desempeña un papel clave como espacio de transición dentro el agua superficial del río y el agua subterránea, permitiendo el intercambio de nutrientes, oxígeno, sólidos finos y microorganismos, además de actuar como corredor ecológico y regulador térmico (Leibowitz *et al.*, 2018; Woessner, 2020). La conexión hidrológica entre un río y un humedal puede establecerse a través de vías superficiales, subterráneas o mixtas, y su intensidad puede variar según las condiciones del relieve, el clima, el tipo de suelo y el régimen hidrológico. De acuerdo con la clasificación propuesta por (Leibowitz *et al.*, 2018), es posible distinguir 4 tipos de conectividad como se aprecia en la figura 1.3 y se resumen en la tabla 1.1.

Tabla 1.1 Clasificación de conexiones ríos y humedales

Clasificación de conexión	Descripción
Conexión superficial directa	El agua del río se comunica con el humedal mediante un canal, caño o escurrimiento visible.
Conexión subterránea por flujo hiporreico o lateral	El humedal recibe o aporta agua por vías subterráneas sin una conexión superficial.
Conexión mixta o intermitente	Combina flujos subterráneos y superficiales, activándose según temporada de secas o lluvias.
Geográficamente aislados	No presentan conexión superficial ni subterránea.

Nota. Adaptado de (Leibowitz *et al.*, 2018).

Los intercambios hidrológicos entre ríos y humedales no solo permiten la transferencia de agua, sino también de nutrientes, sedimentos finos, materia orgánica y organismos acuáticos, promoviendo la productividad ecológica y diversidad biológica en ambos sistemas (Leibowitz *et al.*, 2018). Estas conexiones favorecen la formación de hábitats transicionales como la zona hiporreica, donde se desarrollan procesos biogeoquímicos que regulan la calidad de agua y sostienen comunidades de macroinvertebrados, peces y microorganismos (Woessner, 2020).

Debido a esta conectividad, los humedales funcionan como áreas de almacenamiento temporal de agua y como zonas de refugio hidrológico durante periodos de sequía o caudales extremos (Leibowitz *et al.*, 2018). En este sentido, la comprensión de las funciones ecológicas derivadas de los procesos de intercambio río-humedal resulta fundamental para su manejo, conservación, y representación en modelos hidrodinámicos y gestión hídrica.

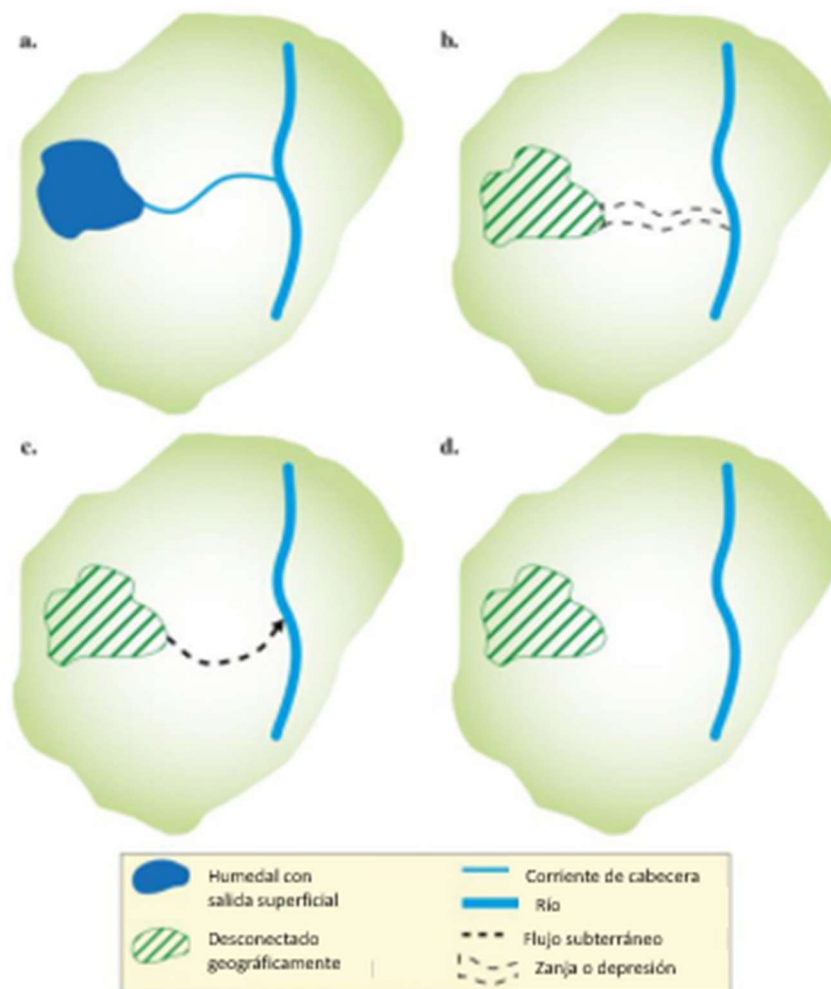


Figura 1.6 Tipos de conexiones hidrológicas entre humedales no asociados a planicies de inundación y arroyos o ríos. (a) Un humedal conectado a un río a través de un cauce de un arroyo. (b) Un humedal conectado a un río por flujo superficial a través de un canal no encauzado. (c) Un humedal geográficamente aislado conectado a un río por flujo subterráneo. (d) Un humedal geográficamente aislado que se encuentra hidrológicamente aislado de un río

1.4 Importancia de comprender los procesos hidrodinámicos para su conservación y manejo.

Frente al deterioro progresivo de los humedales en todo el mundo, se ha impulsado el desarrollo de herramientas para entender el funcionamiento de estos sistemas y evaluar escenarios con situaciones adversas que apoyen a la gestión del recurso hídrico. Un recurso valioso en la resolución de problemas hídricos para la comprensión de los sistemas de agua es la modelación hidrodinámica mediante software, que permite representar las características y el funcionamiento de un humedal. Esta herramienta permite obtener conocimientos cuantitativos puntuales para predecir flujos de agua, variaciones del caudal, elevación de superficie, presión, concentración de contaminantes, para flujos estacionarios, así como como no estacionarios (Torres-Bejarano *et al.*, 2016).

Su aplicación resulta útil para la toma de decisiones orientadas a la gestión integral del recurso hídrico en ecosistemas tan complejos como el del Bajo Sinú. Gracias a estas simulaciones, las organizaciones gestoras del agua tienen la oportunidad de explorar de forma prospectiva las consecuencias de diferentes acciones y tomar decisiones informadas. La aplicación de la modelación hidrodinámica no solo se manifiesta en las etapas de planificación, donde se asegura que el uso del agua considere las necesidades del humedal; sino también, para temas de restauración ecológica donde se puede evaluar acciones como la reconexión de cauces naturales; en el manejo adaptativo y en el ajuste de estrategias según el monitoreo de las respuestas hidrológicas para la definición de caudales ecológicos.

Los humedales son sistemas complejos de agua que ocasionan una alta incertidumbre en la comprensión de su funcionamiento, por ello, la modelación numérica permite estudiar y prever el comportamiento del sistema bajo diversos escenarios (Ramsar, 2021). Los diversos modelos computacionales que han sido desarrollados en los últimos años, han permitido comprender mejor los procesos físicos químicos y biológicos de los cuerpos de agua superficiales, y así lograr una mejor gestión y planificación de los recursos hídricos que estos ofrecen (Munar-Samboní & Méndez-Pedroza, 2021).

Comprender los procesos hidrodinámicos en humedales tropicales, resulta fundamental para su conservación y manejo sostenible, ya que estos sistemas dependen del régimen del agua para mantener su estructura, su función ecológica y sus servicios ecosistémicos. La conectividad hídrica entre ríos, caños y ciénagas regula la frecuencia, duración y extensión de las inundaciones, procesos que determinan la distribución de los hábitats, la recarga de acuíferos, y la dinámica de nutrientes. La alteración de estos patrones ya sea por infraestructura, cambio climático o presiones humanas, pueden desconectar sectores de un humedal acelerando proceso de transformación de su comportamiento hidrológico. Por ello, la modelación hidrodinámica ofrece información valiosa para anticipar los efectos negativos de eventos extremos, tomar decisiones fundamentadas para la restauración hidrológica, la planificación territorial y el diseño de estrategias efectivas de gestión del agua.

1.5 Los humedales en el Caribe Colombiano

Los humedales desempeñan un papel fundamental para la biodiversidad de Colombia como para las comunidades humanas que dependen de ellos, en tal grado que, se estima que aproximadamente 26% del territorio nacional presenta condiciones de humedal, lo cual lo posiciona como uno de los más diversos en ecosistemas acuáticos de América Latina. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019a). El país se adhirió a la Convención Ramsar en 1998 y desde esa fecha ha declarado 11 sitios que abarcan alrededor de 936,442 de hectáreas de humedales.(Ramsar Convención Secretaria, 2025).

La región Caribe Colombiana, alberga una importante diversidad de humedales distribuidos en zonas costeras, planicies, aluviales y deltas fluviales, lo que la convierte en una de las áreas de mayor valor ecológico del país. El funcionamiento de estos sistemas es clave para la regulación del ciclo hidrológico, la conservación de biodiversidad y el sustento para aquellas comunidades que dependen de la pesca, la agricultura y el ecoturismo (Invemar, 2020). Algunos de los humedales más representativos de la zona

son la Ciénaga Grande de Santa Marta, el Complejo Cenagoso de Ayapel, la Ciénaga de Mallorquín, los sistemas asociados al río Magdalena y al río Sinú. Estos humedales enfrentan crecientes presiones por uso cambios en el uso de suelo, canalización de canos, construcción de carreteras y puentes, así como de alteraciones en el régimen hídrico, generando una degradación ambiental en ellos (González-Trujillo *et al.*, 2021).

En la región Caribe de Colombia, los humedales presentan características particulares y una terminología que refleja la interacción de las comunidades con estos entornos. El término “ciénaga”, se refiere a cuerpos de agua estancada o de flujo lento, ricos en sedimentos y vegetación, que sirven como hábitats para especies acuáticas y como proveedoras de recursos para las comunidades a su entorno, generalmente utilizados para zonas de cultivos en épocas de secas y amortiguadores hídricos en épocas de lluvia. (Aguilera-Díaz, 2011; Salazar-Mejía, 2011).

En este caso particular, se estudia el Complejo Cenagoso del Bajo Sinú, un humedal ubicado en el Caribe Colombiano, que desempeña un papel fundamental en la regulación hídrica, biodiversidad y sustento de las comunidades rurales del departamento de Córdoba. La dinámica hidrológica del sistema depende del caudal del río Sinú en gran medida, el cual, es regulado aguas arriba por la represa de URRÁ I. Esta regulación del caudal ha alterado los patrones naturales de flujo, afectando el conjunto de ciénagas aguas abajo, modificando los ciclos de inundación y la conectividad entre caños y ciénagas, lo que además interrumpe procesos ecológicos esenciales como la reproducción de peces, transporte de sedimentos, y la renovación de nutrientes (CVS, 2016b; Salazar-Mejía, 2011).

1.6 Relevancia científica y ambiental del estudio de la hidrodinámica en humedales tropicales.

Contribución a la comprensión de la hidrodinámica de humedales tropicales regulados.

Las ciénagas son humedales tropicales complejos y poco profundos, localizados principalmente en zonas de bajo relieve dentro de planicies aluviales o áreas costeras, y se caracterizan por su conexión hidráulica mediante caños o canales naturales. En estos sistemas, el flujo de agua puede presentarse de forma bidireccional y con distintos grados de conectividad, ya sea permanente o temporal, en función de las condiciones hidrológicas y geomorfológicas del entorno (Montoya & Aguirre, 2009; Triviño & Escobar-Vargas, 2018). Debido a estas características, las ciénagas constituyen ecosistemas altamente dinámicos, cuya estructura y funcionamiento están estrechamente vinculados a los procesos hidrodinámicos que regulan el intercambio de agua, sedimentos y nutrientes.

A pesar de su importancia ecológica y funcional, el conocimiento científico sobre la relación entre la hidrodinámica y los procesos físicos que gobiernan el comportamiento de las ciénagas tropicales sigue siendo limitado. En particular, existe una escasa caracterización de los patrones de flujo, la dirección e intensidad de los intercambios hidráulicos y la forma en que estos procesos responden a modificaciones inducidas por actividades antrópicas, como la regulación hidráulica, los cambios en el uso del suelo y la construcción de infraestructura (Triviño & Escobar-Vargas, 2018).

La creciente presión ejercida sobre estos ecosistemas por la expansión agrícola, el desarrollo urbano y la implementación de obras hidráulicas ha generado alteraciones significativas en sus regímenes naturales de flujo. Estas modificaciones pueden afectar la frecuencia, duración y extensión de los periodos de inundación, reduciendo la capacidad de los humedales para cumplir funciones ecológicas clave, como la regulación hídrica, la amortiguación de eventos extremos y el mantenimiento de la biodiversidad (Aguilera-Díaz, 2011; Salazar-Mejía, 2011).

En este contexto, el análisis de la hidrodinámica en humedales tropicales regulados representa una contribución relevante al conocimiento científico, al permitir integrar herramientas de modelación numérica con información hidrométrica para comprender de manera más precisa los procesos físicos que controlan el movimiento del agua en sistemas interconectados. La caracterización del flujo bidireccional entre ríos y cuerpos lagunares, así como de sus variaciones espacio-temporales, constituye un avance significativo para la ciencia aplicada a los humedales tropicales.

Desde una perspectiva ambiental, el entendimiento de estos procesos hidrodinámicos proporciona una base conceptual y técnica fundamental para la planificación ambiental, la conservación y la gestión sostenible de humedales sometidos a presiones antrópicas y a escenarios de variabilidad climática. De este modo, el estudio de la hidrodinámica en humedales tropicales contribuye al fortalecimiento de enfoques integrales orientados a la preservación de estos ecosistemas estratégicos y a la mitigación de los impactos asociados a la regulación y transformación de los sistemas fluviales.

2. Descripción del área de estudio

En el contexto colombiano se han adoptado el termino ciénaga como sinónimo de la palabra humedal, aunque tiene diferencias particulares, las ciénagas son áreas extensas inundadas de poca profundidad y se caracterizan por tener suelos pantanosos, que reúnen varios ecosistemas dentro de su cuenca. (Neiff, 2004). En el presente estudio, se aborda el Complejo Cenagoso del Bajo Sinú, un cuerpo de agua ubicado en la cuenca baja del río Sinú, en la región Caribe, dentro del norte en el departamento de Córdoba. Está conformado por una red de lagunas interconectadas mediante canales naturales conocidos localmente como *caños*.

2.1 Antecedentes

Históricamente se ha reconocido al Complejo Cenagoso del Bajo Sinú como una unidad territorial clave en el caribe colombiano, no solamente por su extensión y función ecológica, sino también por su integración social y económica con los municipios ribereños. De acuerdo con Salazar-Mejía, (2011) este sistema se configura como si fuera una “espina dorsal” del Bajo Sinú articulando corredores fluviales, centros urbanos y zonas productivas en torno a su dinámica hídrica. En este contexto, su delimitación no puede entenderse solamente por criterios físicos, sino también por los patrones de uso de suelo y la ocupación tradicional de las comunidades asentadas en sus márgenes. Aguilera-Díaz, (2011), propone que, aunque el complejo ha sido dividido por carreteras y bordes artificiales, su influencia ecológica y social se extiende más allá de los límites hidrográficos formales, abarcando territorios que dependen de directa o indirectamente del sistema hídrico. Estas delimitaciones explican por qué la gestión del complejo requiere de una visión integrada del paisaje más allá de las jurisdicciones administrativas.

2.1.1 Estudios previos sobre la dinámica hídrica del Bajo Sinú

Se han realizado diversos estudios sobre el Complejo Cenagoso del Bajo Sinú, el cual ha sido objeto de múltiples investigaciones que abarcan temas técnicos hasta los social. En cuanto a las investigaciones orientadas a comprender su dinámica hídrica, se han optado diferentes perspectivas, algunas desde el enfoque hidrológico, ecológico, biológico y ambiental, destacando trabajos que involucran la modelación de parte parcial del sistema, el uso de SIG para evaluar la variabilidad temporal, entre otros estudios que aportan información valiosa sobre la estructura y funcionamiento del complejo.

Uno de los estudios más completos sobre el sistema hídrico del Bajo Sinú fue desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia, en convenio con la Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y San Jorge (CVS). Este diagnóstico tuvo como propósito evaluar el estado ambiental del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú, y su área de influencia, mediante la integración de información hidrológica, geomorfológica, ecológica y socioeconómica (CVS, 2005; Universidad Nacional de Colombia, 2005). Este estudio identificó que el régimen natural de la inundación del río Sinú había sido profundamente modificado a partir de la construcción y operación de la represa Urrá I, la cual alteró los pulsos de crecida y redujo la conectividad lateral entre el cauce principal y las ciénagas adyacentes. Como resultado, disminuyó el volumen del agua que ingresa al complejo en épocas de lluvias, así como un aumento en los procesos de colmatación y sedimentación en las zonas internas del humedal (Universidad Nacional de Colombia, 2005).

Este diagnóstico, analizó el comportamiento durante el periodo histórico entre 1980 al 2002, simulando diferentes condiciones de funcionamiento, incluyendo el funcionamiento natural del complejo, su condición alterada por la intervención antrópica, la operación de la represa Urra I, y la posible evolución del sistema frente a escenarios de cambio climático. Así mismo el estudio muestra como las alteraciones antrópicas en el sistema han provocado la desconexión de agua de varios cuerpos de agua,

limitando el intercambio de caudales a través de los caños naturales, entre los cuales se destaca el caño Aguas Prietas como principal vía de flujo bidireccional entre el sistema lagunar y el caudal del río Sinú. Por último, este informe también propone integrar la modelación numérica en los procesos de lanificación y manejo ambiental del bajo Sinú para evaluar los efectos de regulación hidráulica (Universidad Nacional de Colombia, 2005).

El estudio desarrollado por Correa *et al.* (2006), presenta un modelo hidrológico conceptual para el Complejo Cenagoso de Bajo Sinú, estructurado como un sistema de reservorios interconectados, refiriéndose a las ciénagas y sus canales de conexión con el río. En este esquema cada cuerpo de agua se trata como un elemento de almacenamiento que intercambia flujos con otras ciénagas y con el río a través de caños, recibiendo aportes por precipitación, caudal fluvial y experimentando pérdidas por evaporación y filtración subterránea.

El modelo incorpora estas variables hidrológicas en un balance hídrico diario del sistema, dando como resultado escenarios contrastantes: una evolución hidrológica del humedal en condiciones naturales, otro con la intervención antrópica y un tercero bajo la operación de la central de Urrá I. Estas simulaciones permitieron evaluar los intercambios de agua y sedimentos dentro el río y los humedales (Barrientos *et al.*, 2006). El enfoque de este estudio constituyó un antecedente metodológico importante para la comprensión y gestión de la dinámica hídrica en el Bajo Sinú.

En el estudio de Duarte-Abadía (2005), se describe como la regulación hídrica del sistema depende del comportamiento estacional del caudal del río Sinú. El autor evidencia que, durante en las épocas de lluvias, las ciénagas funcionan como un sistema mixto, con características lenticas como lólicas, provocando que el agua circule activamente entre las lagunas y caños. Por otro lado, durante el verano, las ciénagas adoptan un comportamiento lentico, limitando la conectividad hasta que el nivel de agua cae debajo de la cota de conexión entre los caños. También, se identifica al caño Aguas Prietas con un flujo

bidireccional entre el sistema cenagoso y el Río Sinú, introduciendo y evacuando agua según la condición hidrológica.

Este estudio refuerza la necesidad de comprender la dinámica hidrológica del sistema, desde una perspectiva temporal y espacial, aporta datos sobre los momentos de mayor y menor cota de los niveles hídricos, y recomienda la implementación de modelos hidrodinámicos como herramienta de análisis (Duarte-Abadía, 2005).

En la investigación realizada por Acosta-Ramos y Morales-Fernández (2021), se empleó el uso de imágenes satelitales Landsat 8, combinado con técnicas de percepción remota para analizar los cambios en el espejo del agua del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú, en los meses de marzo de 2014, 2017 y 2020. El estudio mostro una reducción progresiva del área cubierta por agua en épocas secas, pasando una pérdida del 37% en seis años. Si bien el estudio no se centra en modelación, sus hallazgos ofrecen un insumo clave para respaldar la elección del mes de marzo como mes de simulación crítica. Además, estos resultados pueden ser comparables con la extensión cenagosa modelada (Acosta-Ramos & Morales-Fernández, 2021).

En un proyecto reciente, Payares-Narváez (2023), desarrollo una caracterización hidrológica y geomorfológica del tramo medio y bajo del río Sinú, en este trabajo se incluyó el análisis del régimen de los caudales eventos extremos, uso de suelo y el impacto de la infraestructura hidráulica sobre la dinámica del río. Destaca la identificación de zonas críticas por riesgo de inundación en sectores bajos del Sinú. Es una caracterización útil como antecedente para estudios de modelación hidrodinámica, ya que ofrece información del comportamiento del caudal, además, deja evidencia de la incorporación de incluir variables geomorfológicas y de uso de suelo en el análisis de dinámica hídrica.

2.2 Localización y extensión del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú

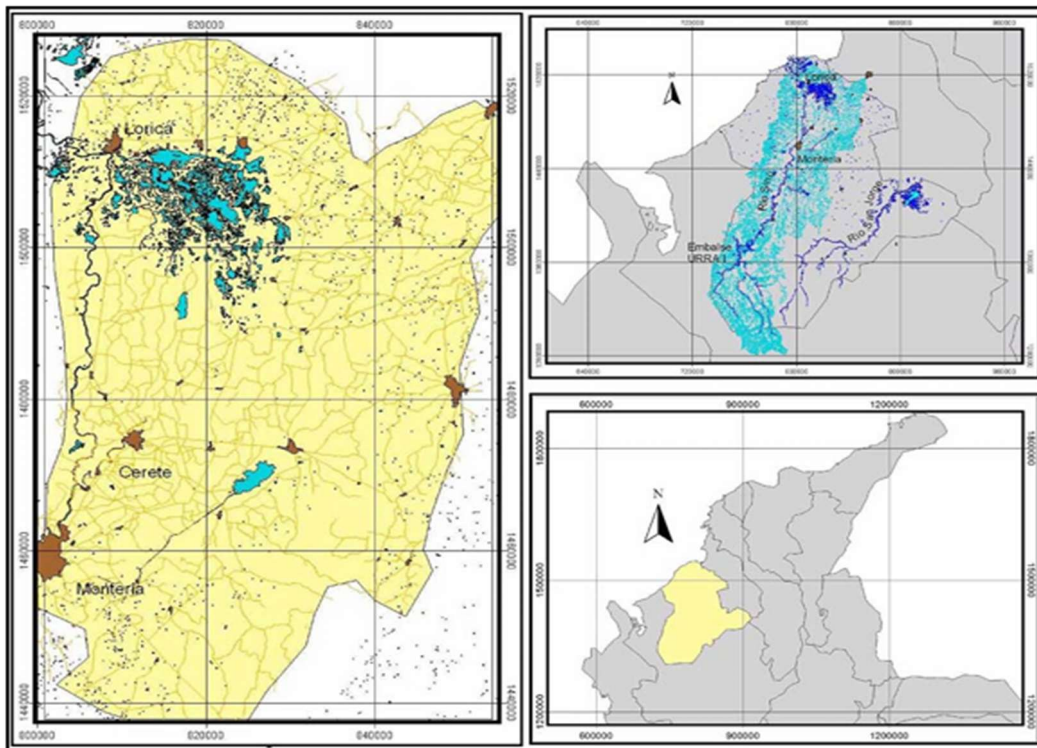


Figura 2. 1 Mapa de ubicación del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú. Obtenido por la Corporación Autónoma de los valles del Sinú y San Jorge, 2004.

El Complejo Cenagoso del Bajo Sinú (CCBS), también nombrado Complejo Lagunar del bajo Sinú o Ciénaga Grande del Bajo Sinú, se encuentra en la región caribeña de Colombia, en el departamento de Córdoba, en la margen derecha del río Sinú. Las coordenadas de ubicación del complejo corresponden entre 1,440,000 a 1,527,000 Norte y de 800,000 a 855,000 Este, con origen en Bogotá (Corporación Regional de los Valles del Sinú, 2005). Se puede apreciar su ubicación en la figura 2.1.

Dentro del departamento de Córdoba, la cuenca del río Sinú se encuentra dividida en 3 subregiones: Alto, Medio y Bajo Sinú. Este último se divide en Sabanero, Costanero y Cienaguero. El Complejo cenagoso comprende principalmente la zona Cienaguera del Bajo Sinú, abarcando 5 municipios: Loricá, Purísima, Momil, Chimá y Cotorra, además ciertos territorios parciales de otros municipios como son San

Pelayo, Cereté, Montería, San Carlos, Ciénaga de Oro, Sahagún, Chinú, San Andrés de Sotavento y San Antero. (CVS,2016). En la figura 2.2 se puede apreciar el área correspondiente a cada municipio.

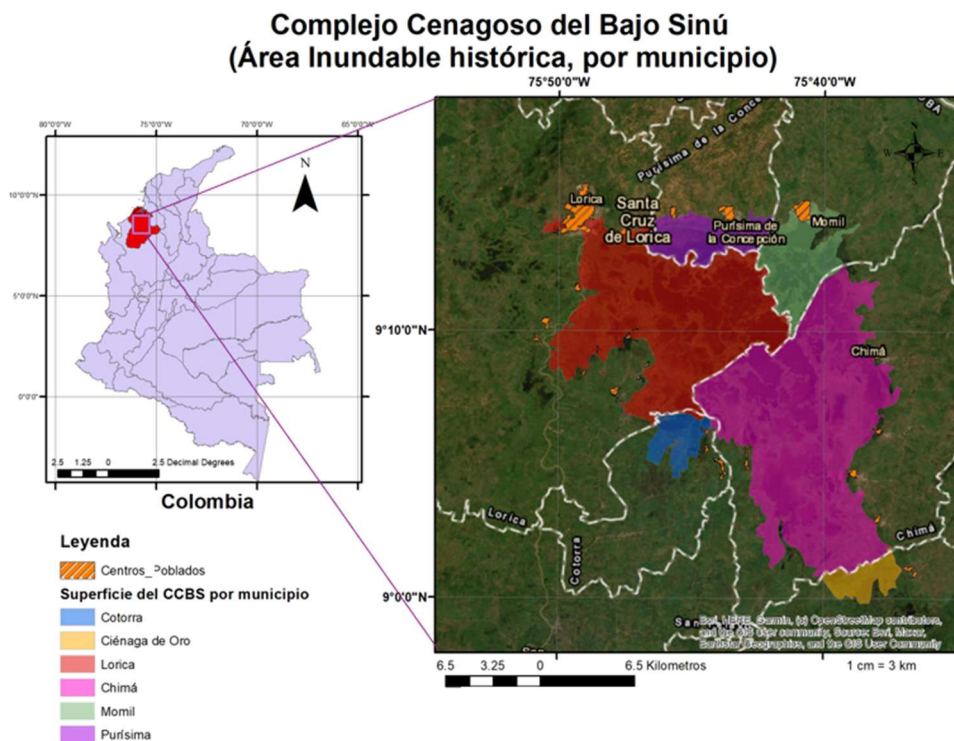


Figura 2. 2 Mapa de la división territorial correspondiente a cada municipio que conforma el Complejo Cenagoso del Bajo Sinú (CCBS). Elaboración propia en base a CVS (2005).

De acuerdo a varios estudios (CVS, 2016a; IDEAM, 1998; PNUD & Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible., 2012) el complejo cenagoso presenta una dinámica de inundación cuya extensión varía entre los 350 y 400 km². Se encuentra delimitada por condiciones naturales como el relieve y una red de drenaje, además de elementos antrópicos como obras viales que cortan el flujo natural del agua. De acuerdo con información de la CVS (2005), el área potencialmente inundable es de 357 km², y se divide entre 7 municipios, como se muestra en la tabla 2.1. Sin embargo, la presencia de otros cuerpos de agua hacia el suroeste podría indicar una extensión del área hasta 400 km². En época de aguas bajas, la zona inundada representa apenas un 15 % del total (53.5 km²). Se estima que el área que permanece inundada el

95% del tiempo es de apenas 39 km², pudiendo reducirse hasta 31 km² en situaciones críticas (Universidad Nacional de Colombia, 2005).

Tabla 2. 1 Población y superficie correspondiente al Complejo Cenagoso por municipio

Municipio	Población	Área de CCBS (Km²)
Lorica	114,864	125.5
San Pelayo	37,465	2.03
Momil	15,764	29.37
Purísima	15,189	21.59
Chimá	13,161	159.01
Cotorra	16,374	10.51
Ciénaga de Oro	56,185	9.40
Total	269,002	357.41

Elaboración propia con datos del DANE,2020; CVS, 2005.

2.3 Características geológicas y fisiográficas de la cuenca.

El Complejo Cenagoso del Bajo Sinú se encuentra sobre una planicie aluvial que forma parte de la cuenca baja del río Sinú, los cinturones geológicos del Sinú y de San Jacinto tienen una influencia estructural sobre esta región, los cuales, se conforman de materiales sedimentarios deformados y altamente meteorizados producto de procesos tectónicos del Terciario y Cuaternario (CVS – Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge., 2004). La región presenta una topografía plana con pendientes muy suaves inferiores al 1%. Esta condición, favorece el encharcamiento de agua, la formación de ciénagas, paleocauces y diques naturales que son la base del sistema fluvio-lacustre del Bajo Sinú (Universidad Nacional de Colombia, 2005).

Entre las geoformas predominantes en la zona se encuentran terrazas fluviales, bacines, diques aluviales, y vegas de divagación, formadas por la deposición de sedimentos en épocas de desbordamiento del río. Durante los periodos de lluvias, los sedimentos más gruesos se depositan cerca de los caños mientras que los finos se acumulan en zonas deprimidas (Universidad Nacional de Colombia, 2005). Asimismo, en la zona se encuentra paleocauces y sistemas de ciénagas que funcionan como amortiguadores hidrológicos frente a crecidas y permiten la expansión y contracción del sistema. Sin embargo, esta dinámica se ha visto afectada por obras de infraestructura como la vía Lórica- Montería, que actúa como una barrera al flujo natural del agua, irrumpiendo la conectividad entre el río y las ciénagas (CVS, 2004; IDEAM, 1998) .

La figura 2.3 muestra los cuerpos de agua que componen el Complejo Cenagoso del Bajo Sinú, así como las localidades y principales vías carreteras que rodean al complejo.

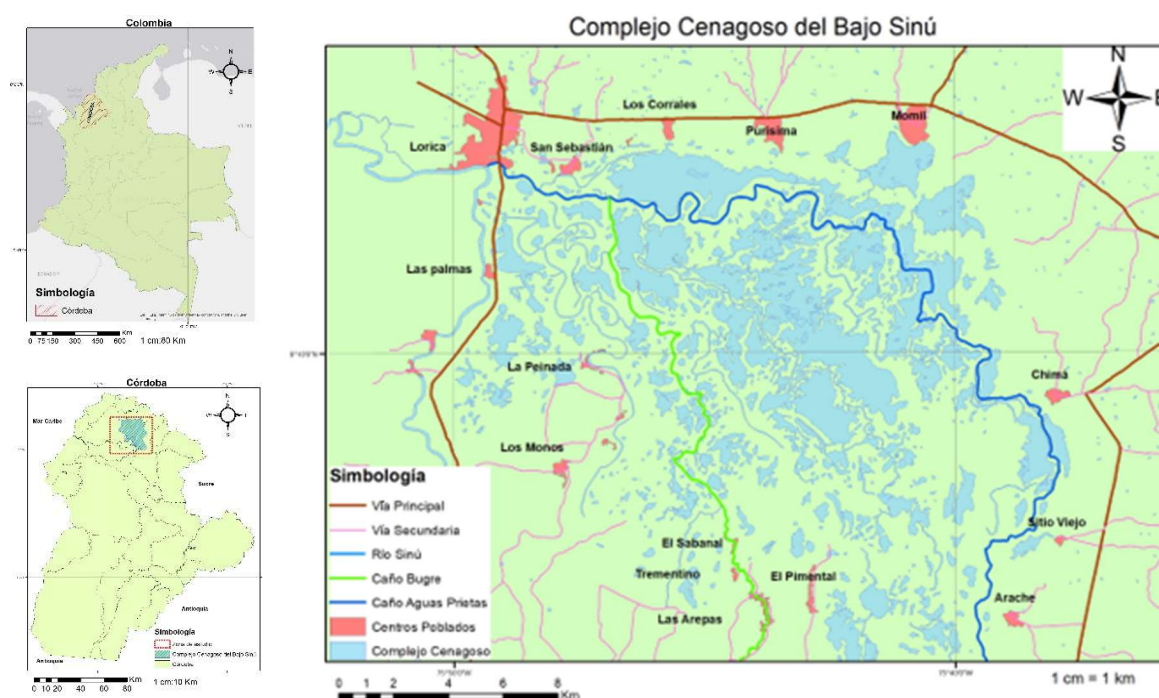


Figura 2. 3 Mapa de ubicación del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú

Elaboración propia con información de CVS (2016).

La formación del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú está íntimamente relacionado a los procesos de acumulación aluvial y a la dinámica de meandros abandonados que caracterizan a la cuenca baja del Sinú. De acuerdo a Salazar-Mejía (2011), el relieve plano de la región y la composición de sus suelos refleja siglos de años de sedimentación y colmatación provocados por el cauce principal y sus afluentes. Estas condiciones generaron un mosaico de geoformas como diques naturales, cubetas de decantación, vegas y paleocauces que determinaron el patrón fisiográfico del sistema. A esto se le añade la acción antrópica reciente que ha inducido alteraciones geomorfológicas mediante obras de relleno, extracción de materiales y modificación del drenaje superficial. Estos cambios, han alterado además del relieve funcional del complejo, su capacidad de amortiguar las crecidas, afectando la morfología interna y reduciendo su conectividad natural. (UNAL 2005).

2.4 Hidrografía de la cuenca

El Complejo Cenagoso del Bajo Sinú forma parte de la gran llanura aluvial del río Sinú, el cual aporta agua mediante un patrón meándrico y de pendiente muy reducida (0.1 % a 0.5%), lo cual favorece a la formación de ciénagas y canales de agua con un flujo muy lento. (UNAL, 2005). Entre los canales de agua que conectan el sistema lagunar con el río Sinú sobresale el caño Aguas Prietas, el cual tiene un comportamiento bidireccional dependiendo de la estacionalidad hidrológica (CVS, 2005). Otros caños relevantes en el sistema son el Bugre, Chimancito, y el Espino, funcionando como parte de la red de drenaje de las ciénagas interiores (IDEAM, 1998).

Durante la temporada de lluvias, las crecientes del río Sinú inundan el complejo alimentando las ciénagas a través de los caños naturales y conexiones superficiales. En época seca, estos caños invierten su dirección y drenan el agua del sistema hacia el río (CVS, 2004). En estudios recientes de la cuenca del río Sinú se ha resaltado la importancia ecológica y funcional de esta conectividad

hidrológica que favorece a los procesos de retención de sedimentos y la regulación de caudales, aspectos importantes para la seguridad hídrica del sistema. (Mandle *et al.*, 2025).

El caño Aguas Prietas cumple con un papel crucial como vía de interconexión bidireccional, durante la temporada de lluvias permite la evacuación del exceso hídrico hacia el río Sinú, mientras que en temporada secas el río aporta hacia el sistema de ciénagas regulando los niveles de agua en el complejo. (Universidad Nacional de Colombia, 2005). El caño nace en la zona sur oriental de la cuenca. En su recorrido de 653 km recibe una gran número de drenajes provenientes del suroriente y del canal del municipio de San Carlos, en su recorrido en dirección noreste rodea poblaciones como Ciénaga de Oro, Punta de Yáñez, Corozalito, Arache, y Chimá, donde llega al Complejo Cenagoso y atraviesa cuerpos de agua en dirección norte y después Oeste, donde finalmente pasa por la población de San Sebastián y conecta con el río Sinú a la altura de Lorica, destacando en esta zona el flujo bidireccional. (Universidad Nacional de Colombia, 2005).

El sistema se compone por al menos 17 caños identificados, los cuales presentan altos niveles de sedimentación, sobre todo aquellos cercanos a áreas intervenidas por la agricultura y la ganadería. La red se articula con un conjunto de ciénagas permanentes y estacionales como Guartinaja, Momil, Sapal y El Quemado, que funcionan como receptores de agua excedente y zonas de regulación temporal. (CVS, 2006; Salazar-Mejía, 2011).

A esta dinámica natural se le pueden sumar las condiciones alteradas por influencia antrópica. Un monitoreo de calidad de agua realizado por FUNSOSTENBLE y la CVS (2019), reveló un deterioro en la calidad del agua en los puntos principales de captación, con una alta presencia de materia orgánica, coliformes y nutrientes que comprometen el equilibrio ecológico.

2.5 Clima y aspectos ambientales relevantes

En la región donde se ubica el Complejo cenagoso del Bajo Sinú el clima es de tipo Sabana Tropical (Aw) de acuerdo con la clasificación Köppen, en la que resalta una estacionalidad entre periodos secos y lluviosos. El régimen pluviométrico en la región es del tipo unimodal. La temporada de secas se extiende por meses de diciembre a marzo y la temporada de lluvias suele abarcar de abril a noviembre, con lluvias máximas entre septiembre y octubre. La precipitación media anual en la zona varía alrededor de los 1,200 mm a 1,600 mm, no obstante, en algunas zonas costeras de Córdoba puede haber precipitaciones en un rango de 1,400 y 1,800 mm, mientras que en las montañas del sur de la cuenca este rango varía entre 3,000 a 3,600 mm anuales (CVS, 2006; Instituto de Hidrología, 2023). En la figura 2.4 se puede apreciar los rangos de precipitación media anual en la cuenca del río Sinú.

Para la predicción a corto plazo, Ruíz-Murcia & Melo-Franco, (2021) señalan que los trimestres de noviembre 2021 a enero del 2022 y febrero a abril del 2022, presentaron anomalías en precipitación por encima del 20% al 50 % respecto a climatología esperada, particularmente sobre el departamento de Córdoba y Sucre, relacionadas a la fase de la Niña anunciada para ese periodo.

En cuanto a temperatura, según el IDEAM (2020), la media anual en la región es cálida con valores alrededor de los 27°C, con una humedad relativa alta, factores que, aunados a la variabilidad interanual con la influencia por El Niño y La Niña, modifican la duración de las inundaciones estacionales en el complejo. La humedad relativa es alta con promedios de 80 % a 90 % durante la mayor parte de año y un brillo solar que alcanza máximos de 8.5 horas diarias entre enero y febrero. La evapotranspiración potencia mensual es de hasta 170 mm en época seca, lo cual influye directamente en la reducción de los niveles de las ciénagas, además la influencia del fenómeno del Niño, puede intensificar estos eventos climáticos, generando periodos de sequía severa o inundaciones prolongadas. (CVS, 2006; Instituto de Hidrología, 2023).

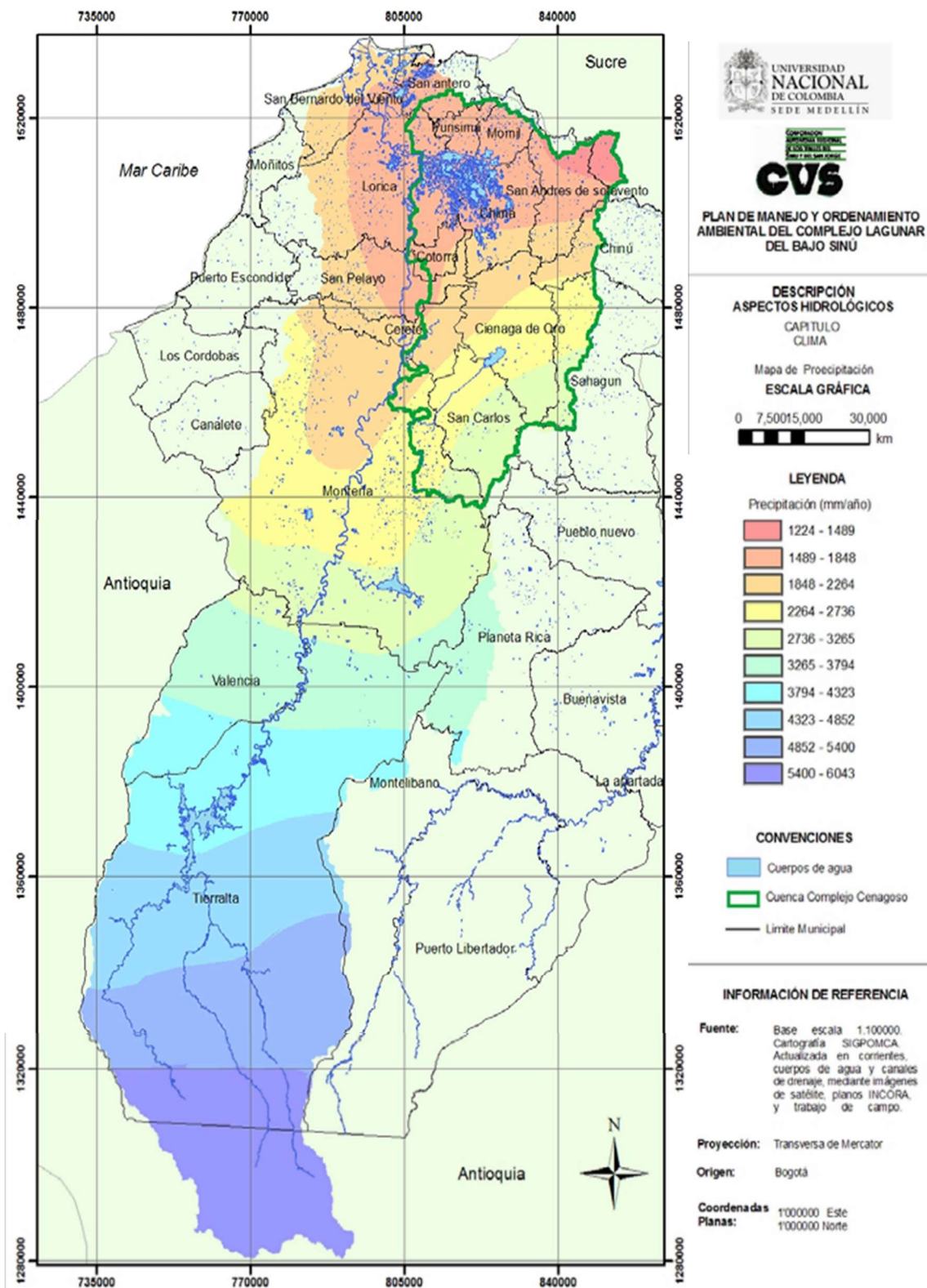


Figura 2. 4 Precipitación promedio anual en la cuenca del río Sinú.

Tomado de CVS y UNALMED (2006).

2.6 Aspectos socioeconómicos del área

Como se ha mencionado, el área de influencia del complejo cenagoso del Bajo Sinú abarca 7 municipios a los cuales ofrece sus servicios ecosistémicos: Lorica, Chimá, Purísima, Ciénaga de Oro y San Pelayo. Según el DANE (2020), la población total estimada es de más de 260,000 habitantes, tal como se puede ver en la tabla 2.1, de los cuales, la gran parte habita en zonas rurales y periurbanas directamente vinculadas al uso de los recursos del sistema cenagoso. Las actividades económicas que predominan en la región son la pesca artesanal, la agricultura de subsistencia (principalmente yuca, arroz y maíz), y la ganadería extensiva. Para un gran número de familias la pesca es una fuente esencial de ingreso y de proteína, sin embargo, esta actividad ha sido la más afectada por la pérdida de conectividad hídrica y la disminución de los niveles de agua durante la época de secas (Universidad Nacional de Colombia, 2005).

El complejo juega un papel crucial como fuente de agua para consumo doméstico y riego, así como un medio de transporte local por los canales navegables, principalmente en épocas de lluvias cuando el nivel aumenta y los caminos terrestres se inundan. Sin embargo, el incremento de actividades ganadera y agrícolas han provocado procesos de sedimentación, colmatación de ciénagas y conflictos por el acceso al recurso hídrico durante la época seca. (CVS, 2004). A esto también se le añaden prácticas informales de ocupación del suelo, la construcción de diques o cierres ilegales de caños que alteran la dinámica del sistema, las cuales, junto con una falta de saneamiento básico y planificación territorial, incrementa la presión sobre los ecosistemas del complejo y dificultan la gestión y el manejo sostenible de este (CVS, 2004).

Además, la economía local está conectada al ciclo hídrico del humedal, en épocas lluvias se fortalece la pesca, mientras que en épocas de secas se amplían cultivos y zonas de pastoreo para la ganadería. Sin embargo, esta estrategia temporal ha sido desplazada por una de ocupación permanente, provocando el desecamiento artificial de ciénagas, la construcción de diques y el uso no planificado del

suelo (Aguilera-Díaz, 2011; Salazar-Mejía, 2011). Adicionalmente, la ocupación de predios baldíos de forma informal, genera conflictos sociales porque muchos de ellos se ubican dentro de la zona funcional del complejo, creando tensiones y dificultando los procesos de gestión ambiental. Las condiciones de pobreza, baja escolaridad y la carencia de servicios básicos aumentan la vulnerabilidad socioeconómica de los habitantes y se vuelven más dependientes al ecosistema (Alarcón *et al.*, 2019).

A pesar del valor ecológico y social del complejo la falta de esfuerzos institucionales limita el acceso a recursos para su manejo y reduce su visibilidad como un ecosistema estratégico en el caribe colombiano. En términos sociales, la ocupación informal ha generado conflictos en el uso y tenencia de suelo, ya que de acuerdo con Alarcón (2019), muchos de estos predios son destinados a actividades agropecuarias sin ningún control ambiental. Estas tensiones, junto con una carente intervención institucional crean un conflicto socioambiental crónico donde la gobernanza del humedal se limita a intereses contrapuestos entre conservación producción y propiedad (Sepúlveda-Vargas *et al.*, 2020).

2.7 Marco institucional y de gestión del recurso hídrico en Colombia

En Colombia, la gestión del agua se fundamenta en un marco normativo que busca promover el uso sostenible, la conservación de los ecosistemas acuáticos y la garantía del acceso equitativo del agua. El marco normativo se basa en la Constitución Política de 1991, en la cual se reconoce el agua (artículo 79 y 80) como un bien público esencial y asigna al Estado la responsabilidad de planificar su manejo y aprovechamiento de acuerdo con los principios del desarrollo sostenible. El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), es la autoridad nacional encargada de formular y orientar la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH), establecido en el año 2010 y actualizada en 2019. La política tiene como enfoque central la administración del agua integrando los componentes de cantidad, calidad, oferta, demanda y riesgo (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019b).

Sus objetivos principales son garantizar la sostenibilidad del recurso, fortalecer la institucionalidad del agua, prevenir conflictos por su uso y promover la adaptación al cambio climático.

A nivel territorial, la política se implementa a través de las denominadas Corporaciones Autónomas Regionales (CAR), autoridades urbanas y los Consejos de Cuenca, que son instancias de participación y coordinación local. Estas entidades desarrollan los Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA), instrumentos de planificación que establecen lineamientos para el manejo del agua, la conservación y la prevención de desastres (IDEAM, 2020). En el caso del departamento de Córdoba, la autoridad responsable es la Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge (CVS), que lidera la gestión ambiental en la cuenca baja del río Sinú, incluyendo el Complejo Cenagoso del Bajo Sinú.

El país cuenta con instrumentos complementarios como el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático, la Política Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, y la estrategia Nacional para la Protección y Uso Sostenible de los Humedales Interiores, los cuales fortalecen la relación entre la gestión hídrica, conservación y planificación ambiental (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019b). En estos instrumentos, se reconocen a los humedales como áreas prioritarias para la regulación del ciclo hidrológico, la mitigación de inundaciones y la provisión de servicios ecosistémicos.

El país aún se enfrenta a desafíos significativos, entre ellos la fragmentación de competencias entre entidades, la insuficiente articulación entre la planificación ambiental y la ordenación del territorio (IDEAM, 2020). La escasez de información hidrología detallada y la falta de herramientas técnicas para el análisis del comportamiento hídrico a escala local dificultan la toma de decisiones efectivas. El fortalecimiento de la gestión del recurso hídrico en Colombia, requiere de integrar el conocimiento científico con la gestión institucional.

3. Análisis hidrológico.

En este estudio se consideró pertinente la realización de un balance hídrico del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú, a fin de cuantificar la entrada y salida de agua del sistema. Esto es de gran ayuda ya que permite tener una idea clara de los aportes de agua por escorrentía que recibe este complejo, el agua que desaloja hacia el Río Sinú, así como las pérdidas por evapotranspiración. El estudio hidrológico de la cuenca del Complejo Cenagoso del bajo Sinú se centra en la comprensión y el análisis de los procesos relacionados al ciclo del agua que puedan ocurrir sobre la superficie delimitada por el parteaguas de esta cuenca. Esta cuenca pertenece a la Cuenca del Río Sinú, siendo parte de la zona media y baja de esta. Este análisis implica una evaluación detallada en diversos aspectos, incluyendo la precipitación, la escorrentía, la infiltración, y la evapotranspiración. Tales componentes son clave para comprender el equilibrio hídrico de una cuenca y como se distribuye el agua sobre su superficie.

3.1 Recopilación y procesamiento de datos meteorológicos e hidrométricos.

3.1.1 Precipitación media anual y temperatura por el método de Polígonos de Thiessen

Se determinó la precipitación media anual para el periodo de 1968 a 2023. De acuerdo con los datos que ofrecen las estaciones meteorológicas activas del IDEAM. Para los datos de precipitación media anual se tomaron en cuenta las estaciones que se presentan en la tabla 3.1. Siendo un total de 28 estaciones, las cuales se sometieron a pruebas de homogeneidad de Helmert y prueba de independencia Anderson, las cuales cumplieron satisfactoriamente. Para el tema de datos faltantes, se utilizaron 21 estaciones auxiliares para completar datos de precipitación y temperatura media anual por medio de promedios para los meses de lluvia (mayo a octubre) y para los demás meses se utilizó el método racional deductivo.

Tabla 3.1 Precipitación y temperatura media anual en estaciones de la cuenca del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú (1968-2023).

			Periodo 1968-2023		
ID	Clave	No. Estación	Nombre	Precipitación media anual (mm/año)	Temperatura media anual °C
1	A	13060020	Buenos aires	1468.711936	27.46778009
2	B	13060010	San Anterito	1415.282569	27.18293755
3	C	13070020	Momil	1396.213613	27.59386515
4	D	13070040	Rabolargo	1408.582305	28.51256013
5	E	13070050	Cereté	1304.40252	28.51256013
6	F	13077070	Ciénaga de Oro	1460.865679	27.92159746
7	G	13070070	Boca de la Ceiba	1406.109599	27.63959822
8	H	13070090	San Carlos	1544.64296	27.68420422
9	I	13070100	Santa Rosa	1599.422704	27.6379272
10	J	13070120	Callemar	1553.361199	27.6379275
11	K	13070110	Carrizal	1515.664528	27.63959822
12	L	13070170	Buenos Aires 1	1469.263616	27.63959822
13	M	13070190	Coroza 2	1358.802803	27.63959822
14	N	13070180	Carrillo	1218.43753	27.63959822
15	O	13070280	Sabanal	1384.769505	27.63959822
16	P	13070430	Venecia	1222.801113	27.58547098
17	Q	13070440	Villa Marcela	1417.180078	27.60845589
18	R	13075010	Chimá	1249.863409	27.58547098
19	S	13075020	El Salado	1356.491607	28.95442806
20	T	13070450	Aguas Mohosas	1388.756951	27.58547098
21	U	13075030	Turipana	1296.914908	27.63959822
22	V	13085010	La Doctrina	1336.713153	27.37521164
23	W	25021040	Sahagún	1359.837142	27.63233451
24	X	13035501	Apto. Los Garzones	1255.556221	27.63959822
25	Y	25021210	Trementino	1538.392033	27.63233451
26	Z	25025170	Colomboy	1485.339657	27.63233451
27	AA	25025270	Unisucré	1246.229728	27.30483399
28	AB	13075050	U. de Córdoba	1341.021507	27.63959822

El método racional deductivo es una estrategia de análisis utilizada convencionalmente en el tratamiento de series climatológicas e hidrológicas incompletas que se basa en el juicio técnico, lógica estructurada y el conocimiento contextual del comportamiento de las variables de estudio (Álvarez & González, 2006; CEDEX, 2010). Este enfoque permite utilizar inferencias sobre los datos faltantes cuando

En la figura 3.1, se revela el mapa con la ubicación de las estaciones respectivas junto con su área correspondiente de acuerdo al método de los polígonos de Thiessen.

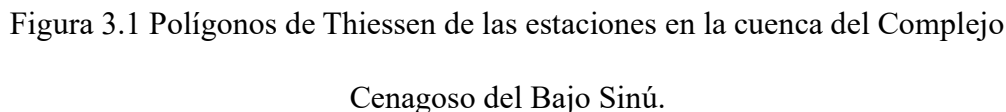


Tabla 3.2 Cálculo de la precipitación y temperatura media anual, método de Thiessen (1968–2023).

Estación	Nombre	Área de influencia AI (km ²)	Precipitación media anual PI (mm/año)	Temperatura media anual TI (°C)	AI * PI	AI * TI
13060020	Buenos Aires	1.960726	1468.711936	27.46778009	2879.741679	53.8567
13070070	Boca de la Ceiba	2.799840891	1406.109599	27.63959822	3936.883153	77.3864
25025270	Unisucure	4.862083182	1246.229728	27.30483399	6059.272601	132.7583
13085040	Apto. Los Garzones	8.23533172	1255.556221	27.63959822	10339.92197	227.6212
13075050	U. de Córdoba	23.32866403	1341.021507	27.63959822	31284.2402	644.7949
13075030	Turipana	30.84122471	1296.914908	27.63959822	39998.44411	852.4390
13060010	San Anterito	37.38110712	1415.282569	27.18293755	52904.82931	1016.1283
13070280	Sabanal	48.36541141	1384.769505	27.63959822	66974.94682	1336.8005
13070190	Coroza 2	57.27250767	1358.802803	27.63959822	77822.04396	1582.9891
13070170	Buenos Aires I	57.34563292	1469.263616	27.63959822	84255.85198	1585.0102
13070050	Cereté	57.85982686	1304.40252	28.51256013	75472.50396	1649.7317
13085010	La doctrina	57.86826081	1336.713153	27.37521164	77353.26537	1584.1558
25025170	Colomboy	58.93909685	1485.339657	27.63233451	87544.5779	1628.6248
25021210	Trementino	73.93356808	1538.392033	27.63233451	113738.8121	2042.9570
13070440	Villa Marcela	76.27006164	1417.180078	27.60845589	108088.4119	2105.6986
13070450	Aguas Mohosas	93.0198178	1388.756951	27.58547098	129181.9186	2565.9954
13070090	San Carlos	112.3032266	1544.64296	27.68420422	173468.3883	3109.0254
13070100	Santa Rosa	123.3870401	1599.422704	27.6379272	197348.0333	3410.1620
13070120	Callemar	129.162784	1553.361199	27.6379275	200636.457	3569.7916
13077070	Ciénaga de Oro	137.5347578	1460.865679	27.92159746	200919.8073	3840.1901
13070180	Carrillo	142.6026128	1218.43753	27.63959822	173752.3753	3941.4789
25020140	Sahagún	154.4757394	1359.837142	27.63233451	210061.848	4268.5253
13070110	Carrizal	164.9118678	1515.664528	27.63959822	249951.0683	4558.0977
13070430	Venecia	224.9102911	1222.801113	27.58547098	275020.5543	6204.2563
13075020	El Salado	225.6765823	1356.491607	28.95442806	306128.3898	6534.3363
13070040	Rabolargo	233.8206003	1408.582305	28.51256013	329355.5602	6666.8239
13070020	Momil	323.5890407	1396.213613	27.59386515	451799.4236	8929.0723
13075010	Chimá	328.8829209	1249.863409	27.58547098	411058.7286	9072.390
Área de la cuenca		2991.540625		Sumatoria	4147336.3	83191.099

Elaboración propia con datos del IDEAM a través de su Geo portal DHIME.

Los polígonos de Thiessen constituyen un método geométrico de ponderación espacial que permite estimar la precipitación media en una cuenca hidrográfica a partir de datos registrados en estaciones climatológicas distribuidas de manera irregular. Este método asume que cada estación representa de forma homogénea el área más cercana a su ubicación mediante mediatrices perpendiculares entre las estaciones adyacentes (Chow *et al.*, 1988). Esta delimitación crea polígonos que asignan un peso proporcional a cada estación, de acuerdo a su área de influencia dentro de los límites de la cuenca. Para este caso, en el Complejo Cenagosos del Bajo Sinú, la aplicación de este método se justifica por las características morfométricas de la cuenca, pues se trata de una gran extensión superficial de alrededor de 2,991.54 km², principalmente por ser una zona con pendientes muy suaves y de relieve bajo donde no existen fuertes gradientes altitudinales que puedan introducir variabilidad orográfica significativa en la precipitación.

Esta condición geomorfológica hace que el método de Thiessen sea adecuado y suficientemente representativo. Además, la cobertura uniforme de las estaciones dentro de los límites de la cuenca refuerza la validez del método para este estudio. A partir del mapa generado con base de las 28 estaciones hidroclimáticas, como se ve en la figura 3.1, se generó el cálculo de la precipitación media anual y de la temperatura media anual para el periodo de 1968 – 2026. Este método pondera el valor de cada estación por el área de influencia delimitada por los polígonos permitiendo una estimación más representativa en comparación con el promedio aritmético simple. En la Tabla 3.2 se muestran los datos de cada estación junto con los valores precipitación y temperatura, así como los productos intermedio necesario para obtener el promedio ponderado el cual se obtuvo aplicando las siguientes expresiones:

$$P_m = \frac{\sum(A_i * P_i)}{A_c} \quad y \quad T_m = \frac{\sum(A_i * T_i)}{A_c}$$

Donde:

A_i es el área de influencia de la estación en km^2 .

P_i es la precipitación media anual de la estación en mm/año .

T_i es la temperatura media anual de la estación en $^{\circ}\text{C}$.

A_c es el área total de la cuenca en km^2 .

Los resultados se pueden apreciar en la tabla 3.3, donde encontró una precipitación media anual de 1,386.635 mm/año y una temperatura media anual de 27.81 $^{\circ}\text{C}$, valores que reflejan las condiciones típicas del clima cálido húmedo de las regiones del Caribe Colombiano.

Tabla 3.3 Precipitación y temperatura media anual

Precipitación media anual	Precipitación media anual= $\sum (A_i \cdot P_i)$ / Área de la cuenca	1968-2023	1386.354664
Temperatura media anual	Temperatura media anual= $\sum (A_i \cdot T_i)$ / Área de la cuenca	1968-2023	27.8087814

3.1.2 Climograma

Un climograma es una representación gráfica que permite analizar el comportamiento conjunto de la precipitación y la temperatura de una región a lo largo de los doce meses del año. Usualmente, en el eje izquierdo se ubica la precipitación mensual en milímetros representada con barras, y en el eje derecho la temperatura media mensual en grados Celsius. Es una herramienta ampliamente usada para identificar la estacionalidad de la lluvia, los periodos secos de los húmedos y la relación con la temperatura y el comportamiento hidrológico de una cuenca (Barry & Chorley, 2003).

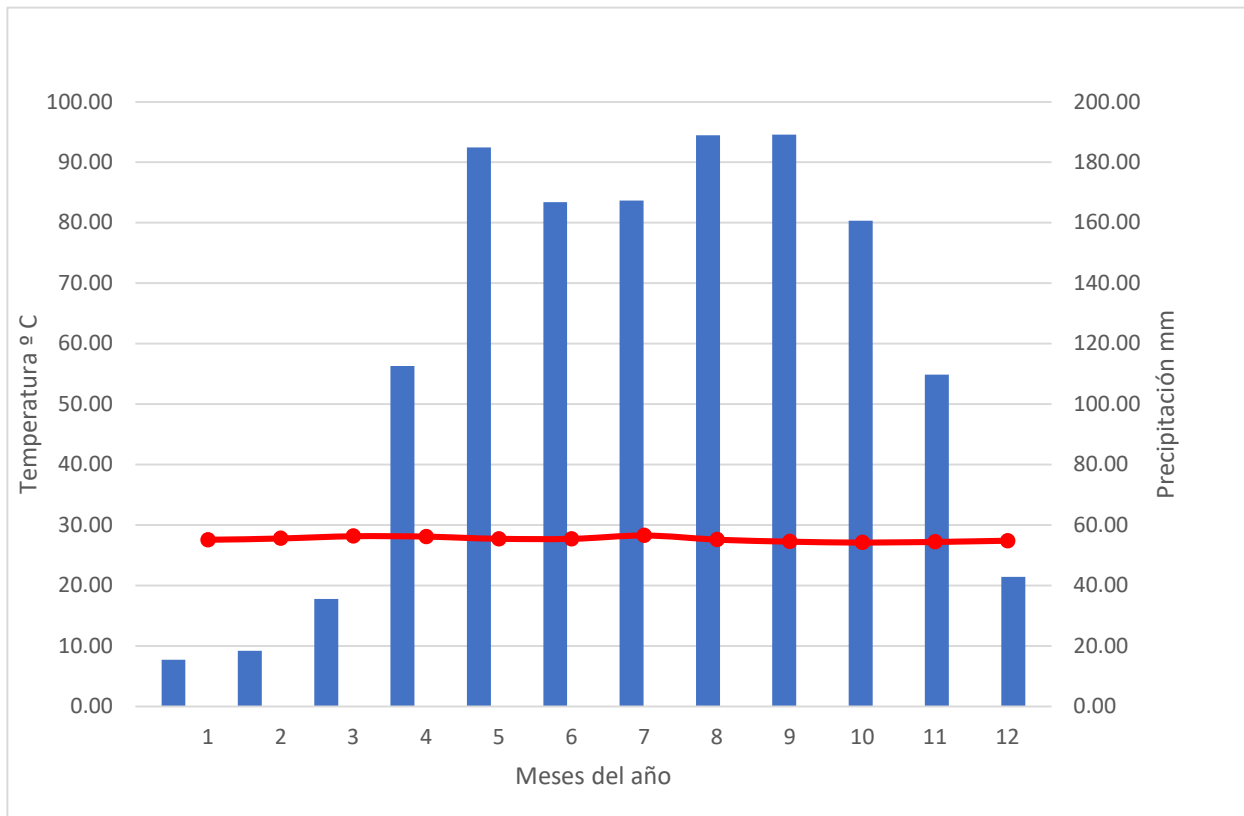


Figura 3.2 Climograma de la cuenca del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú para el periodo 1968-2023. elaborado con información del IDEAM

El climograma generado para esta cuenca correspondiente al periodo de 1968 al 2023 (ver figura 3.2), muestra una marcada estacionalidad en la precipitación, con un incremento entre abril y mayo, alcanzando su punto máximo en septiembre. Aun en octubre la precipitación es alta y comienza disminuir en noviembre. Por otro lado, la temperatura se mantiene constante a lo largo del año oscilando entre los 27 °C y 29°C. Esto sugiere un clima cálido y húmedo característicos de zonas tropicales, también implica una alta evaporación durante todo el año, así como un periodo clave entre mayo y noviembre para el escurrimiento superficial, y la recarga hídrica.

3.2 Balance Hídrico del sistema.

El análisis del balance hídrico de la cuenca evidencia un comportamiento coherente con las condiciones climatológicas y fisiográficas de la región. La precipitación media anual para el periodo de 1968 al 2023, se estima en 1386.35 mm/año, del cual corresponde a evapotranspiración (1193.92 mm/año estimado mediante el método de Turc), lo cual es típico de climas cálido-húmedos, donde la demanda evaporativa y de la vegetación es elevada durante la mayor parte del año.

El escurrimiento superficial, estimado mediante el método del coeficiente de escurrimiento, representa el 31.9% de la precipitación (452.44 mm/año). Es un valor consistente con una cuenca dominada por pastizales manejados, cultivos y cuerpos de aguas superficiales pues a favorecen al escurrimiento debido a la baja infiltración en ciertas áreas y con suelos saturados en zonas de ciénaga, este valor se ve incluido dentro de la evapotranspiración. Por otra parte, la infiltración estimada como el componente residual, alcanza un valor de 192.43 mm/año. En la figura 3.3 se resume este balance en forma de esquema.

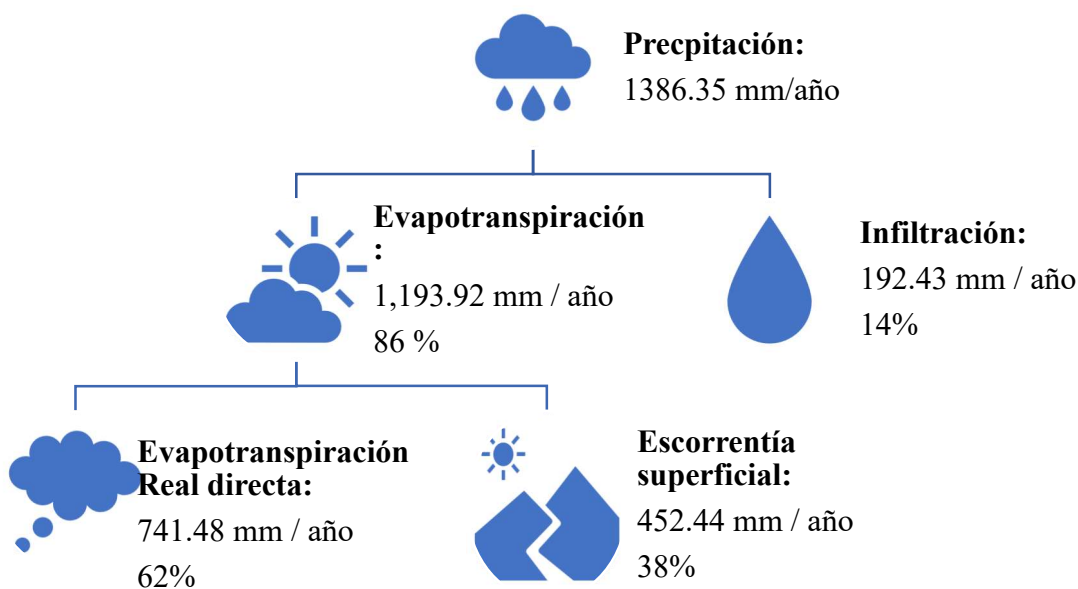


Figura 3.3 Balance hídrico del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú (1968- 2023)

3.2.1 Localización y límites de la cuenca hidrográfica el complejo cenagoso

La cuenca del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú forma parte de la cuenca hidrográfica del río Sinú, la cual está localizada en el departamento de Córdoba, en la región Caribe Colombiano, se extiende por más de 13,700 km² (IDEAM, 2013) , desde las estribaciones del Nudo del Paramillo, en el sur, hasta su desembocadura en el mar Caribe, atravesando 3 zonas fisiográficas: alta media y baja. El río Sinú recorre aproximadamente 415 km, desarrollando un régimen monomodal correspondiente a la estacionalidad climática de la región caribeña. Desde el año 2000 este río ha sido regulado por la central hidroeléctrica Urrá I, ubicada a 30 km al sur del municipio de Tierralta. Esta obra, ha alterado las condiciones de caudal natural, modificando el patrón de inundación estacional en la cuenca baja (URRÁ S.A. E.S.P, 2022.).

La zona baja del Sinú se caracteriza por tener un pendiente suave y altitudes inferiores a 100 metros sobre el nivel del mar- El Complejo Cenagoso del Bajo Sinú (CCBS), ubicado en esta zona es un sistema fluvio lacustre que se extiende por alrededor de 3060 km². (CVS, 2006; Universidad Nacional de Colombia, 2005). En la figura 3.4 se presenta la ubicación de la cuenca del río Sinú, la represa Urrá I y el área de influencia del CCBS, así como la subcuenca de este sistema.

3.2.2 Características morfométricas de la cuenca

La caracterización morfométrica permite conocer, tamaño, forma y geometría de una cuenca hidrográfica, aspectos que son clave en la respuesta hidrológica ante eventos de precipitación. Para la delimitación de la cuenca del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú, se utilizaron herramientas SIG, el software ArcMap, así como de un DEM ALOS PALSAR, con una resolución de 12.5 m.

Cuenca del Río Sinú (Ubicación de Represa Urrá I)

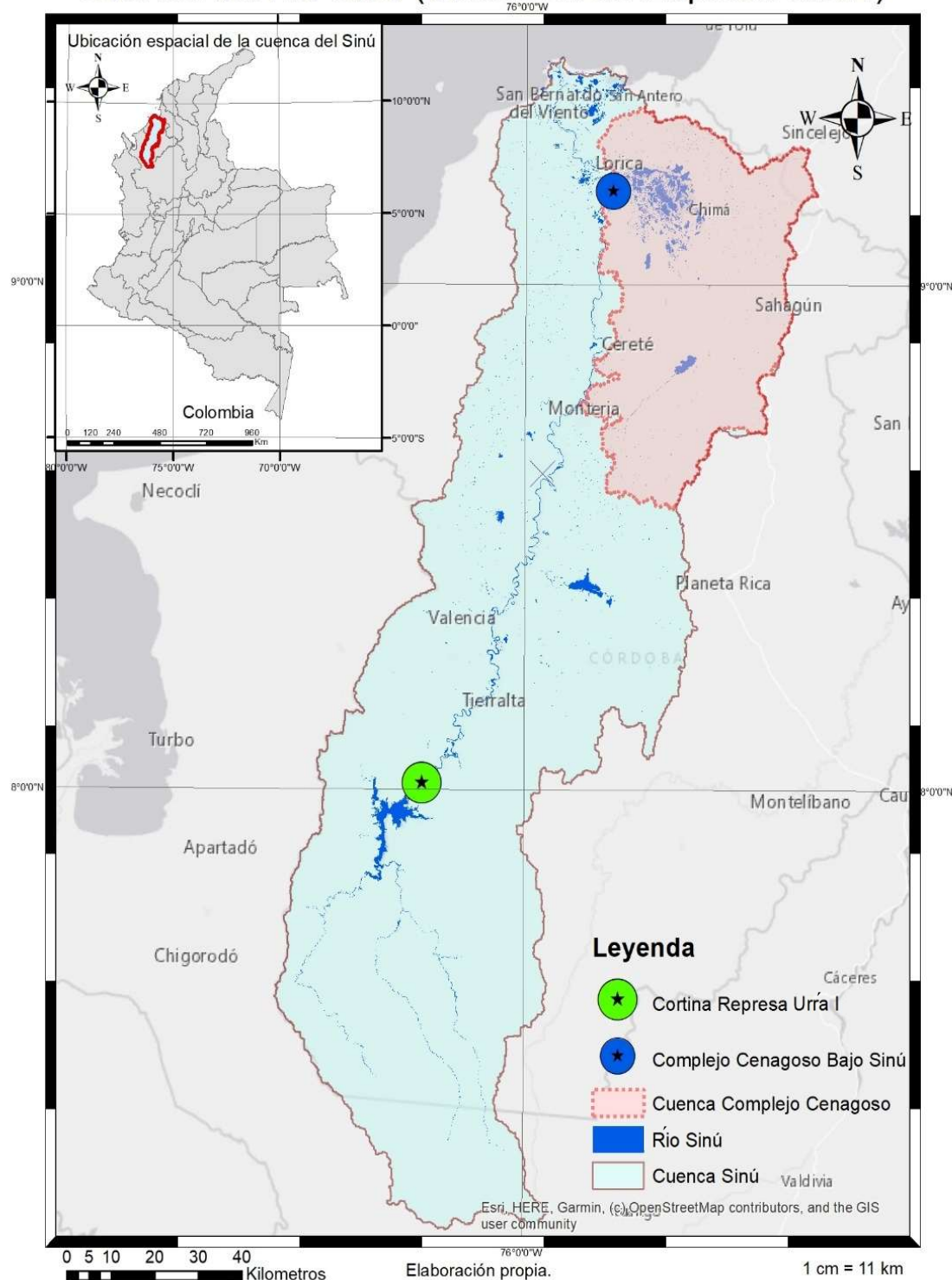


Figura 3. 4 Ubicación de la cuenca del río Sinú, la represa Urrá y el Complejo Cenagoso del Bajo Sinú. Elaborado en base a CVS, 2023 & DANE, 2020.

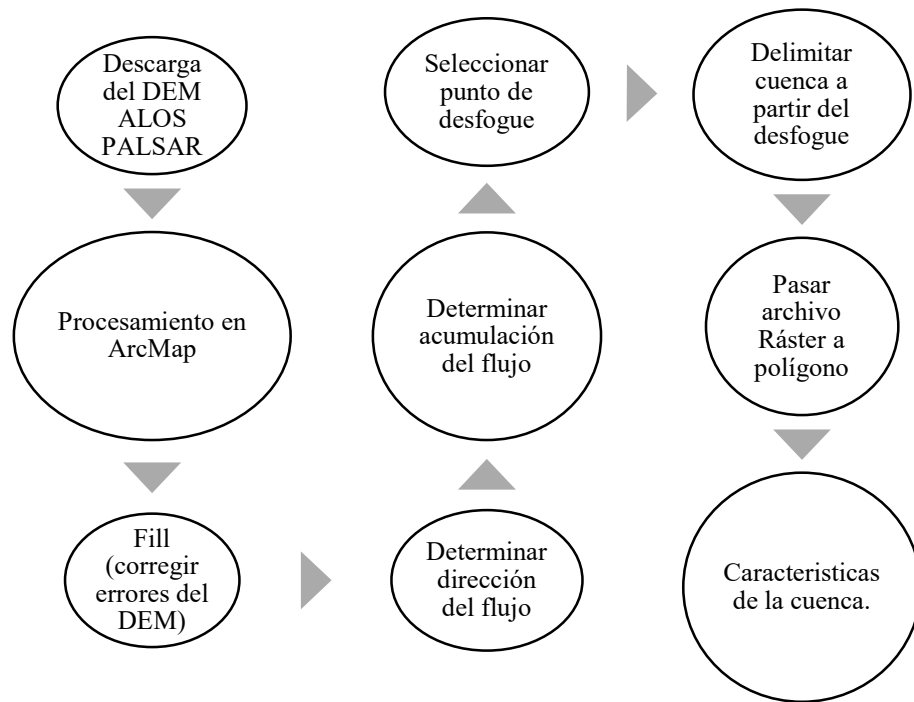


Figura 3.5 Diagrama para delimitación de una cuenca a partir de un DEM en ArcMap 10.8

Área de la cuenca (Ac)

El área de la cuenca se define como la superficie delimitada por el parteaguas, la línea divisoria de aguas donde todas las precipitaciones convergen hacia un punto común de salida, como un río, lago o embalse. Es un parámetro fundamental que influye directamente en la cantidad de escurrimiento que puede generarse en la cuenca, y, por lo tanto, en la magnitud de los caudales (Gualdrón-Alfonso *et al.*, 2022). En este caso el área está limitada por las elevaciones topográficas llamadas divisores de agua que separan la cuenca del Complejo Cenagoso de otras. El proceso de delimitación de la cuenca se realizó en apoyo del programa de ArcMap 10.80.2, para ello se utilizó un DEM ALOS PALSAR con una precisión de 12.5 m de precisión, dentro del programa ArcMap, por medio de las herramientas consiguiendo tener el área de la cuenca siguiendo el diagrama en la figura 3.5.

AC= 2,991.54. km.

De acuerdo a la clasificación de la tabla 3.4, propuesta por Campos (1992), se puede clasificar la cuenca del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú como **intermedia grande**.

Tabla 3. 4 Clasificación tamaño de la cuenca.

Tamaño de la cuenca (km²)	Descripción
Menos de 25	Muy pequeña
25 a 250	Pequeña
250 a 500	Intermedia pequeña
500 a 2500	Intermedia grande
2500 a 5000	Grande
Más de 5000	Muy grande

Tomada de Campos (1992).

Perímetro de la cuenca (Pc)

El perímetro de una cuenca hidrográfica es igual a la longitud total del límite que separa esta de cuencas vecinas, también conocido como línea divisoria de aguas. Es un parámetro de gran utilidad en el análisis morfométrico ya que intervienen en la estimación de otros parámetros como la estimación del coeficiente de compacidad y permite caracterizar de forma general el sistema de drenaje (Gualdrón-Alfonso *et al.*, 2022). Al estar determinado por curvas naturales y sensibles a la resolución espacial, este perímetro no posee una longitud única y su uso puede afectar la objetividad de los índices, por ello, se reemplaza la curva real por una poligonal de segmentos definidos, lo que permite comparar cuencas de distintos tamaños de forma más objetiva (Barrera & Presutti, 2012).

Cuenca del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú

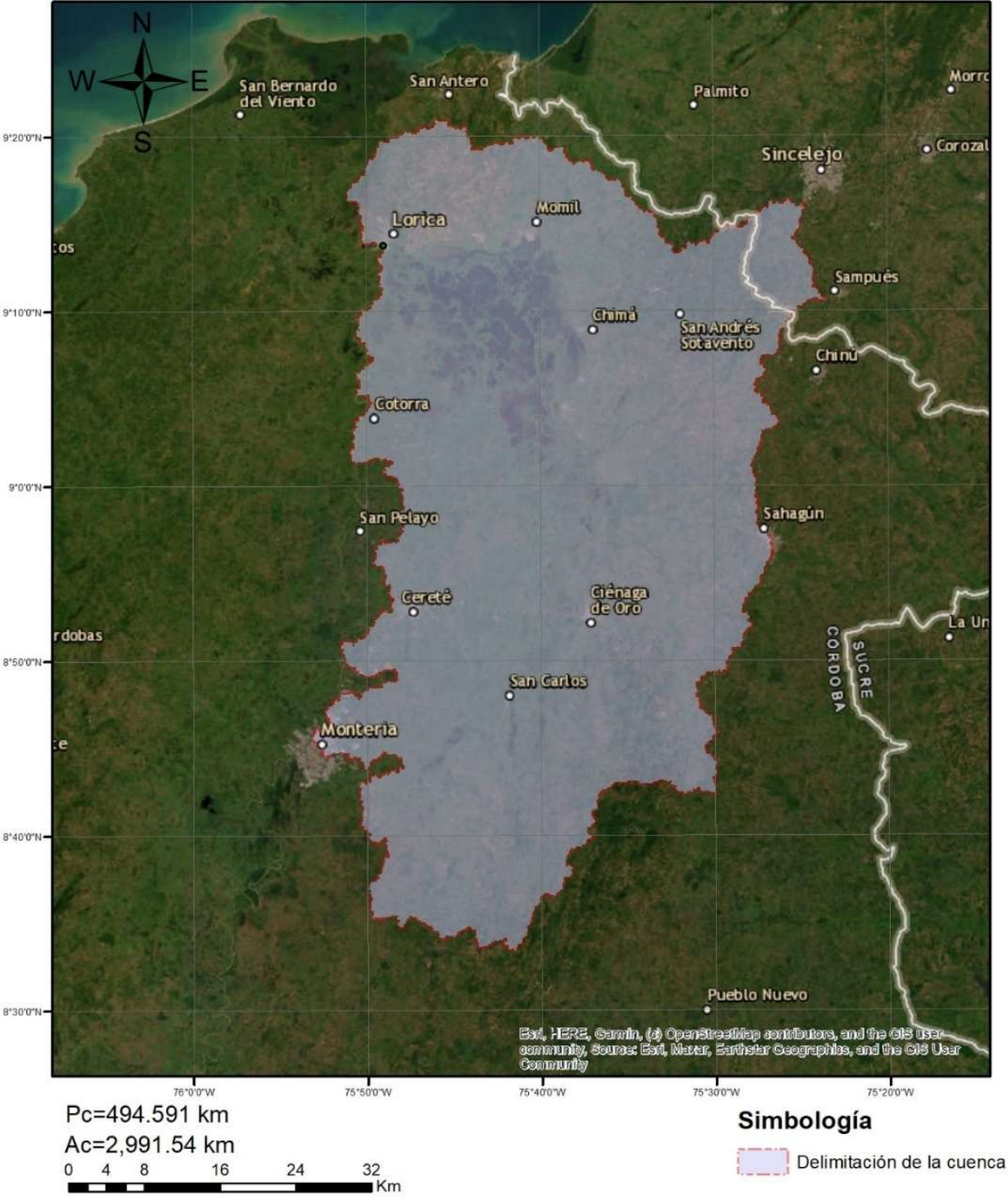


Figura 3.6 Cuenca del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú.

Un perímetro más extenso o irregular puede implicar una mayor complejidad en la red hidrográfica y una respuesta distinta ante eventos de precipitación. Una delimitación precisa del perímetro es esencial ya que errores en este parámetro afectarían la interpretación de parámetros derivados (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), 2016). El perímetro fue calculado a partir del polígono generado en ArcMap, al delimitar el área de la cuenca.

Pc = 494.59 km.

Longitud del Cauce Principal

La longitud del cauce principal de una cuenca se define como la distancia a lo largo del curso de agua principal, desde su punto más distante hasta el punto de salida de la cuenca (Guadrón-Alfonso *et al.*, 2022). Este parámetro es muy útil para el análisis del desarrollo de la red de drenaje y también se emplea en el cálculo de otros índices morfométricos. En este caso, el cauce principal identificado fue el del caño Aguas Prietas, el cual se puede apreciar en la figura 3.7, el cual actúa como el vínculo principal entre el río Sinú y el Complejo Cenagoso.

La medición se realizó a partir de la información procesada a partir de DEM ALOS PALSAR descargado y una capa de información vectorial de los escurrimientos de esta cuenca proporcionada por la Corporación Autónoma del Valle del Sinú Y San Jorge, mediante las herramientas de ArcMap, se midió a partir de estos datos el largo del cauce principal sumando el largo de este cauce desde su desembocadura hasta su origen aguas arriba.

Lcp= 110.07 km

Caño "Aguas Prietas"

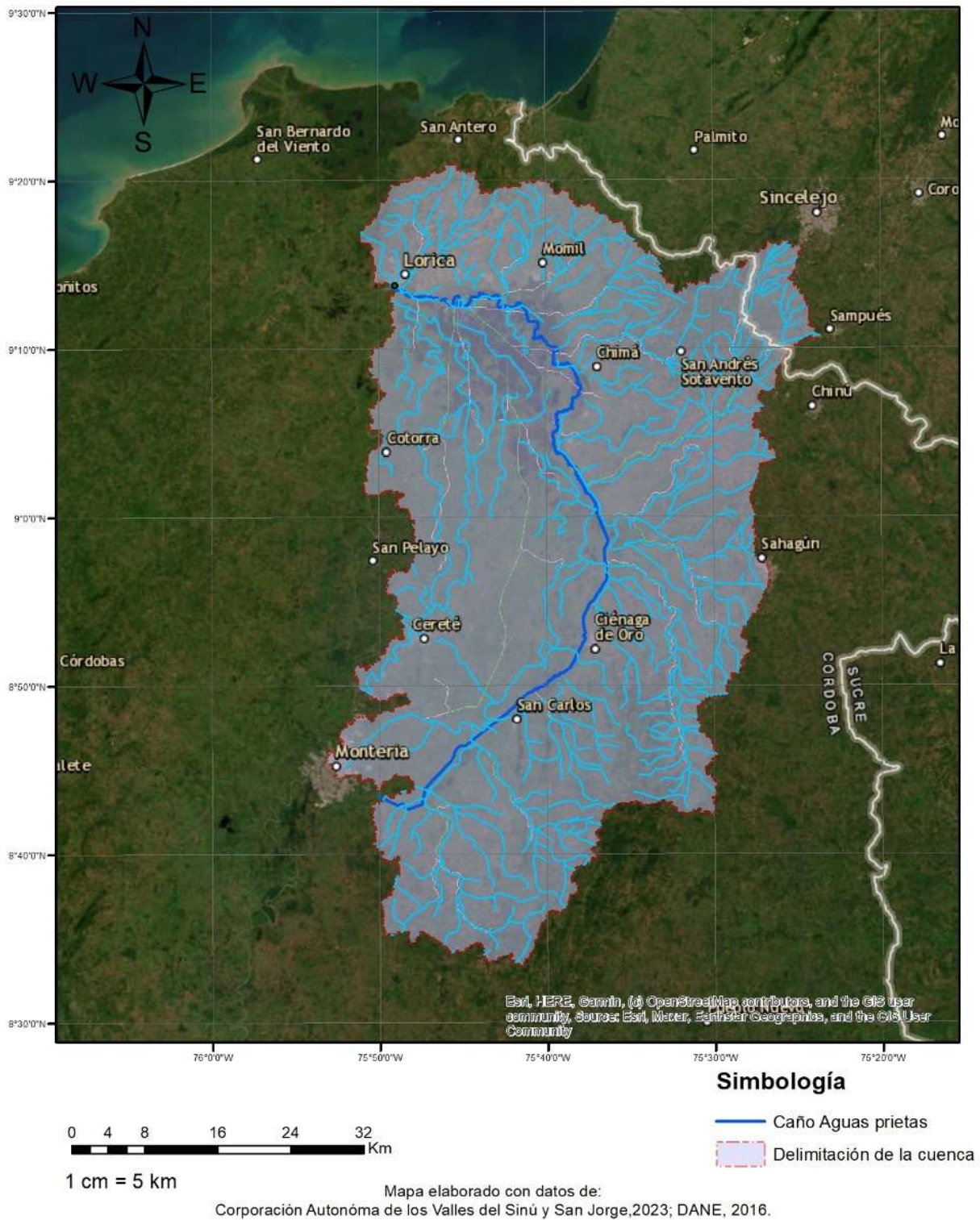


Figura 3.7 Cauce principal de la cuenca del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú.

Elaborado en base a CVS (2023).

Longitud de la cuenca (Lc)

La longitud de la a cuenca hidrográfica o también conocida como eje longitudinal, es la distancia en línea recta desde el punto más alejado del parte aguas hasta el punto de desfogue de la cuenca. Es un parámetro fundamental para el cálculo de índices morfométricos como la relación de elongación y el factor forma, ya que permite describir la configuración espacial general de la cuenca y su influencia en el comportamiento hidrológico (Gualdrón-Alfonso *et al.*, 2022). En el presente estudio, esta longitud fue medida utilizando herramientas de análisis en ArcMap, después de obtener el área de la cuenca del modelo digital de elevación, obteniendo el valor de **75.49 km**.

Coefficiente de Compacidad (Kc)

El coeficiente de Compacidad, es un índice morfométrico que compara la forma de una cuenca con la de un círculo perfecto, ya que esta es la figura geométrica más eficiente en términos de escurrimiento. Se define como el cociente adimensional resultante del perímetro de la cuenca y la circunferencia de un círculo con el área igual al tamaño de la cuenca expresado en km².

Este valor de la forma de la cuenca se ve afectando las características de la descarga de las escorrentías principalmente ante los eventos de flujo máximo.

El valor del coeficiente de compacidad determina como límite inferior la unidad, indicando entonces una cuenca circular y conforme su valor aumenta, este valor indicara mayor distorsión en cuanto a forma.

$$Kc = 0.282 \frac{Pc}{\sqrt{Ac}}$$

Donde:

Kc es el coeficiente de compacidad de Gravelius.

Pc es el perímetro de la cuenca en km.

Y Ac es el área de la cuenca en km².

Realizando la sustitución de la formula por los valores obtenidos se obtiene la siguiente ecuación:

$$Kc = 0.282 \frac{494.59 \text{ km}}{\sqrt{2991.54 \text{ km}}} = \mathbf{2.55}$$

Para este caso en particular, de acuerdo a la tabla 3.5, por tener un valor de **2.55**, la cuenca pertenece a la Clase III Oval – Obliga a rectangular – Oblonga. Esto sugiere una morfología alargada elongada, lo que implica una menor eficiencia en el drenaje y, en consecuencia, una mayor dispersión temporal del escurrimiento superficial, lo cual de acuerdo a Guevara Gutiérrez *et al.*, (2019) influye directamente en la respuesta del sistema. La forma de la cuenca según este parámetro puede estar relacionada con la trayectoria del caño Aguas Prietas y con la presencia de barreras que modifican la conectividad de este y las ciénagas con el río Sinú.

Tabla 3. 5 Clasificación de forma de cuenca.

Clase de forma	Índice de Compacidad (Kc)	Forma de la cuenca
Clase I	1.0 a 1.25	Casi redonda a oval-redonda
Clase II	1.26 a 1.50	Oval-redonda a oval oblonga
Clase III	1.51 a más de 2	Oval-Oblonga a rectangular-Oblonga

Adaptado de Campos (1992).

Factor Forma (Rf)

La relación forma o factor forma, es un parámetro que expresa la proporción entre el área de la cuenca y el cuadrado de la longitud de su cauce principal. Este parámetro mide la tendencia de la cuenca hacia las avenidas rápidas, intensas o lentas según el factor de forma tienda hacia valores extremos

(Gualdrón-Alfonso *et al.*, 2022). Los valores bajos menores a 0.5 indican cuencas alargadas, por ende, con respuestas hidrológicas más tenues y con menos tendencia a crecidas súbitas.

De acuerdo a la siguiente tabla 3.6, donde se muestra la clasificación a en base a este parámetro, propuesta por Campos (1992), la cuenca del complejo cenagoso pertenece al tipo ligeramente achatada y se obtiene mediante la siguiente relación:

$$Rf = \frac{Ac}{Lcp^2}$$

Donde:

Ac es el área de la cuenca expresada en km².

Lcp es la longitud del cauce principal expresado en km.

Sustituyendo los valores de la ecuación, se encontró que el valor **Rf = 0.29**. Esta forma podría tener implicaciones hidrológicas como mayor retención de agua y un desplazamiento más lento del flujo hacia costas bajas. En ecosistemas como el complejo cenagoso, esta condición puede influir en los tiempos de permanencia del agua y la conectividad hídrica en los caños.

Tabla 3. 6 Clasificación de la cuenca de acuerdo factor forma.

Rangos de Factor forma	Clases de forma
0.01 –a 0.18	Muy poco achatada.
0.18 a 0.36	Ligeramente achatada.
0.36 a 0.54	Moderadamente achatada.

Adaptado de Campos (1992).

Relación de elongación (Re)

La relación de elongación es un índice morfométrico que describe a la forma general de una cuenca hidrográfica, que la compara con la forma de un círculo ideal (Gualdrón-Alfonso *et al.*, 2022). Se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$\text{Re} = 1.1284 \frac{\sqrt{A_c}}{L_c}$$

Donde:

Re= Relación de elongación.

A_c= Área de la cuenca.

L_c= Longitud de la cuenca.

Este índice fue introducido por Schumm (1956), como una herramienta para evaluar la morfología de las cuencas en relación con su respuesta hidrológica. El cociente suele variar entre el 0.60 y el 1 para una amplia variedad de climas y medios geológicos. Cuencas con valores cercanos a 1 tienden a ser más circulares y a tener relieves bajo o moderado, con pendientes suaves y el escurrimiento se distribuye de forma más uniforme. Por otro lado, valores bajos, menores a 0.8, se asocian con cuencas alargadas que se desarrollan en terrenos más escarpados con pendientes más pronunciadas y relieves más marcados (Gualdrón-Alfonso *et al.*, 2022; Strahler, 1964).

$$\text{Re} = 1.1284 \sqrt{2991.54 \text{ km}^2 / 75.4938 \text{ km}}$$

$$\text{Re} = 0.817$$

Con este resultado podemos entender que se trata de una cuenca sin pendientes pronunciadas, ya que valores cercanos a uno indican relieve bajo, lo cual permite escoger el método de distribución la precipitación por medio de polígonos de Thiessen.

Relación de circularidad (Rc)

La relación de circularidad es un parámetro morfométrico que también evalúa la similitud entre la forma de una cuenca y la de un círculo. Valores cercanos a 1 indican mayor parecido a un círculo, lo que se asocia a escurrimientos más rápidos y homogéneos, valores cercanos a 0.785 nos indican una cuenca con forma cuadrada. Valores más bajos reflejan cuencas alargadas con drenajes más lentos e indican formas descompuestas alargadas. Este factor aporta a la interpretación de avenidas que forman en la cuenca y puede ser útil para predecir el tiempo de respuesta que tendrá la cuenca entre el agua captada arriba y el punto de desfogue (Gualdrón-Alfonso *et al.*, 2022; Strahler, 1964). Se obtiene mediante la siguiente relación.

$$Rc = \frac{4\pi Ac}{Pc^2}$$

Donde:

Ic= Índice de circularidad.

Ac= Área de la cuenca en km².

. Pc= Perímetro de la cuenca.

Sustituyendo de la ecuación obtenemos:

$$Rc = \frac{4\pi 2991.54}{494.59^2}$$

Rc = 0.15, clasificándose como irregular a alargada.

Este resultado sugiere una cuenca con un contorno altamente irregular. La baja circularidad se puede deber a la influencia de la red de caños secundarios y la presencia de ciénagas laterales. Refleja un sistema amplio y con formas naturales fragmentadas, con un comportamiento típico de un humedal

Densidad de drenaje (Dd)

La densidad de drenaje es un parámetro morfométrico que expresa la relación entre la longitud total de todos los cauces y el área de la cuenca, el valor resultante muestra la eficiencia del drenaje de esta para dar salida a los escurrimientos superficiales (Gualdrón-Alfonso *et al.*, 2022; Strahler, 1964).

La fórmula es la siguiente:

$$Dd = \frac{Ls}{Ac}$$

Donde:

Dd es la densidad de drenaje,

Ac es el área de la cuenca en km² y,

Ls es la longitud de las escorrentías en km.

Se obtuvieron las medidas de los cauces con ayuda del programa ArcMap 10.8, teniendo un valor total de longitud de escorrentías (Ls) de 1,104.88 km, siendo un total de 244 escorrentías, al sustituir los valores en la formula se obtuvo **Dd= 0.37**.

Este resultado es coherente con la morfología plana del terreno, la baja pendiente y la presencia de humedales interconectados, los cuales favorecen la infiltración y retención superficial, reduciendo así los cauces definidos. Esto se confirma en la tabla 3.7, donde se sitúa como de una densidad de drenaje baja.

Tabla 3. 7 Clasificación de densidad de drenaje (Dd).

Clase	Rango de densidad
Baja	0.1 a 1.8
Moderada	1.9 a 3.6

Adaptado de Campos (1992).

Además de asociarse a la infiltración alta, este valor está relacionado a procesos de evapotranspiración, principalmente por el flujo lento o estancado que se puede dar en las ciénagas y la vegetación acuática, sobre todo en regiones cálidas como el caribe colombiano. En zonas tropicales, la interacción entre las altas temperaturas y el nivel freáticos casi en la superficie favorece aún más a la evapotranspiración (Mitsch & Gosselink, 2015).

Densidad de corrientes (Ff)

La densidad de corrientes o también conocida como frecuencia de corrientes es un parámetro que representa el número total de cauces por unidad de área de cuenca (Gualdrón-Alfonso *et al.*, 2022), se representa matemáticamente en la siguiente formula:

$$Ff = \frac{Ns}{Ac}$$

Donde:

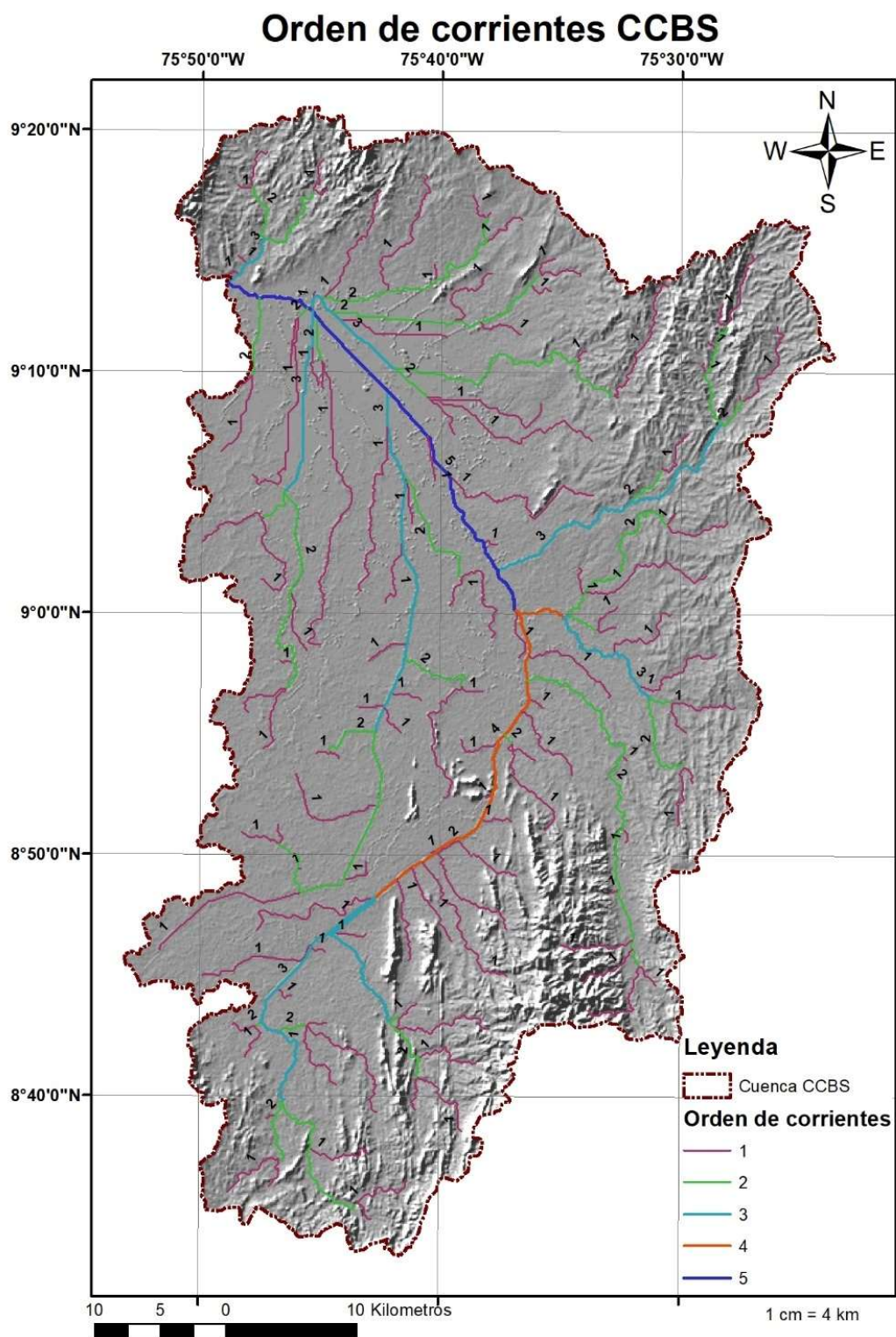
ff es la densidad de escorrentías,

Ac es el área de la cuenca en km², y,

Ns es el número de escorrentías.

Este índice refleja el grado de desarrollo de la red de drenaje de la cuenca y se ve afectado por factores como el clima, la litología, la pendiente, el uso de suelo y el tipo de cobertura vegetal.

Se contabilizaron 244 cauces dentro de la cuenca, en un área de 2,991.54 km², por lo que el valor de densidad de corrientes es de **0.08**. Este valor es considerablemente bajo y poco ramificado, lo cual es típico de regiones con topografía plana, elevada retención hídrica y predominancia de humedales. Esto también nos da indicios de que es una cuenca donde el escurrimiento superficial tiene una velocidad lenta y que existen zonas con mayor permanencia de agua en la superficie.



Elaborado por Adrian Blancas Islaas

Figura 3. 8 Orden de corrientes del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú. Mapa elaborado en base a DEM ALOS PALSAR de 12.5 m

Orden de la cuenca.

El orden de la cuenca es un parámetro estructural que permite clasificar la jerarquía de los cauces dentro de una cuenca hidrográfica, con base en su posición relativa dentro de la red de drenaje. El método más utilizado es el propuesto por Strahler (1964), donde los cauces que no reciben tributarios son de primer orden, cuando dos de estos cauces se unen se forma uno de orden superior y así sucesivamente, mientras que cauces de diferente orden se encuentran, prevalece el de orden mayor. Este sistema permite analizar la madurez geomorfológica de la red y su capacidad para concentrar el flujo superficial (Gualdrón-Alfonso *et al.*, 2022).

En este análisis, la red fluvial de la cuenca es de orden 5, catalogándola como del tipo alta y cuenta con 244 escorrentías. Tiene alrededor de 1104.68 km de longitud en la suma de todas las escorrentías, y tales se pueden observar en la figura con la longitud y los escurrimientos detectadas a partir de DEM con el que se ha trabajado. Esta red puede considerarse como moderadamente desarrollada, muestra además al caño Aguas Prietas como eje principal del sistema, puede verse con más detalle el orden de la red en la figura 3.8.

Tiempo de Concentración (T_c)

El tiempo de concentración puede entenderse como el intervalo que tarda una gota en desplazarse desde el punto más alejado de la cuenca hasta el punto de salida, además, es un parámetro clave para caracterizar la respuesta hidrológica ante eventos de precipitación. Para cuencas con superficie extensa y topografía suave como la del Complejo Cenagosos del Bajo Sinú, el T_c se puede estimar mediante la fórmula de Giandotti, la cual considera el área de la cuenca, la longitud del cauce principal y la diferencia altimétrica entre los extremos de la cuenca (Chow *et al.*, 1988).

La fórmula de Giandotti para este cálculo es la siguiente:

$$T_c = \frac{4 * (Ac)^{0.5} + (1.5 L_{cp})}{0.8 (H_{max} - H_{min})}$$

Donde:

Ac es el área de la cuenca.

Lcp es la longitud del cauce principal.

Hmax es la cota más alta que alcanza el cauce principal.

Hmin es la cota mínima donde desfoga el cauce principal.

Sustituyendo estos valores por los de la cuenca del Complejo Cenagoso, la formula queda de la siguiente forma:

$$T_c = \frac{4 * (2991.54 \text{ km})^{0.5} + 1.5 * 110.07 \text{ km}}{0.8 (65.6 - 0)} = 7.31$$

Como resultado se obtuvo un valor **de 7.31 horas**, lo cual es un valor moderadamente alto, coherente con las características fisiográficas de la región. Esta estimación sugiere una respuesta lenta típica de cuencas en planicie aluvial, donde el escurrimiento se desplaza con poca energía. Es una condición relevante para la modelación hidrodinámica, ya que implica que los pulsos de agua generados por eventos de precipitación podrían tardar varias horas en impactar los niveles de las ciénagas en el complejo.

Los parámetros morfométricos analizados en este subtítulo permiten la caracterización de la cuenca del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú, situándola como una cuenca de gran tamaño con un contorno irregular y una morfología alargada. Los índices aquí analizados confirman que se trata de una

cuenca con bordes poco definidos y que tiene una red de drenaje que responde de forma lenta y distribuida. Esto es muy importante para comprender el comportamiento hidrológico del sistema y para el desarrollo de modelaciones más precisas en capítulos posteriores. En la tabla 3.8, se resumen los parámetros analizados, junto con los comentarios respectivos para los valores encontrados.

Tabla 3.8 Parámetros morfológicos de la cuenca del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú.

Parámetro	Símbolo	Valor	Comentario
Área de la cuenca	Ac	2,991.54 km ²	Cuenca intermedia a grande
Perímetro	Pc	494.59 km	Contorno irregular
Longitud del cauce principal	Lcp	110.07 km	Cauce principal sinuoso
Longitud de la cuenca	Lc	75.49 km	Extensión longitudinal moderada
Coeficiente de compacidad	Kc	2.55	Forma irregular o alargada
Factor de forma	Rf	0.29	Cuenca alargada
Relación de elongación	Re	0.817	Forma ligeramente elongada
Relación de circularidad	Rc	0.15	Contorno muy alejado del círculo ideal
Densidad de drenaje	Dd	0.37 km/km ²	Red de drenaje poco densa
Frecuencia de corrientes	Ff	0.08 cauces/km ²	Baja ramificación del drenaje
Orden máximo de corriente	—	5	Red de drenaje moderadamente desarrollada
Tiempo de concentración (Giandotti)	Tc	7.31 h	Respuesta hidrológica moderada

3.2.3 Análisis altitudinal y pendiente

Rango altitudinal de la cuenca

La cuenca hidrográfica del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú presenta un rango altitudinal que va desde los **0 metros** hasta una altitud máxima de aproximadamente 350 metros sobre el nivel del mar. Esta variación altitudinal influye directamente en la energía potencial del sistema y en la distribución espacial de los flujos de escorrentía, la erosión y el transporte de sedimentos. Las zonas más altas funcionan como generadoras de escorrentía, mientras que las más bajas como de acumulación, almacenamiento e intercambio hídrico. Los gradientes altitudinales dentro de una cuenca son determinantes para comprender su comportamiento hidrológico y morfodinámico.

Tabla 3. 9 Distribución del área de la cuenca por intervalos.

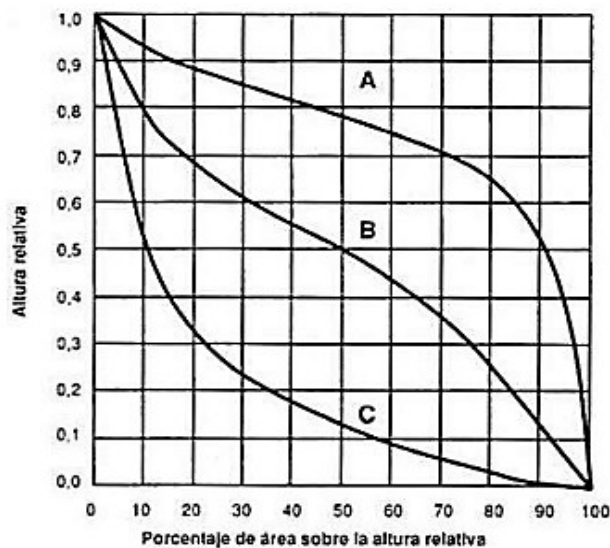
Intervalo altitudinal (m)	Área (km²)	Área acumulada (km²)
0 - 50	2,100.97	2,100.97
51-100	578.04	2,679.01
101-150	216.83	2,895.84
151-200	77.46	2,973.30
201-250	13.70	2,986.99
251-300	3.96	2,990.85
301-350	0.56	2,991.51
>350	0.03	2,991.54

Elaboración propia con base en el análisis del DEM ALOS PALSAR.

La tabla 3.9 muestra la distribución del área de la cuenca del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú por intervalos. Se observa como cerca del 70% del área total se encuentra por debajo de los 100 metros sobre el nivel del mar, lo que refleja el predominio de zonas bajas y planas. Solamente el 1% de la cuenca supera los 250 metros de altitud y, menos del 0.1% alcanza valores, mayores a los 350 m. Esta asimetría altitudinal sugiera una red de drenaje débilmente jerarquizada con tendencia al almacenamiento de agua superficial y procesos de escurrimiento lentos.

3.2.4 Curva hipsométrica

La curva hipsométrica es una herramienta que se utiliza para describir la distribución del área de una cuenca en función de su altitud, con lo que se puede identificar su grado de disección, nivel de evolución geomorfológica y forma de relieve (Strahler, 1964). Este tipo de análisis permite inferir características como la capacidad de retención hídrica, la generación de escorrentía y la susceptibilidad del sistema a la erosión (Pike & Wilson, 1971). Para este caso de estudio, la cuenca del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú, la curva hipsométrica muestra que más del 70% del área se encuentra por debajo de los 100 metros sobre el nivel del mar, de lo que se puede inferir que a un relieve plano. Esta es una configuración típica de humedales de llanura aluvial, donde predominan pendientes suaves, baja energía hidráulica y una alta tendencia a procesos de inundación y sedimentación.



Curva A: refleja una cuenca con gran potencial erosivo (fase de juventud).

Curva B: es una cuenca en equilibrio (fase de madurez).

Curva C: es una cuenca sedimentaria (fase de vejez).

Figura 3.9 Clasificación de la curva hipsométrica. Tomada de Strahler (1964).

Como se puede ver en la figura 3.9 a partir de la forma que tome la curva, es posible determinar el grado de madurez de esta. En este caso, la curva obtenida, en la figura 3.10, asemeja su forma al tipo C, de las propuestas por Strahler (1964). Esto indicaría una cuenca en periodo de vejez, caracterizada por tener un relieve muy plano y una alta proporción de área en sus cotas bajas. Esta forma de curva

refleja también un sistema sedimentario con baja carga hidráulica lo cual coincide con los demás parámetros analizados.

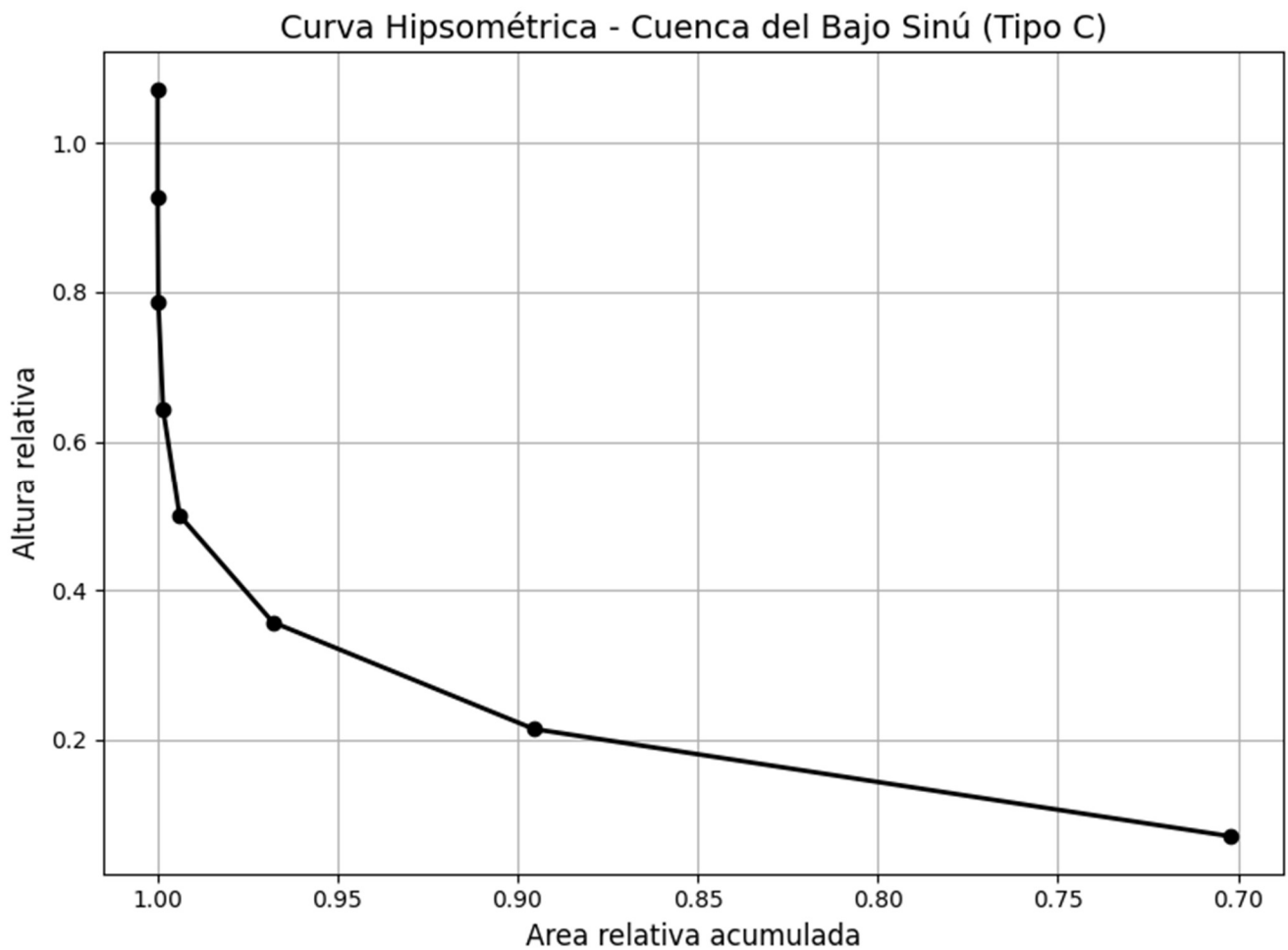


Figura 3.10 Curva hipsométrica de la cuenca del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú. Elaboración propia.

3.2.5 Pendiente del cauce principal

La pendiente del cauce principal representa la relación entre el cambio de elevación y la longitud del tramo fluvial, y constituye un parámetro fundamental en el análisis de una cuenca, ya que este influye en la velocidad del flujo, la capacidad erosiva, la energía hidráulica disponible y el transporte de sedimentos (Chow *et al.*, 1988). Para la estimación de este parámetro, se aplicó el método Taylor

Schwarz, el cual considera la división del cauce principal en tramos de igual diferencia altimétrica, calculando la pendiente parcial en cada tramo aplicando una media cuadrática ponderada en función a la longitud de cada segmento (Taylor & Schwarz, 1952). Esta técnica resulta adecuada en contextos de topografía suave, como es el caso del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú. Ya que permite una representación precisa de las variaciones locales del relieve y su efecto en el régimen del flujo.

Para el cálculo de la pendiente, previamente marcadas las curvas de nivel se debe contar la distancia del cauce principal entre cada cota, esto, graficando el eje x mientras que en las y la altura al doble. Para la última línea es el nivel donde está el desfogue del parte aguas

El método supone la siguiente formula:

$$Scp = \left[\frac{Lcp}{\frac{L1}{\sqrt{S1}} + \frac{L2}{\sqrt{S2}} + \frac{L3}{\sqrt{S3}} + \dots + \frac{Ln}{\sqrt{Sn}}} \right]^2$$

Donde:

Lcp es la longitud del cauce principal

Ln son las longitudes para cada sección entre cotas, y,

Sn, son las pendientes parciales entre cada longitud.

Sustituyendo los valores la ecuación queda de la siguiente forma:

$$Scp = \left[\frac{110,069.53 \text{ m}}{\sqrt{\frac{915.72 \text{ m}}{65.6 \text{ m} - 60 \text{ m}}} + \sqrt{\frac{5,230 \text{ m}}{60 \text{ m} - 50 \text{ m}}} + \sqrt{\frac{2,997.62 \text{ m}}{50 \text{ m} - 40 \text{ m}}} + \sqrt{\frac{3,409.11 \text{ m}}{40 \text{ m} - 30 \text{ m}}} + \dots + \right]^2$$

$$Scp = \left[\frac{110,069.53 \text{ m}}{\frac{7,731.97 \text{ m}}{\sqrt{\frac{30 \text{ m} - 20 \text{ m}}{7,731.97 \text{ m}}}} + \frac{6,755.58 \text{ m}}{\sqrt{\frac{20 \text{ m} - 10 \text{ m}}{6,755.58 \text{ m}}}} + \frac{83,029.55 \text{ m}}{\sqrt{\frac{10 \text{ m} - 0 \text{ m}}{83,029.55 \text{ m}}}}} \right]^2$$

$$Scp = 0.000180073$$

3.2.6 Evapotranspiración real.

La evapotranspiración real (ETR) es el proceso mediante el cual el agua contenida en el suelo se transfiere a la atmósfera por medio de la evaporación directa desde la superficie terrestre y la transpiración de la vegetación. Es un componente fundamental dentro del balance hídrico de una cuenca, ya que representa una pérdida significativa del agua disponible y regula a la cantidad de escurrimiento superficial y de recarga subterránea a diferencia de la evapotranspiración potencial, la ETR refleja las condiciones reales del sistema edafoclimático a partir de las limitaciones de humedad del suelo o coberturas vegetales. Su estimación es clave para la planificación del uso del agua, el diseño de infraestructura hidráulica y la gestión de ecosistemas sensibles como humedales (Chow, Maidment & Mays, 1988; Allen *et al.*, 1998).

3.2.7 Método de Turc

En este estudio, la evapotranspiración real fue estimada mediante el método de Turc por su simplicidad y buen desempeño en regiones húmedas, como lo es el Caribe Colombiano, donde la temperatura media anual y la precipitación cumplen con los rangos de este modelo (Allen *et al.*, 1998; Chow *et al.*, 1988). Este método está basado en observaciones realizadas en 254 cuencas distribuidas a lo largo de todos los climas del mundo y se basa en la siguiente expresión:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2}{L^2}\right)}}$$

Siendo $L = 300 + 25 T + 0.05 T^3$

P es la precipitación en milímetros y,

T es la temperatura en grados Celsius.

La limitación de la formula esta que para $P < 0.31L$ daría una ETR mayor que la precipitación por lo tanto en tales casos se deberá considerar $ETR = P$. Primero se calculó L para verificar si cumplía con la condición:

$$L = 300 + 25 (27.81) + 0.05 (27.81)^3$$

$$L = 2070.486354$$

Para la condición $0.31 L = 641.850 \text{ mm}$, siendo que la precipitación es mayor, por lo que la fórmula es válida. Entonces:

$$ETR = \frac{1386.35}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{1386.35^2}{2070.48^2}\right)}}$$

$$\mathbf{ETR = 1,193.92 \text{ mm/año}}$$

Este valor indica que aproximadamente un 86.1 % de la precipitación anual se devuelve a la atmosfera como evaporación o transpiración mientras que el resto contribuye al escurrimiento o almacenamiento. Esta cifra obtenida es coherente con las condiciones de alta humedad y cobertura vegetal de la región donde la vegetación natural, los cultivos y las ciénagas generan una demanda importante atmosférica importante del recurso hídrico (Chow *et al.*, 1988; Turc, 1961) .

3.2.8 Infiltración

El punto final para determinar dentro del balance hídrico es la infiltración, que puede definirse como el proceso mediante el cual el agua penetra el suelo a través de sus poros y fisuras, permaneciendo retenida en las capas del perfil edáfico contribuyendo a las reservas subterráneas. La tasa de infiltración depende de varios factores como la textura y estructura del suelo, la cobertura vegetal, el contenido de humedad previa y la intensidad de lluvia (Domínguez & Castañeda, 2006). La infiltración representa una fracción crucial que no contribuye directamente al escurrimiento superficial, pero tienen implicaciones clave en la recarga de acuíferos y en la disponibilidad hídrica del sistema.

Para su estimación, se empleó el enfoque de Balance hídrico residual, el cual considera la infiltración como la diferencia entre la precipitación media anual y la evapotranspiración real. En este caso, se decidió por no restar el escurrimiento superficial del balance debido a que parte del mismo es rápidamente devuelto a la atmosfera mediante la evapotranspiración en cuerpos de agua someros, como ocurre en el Complejo Cenagoso del Bajo Sinú. Esta decisión metodológica está respaldada por el criterio del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), que sugiere que este enfoque para zonas con altas saturación superficial (IDEAM,2010). De esta manera el valor de infiltración promedio anual se obtuvo mediante la siguiente diferencia:

$$\text{Infiltración} = \text{Precipitación} - \text{ETR} = 1386.35 - 1193.92 = \mathbf{192.43 \text{ mm/año}}$$

Teniendo el valor estimado de infiltración promedio anual de 192.43 mm, lo cual equivale al 13.9% de la precipitación total anual, siendo un valor coherente con las características del sistema hidro ecológico de la cuenca donde predomina el almacenamiento y la evapotranspiración sobre la recarga profunda.

3.3 Estimación de aportes superficiales

La avenida máxima probable se define como el mayor caudal que puede esperarse en una cuenca hidrográfica bajo condiciones meteorológicas extremas, generalmente se consideran como eventos de muy baja probabilidad de ocurrencia, pero con un gran potencial de daño.

3.3.1 Relación precipitación-Escurrimiento

Este método consiste en estimar el volumen de escurrimiento a partir de la precipitación media anual y un coeficiente de escurrimiento, el cual representa en porcentaje de precipitación que no se infiltra ni se evapora y fluye como escorrentía superficial (Chow,1994). Se basa en la fórmula:

$$Q = C * P$$

O bien para el volumen en metros cúbicos, $Q = C * P * A * 10^3$

Donde:

Q es el escurrimiento en m³

C es el coeficiente de escurrimiento adimensional

P es la precipitación media anual en milímetros y,

A es en área de la cuenca en km²

Se aplico este método empírico de relación precipitación escurrimiento ampliamente utilizado en estudios de balance hídrico a escala regional. Esta metodología permite una aproximación razonable del escurrimiento anual con base a coeficientes empíricos derivados de las características físicas de la subcuenca, como el uso del suelo, tipo de suelo y pendiente. Esta elección resulta apropiada dada la extensión de casi 3,000 km² de la cuenca, donde métodos como el SCS-CN, requerirían de adaptaciones por el tamaño de la cuenca.

3.3.2 Coeficiente de escurrimiento (C)

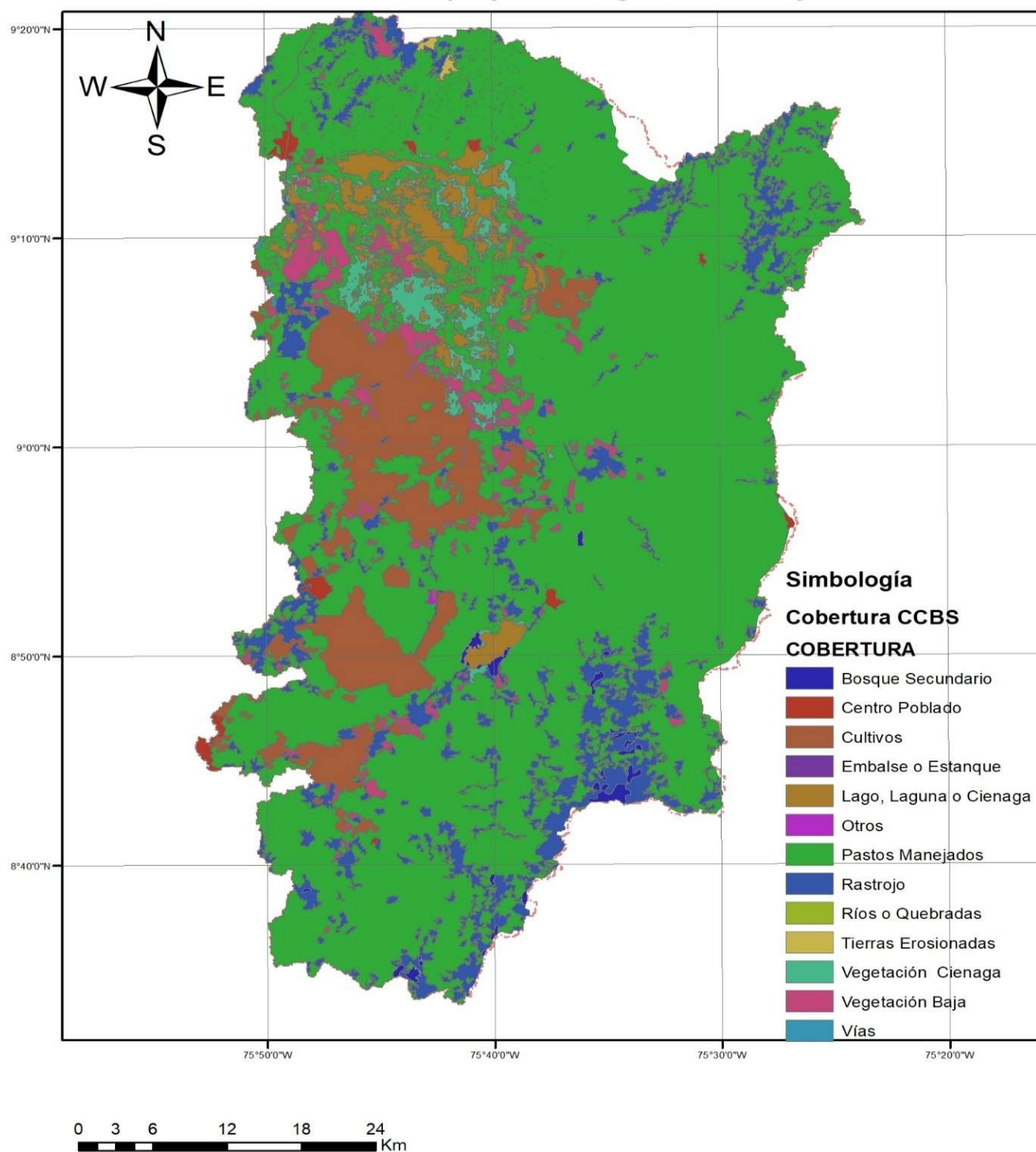
El coeficiente de escurrimiento (C) es un parámetro adimensional que representa la fracción de la precipitación total que se convierte en escorrentía superficial. Su valor depende principalmente de las características del terreno, tales como el tipo de cobertura vegetal, el uso de suelo, la pendiente, textura del suelo y el grado de impermeabilización. Valores cercanos a 0 indican una alta capacidad de infiltración mientras que los cercanos a uno son más impermeables.

Para obtener el coeficiente de escurrimiento se necesitan las cartas o datos vectorizados de cobertura vegetal y edafología, para este caso se cuenta con los datos vectorizados del Plan de manejo del Complejo Cenagoso proporcionado por la CVS, 2023. Con estos datos se puede obtener las áreas del tipo de suelo correspondiente a la vegetación que representan.

La cobertura del suelo se refiere a la composición física y biológica observable de la superficie terrestre en un momento determinado, incluye cuerpos de agua, vegetación, áreas urbanizadas, suelos desnudos, cultivos y construcciones La FAO (2000). la define como la biomasa vegetal o artificial que se encuentra dispersa sobre la superficie.

En la figura 3.11 se puede observar la cobertura de suelo que predomina en la cuenca del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú es la correspondiente a pastos manejados con un 70.2%. Esto refleja la vocación predominantemente ganadera, lo que también genera un mayor grado de compactación del suelo, reducción de la cobertura vegetal natural y un incremento en el coeficiente de escurrimiento. En menor medida siguen cultivos (9.8%) y rastrojos (9.7%), ambos de usos agrícola que también influyen en la dinámica del agua. Zonas de regulación del agua como ciénagas, lagunas y vegetación de ciénaga apenas representan un 5.9% del área total.

Cobertura Complejo Cenagoso del Bajo Sinú



Mapa elaborado con datos de:
Corporación Autónoma de los Valles del Sinú y San Jorge, 2023; DANE, 2016.

Figura 3. 11 Cobertura de Uso de Suelo de la cuenca del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú.

Tabla 3. 10 Cobertura de tipo de suelo por área en Km2 del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú.

Cobertura de suelo	Área en km²
Ríos o Quebradas	0.336468
Otros	0.57645
Embalse o Estanque	1.601705
Vías	2.250166
Tierras Erosionadas	2.78062
Bosque Secundario	13.762101
Centro Poblado	16.401542
Vegetación Ciénaga	64.5606
Vegetación Baja	94.111537
Lago, Laguna o Ciénaga	111.458609
Rastrojo	289.833179
Cultivos	294.365083
Pastos Manejados	2099.50256
Total, Cuenca	2991.54062

El listado completo con sus respectivas áreas se puede ver en la tabla 3.10. Estos resultados muestran que es un área con tendencia a escorrentía rápida, en eventos de lluvia intensa, lo que justifica el análisis del coeficiente de escurrimiento por tipo de cobertura.

El tipo de suelo, en términos edafológicos, se refiere a la clasificación de los suelos basad en sus propiedades físicas, químicas y morfológicas, las cuales constituyen directamente su comportamiento hidrológico, fertilidad y uso potencial. Esta clasificación permite identificar unidades edáficas con características comunes como textura, estructura, profundidad, drenaje, y contenido de materia orgánica. En Colombia, el instituto de Geografía Agustín Codazzi (IGAC) adopta una clasificación taxonómica basada en el sistema internacional de la FAO, utilizando abreviaturas que resumen órdenes y subórdenes, el conocimiento del tipo de suelo es fundamental para los estudios de escorrentía ya que influye en factores

como la infiltración, retención hídrica y capacidad de transmisión del agua en la cuenca (IGAC,2015; FAO,2006).

Para el análisis edafológico de la cuenca del Complejo cenagoso del Bajo Sinú la clasificación del tipo de suelo se puede apreciar en la figura 3.12 y en la tabla 3.11, donde se aprecia un claro predominio de suelos tipo Fluvisol, los cuales representan el 60% del área total. Estos suelos se desarrollan a partir de depósitos aluviales recientes, característicos de zonas bajas, planas y con influencia directa de cuerpos de agua. De acuerdo con la clasificación de la FAO, (2006), los Fluvisoles presentan una alta capacidad de retención hídrica y dinámica de escurrimiento influida por la cobertura del suelo vegetal y uso de suelo. Como paso siguiente, en base a la tabla 3.12, la cual es una adaptación con valores típicos de C dependiendo la cobertura de suelo, de Chow *et al.* (1988), Linsley *et al.* (1982), y el IMTA (2006), se les asigna valores de C a las distintas áreas de los tipos de suelo de la cuenca.

Tabla 3. 11 Edafología por área en Km2 del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú.

Código	Área (km²)	Taxonomía de suelo
Ksc	3.427043	Kastanozem cámbico
Ngbc	6.683799	Nitisol gleyico cámbico
Ngc	72.689917	Nitisol cámbico
Ngd	0.159845	Nitisol dístrico
Ngf	23.195132	Nitisol férrico
Ngs	336.531319	Nitisol sódico
Pgch	75.301627	Gleysol háplico
Pgco	96.231754	Gleysol cálcico óxico
Pgf	122.374878	Gleysol férrico
Pgsc	453.988795	Gleysol sódico cámbico
Qal	1800.95651	Fluvisol (depósito cuaternario reciente)

Edafología (Cuenca del Complejo Cenagoso del Bajo Siú)

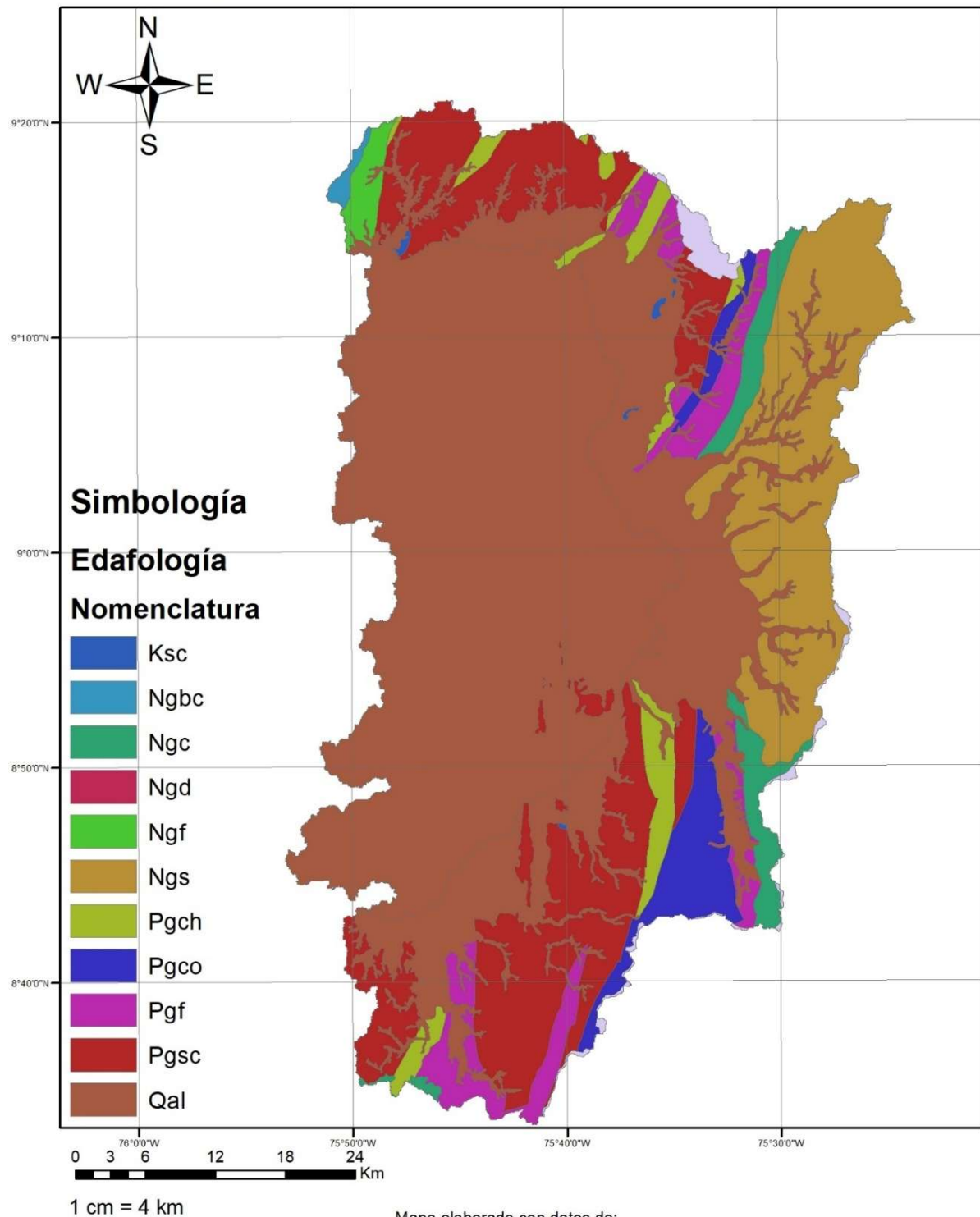


Figura 3. 12 Edafología de la cuenca del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú.

Tabla 3. 12 Coeficientes de escurrimiento según tipo de cobertura o uso de suelo.

Tipo de cobertura o uso del suelo	Descripción hidrológica	C mínimo sugerido	C máximo sugerido
Superficies pavimentadas / Zonas urbanas altas	Alta impermeabilización	0.7	0.95
Calles sin pavimentar / Tierra compactada	Media impermeabilización	0.6	0.85
Áreas urbanas residenciales (densidad baja)	Con jardines y aceras	0.3	0.5
Áreas urbanas residenciales (densidad alta)	Mayor impermeabilización	0.5	0.75
Pastos manejados	Buen drenaje	0.1	0.3
Pastizales densos	Suelos saturados	0.3	0.6
Cultivos en ladera	Compactación moderada	0.3	0.55
Cultivos en terreno plano	Con drenaje natural	0.2	0.4
Rastrojos / tierras descubiertas	Sin cobertura vegetal	0.4	0.65
Bosque denso	Alta infiltración	0.05	0.25
Bosque intervenido / secundario	Infiltración media	0.1	0.3
Humedales / ciénagas	Inundación frecuente	0.05	0.15
Suelo erosionado	Poca retención hídrica	0.45	0.7
Zonas industriales / parqueaderos	Superficies selladas	0.8	0.95

Finalmente, se hace un ponderado entre las áreas y el coeficiente C correspondiente a cada una aplicando la siguiente formula:

$$C_{media} = \frac{\sum(C_i * A_i)}{\sum A_i}$$

Donde:

C_i es el coeficiente de escurrimiento a cada clase de cobertura

A_i es el área en km² de cada clase.

Tabla 3. 13 Coeficiente C por grupo de cobertura de suelo.

Cobertura de suelo	Área en km ²	C	Justificación
Ríos o Quebradas	0.336468	0.95	Representan áreas saturadas con escurrimiento superficial inmediato.
Otros	0.57645	0.5	Valor intermedio, al desconocer la función real.
Embalse o Estanque	1.601705	0.05	Cuerpos de retención, la infiltración o escurrimiento es mínima por que almacenan agua.
Vías	2.250166	0.85	Infraestructura vial pavimentada, con poca infiltración
Tierras Erosionadas	2.78062	0.6	Suelos degradados con poca cobertura por lo que generan escurrimiento alto.
Bosque Secundario	13.762101	0.25	Suelos con alta cobertura vegetal, con infiltración moderada
Centro Poblado	16.401542	0.75	Alta densidad urbana como calles, techos y banquetas impermeables con escurrimiento alto.
Vegetación Ciénaga	64.5606	0.15	Alta capacidad de retención en humedales.
Vegetación Baja	94.111537	0.3	Patos bajos con moderada cobertura vegetación. Infiltración moderada.
Lago, Laguna o Ciénaga	111.458609	0.1	Cuerpos de agua que retienen escurrimiento superficial con flujo lento.
Rastrojo	289.833179	0.5	Residuos vegetales que protegen el suelo con escurrimiento moderado
Cultivos	294.365083	0.45	Suelos compactados por maquinaria y poca cobertura.
Pastos Manejados	2099.50256	0.3	Buen recubrimiento vegetal pero no tan eficiente como un bosque denso.

En la tabla 3.13 se asignan valores al coeficiente C, según la cobertura a la cual pertenecen, esto con el objetivo de tener un valor de C ponderado en función al área que ocupa un tipo de suelo dentro de la cuenca que se está analizando, estos valores se justifican según las coberturas de suelo que representan donde suelos con ríos representan área con los coeficientes más altos, esto por el área donde el agua fluye con mayor facilidad, coberturas como vías y centros poblados al tener superficies impermeables también tienen valores más altos del coeficiente de escurrimiento, mientras que coberturas como pastos, cultivos, y zonas con vegetación representan coeficientes más bajos al tener mayor capacidad de infiltrar el agua. Los valores obtenidos de la ponderación para el coeficiente de escurrimiento C, se muestran en la tabla 3.14.

Tabla 3. 14 Valores obtenidos para coeficiente de escurrimiento según cobertura de suelo.

Cobertura de suelo	Área en km ² (Ai)	Ci	Ai * Ci
Ríos o Quebradas	0.336468	0.95	0.3196446
Otros	0.57645	0.5	0.288225
Embalse o Estanque	1.601705	0.05	0.08008525
Vías	2.250166	0.85	1.9126411
Tierras Erosionadas	2.78062	0.6	1.668372
Bosque Secundario	13.762101	0.25	3.44052525
Centro Poblado	16.401542	0.75	12.3011565
Vegetación Ciénaga	64.5606	0.15	9.68409
Vegetación Baja	94.111537	0.3	28.2334611
Lago, Laguna o Ciénaga	111.458609	0.1	11.1458609
Rastrojo	289.833179	0.5	144.91659
Cultivos	294.365083	0.45	132.464287
Pastos Manejados	2099.50256	0.3	629.850768
Total, cuenca (ΣAi)	2991.54062	C ponderada=	0.32635549

El coeficiente de escurrimiento medio ponderado obtenido para la cuenca del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú fue de **0.32**, en términos más simples, se trata de un 32% de la precipitación total que cae sobre la cuenca, se convierte en escurrimiento superficial directo, mientras que el 68% restante se infiltra, se evapora o es retenido por la vegetación, el suelo o cuerpos de agua. Este valor refleja un comportamiento hidrológico intermedio, coherente con una cuenca que presenta una predominancia de pastos manejados, zonas agrícolas y coberturas naturales como humedales. La baja proporción de áreas urbanas o carreteras contribuye también a que el valor de C sea bajo. Con este cociente es posible estimar el volumen anual de escurrimiento, aplicando la siguiente formula:

$$Q = C * P * A * 10^3$$

Sustituyendo

$$Q = 0.32635549 * 1,386 * 2,991.54 * 10^3$$

$$Q = 1,353,505,970,$$

O bien

$$Q = C * P$$

$$Q = 0.3263 * 1386.354664 \text{ mm/año (1968-2023)}$$

$$Q = 452.44 \text{ mm/año (1968-2023)}$$

Con base en la precipitación media anual de 1386.35 mm previamente obtenida y con un coeficiente ponderado de escurrimiento de **0.32** aproximadamente se obtuvo un valor de escurrimiento de 452.44 mm/año para el periodo de 1968 a 2023 para la cuenca del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú. Este valor representa la fracción de lluvia que no se infiltra ni se evapora, sino que fluye hacia los cuerpos de agua. La cifra obtenida es coherente con las condiciones fisiográficas del terreno donde predominan pastos manejados y cultivos con más de 80% en ocupación del área, lo que favorece niveles intermedios de escurrimiento. Este resultado muestra una cuenca con una capacidad de retención e infiltración moderada típica de zonas con humedales. Este tipo de análisis es esencial para la comprensión de la dinámica hídrica de la zona, así como para el manejo de los recursos hídricos. Este escurrimiento se usa como referencia hidrológica de entrada al sistema, no como hidrograma directo.

3.3.3 Avenida máxima probable (AMP)

Las avenidas máximas de diseño, entre ellas la avenida máxima probable (AMP), son un elemento fundamental para evaluar la seguridad hidráulica de las presas y otras obras de infraestructura para el control de avenidas. Estas avenidas representan los caudales extremos que pueden presentarse bajo condiciones hidrometeorológicas severas, y su determinación es esencial para dimensionar adecuadamente obras de excedencias y garantizar que la estructura pueda operar de manera segura ante eventos extraordinarios (Arganis *et al.*, 2024).

En el presente estudio, la estimación de avenidas extremas adquiere un papel central debido a la necesidad de representar los flujos que puedan ingresar al Complejo Cenagoso del Bajo Sinú a través del caño Aguas Prietas bajo condiciones hidrológicas severas. La integración de estas avenidas en el modelo hidrodinámico EFDC permitirá evaluar el comportamiento del sistema ante escenarios de crecida poco frecuentes, pero potencialmente críticos, identificando como varía la distribución espacial del nivel del agua, las direcciones de flujo y los intercambios entre el complejo cenagoso y el río Sinú.

Métodos para la estimación de las avenidas extremas

La determinación de las avenidas máximas puede realizarse mediante diferente enfoque metodológicos, que van desde las relaciones empíricas basadas en curvas envolventes hasta modelos semi empíricos que utilizan información de intensidad de precipitación y parámetros de escurrimiento, además de modelos hidrológicos completos capaces de simular la respuesta dinámica de una cuenca ante tormentas severas. Para los fines del presente estudio, centrado en caracterizar el orden de magnitud de una avenida extrema dentro del balance hídrico regional, se adoptó únicamente el método empírico de Creager. Este enfoque permitiendo tener una aproximación razonable, ampliamente aceptado del caudal máximo probable sin requerir series históricas extensas, ni parametrizaciones detalladas, lo que resulta adecuado para cuencas de gran tamaño como el Complejo Cenagoso del Bajo Sinú.

Método de Creager

La curva de Creager se trata de un método empírico desarrollado por Creager, Justin y Hinds en 1945 a partir del análisis de numerosas crecidas máximas registradas en diferentes cuencas del mundo. Su objetivo es definir una envolvente hidrológica, es decir, un límite superior teórico del caudal máximo que puede producirse en una cuenca de área determinada bajo condiciones extremas. Debido a su naturaleza

conservadora este método se utiliza como una referencia comparativa en la evaluación de avenidas extremas. En su forma general, la curva de Creager se expresa como la siguiente ecuación:

$$Q_p = 46C_T A^{(0.894 A^{-0.048} - 1)}$$

Donde:

Q_p es el caudal pico máximo en $\text{pies}^3/\text{s}/\text{mi}^2$, A es el área de la cuenca en mi^2 , C_T es el coeficiente Creager asociado a diferentes niveles de severidad.

El Coeficiente C^T define la posición de la curva dentro del conjunto de crecidas históricas analizadas, valores bajos representan crecidas moderadas y valores altos corresponden a la curva envolvente que define el límite externo superior. Para este caso, se adopta la formulación correspondiente a una curva de alto crecimiento, la cual entrega valores superiores a los observados en la mayoría de las cuencas.

Debido a que la cuenca del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú tiene un área aproximada de $2,991.54 \text{ km}^2$, la ecuación de Creager permite obtener un valor máximo teórico del caudal que podría generarse bajo condiciones hidrometeorológicas extremas. Se seleccionaron los valores de $C_T = 30, 60$ y 100 , que corresponden a los niveles intermedio, alto y extremo dentro del espectro típico de Creager para cuencas tropicales de gran extensión. Esta selección permite cubrir un rango completo de posibles condiciones hidrológicas, incluir un escenario conservador para análisis de riesgo, evitar la sobrecarga de resultados redundantes. Para los alcances de este estudio, esto garantiza una representación adecuada de la variabilidad de avenidas extremas sin necesidad de incorporar la totalidad de las curvas. Otros valores del coeficiente de Creager, suelen aplicarse a cuencas mucho más pequeñas, en zonas áridas, regiones montañosas o estudios donde la variabilidad interanual es mucho mayor.

Dado que la fórmula de Creager previamente descrita utiliza el sistema de unidades americano, el primer paso para calcular las avenidas es convertir el área de la cuenca de kilómetros cuadrados a millas cuadradas.

$$A = 2,991.54 \text{ km}^2 = 1155.58 \text{ mi}^2$$

Ahora teniendo el área en millas cuadradas, se sustituyen los valores en la ecuación, quedando de la siguiente manera:

$$Q = 46 C_T 1,155.04^{(0.894 1,155.04^{-0.048} - 1)}$$

Se le asigno a C_T los valores de 30 60 y 100. Para fines prácticos del estudio, se muestran los resultados de aplicar esos coeficientes en la tabla 3.15, además se convirtieron los valores resultantes al sistema de unidades internacional. Finalmente se corrobora los valores con la gráfica original planteada por Creager (1941).

Tabla 3. 15 Valores obtenidos de avenida máxima probable

Coeficiente de Creager C_T	Q_p (ft³ / s / mi²)	Q_p (ft³ / s / mi²)	Caudal total Q (m³/s)
30	107.2	1.17	3,500
60	214.4	2.34	7,000
100	357.4	3.90	11,650

Estos resultados se consideran coherentes con el comportamiento hidrológico documentado con el río Sinú, donde las crecidas históricas han alcanzado valores del orden de 2,000 a 3,000 m³/s. Al extrapolar los caudales específicos al área total de la cuenca, los caudales máximos estimados, se ubican dentro del rango esperado para cuencas tropicales húmedas de tamaño similar, y son comparables con valores

extremos observados en sistemas fluviales del Caribe Colombiano. En este sentido, se puede asociar al calor de $C = 30$, con un evento severo plausible, $C = 60$, corresponde a una avenida muy severa, y $C = 100$, describe un escenario extremo. La progresión de estos valores permite caracterizar adecuadamente la respuesta potencial de la cuenca frente a tormentas de distinta intensidad y contribuya una base sólida para evaluar los efectos hidrodinámicos en el sistema lagunar.

Los valores obtenidos por este método, solo se mencionan como un referente teórico para definir los límites superiores de respuesta hidrológica y evaluar la vulnerabilidad del sistema bajo eventos de baja recurrencia. De esta forma, los caudales históricos permiten reproducir y analizar el comportamiento del complejo.

3.4 Identificación de periodos hidrológicos característicos (lluvia-sequía).

Para caracterizar la dinámica estacional del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú, se identificaron los periodos hidrológicos dominantes, a partir de datos históricos de precipitación y temperatura, así como de observaciones recientes, utilizando registros de 28 estaciones hidro climáticas del IDEAM. Con base a un balance hídrico previo de 1968 a 2023 se determinó que la precipitación promedio anual es de 1386 mm y la temperatura media anual oscila entre 26.9°C y 27.8°C , lo cual confirma la condición de clima tropical húmedo. A partir de la distribución mensual de la precipitación se definieron dos periodos hidrológicos principales, el periodo de lluvias de mayo a noviembre y el de secas de diciembre a abril, también se identificó un periodo de transición entre mayo y julio donde las lluvias presentan gran variabilidad interanual influenciada por eventos ENSO y cambios en la liberación de caudales en la represa URRÁ I.

Esta clasificación permitió seleccionar imágenes satelitales representativas de cada época, abril 30 para secas y noviembre 21 para lluvias lo cual permitió analizar la extensión y variación del espejo de agua en el Complejo Cenagoso.

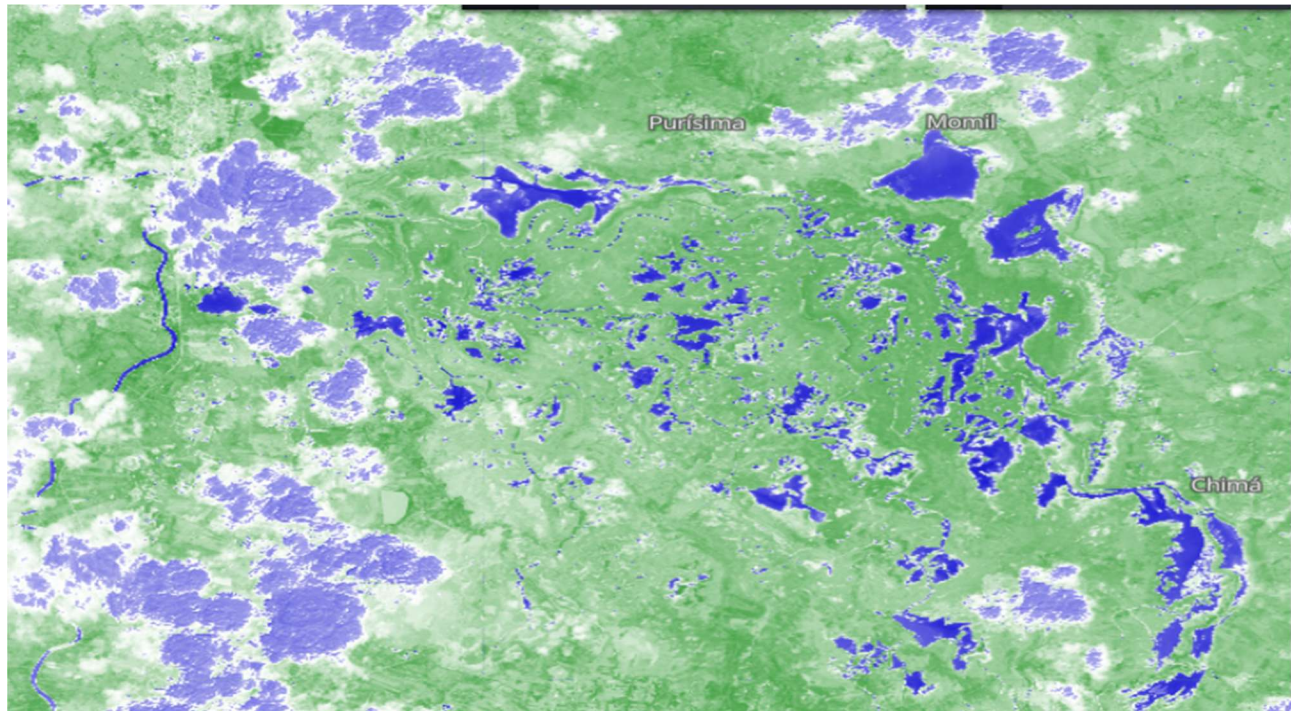


Figura 3. 13 Imagen satelital Sentinel con NDWI aplicado sobre el Complejo Cenagoso del Bajo

Sinú en noviembre del 2024. Tomado de EOS browser.

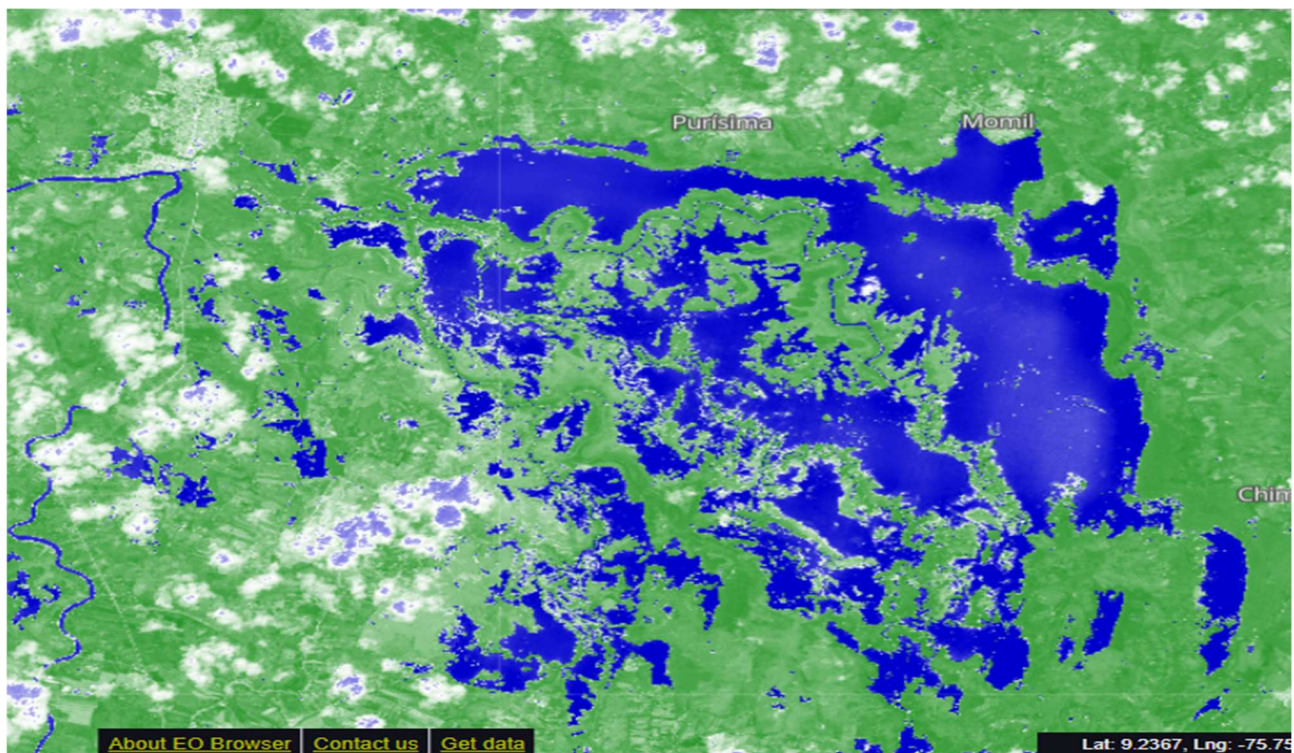


Figura 3. 14 Imagen satelital Sentinel con NDWI aplicado sobre el Complejo Cenagoso del Bajo

Sinú en abril del 2024. Tomado de EOS browser.

Para la obtención de las imágenes satelitales se realizó una búsqueda en el geo portal de Sentinel HUB EO browser, con el objetivo de encontrar el rango de fechas que mostrara una mejor visión de la superficie del terreno y que no tuviera una presencia notable de nubosidad. A tales imágenes se les aplico el Índice normalizado de agua (NDWI), una técnica de teledetección y percepción remota que permite identificar con mayor precisión los cuerpos de agua (Ver figura 3.13 y 3.14).

Con apoyo en la plataforma de Google Earth Engine, se aplicó algoritmo que se ve en la figura 3.15. El cual permite obtener la imagen satelital de la colección Copernicus S/2. Las imágenes obtenidas en formato geotiff, como se ve en las figuras 3.16, fueron procesadas en ArcMap donde se les realizo una clasificación, donde se asignó valores a los cuerpos de agua, a las nubes y a la superficie terrestre.

```

1 // Función para calcular el NDWI
2 function calculateNDWI(image) {
3   var ndwi = image.normalizedDifference(['B3', 'B8']).rename('NDWI');
4   return ndwi.updateMask(ndwi); // Aplicar máscara para ignorar píxeles nulos
5 }
6
7 // Función para seleccionar bandas y calcular el NDWI
8 function processImages(startDate, endDate) {
9   var collection = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2')
10     .filterDate(startDate, endDate)
11     .filterBounds(geometry)
12     .filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 20)) // Menos del 20% de nubosidad
13     .select(['B3', 'B8']); // Seleccionar únicamente las bandas necesarias
14
15   var composite = collection.median(); // Crear una composición para reducir ruido
16   var ndwi = calculateNDWI(composite); // Calcular NDWI
17   var waterMask = ndwi.gt(0); // Máscara: valores NDWI > 0 indican agua
18   return waterMask;
19 }
20
21 // Periodos de tiempo
22 var period1 = {start: '2024-11-19', end: '2024-11-25'};
23 var period2 = {start: '2024-05-14', end: '2024-05-16'};
24
25 // Procesar imágenes para ambos periodos
26 var waterMask1 = processImages(period1.start, period1.end); // Agua en el periodo 1
27 var waterMask2 = processImages(period2.start, period2.end); // Agua en el periodo 2
28
29 // Visualizar resultados
30 Map.centerObject(geometry, 10);
31 Map.addLayer(waterMask1, {palette: ['blue']}, 'Agua en el periodo 1');
32 Map.addLayer(waterMask2, {palette: ['cyan']}, 'Agua en el periodo 2');
33
34 // Exportar resultados
35 Export.image.toDrive({
36   image: waterMask1,
37   description: 'Agua_periodo1',
38   region: geometry,
39   scale: 10,
40   crs: 'EPSG:4326', // Sistema de coordenadas (opcional)
41   fileFormat: 'GeoTIFF'
42 });
43
44 // Exportar Agua del Periodo 2
45 Export.image.toDrive({
46   image: waterMask2,
47   description: 'Agua_periodo2',
48   region: geometry,
49   scale: 10,
50   crs: 'EPSG:4326', // Sistema de coordenadas (opcional)
51   fileFormat: 'GeoTIFF'
52 });

```

Figura 3. 15 Código en Google Earth Engine para obtener imágenes satelitales con el filtro

NDWI en formato GEOTIFF.

Finalmente, se convirtió la imagen a polígono para cuantificar el área correspondiente al cuerpo del agua. Este proceso se puede ver en las figuras 3.17 y 3.18. Con esta información, se puede tener un primer alcance de la variación de la superficie del agua durante los cambios de periodos hidrológicos en el Complejo Cenagoso. La diferencia de las áreas se puede ver en la tabla 3.16. Para el año del 2024, se encontró un cambio de superficie entre ambas épocas de 74.67 km2.

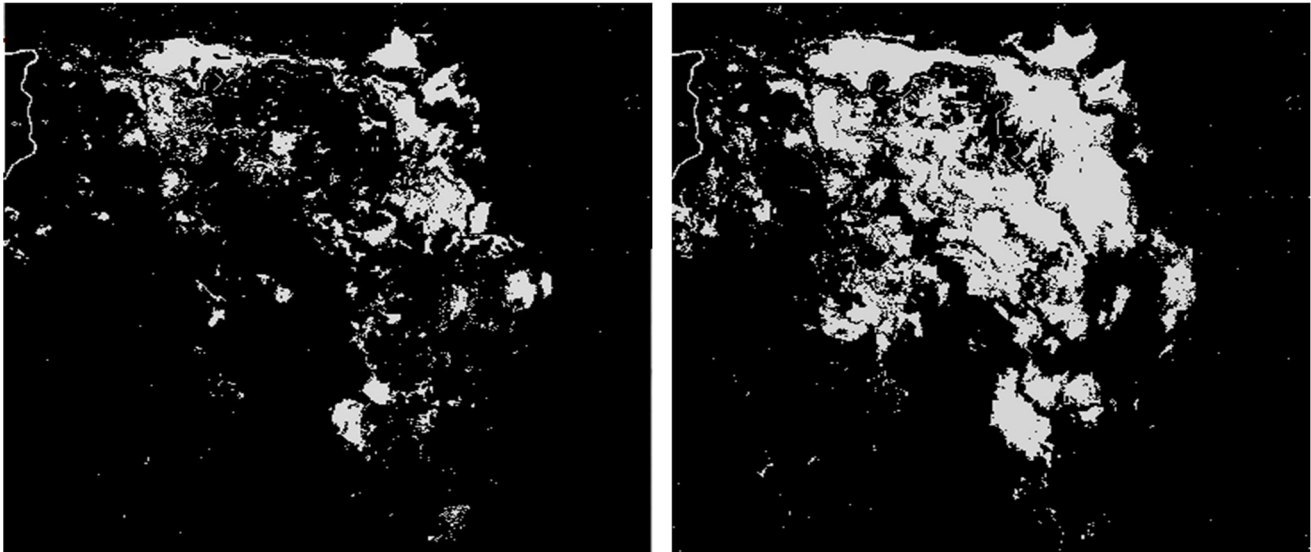


Figura 3. 16 Imágenes obtenidas del Complejo Cenagoso del bajo Sinú con el filtro NDWI aplicado. A la izquierda abril del 2024 (secas) y derecho noviembre 2024 (lluvias)

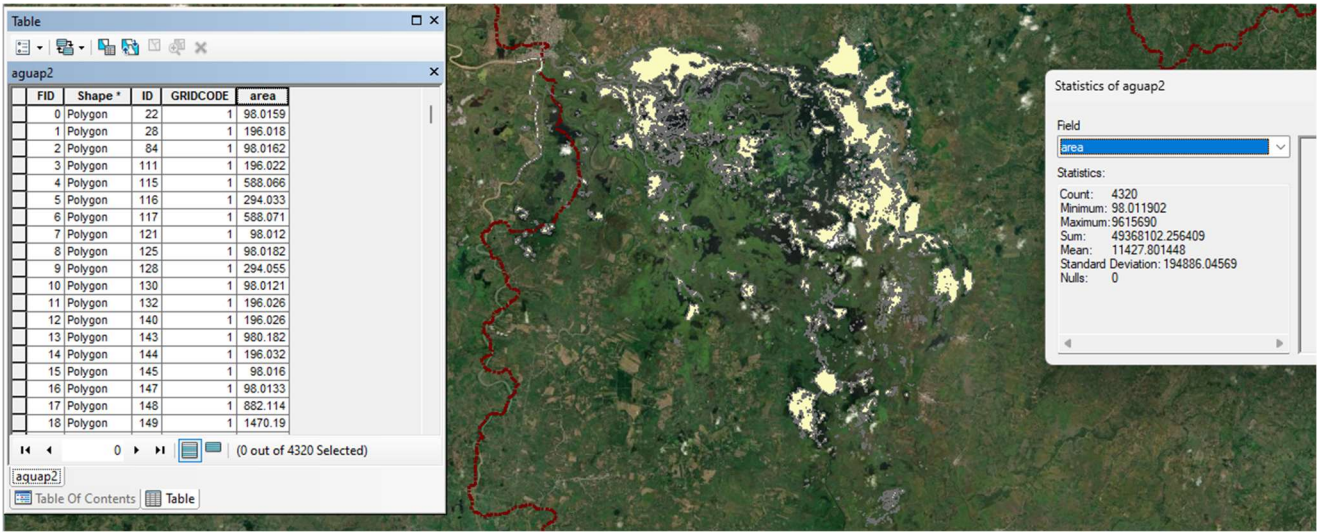


Figura 3. 17 Procesamiento de imagen satelital para cuantificar la superficie de agua del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú (secas).

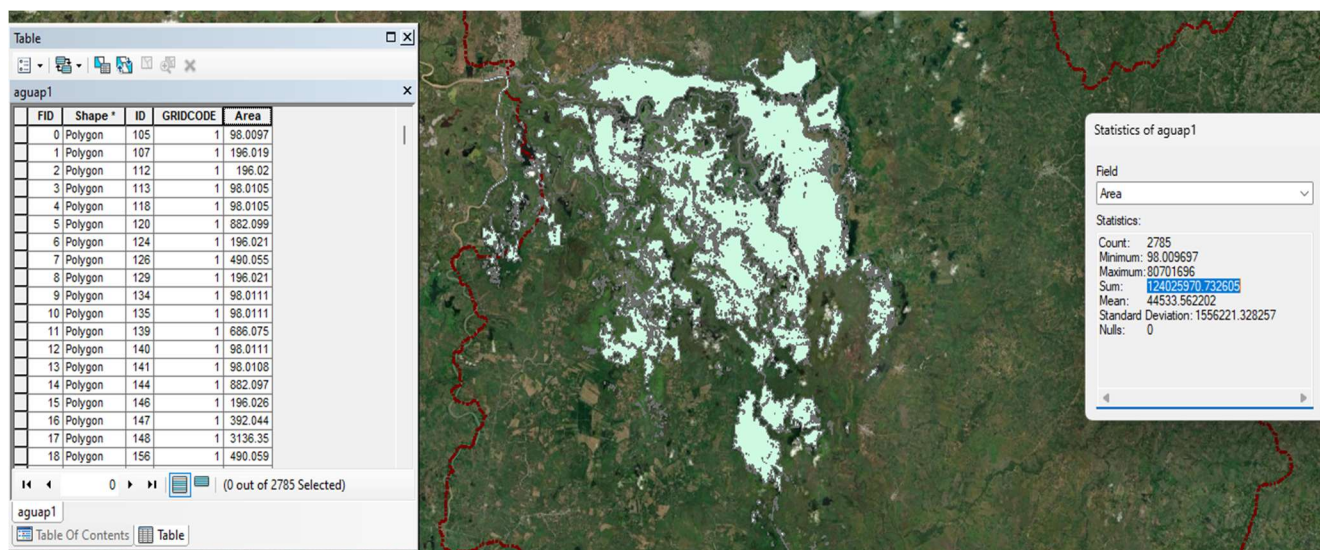


Figura 3. 18 Procesamiento de imagen satelital para cuantificar la superficie de agua del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú (lluvias).

Tabla 3. 16 Superficie de inundación del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú

Fecha de la imagen	Área Km ²
Época seca (30 abril 2024)	49.37
Época húmeda (21 noviembre 2024)	124.03
Zona inundable (diferencia)	74.67

Este análisis espacio temporal constituye una parte clave para la comprensión inicial de la dinámica hidrológica del complejo, al permitir identificar y cuantificar los cambios en la superficie de agua entre periodos climáticos contrastantes. La diferencia de 75.64 km². Observada entre el periodo seco y lluvioso del 2024, funciona como una primera aproximación la magnitud de inundación estacional, la cual es determinante para la configuración de los escenarios de simulación en el modelo hidrodinámico. Además, estos resultados, sirven como una línea base para evaluar el impacto de las condiciones extremas y validar la sensibilidad del sistema ante alteraciones climáticas o antrópicas, fortaleciendo así la utilidad del modelo como herramienta de planificación y gestión ambiental del humedal

4. La modelación numérica como herramienta para la determinación de la hidrodinámica en cuerpos de agua superficiales

4.1 Principios básicos de la modelación hidrodinámica 2D y 3D

La modelación hidrodinámica se ha consolidado como una herramienta clave para el análisis, gestión y planificación de sistemas acuáticos complejos, permitiendo no solo representar el comportamiento actual del sistema, sino también simular escenarios futuros bajo condiciones hipotéticas como sequías prolongadas o crecidas extremas. Esta capacidad predictiva resulta especialmente útil en zonas vulnerables o estratégicas desde el punto de vista ambiental, como los humedales del Caribe colombiano. Su aplicación favorece una gestión integrada del recurso hídrico, en línea con los principios de sostenibilidad y adaptación al cambio climático. Modelos como el EFDC han sido ampliamente implementados por su robustez numérica, facilidad de acoplamiento con otros módulos y su capacidad para simular condiciones tanto estacionarias como no estacionarias de caudal, nivel y transporte de contaminantes (Torres-Bejarano *et al.*, 2022).

La modelación se basa en un conjunto de ecuaciones físicas que describen la conservación de masa y cantidad de movimiento, lo que permite representar de forma detallada fenómenos como el flujo, la velocidad, los niveles de agua, interacciones con la atmósfera y el lecho del cuerpo del agua. Sus aplicaciones se han vuelto valiosas en la gestión del recurso hídrico ya que facilita la evaluación de escenarios actuales y futuros, incluyendo eventos extremos como sequías o inundaciones, así como el diseño de estrategias de mitigación y adaptación ante el cambio climático. En términos matemáticos, los modelos hidrodinámicos resuelven ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento, como las ecuaciones de Saint-Venant o Navier-Stokes, adaptadas a las condiciones del sistema fluvial o lacustre que se desea analizar (Torres-Bejarano *et al.*, 2016).

En contextos complejos como son los humedales tropicales o sistemas lagunares donde las interacciones entre caños, ríos y cuerpos de agua lenticos generan flujos variables en el tiempo, estos modelos permiten comprender los patrones de circulación, identificar áreas críticas y evaluar la conectividad hidráulica. La elección adecuada del modelo depende de la naturaleza del sistema a evaluar, de los objetivos de la simulación y de la disponibilidad de datos (Torres-Bejarano *et al.*, 2016).

Además de su utilidad en la modelación de infraestructura hidráulica, estos estudios contribuyen de forma decisiva en estudios de cambio climático, riesgo por inundaciones y diseño en medidas de conservación ambiental. Su aplicación en contextos como el Caribe Colombiano ha demostrado ser una herramienta clave para estudiar alteraciones en la conectividad hidráulica, sedimentación y gestión de flujos inducidos por intervenciones humanas (Barajas & Leiva, 2016).

Las variables hidrodinámicas fundamentales en la modelación de cuerpos de agua incluyen el nivel del agua, la velocidad, el caudal y la presión. Estas variables permiten describir de forma precisa el comportamiento dinámico del flujo en sistemas acuáticos siendo esenciales para la simulación numérica de procesos hidráulicos y la evaluación de escenarios futuros. El nivel del agua o lamina libre representa a la elevación de la superficie de agua respecto a un plano de referencia y es clave para determinar las condiciones de borde y capacidades de almacenamiento (Balvoa Luengo, 2022). La velocidad del flujo expresada en metros por segundo (m/s), indica la rapidez con la que se desplaza el agua en una sección y se relaciona con la pendiente y rugosidad de la sección. El caudal se mide en metros cúbicos por segundo, representa el volumen de agua que cruza una sección por unidad de tiempo y se calcula como el producto de la velocidad media y el área transversal del flujo (Torres-Bejarano *et al.*, 2016).

Por último, la presión en especial en modelos tridimensionales permite estudiar la distribución de fuerzas dentro del flujo, en condiciones de profundidad o flujos estratificados. Estas variables están

relacionadas a través de las ecuaciones fundamentales de la dinámica de fluidos como la ecuación de continuidad y las ecuaciones Navier-Stokes o de Saint Venant, dependiendo del grado de simplificación adoptado en el modelo (Torres-Bejarano *et al.*, 2016).

Los modelos hidrodinámicos se clasifican según el número de dimensiones espaciales que representan, por ejemplo, los modelos unidimensionales simulan el flujo a lo largo de una dirección espacial, a lo largo del eje principal de un cauce de un río o canal. Utilizan las ecuaciones de Saint-Venant para calcular variables como la elevación de la superficie del agua y la velocidad media en secciones transversales (Autodesk., 2023). Los modelos bidimensionales representan el flujo en dos direcciones, lo que les permite capturar variaciones longitudinales y transversales, esto les hace útiles en el análisis de áreas de inundación, llanuras aluviales y zonas donde el flujo puede divergir en múltiples direcciones. Por último los modelos tridimensionales pueden simular en tres dimensiones espaciales proporcionando una representación detallada de las variaciones verticales y horizontales del flujo. Son recomendados para estudiar cuerpos de agua profundos, estuarios y zonas costeras donde existe estratificación térmica y salina (Horváth *et al.*, 2019).

En sistemas de aguas poco profundas, como humedales de planicie aluvial, la modelación hidrodinámica se basa en las ecuaciones de aguas someras (Shallow Water Equations), las cuales constituyen una simplificación de las ecuaciones de Navier-Stokes bajo el supuesto de presión hidrostática y flujo incompresible. Estas ecuaciones, también conocidas como ecuaciones de Saint-Venant en su forma integrada en profundidad, describen la conservación de masa y cantidad de movimiento en dominios donde la dimensión horizontal es significativamente mayor que la vertical. Los cuerpos de agua lénticos, como lagos y embalses, se caracterizan por tener aguas relativamente quietas. En estos sistemas, las ecuaciones de Navier-Stokes se aplican para modelar procesos como la

estratificación térmica y la circulación inducida por el viento, que afectan la calidad del agua y la distribución de nutrientes.

En contraste, los cuerpos de agua lóticos, como ríos y arroyos, presentan flujos continuos y dinámicos. Las ecuaciones de Saint-Venant son comúnmente utilizadas para modelar el flujo en estos sistemas, permitiendo analizar fenómenos como la propagación de ondas de crecida y el transporte de sedimentos (Hydrologic Engineering Center, 2024).

En sistemas de baja pendiente como el caño Aguas Prietas, el comportamiento hidráulico puede interpretarse bajo el concepto de flujo gradualmente variado (GVF), en el cual las variaciones del tirante ocurren de forma progresiva a lo largo del eje del cauce.

4.2 Selección del modelo hidrodinámico

El desarrollo de un modelo hidrodinámico tridimensional implica seguir con una metodología estructurada que abarque la formulación conceptual del sistema, el establecimiento de condiciones de contorno, la organización de información base y los procesos de calibración y validación del modelo. Los modelos hidrodinámicos tridimensionales, como EFDC, se fundamentan en las ecuaciones de Navier–Stokes bajo aproximación hidrostática y formulación promediada (RANS). Sin embargo, en aplicaciones en humedales someros, el comportamiento hidráulico puede interpretarse principalmente bajo el marco de las ecuaciones de aguas someras integradas en profundidad.

Entre los modelos numéricos más empleados se encuentran el Enviromental Fluid Dynamics Code (EFDC), el MIKE 21/3, el DELFT 3D, y el HEC-RAS 2D, los cuales comparten la capacidad de resolver las ecuaciones de movimiento de Navier Stokes bajo condiciones de presión hidrostática y superficie libre.

Este proceso, inicia con la definición de los objetivos del modelado y la identificación de los objetivos del modelado y las variables de interés, posteriormente se realiza la caracterización del área de estudio mediante la recopilación de información hidrológica, topográfica y meteorológica. En la siguiente fase se procede al diseño del dominio computacional y la construcción de la malla numérica, donde se define la resolución espacial y temporal del fenómeno a representar.

La implementación de un modelo hidrodinámico requiere una secuencia de etapas que comprende desde de la recopilación de datos históricos y medidos, el procesamiento de información geoespacial e hidrológica, la construcción de la malla para el modelo números, la asignación de condiciones de frontera, la calibración, validación y el análisis de los escenarios simulados. Aunque escritos de forma resumida, este proceso es fundamental para garantizar la representatividad y confiabilidad del modelo, permitiendo que las simulaciones reproduzcan con un grado aceptable el comportamiento del sistema real.

Numero de Courant

Los modelos numéricos requieren de una estabilidad que le permite resolver en cada paso la propagación del flujo de acuerdo a su celeridad, esta estabilidad depende de la profundidad y al tamaño de las celdas de la malla numérica. El número de Courant o CFL, representa la porción en la que un soluto en una celda a travesara por el transporte advectivo en un paso de tiempo Δt . Este coeficiente restringe al modelo numérico para que, en un paso de tiempo determinado, pueda trasladarse un disturbio sin la perdida de resolución espacial o suavizamiento del fenómeno (Marín Coria, 2016). El coeficiente se define de acuerdo a la siguiente formula:

$$CFL = 2\Delta T \sqrt{gH} \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2}}$$

Donde Δt es el paso del tiempo, $\sqrt{gH}$ es la velocidad de propagación de una onda y Δx y Δy corresponden al tamaño de la celda numérica.

En malla numéricas con geometrías complejas, con fronteras irregulares, con canales donde la malla no sigue sumamente la geometría del sistema, el número de Courant debe ser menor que 5.6. Dado que el número de Courant depende del paso del tiempo, se debe elegir el mayor paso de tiempo posible para que la estabilidad y la precisión no se vean comprometidas. Con base en las pruebas realizadas en este estudio se determinó usar un paso de tiempo de 0.001 minutos.

4.3 Diseño de malla conceptual y condiciones de frontera

La modelación numérica requiere de una secuencia de pasos a seguir para la correcta implementación del modelo. Antes de comenzar como tal con la secuencia, es importante reconocer que la información obtenida en el capítulo 3, sirvió como base para dimensionar el área sobre la cual se modelara la malla. Además, se utilizó el DEM ALOS PALSAR previamente utilizado en el balance hídrico para la generación de la batimetría para el modelo, el cual, será mejorado en la sección del cauce aguas prietas con los datos de la campaña batimétrica realizada.

Como primer paso, se delimitó el tamaño de la malla. En un principio se planteó realizar una malla que abarcara 450 km², lo más cercano a la zona inundable del complejo cenagoso. Las primeras versiones se hicieron de esta forma siendo mallas curvilíneas de aproximadamente 450 km² de extensión con más de 400,000 de celdas. Sin embargo, por su forma irregular y por la sinuosidad del caño Aguas Prietas, esta malla resultaba ineficiente para los cálculos matemáticos del EFDC, por lo que se recortó, dejando solamente la superficie con mayor relevancia e influencia al flujo del cauce aguas prietas. Durante este perfeccionamiento de la malla se descartaron varias versiones hasta llegar a la versión final de la malla que se aprecia ve en la figura 4.1, la cual tiene las características de la tabla 4.1. Teniendo una extensión

de 137.87 km² con un numero de celdas de 192,249 y un coeficiente de ortogonalidad de 2.2. Esta malla fue realizada en el software GRID + 1.0, una herramienta complementaria del EFDC Explorer que permite modelar la malla curvilínea, realizar ajustes e importarla al EFDC Explorer.

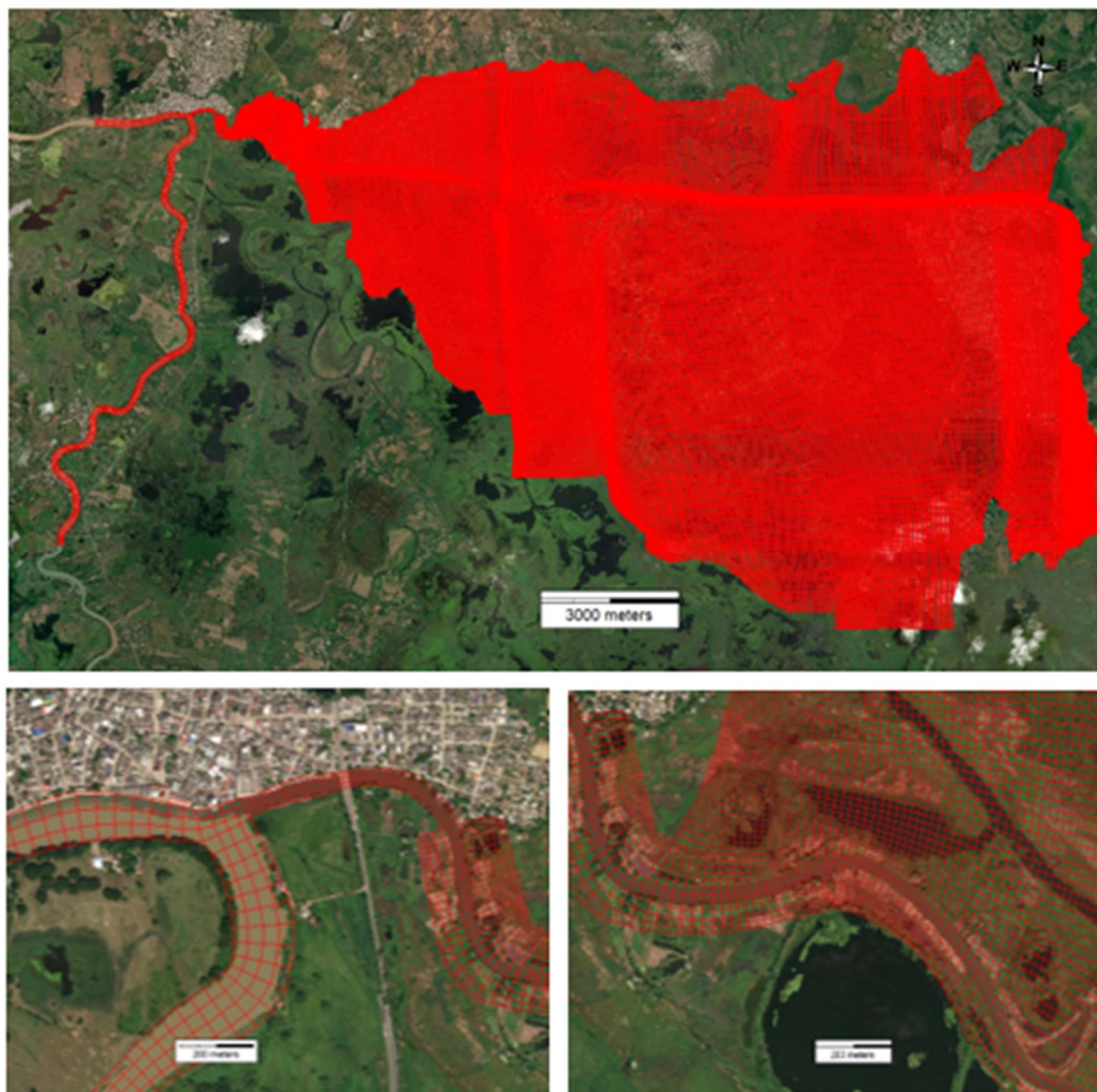


Figura 4. 1 Malla utilizada para el modelo.

Siguiendo con la implementación del modelo, la malla es cargada en el software EEMS Versión 11.8.1. A esta se le asignó la topografía por medio del DEM ALOS PALSAR que se venía usando desde el balance hídrico. A este modelo digital de elevaciones, se le hizo un refinamiento en el caño Aguas Prietas, gracias a las campañas batimétricas previamente realizadas.

Tabla 4. 1 Características de la malla creada para el modelo en GRID +.

Elemento	Descripción
Número de filas	403
Número de columnas	893
Tipo de malla	Ortogonal
Numero de celdas	192,249
Dimensión norte	12,080.66 m
Dimensión este	21,572.98 m
Zona UTM	WGS N 18
Centroide norte	1015217.14 m
Centroide este	418155.65 m
Latitud centroide	9.18 °
Longitud centroide	-75.74°
Tamaño de celda x (promedio)	24.363 m
Tamaño de celda en x (máximo)	61.276 m
Tamaño de celda en x (mínimo)	7.544 m
Área modelada	137.8737 km ²
Tamaño de celda y (promedio)	29.387 m
Tamaño de celda en y (máximo)	72.191 m
Tamaño de celda en y (mínimo)	6.340 m

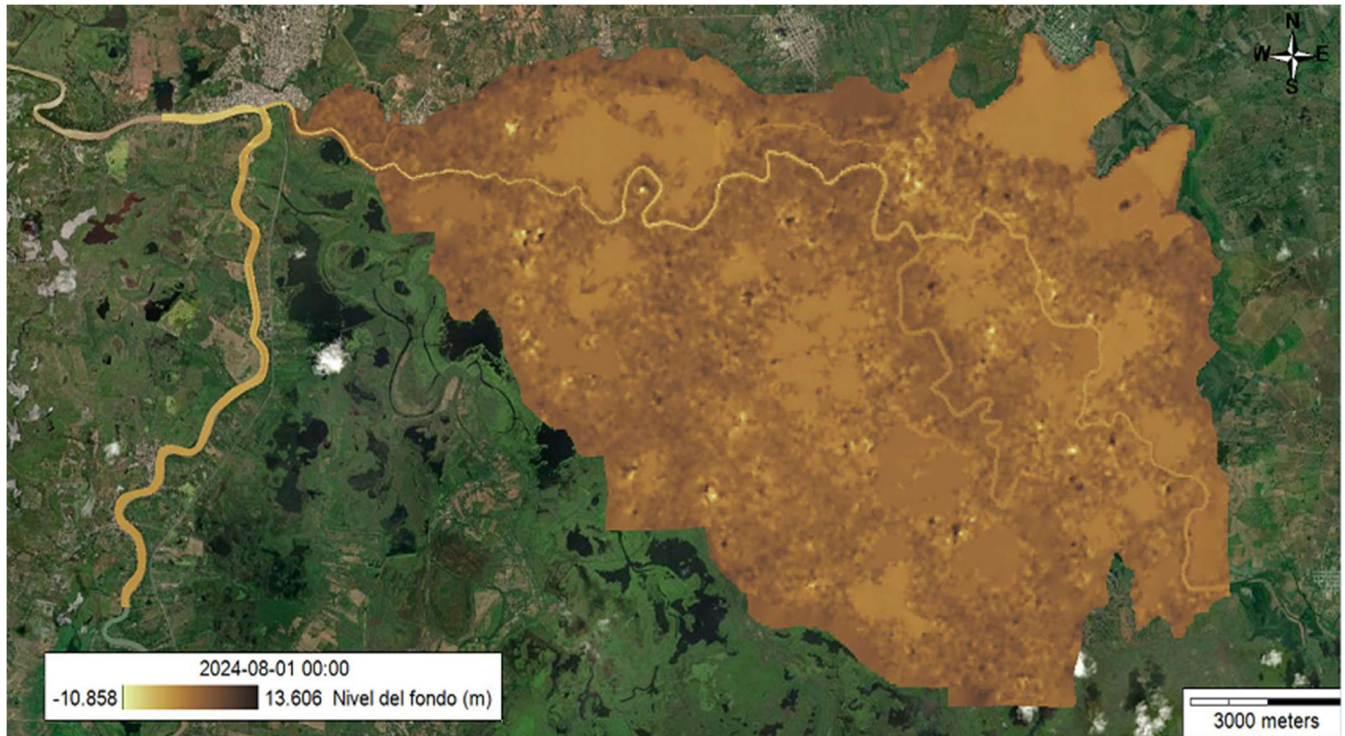
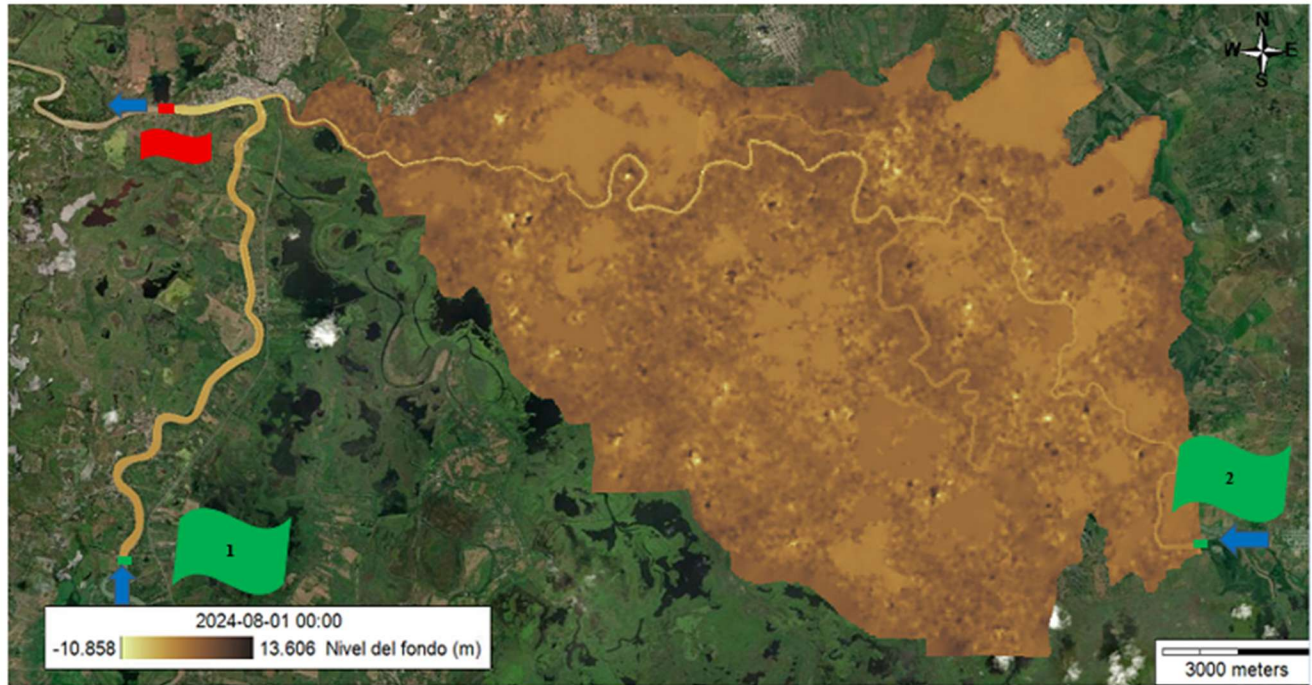


Figura 4. 2 Configuración de nivel de fondo de la malla a partir de un DEM ALOS

PALSAR 12.5 m, mejorado con batimetría del caño Aguas Prietas.

A continuación, se definieron las condiciones de frontera, las cuales se pueden apreciar con mayor claridad en la figura 4.3. Para este modelo se optaron dos fronteras de entrada de flujo, por el lado izquierdo sur, caudales registrados del río Sinú por la estación hidrométrica del IDEAM Sabana nueva, y por el lado derecho sur, caudales históricos del caño Aguas Prietas, basados en el estudio de la Universidad Nacional de Colombia realizado en el 2001. A continuación, se delimitó, como frontera abierta de salida, por el lado norte oeste, a la salida del río Sinú, se abre la frontera abierta con los niveles medidos en la estación Cotoca Abajo del IDEAM. Finalmente se establecen los niveles iniciales de agua, los cuales permiten ver las zonas iniciales donde se almacena agua dentro del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú, esto se puede ver con mayor claridad den la Figura 4.4.



-  Frontera de Salida (Río Sinú).
-  Frontera de entrada (1 Río Sinú, 2 Caño Aguas Prietas).

Figura 4. 3 Ubicación de fronteras de entrada y salida de flujo de agua.

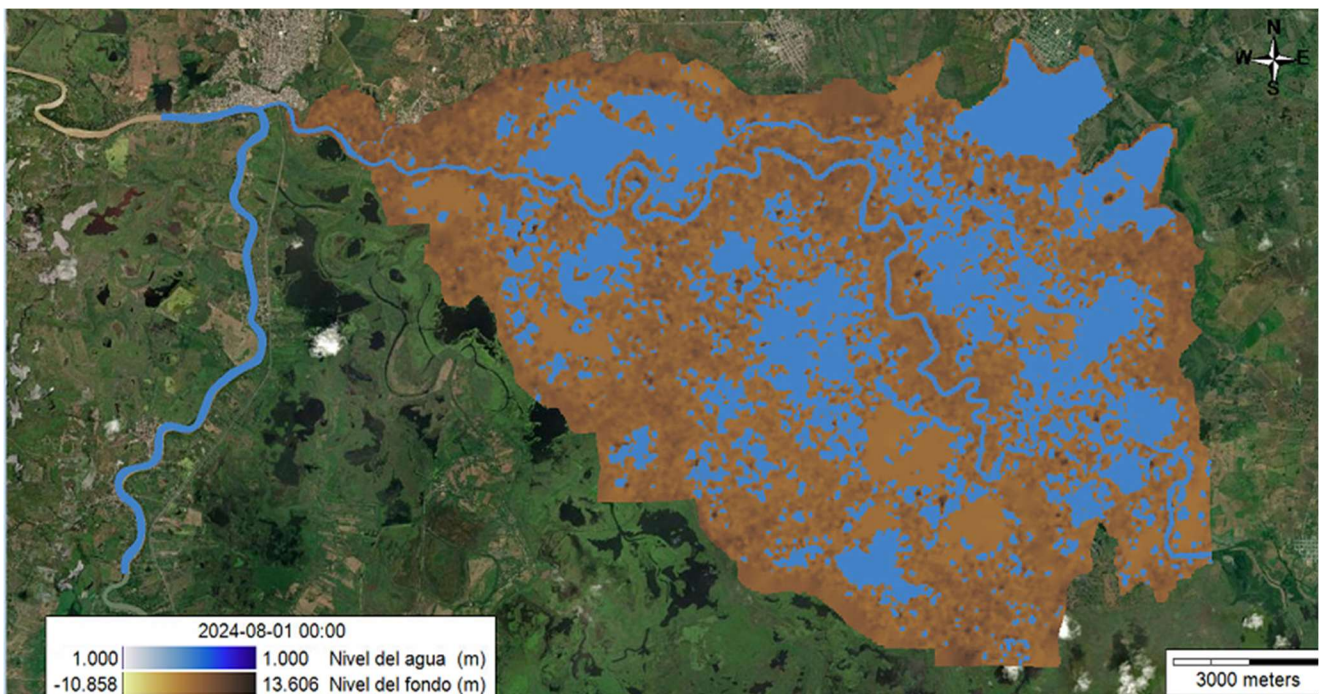


Figura 4. 4 Nivel de fondo y nivel inicial de agua en el modelo.

4.4 Parámetros físicos e hidráulicos utilizados

La configuración del modelo requiere incluir forzantes atmosféricas como son vientos, temperatura, precipitación, humedad relativa, presión atmosférica, nubosidad, brillo solar y evapotranspiración. Para tales valores se emplearon datos históricos medidos por las estaciones de Chimá y Lorica del IDEAM, sin embargo, para datos faltantes como el de los vientos se utilizaron herramientas de análisis geoespacial apoyados en la plataforma de GOOGLE Earth Engine, la cual por medio de la base de datos ERA5-LAND (Climate Reanalysis) de la agencia European Centre for Medium Range Weather Forecast ECMWF. utilizando datos del satélite Sentinel-5P, y Copernicus, se pudo complementar los datos faltantes.

Esta información fue clave para incorporar el módulo de temperatura al modelo el cual calcula las pérdidas por evaporación, y las ganancias por medio de la precipitación. Para lograr esto se optó por utilizar la opción “*Equilibrium Temp (CE-QUAL-W2 method)*” frecuentemente usada en la literatura para modelos con este tipo de características. Utilizando los coeficientes de 0.58 valor estándar y utilizando las estaciones de temperatura de Lorica y de Chimá como serie de tiempos temporal.

Teniendo listo la configuración de las condiciones de frontera, y el módulo de temperatura, se procede a configurar el módulo de hidrodinámica el cual contempla el cálculo de turbulencia, en este caso se utilizará el método de Smagorinsky, ampliamente utilizado en diferentes modelos para el cálculo de turbulencia, aquí se pueden modificar en la calibración los valores de difusividad vertical AHO y difusividad vertical relativa AHD. Continuando con la configuración, se aplicará una rugosidad a las celdas de la malla, basado en la literatura, considerando este tipo de humedal suelen considerarse valores entre 0.0001 y 0.001, los cuales se ajustarán en la etapa de calibración. Se asigna también un nivel inicial del agua, en este caso se establece un nivel ligeramente menor al que se registra en la estación de Cotoca abajo. El siguiente espacio de configuración implica la forma en que el modelo mojará y secará las celdas

de la malla, para lo cual se establecen valores por default de profundidad de mojado y de secado en 0.05 m. Se incorporan además series de datos de vientos, previamente cargados y se asigna un valor de coeficiente de Coriolis en base a la ubicación geográfica del proyecto que para este caso es de 2.15536 E -5.

Existen más módulos que pueden incorporarse en el modelo como vegetación, aguas subterráneas, entre otros, que para este modelo se omiten por no tener mucha relevancia en el cambio de la hidrodinámica del complejo, sin embargo, para futuros estudios, este modelo podría aplicarse para temas de calidad de agua, salinidad, transporte de sedimentos, entre otras aplicaciones.

Finalmente, con la configuración lista para el modelo, lo último es establecer un periodo de simulación previo a que el modelo corra. Para este caso, en base a las campañas de medición con el ADCP se optó por realizar la simulación para los días del 15 de junio del 2024 al 13 de julio del 2024, fechas entre las cuales se realizaron 8 mediciones, las cuales servirá para la calibración del modelo.

4.6 Calibración del modelo y validación del modelo.

La calibración del modelo hidrodinámico desarrollado en EFDC Explorer fue una etapa clave para garantizar que las simulaciones reprodujeran con fidelidad el comportamiento real del flujo en el Complejo Cenagoso del Bajo Sinú. Esta fase se llevó a cabo mediante un proceso iterativo de ajuste de parámetros hidráulicos y de comparación con datos obtenidos en las campañas de campo.

Los principales parámetros calibrados fueron:

- Coeficiente de viscosidad horizontal (AHO): Ajustado entre 0.6 y 0.75 m²/s
- Difusividad horizontal (AHD): Probado entre 0.30 y 0.35 m²/s

- Rugosidad del fondo: Variada entre 0.01 y 0.02 para representar zonas de vegetación densa y fondos limosos, se escogió 0.015 m.
- Profundidades mínimas mojadas y secas (Wet/Dry Depth): Establecidas en 0.1 m y 0.05 m, respectivamente

La calibración del modelo se realizó mediante la comparación directa entre los valores observados medidos y los valores simulados por el modelo. En este modelo se compararon 3 variables: Velocidad, Dirección y Flujo.

Estas variables se comprobaron mediante el método de Nash-Sutcliffe para las cuales, y suma de mínimos cuadrados. El coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) evalúa que tan bien reproduce un modelo una serie observada, comparando con el promedio observado a través de la siguiente formula:

$$NSE = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - \bar{Q}^{obs})^2}$$

Donde: Q^{obs} y Q^{sim} son la variable observada y simulada en el tiempo i , y $\bar{Q}^{obs}$ es el promedio observado.

El rango típico va desde $-\infty$ a 1, donde este último indica un ajuste perfecto, mientras que valores cercanos a 0 significa que el modelo no mejora al promedio observado, valores que tienen al negativo indica que el promedio observado supera al modelo (Nash & Sutcliffe, 1970). No hay un corte universal que defina a partir de que valores se considera valido un modelo, pero, en hidrología se puede tomar como referencia el umbral de la tabla 4.2. El NSE es sensible a los errores en los picos de caudal, en la práctica se recomienda reportarlo con métricas de error para una evaluación equilibrada del desempeño del modelo (Knoben *et al.*, 2019).

Tabla 4. 2 Clasificación del desempeño del modelo según los valores del NSE

Valor de NSE	Interpretación
>0.8	Muy bueno
0.60 a 0.80	Bueno
0.50 a 0.60	Satisfactorio
<0.50	No satisfactorio

Nota: Adaptado de Moriasi *et al.* (2015)

El otro coeficiente de error que se considerara en este modelo es el error cuadrático medio por sus siglas en ingles Root mean Square Error (RMSE), el cual cuantifica el promedio de los errores entre los valores observados y los simulados, penalizando más los errores grandes al elevarlos a cuadrado y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i^{sim} - y_i^{obs})^2}$$

Donde y_i^{sim} y y_i^{obs} son el valor simulado y observado den el tiempo i, respectivamente, y n es el numero de pares comparados. El RMSE se expresa en las mismas unidades de las variables, lo que facilita su interpretación directa, lo que se traduce como valores menores indican mejor ajuste. Debido a su sensibilidad a valores atípicos y a picos se recomienda reportarlo junto con métrica complementarias como el NSE para una evaluación equilibrada del desempleo de un modelo (Moriasi *et al.*, 2015).

Para los alcances de este modelo, consideramos que valores superiores en una calibración 0.6 por el método de Nash-Sutcliffe como valido, además, se toma como referencia complementaria, que el RMSE

se encuentre por debajo de la desviación estándar promedio; pero se hace la recomendación de que a futuro se puede perfeccionar el modelo.

Los valores para calibración del modelo se tomaron de la estación a la que se le denomino de forma interna como “El Hermano”, la caudal se encuentra ubicada en las coordenadas Este (X) 411760.85 y Norte (Y) 1019489.45, en la zona UTM 18 N según del WGS 84, para fines de calibración se consideró optima la ubicación de esta estación, por encontrarse dentro del transecto del caño Aguas prietas donde ocurre el cambio de flujo bidireccional. Los valores obtenidos para Nash-Sutcliffe y cuadrados mínimos de los 3 parámetros pueden verse en la siguiente tabla 4.3.

Tabla 4. 3 Resultados de la calibración del modelo para velocidad, flujo y dirección.

Est.	Parámetro	Capa/ tipo	Comienzo	Final	# Datos	Media	Media	Dev. Est.	RMS	Nash-
			Fecha	Fecha		Observada	Predicha	Observada	Error (RMSE)	Sutcliffe (NSE)
Hno-v	Velocidad (m/s)	Depth Avg.	15/06/2024 08:54	10/07/2024 08:24	8	0.325	0.279	0.249	0.138	0.693
Hno-f	Flujo (m³/s)	Depth Avg.	15/06/2024 08:54	10/07/2024 08:25	8	34.878	37.739	25.34	11.994	0.776
Hno-d	Dirección (°)	Depth Avg.	15/06/2024 08:54	10/07/2024 08:24	8	254.158	238.816	89.11	15.776	0.969

Nota: Elaboración propia

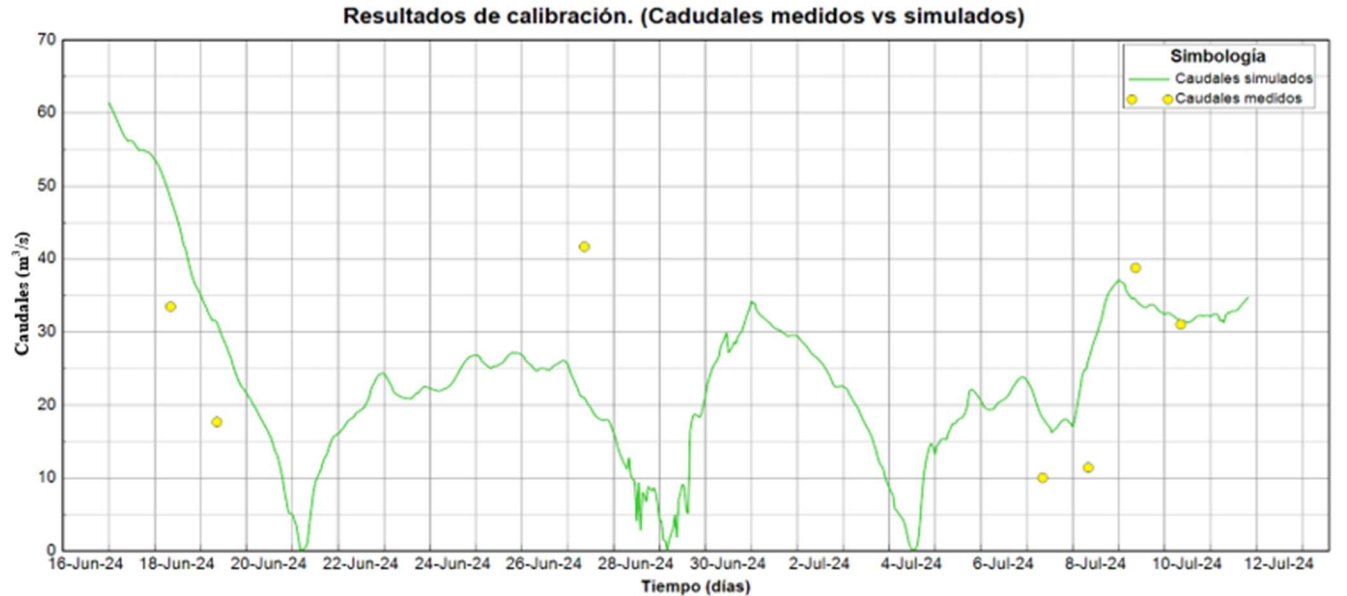


Figura 4. 5 Gráfica de los resultados de calibración para caudales en el caño Aguas Prietas.

De igual forma se puede apreciar en las figuras 4.5 a la 4.7 las gráficas que presentan el ajuste del modelo con los valores medido durante las campañas de medición.



Figura 4. 6 Gráfica de los resultados de calibración para direcciones en el caño Aguas Prietas.

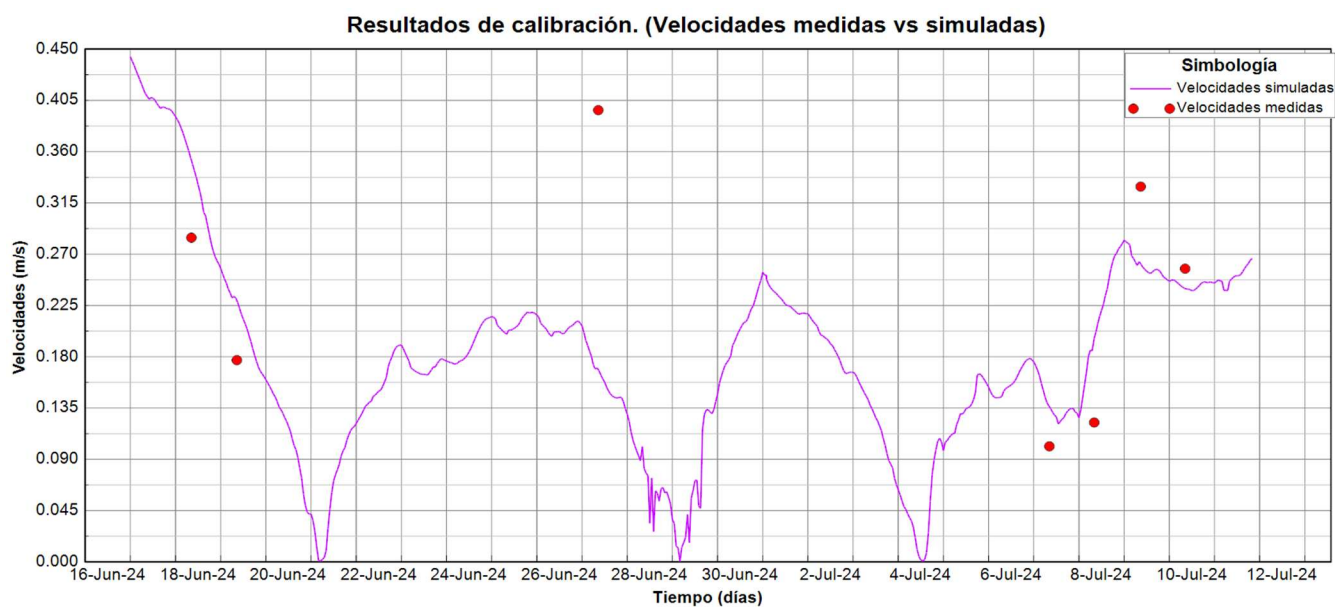


Figura 4. 7 Gráfica de los resultados de calibración para velocidades en el caño Aguas Prietas.

La validación del modelo consistió en lograr que el modelo reprodujera también resultados satisfactorios para otro periodo de tiempo. En este caso, las mediciones realizadas durante la segunda campaña fueron utilizadas para el periodo de simulación del 15 de agosto al 15 de septiembre.

Los resultados obtenidos para este periodo se resumen en la tabla 4.4 con los valores comparados con Nash Sutcliffe y RMSE. La comparación de las variables simuladas con las medidas se puede apreciar mejor en las gráficas 4.8 ,4.9 y 4.10.

Tabla 4. 4 Resultados de validación.

Est.	Parámetro	Capa/ tipo	Comienzo	Final	# Datos	Media	Media	Dev. Est.	RMS	Nash-
			Fecha	Fecha		Observada	Predicha	Observada	Error (RMSE)	Sutcliffe (NSE)
Hno-v	Velocidad (m/s)	Depth Avg.	15/08/2024 00:00	10/09/2024 00:00	6	0.325	0.453	0.20.	0.087	0.729
Hno-f	Flujo (m³/s)	Depth Avg.	15/08/2024 00:00	10/09//2024 00:00	6	51.918	60.663	27.599	11.453	0.765
Hno-d	Dirección (°)	Depth Avg.	15/08/2024 00:00	15/09/2024 00:00	6	306.744	306.742	0.290	0.030	0.957

Esta fase de validación es fundamental para asegurar que los escenarios simulados en etapas posteriores tengan una base numérica y física confiable.

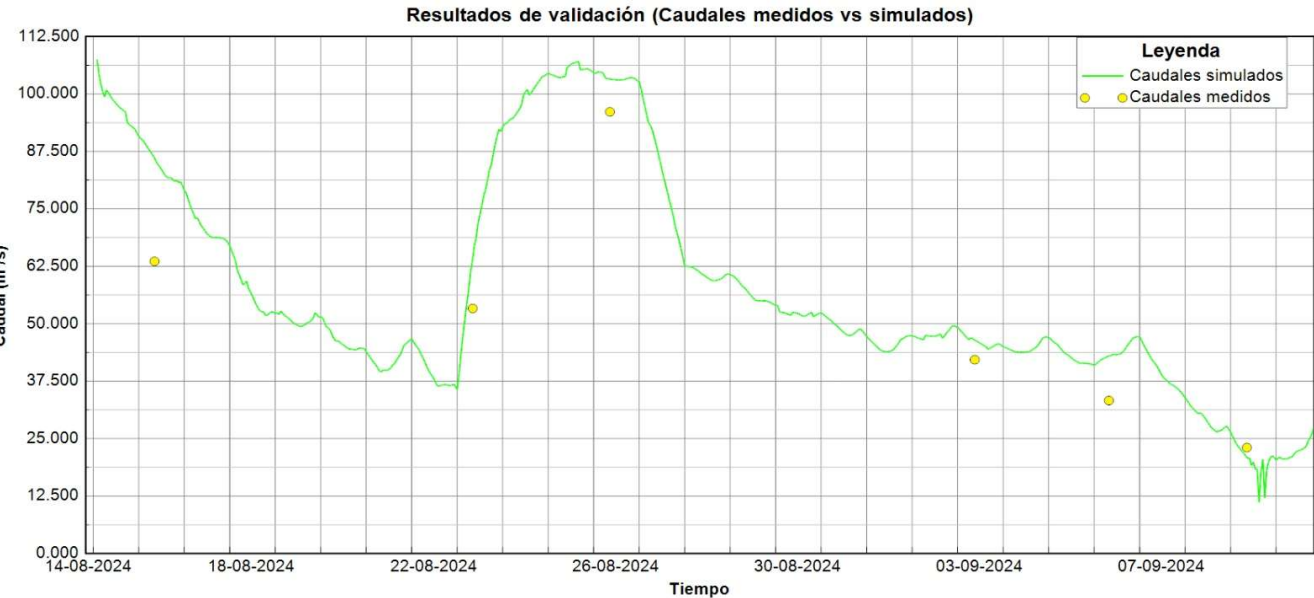


Figura 4. 8 Gráfica de los resultados de validación para caudales en el caño Aguas Prietas.

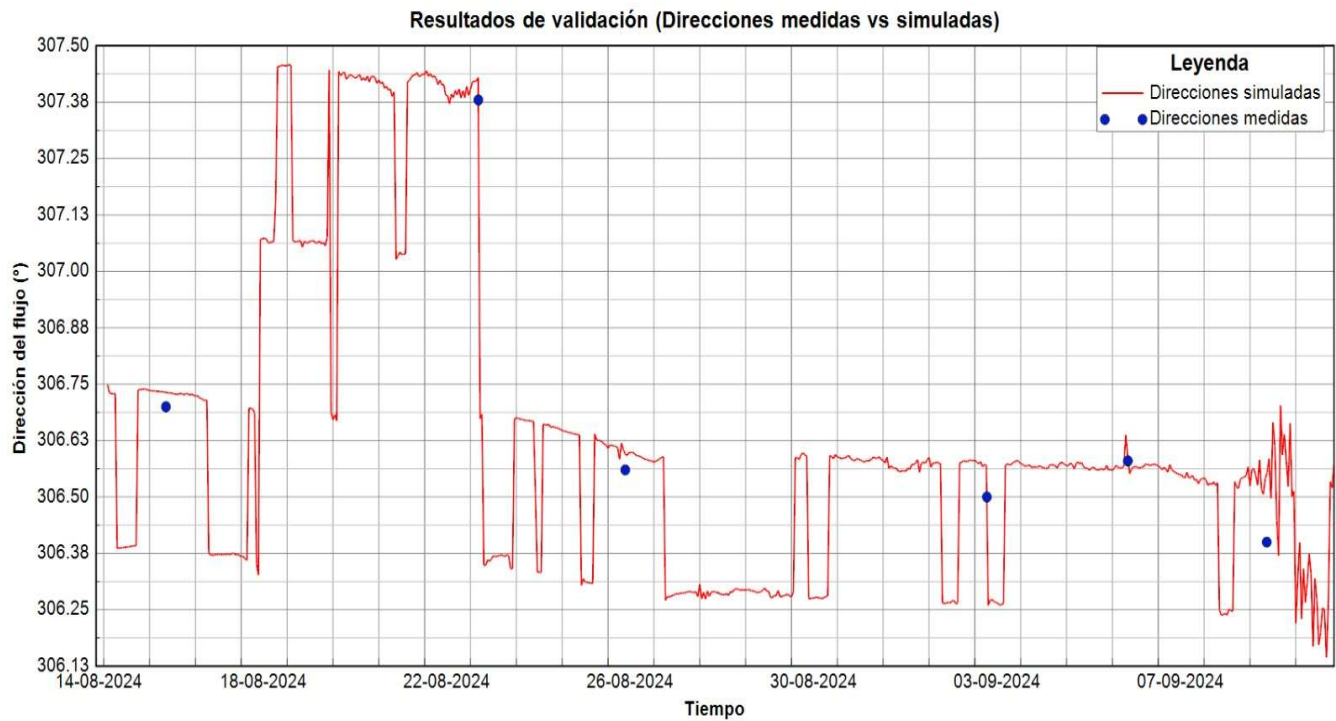


Figura 4. 9 Gráfica de los resultados de validación de dirección para en el caño Aguas Prietas.

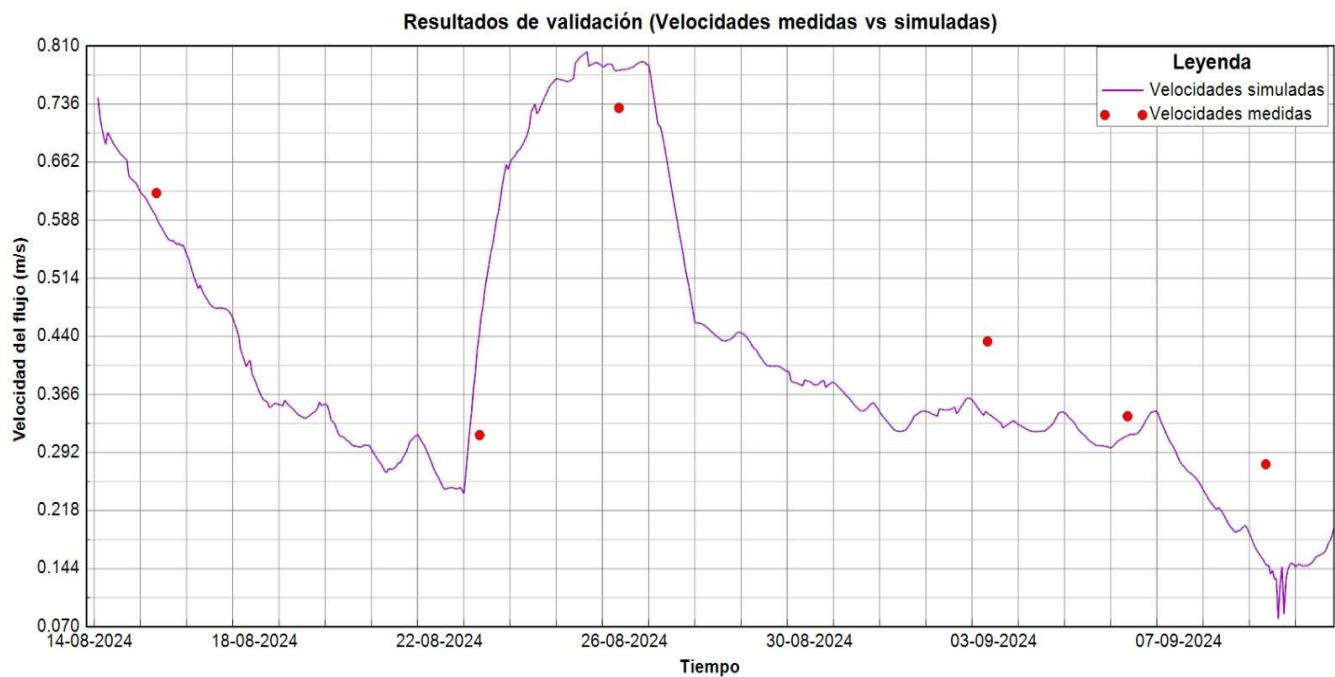


Figura 4. 10 Gráfica de los resultados de validación de velocidades para en el caño Aguas Prietas.

4.7 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se implementó con el propósito de evaluar la robustez del modelo hidrodinámico y determinar en qué medida los parámetros hidráulicos calibrados influyen sobre las variables de interés (velocidad, flujo y dirección del flujo). Esta etapa es complementaria al proceso de calibración y validación, y permite identificar los parámetros con mayor impacto en la respuesta del modelo, así como estimar la incertidumbre asociada al conjunto de resultados utilizados posteriormente para analizar la dinámica hidrodinámica del sistema.

Debido a la naturaleza del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú—caracterizado por zonas de baja pendiente, presencia de vegetación sumergida y flujos bidireccionales en el caño Aguas Prietas—los parámetros seleccionados para el análisis de sensibilidad fueron aquellos que, de acuerdo con la literatura, ejercen mayor influencia en sistemas de humedales planos con flujos de baja energía (Ji, 2017; Park *et al.*, 2020). Los parámetros evaluados fueron:

- Coeficiente de viscosidad horizontal (AHO): variado entre 0.5 y 0.8 m²/s. El valor final fue 0.70 m²/s.
- Difusividad horizontal (AHD): variada entre 0.20 y 0.40. El valor final fue 0.35.
- Rugosidad del fondo (Manning–n equivalente): modificada entre 0.01 y 0.02. El valor final fue 0.015 m.
- Profundidad mínima húmeda (Wet Depth): ajustada entre 0.05 y 0.10 m. El valor final fue 0.1 m
- Profundidad mínima seca (Dry Depth): ajustada entre 0.01 y 0.10 m. El valor final fue 0.05 m.

El análisis consistió en modificar cada parámetro de manera independiente, manteniendo constantes los demás, y evaluar la variación relativa en la simulación de velocidad, dirección y flujo sobre la estación

utilizada para la calibración (“El Hermano”). Para cada prueba se calcularon los índices NSE y RMSE con el fin de cuantificar la sensibilidad del modelo ante cambios incrementales.

Los resultados obtenidos permiten establecer tres conclusiones principales:

1. La rugosidad del fondo fue el parámetro más sensible, especialmente en la simulación de velocidad. Incrementos de 0.002 a 0.008 generaron reducciones de hasta 35 % en la magnitud de las velocidades simuladas, lo que confirma la fuerte dependencia del flujo respecto al efecto de vegetación y fricción en sistemas cenagosos.
2. Los coeficientes de viscosidad y difusividad (AHO y AHD) tuvieron un efecto moderado, afectando principalmente la estabilidad numérica y el grado de suavización de los campos de velocidad. Cambios dentro del rango evaluado modificaron el NSE en un margen reducido (± 0.03), lo cual indica que la calibración adoptada es estable y presenta baja sensibilidad ante variaciones razonables en estos parámetros.
3. Los parámetros Wet/Dry Depth mostraron sensibilidad baja, pero son determinantes para garantizar el comportamiento adecuado de las zonas de transición entre áreas inundadas y emergidas. Aunque no generan cambios significativos en las variables calibradas ($<10\%$), disminuirlos en exceso conduce a inestabilidades numéricas y oscilaciones en la interfaz agua–suelo.

En conjunto, el análisis demuestra que el modelo presenta una sensibilidad alta a la rugosidad, moderada a AHO/AHD, y baja a los parámetros de humedad mínima, lo cual respalda la selección final de los valores calibrados. Esta evaluación aporta confianza adicional al uso del modelo en los escenarios hidrodinámicos simulados en los capítulos posteriores, al comprobar que las tendencias generales del flujo

y la dirección del intercambio río–humedal se mantienen estables bajo variaciones razonables de los parámetros.

4.8 Escenarios de simulación.

Para analizar la dinámica del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú bajo distintas condiciones hidrológicas, se definieron seis escenarios de simulación contrastantes: cuatro históricos (dos de temporada húmeda y dos de temporada seca) y dos bajo proyecciones de cambio climático. Esta configuración permite evaluar el comportamiento del sistema ante condiciones extremas de conectividad entre el río Sinú y el caño Aguas Prietas, y estimar la respuesta del sistema frente a eventos de inundación o aislamiento hídrico. Todas las simulaciones se realizaron con una duración de 30 días, para representar de forma continua la evolución del nivel y flujo del agua dentro del complejo. Los datos de entrada históricos fueron recopilados a partir de series oficiales del IDEAM, utilizando registros de caudal de la estación Sabana Nueva en el río Sinú y de la estación Higal para el caño Aguas Prietas.

Para los escenarios húmedos, se seleccionaron los meses de agosto de 2000 y agosto de 2022, los cuales presentaron valores representativos de alto caudal en el Sinú y máxima expansión del espejo de agua. Los escenarios secos, se construyeron con datos de febrero de 2024 y marzo de 2019, considerados los meses con los caudales más bajos del Sinú posteriores a la entrada en operación de la represa Urrá I (2000). Estos periodos permitieron representar condiciones críticas de mínima conectividad hídrica.

Para comprender los escenarios futuros se utilizaron las proyecciones climáticas IPCC, las cuales, se obtienen mediante simulación con modelos climáticos mundiales bajo distintos escenarios de cambio climático, definidos como posibles estados futuros del clima (IDEAM, 2024). Las

proyecciones IPCC emplean múltiples escenarios en paralelo representando diversas combinaciones socioeconómicas y ambientales. Clasifica estas combinaciones en trayectorias conocidas como Vías socioeconómicas compartidas (SSP, por sus siglas en inglés), describiendo como podría evolucionar la sociedad y los desafíos que conllevaría tales trayectorias. En la figura 4.11 se muestran las vías que muestran diferentes escenarios de acuerdo al comportamiento que siga la humanidad (IDEAM, 2024). Las proyecciones IPCC para Colombia, facilitan datos diarios por regiones de precipitación, temperatura, humedad, y radiación hasta 2100.

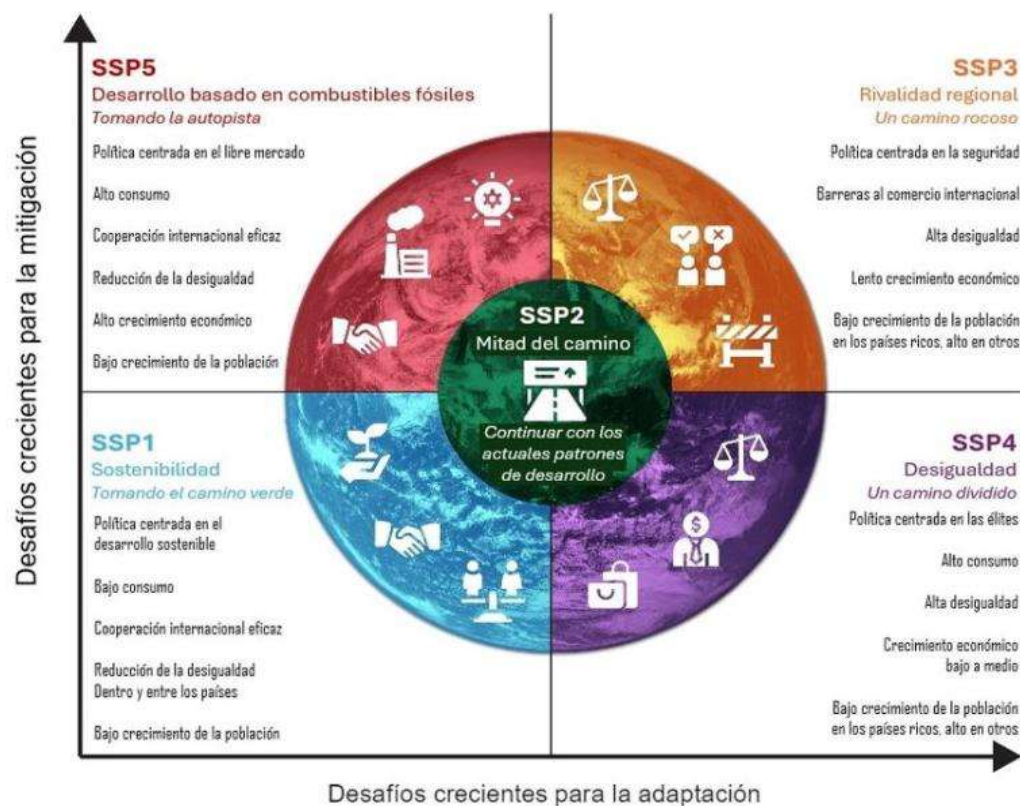


Figura 4. 11 Las cinco vías socioeconómicas compartidas Tomado de IDEAM, 2024;
traducido deClimateData.ca., 2022.

Para los escenarios de cambio climático de este trabajo se recurrió a las proyecciones IPCC Colombia bajo el escenario SSP5-8.5, correspondiente a un contexto de alta, donde se prioriza el desarrollo basado en combustibles fósiles. Se eligió agosto de 2053 como proyección de escenario húmedo, por ser el mes con la mayor precipitación estimada en el modelo. Para el escenario seco

proyectado se seleccionó marzo de 2082, que muestra los valores más bajos de precipitación bajo ese mismo trayecto climático. Los valores de caudal derivados fueron empleados como condiciones de frontera para el modelo hidrodinámico. En la tabla 4.5 se muestra el resumen de los escenarios a proyectar.

Tabla 4. 5 Escenarios de simulación.

Escenarios	Descripción	Caudales utilizados	Datos climatológicos
Secas Feb 2024	Condiciones de sequía. Caudal mínimo en Sinú a 20 años	-Caudal Sinú 2024 febrero -Caudal Ag. Prietas 2024 febrero	-Estación Chimá (febrero 2024).
Secas marzo 2019	Condiciones de sequía. Segundo caudal mínimo en Sinú a 20 años	-Caudal Sinú 2019 marzo -Caudal Ag. Prietas 2019 marzo	-Estación Chimá (marzo 2019).
Lluvias agosto 2000	Escenario de lluvias con caudal superior al promedio	-Caudal Sinú 2000 agosto -Caudal Ag. Prietas 2000 agosto	-Estación Chimá (marzo 2000).
Lluvias agosto 2022	Escenario con caudal histórico más alto	-Caudal Sinú 2022 agosto -Caudal Ag. Prietas 2022 agosto	-Estación Chimá (marzo 2022).
Proyección IPCC marzo 2082 SSP5 -8.5	Marzo con menores cantidades de precipitación a 2100.	-Caudales Sinú 2024 marzo	-Proyecciones IPCC SSP5-8.5 (marzo 2082).
Proyección agosto 2053 SSP5 -8.5	Agosto con mayor precipitación a 2100.	-Caudales Sinú 2022 agosto	-Proyecciones IPCC SSP5-8.5 (marzo 2053).

5. Campañas de medición para la obtención de parámetros hidrodinámico.

Como parte fundamental de la modelación hidrodinámica del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú (CCBS), se llevó a cabo una serie de campañas de campo que incluyeron mediciones batimétricas, instalación y georreferenciación de estaciones limnimétricas, levantamientos de nivel, y uso de tecnología de medición de caudales mediante perfiladores acústicos de corrientes (ADCP). Estas actividades se desarrollaron a lo largo de doce semanas, entre mayo y julio de 2024, como parte de una estancia técnica en Colombia.

La primera visita al CCBS se realizó el 4 de mayo de 2024, con el objetivo de ubicar y referenciar topográficamente dos estaciones limnimétricas previamente instaladas en el caño Aguas Prietas, denominadas "La Prima" y "El Hermano". Sin embargo, las condiciones meteorológicas impidieron completar las mediciones planificadas con el equipo ADCP. Posteriormente, el 18 de mayo, bajo condiciones climáticas óptimas, se retomaron estas actividades logrando la georreferenciación de las estaciones y una nivelación manual con nivel óptico y estatal. Durante esta visita también se gestionó el permiso para instalar una tercera estación en el sector de Corozalito.

A lo largo de las semanas siguientes, se realizaron visitas regulares al sitio para continuar con las mediciones hidrométricas. El 4 de junio, 15 de junio, 19 de junio, 27 de junio, 6 de julio, 9 al 11 de julio, se llevaron a cabo campañas en transectos del caño Aguas Prietas, donde se ubican las estaciones "La Prima", "El Hermano" y "Cotoca Abajo", empleando el ADCP para medir profundidad y velocidad del flujo. Además, el 11 de julio, se realizó una batimetría del caño Aguas Prietas, desde su confluencia con el río Sinú hasta el punto accesible más alejado, utilizando dos ecosondas de medición de profundidad. Este levantamiento permitió generar un perfil detallado del lecho del caño, información esencial para la definición del modelo de fondo en la simulación hidrodinámica.

A fin de extender la mayor cantidad de datos medidos posibles, se continuaron las visitas al sitio con el ADCP y se realizaron transectos de medición en las estaciones previamente mencionadas de agosto hasta noviembre del 2024, los días de medición fueron 16, 23 y 26 de agosto; 03,06,09,18, y 24 de septiembre; 08,16,22, y 31 de octubre; por último, una única medición el 16 de noviembre del 2024. Estas mediciones posteriores fueron esenciales para lograr representar la validación del modelo calibrado.

Cabe destacar que el uso del ADCP presentó diversas dificultades técnicas durante las primeras semanas. Inicialmente, se intentó operar el equipo mediante conexión Bluetooth, lo cual resultó fallido; sin embargo, tras una capacitación específica, se optó por su operación con conexión alámbrica. Se realizaron pruebas con el software WinRiver, logrando filtrar y procesar los datos capturados de caudal y velocidad. Esta experiencia técnica permitió asegurar la calidad de los insumos para el modelo, tanto en términos de calibración como de validación de los flujos observados en campo.

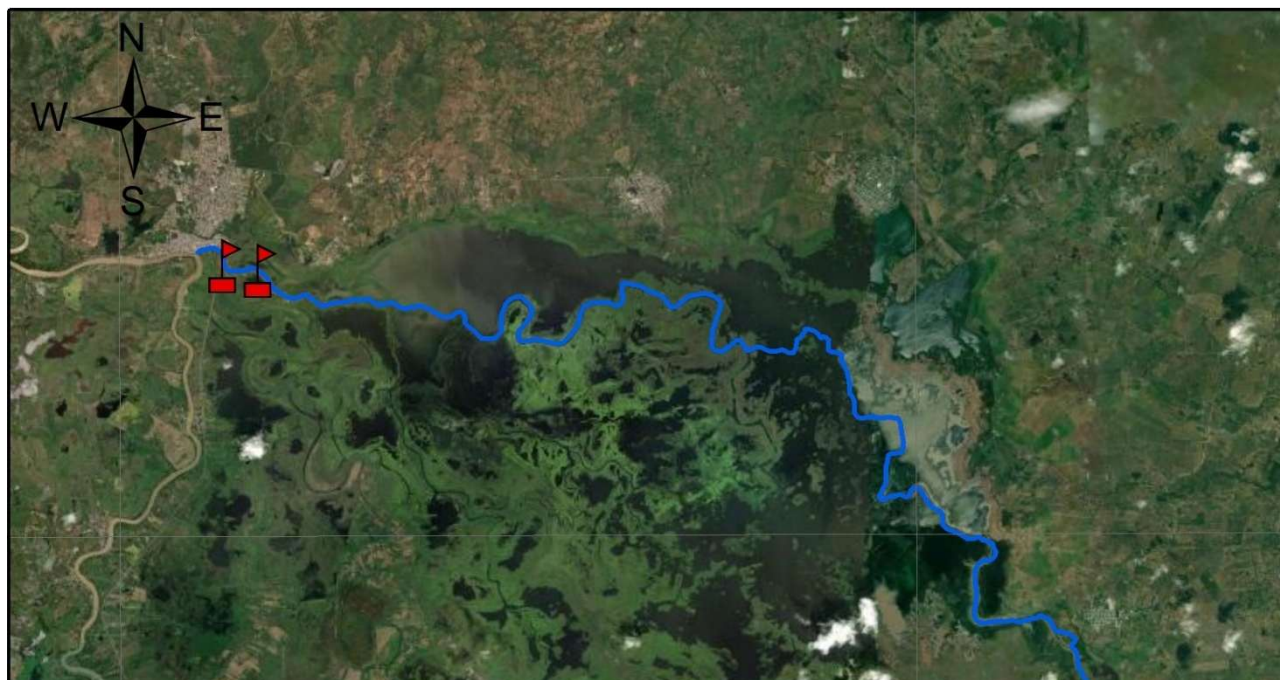


Figura 5. 1 Ubicación estaciones de medición de la zona de estudio.

Estas campañas fueron acompañadas por reuniones de colaboración técnica con integrantes de la Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge (CVS), quienes proporcionaron información sobre pozos, características del acuífero, parámetros fisicoquímicos del agua subterránea y antecedentes de manejo ambiental en la zona. Dicha información contribuyó al análisis complementario del flujo subterráneo y a la validación de los escenarios simulados.

En conjunto, esta serie de actividades de campo proporcionó datos esenciales para la construcción de un modelo hidrodinámico realista del CCBS, sustentado en observaciones directas y en una caracterización detallada de la hidrodinámica superficial del sistema. Las mediciones batimétricas y de velocidad fueron clave para definir tanto la geometría del canal principal como las condiciones de frontera requeridas por el modelo numérico.

5.1 Batimetría, medición de niveles, caudales y velocidades.

Para el desarrollo de las campañas de campo en el Complejo Cenagoso del Bajo Sinú, se utilizó una variedad de instrumentos especializados con el objetivo de obtener información precisa sobre las características hidrodinámicas y morfológicas del sistema. En la tabla 5.1 se presentan los insumos requeridos para estas campañas de medición. Cada uno de estos equipos y herramientas fue fundamental en diferentes fases del proyecto, desde la toma de datos en campo hasta la integración y análisis en gabinete. La combinación de sensores acústicos, herramientas de posicionamiento y programas de simulación numérica permitió construir una base de datos hidrodinámica robusta que alimentó directamente el proceso de modelación. La correcta selección y uso de estos equipos fue determinante para garantizar la calidad y confiabilidad de los datos obtenidos en campo.

Su implementación no solo permitió realizar mediciones precisas en condiciones variables del terreno, sino que también facilitó la validación de los resultados obtenidos mediante simulación numérica. Además, la interoperabilidad entre instrumentos y software contribuyó a una integración eficiente de la información espacial e hidrodinámica. La disponibilidad de equipos adecuados también fue clave para superar las limitaciones operativas en zonas de difícil acceso.



Figura 5. 2 Campaña batimétrica en el caño Aguas Prietas,

La realización de campañas batimétricas se realizó a lo largo del caño aguas prietas como se aprecia en la figura 5.2, sirvió para mejorar el nivel de fondo en el modelo, lo cual permitió mejorar el nivel de detalle del modelo. Además, las campañas de medición de variables, fueron esencial para obtener información hidrodinámica real y actualizada que no se encontraba disponible en bases de datos públicas ni en reportes previos. La complejidad del sistema, caracterizado por su conectividad dinámica con el río Sinú y la variabilidad espacial de sus caños y cuerpos de agua, exigía datos de campo que permitieran una adecuada caracterización del flujo superficial. Estas mediciones sirvieron como insumo directo para la calibración y validación del modelo numérico, aportando datos de velocidad, caudal y profundidad en puntos estratégicos del sistema.

Tabla 5. 1 Instrumentos de medición.

Equipo	Descripción técnica	Uso en campo
ADCP (Acoustic Doppler Profiler)	Instrumento acústico de medición de velocidad de corriente en tres dimensiones mediante el efecto Doppler. Frecuencia de 3 MHz, capacidad de medición en cuerpos de agua someros, precisión $\pm 0.25\%$ de la escala	Medición de velocidad del flujo, profundidad y perfil de corriente en transectos del caño Aguas Prietas. También empleado para estimar caudal
Ecosondas portátiles	Dispositivos de sonar de frecuencia media utilizados para medir la profundidad del lecho del cuerpo de agua	Realización de batimetrías en el caño Aguas Prietas para la generación del modelo de fondo
Nivel óptico con estadal milimétrico	Instrumento de precisión óptica para nivelación geométrica. Marca Topcon AT-B4A, con precisión de ± 2.0 mm por kilómetro doble de nivelación	Verificación manual de cotas limnimétricas y apoyo en la georreferenciación de estaciones
GPS portátil con capacidad diferencial (DGPS)	Receptor satelital con precisión submétrica. Marca Garmin GPSMAP 64sx	Georreferenciación de estaciones limnimétricas y puntos de medición en campo
Computadora portátil con software WinRiver II	Software especializado para la configuración y descarga de datos del ADCP	Control del ADCP, visualización en tiempo real y descarga de registros para análisis posterior
Software adicional (Fortran, ArcMap, Explorer, EEMS, Excel, EFDC, Grid+,)	Herramientas computacionales para el tratamiento, análisis y visualización de datos	Procesamiento de datos brutos, conversión de archivos, creación de mallas numéricas y simulación del modelo hidrodinámico



(a)



(b)



(c)

Figura 5. 3 Estaciones limnimetricas, (a) Transporte de niveles con receptor GPS, (b) Estación “El Hermano”, (c) Estación “la Prima”.



Figura 5. 4 Proceso de instalación de las estaciones limnimétricas



Figura 5. 6 Nivelación Topográfica con Sistema GPS. Equipo South GPS Satelital



Figura 5. 5 Estadal y Nivel Óptico South NL-C32



(a)



(b)



(c)

Figura 5. 7 (a) Componentes del ADCP, (b) Medición de una sección del caño Aguas Prietas con ADCP, (c) Recorrido en balsa a través de una sección del caño.

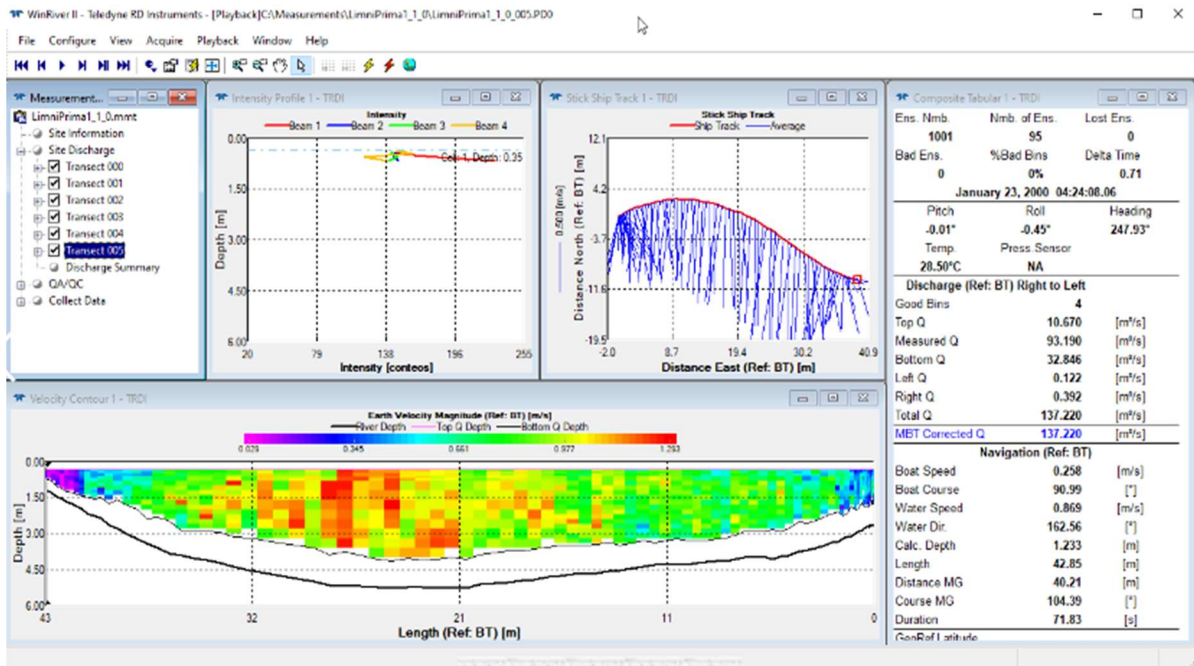


Figura 5. 9 Perfil de medición del ADCP en una sección del caño Aguas Prietas.



Figura 5. 8 Registro de caudales y velocidades mediante el uso del ADCP y WinRiver.

Como resultado de la campaña de medición se generó una serie de productos técnicos clave que sirvieron como base para el análisis y la simulación hidrodinámica del sistema. Entre ellos destacan las series temporales de caudal y velocidad para distintos puntos del caño Aguas Prietas, archivos batimétricos geoetiquetados, curvas de perfil del fondo del canal, y una base de datos estructurada con coordenadas y parámetros limnimétricas de las estaciones instaladas. Además, se elaboró una malla numérica optimizada en Grid+ adaptada a la morfología real del sistema, así como archivos de entrada procesados para EFDC Explorer, incluyendo datos meteorológicos, topográficos e hidráulicos. Estos productos no solo sustentan el modelo, sino que también constituyen una valiosa fuente de información para estudios futuros en la región.

La ejecución de la campaña de medición dejó importantes lecciones tanto técnicas como logísticas. Entre ellas, destacó la necesidad de contar con planes alternativos ante fallos en los equipos, como ocurrió con el ADCP durante las primeras salidas, lo cual retrasó la toma de datos clave. Asimismo, se evidenció la importancia de contar con personal capacitado en el manejo de tecnologías especializadas y en el tratamiento posterior de la información.

En cuanto a las limitaciones, algunas zonas del caño Aguas Prietas presentaron obstrucciones por vegetación densa que impidieron completar ciertos transectos batimétricos. También se identificó una limitada disponibilidad de datos históricos de calidad en la región, lo que incrementó la dependencia de las mediciones propias. A pesar de estos desafíos, la experiencia adquirida permitió adaptar la estrategia de medición y fortalecer la capacidad de análisis del equipo técnico involucrado.

5.2 Recopilación de datos.

Las campañas realizadas en el caño Aguas Prietas en el Complejo Cenagoso del Bajo Sinú, se instalaron 2 estaciones para medir niveles mediante reglas limnimétricas. Señalando que las estaciones se ubicaron en el tramo del caño que presenta el flujo bidireccional.

Estas estaciones sirvieron además como puntos de referencia donde se realizaron mediciones con el ADCP con ayuda de un bote para medir caudal, dirección y velocidad del flujo del caño aguas prietas. Estas variables son indispensables para la calibración del modelo. Además, se realizó una campaña de medición de batimetría del caño Aguas Prietas a fin de mejorar el fondo y mejorar la resolución de la malla en el modelo y así que los resultados sean más fieles a la realidad. La campaña batimétrica se dividió en 2 fechas debido a la extensión del caño. Estas a su vez realizaron con 2 ecosondas GARMIN MAP, para corroborar que las mediciones fuesen correctas. La primera medición se realizó el día 10 de julio del 2024 y la segunda el día 16 de agosto del 2024.

En cuanto a los registros de nivel, estos se obtuvieron de forma diaria mediante el registro de las reglas limnimétricas, con apoyo de los pobladores locales quienes registraban el nivel y tomaban fotografía para corroborar la información.

Para las mediciones realizadas con el ADCP, se hicieron 3 campañas de medición la primera consistió en junio a julio en las fechas 05 de junio al 13 de julio, la segunda de agosto 13 al 29 de septiembre y la tercera de octubre 03 a noviembre 16. La obtención de estos parámetros en los días medidos es clave por que representa mediciones realizadas durante la temporada de lluvias, lo que le permite alimentar al modelo con fechas con altos valores en caudales, velocidades y con la apreciación de días con flujo bidireccional.

5.3 Procesamiento de información y análisis de incertidumbre.

Como parte del trabajo de análisis posterior a las campañas de medición en campo, fue necesario desarrollar herramientas computacionales que permitieran organizar, filtrar y transformar los datos brutos obtenidos con el equipo ADCP y otros dispositivos de medición. Para ello, se diseñó y aplicó un programa escrito en lenguaje Fortran, desarrollado por el Dr. Clemente Rodríguez Cuevas, orientado al posprocesamiento de archivos en formato .rec y .txt. El desarrollo de este script respondió a la necesidad de automatizar la lectura masiva de datos hidrodinámicos, cuya estructura dificultaba el procesamiento manual debido a la alta densidad de puntos por transecto y la presencia de múltiples variables por sección. En este sentido, el programa cumplió las siguientes funciones:

- Lectura estructurada de archivos de salida provenientes de los instrumentos de medición.
- Extracción selectiva de variables relevantes, incluyendo coordenadas espaciales (latitud y longitud), profundidades, velocidades en componentes U y V, magnitud del vector de velocidad, y caudal por perfil vertical.
- Cálculo automatizado de la velocidad escalar mediante la expresión:

$$V = \sqrt{U^2 + V^2}$$

- Conversión y organización de los datos en archivos .csv, facilitando su incorporación en herramientas de análisis geoespacial y hojas de cálculo.

La implementación de este procedimiento fue esencial para la depuración y sistematización de los datos obtenidos en campo, los cuales sirvieron como insumo directo para la calibración y validación del modelo hidrodinámico EFDC. En particular, los datos de velocidad y caudal permitieron contrastar los resultados simulados frente a condiciones reales medidas en los distintos transectos del caño Aguas Prietas.

Además, el uso de esta herramienta informática redujo significativamente los tiempos de procesamiento, mejoró la trazabilidad del análisis y permitió replicar la metodología en distintos tramos del cuerpo de agua. Su valor agregado reside en la integración de capacidades computacionales a la gestión de datos de campo, optimizando la preparación de información para la modelación numérica.

La información obtenida durante la campaña de medición fue fundamental para alimentar y fortalecer el proceso de modelación numérica del sistema hidrodinámico del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú. Los datos recolectados en campo permitieron definir con mayor precisión la geometría del dominio modelado, establecer condiciones de frontera realistas y validar los resultados simulados mediante la comparación con observaciones directas.

En particular, las mediciones de caudal y velocidad obtenidas con el ADCP en los transectos del caño Aguas Prietas sirvieron como referencia clave para ajustar parámetros como la rugosidad, el coeficiente de difusión y la calibración del modelo. Asimismo, las batimetrías generadas contribuyeron a la elaboración de una malla más representativa del relieve subacuático, mejorando la calidad de las simulaciones. En este sentido, la integración de los datos empíricos al modelo EFDC permitió no solo reproducir el comportamiento hidrodinámico del sistema, sino también evaluar su respuesta ante diferentes escenarios.

Si bien durante las campañas de medición se obtuvieron registros hidrodinámicos en tres puntos representativos del sistema, para el proceso de calibración y validación del modelo hidrodinámico se seleccionó únicamente el punto b, (estación El Hermano), debido a su ubicación estratégica en el caño Aguas Prietas, donde se manifiesta de manera más clara la influencia combinada del río Sinú y del complejo cenagoso.

6. Modelación numérica del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú.

6.1 Comportamiento espacial y temporal de los niveles y velocidades.

Con el fin de analizar el comportamiento del flujo de agua entre el río Sinú y el caño aguas Prietas dentro del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú, se extrajeron datos hidrodinámicos en 3 ubicaciones representativas del sistema. La primera ubicación corresponde a la confluencia entre el río Sinú y el caño Aguas Prietas; la segunda se localiza en un punto intermedio del caño Aguas Prietas, próximo a la estación El Hermano, aproximadamente a mitad del trayecto entre el río Sinú y el complejo cenagoso; y la tercera se sitúa en la ciénaga de Guartinaja. Las coordenadas geográficas de estas ubicaciones se presentan en la Tabla 6.1, mientras que su localización espacial dentro de la malla del modelo hidrodinámico se muestra en la Figura 6.1.

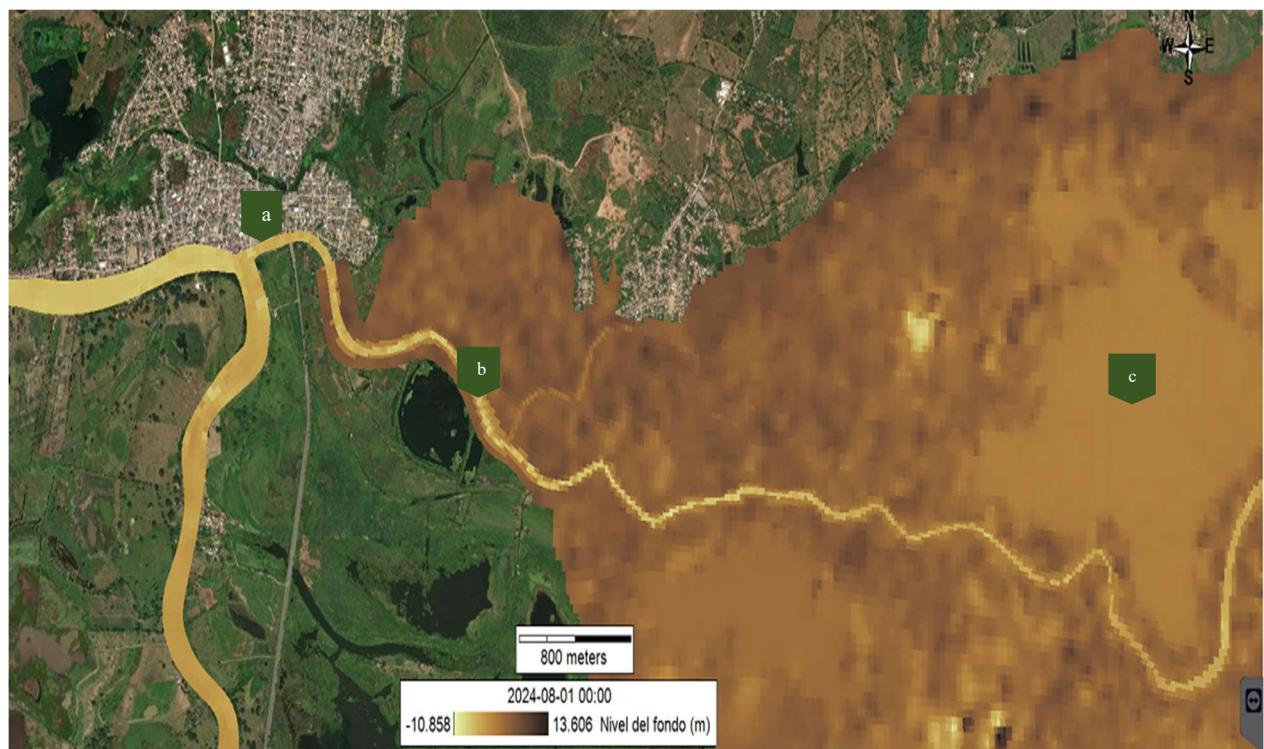


Figura 6. 1 Ubicación de puntos de interés para comparación de datos hidrodinámicos.

Tabla 6. 1 Coordenadas de los puntos de interés

Punto	Descripción	Coordenada X (m)	Coordenada Y (m)
Punto a	Conexión Sinú- Aguas Prietas	410,268.447	1,019,931.58
Punto b	Estación “Hermano”	411,803.78	1,019,364.92
Punto c	Ciénaga Guartinaja	416,672.80	1,019,132.58

El análisis espacial y temporal de los niveles y las velocidades es un primer acercamiento para comprender la hidrodinámica del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú bajo distintas circunstancias hidrológicas. En este apartado se examinan las variaciones simuladas en tres puntos estratégicos del sistema, los cuales se resumen en la tabla 6.1. A partir de los escenarios representativos de épocas de lluvias y secas, así como de las proyecciones climáticas a futuro se evalúan los patrones de fluctuación de los niveles y la magnitud de las velocidades a lo largo del periodo de simulación. En este análisis se permite identificar gradientes hidráulicos, zonas de almacenamiento temporal, momentos de mayor conectividad hidrológica y posibles restricciones al flujo, proporcionando la base para el entendimiento de intercambio de caudales y la respuesta de los humedales ante variaciones externas.

Los niveles simulados muestran diferencias claras entre los puntos de observación, temporadas de lluvias y secas, y escenarios históricos y de proyecciones climáticas. En conjunto los resultados evidencian la gradiente hidráulica que articula el sistema Río Sinú – Caño Aguas Prietas _ Humedales del Complejo Cenagoso, así como su sensibilidad ante variaciones en los caudales y las condiciones climáticas.

En la figura 6.2 (lluvias) y 6.3 (secas) se muestran las gráficas para el punto a, ubicado en la conexión del caño con el río, este es el punto de control hidráulico principal por lo que aquí se expresan con mayor claridad las diferencias entre los escenarios. Para los escenarios que simulan los caudales

máximos de agosto del 2022 y el que utiliza las proyecciones de cambio climático para 2053, no se observan diferencias apreciables, lo que confirma que la variación de precipitación no aumenta considerablemente en este mes, caracterizado por presentar los mayores caudales en el río Sinú. Para lo simulado con los caudales de agosto del año 2000, se mantienen niveles alrededor de 4.8 m a 5.0 m, lo cual sugiere un régimen donde predomina el flujo del complejo hacia el río. En cuanto a la proyección del 2082, los niveles aumentan, mostrando condiciones más húmedas para este periodo.

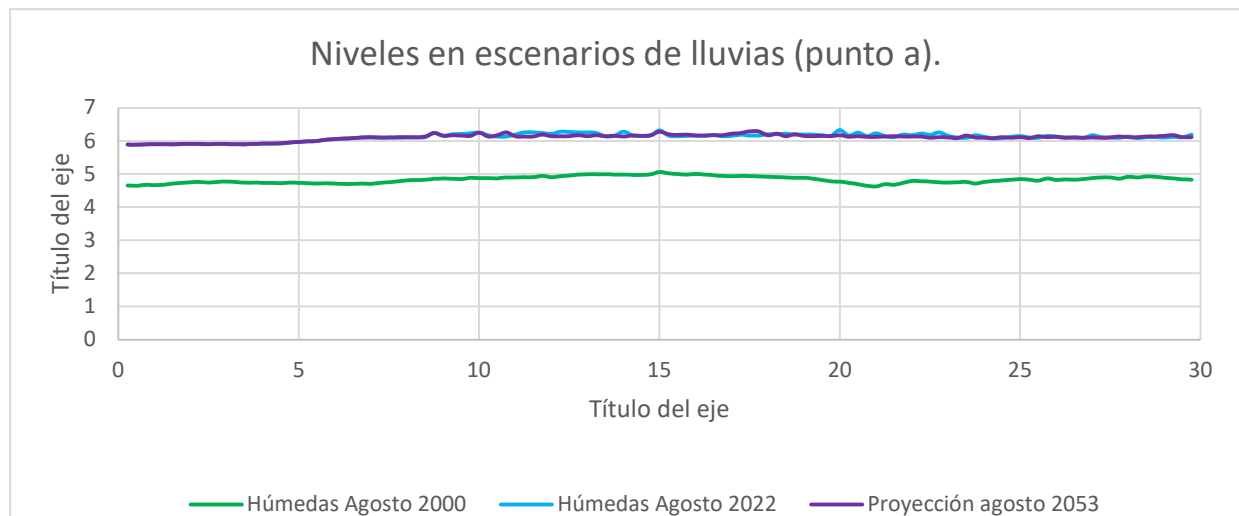


Figura 6.2 Gráfica de niveles punto a (conexión Sinú - Aguas Prietas). Escenarios de lluvias.

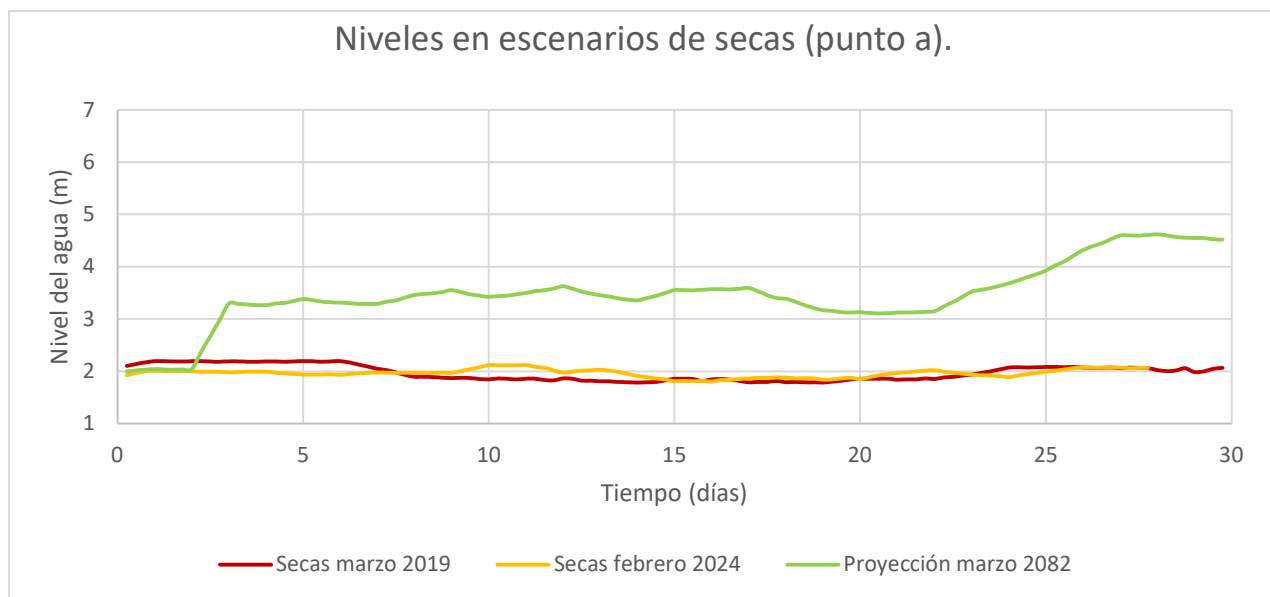


Figura 6. 3 Gráfica de niveles punto a (conexión Sinú - Aguas Prietas). Escenarios de secas.

En la figura 6.4 y 6.5 se aprecian los niveles para el punto b (Hermano), punto intermedio donde los niveles simulados muestran una respuesta coherente con las condiciones hidrológicas impuestas a cada escenario. Para el periodo de lluvias, el escenario de agosto del 2000, presenta niveles más bajo de entre 4.2 a 5.0 m reflejando un régimen histórico menor de caudal y de menor presión hidráulica desde el río Sinú, contrastante contra los niveles mayores que alcanzan en los escenarios de 2022 y las proyecciones climáticas del 2053, los cuales muestran valores muy similares de 5.5 a 6.2 m de nivel de agua indicando que el caño agua aguas prietas responden principalmente la magnitud del caudal que ingresa desde el Sinú; y que bajo escenarios de mayor aporte se transmite con poca atenuación en el caudal en este punto. Esto muestra al caño Aguas Prietas como un tramo de transferencia donde las condiciones son casi uniformes durante eventos húmedos altos.

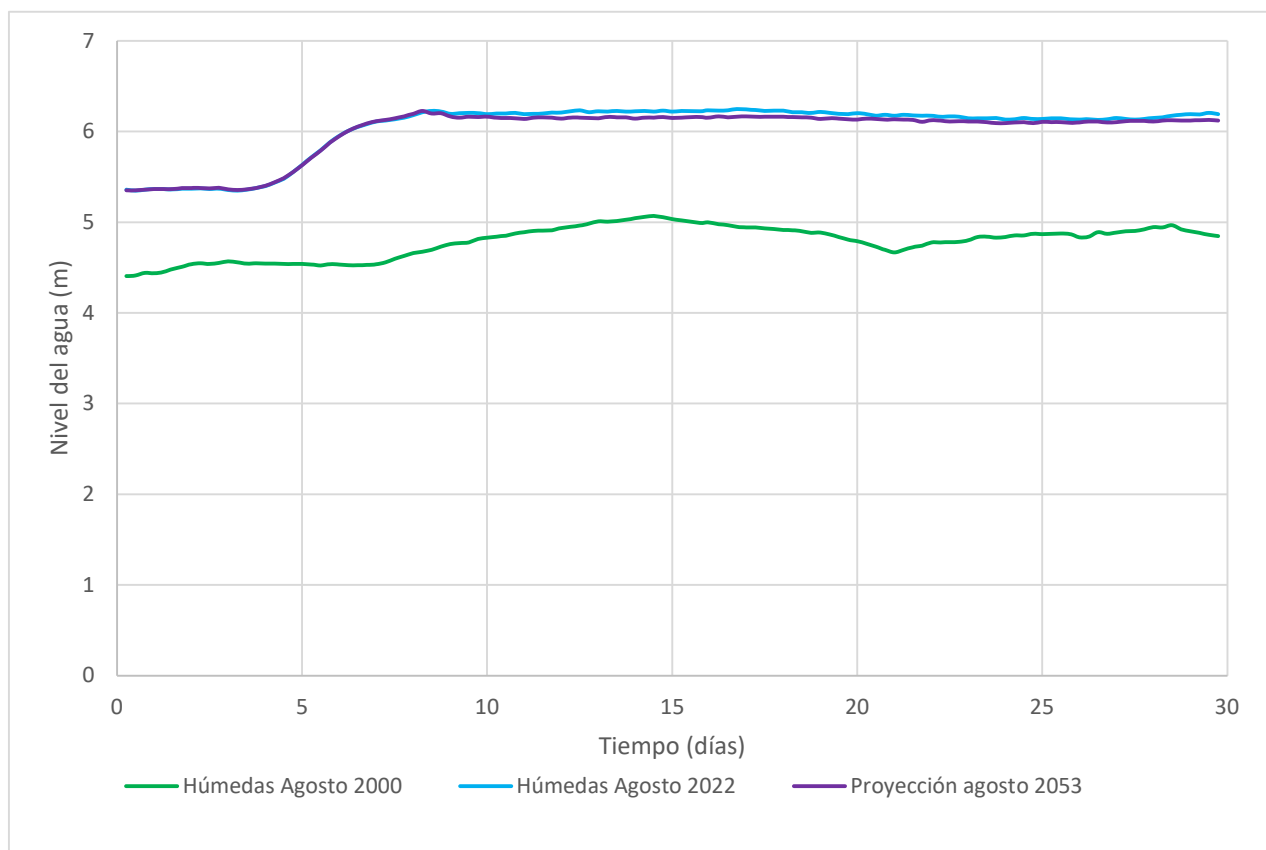


Figura 6. 4 Gráfica de niveles punto b (hermano). Escenarios de lluvias.

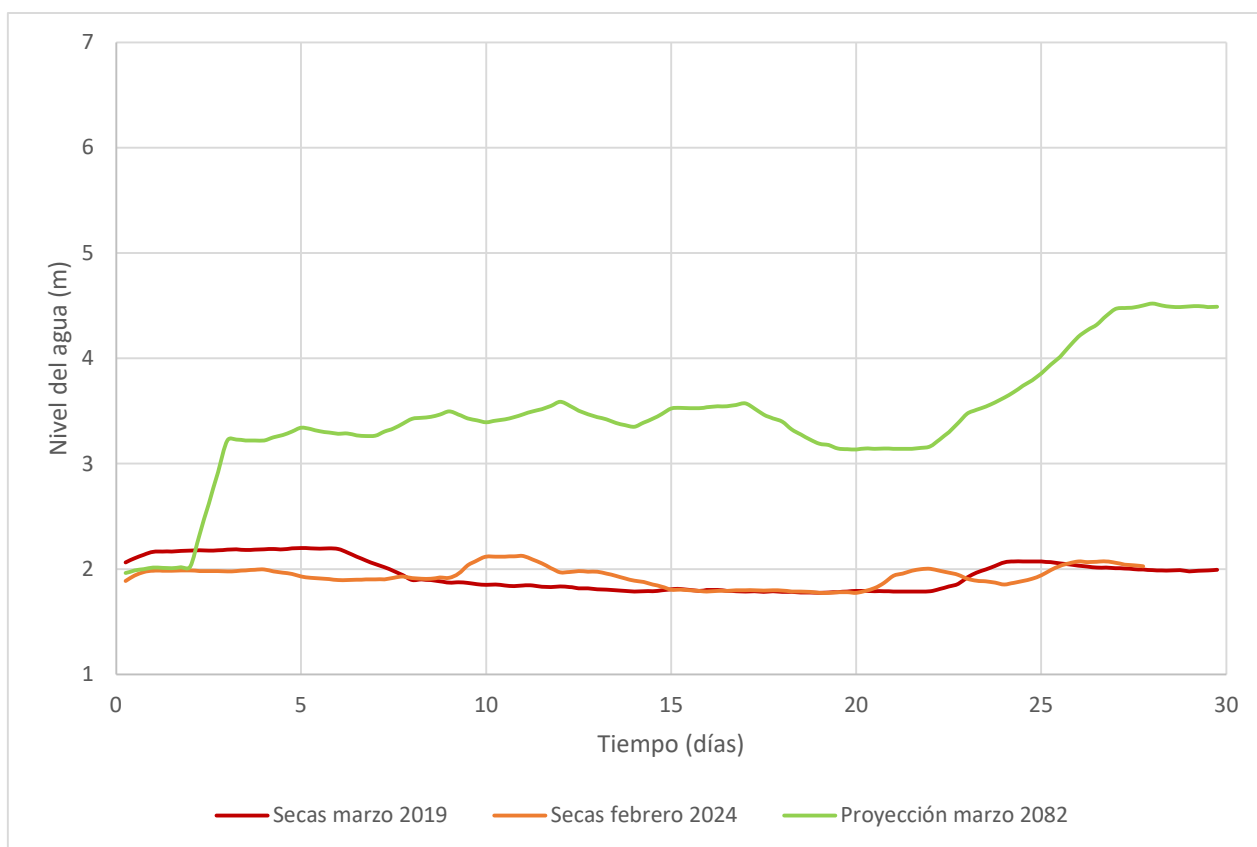


Figura 6. 5 Gráfica de niveles punto b (hermano). Escenarios de secas.

Por otro lado, los escenarios secos muestran diferencia mucho más marcadas, para los escenarios del 2019 y 2024 los niveles varían entre 1.8 m y 2.2 m de nivel de agua, evidenciando un régimen típicamente controlado por niveles locales dentro del año con poca influencia del Sinú. De forma contrastante la simulación de la proyección para el 2082 muestran que los niveles se elevan de 3 a 4.5 m, lo cual muestra un cambio en el régimen de precipitaciones, ya que en las proyecciones se aprecia un aumento en las precipitaciones, lo cual se traduce como un aumento en los niveles del agua en el complejo cenagoso, ríos y canales en su interior.

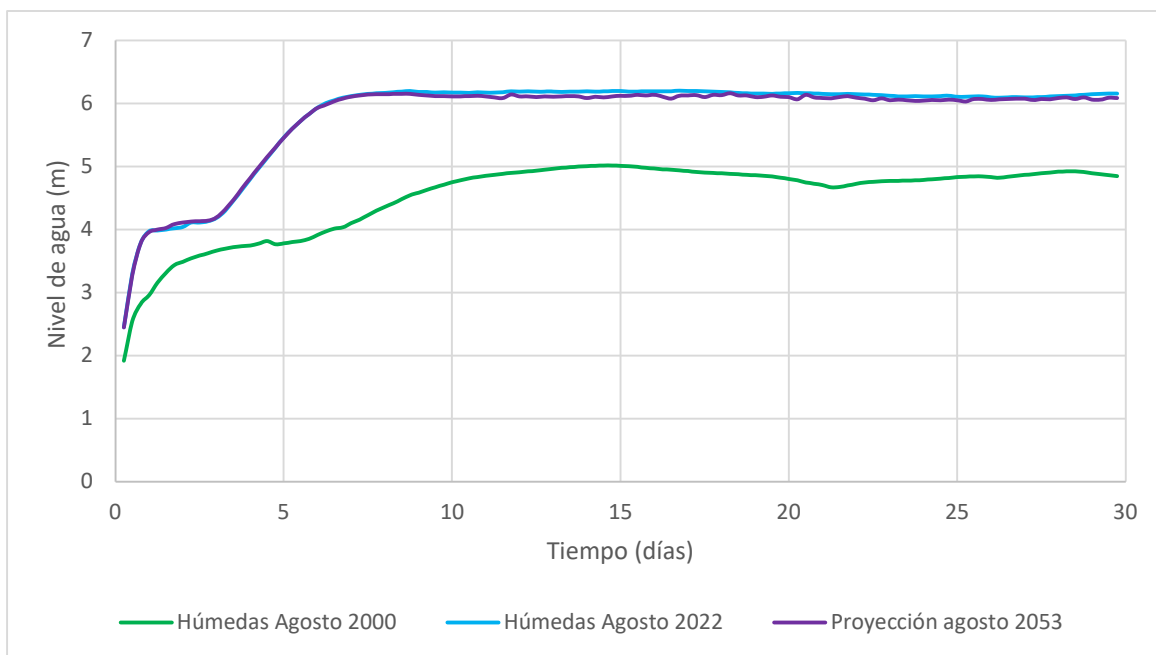


Figura 6. 6 Gráfica de niveles punto C (Ciénaga de Guartínaja). Escenarios de lluvias.

En las figuras 6.6 y 6.7, se muestran las gráficas de nivel para un punto dentro de la ciénaga de Guartínaja, un cuerpo lentic principal donde su comportamiento receptor es más atenuado y lento. Para los escenarios húmedos, los escenarios 2022 y 2053 permanecen muy próximos (6.0 a 6.3 m) indicando que la ciénaga amortigua las variaciones del caudal y no hay cambios bruscos provocados por un aumento de la precipitación, mientras que, en los escenarios para agosto 2000, se mantienen niveles más bajos coherente con menor aporte desde aguas arriba en valores de 4 a 5 m.

Para los escenarios secos, los niveles para los escenarios de 2019 y 2024 permanece relativamente estables variando de 1.7 a 2.2 m. En 2082, se muestra un aumento importante de 3 a 4.5 m, lo cual sugiere un mayor almacenamiento ante un aumento en las precipitaciones por cambio climático, lo cual implica un potencial incremento en el riesgo de inundación permanente o pérdida del pulso hídrico estacional.

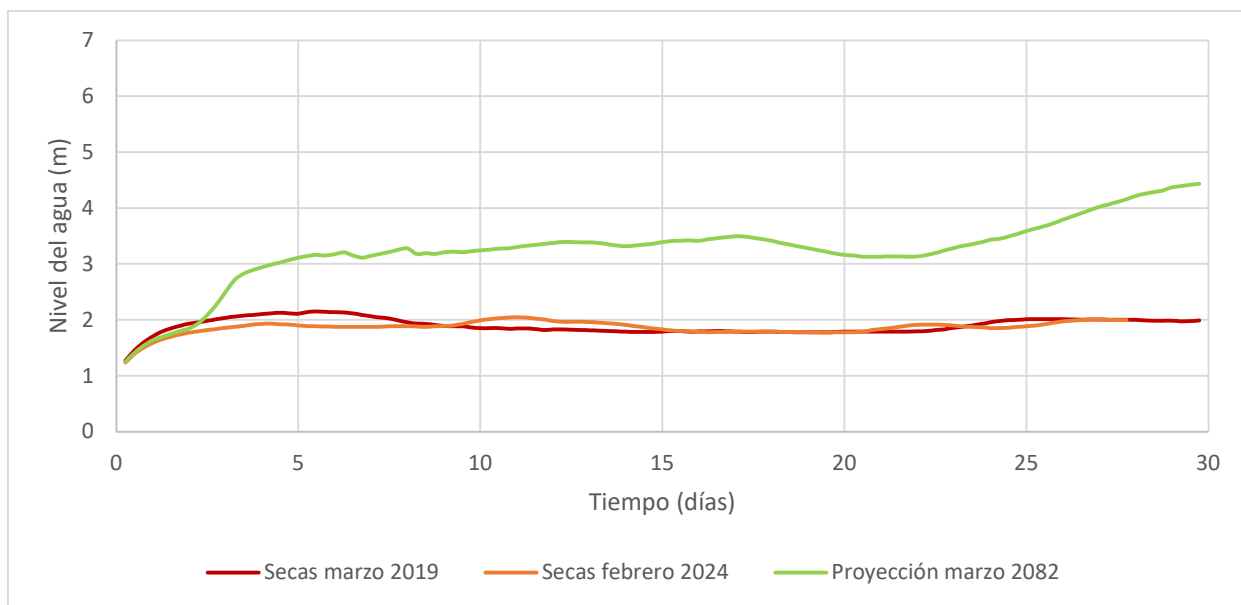


Figura 6. 7 Gráfica de niveles punto c (Ciénaga de Guartínaja). Escenarios de secas.

En cuanto a las velocidades, las gráficas 6.8 y 6.9, muestran las velocidades en el punto A, la conexión entre el río Sinú y el caño Aguas Prietas, para el escenario de lluvias, en los escenarios 2022 y 2053 se aprecia el dominio hidráulico del río Sinú, alcanzando valores hasta 1.5 m/s, en el año 2000 por su parte se tienen valores menores de 0.8 m/s, refleja un aporte menor de caudal por parte del río Sinú. En los 3 escenarios se observa una caída de velocidad entre los días 5 a 7, eso posiblemente por que la energía hidráulica del Sinú se disipa al confluir con el caudal proveniente de caño aguas prietas. Posterior a esta caída se observa que los valores de velocidad se observan muy bajas de entre 0.02 a 0.15 m/s. Llama la atención el escenario 2053 arranca con la velocidad más alta, sin embargo, decae incluso más rápido que los otros dos escenarios, lo cual sugiere, una mayor laminación dentro del complejo, la ampliación de los volúmenes inundados y disipación más eficiente de energía.

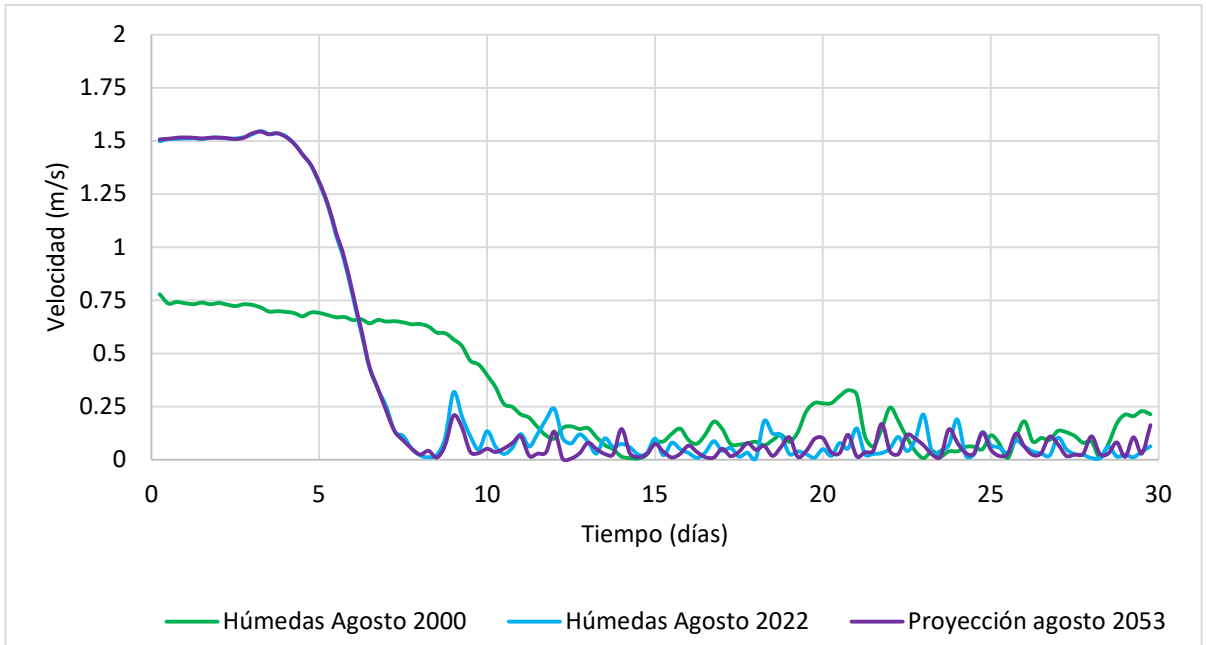


Figura 6. 9 Gráfica de velocidades punto a (conexión). Escenarios de lluvias.

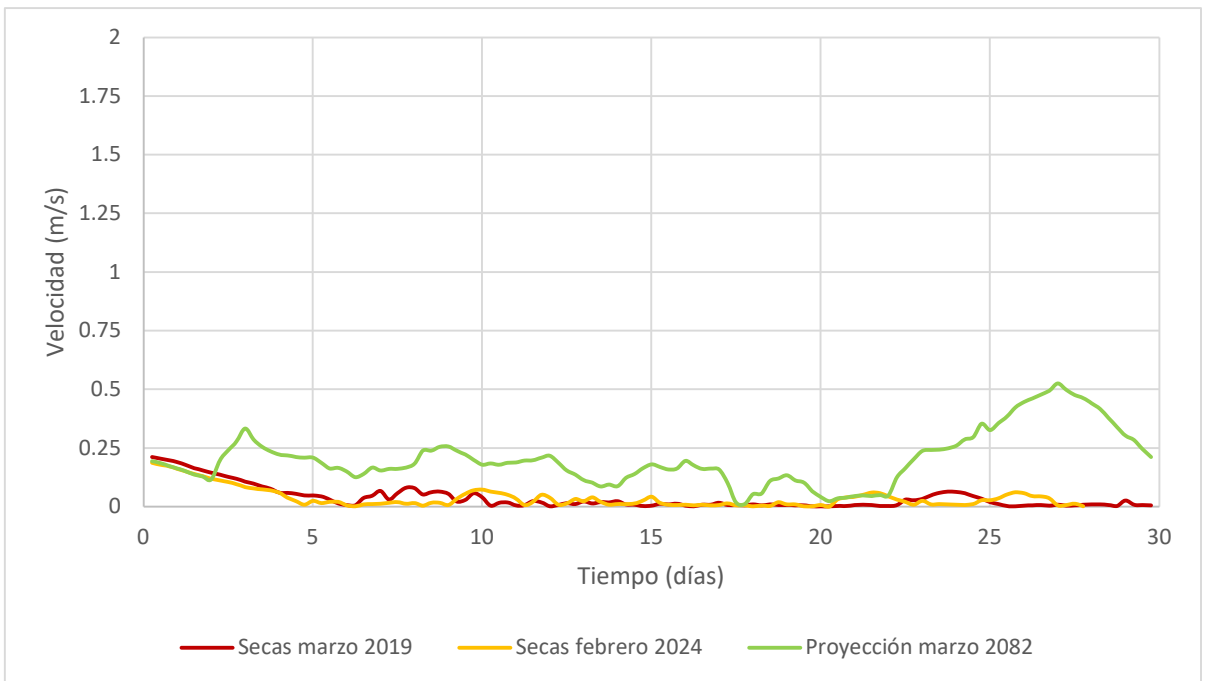


Figura 6. 8 Gráfica de velocidades punto a (conexión). Escenarios de secas.

Para los escenarios en épocas de secas, las series de 2019 y 2024 se mantienen entre 0 y 0.1 m/s, congruente con bajos aportes del Sinú en épocas de estiaje, niveles reducidos en la conexión y fricciones emergentes en el cauce del Sinú. Para el escenario de 2082, se muestra mayor variabilidad porque hay picos que alcanzan hasta 0.5 m/s, y un ascenso progresivo hacia el fin del mes. Esto muestra que el incremento de la evaporación y precipitación genera flujos internos más activos, y estos cambios climáticos incentiva el intercambio de agua entre los cuerpos, intensificando las oscilaciones del flujo aun en estado de estiaje.

En las figuras 6.10 y 6.11, se muestran las velocidades para el punto b, el hermano, donde en las épocas lluvias, se muestra un patrón en la dinámica de la velocidad altamente controlado por el empuje inicial del río Sinú, con una magnitud reducida a medida que el flujo avanza hacia el interior del caño.

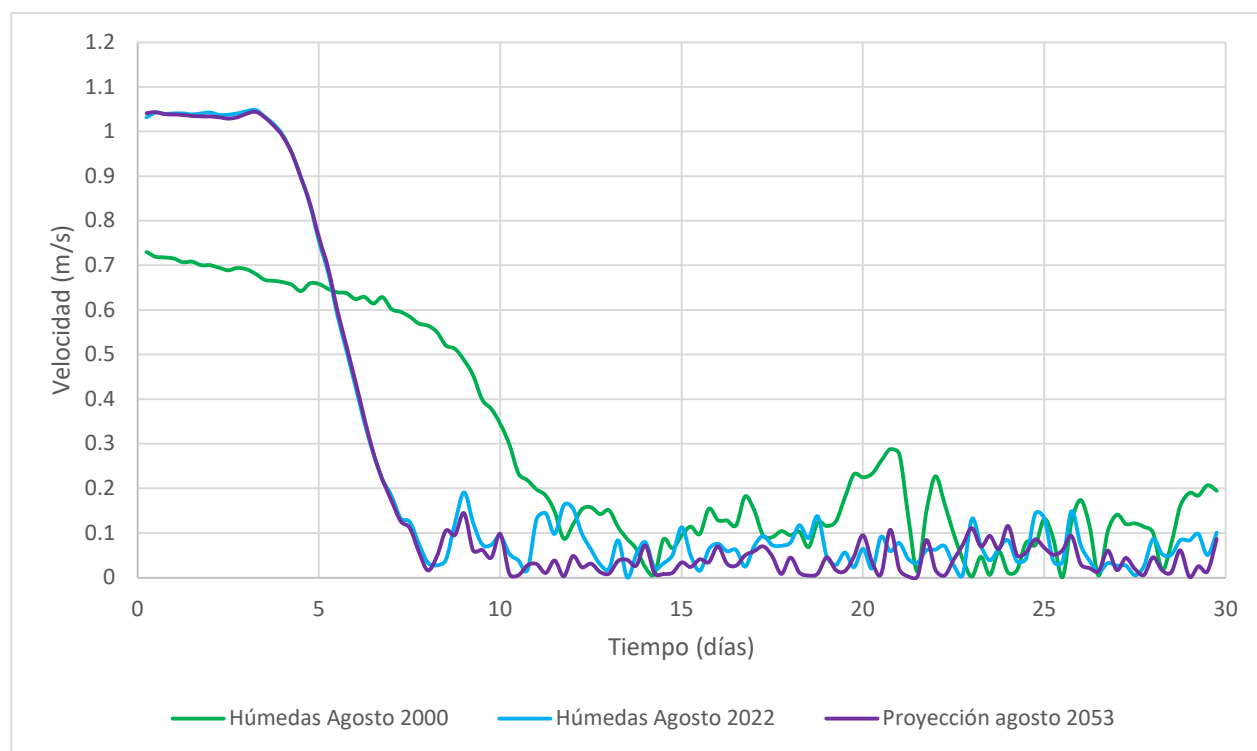


Figura 6. 10 Gráfica de velocidades punto b (hermano). Escenarios de lluvias.

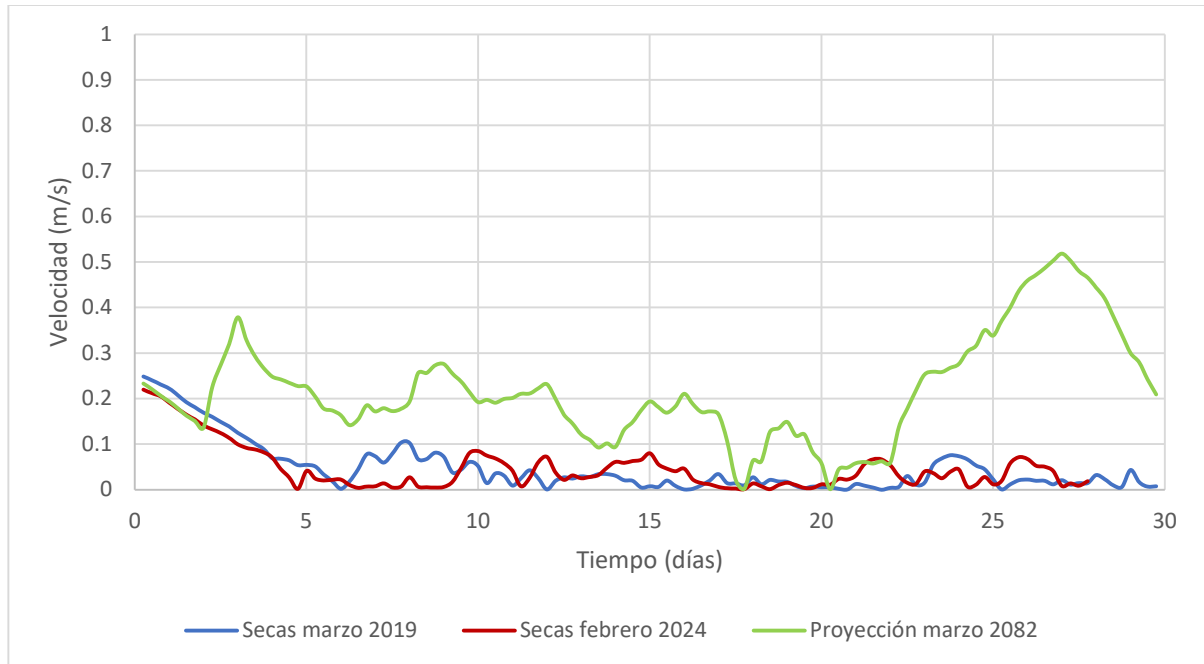


Figura 6. 11 Gráfica de velocidades punto b (hermano). Escenarios de secas.

En comparación con el punto a, el punto b, evidencia una dinámica amortiguada. Aunque ambos sitios experimentan un pulso inicial de energía durante los primeros días de simulación, en el hermano las velocidades son menores y disminuyen más rápido. Esto confirma que en esta zona intermedia del caño aguas prietas se disipa la energía del flujo proveniente del Sinú. Asimismo, las diferencias entre escenarios húmedos, secos y futuros son menos pronunciadas en el Hermanos porque las velocidades son más bajas, y dentro del caño, la sensibilidad a cambios en el caudal es reducida.

En el punto C, correspondiente a la ciénaga de Guartinaja, se observa un comportamiento claramente distinto al de los primeros dos puntos. En este caso, los niveles de agua permanecen prácticamente invariables en los escenarios históricos, con fluctuaciones mínimas que reflejan un desacoplamiento hidráulico respecto al río Sinú durante los periodos secos. A diferencia de los puntos más cercanos al cauce, donde los pulsos de caudal se traducen en cambios rápidos de nivel y de velocidad. La ciénaga opera como un reservorio interior con alta capacidad de amortiguación y tiempos de residencia

prolongados. Las velocidades registradas, tanto en los escenarios de épocas de lluvias como en secas son sistemáticamente más bajas, lo que confirme un régimen del tipo léntico. Aunque en el escenario futuro se muestran incrementos sustanciales en el nivel, esto no se traduce en aumentos equivalentes de velocidad, lo cual confirma que el humedal continúa funcionando como un área de almacenamiento y amortiguamiento.

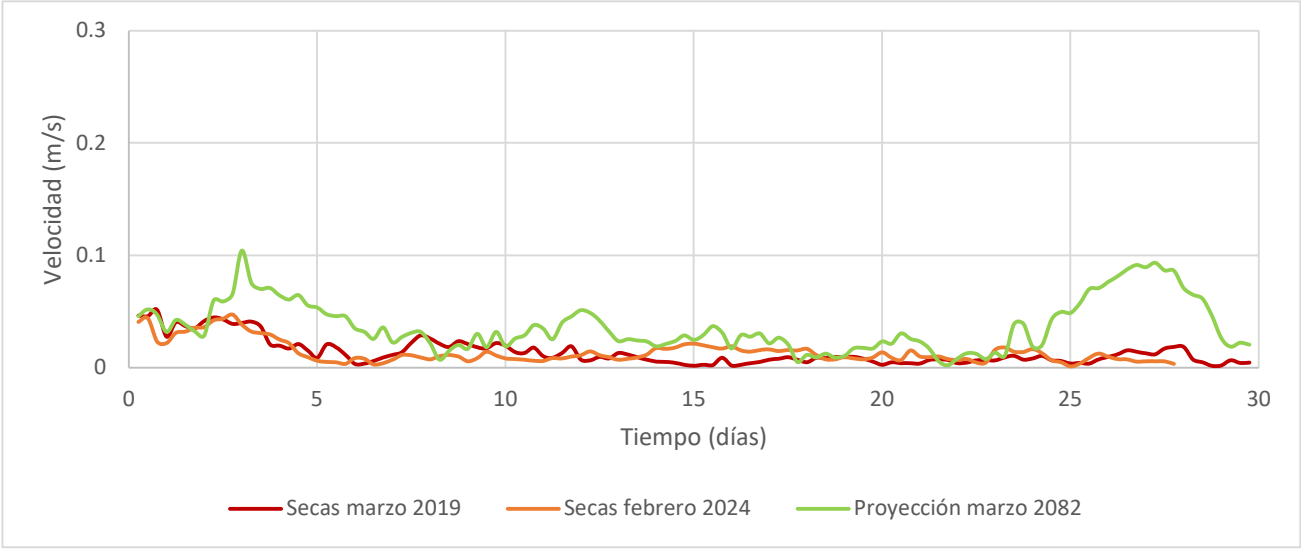


Figura 6. 12 Gráfica de velocidades punto c (Ciénaga). Escenarios de secas.

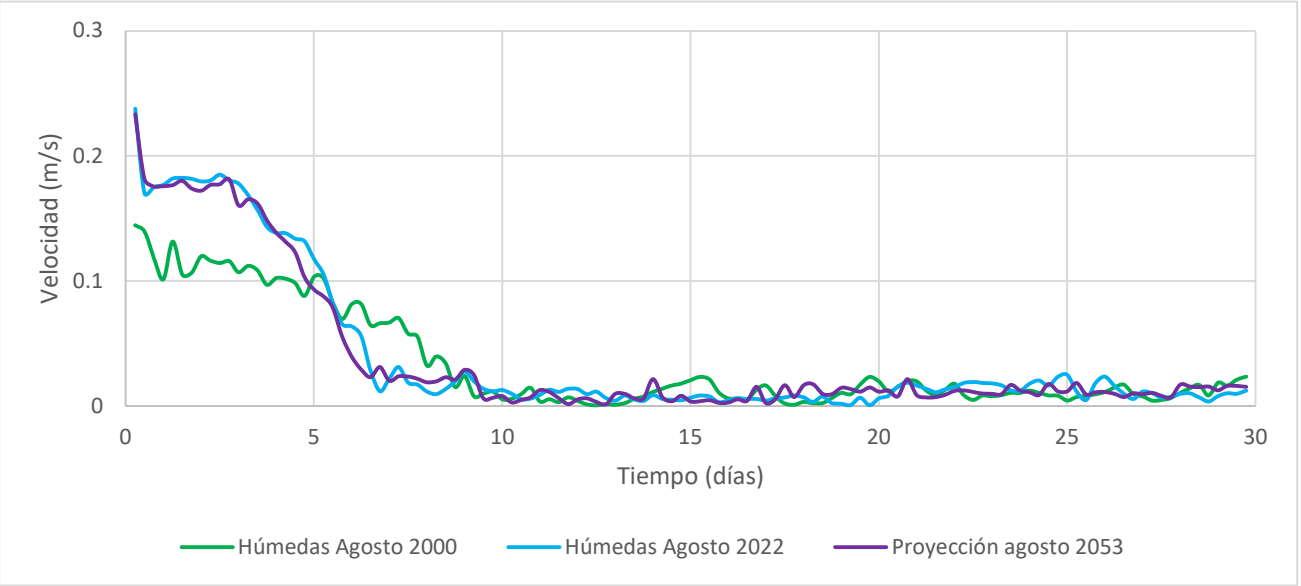


Figura 6. 13 Gráfica de velocidades punto c (Ciénaga). Escenarios de lluvias.

En conjunto, el análisis de niveles y velocidades en los 3 puntos evaluados, se evidencia un gradiente hidrodinámico claramente definido a lo largo del complejo cenagoso. Este gradiente responde a la distancia funcional respecto al cauce principal y al grado de conectividad hidráulica, lo que genera contrastes marcados tanto en la magnitud como en la variabilidad temporal de las condiciones hidrodinámicas.

En la conexión, la influencia directa del río Sinú se manifiesta en fluctuaciones rápidas y de mayor amplitud en los niveles, particularmente durante las épocas lluvias, donde el incremento inicial del caudal genera picos inmediatos y velocidades superiores a 1 m/s. Este punto concentra el mayor intercambio energético del sistema, funcionando como la puerta de entrada del flujo hacia el complejo. As velocidades disminuyen conforme avanza la simulación, pero se mantienen más altas que en los demás puntos, reflejando un entorno de flujo canalizado y sensible a los pulsos del río. Incluso en escenarios futuros, la dinámica sigue dominada por la respuesta rápida al pulso inicial, lo que confirma la fuerte dependencia del régimen del río Sinú.

En el punto intermedio del Hermano, la señal del río aún se percibe, pero de forma notablemente amortiguada. Los niveles muestran variaciones menores que en la conexión, con una tendencia a estabilizarse más rápidamente y con una amplitud reducida. Las velocidades, aunque inicialmente moderadas, decrecen a valores muy bajos dentro de los primeros días (por debajo de 0.1 a 0.2 m/s). Esto indica que el transporte energético pierde fuerza conforme el flujo se interna en el complejo. Este punto representa una zona de transición donde el flujo deja de ser estrictamente canalizado y comienza distribuirse en plano más amplios favoreciendo procesos de almacenamiento.

En el punto c, la ciénaga de Guartinaja, la respuesta hidrodinámica es marcadamente estable. Los niveles permanecen prácticamente constantes en los escenarios históricos, y aunque los escenarios futuros proyectan incrementos de nivel del agua estos no se traducen en un aumento equivalente de velocidad.

Las velocidades se mantienen bajas, cercanas a 0, lo que evidencia un ambiente léntico de alta capacidad de amortiguación. Guartinaja constituye por tanto una zona de almacenamiento con procesos de sedimentación y recirculación interna.

En conjunto, se muestra como la energía del sistema se disipa progresivamente desde la conexión hacia las zonas internas del humedal, dando lugar a diferencias de nivel y velocidad que estructuran la dinámica interna del complejo. Este comportamiento espacial está controlado por la conectividad, morfología y la distancia al cauce principal.

6.2 Intercambio de flujo entre el río Sinú y los cuerpos del complejo.

Las gráficas de caudal en la figura 6.14 muestran que el intercambio de flujo en la conexión con el río Sinú está fuertemente controlado por el régimen del río, particularmente durante la primera semana de la simulación. Para el escenario de agosto 2000, el caudal alcanza valores de entre 170 m³/s a 180 m³/s, descendiendo de forma progresiva hasta el final de la simulación. En agosto del 2022 y en la proyección

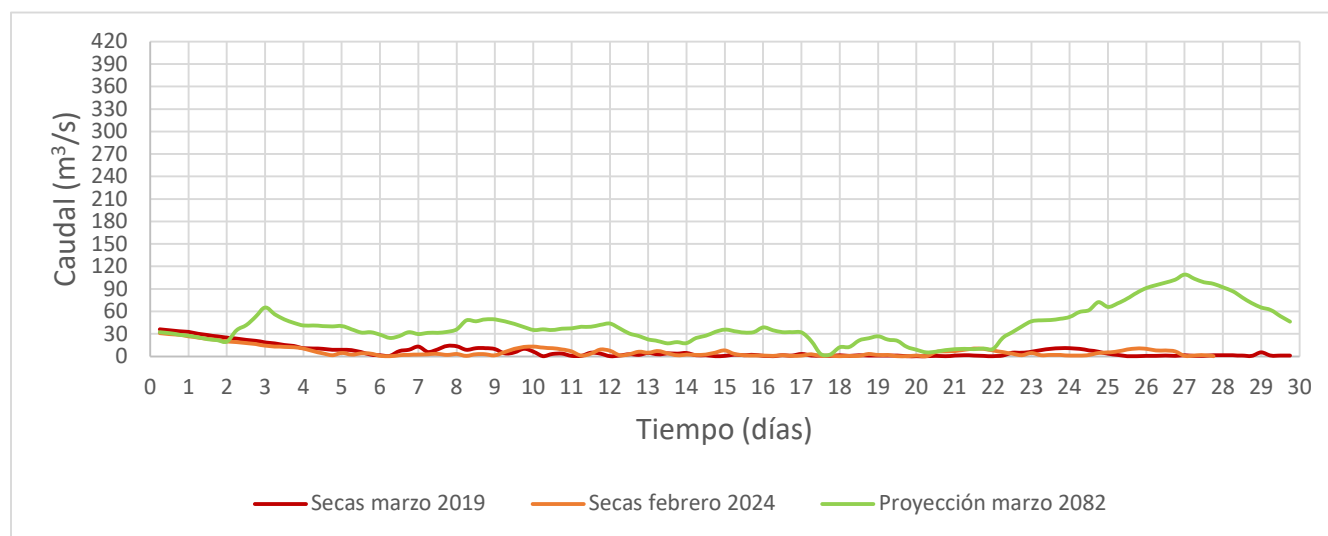


Figura 6. 14 Gráfica de caudales punto a (conexión). Escenarios de secas.

de 2053, los caudales iniciales son mucho mayores desde 365 m³/s a 380 m³/s, coherente con un río Sinú con mayor aporte inicial y con eventos de crecida asociados al escenario climático SSP5-8.5.

En todos los escenarios húmedos, como se aprecia en la figura 6.15, después del día 7, el caudal cae abruptamente a valores menores de 20 m³/s, y a partir de ese momento aparece un patrón altamente pulsante, con oscilaciones rápidas que sugieren una inversión de flujo frecuente. Durante las épocas lluvias la conexión funciona como punto de descarga del río hacia el caño, pero solamente mientras el caudal del caño Aguas Prietas no aumente, por lo que cuando esto pasa, pierde estabilidad y se vuelve bidireccional a baja magnitud.

En épocas de secas el caudal del río hacia el complejo es mínimo, inicialmente se mantienen valores de 30 m³/s, decayendo rápidamente hasta valores cercanos a 0 m³/s. El escenario proyectado para 2082 muestra una dinámica distinta, aumenta hasta 60 m³/s en los primeros 5 días y posteriormente oscila entre 20 m³/s a 50 m³/s, y hacia el final del mes alcanza un pico de hasta 100 m³/s. Este comportamiento sugiere que bajo el escenario climático SSP5-8.5, aun en época seca, habría mayor variabilidad hidrológica, intensificación de eventos extremos y un cambio en el régimen climático.

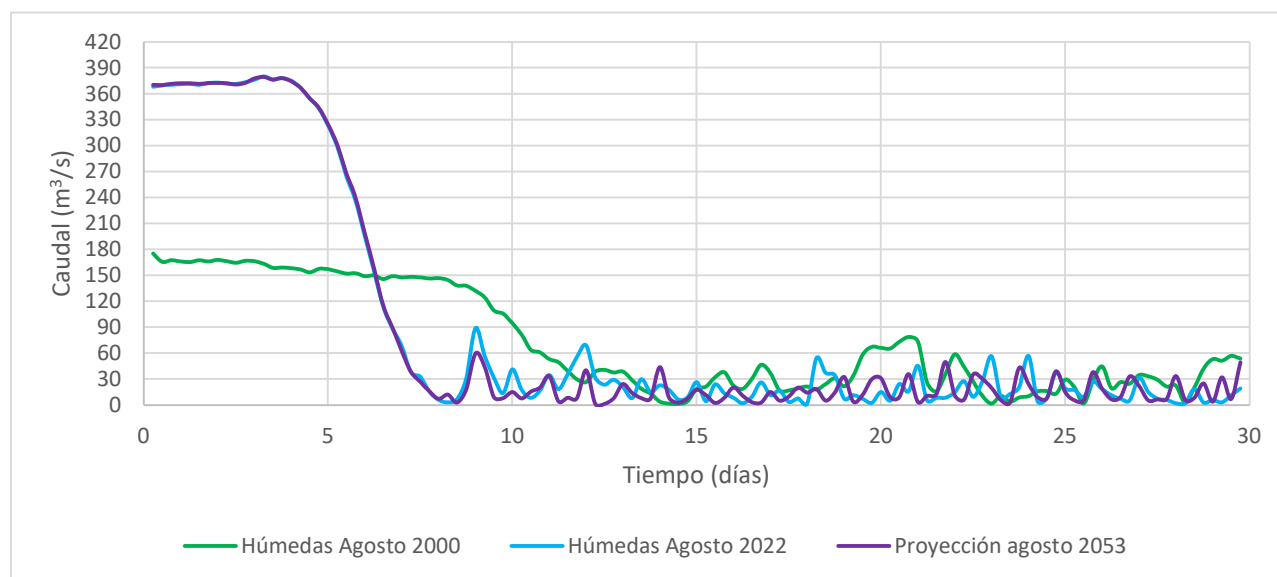


Figura 6. 15 Gráfica de caudales punto a (conexión). Escenarios de lluvias.

Para la dirección del flujo, en épocas de lluvias se ve una dirección estable de un flujo desde el río hacia el caño, a partir del día 7 las direcciones tienen cambios, y variaciones donde se invierte el flujo

hacia el río Sinú, lo que indica un flujo bidireccional, en épocas de lluvias mientras el caudal del río es mayor al del aguas prietas, este controla la dirección del flujo sobre este, des pues cuando los niveles del complejo se elevan, existe interacción fuerte entre el aporte del río Sinú y la respuesta interna del complejo. La proyección en lluvias de 2053 refleja una intensificación en esta inestabilidad, mostrando inversiones más frecuentes y amplitudes mayores.

Para épocas secas el escenario es distinto, (ver figura 6.17), en los primeros dos escenarios s la dirección del flujo se mantiene hacia el caño sin inversiones significativas. En la simulación del 2082, aparece cierta variabilidad, pero sin cambios bruscos recupera la estabilidad suavemente, por lo que es evidente que en época seca el río Sinú controla el flujo, donde el complejo recie agua en volúmenes muy reducidos.

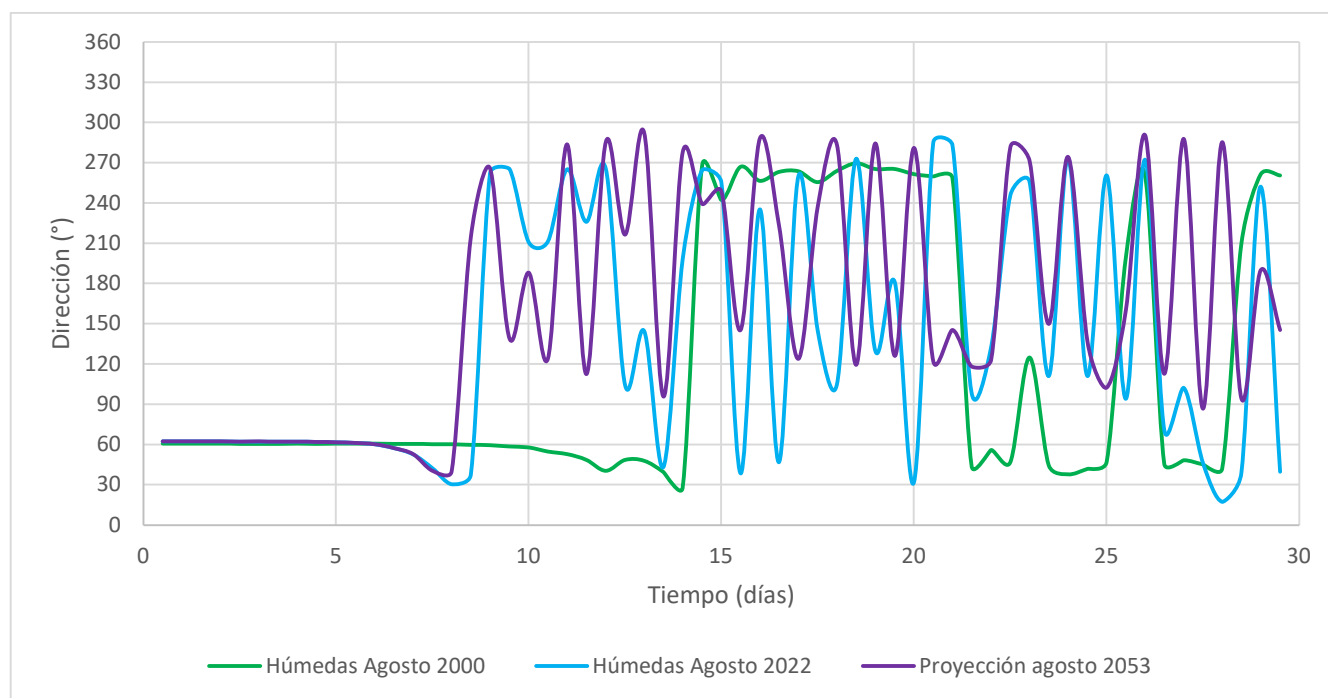


Figura 6. 16 Gráfica de dirección del flujo punto a (conexión). Escenarios de lluvias.

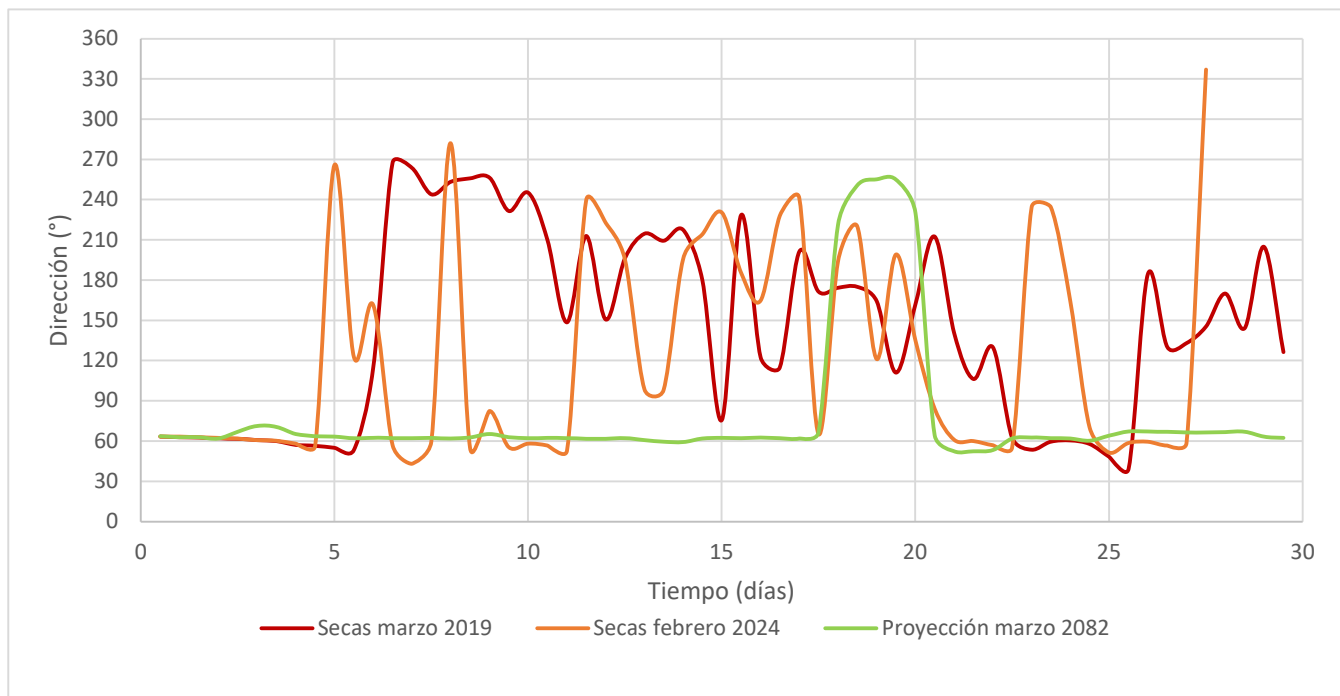


Figura 6. 17 Gráfica de dirección del flujo punto a (conexión). Escenarios de secas.

En el punto b, ubicado cerca de la estación del Hermano, se presenta un comportamiento hidrodinámico distinto al punto a (conexión). Si bien, ambos reflejan la influencia directa del río Sinú, en el punto B, la respuesta es más amortiguada, los caudales máximos son menores y la transición entre fases de aporte y vaciamiento ocurre de forma más gradual. Este comportamiento es coherente con un tramo más interno del caño, con mayor atenuación hidráulica.

En épocas de lluvias (ver figura 6.18), los caudales de los escenarios de 2000 y 2022, inicialmente se mantuvieron alrededor de 140 a 150 m³/s, claramente menores a los valores superiores a 360 m³/s en el punto a. La proyección 2053 muestra caudales cercanos a 215 m³/s, también menores que en el punto a. Los 3 escenarios se observa una caída pronunciada alrededor del día 7, coherente con la reducción del nivel en el río Sinú. Después de este descenso, los caudales oscilan entre 5 y 40 m³/s, con picos aislados

en 2000 y 2022. Esto se interpreta como que, en este tramo del caño, se amortiguan los picos altos observados en la conexión, con una pérdida de energía que reduce la magnitud del flujo.

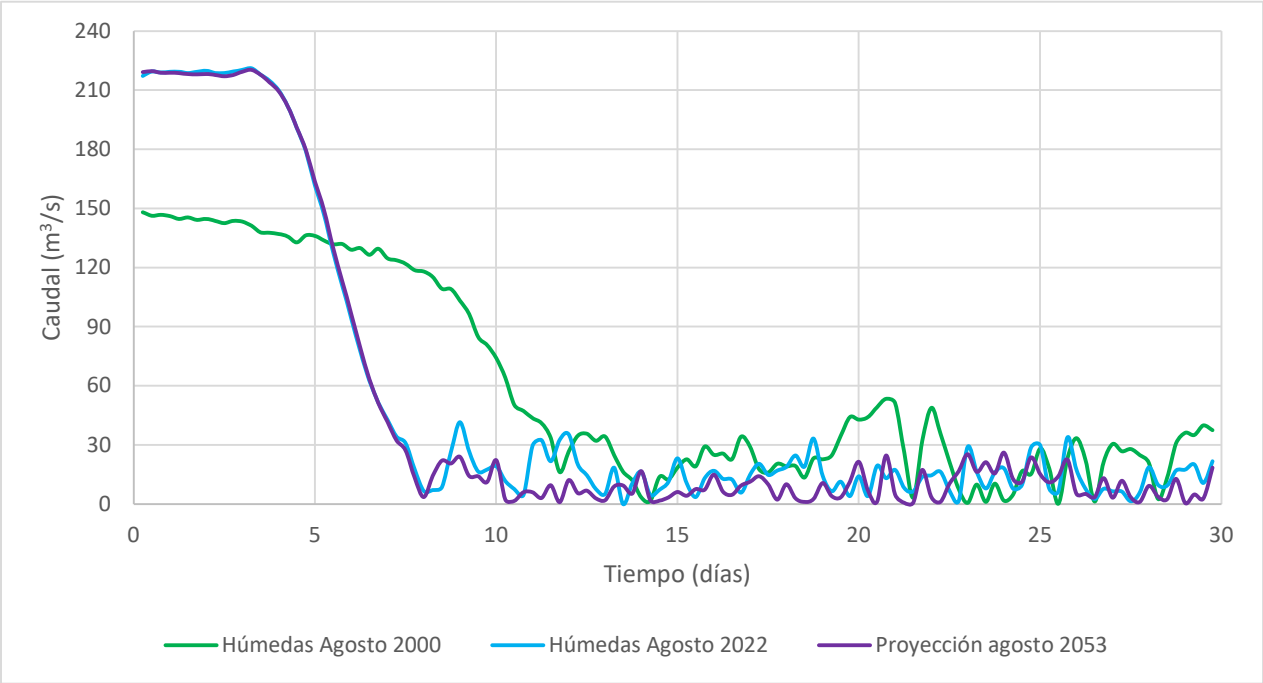


Figura 6. 18 Gráfica de caudales punto b (hermano). Escenarios de húmedas.

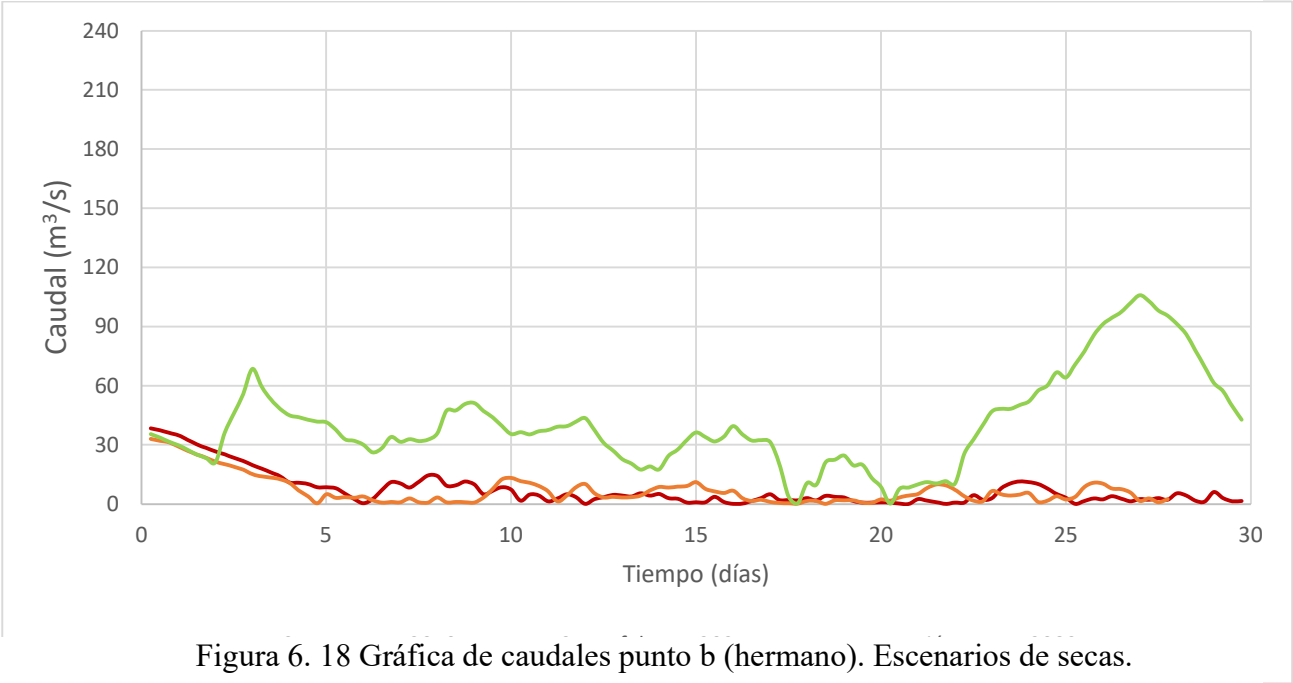


Figura 6. 18 Gráfica de caudales punto b (hermano). Escenarios de secas.

Figura 6. 19 Gráfica de caudales punto b (hermano). Escenarios de secas.

En épocas secas los escenarios de 2019 y 2024 los caudales son muy bajos desde el inicio cerca de 30 a 35 m³/s, y descienden rápidamente hacia valores cercanos a 0.00 m³/s, en el escenario 2082, aunque tiene valores similares, exhibe picos entre 30 y 60 m³/s, e incluso un ascenso marcado después del día 23, alcanzando niveles cercanos a 110 m³/s. Esto indica que condiciones futuras el aporte desde el Sinú podría intensificarse en épocas secas, por un aumento en las precipitaciones en pocas secas.

En cuanto a la dirección (figuras 6.20 y 6.21), en los primeros 7 días se aprecia una dirección estale del rio hacia el complejo, cuando el caudal cae las direcciones, tienen mayor variabilidad mostrando alternancia entre el aporte y el retorno. Para los escenarios de 2022 y 2053 se muestran oscilaciones que sugieren un flujo bidireccional más frecuente que en el de agosto del 2000. En 2053, estas fluctuaciones son más abruptas, indicando más inestabilidad direccional asociada a una mayor sensibilidad del sistema ante variaciones del nivel.

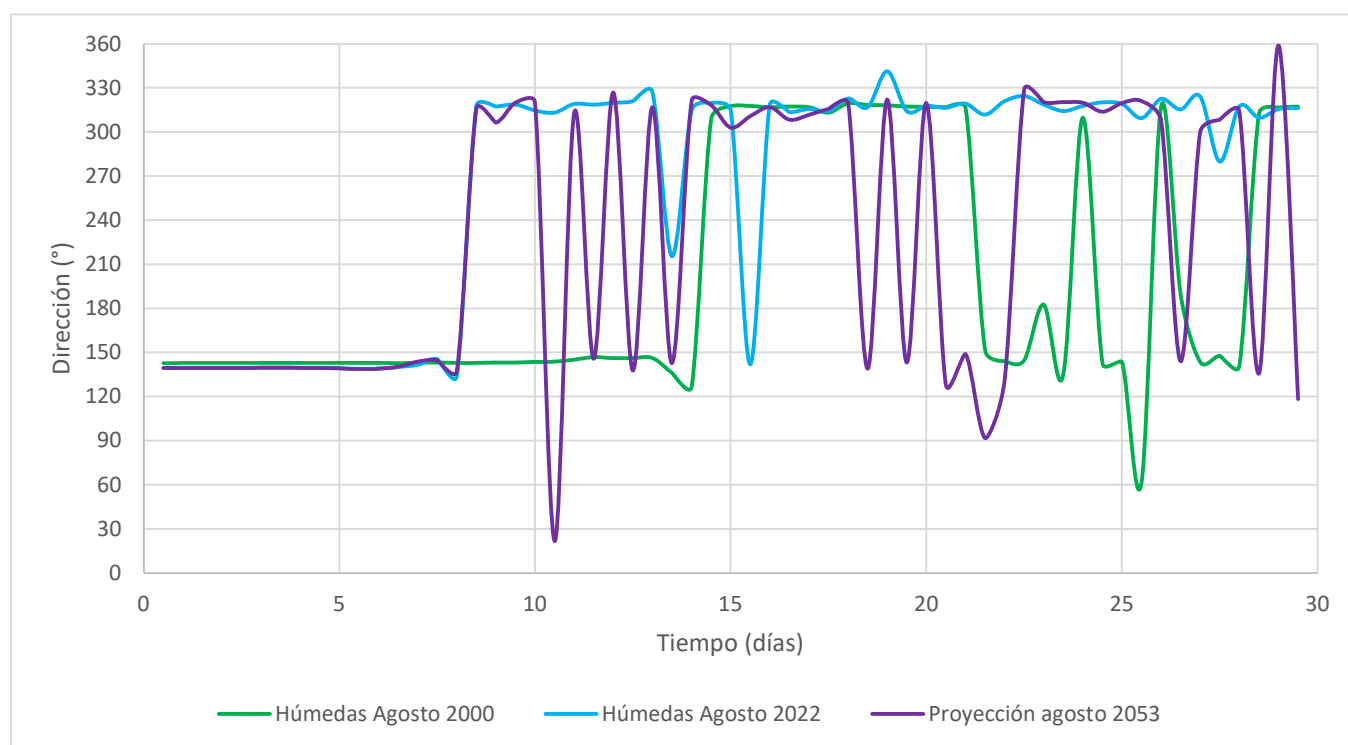


Figura 6. 19 Gráfica de dirección del flujo punto b (hermano). Escenarios de lluvias.

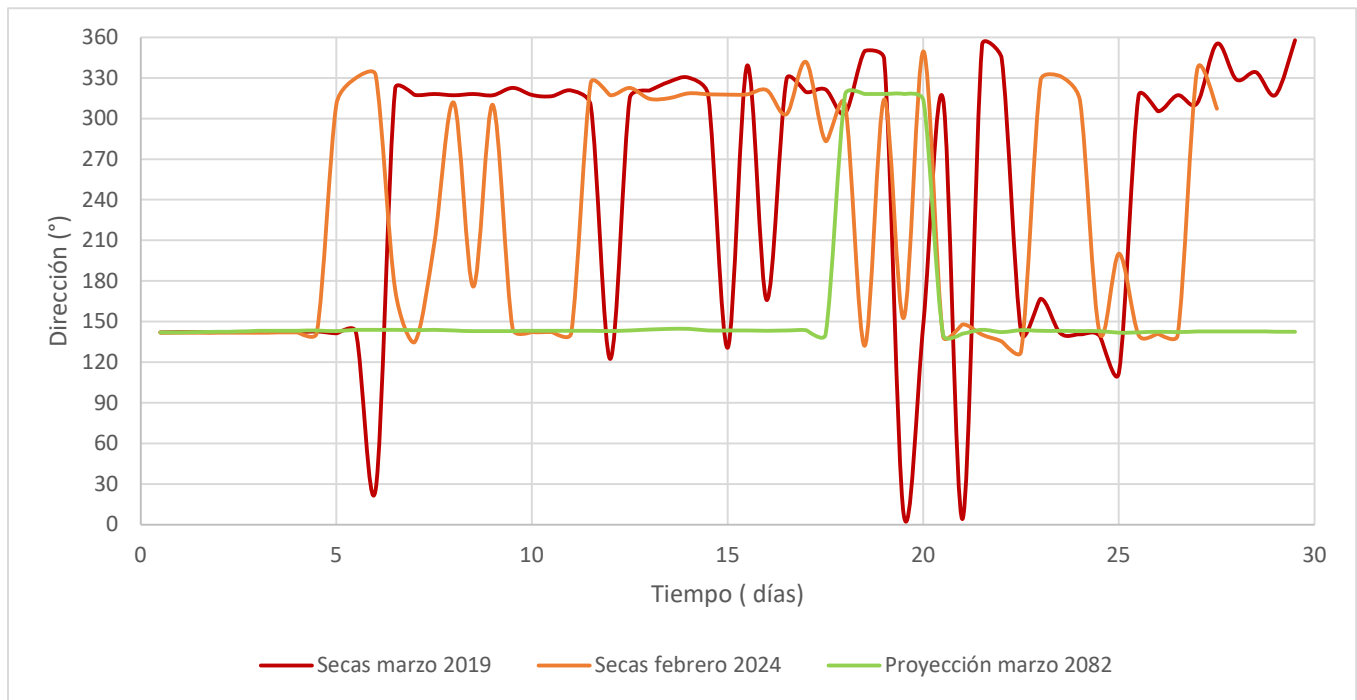


Figura 6. 20 Gráfica de dirección de flujo punto b (hermano). Escenarios de secas.

6.3 Efecto de las variaciones de caudal del río sobre los humedales.

Los resultados obtenidos en el punto B, en la estación Hermano, permiten analizar de manera detallada como las variaciones del caudal del río Sinú se transmiten hacia el sistema lagunar del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú. Este punto representa un tramo intermedio del caño Aguas Prietas, donde el flujo se encuentra influido tanto por las descargas del río como por la capacidad de almacenamiento de los humedales. Por lo anterior, es un indicador clave en la conectividad hidrológica entre ambos sistemas.

Durante el periodo húmedo, los caudales muestran una disminución progresiva conforme continúa la simulación, en los primeros días los valores son relativamente altos, asociados a la influencia directa de los caudales provenientes del río Sinú. A partir del día 5 al 7, el caudal tiene una disminución

abrupta en los 3 escenarios simulados en época de lluvias, lo que indica que la propagación del caudal se disipa conforme el agua se distribuye hacia las ciénagas. Entre los días 10 al 30, el sistema entra en un estado dominado por caudales bajos y altamente variables, lo cual refleja una transición hacia un flujo principalmente gobernado por gradientes locales dentro del complejo, con menor dependencia del aporte fluvial.

Para el escenario proyectado para el 2053 bajo condiciones de lluvias, se muestra un patrón muy similar al del 2022, aunque con disminuciones más rápidas, y valores significativamente menores en la segunda mitad del mes. Esto sugiere que, bajo escenarios de cambio climático, la hidrodinámica del río podría atenuarse más rápidamente reduciendo la capacidad del pulso fluvial para mantener altos niveles de conectividad entre el río y los humedales.

El comportamiento del modelo para los escenarios de secas, muestra que los caudales se mantienen bajos durante el inicio de la simulación y disminuyen gradualmente al paso de los días. Para los primeros 2 escenarios los caudales, apenas pasan de los 10 m³/s, lo que indica una contribución mínima del río hacia el complejo durante la época de secas. El escenario proyectado para 2082 muestra caudales mayores con picos hasta 110 m³/s hacia el final de la simulación, lo que implica que bajo condiciones climáticas futuras podrían presentarse eventos de aporte puntual incluso en meses secos. En general el punto B, evidencia que la relación río-humedal, se debilita marcadamente en condiciones secas, reduciendo la renovación de agua dentro del complejo y aumentando la dependencia de procesos internos.

La dirección del flujo en este punto presenta diferencias claras entre épocas lluvias y secas, en la primera, la dirección se mantiene inicialmente alrededor de 130 a 140°, correspondiendo un flujo predominante desde el Sinú hacia el complejo. Según continua la modelación la dirección se vuelve variable con oscilaciones entre 15° a hasta revertirse a más de 330°. Esto refleja un sistema altamente

dinámico donde el agua circula dentro del complejo en múltiples sentidos, asociado al llenado de ciénagas y a la redistribución interna del volumen de agua.

Para la época seca, los primeros dos escenarios muestran direcciones estables alrededor de 140° durante casi toda la simulación, mostrando que durante épocas secas el flujo es principalmente unidireccional y débil. En contraste la proyección de 2082, presenta oscilaciones importantes en direcciones múltiples, lo que sugiere variabilidad climática futura, que podría introducir mayor inestabilidad en las conexiones hidrológicas en el complejo cenagoso.

6.4 Implicaciones para la gestión de recurso hídrico.

Los resultados obtenidos para los distintos escenarios de lluvias, secas y proyección del cambio climático, revelan patrones hidrodinámicos que tienen consecuencias directas para la gestión integral del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú. Las combinaciones de niveles, caudales, velocidad, y dirección del flujo permite identificar condiciones críticas de conexión, periodos de aislamiento hidráulico, y la vulnerabilidad del sistema ante variaciones del caudal del río Sinú, ya sea por condiciones naturales o por operaciones de regulación a través de la represa.

Como primero punto, los análisis reflejan que el sistema depende fuertemente del aporte proveniente del río Sinú para mantener la conectividad hídrica interna y la renovación del volumen de agua almacenado en las ciénagas. Durante los escenarios húmedos el incremento del caudal del río genera flujos de entrada hacia el caño Aguas Prietas, favoreciendo procesos de recarga, intercambio de nutrientes y mantenimiento de las superficies inundadas. Sin embargo, bajo condiciones extremas como las proyecciones IPCC SSP-8.5, como agosto del 2053, se observa un pulso inicial elevado, lo que sugiere que los humedales podrían experimentar flujos más cortos y menos voluminosos, aumentando la exposición a periodos de retracción del agua.

Por otro lado, los escenarios de secas, muestran que el sistema entra en un régimen de flujo muy reducido con magnitudes inferiores a los 10 m³/s durante la mayor parte del periodo, y en algunos casos con direcciones dominadas por aportes internos o variación local del nivel, más que por influencia del río. Esto indica que, en ausencia de aportes significativos desde el Sinú, la capacidad de los humedales para mantener su volumen, intercambiar masa y preservar condiciones ecológicas óptimas se reduce considerablemente. Este patrón, se pronuncia más en las proyecciones para marzo del 2082, donde el flujo se mantiene extremadamente bajo durante periodos prolongados, lo que podría provocar el aislamiento parcial de ciertas ciénagas y un aumento en la vulnerabilidad a procesos de eutrofización y sedimentación.

Un hallazgo relevante para la gestión hídrica es la persistencia del flujo bidireccional en el punto de conexión entre el río y el caño Aguas Prietas, aun bajo escenarios con caudales reducidos. No obstante, el análisis temporal muestra que la frecuencia, magnitud y duración de estos eventos dependen estrechamente del nivel del río, lo que implica que la modulación del caudal aguas arriba, puede alterar significativamente la dinámica natural del intercambio. En escenarios de caudales bajos, este efecto se amplifica, generando periodos prolongados donde el río deja de aportar volumen al complejo de la dependencia de aportes locales o de agua retenida.

Estos resultados sugieren tres implicaciones clave:

- a. Necesidad de un régimen ecológico de caudales. Para mantener la conectividad río-humedal y evitar el aislamiento funcional de sectores como la ciénaga de Guartinaja, es recomendable establecer umbrales mínimos de caudal liberado desde la represa que permitan sostener flujos de entrada durante épocas secas. Sin esos volúmenes, el sistema podría perder capacidad de renovación hídrica y resiliencia ante eventos climáticos.
- b. Fortalecer el monitoreo hidrométrico en puntos estratégicos. Los puntos analizados demostraron comportamientos distintos ante las variaciones de caudal. Incorporar

estaciones permanentes permitiría calibrar y actualizar de manera continua los modelos hidrodinámicos, garantizando mejores proyecciones y acciones de manejo.

- c. Diseño de estrategias diferenciales por unidad hidrológica. Los resultados muestran que las ciénagas presentan respuestas contrastantes: mientras la zona de conexión es altamente sensible a cambios en caudal, sectores interiores que responden con retrasos y amortiguación de las avenidas. Esto implica que las medidas del manejo deben aplicarse diferenciadamente según la función ecológica y la posición dentro del sistema hidrológico.

En conjunto, los escenarios evaluados sugieren que, bajo condiciones climáticas futuras con mayor variabilidad, el sistema podría experimentar mayor frecuencia de desconexiones hidráulicas, reducciones en el volumen intercambiado y periodos más prolongados de bajo flujo. Estos factores hacen indispensable fortalecer esquemas de gestión adaptativa del recurso hídrico, apoyados por modelos numéricos que permitan anticipar el comportamiento del sistema ante diferentes condiciones climáticas operativas.

Conclusiones y recomendaciones.

Los resultados del modelo hidrodinámico implementado permitieron caracterizar con detalle el comportamiento espacial y temporal del flujo entre el río Sinú, el caño Aguas Prietas y las ciénagas internas. Los patrones simulados evidencian una dinámica altamente dependiente de las condiciones hidráulicas del río, con fluctuaciones marcadas en la zona de conexión, donde se registran las mayores variaciones en dirección y caudal. El flujo bidireccional se reproduce con claridad, mostrando inversiones que se originan en respuesta a oscilaciones en el nivel del Sinú y que se amortiguan progresivamente hacia el interior del complejo. En contraste, el punto B presenta un comportamiento intermedio con velocidades reducidas y menor variabilidad direccional, mientras que la ciénaga de Guartinaja funciona como una zona de almacenamiento con fluctuaciones leves y un régimen predominantemente estable.

En conjunto el modelo confirma la presencia de un gradiente espacial de energía hidráulica que define la estructura del intercambio hídrico entre el río y los humedales. La simulación de múltiples escenarios hidrológicos demostró que el caudal del río Sinú es el principal determinante de la conectividad entre el río y el complejo de ciénagas. Los eventos de mayor caudal fortalecen la conexión mediante incrementos simultáneos en niveles, velocidades y transporte volumétrico hacia el interior del humedal, favoreciendo la recarga y expansión temporal del espejo de agua. En condiciones de caudales reducidos, la conexión hídrica se debilita, el aporte hacia el interior disminuye y la ciénaga de Guartinaja puede aproximarse a una condición intermedia de separación hidrológica no total y que cualquier alteración en su régimen incluyendo la operación de la represa de Urrá que tiene implicaciones directas sobre el comportamiento hidrodinámico del complejo.

Los escenarios extremos de humedad y de las proyecciones IPCC, generaron aumentos significativos en niveles y caudales en la zona de conexión intensificando las entradas de agua hacia el

complejo. No obstante, estas condiciones también producen pulsos de corta duración con variabilidad abrupta que sugiere una inestabilidad hidrodinámica bajo evento futuros de alta precipitación.

Los escenarios de secas mostraron disminuciones marcadas en niveles y velocidades, reducción del intercambio hidráulico y episodio de flujo débil o casi nulo en la zona interna del complejo. Estos resultados evidencian que la severidad de los periodos secos proyectados podría comprometer la renovación hídrica especialmente en sectores más alejados como Guartinaja. En conjunto los escenarios extremos confirman que las condiciones futuras podrían amplificar tanto los pulsos de recarga como los periodos de aislamiento afectando la estabilidad ecológica del sistema.

El comportamiento bidireccional, las variaciones en dirección y magnitud del flujo y la respuesta dinámica del caño Aguas Prietas frente a los cambios en el caudal del río Sinú fueron reproducidos con fidelidad mediante la modelación hidrodinámica. Los valores satisfactorios obtenidos durante la calibración y la validación respaldan que el modelo representa adecuadamente la física del sistema y constituye una herramienta válida para evaluar la conectividad hídrica en el Bajo Sinú.

En síntesis, la modelación hidrodinámica permitió demostrar que la conectividad del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú está controlada principalmente por el régimen hidráulico del río Sinú, configurando un sistema altamente sensible a variaciones extremas de caudal, lo cual tiene implicaciones directas para la gestión adaptativa del recurso hídrico bajo escenarios de cambio climático. Los resultados obtenidos mediante la modelación hidrodinámica permiten confirmar la hipótesis planteada, ya que las variaciones en dirección e intensidad del flujo en el caño Aguas Prietas fueron reproducidas satisfactoriamente en función del caudal aportado por el río Sinú. La simulación evidenció que el gradiente hidráulico inducido por el régimen del río controla el patrón bidireccional del sistema, validando así el planteamiento inicial.

Limitaciones.

1. Resolución del modelo digital de elevación (DEM). El modelo digital de elevación utilizado presenta una resolución espacial de 12.5 m, lo cual, aunque adecuado para análisis regionales, puede limitar la representación detallada de microrelieves, pequeños canales secundarios y variaciones topográficas locales dentro del complejo cenagoso. Una resolución espacial más fina permitiría mejorar la definición geométrica del dominio, optimizar la discretización de la malla y representar con mayor precisión los gradientes hidráulicos locales, particularmente en zonas de conexión estrecha.
2. Limitada red de estaciones hidrométricas dentro del complejo. La calibración y validación del modelo se sustentaron principalmente en información obtenida en la estación Hermano y en puntos estratégicos del caño Aguas Prietas. La ausencia de estaciones permanentes dentro de las ciénagas internas, como Guartinaja, restringe la validación espacial del comportamiento simulado en sectores con baja influencia directa del río.
3. Actualización incompleta de las series de tiempo en el río Sinú. La disponibilidad y continuidad de las series hidrológicas del río Sinú presentan limitaciones temporales, lo cual puede introducir incertidumbre en la definición de condiciones de frontera y en la construcción de escenarios representativos de variabilidad reciente.
4. Simplificación bidimensional del modelo hidrodinámico. El modelo fue implementado bajo un esquema bidimensional (2D), resolviendo las ecuaciones de aguas someras. Esta aproximación no representa procesos verticales tales como estratificación térmica, variaciones de densidad, intrusiones o gradientes verticales de velocidad, los cuales podrían ser relevantes bajo determinadas condiciones hidráulicas.
5. Ausencia del componente de flujo subterráneo. El modelo no incorporó explícitamente la interacción entre aguas superficiales y subterráneas. En sistemas cenagosos, los intercambios laterales o verticales

con el acuífero pueden contribuir al balance hídrico, especialmente durante periodos prolongados de sequía.

6. No incorporación explícita de vegetación acuática y resistencia hidráulica variable. La representación de la rugosidad se realizó mediante parámetros promedio, sin modelar de manera dinámica la influencia de vegetación sumergida o flotante. La vegetación puede modificar localmente la resistencia al flujo y afectar la distribución de velocidades en zonas someras.

7. Representación simplificada de procesos de transporte y sedimentación. El estudio se enfocó en la dinámica hidrodinámica, sin incorporar módulos de transporte de sedimentos o calidad del agua. Estos procesos podrían influir en la evolución morfológica y ecológica del sistema a mediano y largo plazo.

8. Alcance temporal de las simulaciones. Las simulaciones se realizaron para periodos específicos representativos de condiciones húmedas y secas, así como escenarios proyectados. No se evaluaron ciclos multianuales completos que permitan analizar tendencias de largo plazo o procesos acumulativos.

En conjunto, estas limitaciones no invalidan los resultados obtenidos, pero delimitan el alcance interpretativo del estudio y establecen líneas claras para investigaciones futuras orientadas a mejorar la representación integral del sistema.

Recomendaciones:

1. Fortalecer el monitoreo hidrométrico continuo del río Sinú y el caño Aguas Prietas. Debido al rol determinante del caudal del Sinú en la conectividad hidrológica del complejo cenagoso, se recomienda implementar un programa de monitoreo continuo que permita registrar su variabilidad estacional y su respuesta ante eventos extremos.
2. Ampliar la red de estaciones de medición en el sistema. Es fundamental instalar nuevas estaciones hidrométricas tanto en el río Sinú como en el caño Aguas Prietas, con el fin de obtener series

temporales de niveles, caudales y velocidades que permitan mejorar la calibración y reducir la incertidumbre del modelo.

3. Extender las campañas de medición hacia las ciénagas internas del complejo. Incluir mediciones en cuerpos como Guartinaja y otras ciénagas permitirá caracterizar zonas con baja influencia directa del río y fortalecer la representación espacial de la dinámica interna.
4. Integrar un análisis ecológico complementario, se recomienda vincular las variaciones hidrodinámicas con indicadores de vegetación acuática , calidad del agua, hábitats sensibles, con el fin de definir umbrales ecológicos de caudal y de conectividad que permitan orientar decisiones de manejo.
5. Incorporar el componente subterráneo en la evaluación hidrológica. El análisis de la interacción entre aguas superficiales y subterráneas, mediante modelos hidrogeológicos o balance hídrico integrado, permitirá comprender mejor los intercambios laterales que contribuyen al mantenimiento del complejo cenagoso.
6. Aprovechar módulos adicionales de EFDC+ para perfeccionar el modelo. El modelo puede mejorarse incorporando módulos de turbulencia, vegetación sumergida, calidad del agua o transporte de sedimentos, lo que permitiría obtener valores de calibración y validación más robustos.
7. Implementar modelos tridimensionales para evaluar procesos complejos. La utilización de modelos 3D permitiría caracterizar efectos verticales, intrusiones, estratificación térmica o variaciones de densidad, y compararlos con los resultados 2D obtenidos, fortaleciendo así la comprensión integral del sistema.
8. Ampliar los escenarios de cambio climático considerados. Se recomienda explorar otros escenarios derivados de las proyecciones del IPCC–IDEAM (SSP intermedios o severos).

Referencias bibliográficas.

- Acosta-Ramos, J. G., & Morales-Fernández, C. (2021). *Análisis espacial y temporal del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú en épocas secas durante los periodos 2014–2017–2020 en el departamento de Córdoba, Colombia*. Universidad Antonio Nariño.
- Adhya, T., & Banerjee, S. (2022). Impact of Wetland Development and Degradation on the Livelihoods of Wetland-dependent Communities: A Case Study from the Lower Gangetic Floodplains. *Newlands*, 42(65).
- Agarwal, A., S. Marian, Bhatia, R., Chareto, I., Dávila-Poblete, S., & González, F. (2000). *Manejo integrado de recursos hídricos* (Primera impresión, Vol. 1). Global Water Partnership.
- Aguilera-Díaz, M. M. (2011). La economía de las ciénagas del Caribe colombiano. In *La economía de las ciénagas del Caribe colombiano* (1st ed.). Banco de la República. <https://doi.org/10.32468/ebook.664-245-3>
- Alarcon, O. R., Mestra-Herrera, D. A., Villería Araújo, E. R., Méndez-Hernández, L. A., & Cuadrado-Vettel, B. J. (2019). *Proceso de formalización de predios baldíos* (Vol. 1).
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements*.
- Álvarez, M., & González, M. (2006). *Hidrología aplicada: métodos y técnicas*. Ediciones CYTED.
- Arganis, M., Rosales, S., Domínguez, R., Osnaya, J., Macario, I., Esquivel, G., & Carrizosa, E. (2024). Avenidas de diseño de la obra de excedencias de una presa con análisis de caudales y programa IIHIDRODIS. *VII Jornadas de Ingeniería Del Agua*, 44–55. <https://doi.org/10.31428/10317/16733>
- Autodesk. (2023). *What's the difference between 1D and 2D hydraulic modeling and how to decide between them?*
- Balboa Luengo, J. (2022). *Aplicación de un modelo hidrodinámico tridimensional para simular floraciones algales en Laguna Lo Galindo, Chile*. Universidad de Concepción, Chile.
- Barajas-Ibañez, H., & Andrés-Leiva, F. (2016). *Evaluación del cambio morfológico y sedimentológico del cauce del Río Sinú aguas abajo de la presa del Embalse Urrá asociados a su construcción y operación* [Trabajo de grado, Universidad de la Salle]. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil
- Barrera, D. F., & Presutti, M. E. (2012). El perímetro de una cuenca hídrica su tratamiento objetivo en la definición de índices geomorfológicos. *Cuadernos Del CURIHAM*, 18, 1–3.
- Barrientos, A. E., Correa V., P. L., Vélez U., J. I., Smith Q., R. A., Vélez, A. J., Ricardo Agustín, & Gómez, J. D. (2006). Metodología de balance hídrico y de sedimentos como herramienta de apoyo para la gestión integral del Complejo lagunar del Bajo Sinú. *Avances En Recursos Hidráulicos*, 14, 71–86.
- Betancur Pérez, G. A. (2013). *Metodología para la selección de modelos hidrodinámicos tridimensionales*.

- Betancur, T., & Palacio, C. (2009). La modelación numérica como herramienta para la exploración hidrogeológica y construcción de modelos conceptuales (Caso de aplicación: Bajo Cauca Antioqueño). *Dyna*, 76(160), 39–49.
- Campos, D. F. (1992). *Procesos del Ciclo Hidrológico* (L. E. Mejía Pedrero, Ed.). Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- CEDEX. (2010). *Metodología para el análisis y control de calidad de series climáticas*.
- Chow, V. Te, Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*.
- ClimateData.ca. (2022). *Understanding shared socio-economic pathways (SSPs)*. Understanding shared socio-economic pathways (SSPs)
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). (2016). Capítulo 7: Morfometría. In *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del río La Vieja*.
- Corporación Regional de los Valles del Sinú. (2005). Diagnóstico de la dinámica hídrica, tenencia y ocupación del complejo lagunar del bajo Sinú. *Universidad Nacional de Colombia*.
- Corrales-Chaves L. (2025). ¿Estamos perdiendo los humedales más rápido de lo que podemos restaurarlos? . *Revista de Ciencias Ambientales*, 59(1), 1–13. <https://doi.org/https://doi.org/10.15359/rca.59-1.9>
- CVS. (2005). Diagnóstico de la dinámica hídrica, tenencia y ocupación del Complejo lagunar del bajo Sinú. Escenarios de simulación. In *Diagnóstico de la dinámica hídrica, tenencia y ocupación del Complejo lagunar del bajo Sinú*.
- CVS. (2006). *Descripción de los aspectos hídricos: Plan de Manejo y Ordenamiento Ambiental del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú* .
- CVS. (2016a). *Plan de Manejo Ambiental del Complejo Lagunar del Bajo Sinú*.
- CVS. (2016b). *Plan de Manejo y Ordenamiento Ambiental del Complejo Lagunar del Bajo Sinú*. CVS.
- CVS – Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge. (2004). *Plan de Manejo y Ordenamiento Ambiental del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú: Aspectos generales, ecológicos, socioeconómicos, morfológicos y plan de acción*.
- Davidson, N. C. (2014). How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. *Marine and Freshwater Research*, 65(10), 934–941. <https://doi.org/10.1071/MF14173>
- Domínguez, J. M., & Castañeda, M. G. (2006). *Hidrología superficial: Conceptos y aplicaciones*.
- Duarte-Abadía, B. A. (2005a). *Análisis comparado de las dinámicas hídricas de la cuenca baja del río Sinú con los cambios de coberturas en el complejo de la ciénaga grande de Lorica* [Trabajo de grado]. Pontificia Universidad Javeriana.
- Duarte-Abadía, B. A. (2005b). *Análisis comparado de las dinámicas hídricas de la cuenca baja del río Sinú con los cambios de coberturas en el complejo de la Ciénaga Grande de Lorica*. Pontificia Universidad Javeriana.

- González-Trujillo, J., Bernal, G., & Andrade-Piedrahíta, M. (2021). Diagnóstico de humedales del Caribe colombiano: avances y retos en su gestión. *Revista Colombiana de Ecología*, 25(2), 123–137.
- Gualdrón-Alfonso, D. F., Reyes-Rodríguez, C. A., Villate-Corredor, J. J., Torres-Villamil, D. L., & Molina-Reyes, J. F. (2022). *Determinación de los parámetros morfométricos en cuencas empleando Sistemas de Información Geográfica* (W. Becerra-Mayorga, Ed.; Primera). Editorial UPTC.
- Guevara Gutiérrez, R. D., Olguín López, J. L., Mancilla Villa, O. R., & Barreto García, O. A. (2019). Análisis Morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Ayuquila, Jalisco-México. *GeoFocus*, 2019(24), 141–158. <https://doi.org/10.21138/GF.622>
- Horváth, L., Kovács, A., & Rácz, P. (2019). Comparison of Hydrodynamics Simulated by 1D, 2D and 3D Models Focusing on Bed Shear Stresses. *Water*, 11(2), 226.
- Hu, S., Niu, Z., & Chen, Y. (2017). Resultados de bases de datos globales para humedales: Una revisión de 54 bases de datos globales de humedales. *WETLANDS*, 37(5), 807–817.
- Hydrologic Engineering Center. (2024). *Channel Flow Basic Concepts, Equations, and Solution Techniques*. U.S. Army Corps of Engineers.
- IDEAM. (n.d.). *Hidrográficas Zonificación y Codificación de Cuencas Hidrográficas*. www.imprenta.gov.co
- IDEAM. (1998). *Evaluación del recurso hídrico superficial en Colombia: Región Caribe*.
- IDEAM. (2020). *Informe de Gestión 2020*.
- IDEAM. (2024, December). <https://climatedata.ca/resource/understanding-shared-socio-economic-pathways-ssps>.
<https://visualizador.ideam.gov.co/portal/apps/storymaps/stories/660ec48de9454157b54adc074b1f38fd>
- Instituto de Hidrología, M. y E. A. (2023). *Mapa de precipitación decadal promedio multianual, periodo 1981–2010*.
- Invemar. (2020). *Estado de los ecosistemas marinos y costeros de Colombia*.
- Junk, W., Shuqing, A., C.M., F., Brij, G., Jan, K., & Stephen, M. (2013). Current state of knowledge regarding the world's wetlands and their future under global climate change: a synthesis. *Aquatic Sciences*, 75, 151–167. <https://doi.org/10.1007/s00027-012-0278-z>
- Knoben, W. J. M., Freer, J. E., & Woods, R. A. (2019). Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(10), 4323–4331.
- Leibowitz, S. G., Wigington, P. J., Schofield, K. A., Alexander, L. C., Vanderhoof, M. K., & Golden, H. E. (2018). Connectivity of Streams and Wetlands to Downstream Waters: An Integrated Systems Framework. *Journal of the American Water Resources Association*, 54(2), 298–322. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12631>
- Madera-Arteaga, E. L. (2014). *Deshaciendo el encanto: Impactos de la represa de Urrá I sobre tre comunidades de la Ciénaga Grande de Lorica* [Tesis de maestría]. Universidad de los Andes.

- Mandle, L., Angarita, H., Moreno, J., Goldstein, J. A., Melo L, S. F., Echeverri, A., Rojas, N., & Villalba, F. D. (2025). Natural capital accounting reveals ecosystems' role in water and energy security in Colombia's Sinú Basin. *Communications Earth and Environment*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02254-9>
- Marin Coria, E. J. (2016). *Modelación de la hidrodinámica de un sistema lagunar humedal costero con descargas de agua subterránea (DAS) y su relación con la distribución de algunas especies de ictiofauna*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- McInnes, R., Ali, M., & Pritchard, D. (2017). *Las Convenciones de Ramsar y del Patrimonio Mundial, convergiendo hacia el éxito*. www.ramsar.org/es
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human Well being: Wetlands and Water Synthesis*. Island Press.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2019a). *Informe de gestión 2018*.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2019b). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico* (Segunda edición). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Mitsch, W., & Gosselink, J. (2015). *Wetlands* (5th Edition). John Wiley & Sons, Inc.
- Monterroso-Rivas, A. I., Gómez-Díaz, J. D., & Tinoco-Rueda, J. A. (2009). Servicios ambientales hidrológicos bajo escenarios de cambio climático en el Parque Nacional “El Chico”, Hidalgo. *Madera y Bosques*, 15(2), 5–26.
- Montoya, Y., & Aguirre, N. (2009). Estado del arte de la limnología de lagos de planos inundables. *Revista Gestión y Ambiente*.
- Moriasi, D. N., Senaviratne, G., Saraswat, D., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763–1785.
- Munar-Samboní, A. M., & Méndez-Pedroza, N. M. (2021). Modelación hidrodinámica y de calidad del agua en un ecosistema estuarino urbano con incidencia maregráfica y vertimientos de aguas residuales. *Entramado*, 17(1). <https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.1.7285>
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models: Part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290.
- Payares-Narváez, F. E. (2023). *Análisis de la variación de la superficie del complejo cenagoso del bajo Sinú para las temporadas estacionales del año 2021 a partir de imágenes satelitales PlanetScope* [Trabajo de grado, Universidad de Córdoba]. www.unicordoba.edu.co
- Pike, R. J., & Wilson, S. E. (1971). Elevation-relief ratio, hypsometric integral, and geomorphic area-altitude analysis. *Geological Society of America Bulletin*, 82(4), 1079–1084.
- PNUD & Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). *Humedales estratégicos del Caribe colombiano: Diagnóstico y lineamientos para su conservación*. .
- Ramsar. (2021). *Perspectiva mundial sobre los humedales: Edición especial de 2021*. <https://www.global-wetland-outlook.ramsar.org/report-1>

- Ramsar Convention Secretariat. (2025). *The List of Wetlands of International Importance*. http://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/strategic_framework_rsis_en.pdf
- Ruíz-Murcia, J. F., & Melo-Franco, J. Y. (2021). *Informe de Predicción Climática a corto, mediano y largo plazo en Colombia*.
- Salazar-Mejía, I. (2011). La economía de la ciénaga Grande del Bajo Sinú: lugar encantado de las aguas. In M. M. Aguilera-Díaz (Ed.), *La economía de las ciénagas del Caribe Colombiano*. (1a edición, pp. 96–134). Banco de la República.
- Secretaria de la Convención Ramsar. (2016). *Introducción a la convención sobre los humedales*. www.larissab.fr
- Sepulveda Vargas, R. D., Taborda Caro, M. A., & Fuentes Doria, D. D. (2020). Water conflicts and community resilience in lower sinu: Evidence of disputes and alternativivity. *Utopia y Praxis Latinoamericana*, 25(Extra3), 105–124. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3907052>
- Strahler, Arthur. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In V.T. Chow (Ed.), *Handbook of Applied Hydrology* (pp. 439–476). McGraw Hill.
- Taylor, H. E., & Schwarz, G. E. (1952). *Hydrologic computations for small drainage areas*. U.S. Geological Survey.
- Torres-Bejarano, F., González-Martínez, J. A., Naranjo-Saleme, M., & Cantero-Martínez, J. (2022). Modelación del transporte de sedimentos en el Delta del río Sinú, Colombia. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. <https://doi.org/10.20937/rica.54337>
- Torres-Bejarano, F., Padilla Coba, J., Rodríguez Cuevas, C., Ramírez León, H., & Cantero Rodelo, R. (2016). La modelación hidrodinámica para la gestión hídrica del embalse del Guájaro, Colombia. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Calculo y Diseño En Ingeniería*, 32(3), 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2015.04.001>
- Triviño, N., & Escobar-Vargas, J. (2018). *Un modelo conceptual de la hidrodinámica en Humedales tropicales y sus relaciones con dinámicas sociales. Caso de estudio: Complejo Cenagoso de la Rinconada (Colombia)*.
- Turc, L. (1961). Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle: formule climatique simplifiée et mise à jour. *Annales Agronomiques*, 12(1), 13–49.
- UNESCO. (2020). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los recursos hídricos 2020*.
- Universidad Nacional de Colombia. (2005). *Diagnóstico de la dinámica hídrica, tenencia y ocupación del Complejo Lagunar del Bajo Sinú: diagnóstico, tendencias futuras, propuestas y recomendaciones*.
- Urrá, S. A. E. S. P. (2022). *Informe integrado de Gestión 2022*.
- Velásquez-Franco, P. A., & Pérez-González, M. E. (2024). Análisis de la dinámica espaciotemporal de humedales tropicales a través de imágenes SAR Sentinel-1: Caso de estudio en Colombia. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 33(1). <https://doi.org/10.15446/rcdg.v33n1.105225>

Web of Science. (2024, February 22).

Westman, W. E. (1977). How much are nature's services worth? *Science*, 197(4307), 960–964.

Woessner, W. W. (2020). *Groundwater-Surface Water Exchange: Rivers, Lakes, and Wetlands*.

Xu, T., Weng, B., Yan, D., Wang, K., Li, X., Bi, W., Li, M., Cheng, X., & Liu, Y. (2019). Wetlands of international importance: Status, threats, and future protection. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(10). <https://doi.org/10.3390/ijerph16101818>