



## PROYECTO MANEJO SOSTENIBLE Y CONSERVACION DE LA BIODIVERSIDAD EN LA CUENCA DEL RIO MAGDALENA



CONVENIO DE COOPERACIÓN TÉCNICA NO REEMBOLSABLE (FMAM)  
No. ATN/FM-15981-CO

# MODELOS ECOHIDROLOGICOS

MODELOS PILOTO - Versión: 0.

**Autores: Beatriz Hernández**

**Nelson Obregón**

**Luisa Mendoza**

**Carlos Fuentes**

**Nicolás Duque**

**Maria del ángel Martínez**

**Maria Carolina Reyes**

**Javier Poloche**

**Luis Carlos Porto**

**Yesid Rondon**

**Claudia Avila**

**Martha Díaz**

11/2020

# 1. TABLA DE CONTENIDO

<b>1.</b>	<b>TABLA DE CONTENIDO</b> .....	<b>2</b>
<b>2.</b>	<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>5</b>
<b>3.</b>	<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>8</b>
<b>4.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>10</b>
<b>1.</b>	<b>MODELOS CONCEPTUALES ECOHIDROLOGICOS</b> .....	<b>12</b>
1.1	CIÉNAGA DE ZAPATOSA .....	13
1.2	CIÉNAGA DE AYAPEL .....	18
1.3	CUENCA DEL RIO LA VIEJA .....	21
<b>2.</b>	<b>GENERALIDADES DE LA CONSTRUCCIÓN DE LOS MODELOS HIDROLOGICOS</b> .....	<b>23</b>
2.1	SELECCIÓN DE CÓDIGO COMPUTACIONAL .....	23
2.2	INSUMOS PARA LOS MODELOS HIDROLOGICOS .....	23
2.2.1	<i>Climatología</i> .....	23
2.2.1.1	<b>Precipitación</b> .....	23
2.2.1.2	<b>Temperatura</b> .....	24
2.2.1.3	<b>Velocidad del viento</b> .....	24
2.2.1.4	<b>Humedad relativa</b> .....	25
2.2.1.5	<b>Radiación solar</b> .....	25
2.2.2	<i>Datos hidrosedimentológicos y de calidad del agua</i> .....	25
2.2.3	<i>Elevación y geomorfogenesis del terreno</i> .....	25
2.2.4	<i>Coberturas</i> .....	26
2.2.5	<i>Estudios de suelos</i> .....	27
2.2.6	<i>Demanda hídrica</i> .....	27
2.3	APLICATIVO ARCSWAT Y SWAT-CUP .....	28
2.4	CALIBRACION DE MODELOS DE SWAT .....	31
2.5	DESCRIPCIÓN DE LA TRANSFORMACIÓN DE LA INFORMACIÓN DE SUELOS A LOS PARÁMETROS QUE REQUIERE SWAT .....	34
2.5.1	<i>Transformación de la información de suelos para la cuenca del río Cesar</i> .....	40
2.5.2	<i>Información de suelos para la cuenca del río San Jorge hasta el caño Seheve y La Vieja</i> .....	41
2.6	DEFINICIÓN DE LAS SUBCUENCAS EN LOS MODELOS .....	41
<b>3.</b>	<b>MODELO PILOTO CUENCA DEL RÍO CESAR</b> .....	<b>43</b>
3.1	MODELO CONCEPTUAL HIDROLÓGICO.....	43
3.2	CONFIGURACIÓN DEL MODELO EN EL APLICATIVO SWAT.....	45
3.3	DEMANDA HÍDRICA CONSOLIDADA EN LOS POMCAS .....	47
3.4	CALIBRACION DEL MODELO HIDROLÓGICO CUENCA RIO CESAR.....	48
3.4.1	<i>series historicas para calibracio y validación</i> .....	48
3.4.2	<i>Calibración modelo cantidad de agua</i> .....	49
3.4.3	<i>Descripción de los ajustes en los valores de los parámetros</i> .....	55
3.4.4	<i>Descripción de los caudales simulados y observados en el periodo usado para calibración (1987-2002)</i> .....	68
3.4.4.1	Análisis sobre el ajuste de las simulaciones de cantidad de agua en la estación Caimancito...77	
3.4.4.2	Análisis en el periodo 2003 - 2017 .....	79
3.4.4.3	Análisis sobre el ajuste de las simulaciones de cantidad de agua en la estación Caimancito...81	
3.4.4.4	Datos de caudal para el acople del aplicativo hidrológico con el aplicativo de modelación hidráulica 98	



3.4.5	Calibración cantidad de sedimentos.....	99
3.4.5.1	Descripción de los resultados del transporte de sedimentos simulados y observados en el periodo para calibración (1987-2002) .....	103
3.4.5.2	Ajustes a los parámetros que controlan la cantidad de sedimentos .....	107
<b>4.</b>	<b>MODELO HIDRODINAMICO COMPLEJO CENAGOSO CIENAGA ZAPATOSA .....</b>	<b>111</b>
4.1	MODELO CONCEPTUAL.....	111
4.1.1	Información topo-batimétrica para la Ciénaga de Zapatosa. ....	113
4.1.2	Dinámica fluvial.....	119
4.1.3	edimentos.....	123
4.1.4	Análisis de la mancha de inundación con sensores remotos .....	126
4.2	CONFIGURACION DEL MODELO.....	128
4.2.1	Condiciones iniciales.....	128
4.2.2	Condiciones de frontera.....	128
4.2.3	Selección del dominio computacional .....	129
4.2.4	Entrada del modelo .....	131
4.2.5	Refinamiento del modelo de elevación digital .....	132
4.2.6	Generación de la malla de cómputo.....	135
4.3	PRIMEROS RESULTADOS MODELO HIDRODINÁMICO. ....	139
4.4	PRÓXIMOS PASOS EN LA MODELACIÓN .....	140
4.5	REQUERIMIENTOS DE INFORMACIÓN TOPO-BATIMÉTRICA .....	142
<b>5.</b>	<b>CUENCA DEL RÍO SAN JORGE HASTA EL CAÑO SEHEVE .....</b>	<b>144</b>
5.1	CONFIGURACIÓN MODELO .....	144
5.2	CALIBRACIÓN CANTIDAD DE AGUA.....	147
5.2.1	Descripción de los caudales simulados y observados en el periodo usado para calibración (1987-2002) .....	153
5.2.2	Análisis en el periodo 2003 - 2017.....	157
5.2.3	Análisis de la correspondencia entre la lluvia y el caudal simulado.....	160
5.2.4	Datos de caudal para el acople del aplicativo hidrológico con el aplicativo de modelación hidráulica.....	163
5.3	CALIBRACIÓN CANTIDAD DE SEDIMENTOS.....	164
<b>6.</b>	<b>MODELO HIDRODINAMICO CIENAGA DE AYAPEL.....</b>	<b>175</b>
6.1	CONFIGURACIÓN DEL MODELO.....	175
6.1.1	Definición del dominio computacional.....	175
6.1.2	Condiciones de frontera.....	175
6.1.3	Condiciones iniciales.....	175
6.1.4	Generación de la malla de cómputo.....	175
6.1.5	Malla de cómputo generada para la ciénaga de Ayapel .....	177
6.2	RESULTADOS DE LA MODELACIÓN PILOTO DE LA CIÉNAGA DE AYAPEL.....	179
6.2.1	Patrones de flujo en la ciénaga.....	179
6.2.1.1	Campo de profundidades calculado en la ciénaga.....	183
<b>7.</b>	<b>MODELO HIDROLOGICO CUENCA RIO LA VIEJA .....</b>	<b>186</b>
7.1	MODELO CONCEPTUAL HIDROLÓGICO .....	186
7.2	CONFIGURACIÓN DEL MODELO COMPUTACIONAL .....	186
7.3	MODELO TOPOLÓGICO CUENCA DEL RÍO LA VIEJA .....	188
7.3.1.1	Calibración del modelo.....	189
<b>8.</b>	<b>FASE II MONITOREO Y POSTPROCESO.....</b>	<b>193</b>



8.1	DISEÑO DE MUESTREO .....	193
8.2	PLAN DE MUESTREO .....	196
8.3	PLAN DE ANALISIS.....	196
8.4	CAMPAÑA DE MUESTREO 1 PMEH .....	197
8.5	CAMPAÑA DE MUESTREO 2 PMEH .....	198
8.5.1	<i>Ciénaga de Zapatosa</i> .....	198
8.5.1.1	Datos Físicos obtenidos en la campaña de campo.....	200
8.5.1.1.1	Profundidades del lecho (batimetrías) .....	200
8.5.1.1.2	Aforos líquidos.....	204
8.5.1.1.3	Aforos sólidos .....	206
8.5.1.1.4	Toma de muestras del lecho.....	207
8.5.1.2	Análisis de los resultados de la segunda campaña de campo .....	208
8.5.1.2.1	Salida de agua de la ciénaga hacia el río Magdalena.....	208
8.5.1.2.2	Caudales a la entrada del sistema (Sector Rancho Claro) .....	208
8.5.1.2.3	Batimetrías .....	210
8.6	CAMPAÑA DE MUESTREO 3 PMEH .....	210
8.6.1	<i>resultados físicos</i> .....	212
8.6.2	<i>Temperatura</i> .....	214
8.6.3	<i>Oxígeno Disuelto</i> .....	214
1.1.1	<i>Turbiedad</i> .....	215
8.7	PRIMERA CAMPAÑA DE MUESTREO CIÉNAGA DE AYAPEL .....	216
8.7.1	<i>Plan de muestreo ciénaga de Ayapel</i> .....	216
8.7.2	<i>Resultados de la campaña de campo</i> .....	217
8.7.2.1	Batimetrías levantadas.....	217
8.7.2.2	Toma de parámetros físico-químicos con Aquamerck y sonda multiparamétrica HL7.....	219
9.	<b>PASOS A SEGUIR PARA EL REFINAMIENTO DE MODELOS .....</b>	<b>221</b>
6.	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>222</b>
7.	<b>ANEXO1.....</b>	<b>225</b>



## 2. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Criterio para reasignación de cobertura .....	27
Tabla 2-2. Archivos creados por el aplicativo ArcSWAT para formular modelos SWAT .....	28
Tabla 2-3. Campos requeridos para el simulador de clima del aplicativo ArcSWAT .....	30
Tabla 2-4. Listado de parámetros susceptibles de ser calibrados .....	32
Tabla 2-5. Información de suelo requeridos por el aplicativo SWAT.....	34
Tabla 2-6. Densidad aparente en relación con el contenido de arcillas. Fuente: USDA.....	37
Tabla 6-1. Demandas hídricas consolidadas en los POMCAs, de la cuenca del río Cesar .....	47
Tabla 6-2. Demandas asignadas a las subcuencas de SWAT, caso cuenca del río Cesar .....	48
Tabla 6-3. Estaciones de hidrológicas consideradas para en análisis de sedimentos .....	49
Tabla 6-4. Parámetros priorizados por análisis de sensibilidad .....	53
Tabla 6-5. Opciones implementadas para el ajuste automático y manual de parámetros, cuenca del río Cesar.....	56
Tabla 6-6. Variación de los parámetros ajustados, caso cuenca del río Cesar .....	72
Tabla 6-7. Desempeño de las simulaciones, caso cuenca del río Cesar.....	73
Tabla 6-8. Desempeño de las simulaciones en el periodo 2003-2017, caso cuenca del río Cesar .....	80
Tabla 6-9. Módulos de consumo de Palma .....	85
Tabla 6-10. Consumos de cultivos de Palma de aceite cercanos a la estación Caimancito.....	85
Tabla 6-11. Estimaciones de demanda hídrica hecha por diferentes fuentes.....	88
Tabla 6-12. Concesiones de CorpoCesar cercanas a la estación Caimancito .....	88
Tabla 6-13. Variación de los parámetros ajustados, caso cuenca del río Cesar ....	97



Tabla 6-14. Parámetros del bloque 5 para ajustar la serie sintética en Caimancito ..... 97

Tabla 6-15. Cuerpos de agua escogidos para acoplar con el modelo hidrodinámico ..... 98

Tabla 6-16. Procedimiento de ajuste de parámetros relacionados para la cantidad del agua seguido para la cuenca del río Cesar..... 100

Tabla 6-17. Variación de los parámetros ajustados para la fase de sedimentos, caso cuenca del río Cesar ..... 107

Tabla 6-18. Análisis de los cambios por variación en los parámetros asociados a los sedimentos..... 109

Tabla 4-1. Granulometría por floculación de arcillas. Tomado de: (Moreno, 2007) ..... 124

Tabla 4-2. Tamaños de celda empleados para la generación de la malla de cómputo ..... 136

Tabla 4-3. Composición de las zonas a levantar..... 142

Tabla 5-1. Estaciones de caudal consideradas para el modelo en la cuenca del río San Jorge ..... 145

Tabla 5-2. Demandas hídricas del POMCA y del ENA 2018 para la cuenca del río San Jorge ..... 146

Tabla 5-3. Demandas asignadas a las subcuencas de SWAT, caso cuenca del río San Jorge ..... 146

Tabla 5-4. Procedimiento de ajuste de parámetros seguido para la cuenca del río San Jorge aferente a la ciénaga de Ayapel ..... 149

Tabla 5-5. Parámetros ajustados para mejorar el desempeño, caso cuenca del río San Jorge hasta ciénaga de Ayapel ..... 154

Tabla 5-6. Desempeño de las simulaciones, caso cuenca del río San Jorge..... 155

Tabla 5-7. Desempeño de las simulaciones, caso cuenca del río San Jorge en el periodo 2003-2017 ..... 159

Tabla 5-8. Cuerpos de agua escogidos para acoplar con el modelo hidrodinámico ciénaga de Ayapel..... 163

Tabla 5-9. Procedimiento de ajuste de parámetros relacionados para la cantidad del agua seguido para la cuenca del río Cesar..... 164





Tabla 5-10. Variación de los parámetros ajustados para la fase de sedimentos, caso cuenca del río San Jorge ..... 171

Tabla 7-1. Coeficientes de desempeño NSE para las dos estaciones del río La Vieja ..... 191

Tabla 8-1. Parámetros a evaluar durante los muestreos ..... 196

Tabla 8-2 Sectores de muestreo campaña 1 ..... 197

Tabla 8-3 Sectores de muestreo campaña 2 ..... 198

Tabla 8-3 Sectores de muestreo campaña 3 ..... 210

Tabla 8-4. Coordenadas determinaciones parámetros en Ayapel ..... 219

### 3. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Modelo conceptual de la Ciénaga de Zapatosa.....	15
Figura 1-2. Modelo conceptual de la Ciénaga de Ayapel.....	20
<b>Figura 1-3 Modelo conceptual cuenca del río La Vieja .....</b>	<b>22</b>
Figura 8-1 Serie histórica de niveles mensuales multianuales para las estaciones de la zona aferente a la ciénaga de Zapatosa. ....	194
Figura 8-2 Serie histórica de niveles mensuales multianuales para la estación de Belén en la ciénaga de Zapatosa.....	194
Figura 8-3 Ubicación de los puntos de muestreo de la primera campaña del PMEHE en la ciénaga de Zapatosa .....	198
Figura 8-4. Batimetrías levantadas Cesar sector California (Sur) .....	201
Figura 8-5. Batimetrías levantadas Cesar sector California (Norte) .....	202
Figura 8-6. Detalle sector California.....	203
Figura 8-7. Totalidad de los levantamientos realizados .....	204
Figura 8-8. Aforos líquidos realizados en la segunda campaña .....	205
Figura 8-9. Aforos líquidos realizados en la segunda campaña, sector Rancho Claro .....	206
Figura 8-10. Muestras de fondo obtenidas para su caracterización granulométrica. ....	207
Figura 8-11. Caudales obtenidos a la salida de la ciénaga durante las campañas realizadas .....	208
Figura 8-12. Configuración del drenaje rio Cesar (Imagen de fondo Landsat 8 del 22 de diciembre de 2015). ....	209
Figura 8-13. Niveles mensuales multianuales registrados en la ciénaga de Ayapel. ....	217
Figura 8-14. Batimetrías levantadas Ayapel.....	218
Figura 8-15. Puntos con determinaciones de parámetros fisicoquímicos.....	220





## 0. INTRODUCCIÓN

El proyecto GEF Magdalena Cauca Vive tiene como objetivo contribuir a la conservación y uso sostenible de la biodiversidad en la cuenca del Río Magdalena a través de la protección de hábitats prioritarios de agua dulce, el mejoramiento de la salud del ecosistema, de la gobernanza y del reforzamiento de la capacidad local, por ello tiene establecido como uno de los productos esperados la Incorporación en la política y en el marco regulatorio, medidas para conservar y usar sosteniblemente la biodiversidad.

En ese sentido y desde el componente 2 gestión de la salud de los ecosistemas se generan productos para : i) Aprobar e implementar Instrumentos de planeación a nivel nacional, regional y local que incluyan la integración de consideraciones para la salud y la biodiversidad del ecosistema de agua dulce; ii) tres (3) Modelos hidrológicos que representen sistema hídricos estratégicos desarrollados y aplicados para entender los impactos de las tres principales amenazas para la biodiversidad acuática (transporte de sedimentos, interrupción de flujo libre y caudal ambiental); iii) Lineamientos técnicos para criterios de conservación biodiversidad de agua dulce desarrollados e incluidos en por lo menos 3 herramientas de planeación a nivel local (POT), regional (POMCA) and nacional (Plan estratégico para la cuenca Magdalena) y iv) Entrenamiento de por lo menos 30 empleados de institutos ambientales a nivel nacional (ANLA, MADS), regional (CARs) y local (alcaldías) en técnicas para el manejo (gestión) de la salud de los ecosistemas.

Para direccionar estos productos el componente 2, gestión de la salud de los ecosistemas se apoya en el programa de modelación ecohidrológica que tiene como meta no sólo el desarrollo de los tres (3) modelos hidrológicos esperados por el proyecto si no también aportar evidencias, análisis y acoples que soporten técnicamente los lineamientos de conservación y el fortalecimiento de capacidades en instituciones responsables del manejo de la salud de los ecosistemas.

Si bien, los modelos hidrológicos pueden simular el transporte de sedimentos, la interrupción de flujo y el caudal ambiental de corrientes, por si solos no pueden direccionar la complejidad de los ecosistemas acuáticos ni cubrir todos los aspectos que influyen en la salud de los mismos. Es por esto, que se avanzó en la creación de modelos ecohidrológicos que permitieran acoplar los diferentes elementos que influyen en la salud del ecosistema entre ellos elementos hidrobiológicos, bióticos, físicos, químicos e inclusive sociales, es decir la totalidad del sistema ecohidrológico de tal forma que brinde soporte técnico a los lineamientos con enfoque a la salud de los ecosistemas acuáticos de interés y que realmente se logre incorporar la biodiversidad en los procesos de toma de decisiones y en los instrumentos de planeación en la cuenca del río Magdalena, generando modelos matemáticos que puedan dar el entendimiento de los hidrosistemas y las amenazas sobre la biodiversidad acuática.



Los hidrosistemas de interés corresponden a tres áreas consideradas como prioridad para el proyecto: La subcuenca del Río la Vieja (mosaico de conservación), la ciénaga de Zapatosa (nueva área protegida) que se encuentra dentro de la cuenca hidrográfica del río Cesar y la ciénaga de Ayapel (Área protegida existente) que se encuentra en la cuenca hidrográfica del río San Jorge.

Lo anterior se lleva a cabo con el apoyo de las entidades socias específicamente del Centro Nacional de Modelación liderado por el IDEAM.

El programa de modelación ecohidrológica (PMEH), así concebido inició en noviembre de 2019 a la luz de la guía metodológica adelantada por el asesor Nelson Obregon, en la cual se estableció un proceso de cinco fases: fase preliminares, fase I modelos pilotos, fase II Monitoreo y postproceso, fase III modelos refinados, fase IV generación de lineamientos y fase V análisis de resultados para la toma de decisiones. En este año de trabajo el PMEH cerró la fase de preliminares con el análisis de información secundaria, la fase I o modelos pilotos y primeros resultados para lo cual se elaboraron los modelos conceptuales para cada ventana, la selección del código computacional y del software a emplear y la construcción de los modelos computaciones pilotos. Se cerró la fase II de monitoreo con la ejecución de 3 campañas de muestreo para la ciénaga de Zapatosa y el análisis en laboratorio de las muestras de estas campañas y la ejecución de muestreo físico en la ciénaga de Ayapel.

En este informe se presentan los modelos piloto y primeros resultados correspondientes a la fase I de la escalera metodológica, para cada una de las ventanas de trabajo del PMEH, es decir, complejo cenagoso Zapatosa, complejo cenagoso Ayapel y Cuenca del río la Vieja.

El documento se encuentra distribuido de la siguiente forma: en el capítulo 2 se presentan los modelos conceptuales ecohidrológicos de los cuales se parte en el PMEH.

En el capítulo 3 se presentan el modelo piloto hidrológico para la cuenca del río Cesar; en el capítulo 4 detalla la configuración y los primeros resultados del modelo hidrodinámico para la ciénaga de Zapatosa; en el capítulo 5 y 6 se presenta el modelo piloto hidrológico (a nivel de cuenca del río San Jorge) e hidrodinámico (a nivel de ciénaga de Ayapel) respectivamente y en el capítulo 7 se presenta el modelo piloto hidrológico para la cuenca del río La Vieja.

Por último, en el capítulo 8 se presenta el tipo de muestreo realizado en la ciénaga de Zapatosa que servirá y se empleará para realizar el refinamiento de modelos que corresponde a los pasos a seguir por parte del PMEH plant.





## 1. MODELOS CONCEPTUALES ECOHIDROLÓGICOS

En la fase I se parte de la consolidación y análisis de información secundaria existente para cada ventana de trabajo que fundamentan y soportan los modelos conceptuales Ecohidrológicos que a su vez son la base para la construcción de modelos pilotos para las áreas de estudio.

A continuación, se detallan los avances en esta fase con énfasis en los modelos conceptuales desarrollados. En las ciénagas se plantea un modelo conceptual de compartimentos de macroelementos carbono, nitrógeno y fósforo que corresponde a tres de los principales macroelementos ((CHONPS) que muestran variación a lo largo del año, y se espera que esta variación presente relación con el pulso de inundación y condicione la productividad primaria fitoplanctónica y de macrófitas, así como su descomposición a lo largo del ciclo hidrológico anual.

Los modelo conceptuales representa la vinculación de la meteorología, el ciclo hidrológico y la hidro – sedimentología (sistema físico) con los macroelementos carbono (C), nitrógeno (N) y fósforo (P), presentes en sedimentos y disueltos en el agua, su movimiento, la variación espacio - temporal y su influencia sobre los productores primarios: fitoplancton (PP) perifiton algal (incluye algas bentónicas) (PP), vegetación riparia (PP), las macrófitas (PP), que no sólo ofertan abundante materia orgánica para los procesos de descomposición (producción secundaria - PS1), sino sustratos para algas del perifiton (PP), áreas de refugio y/o reproducción para especies de peces (PS2) e invertebrados.

La reducción en el ingreso y permanencia de agua dentro del sistema cenagoso (ciclo hidrológico) incide sobre las comunidades biológicas (no sólo los productores primarios (PP) y los descomponedores (PS1)); en el periodo seco como posible respuesta a una reducción del oxígeno disuelto (menor volumen de agua, con abundantes macrófitas y altas tasas respiratorias por aumento de temperatura), las especies de peces migratorios (migraciones cortas y largas), remontan por los tributarios hasta el periodo de lluvias cuando regresan e ingresan los inmaduros y juveniles a la ciénagas a iniciar su crecimiento.

En cuanto a otras variables físicas: la radiación solar, insolación, temperatura, velocidad del viento (precipitación – nivel del agua), que inciden en los productores primarios, debido a la intensidad y horas de luz y la resuspensión y bioturbación de sedimentos que establecen la dinámica de nutrientes que aumenta su disponibilidad para estos productores y puede aumentar la productividad primaria bajo estas circunstancias.





## 1.1 CIÉNAGA DE ZAPATOSA

En este caso particular se vincula la meteorología, el ciclo hidrológico y la hidro – sedimentología (sistema físico) con los macroelementos carbono (C), nitrógeno (N) y fósforo (P), presentes en sedimentos y disueltos en el agua, su movimiento, la variación espacio - temporal (en caso que exista) y su influencia sobre los productores primarios: fitoplancton (PP) perifiton algal (incluye algas bentónicas) (PP), vegetación riparia (PP), las macrófitas (PP), que no sólo ofertan abundante materia orgánica para los procesos de descomposición (producción secundaria - PS1 - ), sino sustratos para algas del perifiton (PP), áreas de refugio y/o reproducción para especies de peces (PS2) e invertebrados.

La reducción en el ingreso y permanencia de agua dentro del sistema cenagoso (ciclo hidrológico) incide sobre las comunidades biológicas (no sólo los productores primarios (PP) y los descomponedores (PS1)); en el periodo seco como posible respuesta a una reducción del oxígeno disuelto (menor volumen de agua, con abundantes macrófitas y altas tasas respiratorias por aumento de temperatura), las especies de peces migratorios (migraciones cortas y largas), remontan por los tributarios hasta el periodo de lluvias cuando regresan e ingresan los inmaduros y juveniles a la ciénagas a iniciar su crecimiento. En la Figura 1-1 se plantea el modelo conceptual para la Ciénaga de Zapatosa.

Para cada una de las especies componentes del stock de pesca (en este caso el bocachico: *Prochilodus magdalenae*; y bagre rayado: *Pseudoplatystoma magdaleniatum*) y de acuerdo con la información secundaria existente, puede modelarse alguna variable asociada al ciclo hidrológico que incide en el comportamiento, la disponibilidad de alimento, áreas de anidación y refugio. En caso de introducción de una especie carnívora y con adecuada información secundaria disponible, podría modelarse la variación en la depredación de otras especies.

En cuanto a otras variables físicas: la radiación solar, insolación, temperatura, velocidad del viento (precipitación – nivel del agua), que inciden en los productores primarios, debido a la intensidad y horas de luz y la resuspensión y bioturbación de sedimentos que establecen la dinámica de nutrientes que aumenta su disponibilidad para estos productores y puede aumentar la productividad primaria bajo estas circunstancias (Figura 1-1).

A continuación, se presentan cada uno de los componentes del sistema que integra el modelo conceptual.





- Sedimentos

Los sedimentos de los lagos constituyen una fuente o reserva de nitrógeno (N) y fósforo (P) necesarios para la productividad primaria y la su disponibilidad depende de sus características y las del agua que le cubre (Wetzel 1981).

En ciénagas someras tropicales, con altas temperaturas (25°C a 30°C), con alta turbulencia, abundante bioturbación asociada a la presencia de peces detritívoros (iliófagos), decápodos y macroinvertebrados bénticos, los procesos de descomposición son rápidos y se espera alta presencia de nutrientes en la columna de agua, altas densidades de plancton y baja acumulación de sedimentos orgánicos; puede presentarse variación de los nutrientes en los diferentes sectores de la ciénaga.



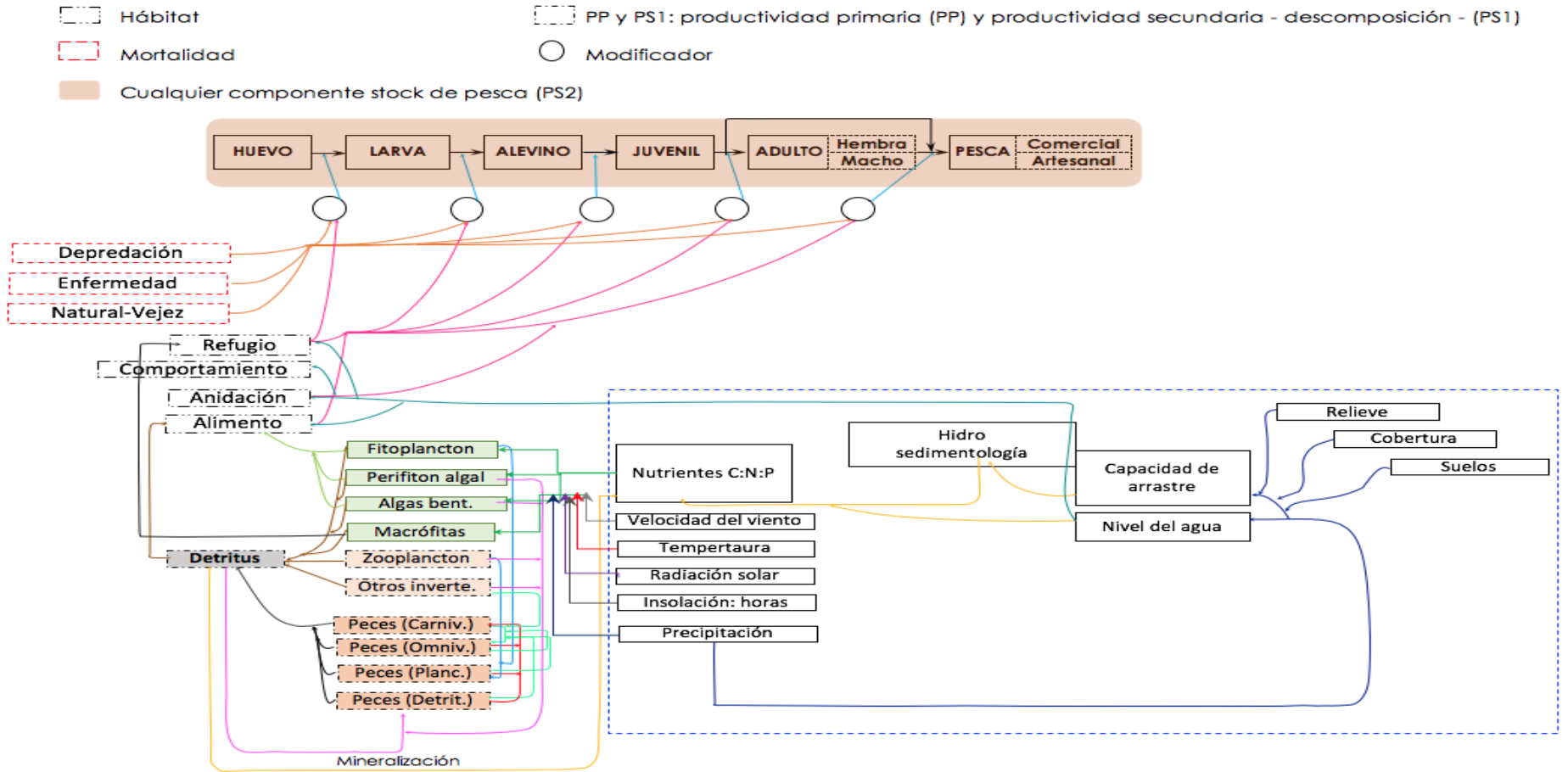


Figura 1-1. Modelo conceptual de la Ciénaga de Zapato



- Carbono - oxígeno

Toda la energía química que ingresa al ecosistema, proviene de la producción primaria resultante del proceso de fotosíntesis, este proceso es realizado por las plantas verdes y se produce glucosa que corresponde a la molécula que es oxidada en el proceso de respiración, por medio del cual obtienen energía los productores primarios (plantas verdes) y secundarios (consumidores y descomponedores).

El carbono constituye el 9,5% de los seres vivos, es utilizado por las plantas en forma de  $CO_2$ , y no es deficitario de los ecosistemas acuáticos debido a su alta concentración resultantes de la facilidad de dilución en el agua. Puede ingresar por difusión desde la atmósfera, o proceder de los procesos de descomposición y respiración. Se acumula como materia orgánica particulada y disuelta en la columna y como carbono orgánico en sedimentos, con porcentajes entre el 5% y el 20%, en ciénagas del Magdalena Medio (Jaramillo et al, 2012).

- Fósforo

En la naturaleza los depósitos de fósforo se encuentran en la roca, en los ecosistemas acuáticos es incorporado por los productores primarios (fitoplancton y macrófitas) en forma de ion fosfato ( $PO_4$ ); y en todos los seres vivos forma parte de moléculas transportadoras de energía (ATP, ADP, NADP, NADPH), esenciales en procesos metabólicos.

El fósforo cuando se encuentra hidratado (ortofosfato), puede ser utilizado por los productores primarios e ingresa al resto de los organismos a través de la cadena trófica. Todos los organismos reingresan este compuesto al ecosistema por aporte de heces y orina que pueden quedar y ser rápidamente asimilados en la columna o depositarse en los sedimentos. En los sedimentos vuelven a hidratarse y ser resuspendidos por bioturbación o por el movimiento del agua y reingresan nuevamente a la cadena trófica.

- Nitrógeno

El nitrógeno es el elemento más abundante en la atmósfera ( $N_2$ ); es posible encontrarlo de diferentes formas en la naturaleza: como sal en suelos y aguas, de forma utilizable ( $NH_4^+$ ), ( $NO_3^-$ ) y no utilizable ( $NO_2^-$ ) por las plantas; en la atmósfera como gas ( $NH_3$ ,  $NO_x$ ,  $N_xO$ ,  $N_2$ ) y formando parte de los organismos como ácidos nucleicos, aminoácidos y proteínas (orgánico:  $R-NH_2$ ).

En el agua, las Cianobacterias son los organismos capaces de convertir el nitrógeno atmosférico ( $N_2$ , no utilizable), a amonio ( $NH_4^+$ ); el amonio corresponde al ingreso





del nitrógeno al ciclo biológico. Una vez el nitrógeno se encuentra en forma de amonio, es oxidado a nitrito (nitritación) por dos grupos de bacterias: Nitrosococcus y Nitrosomonas, en este caso, las Nitrosomonas pueden continuar la oxidación del nitrógeno y devolverlo a su forma molecular ( $N_2$ ).

Como nitrito es oxidado por el Nitrobacter y forma el nitrato (nitratación) que corresponde al estado utilizable por la mayoría de las plantas. Durante este paso, puede continuar el proceso de oxidación e interviene Nitrosococcus. Es importante aclarar que, durante el proceso de fijación de nitrógeno, este se transforma nuevamente a formas no asimilables y por tanto puede resultar en un elemento limitante para los procesos productivos al permanecer la mayor parte de este elemento en formas moleculares no asimilables.

Tanto para el nitrógeno como para el fósforo, en el sedimento suelen distinguirse dos capas, una superficial y normalmente oxidada y otra profunda en condiciones anóxicas / anaerobias. Es importante aclarar que únicamente los 10cm superficiales del sedimento son los que presentan actividad.

Como se ha comentado anteriormente, es la diferencia de concentraciones entre el agua intersticial y la columna de agua, la que crea un flujo desde el compartimento de mayor concentración al de menor. Aunque el efecto de los organismos puede aumentar el intercambio entre la columna de agua y los sedimentos (bioturbación) (Jiménez Sales 2008), incrementando la disponibilidad de nutrientes.

#### - Productores primarios - autótrofos

Se consideran productores primarios, los organismos que ingresan la energía a los ecosistemas. Los productores primarios son las plantas verdes acuáticas y terrestres incluyendo las algas y algunas bacterias. El ingreso de energía se realiza por medio del proceso de fotosíntesis, en el cual las plantas captan energía lumínica y la transforman en energía química (fijan carbono); para esta transformación utilizan dióxido de carbono ( $6CO_2$ ) y agua ( $6H_2O$ ) y producen glucosa ( $C_6H_{12}O_6$ ) y oxígeno ( $6O_2$ ).

En los ecosistemas acuáticos tropicales, los productores primarios pertenecen a tres grandes grupos: las algas, las cianobacterias y las macrófitas y debido a su tamaño y fisionomía pueden o no ser directamente consumidas por los productores secundarios (consumidores: zooplancton, peces y reptiles o descomponedores: hongos, bacterias y detritívoros - macroinvertebrados, protistas-).

Al ser las plantas las fijadoras de carbono, el carbono de todas las biomoléculas (carbohidratos, lípidos, proteínas y ácidos nucleicos) tiene un origen fotosintético,







que es devuelto a la atmósfera en forma de CO<sub>2</sub> durante el proceso de respiración (descomposición), que es realizado por todos los organismos vivos.

En los ecosistemas acuáticos que presentan inundaciones periódicas extremas, los productores primarios experimentan variaciones en la productividad primaria que se expresan en el tiempo de acumulación de biomasa.

- Productores secundarios - heterótrofos

Corresponde a dos grandes grupos los consumidores y los descomponedores. Los consumidores asimilan una fracción de la biomasa que consumen y que reingresan al ecosistema en forma de heces y orina; estas sustancias, junto con los cadáveres y restos vegetales son utilizados por los descomponedores, que devuelven los nutrientes al ecosistema y de forma mineral pueden volver a ser utilizados por las plantas verdes.

Los consumidores pueden ser de diferentes grupos; planctóvoros (fito y/o zooplancton), herbívoros y carnívoros que pueden ser de varios tipos, dependiendo del tipo de presas que consuman y los omnívoros que consumen diferentes tipos de alimento.

## 1.2 CIÉNAGA DE AYAPEL

En la Figura 1-2 se plantea el modelo conceptual para la Ciénaga de Ayapel. Para la Ciénaga de Ayapel, el modelo conceptual es semejante al presentado para la ciénaga de Zapatosa, con la diferencia de la presencia de mercurio en el ecosistema.

El mercurio (Hg) es un contaminante global, que genera problemas en el medioambiente y la salud de la fauna y humana (UNEP 2013). Las emisiones de mercurio a la atmósfera se distribuyen globalmente y contaminan todos los ecosistemas; provienen de actividades humanas (combustión del carbón, minería directa de mercurio, plata y oro) y actividades naturales (vulcanismo).

Las emisiones producen mayoritariamente Hg<sup>0</sup>, con menor cantidad de Hg<sup>2+</sup>. El mercurio depositado puede ser re-emitido a la atmósfera mediante su intercambio entre el agua y el aire o la combustión de biomasa. La forma más tóxica, el metil mercurio (MeHg) que se acumula en los tejidos de los organismos a lo largo de su vida (Baeyens et al. 2003), debido a su habilidad en cruzar las membranas celulares, resultando en gran absorción, para el sistema nervioso y mayor retención dentro del cuerpo (Neathery & Miller 1975 en Kehrig et al. 2009).







El mercurio se bioacumula (acumulación neta en un organismo de metales provenientes de fuentes bióticas o abióticas) hasta un millón de veces a lo largo de la cadena trófica acuática, desde la base (microorganismos) hasta los organismos de la parte superior de la cadena (peces depredadores y mamíferos), por adsorción a la superficie corporal y, principalmente, por ingestión de alimentos (Kehrig et al. 2009).

Teniendo en cuenta su alta capacidad de acumulación en organismos acuáticos, se espera concentraciones elevadas en carnívoros, (niveles tróficos superiores) debido al proceso de biomagnificación (acumulación progresiva de ciertos metales pesados - y otras sustancias persistentes - de uno a otro nivel trófico sucesivo) (Kehrig et al. 2009).



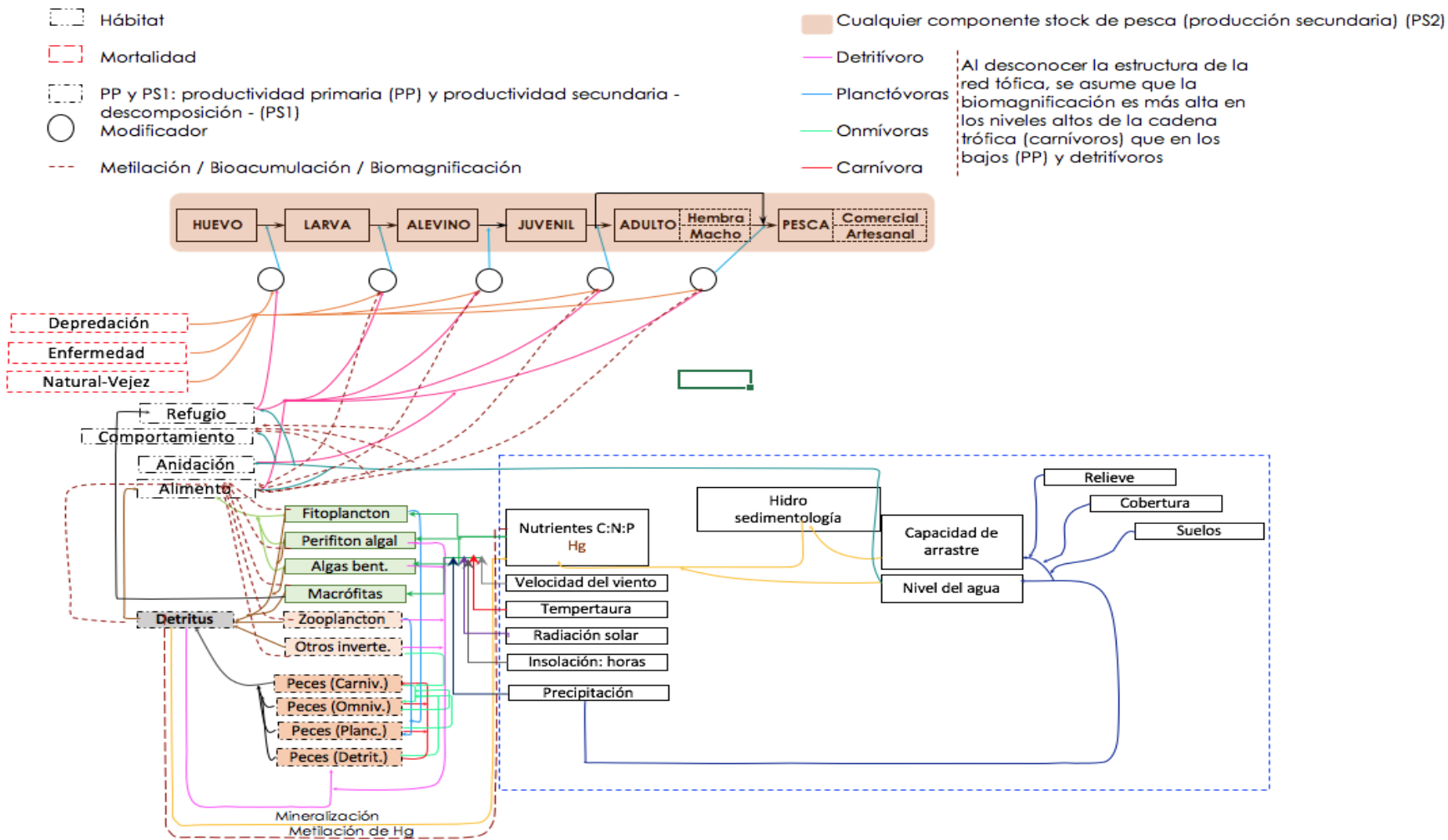


Figura 1-2. Modelo conceptual de la Ciénaga de Ayapel.



### 1.3 CUENCA DEL RIO LA VIEJA

En la Figura 1-3 se presenta el marco y diagrama del modelo conceptual de la cuenca del río La Vieja.

La propuesta se centra en la optimización del paisaje, buscando conservar la mayor cantidad de servicios ecosistémicos de la cuenca, mediante la optimización de la estructura del paisaje. En este sentido los procesos de polinización, dispersión de semillas y parasitismo, constituyen importantes indicadores de la generación de esta conectividad que redundan, en la permanencia de áreas protegidas, la construcción de corredores de coberturas naturales de conectividad y/o mosaicos agrosilvopastoriles que permiten un beneficio económico, en especial la conservación de la biodiversidad y la complejidad de los ecosistemas conservados.

Se realizan simulaciones de las coberturas presentes, reorganizándolas, sin modificar la infraestructura pero favoreciendo los flujos de materia e información entre los ecosistemas conservados.

La polinización es una función ecológica fundamental en la producción de biomasa, la reproducción de plantas y la producción de alimentos, este proceso implica la transferencia de polen Co-específico entre los órganos reproductores de las flores, lo que desencadena en la fecundación de las plantas, y la posterior producción de frutos y semillas. Los Himenópteros, puntualmente las abejas, son consideradas las principales polinizadoras del planeta silvestre (Kluser & Peduzzi, 2007) y de cultivo se estima que un 35 % de las plantas utilizadas en la agricultura dependen especialmente de himenópteros para su polinización (Potts et al., 2010).

Los parasitoides son individuos que hacen parte de los controladores de plagas naturales, los cuales contribuyen a mantener un equilibrio al buscar cuidadosamente a sus huéspedes, así mismo son individuos que sólo parasitan y consumen (matan) a un solo huésped durante su ciclo de vida, su tamaño es similar a su huésped y poseen un ciclo de vida relativamente simple, el parasitoides adulto es un insecto de vida libre que puede ser tanto herbívoro como depredador, y pertenecen generalmente a un grupo taxonómico afín a su huésped entre los cuales se encuentran diferentes ordenes (Hymenoptera, Diptera, Coleoptera, Lepidoptera, Neuroptera, Trichoptera entre otros).

El conocimiento de los parasitoides es importante, ya que la correcta identificación (parasitoides o predadores) es elemento clave para el control biológico exitoso en agroecosistemas (Martínez-Chávez, Duque-Gamboa, & Toro-Perea, 2019).



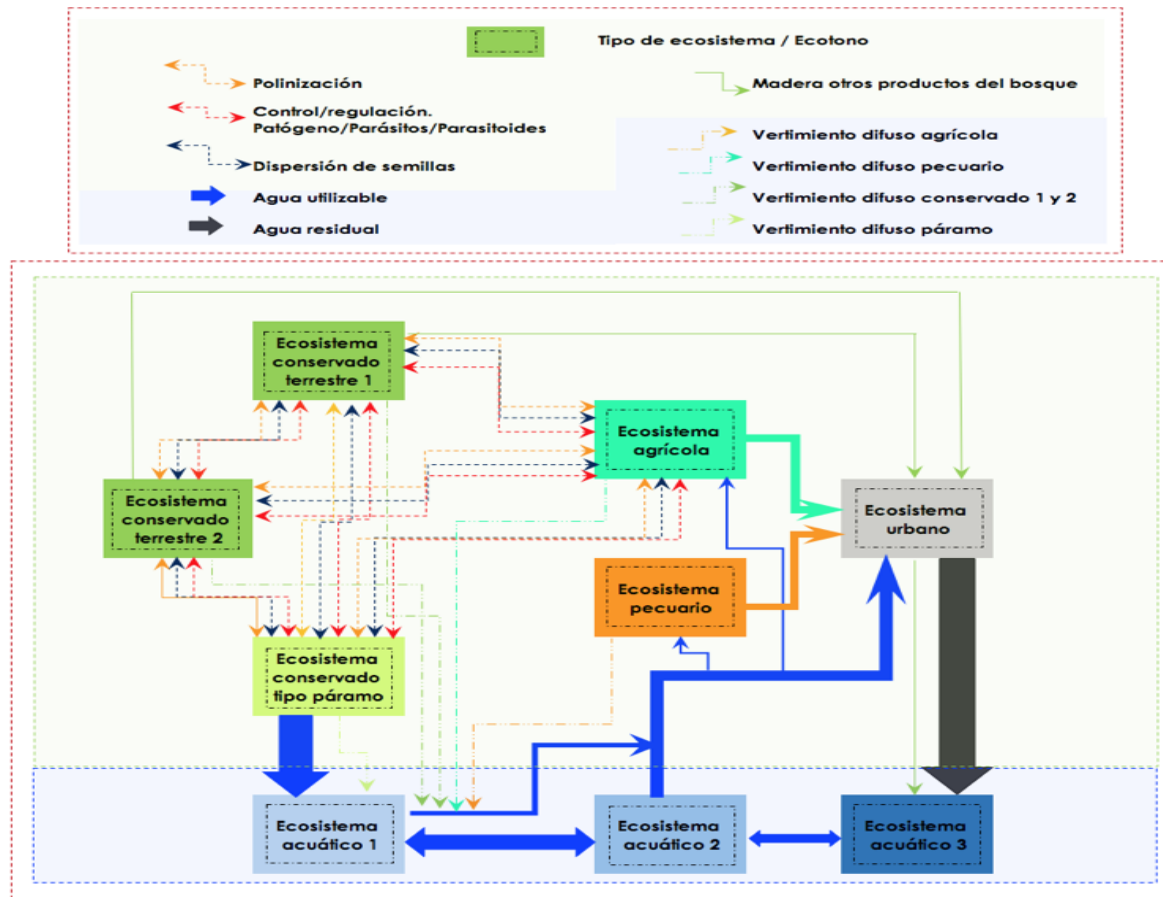


Figura 1-3 Modelo conceptual cuenca del río La Vieja

## 2. GENERALIDADES DE LA CONSTRUCCIÓN DE LOS MODELOS HIDROLOGICOS

### 2.1 SELECCIÓN DE CÓDIGO COMPUTACIONAL

Los modelos hidrológicos computacionales pilotos se desarrollaron empleando el SWAT (Soil Water Air Tool, por sus siglas en inglés) software que es de dominio público y de código abierto.

### 2.2 INSUMOS PARA LOS MODELOS HIDROLOGICOS

Para crear los modelos hidrológicos con el aplicativo Soil and Water Assessment Tool (SWAT), se empleó información que comprenden información climatológica, topográfica, coberturas y de estudios de suelos. Cabe mencionar que la información topográfica, de coberturas y de suelos se utiliza en el aplicativo para analizar y definir las zonas de respuesta hidrológica homogénea (HRU por sus siglas en inglés).

#### 2.2.1 Climatología

El modelo SWAT requiere de las siguientes variables climatológicas para su funcionamiento: precipitación, temperatura máxima y mínima, velocidad del viento, humedad relativa y presión atmosférica.

##### 2.2.1.1 Precipitación

La precipitación ingresada al modelo se construyó a partir de interpolación de los registros de estaciones pluviométricas del IDEAM. A las series de tiempo se les realizaron análisis de homogeneidad y depuración de datos anómalos.

Se realizaron varias interpolaciones con diferentes métodos de interpolación, midiendo el error mediante la metodología de validación cruzada, siendo las metodologías de IDW y mezcla con algoritmo Double Smoothing las que mejores resultados presentaron. Basados en los resultados y en los patrones espaciales de las interpolaciones, se escogió el método de IDW. Los estimados de las precipitaciones se promediaron dentro de cada subcuenca definida dentro del aplicativo SWAT para así asignar esas precipitaciones a los centroides de las subcuencas como estaciones virtuales. Las series se crearon desde el 1985/01/01 hasta el 2018/12/31.

Para las cuencas del río San Jorge hasta el caño Seheve y la cuenca del río La Vieja, se tienen definidas las subcuencas y se espera tener los forzamientos en cada subcuenca a la brevedad posible.

### 2.2.1.2 Temperatura

Utilizando el método de IDW y regresiones con la altura, se crearon campos de temperatura máxima y mínima, usando como insumo las estaciones meteorológicas del IDEAM. Las series de tiempo de las estaciones también fueron objeto de análisis de homogeneidad y datos anómalos. Estas interpolaciones también fueron sujetas de evaluación y comparación con otros métodos con la metodología de validación cruzada, dando como resultado que la mejor opción para las cuencas era el método mencionado. Igualmente, los estimados se promediaron dentro de cada subcuena definida dentro del aplicativo SWAT y así definir la temperatura en el centroide de las subcuencas. Las series también se crearon desde el 1985/01/01 hasta el 2018/12/31.

### 2.2.1.3 Velocidad del viento

Debido a las deficiencias de información de esta variable se optó por utilizar información complementaria para esta variable del forzamiento. Ejemplos de esta falta de datos son: en el periodo 1975 a 2018 hay en promedio 1.5 datos por día en toda la cuenca del río Cesar, para la cuenca del río San Jorge no se encuentran estaciones al interior de la cuenca y una estación cercana tiene aproximadamente 47 % de datos faltantes en el periodo 1986 a 2015. Debido a esto se optó por utilizar el simulador de clima que contiene ArcSWAT, pero se buscó que este tuviera en cuenta información de la climatología de las zonas de estudio para tener una mejor representación de los fenómenos.

El reanálisis meteorológico del NCEP de la NOAA, Climate Forecast System Reanalysis (CFRS) (Saha, y otros, 2010), es una simulación atmosférica global que acopla un sistema de asimilación de datos. Es decir, además de simular físicamente la atmosfera, incorpora dentro de su simulación la actualización de las variables del sistema con datos observados de estaciones, globos meteorológicos, satélites, etc. De las bases de datos asimiladas por él reanálisis CFRS, se encuentra las estaciones sinópticas recopiladas sistemáticamente por la organización meteorológica mundial (WMO, 2012). Dentro de las estaciones reportadas por Colombia se encuentran las del aeropuerto Alfonso López de Valledupar, el aeropuerto las flores de El Banco, el aeropuerto internacional Matecaña en Pereira, y el aeropuerto El Edén en el Quindío, entre otras.

Los datos de éste reanálisis fueron transformados a los datos requeridos por el simulador de clima del aplicativo ArcSWAT (Dile & Srinivasan, 2014), y almacenados en una base de datos. Esta se puede descargar desde la página de la página web de la universidad de Texas (Texas A&M University, 2020). Esta base de datos fue importada al compendio de datos del aplicativo ArcSWAT, y así se pudo montar los modelos directamente con un simulador de clima específico para cada ventana de estudio. El simulador es alimentado por varios estadísticos para las variables de precipitación y temperatura (que se dejan inhabilitados cuando se ingresan las





series de tiempo producto de las interpolaciones mencionadas), y para la variable velocidad del viento requiere los promedios mensuales multianuales.

#### **2.2.1.4 Humedad relativa**

Para esta variable también se utilizaron los datos del reanálisis CFRS y el simulador de clima de ArcSWAT debido a la falta de datos (por ejemplo: un promedio de 6 estaciones activas en el periodo 1983 a 2018 en la cuenca del río Cesar). Se requiere el promedio mensual multianual de la humedad relativa para que el simulador de clima de ArcSWAT genere estas series sintéticas de humedad relativa.

#### **2.2.1.5 Radiación solar**

Se utilizaron los datos del reanálisis CFRS y el simulador de clima de ArcSWAT debido a la falta de datos (por ejemplo: no existen estaciones dentro de la cuenca del río San Jorge y en la cuenca del río Cesar hay un promedio de 1 dato por día en el periodo 1983 a 2018). Para que el simulador de clima de ArcSWAT genere series sintéticas se necesita conocer el valor mensual multianual.

### **2.2.2 Datos hidrosedimentológicos y de calidad del agua**

Para incorporar la información medida en el modelo, se realizan procesos de calibración de parámetros. En los modelos hidrológicos, se tienen en cuenta los registros de estaciones de caudal, de sedimentos y de calidad del agua. Los registros utilizados provienen de estaciones hidrométricas del IDEAM. Los registros de caudal fueron objeto de análisis de homogeneidad y datos anómalos.

### **2.2.3 Elevación y geomorfogenesis del terreno**

El aplicativo SWAT requiere un producto distribuido que describa la topografía de la zona a modelar. Como insumo para la delimitación de las subcuencas y el cálculo de las pendientes del terreno, se utilizó un modelo digital de elevación (DEM) de la misión ALOS PALSAR 1 de 12.5 m de resolución (JAXA/METI, 2019). Este producto fue corregido en cada ventana por medio del quemado de la red de drenaje de la cartografía hídrica del Instituto Agustín Codazzi (IGAC) a escala 1:25.000 utilizando la herramienta Arc Hydro (Environmental Systems Research Institute, Inc. (Esri), 2014). Se utilizó en cada ventana para delimitar las subcuencas.

El DEM mencionado también se utilizó para hacer una reclasificación de las pendientes en intervalos. Dadas las posibles combinaciones de suelos y coberturas, que realiza el aplicativo, Arnold, y otros (2012) mencionan que una amplia discretización por pendientes del terreno no es necesaria. En consecuencia, limitan el número máximo de reclasificación en el aplicativo ArcSWAT a 5 intervalos. Para la definición de los intervalos se tuvieron en cuenta dos fuentes de información: los Planes de Ordenación y Manejo de Cuenca (POMCA) y la clasificación de pendientes de los sistemas morfogénicos del terreno colombiano (IDEAM, 2010).





Los sistemas morfogénicos del terreno colombiano también aportaron información valiosa para caracterizar zonas hidrológicas homogéneas. Con él se subdividieron subcuencas que por las características de la red de drenaje presentaban sistemas de planicies y montañas dentro de la misma subcuenca. En consecuencia, se utilizó la delimitación del territorio que realiza el mapa de sistemas morfogénicos para subdividir esas subcuencas en dos o más subcuencas homogéneas.

## 2.2.4 Coberturas

Las coberturas del suelo influyen sobre el comportamiento hidrológico. Para la definición de los HRUs y para la definición de los parámetros asociados a ellas, el software ArcSWAT contiene una base de datos que asocia una clasificación de coberturas. Para el montaje de los modelos se optó por realizar un análisis multitemporal de coberturas, con la información de las ventanas temporales para los años 2000-2002, 2005-2009, y 2010-2012. En primera medida se hizo una reclasificación de las posibles coberturas registradas en la metodología Corine Land Cover a las coberturas definidas por SWAT, esto para las tres ventanas temporales y espaciales, la reclasificación se basó en lo expuesto en INFOCOL LTDA. (2016).

Las características del análisis se basaron principalmente en la repetición de una clase de cobertura a través de las tres ventanas temporales y la similitud de las coberturas entre una ventana temporal y la siguiente. Es decir, si en dos de las tres ventanas temporales se presentó la misma cobertura, se asignó ésta para el análisis multi temporal. Además, debido a que en algunos casos se presentó diferencia entre las tres ventanas temporales para un mismo espacio y que en muchos casos dos de esas tres coberturas eran muy similares, se reasignó la cobertura de una ventana temporal (esto se debe a la foto interpretación de cada ventana temporal y que bajo la existencia de muchas dinámicas puede generar un cambio en la cobertura simplemente por interpretación). Es decir, si en un lapso de tiempo se encontró que la cobertura era bosque (FRST) y en el siguiente lapso se registró bosque de hoja perene (FRSE) se asignó bosque (FRST) a la segunda ventana temporal y subsecuentemente se asignó la codificación al análisis multitemporal. En la Tabla 2-1 se encuentran estos criterios. En caso de no cumplirse ninguno de estos criterios se dejó la cobertura del 2000-2002 por ser la más cercana al periodo de calibración.



**Tabla 2-1. Criterio para reasignación de cobertura**

Cobertura tiempo 1	Cobertura tiempo 2	Cambio a cobertura
Bosque (FRST)	Bosque hoja perene (FRSE)	Bosque (FRST)
Pastos (PAST)	Herbazal (RNGE)	Pastos (PAST)
Zona pantanosa (WETL)	Agua (WATR)	Agua (WATR)
Zona Urbana Media (URMD)	Zona Urbana Densa (URHD)	Zona Urbana Densa (URHD)
Arbustal (RNGB)	Café (COFF)	Arbustal (RNGB)
Agricultura genérica (AGRL)	Agricultura cereales (AGRC)	Agricultura genérica (AGRL)
Pastos (PAST)	Zona pantanosa (WETL)	Pastos (PAST)

### 2.2.5 Estudios de suelos

Se consultaron tanto los estudios de suelos departamentales, como estudios detallados de municipios que se encuentre al interior de las cuencas del río Cesar, río San Jorge y río La Vieja. Los estudios departamentales adquiridos en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) fueron:

- Departamento de Bolívar
- Departamento de Cesar
- Departamento de Córdoba
- Departamento de Antioquia
- Departamento de Guajira
- Departamento de Magdalena
- Departamento de Tolima
- Departamento de Valle del Cauca
- Departamento de Quindío
- Departamento de Risaralda
- Departamento de Sucre

También se consultaron los estudios detallados de varios municipios que se encuentran dentro de la cuenca. Estos estudios se listan en la descripción de la transformación para cada cuenca.

### 2.2.6 Demanda hídrica

Con el objetivo de tener en cuenta ciertas dinámicas socio-económicas que influyen sobre la cantidad de agua que está presente en las cuencas, se buscó

introducir información secundaria de demanda hídrica. Se consultaron dos fuentes principalmente: el estudio nacional del agua 2018 y los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas. Las demandas conseguidas generalmente están a nivel de concesión o de reporte de caudal extraído, es decir un solo valor que para efectos de la modelación se hizo la suposición que corresponde a un valor anual multianual.

La información contenida en dichos documentos se intentó georreferenciar de acuerdo con la información de los cauces a los que se hace referencia.

### 2.3 APLICATIVO ARCSWAT Y SWAT-CUP

Se utilizó la extensión para el sistema de información geográfica ArcGIS, denominada ArcSWAT (Arnold, y otros, 2012). Éste complemento se basa en información georreferenciada para calcular y construir los archivos para una cuenca en modelos SWAT. Una lista de los archivos que se crean con el aplicativo puede verse en la Tabla 2-2.

**Tabla 2-2. Archivos creados por el aplicativo ArcSWAT para formular modelos SWAT**

Tipo de archivo	Nombre de archivo	Función
Generales de ArcSWAT	.mxd	Archivo general de proyecto, agrupa la información
	Proyecto.mdb SWAT2012.mdb	Bases de datos con información general de parámetros y de cálculos para la cuenca de estudio
	.dat	Archivos de información general de parámetros para rutinas del modelo SWAT
	Carpeta Watershed	Almacena los datos de los archivos de suelos, coberturas, pendientes usados para crear un modelo en una cuenca específica
Archivos de modelo SWAT (Carpeta Scenarios y subcarpet a TxtInOut)	.pnd; .rte; .sub; .swq; .wgn; .wus	Archivos para cada subcuenca con sus características
	.chm; .gw; .hru; .mgt; .sdr; .sep; .sol	Archivos para cada HRU dentro de cada subcuenca
	file.cio	Archivos generales de control
	pcp1.pcp Tmp1.tmp	Archivos de forzamientos (entradas climatológicas); para las variables climáticas simuladas, se mira el archivo .wgn en cada subcuenca



	Output.hru; Output.pst; Output.rch; Output.rsv; Output.std; Output.sub;	Archivos de variables simuladas (salidas)
--	--	---

Para construir estos archivos el aplicativo ArcSWAT cuenta con una base de datos de donde obtiene información. Con base en la información de suelos y coberturas, el aplicativo hace uso de la base de datos donde se cruza la información ingresada para asignar parámetros a las abstracciones del espacio denominadas HRUs. También se vale de la información de pendientes para asignar valores a parámetros. Asimismo, el aplicativo asigna a los archivos de los HRUs el valor de algunas características de los suelos, ingresadas en la base de datos de suelos creada por el usuario. Estos valores son puntuales en muchos casos y sirven como valor “semilla” para el proceso de calibración.

**La base de datos general de ArcSWAT se denomina “SWAT2012” y se encuentra en la carpeta principal del aplicativo cada vez que se crea un modelo. De la información contenida allí, se debe resaltar 3 tablas. La primera es la tabla “usersoil”, que contiene todos los parámetros de los suelos que terminan transfiriéndose a los archivos creados por ArcSWAT; un ejemplo puede verse en la Figura 2-1 Base de datos de suelos**

OBJECTID	MUID	SEQN	SNAM	SSID	CMPPCT	NLAYERS	HYDRP	SOL_ZMX	ANION_EXCL	SOL_CRK	TEXTURE	SOL
291	VT028	38	LWCa	VT0040	42	4	B	590	0.5	0.5	SANDY_LOAM	
292	VT028	39	LWCb	VT0041	42	4	B	590	0.5	0.5	SANDY_LOAM	
293	VT028	40	LWD	VT0042	42	3	B	1500	0.5	0.5	CLAY_LOAM	
294	VT028	41	LWE	VT0043	42	4	B	450	0.5	0.5	SANDY_LOAM	
295	VT028	42	LWF	VT0044	42	2	C	600	0.5	0.5	CLAY_LOAM	
297	VT028	43	LWG	VT0045	42	6	B	780	0.5	0.5	SANDY_LOAM	
298	VT028	44	LWH	VT0046	42	1	C	100	0.5	0.5	CLAY_LOAM	
299	VT028	45	LWI	VT0047	42	4	D	750	0.5	0.5	CLAY	
300	VT028	46	LXA	VT0048	42	3	B	400	0.5	0.5	SANDY_LOAM	
302	VT028	47	MBA	VT0049	42	2	B	230	0.5	0.5	SANDY_LOAM	
303	VT028	48	MEAg	VT0050	42	1	B	100	0.5	0.5	SANDY_LOAM	
305	VT028	49	MHA	VT0051	42	2	B	580	0.5	0.5	SANDY_LOAM	
306	VT028	50	MHB	VT0052	42	3	B	600	0.5	0.5	SANDY_LOAM	
307	VT028	51	MLA	VT0053	42	4	C	2100	0.5	0.5	SANDY_CLAY_L	
308	VT028	52	MLAg2	VT0054	42	2	C	570	0.5	0.5	CLAY_LOAM	
309	VT028	53	MLAg3	VT0055	42	2	C	570	0.5	0.5	CLAY_LOAM	
310	VT028	54	MLB	VT0056	42	4	C	420	0.5	0.5	CLAY_LOAM	
311	VT028	55	MLBf1	VT0057	42	1	B	160	0.5	0.5	SANDY_LOAM	
312	VT028	56	MLBf2	VT0058	42	1	B	160	0.5	0.5	SANDY_LOAM	
313	VT028	57	MLBf2	VT0059	42	1	B	160	0.5	0.5	SANDY_LOAM	
314	VT028	58	MQA	VT0060	42	3	A	780	0.5	0.5	SANDY_LOAM	
315	VT028	59	MQAf2	VT0061	42	1	C	340	0.5	0.5	CLAY_LOAM	
316	VT028	60	MQAg2	VT0062	42	1	C	340	0.5	0.5	CLAY_LOAM	
317	VT028	61	MOB	VT0063	42	3	C	800	0.5	0.5	LOAM	
318	VT028	62	MOBe2	VT0064	42	3	C	800	0.5	0.5	CLAY	
320	VT028	63	MOBf2	VT0065	42	3	C	800	0.5	0.5	CLAY	
321	VT028	64	MOBg2	VT0066	42	3	C	800	0.5	0.5	CLAY	
322	VT028	65	MOBg3	VT0067	42	3	C	800	0.5	0.5	CLAY	
324	VT028	66	MQC	VT0068	42	3	C	1500	0.5	0.5	LOAM	

**Figura 2-1 Base de datos de suelos**

La segunda es la tabla del simulador de clima que se va a usar y cuyo nombre debe comenzar por “WGEN”. La tabla maneja información estadística de las cinco variables climatológicas asociadas a la evapotranspiración: precipitación, temperatura, radiación, humedad relativa y velocidad de vientos. En la Tabla 2-3

se pueden ver los nombres de los campos requeridos descargados desde la página de la universidad de Texas para suplir los faltantes de información en las variables: humedad relativa, radiación y velocidad del viento.

**Tabla 2-3. Campos requeridos para el simulador de clima del aplicativo ArcSWAT**

Variable	Estadístico	Número de valores
Temperatura	Máxima: Promedio mensual multianual	12
	Mínima: Promedio mensual multianual	12
	Máxima: Desviación estándar de los datos diarios para el mes	12
	Mínima: Desviación estándar de los datos diarios para el mes	12
Precipitación	Media mensual multianual	12
	Desviación estándar de los datos diarios para cada mes	12
	Coefficiente de asimetría de los datos diarios para cada mes	12
	Probabilidad de día húmedo después de día seco para cada mes	12
	Probabilidad de día húmedo después de día húmedo para cada mes	12
	Promedio de días con precipitación para cada mes	12
	Intensidad máxima para 30 minutos en cada mes	12
Radiación	Promedio diario para cada mes	12
Humedad	Promedio diario del punto de rocío para cada mes	12
Velocidad del viento	Promedio mensual multianual	12

La tercera es la tabla "crop". En ella se encuentran los valores de muchos parámetros asociados a coberturas y algunos que se asignan dependiendo de la combinación del tipo de suelo y cobertura que se presenta en un mismo espacio geográfico. Ejemplo de esas variables cuyos valores son asignados dependiendo de la información de suelos y coberturas asignadas son: el número de curva (CN2), la rugosidad de la superficie, el contenido de nitrógeno y fósforo en las coberturas, etc. Ejemplo de esta tabla en la base de datos puede verse en la Figura 2-2.



CPNM	CROPNAME	OV_N	CN2A	CN2B	CN2C	CN2D	FERTFIELD	ALAI_MIN	BIO_LEAF
AGRL	Agricultural Land	0.14	67	77	83	87	1	0	0
AGRR	Agricultural Land	0.14	67	78	85	89	1	0	0
AGRC	Agricultural Land	0.14	62	73	81	84	1	0	0
ORCD	Orchard	0.15	45	66	77	83	1	0.75	0.3
HAY	Hay	0.3	31	59	72	79	1	0	0
FRST	Forest-Mixed	0.1	36	60	73	79	0	0.75	0.3
FRSD	Forest-Deciduous	0.1	45	66	77	83	0	0.75	0.3
FRSE	Forest-Evergreen	0.1	25	55	70	77	0	0.75	0.3
WETL	Wetlands-Mixed	0.05	49	69	79	84	0	0	0
WETF	Wetlands-Forest	0.05	45	66	77	83	0	0	0
WETN	Wetlands-Non-forest	0.05	49	69	79	84	0	0	0
PAST	Pasture	0.15	49	69	79	84	0	0	0
SPAS	Summer Pasture	0.15	49	69	79	84	0	0	0
WPAS	Winter Pasture	0.15	49	69	79	84	0	0	0
RNGE	Range-Grasses	0.15	49	69	79	84	0	0	0
RNGB	Range-Brush	0.15	39	61	74	80	0	0	0
SWRN	Southwestern Upland	0.15	39	61	74	80	0	0	0
WATR	Water	0.01	92	92	92	92	0	0	0
CORN	Corn	0.14	67	77	83	87	1	0	0
CSIL	Corn Silage	0.14	67	77	83	87	1	0	0
SCRN	Sweet Corn	0.14	67	77	83	87	1	0	0
EGAM	Eastern Gamagrass	0.1	31	59	72	79	0	0	0
GRSG	Grain Sorghum	0.14	67	77	83	87	1	0	0
SGHY	Sorghum Hay	0.14	67	77	83	87	1	0	0
JHGR	Johnsongrass	0.1	31	59	72	79	0	0	0
SUGC	Sugarcane	0.14	67	77	83	87	1	0	0
SWHT	Spring Wheat	0.14	62	73	81	84	1	0	0
WWHT	Winter Wheat	0.14	62	73	81	84	1	0	0
DWHT	Durum Wheat	0.14	62	73	81	84	1	0	0

**Figura 2-2 Ejemplo de la tabla de coberturas y los valores de variables asociadas a ellas**

Para modificar los parámetros del modelo y observar los cambios en las simulaciones, se utilizó el aplicativo SWAT-CUP. Este permite no solamente realizar cambios de valor de los parámetros, sino que también permite hacer cambios relativos a los valores ingresados dadas las condiciones de suelos y coberturas.

## 2.4 CALIBRACION DE MODELOS DE SWAT

A pesar de ser considerado un modelo de base física, SWAT también requiere un ajuste de los parámetros que controlan la conceptualización matemática de los procesos naturales que pretende simular. Esto se basa en la necesidad de mejorar el desempeño de los modelos con base en la comparación de las observaciones de ciertas variables contra las simuladas por el modelo. Para esto se requiere de implementar una serie de fases que comienza con la especificación de parámetros, que consiste en identificar los posibles procesos y en consecuencia parámetros que son susceptibles de ser modificados para mejorar el desempeño del modelo (Arnold, J. G.; Moriasi, D. N.; y otros, 2012).

Para lograr lo mencionado, se creó una tabla de parámetros asociados a los procesos que simulan y que de acuerdo a la bibliografía se han analizado. También se incluyen otros parámetros que, no han tenido análisis de sensibilidad, pero que se encuentran dentro del listado de parámetros disponibles y que son asignados dependiendo de la información de suelos, coberturas o pendientes ingresadas. En consecuencia, esta lista corresponde al universo de parámetros susceptibles de ser calibrados. Esto se hizo basado en revisión de artículos relacionados con el aplicativo SWAT y otros que se enfocan en los procesos de análisis de sensibilidad, calibración y validación. En la Tabla 2-4 se puede ver el listado de parámetros.





**Tabla 2-4. Listado de parámetros susceptibles de ser calibrados**

Proceso hidrológico	Parámetro	Descripción	Sensibilidad literatura	Sensible
Escorrentía superficial	CN2	Número de curva del SCS inicial para la condición de humedad II	Si	Si
	SOL_AWC	Capacidad disponible de agua en la capa de suelo	Si	Si
	SOL_K	Conductividad hidráulica saturada	Si	Si
	ESCO	Factor de compensación de evaporación desde el suelo	No muy sensible	A definir
	EPCO	Factor de compensación por absorción de plantas	No muy sensible	A definir
	SURFACE_LAG	Coefficiente de retraso de la escorrentía superficial	No muy sensible	Si
	BLAI	Índice de área foliar de cultivos	No	A definir
	OV_N	Coefficiente de rugosidad superficial de Manning	Si	Si
	CANMX	Índice máximo del dosel	No	A definir
	SOL_ALB	Albedo del suelo	No muy sensible	A definir
	SOL_BD	Densidad aparente húmeda	Si	Si
Flujo Base	ALPHA_BF	Factor Alpha para flujo base	Si	Si
	GW_REVAP	Coefficiente de retorno de agua subterránea	No muy sensible	A definir
	GW_DELAY	Retraso en el flujo subterráneo	Si	Si
	GWQMN	Umbral en los acuíferos superficiales para que ocurra flujo base	No	A definir
	REVAPMN	Umbral para que el retorno o la percolación desde el acuífero superficial ocurra	No	A definir
	RCHRG_DP	Factor de percolación al acuífero profundo	Si	Si
Flujo de agua y sedimento en canales	CH_K (1 y 2)	Conductividad hidráulica efectiva en el canal y en la subcuenca (archivo .rte y .sub)	Si	Si
	CH_N	Coefficiente de rugosidad de Manning para el canal principal	Si	Si
	PRF	Factor de ajuste para tránsito de sedimentos en flujo pico		





Proceso hidrológico	Parámetro	Descripción	Sensibilidad literatura	Sensible
	SPCON	Parámetro para la máxima cantidad de sedimentos transportados	No	A definir
	SPEXP	Exponente para el cálculo de los sedimentos transportados	Si, para calidad	Si
	CH_COV	Factor de cobertura del canal	No,	A definir
	CH_EROD	Escalamiento de erosión en el canal	No	A definir
Sedimentos y nutrientes desde el terreno	USLE_K	Factores de erodabilidad del suelo, de cobertura y manejo del suelo, factor de practicas	No	A definir
	USLE_C		No	A definir
	USLE_P		Si	Si
	LAT_SED	Concentración de sedimentos en flujo lateral y de agua subterránea		
	SLSOIL	Longitud de la pendiente para el flujo subsuperficial lateral		
	HRU_SLP	Pendiente promedio de cada HRU	Si	Si
	SLSUBBSN	Longitud promedio de la pendiente	No muy sensible	A definir
	RCN	Concentración de nitrógeno en la lluvia		
	UPN	Absorción de nitrógeno por las plantas		
	GWNO3	Nitratos iniciales en acuífero	No	A definir
	ERORGN	Relación de Nitrógeno erodado		
	NPERCO	Coefficiente de percolación de nitrógeno		
	SOL_ORGN	Concentración de Nitrógeno orgánico inicial en la capa superficial de suelo	Si	A definir
	SOL_ORGP	Concentración de Fosforo orgánico inicial en la capa superficial de suelo	Si	A definir
	PSP	Índice de disponibilidad de fosforo		
	PHOSKD	Coefficiente de partículas de fósforo		
	PPERCO	Coefficiente de percolación de fosforo		
	GWSOLP	Concentración de fosforo en el agua subterránea		
ERORGP	Relación de Fosforo erodado			

## 2.5 DESCRIPCIÓN DE LA TRANSFORMACIÓN DE LA INFORMACIÓN DE SUELOS A LOS PARÁMETROS QUE REQUIERE SWAT

La identificación de las propiedades de los suelos y su influencia sobre el ciclo del agua, sedimentos y nutrientes es indispensable para el acorde modelado de estos ciclos con el aplicativo SWAT. En consecuencia, se ajustó la información de los estudios de suelos a las características de los suelos requeridos por el aplicativo SWAT, que se listan en la Tabla 2-5. A continuación, se explica cómo se hizo el traspaso de la información contenida en los estudios generales.

**Tabla 2-5. Información de suelo requeridos por el aplicativo SWAT**

Variable	Convención	Requerimiento
Nombre suelo	SNAM	Obligatorio
Numero de capas de suelo	NLAYERS	Obligatorio
Grupo hidrológico del suelo	HYDGRP	Obligatorio
Profundidad máxima de raíces	SOL_ZMX	Obligatorio
Fracción de porosidad	ANION_EXCL	Opcional
Grieta potencial del suelo	SOL_CRK	Opcional
Textura del perfil del suelo	TEXTURE	Obligatorio
Profundidad de la capa suelo	SOL_Z	Obligatorio
Densidad aparente húmedo	SOL_BD	Obligatorio
Capacidad de agua disponible de la capa de suelo	SOL_AWC	Obligatorio
Conductividad hidráulica saturada	SOL_K	Obligatorio
Contenido de carbono orgánico	SOL_CBN	Obligatorio
Contenido de arcillas	CLAY	Obligatorio
Contenido de limos	SILT	Obligatorio
Contenido de arenas	SAND	Obligatorio
Contenido de roca fragmentada	ROCK	Obligatorio
Albedo de suelo húmedo	SOL_ALB	Obligatorio



Factor k de la ecuación de erosionabilidad de la USLE	USLE_K	Obligatorio
Conductividad eléctrica	SOL_EC	Opcional
Porcentaje de carbonato de Calcio en el suelo.	SOL_CAL	Opcional
pH del suelo	SOL_PH	Opcional

### Nombre suelo

Para este campo se definió el nombre de la unidad cartográfica de suelo (UCS) presente en los estudios del IGAC como nombre del suelo a utilizar por SWAT. Se analizó el perfil de suelo que mayor porcentaje presentara para la unidad analizada. Esto de acuerdo con los criterios expuestos por INFOCOL LTDA (2016).

### Número de capas de suelo

Esta característica se encuentra listada tanto en la descripción de los perfiles como en las tablas anexas. En algunos casos se indica en los estudios que la última capa de suelo corresponde a roca, en cuyo caso y siguiendo las indicaciones de Arnold, y otros (2012), se obvia esta capa de los estudios de suelos.

### Grupo hidrológico del suelo

De acuerdo con Arnold, y otros (2012), los suelos se clasifican en cuatro grupos como se describe a continuación:

- Grupo A: Suelos conformados por grava y arena que se caracterizan por tener altas tasa de infiltración, lo cual se traduce a bajos potenciales de escurrimiento.
- Grupo B: Suelos con textura fina en transición a moderadamente gruesa (rugosa), se caracterizan por ser suelos moderadamente bien drenados, generando buenas tasas de infiltración y bajos índices de escurriendo.
- Grupo C: Suelos caracterizados por tener una tasa lenta de infiltración al estar saturados, generando un incremento en el escurrimiento
- Grupo D: Suelos conformados por arcillas expansibles, dónde las tasas de infiltración son bajas causando altos índices de escurrimiento.

Asimismo, dan los siguientes criterios para clasificar los suelos:

- Grupo A si Arena > 86 %
- Grupo B si Arena > 50 % y arcilla < 35 %
- Grupo C si Arcilla > 28 % y arena < 44 %
- Grupo D si Arcilla > 50 %

Tomando en cuenta la granulometría de la primera capa que se encuentra en las tablas anexas a los perfiles de suelo, los criterios mencionados y la descripción de los perfiles de los estudios de suelos, se clasificó cada perfil en un grupo hidrológico.

Para zonas urbanas, considerando que son zonas casi impermeables o con un alto grado de escurrimiento, se asignó las unidades identificadas con zona urbana al suelo tipo D. Esto es contrastado por la base de datos del aplicativo SWAT, con la cobertura correspondiente al lugar geográfico; si esta cobertura corresponde a zona urbana, asigna parámetros que representan zonas impermeables.

### **Profundidad máxima de raíces**

En la descripción de cada capa de los estudios de suelos se encontró que existían donde se indicaba la no presencia de raíces. En consecuencia, se asignó como valor a la profundidad máxima de raíces la profundidad del límite superior de aquel intervalo en el que se indicaba es ausencia de raíces.

### **Fracción de porosidad**

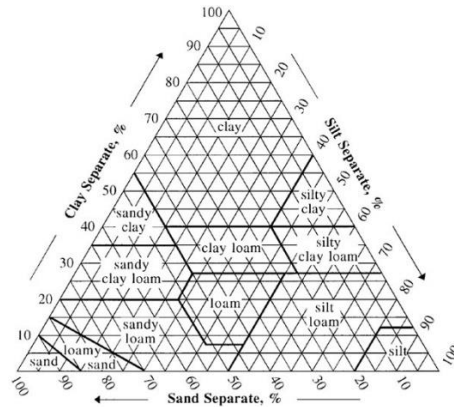
La fracción de porosidad del suelo es un parámetro que no se encontró en los estudios de suelos. No obstante, es un parámetro opcional (Arnold, y otros, 2012) y se aconseja que el modelo asigne por defecto un valor de 0.5 en los casos en los que no se cuenta información.

### **Grieta potencial del suelo**

De acuerdo con Arnold, y otros (2012), es un parámetro opcional para mejorar ciertas estimaciones en suelos vertisoles. En los estudios de suelos no se encontró esta propiedad que se expresa como fracción total del volumen del suelo.

### **Textura de cada capa de suelo**

De acuerdo con Arnold, y otros (2012), es un parámetro opcional y se puede dejar en blanco porque no es procesada por el modelo. Sin embargo, en la reclasificación se colocó la textura también para hallar otras propiedades asociadas a la clase textural, cuando esas propiedades no se encontraron en los estudios de suelos. En las descripciones de los perfiles de los estudios de suelos, se encontró la textura de cada capa y en algunos casos se encontró los porcentajes granulométricos en las tablas anexas a los estudios. En la Figura 2-3 se puede ver en triángulo textural del departamento de agricultura de los Estados Unidos, que es también utilizado internacionalmente por la FAO para definir la textura en función de los porcentajes de la granulometría.



**Figura 2-3. Triangulo textural de la USDA. Fuente: United States Department of Agriculture**

### Profundidad de la capa suelo

Parámetro obligatorio para el aplicativo SWAT, que se encontró en la descripción de los perfiles.

### Densidad aparente húmedo

Es un parámetro obligatorio para el aplicativo SWAT. En algunos casos se encontró en las tablas físicas anexas a los estudios, en otros se debió acudir a la siguiente tabla propuesta por el departamento de agricultura de Estados Unidos (United States Department of Agriculture). La Tabla 2-6 muestra la densidad aparente con relación al contenido de arcillas del suelo.

**Tabla 2-6. Densidad aparente en relación con el contenido de arcillas. Fuente: USDA**

Porcentaje de arcillas	Densidad aparente
0 – 20	1.6
20 – 30	1.55
30 – 40	1.5
40 – 50	1.45
50 – 60	1.4

### Capacidad de agua disponible de la capa de suelo

Esta propiedad es obligatoria para el aplicativo SWAT. Se calculó como la resta de la capacidad de campo (CC) y el punto de marchites permanente (PMP), porque no se encontró su valor dentro de los estudios de suelos. Las dos propiedades mencionadas se determinaron con base en la granulometría usando las ecuaciones de Bodman y Mahmud para la CC (Bodman & Mahmud), y la ecuación de Maximov para el PMP (INFOCOL LTDA., 2016).

$$CC\% = 0.023 * \%Arena + 0.25 * \%Limo + 0.61 * \%Arcilla$$

$$PMP\% = 0.001 * \%Arena + 0.12 * \%Limo + 0.57 * \%Arcilla$$

### **Conductividad hidráulica saturada**

Es un parámetro obligatorio de gran importancia para el modelo (Arnold, y otros, 2012). Los estudios de suelos no contienen el valor de esta propiedad por lo que, se calculó a partir de los datos granulométricos y de las texturas. Esto se hizo a partir de la propuesta hecha por Gabriels, Lobo, & Pulido (2011).

### **Contenido de carbono orgánico**

El contenido de carbono orgánico es requerido para la simulación del ciclo del carbono, pero no es indispensable para el funcionamiento del modelo (Arnold, y otros, 2012). Esta propiedad se encontró en las tablas anexas a algunos de los estudios de suelos.

### **Contenido de arcillas**

Esta propiedad es requerida por el aplicativo SWAT y se encontró en algunas de las tablas anexas a los estudios de suelos. En algunos casos no se encontró el porcentaje de arcillas, pero si la clase textural en la descripción del perfil. Con base en la clase textural indicada en esa descripción, se determinó el porcentaje de arcilla del punto medio de la clase textural (ver Figura 2-3) y se asignó este valor como el contenido de arcillas.

### **Contenido de limos**

Esta propiedad es requerida por el aplicativo SWAT y se encontró en algunas de las tablas anexas a los estudios de suelos. En algunos casos no se encontró el porcentaje de limos, pero si la clase textural en la descripción del perfil. Con base en la clase textural indicada en esa descripción, se determinó el porcentaje de arcilla del punto medio de la clase textural (ver Figura 2-3) y se asignó este valor como el contenido de limos.

### **Contenido de arenas**

Esta propiedad es requerida por el aplicativo SWAT y se encontró en algunas de las tablas anexas a los estudios de suelos. En algunos casos no se encontró el porcentaje de arenas, pero si la clase textural en la descripción del perfil. Con base en la clase textural indicada en esa descripción, se determinó el porcentaje de arcilla del punto medio de la clase textural (ver Figura 2-3) y se asignó este valor como el contenido de arenas.

### **Contenido de roca fragmentada**

Esta propiedad es requerida por el aplicativo SWAT y se encontró en algunas de las tablas anexas a los estudios de suelos o en la descripción del perfil. En algunos casos

no se encontró el valor y con base en la descripción del perfil se decidió asignar un porcentaje de 0% en aquellos casos en los que se indicaba la no presencia de rocas o gravilla.

### Albedo de suelo húmedo

Esta es una propiedad obligatoria para el aplicativo SWAT que se asignó dependiendo de la clasificación del sistema de color Munsell (Munsell Color, s.f.) que se encontró en la descripción de los perfiles de los estudios de suelo. Este sistema de clasificación de color se reparte en tres dimensiones denominadas: matiz (hue en inglés), color y chroma. De acuerdo con Post, y otros (2000), el albedo del suelo tiene una correlación alta con el color Munsell ( $r^2=0.93$ ), en el rango de onda de 0.3 a 2.8  $\mu\text{m}$ , a través de la siguiente ecuación:

$$\text{SolAlb} = 0.069 * (\text{valor de color Munsell}) - 0.114$$

No existe correlación con respecto al matiz y al chroma (Post, y otros, 2000).

### Factor k de la ecuación de erosionabilidad de la USLE

Este es un parámetro obligatorio para el funcionamiento del modelo y es una propiedad que no se encuentra en los estudios de suelos. Este parámetro se debió determinar de acuerdo con la ecuación reducida de Wisheimer (Díaz Henández, 2007).

$$k = 2.71 * 10^{-6} * M^{1.14} * (12 - a)$$

Donde:

- K es el factor de erosionabilidad del suelo
- M es el factor de textura, que corresponde al producto de X y Y, donde cada uno corresponde a:
  - X es el porcentaje de partículas de suelo comprendidas entre 0,002 y 0,1 mm (limos y arenas muy finas)
  - Y es el porcentaje de partículas comprendidas entre 0,002 y 2 mm
  - Para determinar esos factores, se tuvo en cuenta la granulometría presentada en los estudios de suelos
- $a$  es el porcentaje de materia orgánica que se encontraron en algunos de los estudios de suelos.

### Conductividad eléctrica

No es un parámetro indispensable para el funcionamiento del aplicativo. De acuerdo con Arnold, y otros (2012) no está actualmente activo. Por tal razón no se tuvo en cuenta.

### Porcentaje de carbonato de Calcio en el suelo



No es un parámetro indispensable para el funcionamiento del aplicativo. De acuerdo con Arnold, y otros (2012) no esta actualmente activo. Por tal razón no se tuvo en cuenta.

### **pH del suelo**

No es un parámetro indispensable para el funcionamiento del aplicativo. De acuerdo con Arnold, y otros (2012) no esta actualmente activo. Por tal razón no se tuvo en cuenta.

### **Propiedades para los polígonos asociados a zonas mineras y cuerpos de agua**

El aplicativo ArcSWAT requiere tener valores para las propiedades de los suelos, incluso en aquellos polígonos donde se encuentran cuerpos de agua o zonas mineras. Es claro que en esas ubicaciones no se encuentran suelos pero el aplicativo trae por defecto en su base de datos ciertas propiedades que no son tenidas en cuenta cuando, al superponer la capa de coberturas y de suelos, se presentan las dos coberturas mencionadas. En consecuencia, en los archivos de reclasificación de suelos se creo un tipo de suelo "virtual" para las dos coberturas, y se copiaron los valores de las propiedades contenidas en la base de datos original de SWAT.

Los archivos shapefiles de suelos se pasaron a formato raster utilizando como base el DEM de 12.5 m de ALOS PALSAR. Esto es necesario para utilizar el aplicativo ArcSWAT y montar los modelos.

### **2.5.1 Transformación de la información de suelos para la cuenca del río Cesar**

Se realizó la reclasificación de la información contenida en los estudios generales de suelos de los departamentos de Magdalena, Cesar y La guajira. Asimismo, se consultaron los estudios de suelos detallados que se listan a continuación:

- Estudios de suelos para catastro municipio de Valledupar: departamento del Cesar
- Estudios de suelos para catastro municipio de Codazzi: departamento del Cesar
- Estudio semidetallado de suelos para catastro: municipio de Chiriguáná Cesar
- Estudio semidetallado y general de suelos municipio de La Gloria: departamento del Cesar
- Estudio de suelos para catastro municipios de Chiriguáná y Curumaní cordillera Departamento del Cesar
- Estudios de suelos para catastro municipio de Chimichagua: departamento de Cesar
- Estudio general de suelos de los municipios de Curumaní, Chimichagua, Chiriguáná y La Jagua de Ibirico. Departamento del Cesar
- Estudio semidetallado de suelos para fines agrícolas, de los municipios de El Banco y Guamal

Los mapas de estos estudios de zonas detalladas, no se encuentran digitalizados, lo que no permite su inclusión espacial dentro de la capa vectorial de suelos ingresada al aplicativo SWAT. Sin embargo, su información sí se tuvo en cuenta para complementar o verificar la información contenida en los perfiles del estudio de suelos del departamento del Cesar y Magdalena.

## 2.5.2 Información de suelos para la cuenca del río San Jorge hasta el caño Seheve y La Vieja

Para la cuenca del río San Jorge hasta el caño Seheve y la cuenca del río la Vieja, se identificaron 67 y 79 perfiles diferentes respectivamente.

## 2.6 DEFINICIÓN DE LAS SUBCUENCAS EN LOS MODELOS

Para la definición y delimitación de las subcuencas representadas en el aplicativo SWAT, se tuvo en cuenta varios criterios. Estos se establecen como delimitaciones o puntos de control que subdividen el dominio en subcuencas. Los criterios son:

- Delimitación de subcuencas siguiendo la información topográfica representada en los DEMs ALOS PALSAR de 12.5m de resolución, y de la red de drenaje de la cartografía hídrica 1:25000 del IGAC.
- Definir las subcuencas a un tamaño cercano a 100 km<sup>2</sup> debido a que la separación de la lluvia en escorrentía e infiltración se basa en el concepto de número de curva del servicio de conservación de suelos de los Estados Unidos (Arnold, y otros, 2012). Esa conceptualización tiene como suposición, que la lluvia no cambia dentro de cuencas de tamaño grande, es decir aquellas con área entre 10 y 1000 km<sup>2</sup> (Chow, Maidment, & Mays, 1988).
- Localización de las estaciones de caudal.
- Representación de zonas homogéneas basados en cubiertas, suelos y pendiente del terreno. Esto se usó para garantizar una adecuada representación de los procesos hidrológicos que se dan en el terreno.
- Subdivisión del territorio a través del mapa de sistemas morfogénicos del territorio colombiano (IDEAM, 2010). El cual permitió subdividir las subcuencas delimitadas con los anteriores criterios, en subcuencas más pequeñas y que presentaran comportamientos hidrológicos homogéneos. Por ejemplo, subdividir una subcuenca en dos, una para zona montañosa y otra para planicie. Estos sistemas también se encuentran representados en los POMCAS formulados en algunas subzonas hidrográficas.
- Afluentes a las ciénagas que tengan un área superior a 50 km<sup>2</sup>. La razón de este criterio se basa en que el aporte de caudal y de nutrientes hacia las ciénagas debe ser significativo para producir cambios físicos, químicos o biológicos.
  - Tomando en cuenta un rendimiento hídrico como el promedio del territorio colombiano que es de 56 l/s/km<sup>2</sup> (IDEAM, 2019), se tendría un aporte de 2.8 m<sup>3</sup>/s para cuencas de 50 km<sup>2</sup>. Teniendo en cuenta que un hidrosistema como la ciénaga de Saloa tiene una extensión aproximada de 19.6 km<sup>2</sup>, y una variación de 3 m aproximadamente un tiempo de 3 meses (periodo de tiempo donde se dan grandes cambios), el caudal

de esta variación sería de aproximadamente 7.8 m<sup>3</sup>/s. Comparando los dos caudales, se puede decir que el producido por una cuenca de 50 km<sup>2</sup> puede llegar a representar cambios volumétricos en ese cuerpo de agua, por tanto amerita ser modelado hidrológicamente para estudiar su efecto en la ciénaga.

- Asimismo, un área de 50km<sup>2</sup> equivale al 0.2 % del área de la cuenca río Cesar y a 0.7 % de la cuenca del río San Jorge hasta el caño Seheve.
- Las cuencas de menor tamaño también se modelarán hidrológicamente para estudiar efectos locales en conjunto con la hidrodinámica del sistema, pero tendrán un tratamiento diferencial como fue acordado.
- Subdivisión del territorio a través de las subzonas hidrográficas del país (IDEAM, 2013), sobre las cuales se ha hecho un mapeo de la oferta, demanda, calidad entre otras temáticas. Los puntos de control asociados a esta subdivisión se agregan con el principal objetivo de ingresar la demanda hídrica o extracciones de agua desde los cauces.

### 3. MODELO PILOTO CUENCA DEL RÍO CESAR

#### 3.1 MODELO CONCEPTUAL HIDROLÓGICO

En este capítulo se presenta el modelo conceptual del hidrosistema. Esto incluye representación de los procesos físicos, tensionantes y limitantes, identificación de la influencia de servicios ecosistémicos en la agrupación de zonas de respuesta hidrológica homogéneas (HRU, por sus siglas en inglés).

A continuación se mencionan los procesos físicos y químicos que interactúan en la cuenca desde la temática de la hidrología, hidráulica. Esto incluye la interacción entre los procesos, flujos, retroalimentaciones y almacenamientos dentro del sistema.

Se considera la influencia e interacciones que puede llegar a tener sustancias químicas, la biota y la humanidad sobre el ciclo hidrológico **Fuente especificada no válida..** Las extracciones para industria y sobre todo para irrigación alteran en gran medida el ciclo hidrológico, y por tanto es importante incluirlas en un modelo conceptual del sistema ecohidrológico a modelar. En la Figura 3-1 se muestra esquemáticamente estas interacciones.

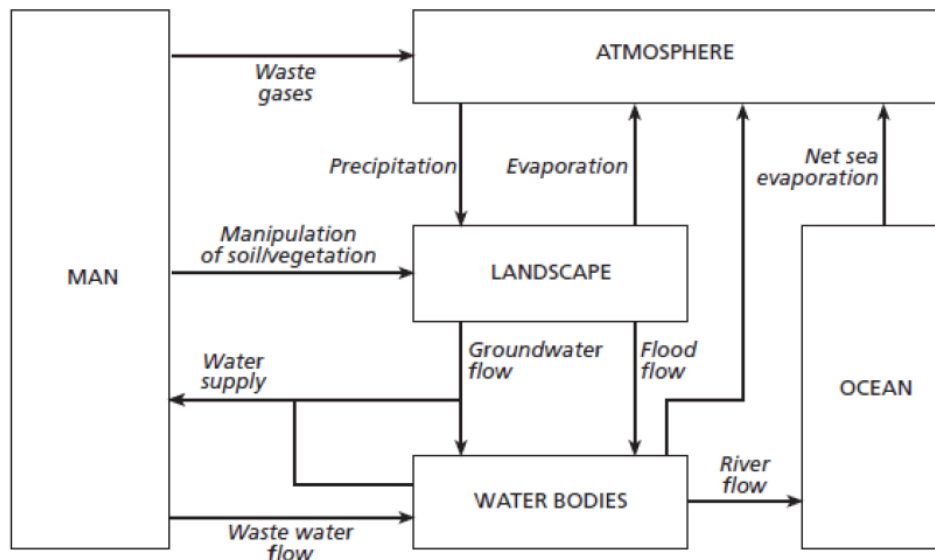


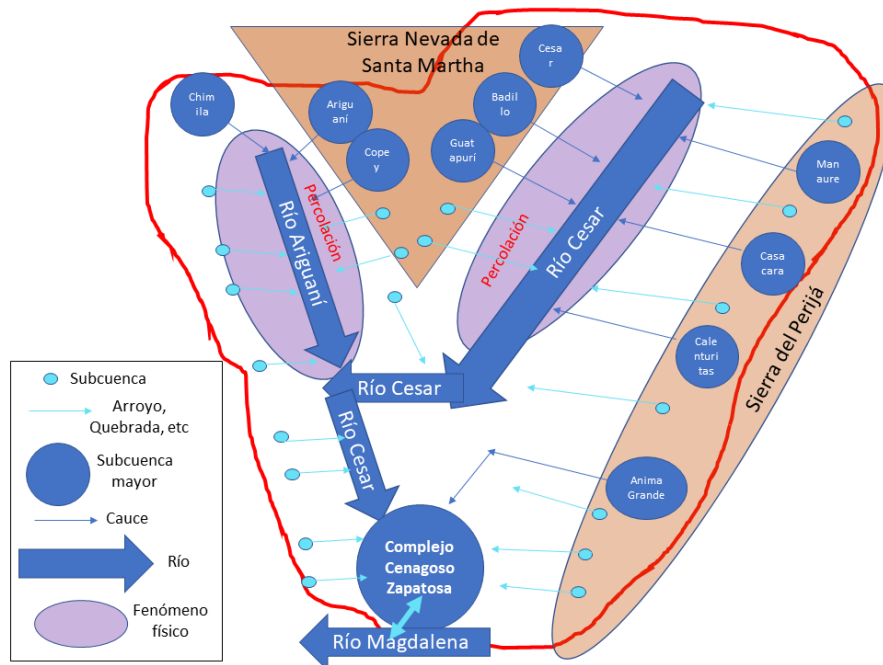
Figura 3-1. Alteraciones e interacciones en el ciclo hidrológico. Fuente Falkenmark & Rockström (2004)

Para las tres ventanas del proyecto se establece que se modele la cantidad de agua que llega a las regiones donde los flujos de agua y nutrientes dependen de la hidrodinámica del agua. Es decir, existen regiones del espacio donde para representar correctamente los movimientos del agua, se debe conceptualizar a través de las ecuaciones diferenciales parciales de advección-difusión.

El agua en su paso por la superficie y la subsuperficie arrastra sedimentos y nutrientes que se transportan a través de la red de drenaje. Estas sustancias transportadas se depositan y son aprovechadas por diferentes organismos que las retornan en muchos casos transformadas para que sean nuevamente trasladadas o usadas por otros organismos.

Los ciclos relevantes para los objetivos del PMEHA adicional al ciclo del agua, están el del Carbono, el Nitrógeno, el Fósforo y el del Oxígeno, debido a que influyen sobre la disponibilidad de nutrientes para la biota y que su acumulación excesiva o escasez puede traer consecuencias sobre la biodiversidad. En consecuencia, se incluye su conceptualización, estudio de sus flujos y concentraciones en el hidrosistema de estudio.

La Figura 3-2 muestra la conceptualización espacial de los cuerpos de agua en la cuenca del río Cesar. Asimismo, muestra la ubicación esquemática de la orografía de la cuenca cuyos rasgos principales son la sierra nevada de santa marta y la serranía del Perijá. Allí se indica como los ríos Cesar, Badillo, Guatapurí, Araguaní y Copey, nacen y drenan subcuencas que se encuentra en la sierra nevada, pero que drenan hacia los ríos que se encuentran en la planicie como lo son el río Cesar y el río Ariguaní. Con respecto a la serranía del Perijá, se resaltan los ríos Manaure, Casacará, Calenturitas y Animagrande, que drenan hacia el río Cesar en su planicie en cuenca media. Se incluyen esquemáticamente otras cuencas de ríos de menor tamaño que drenan hacia los ríos de planicie mencionados o directamente hacia el complejo cenagoso ciénaga de Zapatosa. Como fenómenos físicos a resaltar, se encuentra la percolación del agua hacia acuíferos profundos documentada para los valles del río Cesar y Ariguaní; además de la interacción que hay entre la ciénaga de Zapatosa y el río Magdalena. A estos fenómenos físicos se suman: la interceptación, la infiltración, la escorrentía superficial y subsuperficial, entre otros.



**Figura 3-2. Esquema del modelo conceptual espacial de los cuerpos de agua en la cuenca del río Cesar**

### 3.2 CONFIGURACIÓN DEL MODELO EN EL APLICATIVO SWAT

Este esquema se transforma dentro del aplicativo SWAT en subcuencas representadas como puntos, subdivididos internamente como HRUs, que tienen un canal al interior donde se transita el agua y conecta con otros canales que se encuentran en otras subcuencas. Esto se repite hasta la salida de la cuenca

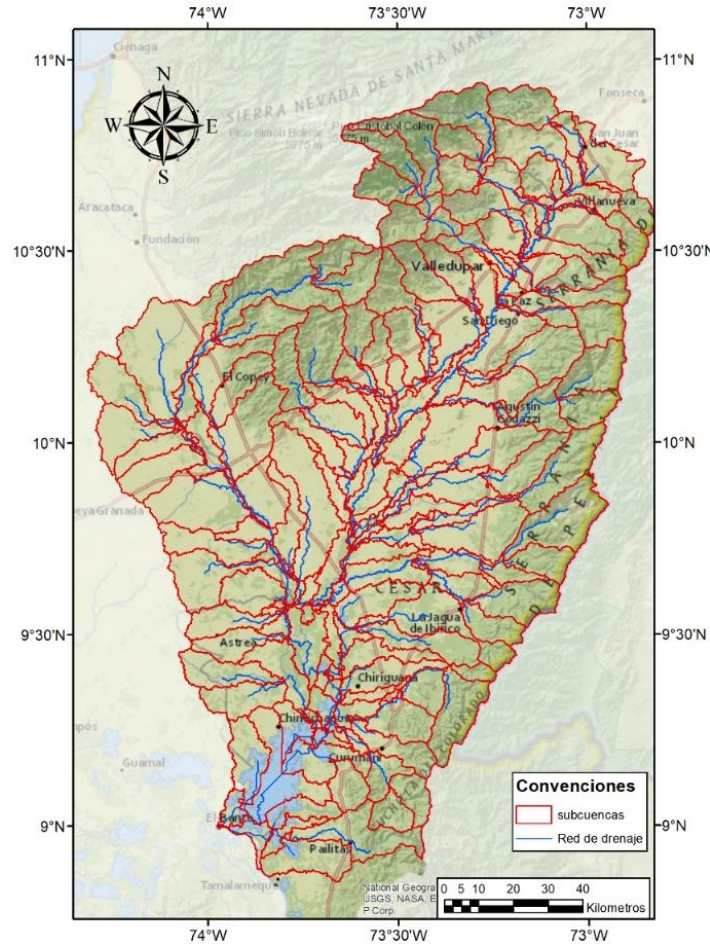
Para la definición y delimitación de las subcuencas representadas en el aplicativo SWAT, se tomaron en cuenta varios criterios, los cuales se convierten en delimitaciones o puntos de control que subdividen el dominio en subcuencas. Los criterios son:

- Delimitación de subcuencas siguiendo la topografía de la zona, para lo cual se empleó el DEMs ALOS PALSAR de 12.5m de resolución, y de la red de drenaje de la cartografía hídrica 1:25000 del IGAC.
- Area media de las subcuencas 100 km<sup>2</sup>.
- Las estaciones de caudal son puntos de control
- Zonas homogéneas de cuberturas,
- Zonas homogéneas de suelos
- Zonas homogéneas de pendiente del terreno.
- Características morfogenéticas del territorio para lo cual se empleó el mapa morfogenético colombiano (IDEAM, 2010).
- Se delimitaron cuencas afluentes a la ciénaga de Zapatosa con áreas mayores a 50 km<sup>2</sup>.
- Se incluyeron las subzonas hidrográficas del país (IDEAM, 2013),





En la Figura 3-3 se puede ver la distribución de las subcuencas representadas en el aplicativo SWAT para la cuenca del río Cesar al aplicar los criterios mencionados anteriormente. Se delimitaron 182 subcuencas con un promedio de área de 122.64 km<sup>2</sup> y que en un 75% (tercer cuartil), tienen un área menor a 184.53 km<sup>2</sup>. El área de la cuenca es de 22321.54 km<sup>2</sup>.



**Figura 3-3 Distribución de la subcuencas y canales representados en el aplicativo SWAT**

se agregaron las posiciones de las bocatomas y vertimientos encontrados en los POMCAs. Los POMCAs consultados fueron:

- Cuenca del río Cesar:
  - POMCA del río Manaure. Documento de caracterización biofísica
    - Tabla 2-119 Caudales concesionados por las corporaciones autónomas regionales, asignados a los distintos tipos de uso del suelo.
    - Tabla 2-120 Caudales concesionados a los acueductos de las cabeceras municipales ubicadas dentro de la cuenca
  - POMCA del río Calenturitas



- Documento fase de diagnóstico Tabla 3.117 Demanda total por subcuencas
  - POMCA del río Magiriaimo
    - Documento Fase de diagnóstico. Componente biofísico. Tabla 8.65. Demanda hídrica total
  - POMCA del río Casacará
    - Tabla 57. Distribución de la demanda en las microcuencas del río Casacará.
  - POMCA del río Guatapurí. Documento caracterización del medio biofísico
    - Tabla 3.211. Estructuras hidráulicas en la cuenca en ordenación.
  - POMCA del bajo río Cesar - ciénaga de Zapatosa
    - Documento final de fase de aprestamiento Tabla 6.15. Indicadores de cabeceras municipales.

La asignación de estos puntos de control para subdividir las subcuencas se realizó mediante la comparación de la posición de la bocatoma o vertimiento y la subdivisión previa de subcuencas. Es decir, si una estructura se encontraba a la salida de una subcuenca no se adicionó un nuevo punto de control. Por el contrario, si la estructura se encuentra en la mitad del cauce de una subcuenca, se adicionó un nuevo punto de control para subdividir la subcuenca en dos y poder obtener información simulada en el punto de la bocatoma o vertimiento.

### 3.3 DEMANDA HÍDRICA CONSOLIDADA EN LOS POMCAS

Se crearon y asignaron las demandas de agua establecidas en los POMCAs consultados. Los valores se encontraron por cuenca o subcuenca y fueron asignados a un shapefile con puntos al final de cada cauce referenciado en el POMCA. La posición geográfica del punto se cruzó con las subcuencas definidas en el aplicativo SWAT (donde cada una tiene asignada un cauce), y posteriormente se asignó la demanda a cada subcuenca del aplicativo. La Tabla 3-1 contienen las demandas consolidadas reportados en los POMCAs de la cuenca y en la Tabla 3-2 se puede ver la correspondencia con la subcuenca numerada dentro del aplicativo.

**Tabla 3-1. Demandas hídricas consolidadas en los POMCAs, de la cuenca del río Cesar**

ENA 2018		ENA 2008			Demanda Rio POMCA	
SUB-CUENCA	Demanda (millones m3)	DET	Municipios	Demanda Mm <sup>3</sup> (año medio)	Rio	Demanda (m3/s)
2802-Medio Cesar	615.09	Cesar	VALLEDUPAR	512.49	Calenturitas	5.43
		Cesar	PUEBLO BELLO	1.72		
		Cesar	LA PAZ	61.78	Casacara	0.99
		Cesar	MANAURE	16.87		



ENA 2018		ENA 2008			Demanda Rio POMCA	
SUB-CUENCA	Demanda (millones m3)	DET	Municipios	Demanda Mm <sup>3</sup> (año medio)	Rio	Demanda (m3/s)
		Cesar	EL COPEY	67.21	Cesar	2.08
		Cesar	SAN DIEGO	244.01		
		Cesar	AGUSTIN CODAZZI	8.78	Chiriaimo	1.45
		Cesar	BECERRIL	2.26		
		Cesar	EL PASO	72.55	Magiriaimo	1.58
		Cesar	LA JAGUA DE IBIRICO	2.7		
		La Guajira	URUMITA	45.27	Manaure	1.33
		La Guajira	LA JAGUA DEL PILAR	0.36	Mocho	2.14

Tabla 3-2. Demandas asignadas a las subcuencas de SWAT, caso cuenca del río Cesar

Subcuenca SWAT	Demanda (m3/s)	Demanda (m3/día/10000)	Justificación
28	6.18	53.4	POMCA Rio Guatapuri
38	1.33	11.5	POMCA Rio Manaure
40	2.77	23.9	ENA2018 Alto Cesar
42	2.14	18.5	POMCA Rio Mocho
46	1.44	12.5	POMCA Rio Chiriaimo
71	1.58	13.7	POMCA Rio Magiriaimo
96	0.99	8.6	POMCA Casacara
123	19.5	168.48	ENA2018 Medio Cesar
126	5.43	46.9	POMCA Rio Calenturitas
132	9.24	79.8	ENA2018 Rio Ariguani

### 3.4 CALIBRACION DEL MODELO HIDROLÓGICO CUENCA RIO CESAR

Se describe en esta sección el procedimiento empleado para el ajuste de los parámetros que controlan los procesos configurados en el modelo. Se empieza en cada sección haciendo referencia a la calibración para la cantidad de agua y posteriormente los que controlan la producción y el transporte de sedimentos.

#### 3.4.1 series historicas para calibracio y validación

Para el ajuste de los parámetros del modelo, además de los caudales, se consideran los estimados de transporte y concentración de sedimentos. En la Tabla 3-3 se pueden ver las estaciones disponibles, cuyos datos fueron agregados a

escala mensual, anual y anual multianual con el propósito de contrastar las simulaciones a diferentes escalas.

**Tabla 3-3. Estaciones de hidrológicas consideradas para en análisis de sedimentos**

CODIGO	CAT	NOMBRE	CORRIENTE	TRASPORTE	CONCENTRACIÓN
25027590	LM	CAIMANCITO	CESAR	SI	NO
28017080	LM	CORRAL DE PIEDRA	CESAR	SI	NO
28017050	LG	EL REPOSO	GUATAPURI	SI	SI
28027160	LM	ISLANDIA	CALENTURITAS	SI	NO
28037030	LG	PTE SALGUERO	CESAR	SI	NO
28037090	LM	PTE CANOAS	CESAR	SI	SI
28047010	LM	LA AURORA	ARIGUANI	SI	NO

### 3.4.2 Calibración modelo cantidad de agua

Para el ajuste de los parámetros asociados a la cantidad de agua, se definieron bloques de calibración que agrupan las subcuencas definidas dentro del aplicativo SWAT. Este tipo de agrupaciones está basado en metodologías de regionalización que se requieren porque no se cuenta con mediciones en todas las subcuencas para poder realizar una calibración individual (Beck, y otros, 2016). Se modifican los valores de los parámetros de forma relativa a través de un factor de calibración para así mantener la variabilidad espacial de los parámetros asignada al ingresa la información fisiográfica al modelo (suelos, coberturas, pendientes). Se asigna entonces un factor de calibración por cada bloque definido. Esto se basa en la metodología planteada por Francés, Vélez, & Vélez (2007).

Para la cuenca del río Cesar, se plantearon cinco bloques de calibración asociados a las estaciones de caudal disponibles y al mapa de sistemas morfológicos de Colombia (Figura 3-4). Se definió:

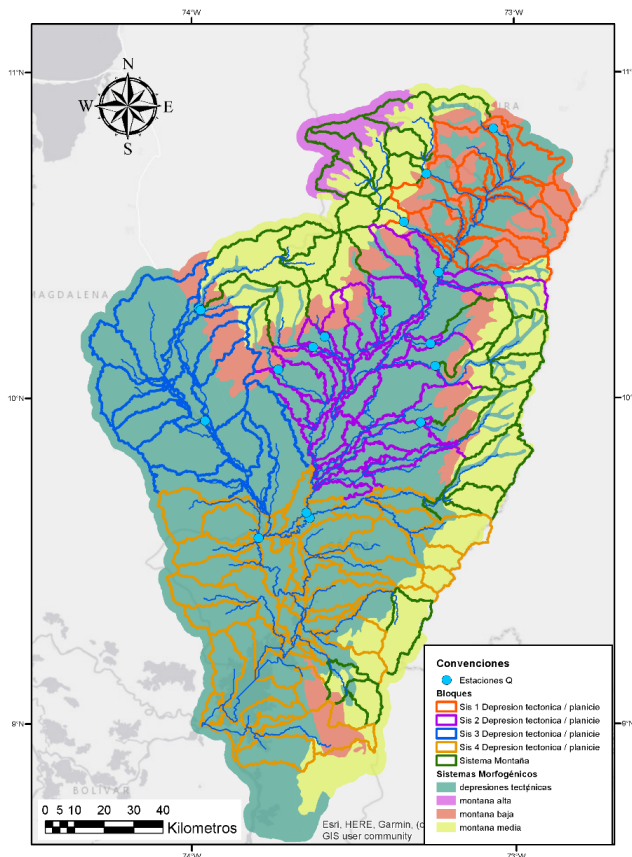
- un primer bloque para todas aquellas subcuencas que drenan montañas hasta estaciones de caudal (ver Figura 3-4); se utilizó como base el mapa de sistemas morfológicos para definir algunas subcuencas dentro de este primer bloque de montaña, así esas subcuencas no drenaran hacia estaciones de caudal que se encuentren bajando de eso sistemas montañosos.
- un segundo bloque para la planicie que drena hacia la estación PTE SALGUERO [28037030]
- un tercer bloque de subcuencas de planicie que drenan desde las montañas y las planicies del bloque 2 hasta la estación PTE CANOAS [28037090]
- un cuarto bloque de subcuencas de planicie que drenan desde las subcuencas del bloque 1 de montaña cubriendo las subcuencas del río Ariguani hasta la desembocadura de este río en el río Cesar; el comportamiento hidrológico de estas subcuencas se ven representadas por los registros de la estación PALMARIGUANI [28047050]



- un quinto bloque de subcuencas de planicie que drenan la parte baja del río Cesar, desde las subcuencas del bloque de montaña, desde las subcuencas del bloque 3 y 4, hasta las subcuencas de salida; el bloque incluye aquellas subcuencas que drenan hacia las estaciones ISLANDIA [28027160] y CAIMANCITO [25027590].

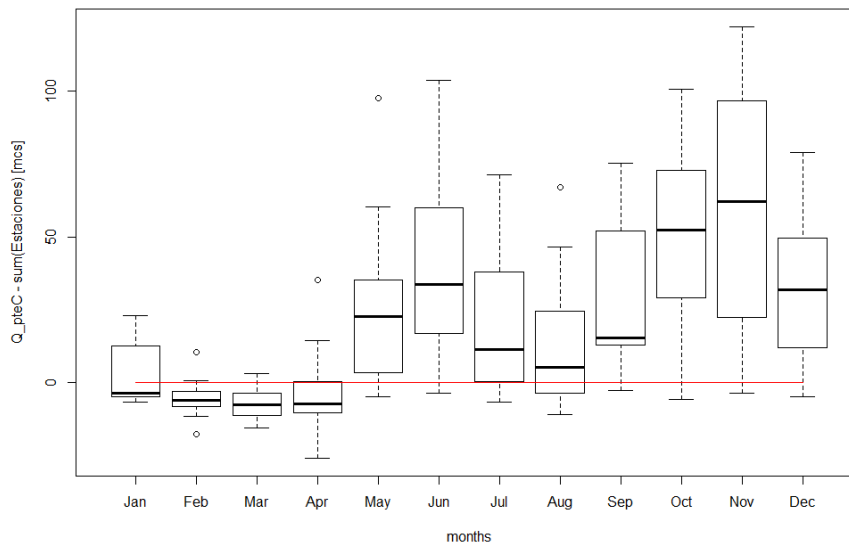
Para la calibración se definió el período de 1985-2002 con los años 1985 y 1986 para calentamiento del modelo, es decir período en el que el aplicativo computacional establezca las condiciones de los almacenamientos de agua dentro del modelo. Por lo que se tiene un período de 15 años (1987-2002) para realizar la calibración del modelo que garantiza la inclusión de variaciones intra anuales del ciclo hidrológico pero también las interanuales (por ejemplo, fenómenos de variabilidad climática como el fenómeno ENSO (Poveda, Waylen, & Pulwarty, 2006)).

El periodo 2003-2017 se empleará para el análisis de validación del modelo que brinda 14 años de datos que da robustez al análisis de las simulaciones de caudal y demás variables; además es un periodo reciente que busca representar las condiciones actuales del sistema.



**Figura 3-4. Bloques de subcuencas para calibración, cuenca del río Cesar**

La calibración del modelo se realizó analizando en primer lugar los resultados en la estación Puente Canoas [28037090] en comparación con las estaciones que drenan hacia ella. Se hizo un balance de masas sumando los registros de las estaciones 28047010, 28047040, 28037020, 28037040, 28037060, 28037130, 28027020, 28027030, 28027040, y restando ese valor de los registros de la estación Puente Canoas [28037090]. Dado que ésta última estación recoge el caudal de las cuencas aguas arriba, el caudal calculado en la estación Puente Canoas debe ser mayor a la suma de las demás estaciones. La Figura 3-5 muestra de forma mensual la variación de esa resta, donde se ve que en la mayoría de los meses efectivamente pasa un mayor caudal por Puente Canoas. Sin embargo, en algunos casos pasa un mayor caudal por las estaciones aguas arriba que por la estación Puente Canoas, lo que es un indicio de que en el transcurso de agua por los ríos el agua se infiltra en el terreno, puede evaporarse, entre otras.

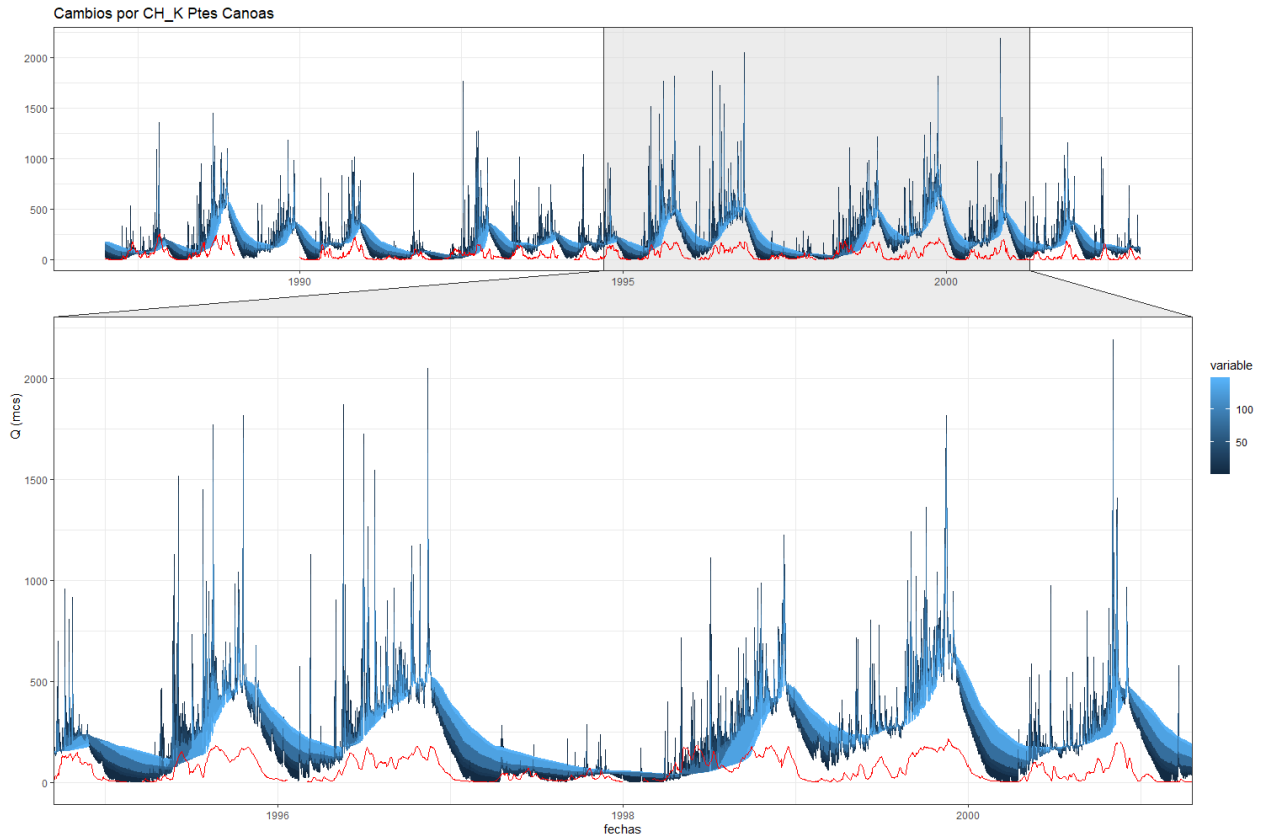


**Figura 3-5. Resta de caudales de Puente Canoas y la suma de las estaciones aguas arriba**

Con estos análisis se evidencia la necesidad de hacer énfasis en la variación de los parámetros que controlan los procesos de percolación y de flujo desde los acuíferos, así como el almacenamiento de agua en el suelo. Esto es soportado por lo reportado también en informes de estudios de recarga potencial realizados por el IDEAM y CorpoCesar en la región (IDEAM y CorpoCesar, 2006).

Además, se realizaron análisis de sensibilidad general de la afectación del cambio en los valores de los parámetros en las hidrógrafas simuladas. Se generaron graficas en varias estaciones y se detalló el comportamiento en la estación PTE CANOAS para ver más en detalle las consecuencias del cambio. Esto puede verse como ejemplo en la Figura 3-6 y Figura 3-7. El análisis de esta información permitió definir que los parámetros priorizados para calibrar, teniendo en cuenta la revisión bibliográfica precedente y los resultados de estos análisis de sensibilidad. Los parámetros se listan en la Tabla 3-4. También se detalla que parámetros se dejan

estáticos ya sea porque no demostraron cambiar en gran medida las simulaciones o porque su valor proviene de los insumos fisiográficos, es decir mediciones sobre el territorio que tienen baja incertidumbre.



**Figura 3-6. Cambios en la hidrógrafa simulada en la estación Pte Canoas debido al cambio en el parámetro CH\_K, caso río Cesar**



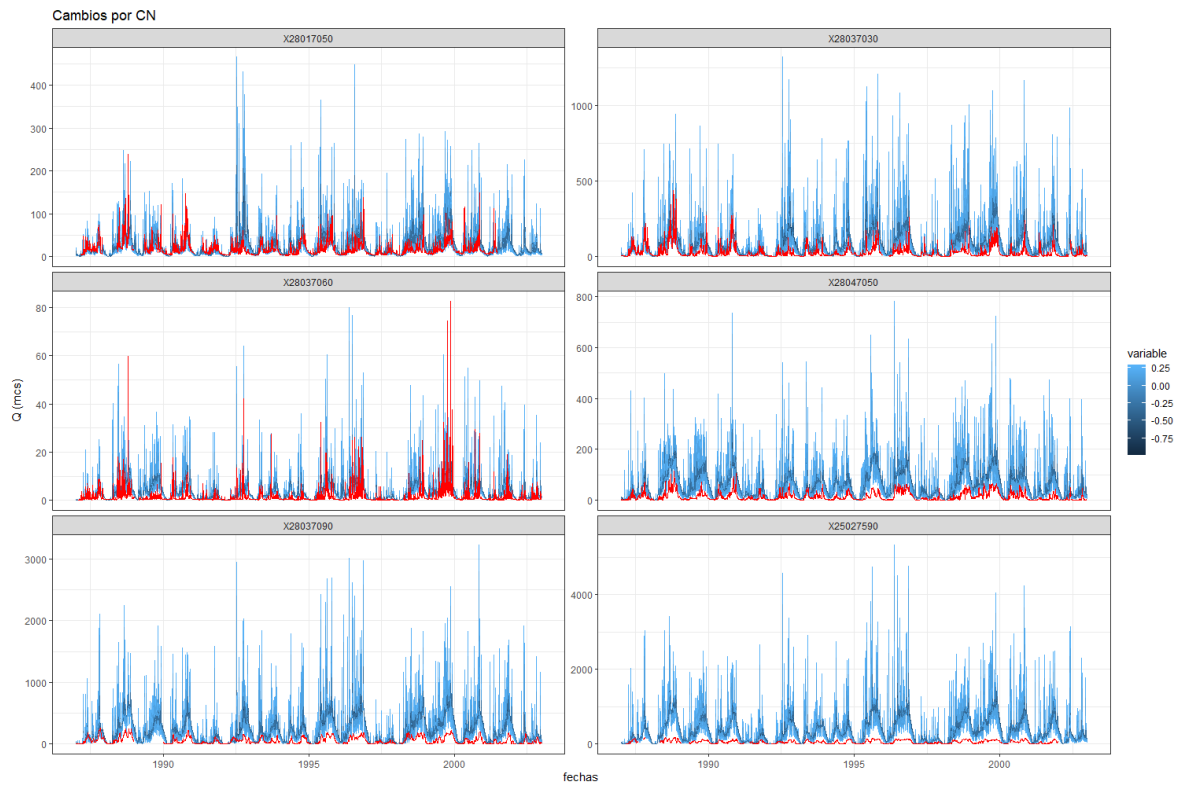


Figura 3-7. Cambios en las hidrógrafas en varias estaciones de la cuenca del río Cesar debidas al cambio en el valor del parámetro CN, caso río Cesar

Tabla 3-4. Parámetros priorizados por análisis de sensibilidad

Estático	Razón de no calibrar	Sensible y priorizado [Rango posible]	Efecto sobre las hidrógrafas
HRU_SLP ( $-\infty, \infty$ )	Este valor se determina por ArcSWAT a partir del modelo digital de elevación usado para toda la cuenca. Aunque este insumo proviene de datos de satélite, se reconoce que sigue los patrones del terreno y por tanto la pendiente calculada a partir de él es confiable. Por tanto, su valor no se modifica en el proceso de ajuste de parámetros	CN2 (-1, $\infty$ )	Con su reducción se reducen los picos de caudal en un porcentaje del 20% aproximadamente y aumento de la escorrentía subsuperficial que se evidencia en un incremento de la curva de recesión





Estático	Razón de no calibrar	Sensible y priorizado [Rango posible]	Efecto sobre las hidrógrafas
ESCO [0,1]	Este parámetro ajusta la evapotranspiración. Como esa variable depende de las coberturas, que fueron ingresadas al aplicativo ArcSWAT, se decide no ajustar dicho parámetro	RCHRG_DP [0,1]	Con su aumento se incrementa la parte final de la curva de recesión de caudales, no afecta los picos de caudal
SOL_ALB [0,1]	Esta es una propiedad que se reclasifico a partir de los estudios de suelos del IGAC. Por tanto, se decide no cambiar su valor.	SOL_AWC (-1,∞)	Su variación incrementa o disminuye los estimados de caudal tanto en picos como en las curvas de recesión
SOL_BD (0,∞)	Esta es una propiedad que se reclasifico a partir de los estudios de suelos del IGAC. Por tanto, se decide no cambiar su valor.	SOL_K (-1,∞)	Con su aumento se incrementa toda la curva de recesión de caudales, afecta los picos de caudal, pero no considerablemente
OV_N (0,0.4]	Como este parámetro depende de las coberturas, que fueron ingresadas al aplicativo ArcSWAT, se decide no ajustar dicho parámetro	GW_DELAY (-1,∞)	Con su aumento se mueve la curva de recesión hacia adelante, es decir la parte baja de la curva de recesión se demora más tiempo en bajar hacia valores de estiaje
GW_REVAP	Sobre este parámetro no se tiene información de su valor físico. Además, en los análisis de sensibilidad se encontró que no ejerce un gran cambio sobre las simulaciones. Por ende, se decide adoptar el valor por defecto.	CH_K [0,250]	Con su aumento se incrementa toda la curva de recesión de caudales, y afecta los picos de caudal considerablemente hacia su reducción
REVAPMN	Sobre este parámetro no se tiene información de su valor físico. Además, en los análisis de sensibilidad se encontró	ALPHA_BF [0,1]	Incrementa o reduce la velocidad de descenso de la curva de recesión, no afecta los picos de caudal



Estático	Razón de no calibrar	Sensible y priorizado [Rango posible]	Efecto sobre las hidrógrafas
	que no ejerce un gran cambio sobre las simulaciones. Por ende, se decide adoptar el valor por defecto.		
GWQMN	Sobre este parámetro no se tiene información de su valor físico. Además, en los análisis de sensibilidad se encontró que no ejerce un gran cambio sobre las simulaciones. Por ende, se decide adoptar el valor por defecto.		
CH_N	Sobre este parámetro no se tiene información de su valor físico. Además, en los análisis de sensibilidad se encontró que no ejerce un gran cambio sobre las simulaciones. Por ende, se decide adoptar el valor por defecto.		
SLSUBBSN	Este valor se determina por ArcSWAT a partir del modelo digital de elevación usado para toda la cuenca. Aunque este insumo proviene de datos de satélite, se reconoce que sigue los patrones del terreno y por tanto la pendiente calculada a partir de él es confiable. Por tanto, su valor no se modifica en el proceso de ajuste de parámetros		

### 3.4.3 Descripción de los ajustes en los valores de los parámetros

Para el ajuste de parámetros se plantearon varias opciones de corridas que se describen en la Tabla 3-5. Primero se realizaron ajustes automáticos con el algoritmo PSO para encontrar las zonas del espacio parametral donde posiblemente se encuentra el conjunto de parámetros que mejor ajustara las simulaciones a las observaciones; lo anterior tuvo en cuenta la discretización por bloques. Segundo se variaron los rangos de los parámetros manualmente basados en la información de los procesos que ocurren en cada zona, se consultaron documentos que indicaran las características del flujo hídrico en diferentes puntos de la cuenca. Principalmente se consultaron los POMCAS y estudios de aguas subterráneas (IDEAM y CorpoCesar, 2006). Se debe resaltar que para el caso de esta cuenca se encontró que era necesario ajustar el parámetro TRNSRCH que controla la transmisión de agua desde los canales simulados hacia los acuíferos profundos (parámetro disponible para toda la cuenca y no es posible modificarlo por bloques). Este parámetro no se resalta en muchas referencias bibliográficas consultadas. El valor por defecto que asigna el aplicativo es de 0% porque el aplicativo no permite ingresar un valor basado en observaciones y por tanto debe ser ajustado en la calibración; dentro de las simulaciones realizadas se evidenció que un valor de 19% permite ajustar las simulaciones a las observaciones de caudal con un buen ajuste. Posteriormente se realizaron nuevas calibraciones automáticas escalonadas, es decir, calibrando primero el bloque de subcuencas que se encuentra más agua arriba y prosiguiendo hacia aguas abajo. Por último, se refinó los resultados de esa calibración escalonada con calibraciones manuales para ajustar el valor de los parámetros a rangos apropiados. Esto se hizo observando los cambios en las hidrógrafas para ajustar las simulaciones a las observaciones. La función objetivo escogida para evaluar el desempeño general de las simulaciones fue el coeficiente de Kling-Gupta (Gupta, Kling, Yilmaz, & Martinez, 2009), que tiene un valor de 1 si la simulación es perfecta y un valor de infinito negativo para la peor simulación.

**Tabla 3-5. Opciones implementadas para el ajuste automático y manual de parámetros, cuenca del río Cesar.**

Opción	No. Sim.	Desempeño General	Objetivo/Observaciones
Iter1_4900	4900	Regular ( $KGE_{prom} = -0.49$ )	<p>Todos los bloques todos los parámetros al tiempo. Análisis posterior con filtración de las simulaciones en rangos de parámetros que probablemente representan mejor algunos fenómenos físicos que se dan en la cuenca.</p> <p>Se cambia la posibilidad de infiltración a través del cambio porcentual del CN definido por suelos y coberturas, que se destina a buscar en un rango de:</p> <p>Bloque 1: -70% a 10%, debido a que en las montañas se tienen más coberturas boscosas que favorezcan la infiltración.</p>



Opción	No. Sim.	Desempeño General	Objetivo/Observaciones
			<p>Bloque 2 a 5: -50% a 50%, no se cuenta con datos por que soporten un preferencial aumento o reducción de este fenómeno en las planicies</p>
			<p>Para el paso de agua desde la última capa de suelo al acuífero profundo y el superficial se cambia el parámetro RCHRG_DP en los rangos: Bloque 1: porcentajes bajos de paso hacia el acuífero profundo porque en pendientes escarpadas el gradiente hidráulico del nivel freático llevara el agua más rápidamente hacia el canal por flujo subsuperficial (rango de 0 a 0.3) Bloque 2 a 5: Se asigna un rango de búsqueda alto, ya que en planicies el flujo subsuperficial tiene más tiempo para percolar (rango de 0.5 a 1)</p>
			<p>Capacidad de agua disponible en el suelo (AWC), se define un rango entre 0 y el 100% debido a que las simulaciones previas demuestran una gran cantidad de agua en escorrentía, las observaciones de caudal son menores y probablemente el agua se esté reteniendo más en el suelo. Se ajusta en todos los bloques utilizando como valor semilla la reclasificación de la información de suelos.</p>
			<p>La Conductividad hidráulica del suelo (SOL_K), se mantiene en un rango de búsqueda de entre -50% y 50% porque este valor ha sido ingresado a partir de los estudios de suelos, pero su valor tiene incertidumbre y requiere ser calibrado de acuerdo con la revisión de literatura</p>
			<p>El retraso en la descarga (GW_DELAY) desde aguas subterráneas se ajusta basado en las curvas de recesión de las hidrógrafas. Se hace la variación sin preferencia por algún rango especial para algún bloque.</p>
			<p>La conductividad hidráulica del fondo del canal (CH_K) no es un valor ingresado y debe calibrarse. Puede reducir la sobreestimación presente en la simulación previa al ajuste de parámetros. Se busca información en documentos complementarios que indique si los valores encontrados están acordes con lo</p>



Opción	No. Sim.	Desempeño General	Objetivo/Observaciones
			<p>indicado allí sobre los procesos hidrológicos que se dan en los canales de la cuenca.</p> <p>El exponente de la descarga de aguas subterráneas (ALPHA_BF), debe calibrarse según la literatura. No se evidencia información que guíe la búsqueda en algún rango para algún bloque determinado.</p>
Iter2_1200	1200	Regular ( $KGE_{prom} = -0.032$ )	Refinación de la búsqueda de 4900 simulaciones, persiste la sobreestimación en los bloques 3 a 5 y algunos pobres desempeños en las estaciones de caudal del bloque 1
18 variando manualmente los rangos de búsqueda	20 sim. En cada búsqueda	Aceptable ( $KGE_{prom} = 0.078$ )	<p>Búsquedas en rangos filtrados, variando factores de parámetros en un bloque a la vez. Se siguen presentando sobreestimaciones consistentes en las estaciones de los bloques 3 a 5. Se hacen ensayos manuales variando diversos parámetros. Conclusión, se requiere ajustar el parámetro TRNSRCH aproximadamente a un 19%. Además, se requiere hacer una calibración automática escalonada de cada bloque fijando parámetros y siguiendo hacia el siguiente bloque</p>
			<p>1° Bloque 3: Definición del coeficiente del flujo base en 0.99 con base en las anteriores simulaciones, variación del contenido posible de humedad entre -5% y 50% para reducir los caudales en PTE Canoas. No reduce la sobreestimación general y reduce los picos de caudal muy poco</p>
			<p>2° Bloque 3: Definición del coeficiente del flujo base en 0.99 con base en las anteriores simulaciones, aumento de la conductividad hidráulica del lecho del canal a 50 mm/hr, variación del contenido posible de humedad entre 50% y 80% para reducir los caudales en PTE Canoas. No reduce la sobreestimación general y reduce los picos de caudal en buena medida, pero generando desplazamiento temporal hacia delante en el tiempo y aumentando las curvas de recesión</p>
			<p>3° Bloque 3: Definición del coeficiente del flujo base en 0.99 con base en las anteriores simulaciones, reducción del número de curva</p>



Opción	No. Sim.	Desempeño General	Objetivo/Observaciones
			(CN) para reducir la infiltración entre el -40% y el -90%. No reduce la sobreestimación general y reduce los picos de caudal muy poco, el flujo subsuperficial se eleva, pero sigue llegando rápidamente a los canales.
			4° Bloque 3: Se mantienen los valores anteriores, pero se modifica la conductividad hidráulica entre un -70% y un 50% para reducir la llegada a los canales. Se sigue manteniendo la sobreestimación y se generan picos de caudal muy altos, la humedad en las primeras capas crece.
			5° Bloque 3: Se hace una búsqueda del coeficiente del flujo base en el rango 0.2 a 0.9, encontrando que solo se afectan las curvas de recesión. Se sigue presentando la sobreestimación de los caudales.
			6° Bloque 3: Definición del coeficiente del flujo base en 0.845 con base en las anteriores simulaciones, búsqueda del contenido de humedad del suelo en los intervalos -50% a 300%. No reduce la sobreestimación general y reduce los picos de caudal muy poco, el flujo subsuperficial se eleva, pero sigue llegando rápidamente a los canales.
			7° Bloque 3: Se varía el porcentaje de división del paso desde la última capa de suelo hacia el acuífero profundo y su correspondiente complemento hacia el acuífero superficial. Se muestrea en el rango del 20 al 80%. Se encuentra un mejor ajuste de los volúmenes con un valor del 62.5 % pero sigue habiendo sobreestimación general.
			8° Bloque 3: Se hace una búsqueda del coeficiente del flujo base en el rango 0 a 0.2, encontrando que se afectan las curvas de recesión y que se genera una percolación excesiva que reducen los volúmenes escurridos, pero se presentan muchos periodos sin flujo de agua.
			9° Bloque 3: se varía el retraso en la descarga desde el acuífero superficial en el intervalo 1 a 10 días. Se encuentra un valor de 4.75 como el que genera una mejor representación de la





Opción	No. Sim.	Desempeño General	Objetivo/Observaciones
			<p>curva de recesión. Se siguen presentando picos altos de caudal que se intercalan con subestimaciones entre ellos. Se decide definir estos rangos de búsqueda ensayados para la calibración escalonada y proseguir hacia el bloque 4.</p>
			<p>10° Bloque 4: Se hace una búsqueda del coeficiente del flujo base en el rango 0 a 0.2. Se encuentra que el volumen general de las simulaciones ya no tiene sobreestimaciones pero al igual que en el bloque 3 se presenta infiltración excesiva.</p>
			<p>11° Bloque 4: Definiendo el valor del coeficiente del flujo base en 0, con base en las anteriores simulaciones, variación del contenido posible de humedad entre -5% y 50% para reducir los caudales en PTE Canoas. Reduce la sobreestimación general y reduce los picos de caudal muy poco, pero se presentan varios periodos donde no se registra caudal.</p>
			<p>12° Bloque 4: Definiendo el valor del coeficiente del flujo base en 0, con base en las anteriores simulaciones, variación de la conductividad hidráulica del lecho del canal a 50 mm/hr, para reducir los caudales en Palmariguaní. Reduce la sobreestimación general y reduce los picos de caudal en buena medida, pero generando desplazamiento temporal hacia delante en el tiempo y aumentando las curvas de recesión. Se siguen manteniendo varios periodos donde no simula caudal.</p>
			<p>13° Bloque 4: Se varía el porcentaje de división del paso desde la última capa de suelo hacia el acuífero profundo y su correspondiente complemento hacia el acuífero superficial. Se muestra en el rango del 10 al 100%. Se mantiene la gran variación de picos de caudal, pero quedan ajustados a los mismos rangos que los datos observados.</p>
			<p>14° Bloque 3: Se encuentra en varios POMCAs y en el estudio nacional que la recarga del acuífero subterráneo tiene valores altos. Se modifica el paso de la infiltración de los <b>canales hacia los acuíferos profundos (TRNSRCH)</b>, desde</p>





Opción	No. Sim.	Desempeño General	Objetivo/Observaciones
			<p>0 a 60% encontrando que se reduce en gran medida la sobreestimación del caudal tanto en el bloque 3 como en el bloque 4 y 5.</p> <p>15° Bloque 3: <b>Se investiga</b> en el estudio nacional el mapa potencial de recarga viendo que la zona de pie de monte alrededor del río Cesar tiene potenciales de recarga moderados. Se consultaron también los POMCAS del río Gatapurí (Tabla 3.77, recarga entre el 15 y el 40% del superávit de agua), Calenturitas (recarga entre el 20 y el 35% del volumen escurrido, infiltración por escorrentía es mayor que por precipitación Tabla 3.30), no se encontró valor para el río Chiraimo – Manaure, para el río Magiriamo se encuentran determinadas las recargas potenciales en lámina de agua con valores que van desde 10 hasta el 70% de la escorrentía superficial (Tabla 4.13). Con los valores anteriores se prueba en esta iteración varios porcentajes para el parámetro TRNSRCH en el intervalo 10 a 25% encontrando que el valor de 19% genera una diferencia escorrentía multianual simulada en comparación con la observada de 9.2% (20 simulaciones en el intervalo mencionado).</p> <p>16° Bloque 3: Se hace una búsqueda del coeficiente del flujo base en el rango 0.3 a 0.8, encontrando que se afectan las curvas de recesión y que se genera una percolación excesiva que reducen los volúmenes escurridos, el mejor valor se obtiene cercano a 0.325.</p> <p>17° Bloque 3: se varía el retraso en la descarga desde el acuífero superficial en el intervalo 1 a 10 días. Se encuentra un valor de 4.75 como el que genera una mejor representación de la curva de recesión. Se siguen presentando picos altos de caudal que se intercalan con subestimaciones entre ellos, pero se registra un aumento en el valor de la función objetivo. Se decide definir estos rangos de búsqueda ensayados para la calibración escalonada y proseguir hacia el bloque 4.</p> <p>18° Bloque 4: Se hace una búsqueda del coeficiente del flujo base en el rango 0.2 a 0.9</p>



Opción	No. Sim.	Desempeño General	Objetivo/Observaciones
			Se encuentra que el volumen general de las simulaciones ya no tiene sobreestimaciones, las curvas de recesión tiene formas similares con un valor de 0.715, pero se encuentran adelantadas. Con el nuevo valor para el parámetro TRNSRCH se decide empezar la calibración escalonada con el algoritmo de búsqueda PSO.
Escalonada	1200 sim. por bloque	Aceptable ( $KGE_{prom} = 0.16$ )	Ajuste de parámetros de forma automática en cada bloque por separado siguiendo la red de flujo, empezando por el bloque 1 de montaña y siguiendo hacia los bloques de las planicies en orden de flujo. Se tienen en cuenta el valor de 0.19 para el parámetro TRNSRCH y los rangos ensayados en las calibraciones manuales anteriores, para poder mejorar la sobreestimación persistente que existe en las estaciones de los bloques 3 a 5. Esto tiene en cuenta la información sobre la percolación registrada en la cuenca. Al terminar cada bloque se filtran los parámetros ensayados por el algoritmo de búsqueda para fijarlos hacia el siguiente bloque.
24 muestreos variando rangos de búsqueda manualmente	20 simulaciones por búsqueda	Aceptable ( $KGE_{prom} = 0.31$ excluyendo la estación caimancito)	<p>Basado en los resultados filtrados de las calibraciones automáticas actualizando el valor del parámetro TRNSRCH, se realizan búsquedas manuales para ajustar los parámetros a zonas donde el comportamiento hidrológico sea consistente con los fenómenos físicos presentes en la cuenca. Se consultan los POMCAs de las cuencas disponibles encontrando que se resalta que las subcuencas que pertenecen al bloque 1 la infiltración se presenta a través de la escorrentía, es decir a través de los canales. Asimismo, se resalta el aporte de agua desde el suelo hacia los acuíferos en la zona de planicie; por tanto, se hará énfasis en el ajuste del parámetro RCHRG_DP en la búsqueda manual.</p> <p>1° Bloque 2: Ajuste de la conductividad hidráulica del lecho del canal para reducir la sobreestimación de los caudales. Variación entre 10 y 60 mm/día. Se mejora la sobreestimación de los picos de caudal. Se</p>



Opción	No. Sim.	Desempeño General	Objetivo/Observaciones
			requiere un mayor detalle en el valor del parámetro cerca de 40 mm/día
			2° Bloque 2: Se ajusta nuevamente la conductividad encontrando que el valor que mejora las simulaciones para la estación Pte Salguero es 38.96 mm/día.
			Al finalizar estos ajustes al bloque 2, la simulación de caudal en la estación 28037030 presenta una representación general del ciclo bimodal que evidencian los datos observados y una variación de los picos que también se ve en la serie observada. Persisten algunas sobreestimaciones en épocas lluviosas de los años 1992, 1995, 1999, 2000. Las simulaciones en la estación tienen un coeficiente de Kling-Gupta (KGE) de 0.67 que es bueno (Gupta, Kling, Yilmaz, & Martinez, 2009), porque representa de forma acorde la media de los caudales observados y su correlación entre simulados y observados, pero tiene algunas deficiencias en la varianza. A escala mensual tiene un coeficiente de correlación de 0.6. En la curva de duración de caudales se presenta una buena representación de los caudales altos y medios, pero existen algunas sobreestimaciones de los caudales bajos
			3° Bloque 3: Se ajusta también el parámetro de la conductividad hidráulica para el bloque 3, probando en los rangos 5 a 30, encontrando como que el valor de 29.375 mejora la sobrestimación consistente en la estación Pte Canoas. Persisten algunos periodos en los que no se registra caudal simulado debido a la percolación desde el canal
			4° Bloque 3: Se hace variar el ALPHA_BF en el rango 0.2 a 0.5, encontrando que se requiere seguir refinando su valor cerca de 0.3. No es muy sensible el cambio en las hidrógrafas.
			5° Bloque 3: Se hace variar el ALPHA_BF en el rango 0.25 a 0.35, encontrando que las curvas de recesión se ajustan mejor con un valor de 0.305.



Opción	No. Sim.	Desempeño General	Objetivo/Observaciones
			6° Bloque 3: Se hace variar el AWC entre 100 y 400, encontrando que no tiene mayor injerencia en el comportamiento, solo reduciendo un poco los picos de caudal e incrementando los valles entre picos en las temporadas lluviosas. El mejor valor se encuentra cercano a 130.
			7° Bloque 3: Se refina la búsqueda del AWC entre 120 y 140, encontrando que el mejor valor se encuentra cercano a 122.5.
			8° Bloque 3: Se busca verificar el valor del CN que originalmente se había hallado en -50.2%. Se varía entre -40% y -90%. No se registran mayores cambios en los picos en la estación Pte Canoas y por tanto se deja el mismo valor.
			9° Bloque 3: Se hace variar el GWDelay entre 1 y 5 días, para verificar el valor de 3.09 encontrado previamente. Se encuentra que un mejor valor se encuentra cerca de 5 porque suaviza los descensos de las curvas de recesión que se presentaban caídas muy rápidas y posteriormente no generaban caudal simulado.
			10° Bloque 3: Con respecto a la recarga desde el suelo, se resaltaba en los POMCA que desde los suelos también se presentaba recarga de los acuíferos desde los suelos, por tanto, se espera un valor por encima de 0.5. Se hace variar el RHCRG_DP entre 0.5 y 0.9, para verificar el valor de 0.59 encontrado previamente. Se encuentra que en el rango muestreado el parámetro ya no cambia los picos de caudal y en general las hidrógrafas. En consecuencia, se deja el mismo valor encontrado previamente.
			Al finalizar estos ajustes al bloque 3, la simulación de caudal en la estación 28037090 presenta una representación general del ciclo bimodal, comportamiento que evidencian los datos observados; no obstante, existen falencias en algunos periodos de lluvia donde la percolación a través del canal no permite que alcance los picos de caudal registrados en la estación. Las curvas de recesión se encuentran bien representadas, ocurren en los mismos tiempos que las observadas, pero en los picos

Opción	No. Sim.	Desempeño General	Objetivo/Observaciones
			<p>de las épocas muy lluviosas como en el fenómeno de la niña del año 1999, se presenta sobreestimaciones altas en días específicos. Se presenta un KGE para esa estación de 0.48 que es aceptable, porque representa la media de los caudales observados y su varianza, pero tiene algunas deficiencias en el coeficiente de correlación. A nivel mensual estos picos no son tan importantes a excepción del año 1999 donde persiste la sobreestimación y se presenta un coeficiente de correlación de 0.55. Con respecto a la CDC, se tiene una subestimación de los caudales medios y caudales altos similares y tiene la misma pendiente; asimismo, se presenta una subestimación de caudales bajos.</p>
			<p>11° Bloque 4: Se empieza verificando el valor del Alpha_bf variando su valor desde 0.3 hasta 0.8. No se evidencian cambios significativos y la sobreestimación persiste en la estación Palmariguaní. Se debe aumentar la percolación en el fondo del canal (CH_K), para reducir la sobrestimación (130.3%).</p>
			<p>12° Bloque 4: Se verifican las simulaciones cercanas a un valor del parámetro CH_K de 12.5 mm/día que fue el valor encontrado por el algoritmo automático porque se mantienen las sobreestimaciones. Se decide variarlo en el rango 0 a 70 encontrando que cercano a 70 se reduce un poco la sobreestimación, pero puede darse una mejor estimación aumentando el parámetro.</p>
			<p>13° Bloque 4: Se verifican las simulaciones cercanas a un valor del parámetro CH_K porque se mantienen las sobreestimaciones. Se decide variarlo en el rango 80 a 130 encontrando que cercano a 130 se sigue reduciendo un poco la sobreestimación, pero puede darse una mejor estimación aumentando el parámetro.</p>
			<p>14° Bloque 4: Se verifican las simulaciones cercanas a un valor del parámetro CH_K porque se mantienen las sobreestimaciones. Se decide variarlo en el rango 130 a 200</p>

Opción	No. Sim.	Desempeño General	Objetivo/Observaciones
			<p>encontrando que cercano a 170 se sigue reduciendo ya en gran medida la sobreestimación la sobrestimación, pero se requiere refinar el valor del parámetro.</p>
			<p>15° Bloque 4: Se verifican las simulaciones cercanas a un valor del parámetro CH_K porque se mantienen las sobreestimaciones. Se decide variarlo en el rango 160 a 180 encontrando que el valor de 169.375 genera valores similares en la escorrentía a nivel multianual (15.1 %). Se termina de refinar con los otros parámetros.</p>
			<p>16° Bloque 4: Se hace variar el GWDelay entre -3 y 0 días, para verificar que el valor de 2.925 encontrado previamente este en la zona parametral correcta. Los cambios producidos por la variación desmejoran notablemente la simulación de los caudales en Palmariguani.</p>
			<p>17° Bloque 4: Se hace variar el GWDelay entre 1 y 4 días, para verificar que el valor de 2.925 encontrado previamente este en la zona parametral correcta. Se termina confirmando que el valor encontrado anteriormente genera las mejores estimaciones.</p>
			<p>Al finalizar estos ajustes al bloque 4, la simulación de caudal en la estación 28047050 presenta una representación general del ciclo bimodal que también es registrado en la estación, pero en algunos años se presenta sobreestimación de las curvas de recesión. El volumen de los picos de caudal está bien representado a excepción de algunos días en los que se presenta sobreestimación; el tiempo de ocurrencia de los picos de caudal simulado está acorde con los picos observados. Se presenta un KGE de 0.6 que es bueno y a escala mensual se registra un coeficiente de determinación de 0.77. En la curva de duración de caudales se tiene una buena representación de los caudales medios y de los caudales altos, con algunas deficiencias en la representación de caudales bajos.</p>



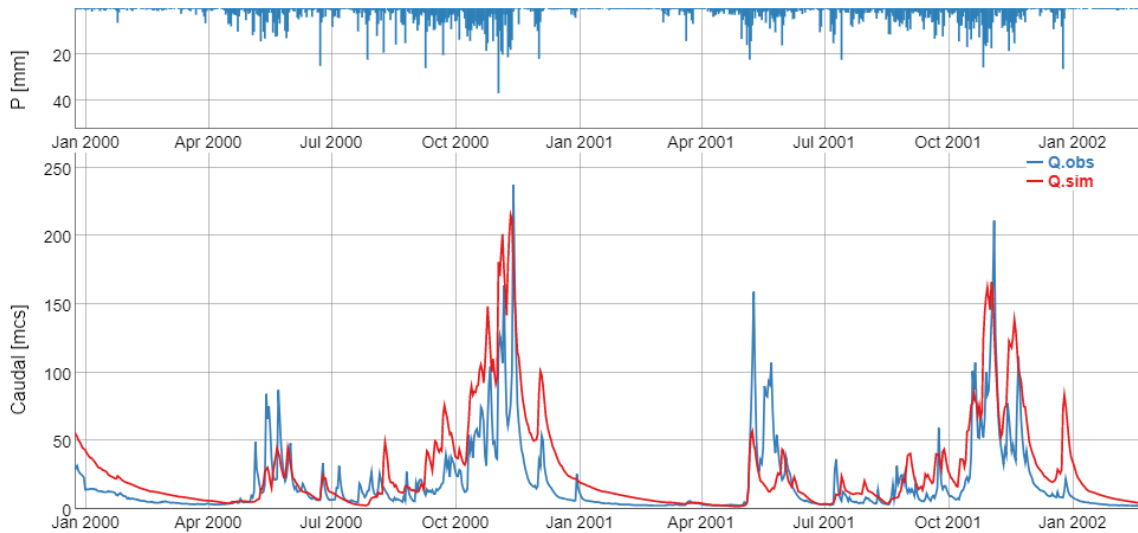


Opción	No. Sim.	Desempeño General	Objetivo/Observaciones
			<p>18° Bloque 5: Se empieza verificando el valor del Alpha_bf de 0.545 variando su valor desde 0.5 hasta 1. Existen cambios significativos sobre todo en la estación Islandia y la sobreestimación persiste en ambas estaciones. Se cambia el valor por 0.612 que produce mejores resultados en Islandia, partiendo de los análisis hechos sobre los datos de la estación Caimancito. Se debe aumentar la percolación en el fondo del canal (CH_K), para reducir la sobreestimación que existe sobre todo en la estación Caimancito.</p>
			<p>19° Bloque 5: Se verifican las simulaciones cercanas a un valor del parámetro CH_K de 55.41 mm/día que fue el valor encontrado por el algoritmo automático porque se mantienen las sobreestimaciones. Se decide variarlo en el rango 0 a 200 encontrando que cercano a 200 se reduce un poco la sobreestimación, pero puede darse una mejor estimación aumentando el parámetro.</p>
			<p>20° Bloque 5: Se verifican las simulaciones cercanas a un valor del parámetro CH_K porque se mantienen las sobreestimaciones. Se decide variarlo en el rango 190 a 205 encontrando que el valor de 204.75 genera valores similares en la escorrentía a nivel multianual (16.8 % de sobreestimación en la estación Islandia). Se termina de refinar con los otros parámetros.</p>
			<p>21° Bloque 5: Se hace variar el CN entre -80% y -40% días, para verificar que el valor de -60.5 % encontrado previamente este en la zona parametral correcta. Los cambios producidos no afectan las simulaciones en gran medida, solo cambian un poco los picos de caudal y las recesiones en épocas lluviosas. Se mantiene el valor hallado previamente.</p>
			<p>22° Bloque 5: Se hace variar el GWDelay entre 1 y 5 días, para verificar que el valor de 2.539 días encontrado previamente este en la zona parametral correcta. La variación de las hidrógrafas debido al cambio en el valor del parámetro ajusta la parte final de las curvas de</p>

Opción	No. Sim.	Desempeño General	Objetivo/Observaciones
			<p>recesión. Existe una pequeña mejoría en el valor de la función objetivo. Se requiere detallar el valor obtenido.</p>
			<p>23° Bloque 5: Se hace variar el GWDelay entre 3.4 y 3.6 días, para verificar refinar el valor del parámetro. La variación de las hidrógrafas debido al cambio en el valor del parámetro ajusta la parte final de las curvas de recesión. Se deja como valor final 3.575</p>
			<p>24° Bloque 5: Con respecto a la recarga desde el suelo, se resaltaba en los POMCA que desde los suelos también se presentaba recarga de los acuíferos desde los suelos, por tanto, se espera un valor por encima de 0.5. Se hace variar el RHCRG_DP entre 0.5 y 0.9, para verificar el valor de 0.57 encontrado previamente. Se encuentra que en el rango muestreado el parámetro ya no cambia los picos de caudal y en general las hidrógrafas. En consecuencia, se deja el mismo valor encontrado previamente.</p>
			<p>Al finalizar estos ajustes al bloque 5, las simulaciones de caudal en las estaciones Islandia y Caimancito presentan los ciclos bimodales de los caudales observados con sobreestimaciones para algunos meses particulares. En ambas estaciones se sigue sobreestimando el caudal en noviembre de 1999 al igual que en las anteriores estaciones. Sin embargo, la estimación general para la estación Islandia corresponde con las observaciones, esto se ve representado en un KGE mensual de 0.54. Para la estación Caimancito, y reconociendo las dudas que se tienen sobre sus registros, se debe resaltar que se siguen presentando los excesos en las épocas de lluvia. No obstante, se debe resaltar que las curvas de recesión son congruentes, es decir, la reducción del caudal simulado y observado ocurren en los mismos tiempos y con los mismos valores.</p>

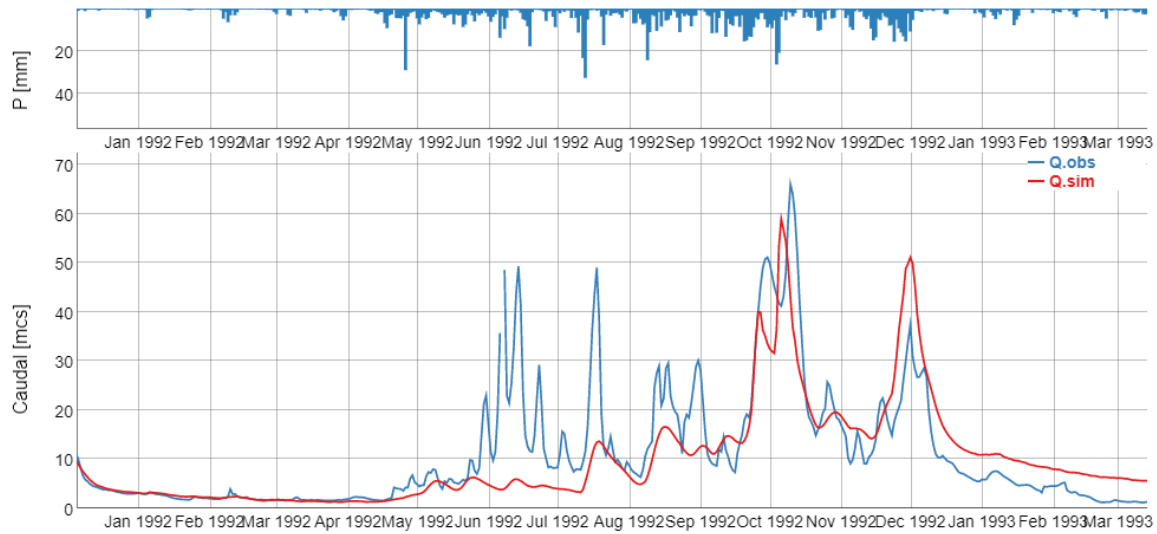
### 3.4.4 Descripción de los caudales simulados y observados en el periodo usado para calibración (1987-2002)

Se evaluó la relación entre la lluvia estimada e ingresada al aplicativo, contra las estimaciones de caudal observado. En la Figura 3-8 se puede ver que el modelo responde a los pulsos diarios de precipitación y como se corresponde estos con los datos de caudal observado. La correspondencia entre el caudal observado y simulado evidencia que la determinación de la lluvia en esta cuenca fue correcta gracias al ajuste de los parámetros relacionados con infiltración y el flujo subsuperficial (principalmente, el CN y el SOL\_K).



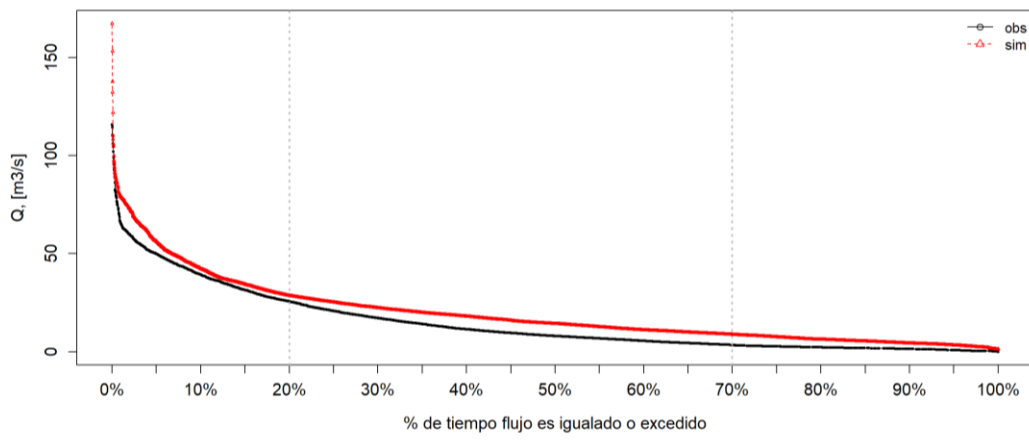
**Figura 3-8. Precipitación promedio sobre la cuenca drenante a la estación Pte Salguero e hidrógrafas simuladas y observadas para el periodo 2000-2001**

Asimismo, la estimación de la precipitación también conlleva incertidumbres generadas por la densidad espacial de estaciones, que en el caso particular de la cuenca del río Cesar es de 3.13 estaciones por cada 1000 km<sup>2</sup>, densidad menor a la recomendada por la WMO para las características que presenta la cuenca (WMO, 2012). La Figura 3-9 muestra como en la estación de Palmariguaní se registraron caudales en un periodo de tiempo, que al compararlo con la disponibilidad de datos de precipitación se evidencia varios pluviómetros sin datos para esos días. Esto influye en poco sobre el desempeño general del modelo en esa estación ya que son casos aislados en periodos cortos de tiempo.



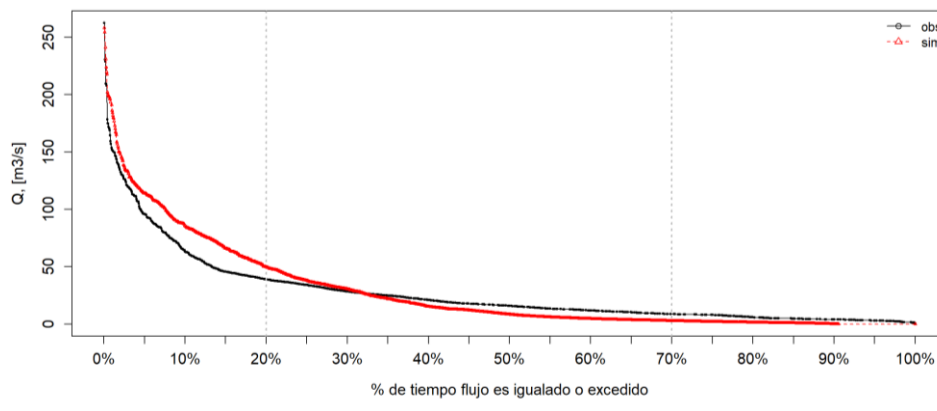
**Figura 3-9. Precipitación promedio sobre la cuenca drenante a la estación Palmariguani e hidrógrafas simuladas y observadas para el año 1992**

Como parte del análisis de los resultados de las simulaciones y de su evaluación, se realizaron curvas de duración de caudales (CDC), del periodo 1987-2002 y de los subperiodos 1987-1992, 1993-1997 y 1998-2002. Esto permite evaluar el desempeño general del modelo al contrario de un periodo particular como se mostraba en la Figura 3-8 y Figura 3-9. Del análisis de las curvas en el periodo completo se depende que en varias estaciones se logra representar los caudales de la zona central y en algunos casos los caudales altos; en varias se sobreestiman los caudales bajos, pero estos son los que menor volumen de agua aportan a los ecosistemas. En la se puede ver la CDC para todo el periodo para la estación Palmariguani, en la que se ve que de buena manera se logran representar los caudales simulados tanto en los flujos altos medios y bajos.

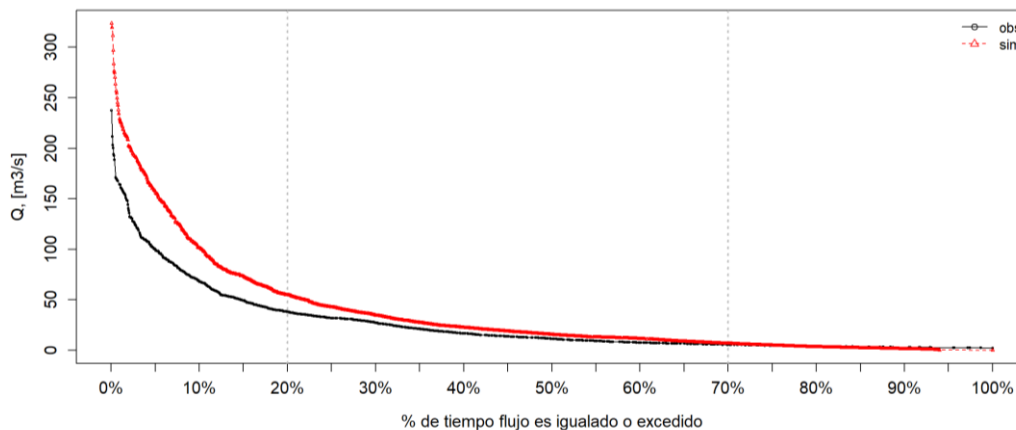


**Figura 3-10. CDC para estación Palmariguani en el periodo 1987-2002**

Del análisis en varios periodos se desprende que las estaciones representan en casi todos los periodos los caudales medios (aquellos que ocurren entre el 20 y el 70% del tiempo), pero la representación de los picos y los caudales bajos mejora y empeora dependiendo del periodo de tiempo que se haya escogido. Por ejemplo, se puede ver en la Figura 3-11 y Figura 3-12 que para la estación Puente Salguero [28037030] la representación de los caudales altos es mejor en el periodo 1993-1997 que para el periodo 1998-2002, mientras que para este último periodo hay una mayor correspondencia en los caudales medios y bajos pero mala para los altos. De aquí se desprende que, aunque el modelo puede tener falencias al ser un intento de la representación de la realidad, el comportamiento de los caudales en el mayor porcentaje de tiempo está siendo bien representado.



**Figura 3-11. CDC para la estación Puente Salguero en el periodo 1993-1997**



**Figura 3-12. CDC para la estación Puente Salguero en el periodo 1998-2002**

De los ejercicios descritos se encontraron los conjuntos de parámetros consignados en la Tabla 3-6. Estos valores corresponden a los resultados después del proceso de ajuste del modelo que se llevó acabo, para que represente de la mejor manera posible las observaciones de caudal. Como todo proceso de ajuste de modelos puede llegar a ser mejorado con otras configuraciones de modelación y con el

avance de investigaciones que mejoren la formulación matemática de los procesos físicos. Procesos que reducen la incertidumbre de la modelación de sistemas.

Los valores indican que en el bloque de montaña la recarga desde el agua que se infiltra en las colinas no es tan significativa como la que se infiltra a través del canal principal (valores bajos para el CN y el RCHRG\_DP, valor alto para el CH\_K). Lo anterior también se evidencia en las determinaciones de otros documentos como Corporación Autónoma Regional del Cesar, CORPOCESAR (2018), y Corporación Autónoma Regional del Cesar, CORPOCESAR (2016), donde se resalta que las subcuencas que pertenecen al bloque 1 la infiltración se presenta a través de la escorrentía. Por el contrario, en la planicie 1 se aumenta la recarga desde la infiltración en las capas de suelo hacia el acuífero profundo (alto valor para RCHRG\_DP), pero también se mantiene la recarga desde el canal. Para la planicie 2, se mantiene un porcentaje de percolación alto desde las capas inferiores del suelo; el número de curva no requirió de un gran cambio indicando que la conjunción de coberturas y suelos (que en su mayoría son pastos y suelos tipo B, están representando de forma acorde el modelo). En la planicie 3, que corresponde al río Ariguaní, se puede ver que el fenómeno de percolación que esta predominando es el que se da a través del canal (CH\_K de 169 mm/día); por el contrario, la percolación desde la última capa del suelo es baja (RCHRG\_DP de 0.159). La alta tasa de percolación en el canal concuerda con lo expuesto en el mapa potencial de recarga del IDEAM (IDEAM, 2019), donde se evidencia que en el tramo sobre el río Ariguaní puede existir un potencial de recarga más alto que en sus alrededores.

**Tabla 3-6. Variación de los parámetros ajustados, caso cuenca del río Cesar**

Parámetro	Variación	BQ1. Montaña	BQ2. Planicie 1	BQ3. Planicie 2	BQ4. Planicie 3	BQ5. Planicie 4
CN2	Relativa	-0.610	-0.618	-0.501	-0.402	-0.645
RCHRG_DP	Reemplazo	0.163	0.790	0.592	0.104	0.579
SOL_AWC	Relativa	2.125	3.553	1.225	2.280	5.404
SOL_K	Relativa	-0.755	-0.709	-0.675	0.012	-0.988
GW_DELAY	Relativa	-0.922	-0.481	5.190	1.712	3.575
CH_K	Reemplazo	86.294	38.960	35.510	207.704	204.750
ALPHA_BF	Reemplazo	0.620	0.367	0.305	0.558	0.613
TRNSRCH	Reemplazo	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19

Algunas métricas de desempeño de las simulaciones a nivel diario y mensual pueden verse en la Tabla 3-7. Ejemplos de las simulaciones con los parámetros ajustados pueden verse en la Figura 3-13 y Figura 3-14. Allí se puede ver una buena correspondencia de las simulaciones mensuales contra los datos observados, donde se logra representar el ciclo bimodal de caudales en la mayoría de los años.





Tabla 3-7. Desempeño de las simulaciones, caso cuenca del río Cesar

Métrica \ Estación	Diario					Mensual				
	NSE	KGE	RMSE	PBIAS	R2	NSE	KGE	RMSE	PBIAS	R2
X28017080	0.24	0.22	5.13	-35.2	0.269	0.513	0.458	2.356	-35.5	0.605
X28017110	-2.83	-0.44	12.80	66.4	0.308	-2.968	-0.498	10.606	62.6	0.424
X28017050	0.00	0.55	17.05	-5.4	0.358	0.165	0.572	11.547	-6	0.529
X28047010	-0.78	0.28	14.36	3.4	0.257	-0.564	0.350	11.887	4.1	0.282
X28047040	-0.13	0.49	3.34	15.2	0.296	0.030	0.548	2.533	14.8	0.397
X28037020	-0.03	0.27	4.10	61	0.419	0.090	0.305	2.746	59.3	0.607
X28037040	0.40	0.41	2.86	40.2	0.441	0.650	0.581	1.382	39.5	0.742
X28037060	0.09	0.13	3.09	76.3	0.343	-0.096	0.088	1.819	76.2	0.702
X28037130	0.35	0.47	5.39	29.9	0.397	0.477	0.600	3.359	30.2	0.560
X28027020	-0.41	0.10	3.63	73.5	0.429	-0.761	0.010	2.829	77.3	0.535
X28027030	-0.97	-0.14	8.00	90.1	0.329	-1.059	-0.127	6.328	89.7	0.408
X28027040	0.40	0.39	3.16	-38.2	0.455	0.538	0.554	1.876	-36.9	0.659
X28037030	0.31	0.67	33.25	-0.6	0.485	0.369	0.668	25.131	-0.9	0.590
X28037090	-0.06	0.48	56.45	-23.3	0.412	0.261	0.592	43.237	-23.1	0.547
X28047050	0.47	0.60	11.84	34.2	0.626	0.591	0.622	9.010	34.2	0.767
X28027160	-0.36	0.40	9.65	-16.8	0.310	0.031	0.540	7.191	-15.9	0.414
X25027590	-0.78	0.24	58.80	-17	0.332	-0.355	0.367	47.939	-16.8	0.420

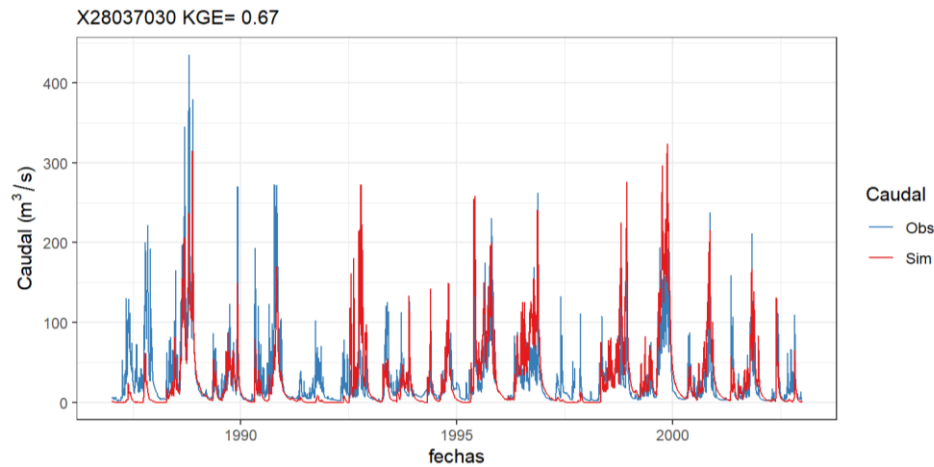
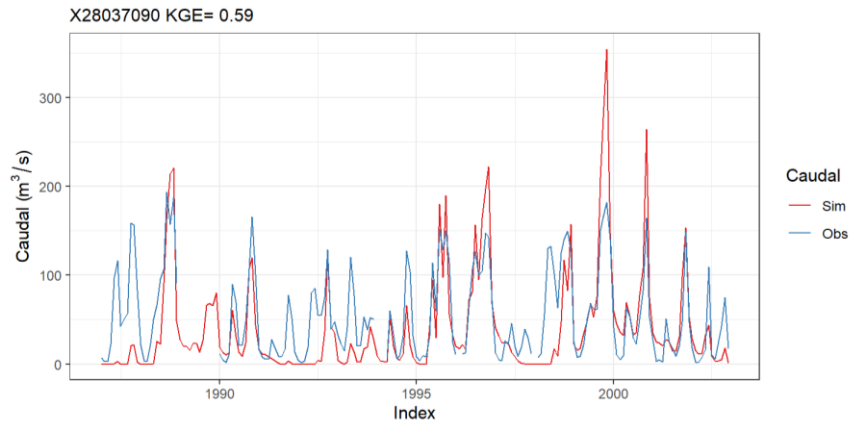
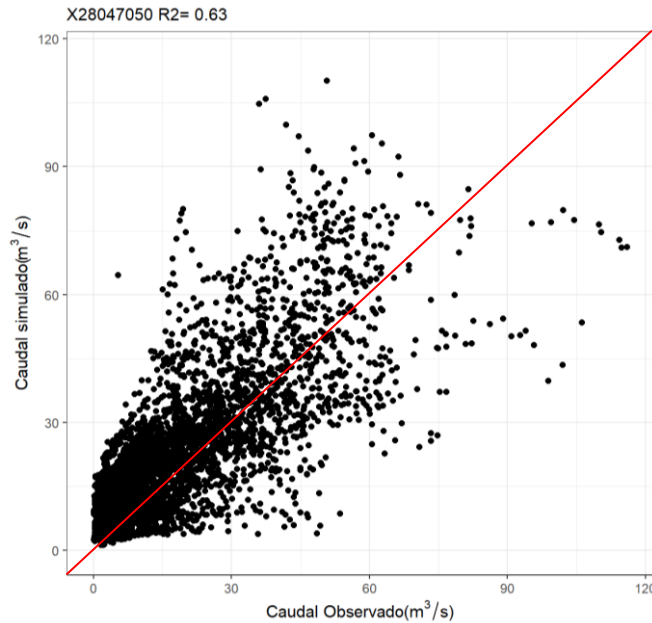


Figura 3-13. Hidrógrafa simulada y observada en la estación Pte Salguero



**Figura 3-14. Hidrógrafa simulada y observada a escala mensual en la estación Pte Canoas**

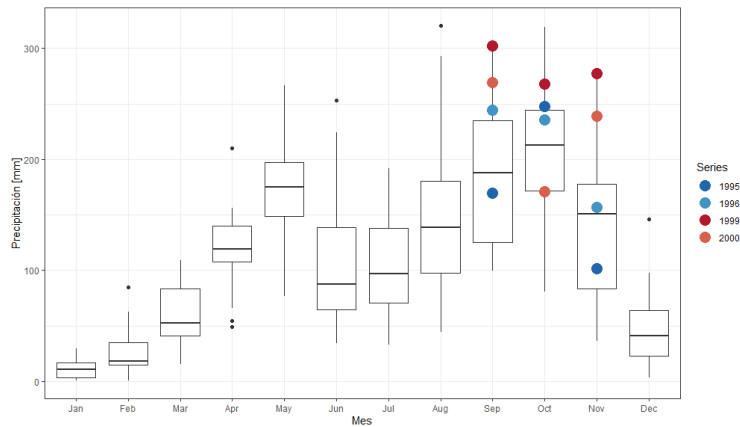
La correspondencia se evidencia en el scatter plot, Figura 3-15. Allí se comparan para el mismo día los valores simulados y observados que de ser perfecta la simulación los puntos se alinearían sobre una línea recta con pendiente de 45°. Esto también permite distinguir si existe un sesgo sistemático sobre las estimaciones, que se evidenciaría como una dispersión que asemejaría una recta con un ángulo diferente a 45°.



**Figura 3-15. Scatter plot de los caudales simulados vs los observados a escala diaria para la estación Palmariguani**

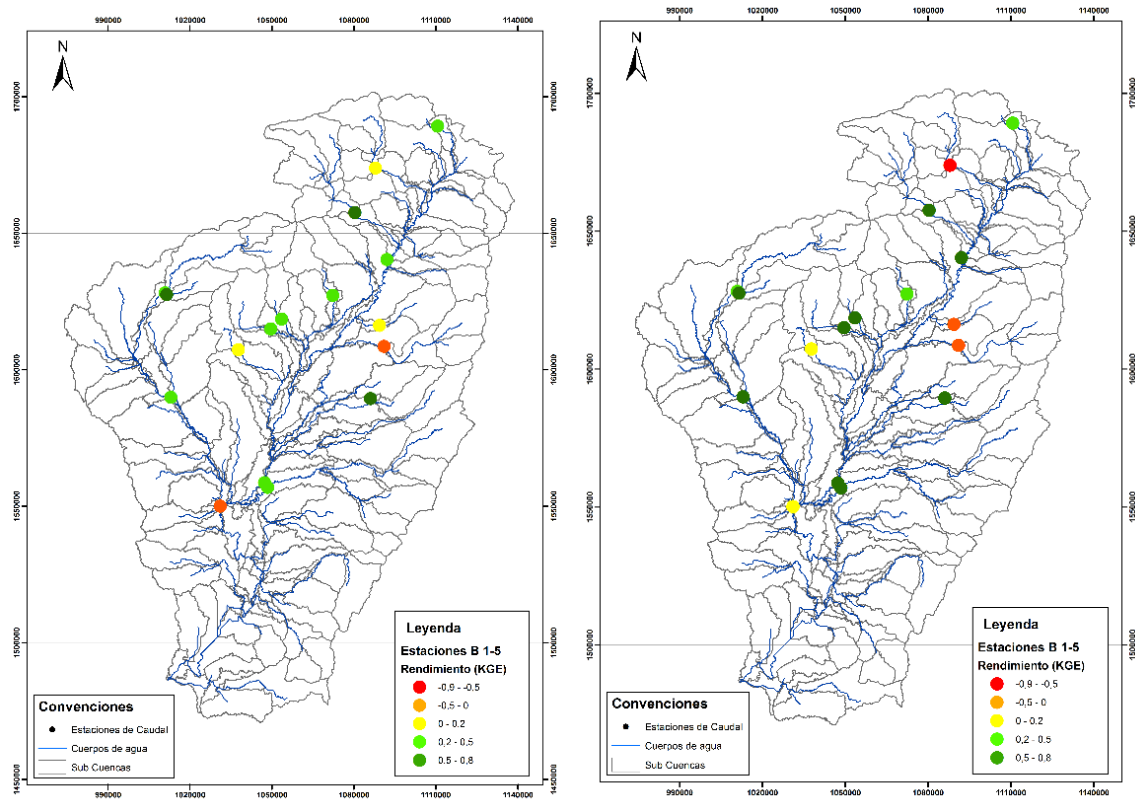
Se puede ver que para los años 1999 y 2000 existe una sobreestimación del pico del caudal importante. Esta sobreestimación se debe a que la lluvia registrada por los pluviómetros en el año 1999 para los meses de septiembre, octubre y noviembre

estuvo dentro de las más altas, incluso en dos de los tres meses, lo que es poco probable, ver Figura 3-16. A pesar de que a las estaciones pluviométricas se les realizó análisis de homogeneidad y de datos anómalos, las observaciones de esta variable también tienen incertidumbre y pueden trasladar esas incertidumbres a la determinación del caudal. Para el año 2000 ocurre algo similar pero la sobreestimación no es de igual magnitud. Esta es una de las razones por las que el modelo tiene un mal comportamiento en esos años. Por el contrario, en los años 1995 y 1996 aunque se presentan sobreestimaciones menores, también se presentaron lluvia por encima del 75% de los datos y el modelo logro representar parcialmente bien los caudales observados.



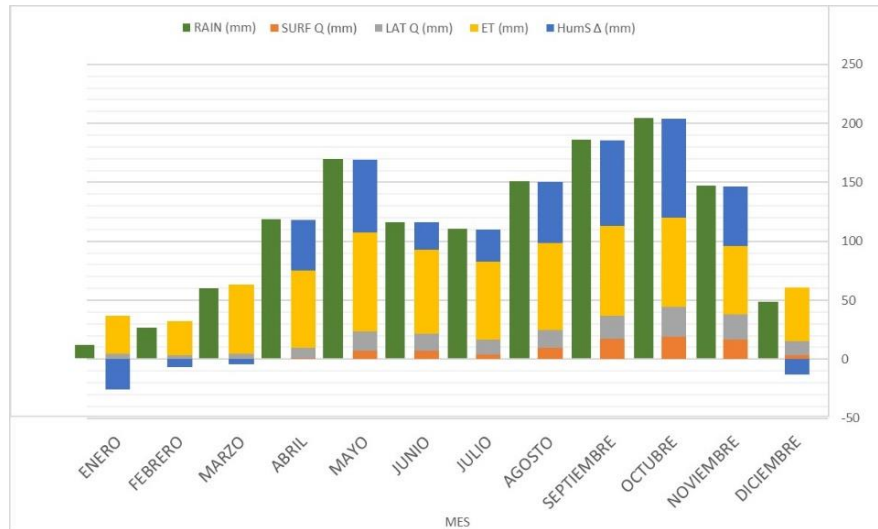
**Figura 3-16. Variación de la precipitación mensual y detalles en años clave**

La espacialización del desempeño del modelo a escala diaria y mensual con base en la métrica KGE puede verse en Figura 3-17. Puede verse que a escala diaria se presentan buenos desempeños en las estaciones de la parte norte de la cuenca, con algunos puntos con desempeño intermedio. En la parte sur de la cuenca la estación caimancito presenta desempeños regulares y aceptables a nivel mensual, pero se recuerda que los datos de esta estación son inciertos, sobre todo en los meses de lluvias. Las siguientes estaciones hacia aguas arriba (Palmariguani y Pte Canoas), presentan desempeños aceptables a nivel diario y buenos a nivel mensual.



**Figura 3-17. Espacialización del desempeño a escala diaria (izq) y mensual en la cuenca del río Cesar**

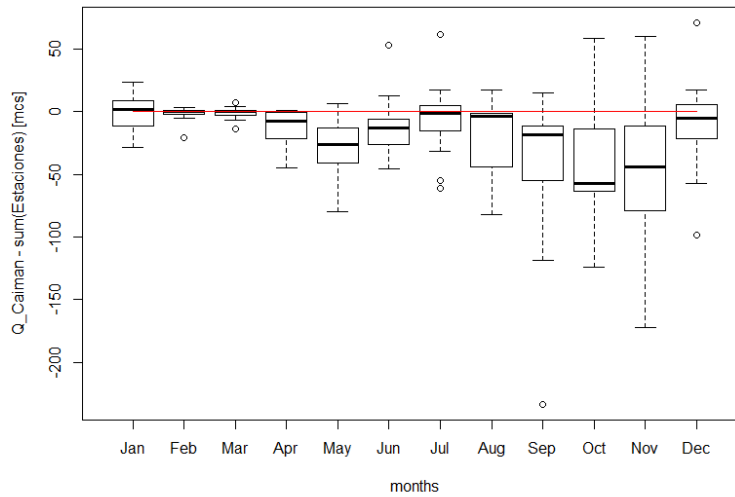
En la Figura 3-18 se puede ver el balance multianual a escala mensual para la cuenca del río Cesar. Se ve que el modelo conserva la masa ingresada (precipitación), que es repartida entre la escorrentía superficial, la escorrentía subsuperficial, la evapotranspiración, y el cambio en la humedad del suelo. Para los meses de diciembre a marzo, se ve como la humedad del suelo se transforma en un porcentaje en caudal lateral (que termina llegando a los canales), pero también en evapotranspiración. Esto corrobora que el modelo está aplicando las leyes sobre las que se fundamenta, pero como todo modelo es una representación que no es perfecta de la realidad.



**Figura 3-18. Balance multianual en la cuenca del río Cesar**

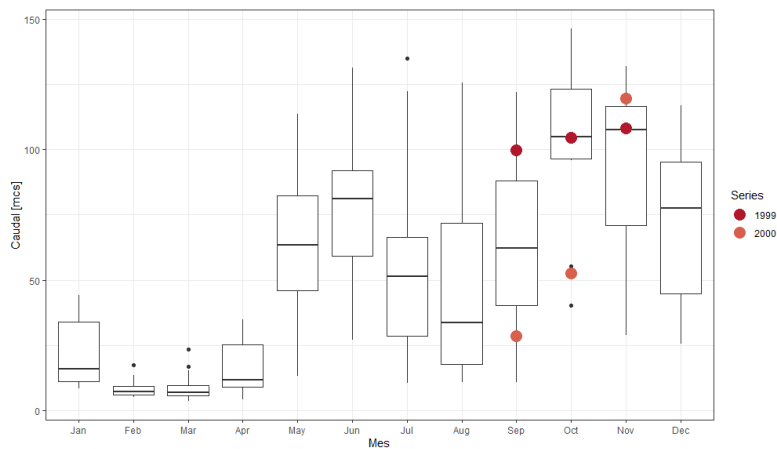
### 3.4.4.1 Análisis sobre el ajuste de las simulaciones de cantidad de agua en la estación Caimancito

El mismo procedimiento de suma de caudales realizado sobre la estación puente Canoas se aplicó a la estación Caimancito [25027590], y las estaciones 28047050, 28037090 y 28027160. El procedimiento se aplicó posterior a realizar algunos ensayos de ajustes de parámetros donde se evidenció que consistentemente las simulaciones sobreestimaban los caudales observados en la estación Caimancito. La Figura 3-19 muestra como consistentemente los caudales que pasa por la estación Caimancito son menores que la suma de las demás estaciones que drenan sus aguas hacia esta estación. Esto se presenta incluso en los meses lluviosos en los que es más probable que pase más agua por la estación que esté más agua abajo (Caimancito para este caso). En los meses de estiaje, se presentan valores muy cercanos a 0, resaltando que es en las épocas de lluvias donde se presentan inconsistencias. Las razones de estos comportamientos pueden ser variados: infiltraciones en el canal similares a las que se evidencian en los tramos que drenan hasta la estación Puente Canoas, deficiencias en los registros de caudales altos de la estación Caimancito, extracciones de caudal en el tramo desde las estaciones hasta la estación Caimancito, entre otras. Dado los valores de las diferencias que se ven en la Figura y los estimados de demanda consignados en la sección 3.3, se descarta que sea enteramente por extracciones de caudal. Se consultaron las curvas de caudal nivel, donde se encuentran los periodos de validez de cada medición; aunque hay varios registros para varios periodos, estos se encuentran espaciados por varios años en algunos casos, no se registra una medición del error del aforo.



**Figura 3-19. Resta entre caudales observados en la estación Caimancito y aquellas que se encuentran aguas arriba.**

La Figura 3-20 muestra la variación mensual de los caudales en la estación Caimancito. Además, muestra los valores en algunos meses para los años 1999 y 2000. Es reconocido que el año 1999 y el 2000 fueron años niña y en consecuencia los volúmenes registrados en las estaciones pluviométricas y de caudal fueron en general más altos (NOAA climate prediction center, 2020). Sin embargo, en la Figura 3-20 se puede ver que los registros de la estación Caimancito para esos años fueron entre medios y bajos, lo que no concuerda con lo registrado en las demás estaciones de caudal y con la relación con el fenómeno de la niña. Esto aporta en el análisis realizado sobre la estación. El modelo SWAT para esos años indica que debió pasar un caudal mayor para esos años.



**Figura 3-20. Variación mensual de los caudales observados en la estación Caimancito**

En consecuencia, las evaluaciones o ajustes de parámetros que se hagan sobre las zonas que drenen hacia la estación Caimancito, no necesariamente indican que

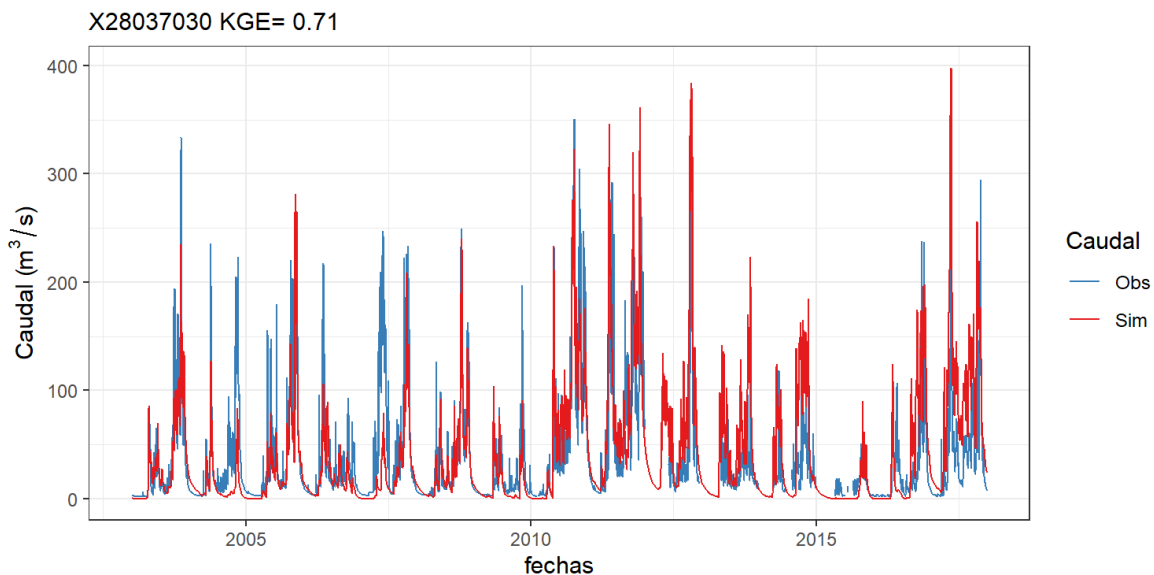


el desempeño del modelo sea bueno o malo en dicho punto. Esto debido a las dudas que se encuentran sobre los datos de esa estación.

### 3.4.4.2 Análisis en el periodo 2003 - 2017

Se compara a continuación las simulaciones de caudal contra las observaciones para el periodo 2003-2017. Se evidencia en la Figura 3-21 que para la estación Pte Salguero se presentan una buena representación de los picos diarios de caudal y del ciclo bimodal de la cuenca. Esto es respaldado por las métricas de desempeño que se listan en la Tabla 3-8. Para este periodo se tiene en general un desempeño menor que para el periodo 1987-2002 debido a que los caudales comparados son de un conjunto independiente de datos que no se tuvo en cuenta para el ajuste de los parámetros. Cabe resaltar que para las estaciones Pte Salguero hubo un ligero aumento en las métricas de desempeño y que los desempeños en la mayoría de estaciones se clasifican como buenos y aceptables, dependiendo de la estación (D. N. Moriasi, y otros, 2007).

Por otra parte, la Figura 3-22 muestra los caudales simulados y observados a escala mensual para la estación Palmariguaní. Se puede ver que en general para este periodo hay una tendencia a sobreestimar levemente los caudales y que para los años 2010 y 2011 existen picos muy altos que corresponden al fenómeno de la Niña reportado (NOAA climate prediction center, 2020). En muchas de las estaciones no se reportaron datos para alguno de esos dos años como puede verse para la estación Palmariguaní. Sin embargo, los resultados mostrados en la Figura 3-21 para la estación Pte Salguero dan indicios que los parámetros ajustan razonablemente las simulaciones a las observaciones.

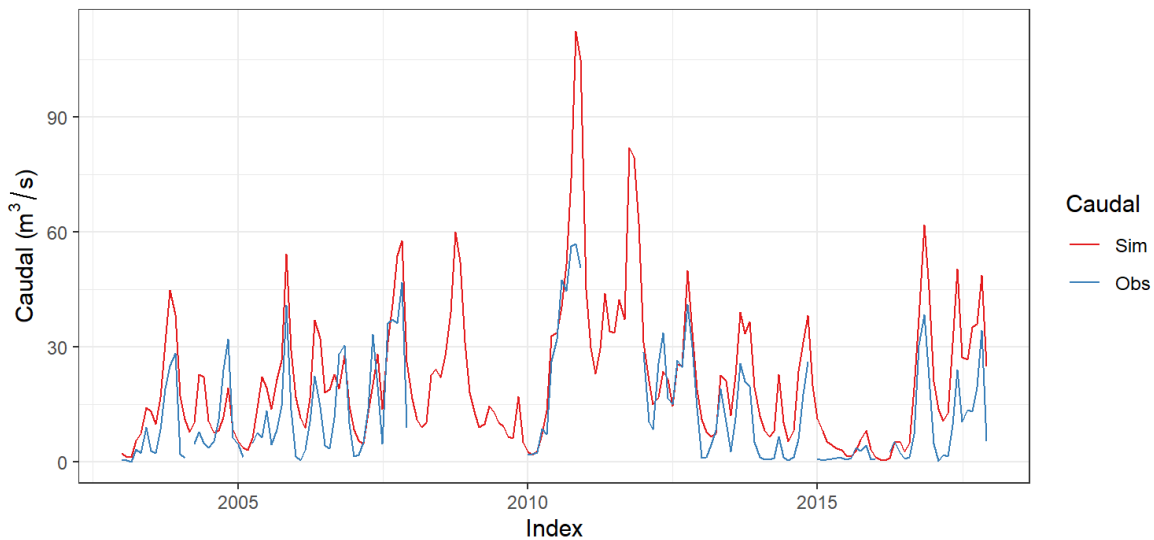


**Figura 3-21. Caudales diarios en la estación Puente Salguero para el periodo 2003-2017**

**Tabla 3-8. Desempeño de las simulaciones en el periodo 2003-2017, caso cuenca del río Cesar**

Métrica \ Estación	Diario					Mensual				
	NSE	KGE	RMSE	PBIAS	R2	NSE	KGE	RMSE	PBIAS	R2
X28017080	0.16	0.47	4.59	20.9	0.28	0.29	0.59	2.81	23.3	0.44
X28017110	-0.77	0.08	14.05	65.5	0.30	-1.33	-0.04	13.84	67.7	0.28
X28017050	-0.54	-0.38	141.1	-87.8	0.19	-0.34	-0.40	111.59	-79.4	0.07
X28047010	-3.28	-0.34	16.61	14.9	0.11	-2.75	-0.23	13.70	13.4	0.14
X28047040	-0.35	0.39	3.51	12	0.18	-0.25	0.43	2.85	14.4	0.21
X28037020	-0.40	-0.04	4.61	94.8	0.40	-0.53	0.00	3.24	88.2	0.63
X28037040	0.26	0.39	3.43	37.3	0.33	0.51	0.57	1.55	37.2	0.72
X28037060	-0.23	0.29	3.18	51.5	0.31	-0.36	0.24	2.36	51.5	0.50
X28037130	0.32	0.43	7.64	9	0.33	0.53	0.60	4.86	7.5	0.53
X28027020	-0.32	0.24	4.58	50.8	0.18	0.00	0.33	3.11	53.4	0.36
X28027030	-0.96	-0.19	8.94	96.9	0.34	-1.39	-0.28	7.14	99.3	0.51
X28027040	0.36	0.28	4.74	-50.4	0.52	0.40	0.37	3.19	-50.7	0.71
X28037030	0.43	0.71	39.28	10.4	0.55	0.47	0.69	29.40	10.6	0.65
X28037090	0.04	0.44	67.07	-44.5	0.43	0.25	0.49	57.57	-43.8	0.55
X28047050	0.25	0.35	12.91	59	0.66	0.19	0.29	12.29	61	0.74
X28027160	-1.47	-0.04	9.79	-17.1	0.38	-0.70	0.10	7.34	-12.7	0.56
X25027590	-0.55	0.29	53.67	-46.7	0.23	-0.12	0.41	44.48	-45.3	0.38

X28047050 KGE= 0.29

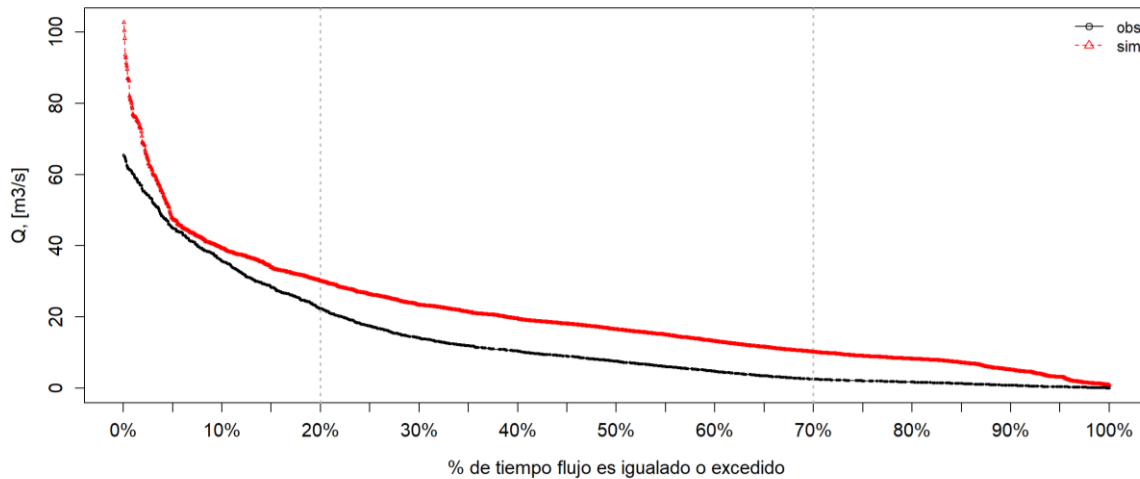


**Figura 3-22. Caudales mensuales para la estación Palmariguaní para el periodo 2003-2017**

Asimismo, se evaluaron los desempeños en diferentes intervalos de tiempo de este periodo, por ejemplo a través de las CDC. En la Figura 3-23 se puede ver la CDC para la estación Palmariguaní para uno de los subperiodos. Se ve que hay una



tendencia a estimar la distribución de los flujos altos, pero los flujos medios y bajos se encuentran sobreestimados.



**Figura 3-23. CDC observada y simulada de la estación Palmariguani para el periodo 2003-2008**

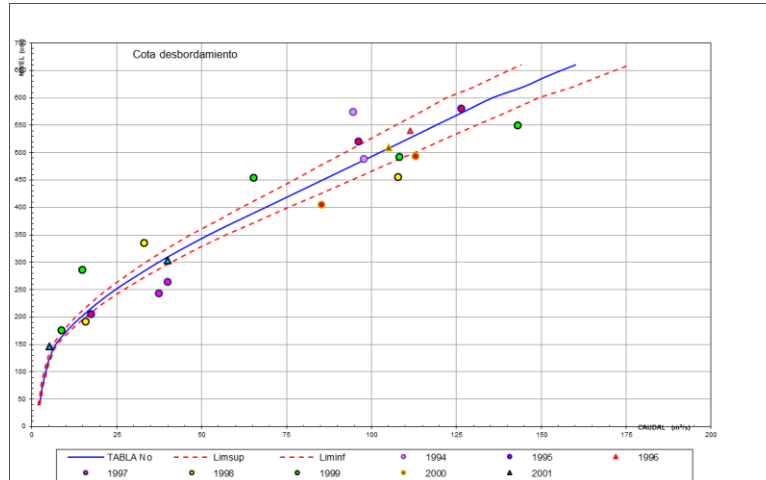
### 3.4.4.3 Análisis sobre el ajuste de las simulaciones de cantidad de agua en la estación Caimancito

Además de los análisis reportados en el producto 5 sobre el balance entre las estaciones Palmariguani, Puente Canoas, Islandia y Caimancito, se realizaron más análisis sobre los datos observados, mediciones y simulaciones.

Se consultaron las curvas de caudal-nivel de la estación Caimancito, donde se encuentran los periodos de validez de cada curva de gasto. Aunque para la estación hay varios registros para dos periodos (1994-2001 y 2002-2012), estos se encuentran espaciados por varios años en algunos casos, no se registra una medición del error del aforo. La Figura 3-24 muestra la curva de gasto para la estación Caimancito, donde se observa que existe dispersión de los puntos que crea la curva nivel-caudal. La imagen para el periodo 2002-2011 se adjunta a este informe y evidencia que se realizaron menos aforos para dicho periodo de simulación. Esta información no evidencia que los registros de la estación sean completamente consistentes, pero tampoco descartan que se puedan presentar inconsistencias sobre el caudal que pasa por dicha estación. Ejemplos de dichas inconsistencias pueden ser: histéresis de la relación nivel caudal, afectación de la curva por presencia de vegetación, extrapolación de las mediciones y de la relación nivel-caudal en caudales altos, paso del fluido por secciones transversales



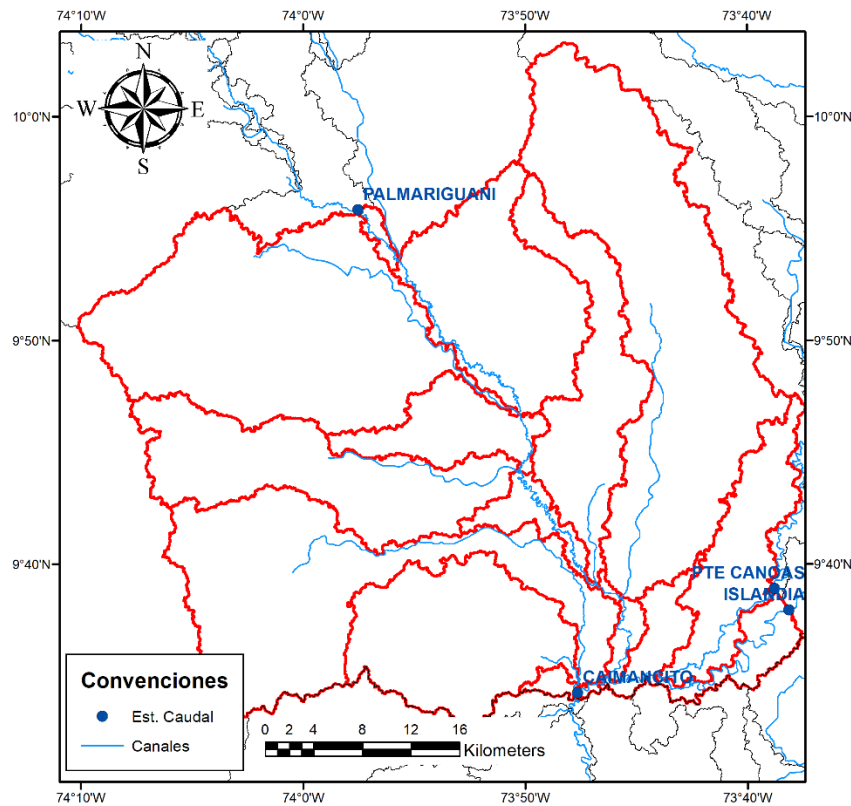
aledañas, entre otras. Los archivos y análisis de las curvas se adjuntan en el anexo 1 de este documento mediante la descripción de su ubicación en el servidor 25275 del IDEAM.



**Figura 3-24. Curva de gasto Nivel v.s. Caudal para la estación Caimancito en el periodo 1994-2001**

Otras investigaciones adicionales arrojaron alternativas para la implementación y la explicación de los resultados arrojados por el modelo para la estación Caimancito. El primer análisis se realizó a partir de imágenes satelitales de la zona que se encuentra entre las estaciones Puente Canoas [28037090], Islandía [28027160] y Caimancito [25027590]. El segundo consistió en determinar los requerimientos hídricos de los cultivos de Palma que se encuentran en la zona aferente a las estaciones. El tercero, se revisaron las concesiones emitidas por la Corporación Autónoma Regional del Cesar (CorpoCesar) y la información también contenida en el sistema de información del recurso hídrico. Cuarto, se revisaron las fallas geológicas de la zona. Quinto, se compararon los caudales simulados en las estaciones mencionadas contra la suma de los caudales observados.

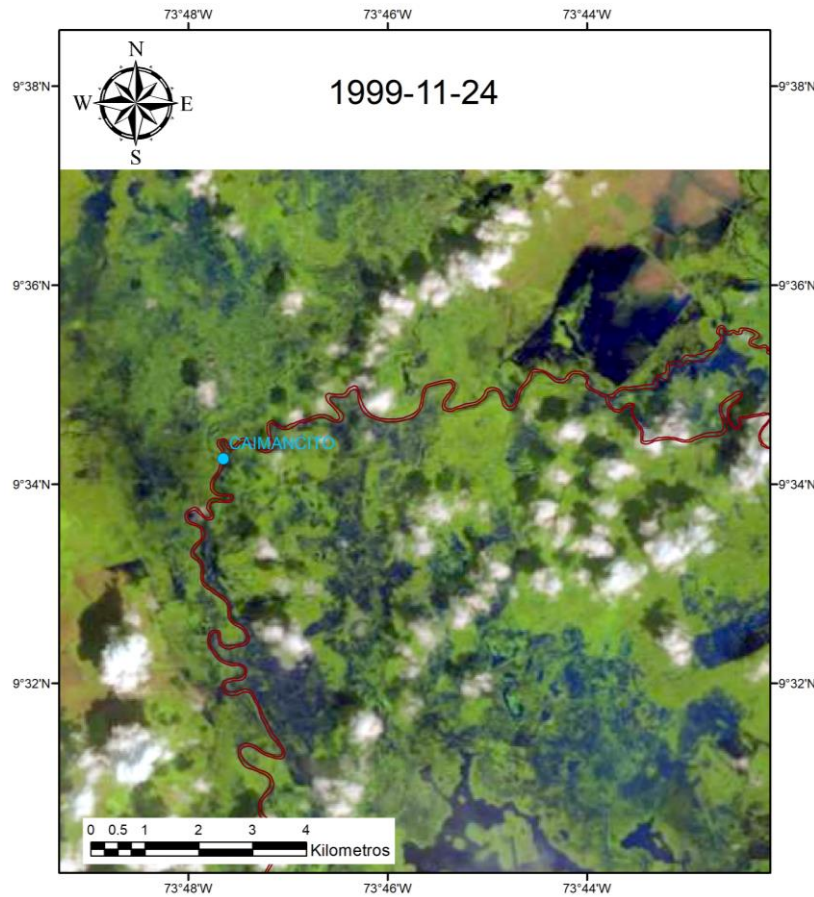
La Figura 3-25 muestra un detalle de las subcuencas del aplicativo SWAT y del territorio que se encuentra entre las 4 estaciones donde se realizaron los análisis.



**Figura 3-25. Detalle del área de drenaje entre estaciones**

### Imágenes satelitales

Con respecto a las imágenes satelitales, se enfocó la búsqueda en las épocas en que el modelo indicó una sobreestimación del caudal. Debido a los años en los que se realizó el análisis, se utilizaron imágenes Landsat (U.S. Geological Survey, 2016). La Figura 3-26 muestra como el volumen de agua que provenía de los ríos Ariguani y Cesar se desbordó antes de la estación Caimancito. Esto ocasionó que gran parte de la cantidad de agua no se registró en dicha estación de caudal, pero si ocurrió como es indicado por los resultados del aplicativo SWAT. A través de las gráficas de precipitación y caudal, también se constató que en el año 1999 las lluvias registraron valores superiores al tercer cuartil. Este tipo de situaciones también fueron corroboradas en otros periodos de tiempo donde el modelo también indicó sobreestimaciones con respecto al caudal observado, como el 2001 en el que el desbordamiento se dio en el costado occidental del río Ariguani y también en el costado occidental de la estación Caimancito. Así mismo, se analizaron imágenes para los eventos en los años 1987, 1988, 1990, 2007, 2010, 2012, 2017; para los años 1995 y 1996 no fue posible verificar los indicado por el modelo debido a que no hubo imágenes satelitales disponibles.



**Figura 3-26. Ejemplo de las inundaciones y desbordamientos ocurridos en la temporada invernal del año 1999 al rededor de la estación Caimancito**

Bajo los fenómenos observados en las imágenes satelitales, se ha reconocido que se debe ajustar el transito del caudal dentro de la representación del modelo. Esto se hace a través del ajuste del parámetro CH\_N en los canales donde se presenten los fenómenos (dicho parámetro se relaciona con la rugosidad y el transito del agua en el canal). Específicamente, se ajustó el valor sobre las subcuencas de los bloques 2 a 5, donde se evidenció la posibilidad de retrasos en el transito del caudal en los ríos. Este procedimiento produjo mejoras que sobre todo fueron notorias en la estación Caimancito.

### **Consumo hídrico de Palma**

Los análisis del consumo hídrico de palma de aceite se fundamentaron en módulos de consumo y el área cultivada. La palma es un cultivo permanente que demanda un consumo hídrico que se estima con base en la evapotranspiración potencial de cultivos de referencia y coeficientes de cultivo. Los módulos de consumo se multiplican por el área cultivada, permitiendo estimar el requerimiento hídrico total. En la Tabla 3-9 se pueden ver los módulos señalados por varios autores, para



diferentes condiciones climáticas, y que pueden usarse para estimar la demanda a través del ciclo climático intraanual.

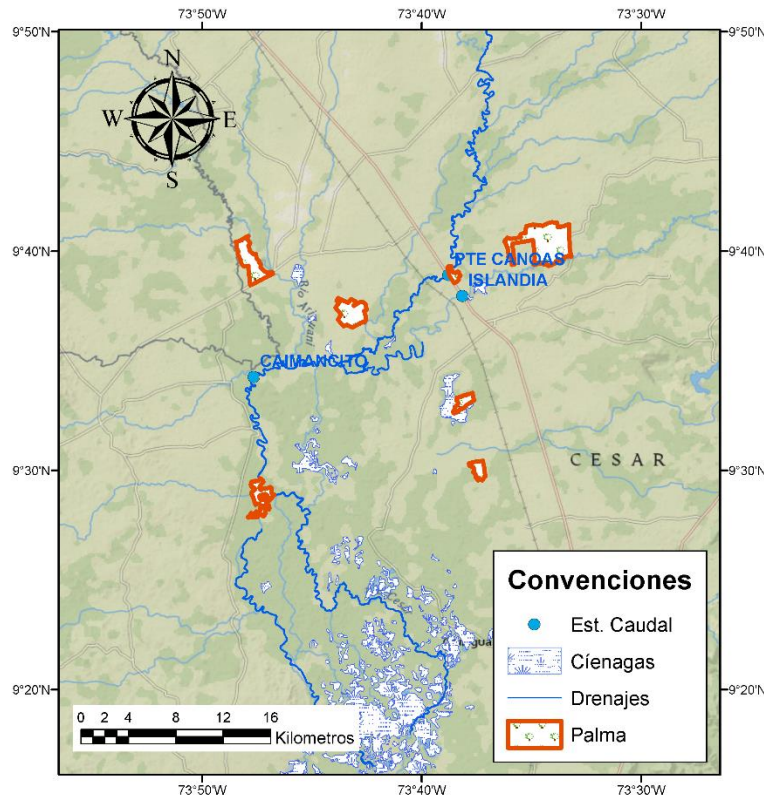
**Tabla 3-9. Módulos de consumo de Palma**

Fuente	Condiciones Meteorológicas	Consumo (mm/día)	Consumo (mm/año)
Safitri et al (2018)	Cond. Normales	3.73	1361.65
Goh (2000)	Cond. Secas	6	2190
Foong (1993)	Cond. Normales	5	1825
	Cond. Secas Extremas	7	2555

Se determinó el área de palma cultivada con base en el mapa de coberturas 2020 para la cuenca del río Cesar. Allí se detalla en algunos casos hasta la identificación de la palma y en algunos otros hasta el nivel “cultivos permanentes arbóreos” que fueron incluidos verificando con imágenes satelitales que fueran cultivos de Palma. Se filtraron los polígonos cercanos a la zona de la estación Caimancito, encontrando las áreas y consumos que se ven en la Tabla 3-10 y que se ven representados en la Figura 3-27. Para el ejercicio se tomó como modulo un valor de 6 mm/día que asegura tomar en cuenta todas las variaciones posibles en la demanda producto de las variaciones climatológicas.

**Tabla 3-10. Consumos de cultivos de Palma de aceite cercanos a la estación Caimancito**

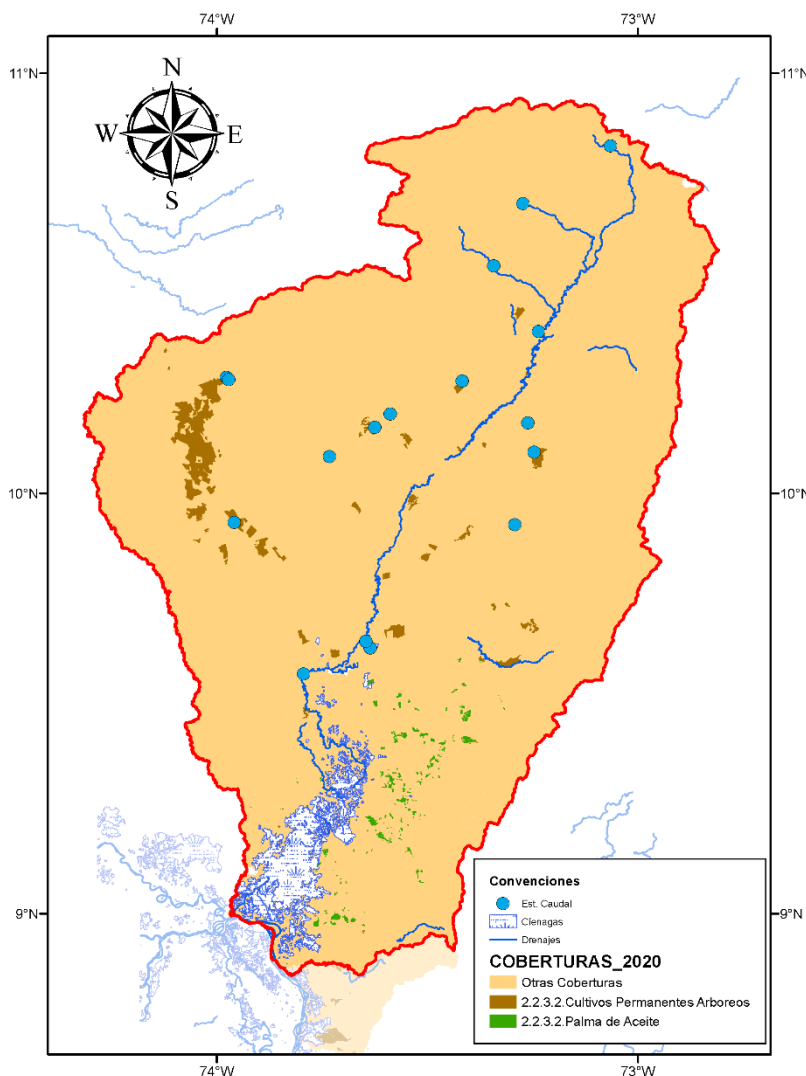
Leyenda	Área (ha)	Área (m <sup>2</sup> )	Demanda (mcs)
Total	3113.08	31130847.72	2.16



**Figura 3-27. Cultivos de Palma de Aceite aferentes a la estación Caimancito**

De este análisis se desprende que la demanda hídrica de estos cultivos es mucho menor que la diferencia de los caudales que se registró en el balance de masas que se realizó entre las cuatro estaciones.

Un segundo ejercicio realizado incluyó todos los cultivos de Palma que se encuentran en la subzona del bajo río Cesar, como se puede ver en la Figura 3-28. Esto corresponde a muchos más cultivos de los que se abastecerían desde los tramos entre las estaciones Islandia [28027160], Puente Canoas [28037090], Palmariguaní [28047050] y Caimancito [25027590], debido a que tienen otras fuentes de agua más cercanas. Este ejercicio determinó que la demanda hídrica de todas esas plantaciones es de aproximadamente 5.96 m<sup>3</sup>/s que sigue siendo menor a las diferencias de caudal encontradas en el balance de masas realizado entre las cuatro estaciones.



**Figura 3-28. Cultivos de Palma y permanentes arbóreos en la cuenca del río Cesar**

### **Concesiones corpoCesar e información SIRH**

De acuerdo con la información contenida en el Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH) para el departamento del Cesar se cuentan con 723 registros. Estos se encuentran clasificados por municipio, tipo de acceso, en algunos casos presenta las coordenadas del predio, zona hidrográfica e incluso subzona hidrográfica.

Con respecto a la información de las concesiones hídricas de CorpoCesar, se recibieron 1400 registros que se encuentran clasificados por municipio, fuente, derivación y en algunos casos presenta la coordenada del predio o establecimiento. A través de la localización, la fuente o del municipio se clasificó la concesión en alguna de las subzonas hidrográficas.

Al filtrar las fuentes mencionadas por subzona hidrográfica se encuentran los valores consignados en la Tabla 3-11.

**Tabla 3-11. Estimaciones de demanda hídrica hecha por diferentes fuentes**

Subzona	Permisos SIRH (mcs)	Concesiones CorpoCesar (mcs)	Demanda ENA2018 (mcs)	SUMA POMCAs
Alto Cesar	10.662	4.6	2.77	6.18
Medio Cesar	16.258	24.1	19.5	12.92
Río Ariguani	3.133	7.1	9.24	-
Bajo Cesar	5.380	7.09	8.64	8.64
Total	35.435	42.9	40.15	27.74

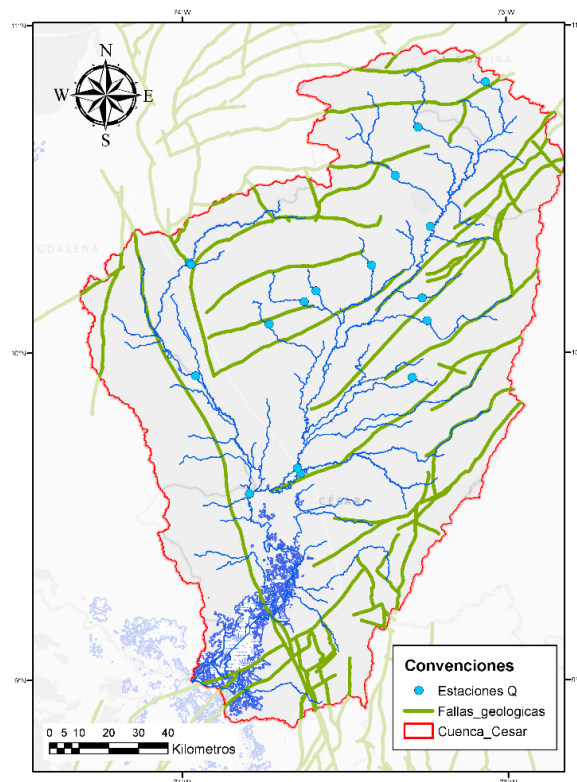
Asimismo, se logró consolidar algunas de las concesiones cercanas a los tramos entre las estaciones analizadas (Caimancito, Islandia, Puente Canoas y Palmariguani). Sólo fue posible llegar hasta el nivel municipal debido a que no todas las concesiones se encuentran georreferenciadas. En la Tabla 3-12 se registra la suma de las concesiones para cada municipio en la zona mencionada de análisis. Se puede ver que el total del caudal concesionado no alcanza tampoco la diferencia de caudales del análisis del balance hecho entre las cuatro estaciones. Al descartar estos datos como la causa de la diferencia de caudal entre las estaciones Puente Canoas, Caimancito y demás indicadas anteriormente, se busca verificar que la diferencia de caudales se debe a la infiltración y percolación desde el canal donde se transita el agua.

**Tabla 3-12. Concesiones de CorpoCesar cercanas a la estación Caimancito**

Fuente	Municipios (Q en mcs)				
	BOSCONIA	CHIMICHAGUA Y ASTREA	EL PASO	VALLEDUPAR Y EL PASO	Total (Q en mcs)
AGUAS LLUVIAS	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
CAÑO TINAJITAS	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01
POZO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
RIO ARIGUANI - ARIGUANICITO	0.00	0.00	0.51	0.00	0.51
RIO CALENTURITAS	0.00	0.00	0.56	0.00	0.56
RIO CESAR	0.00	0.12	0.00	0.00	0.12
RIO GARUPAL	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02
SUBTERRANEA	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01
Total (Q en mcs)	0.01	0.12	1.09	0.02	1.24

### Fallas geológicas

En la Figura 3-29 se puede ver que varias fallas geológicas se encuentran sobre, cercanas o paralelas a los cauces del río Cesar. Se destaca en el POMCA del bajo Cesar -ciénaga de Zapatosa que los sistemas de fallas no son aislados, sino que se encuentran interconectados (CorpoCesar; Consorcio Guatapurí-Cesar, 2016). Si se observa en la zona que comprende los drenajes hacia la estación Caimancito, es decir aguas abajo de las estaciones Palmariguaní, Puente Canoas e Islandia, se ve que se presentan fallas geológicas muy cerca y sobre los cauces de los ríos. Aunque el trasado y posición de las fallas geológicas tiene incertidumbre, su ubicación cercana a las posiciones y tramos de los cauces es un indicio de que la infiltración y percolación que se identifica en el modelo SWAT puede estar sucediendo debido a que el agua percola por dichas fallas. Es decir que a través del lecho del canal percola agua hacia el subsuelo en su tránsito hacia la estación Caimancito, causando que se registre un menor caudal en la estación Caimancito que en la suma de los caudales de las estaciones aguas arriba.



**Figura 3-29. Fallas geológicas en la cuenca del río Cesar**

Sin embargo, al consultar el mapa geológico de Colombia y perfiles estratigráficos, se encuentra que en el subsuelo hay formaciones del periodo Cuaternario y Terciario. Se evidencia que los depósitos de esos periodos en la zona aguas abajo de la estación Puente Canoas y Caimancito, pueden almacenar agua en acuíferos, pero no tienen el espesor suficiente para recibir la diferencia de caudal encontrado en el ejercicio de balance entre las cuatro estaciones.



## Suma de caudales simulados y observados

Se realizó un análisis enfocado en la suma de los caudales simulados en las estaciones aguas arriba de la estación Caimancito. Esto se realizó, teniendo en cuenta los posibles flujos por caños difluentes del río Cesar, percolaciones por el lecho del canal, entre otras razones que causan el desbalance evidenciado en el balance hecho entre las cuatro estaciones. Ese desbalance se obvia en los siguientes ejercicios mediante la suma de los caudales de las 3 estaciones de caudal aguas arriba de la estación Caimancito y el traslado de la serie de tiempo hasta la posición de la estación mencionada. Esto también implica la suposición de que en las subcuencas intermedias o terreno entre esas tres estaciones y la estación Caimancito no ingresa o se retira masa de agua. El único egreso en este ejercicio sería la serie de tiempo de esa estación virtual. En las siguientes figuras, siempre se encontrarán la serie de tiempo observada en la estación Caimancito en color azul; en color verde se registra la suma de las series de tiempo observada en las estaciones Palmariguaní, Puente Canoas e Islandia; en color rojo se encuentra una serie de tiempo simulada por el aplicativo SWAT proveniente de varios ejercicios.

En la Figura 3-30 se pueden ver las series observadas mencionadas y la serie en rojo que es producto de sumar las series simuladas en las tres estaciones aguas arriba de Caimancito (Palmariguaní, Puente Canoas e Islandia). Se puede ver que existe una buena correspondencia entre la suma de los datos observados y la suma de las series simuladas. Se presentan algunas sobreestimaciones en algunos periodos de tiempo, como por ejemplo las curvas de recesión en los años posteriores a 1998 y en los picos de los años 1999 y 2000. Si se compara contra la serie original de la estación Caimancito, se observan las mismas sobreestimaciones reportadas en los ejercicios de calibración anteriores.

En un segundo ejercicio se comparó la serie simulada por el aplicativo SWAT en la posición de la estación Caimancito, contra la suma de los caudales observados en las tres estaciones aguas arriba de la estación Caimancito (ver Figura 3-31). Esa serie simulada no fue objeto de ajuste de parámetros en el bloque 5 pero si en los demás bloques (bloques que ajustaron todas las estaciones aguas arriba de la estación Caimancito). Se puede observar que las simulaciones son similares a las mostradas en la Figura 3-30 pero tienen una mayor sobreestimación, debido a que en este caso el modelo si está teniendo en cuenta la producción de agua de la región intermedia entre las 4 estaciones. Se sigue presentando sobreestimaciones en algunas curvas de recesión, y también la sobreestimación contra lo registrado en Caimancito es bastante alta. Para este caso se evidencian picos de caudales diarios que se deben a que no se modificaron los parámetros de tránsito del caudal, con lo que no se atenúan los pulsos de lluvias diarios que generan esos picos repentinos de caudal.

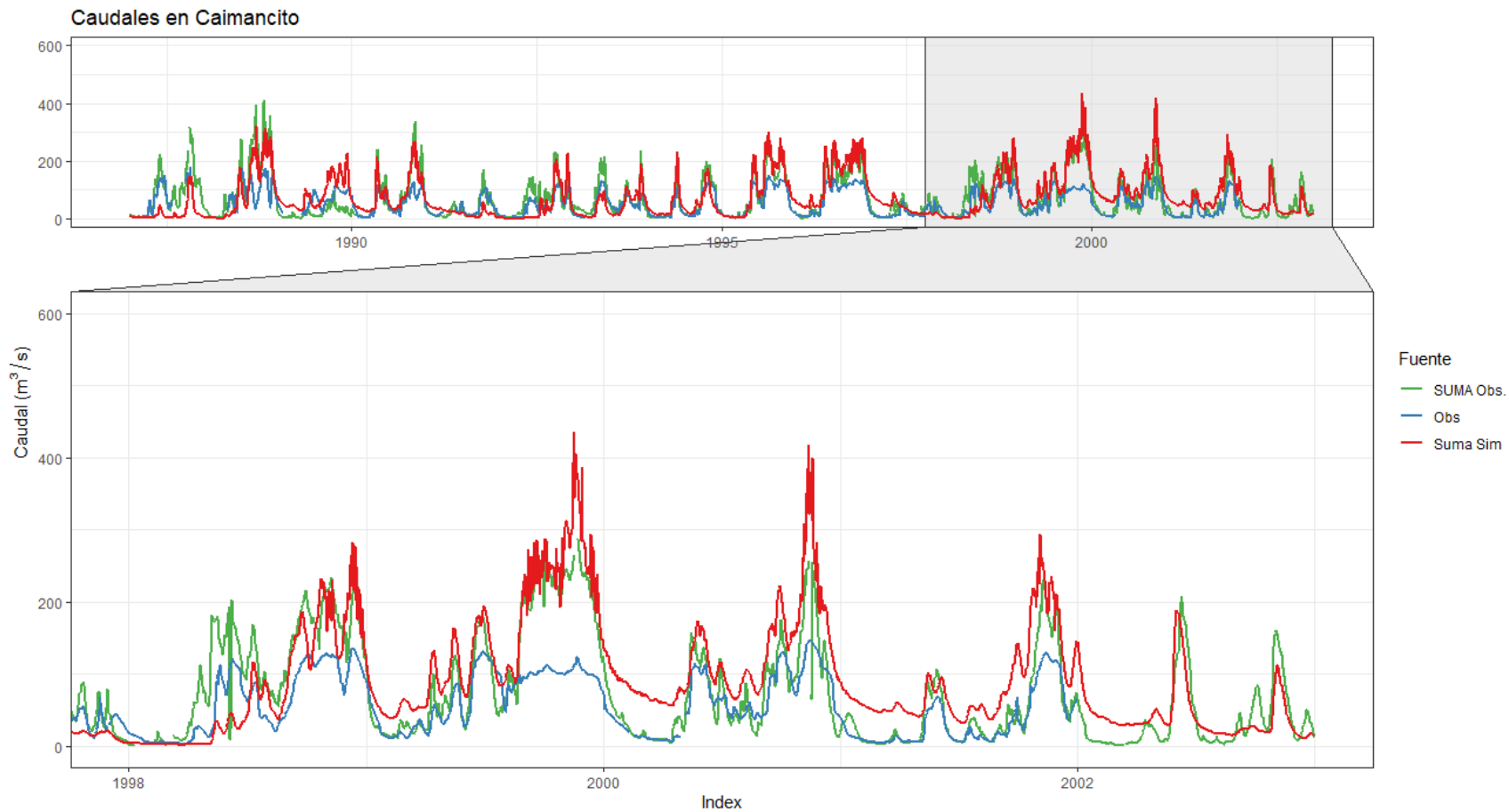
En la Figura 3-32 se muestra la serie simulada en la estación Caimancito realizando ajustes de parámetros para que se represente la serie original de Caimancito. El



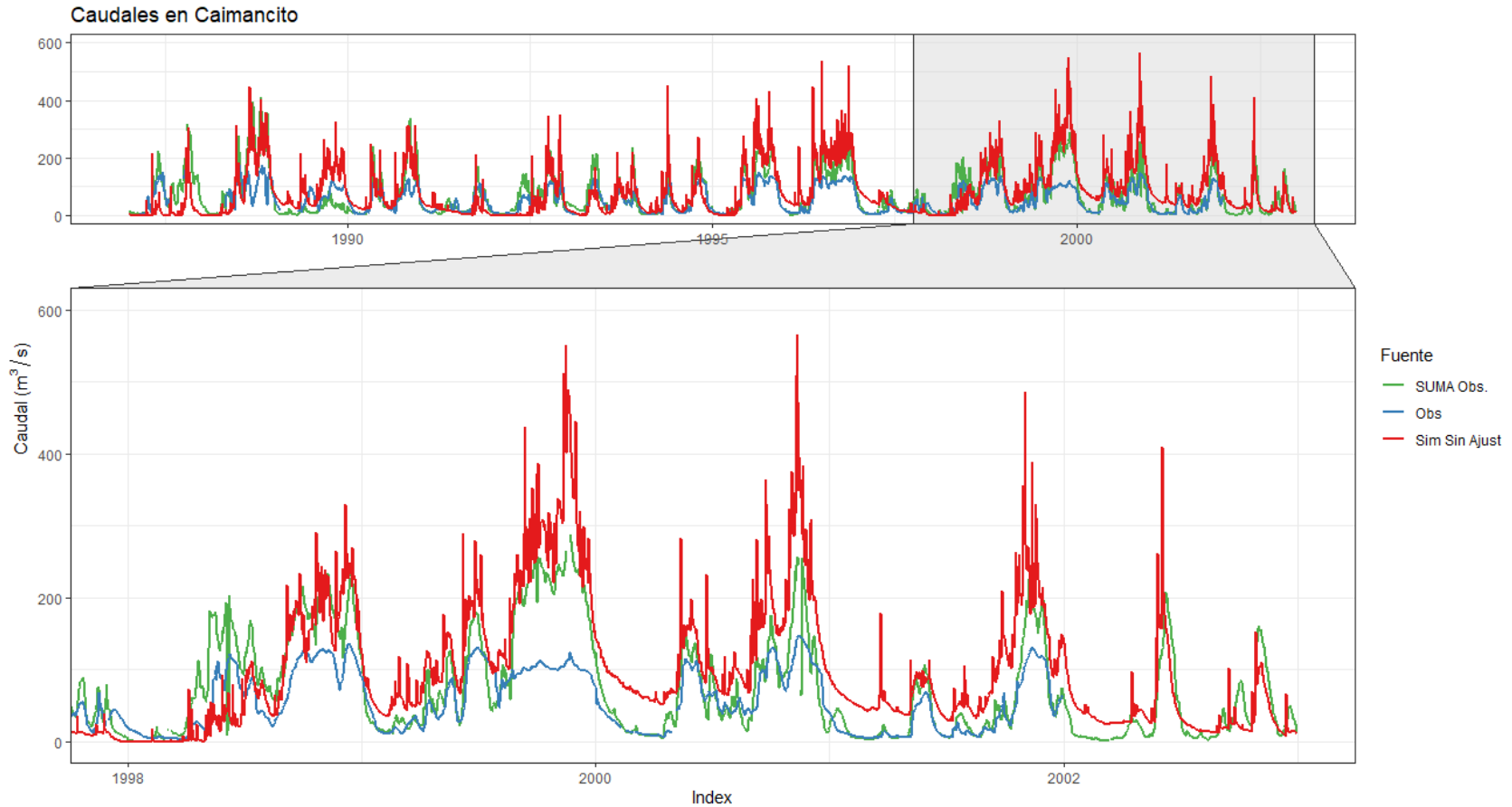
ajuste de parámetros se realizó en el bloque 5 que incluye aquellas subcuencas que se encuentran en la región entre las 4 estaciones. Se compara también contra la suma de las estaciones aguas arriba de la estación en cuestión. Se puede ver que el ajuste de parámetros del aplicativo genera una buena correspondencia entre las simulaciones y los datos observados en la estación Caimancito. También se detalla que en el año 1999 el exceso de agua simulada es consistente con la suma de los caudales observados, en otros periodos se presenta subestimación contra la suma de los observados debido a que el ajuste buscó representar la serie observada en la estación Caimancito. Se debe resaltar que en el panel superior de la figura se puede ver que por ejemplo para los años 1988, 1990, 1991, 1995 y 1996, existe una buena correspondencia entre con la serie de la estación Caimancito, lo que da cuenta del ajuste general de las simulaciones.

En la Figura 3-33 se puede ver la serie simulada por el aplicativo en la posición de la estación Caimancito pero bajo una condición de ajuste a una serie sintética. La serie sintética observada se constituyó por la suma de los caudales observados en las tres estaciones aguas arriba. El ajuste de parámetros se realizó en el bloque 5 que incluye aquellas subcuencas que se encuentran en la región entre las 4 estaciones. Se puede ver que hay una buena correspondencia debido al ajuste de parámetros incluso existe un buen ajuste en los picos de caudal de las dos temporadas invernales de los años 1995 y 1996 que fueron registrados en las tres estaciones aguas arriba de Caimancito, y que en la serie original de la estación Caimancito no se registraron. Los caudales del año 1999 concuerdan con la serie sintética a excepción del pico más alto de noviembre. Se siguen presentando sobreestimaciones de la curva de recesión sobre todo posteriores a grandes épocas invernales. Se aclara que este ejercicio de ajuste a las series sintética buscar evidenciar que en el sector resaltado en la Figura 3-25 se presentan fenómenos que están alterando el flujo desde las estaciones Palmariguaní, Puente Canoas e Islandia. Algunos de estos fenómenos físicos han sido tenidos en cuenta en el aplicativo SWAT pero a pesar esto no se logra representar a cabalidad los datos registrados en la estación Caimancito.

Las figuras presentadas en esta sección se adjuntan en el anexo 2 de este documento y se detalla su ubicación en el servidor 25275 del IDEAM en el anexo 1.



**Figura 3-30. Suma de simulaciones y de las observaciones en las tres estaciones aguas arriba de Caimancito**



**Figura 3-31. Simulación en Caimancito sin ajustar parámetros en el bloque 5 comparado contra la suma de las observaciones en las tres estaciones agua arriba de Caimancito**

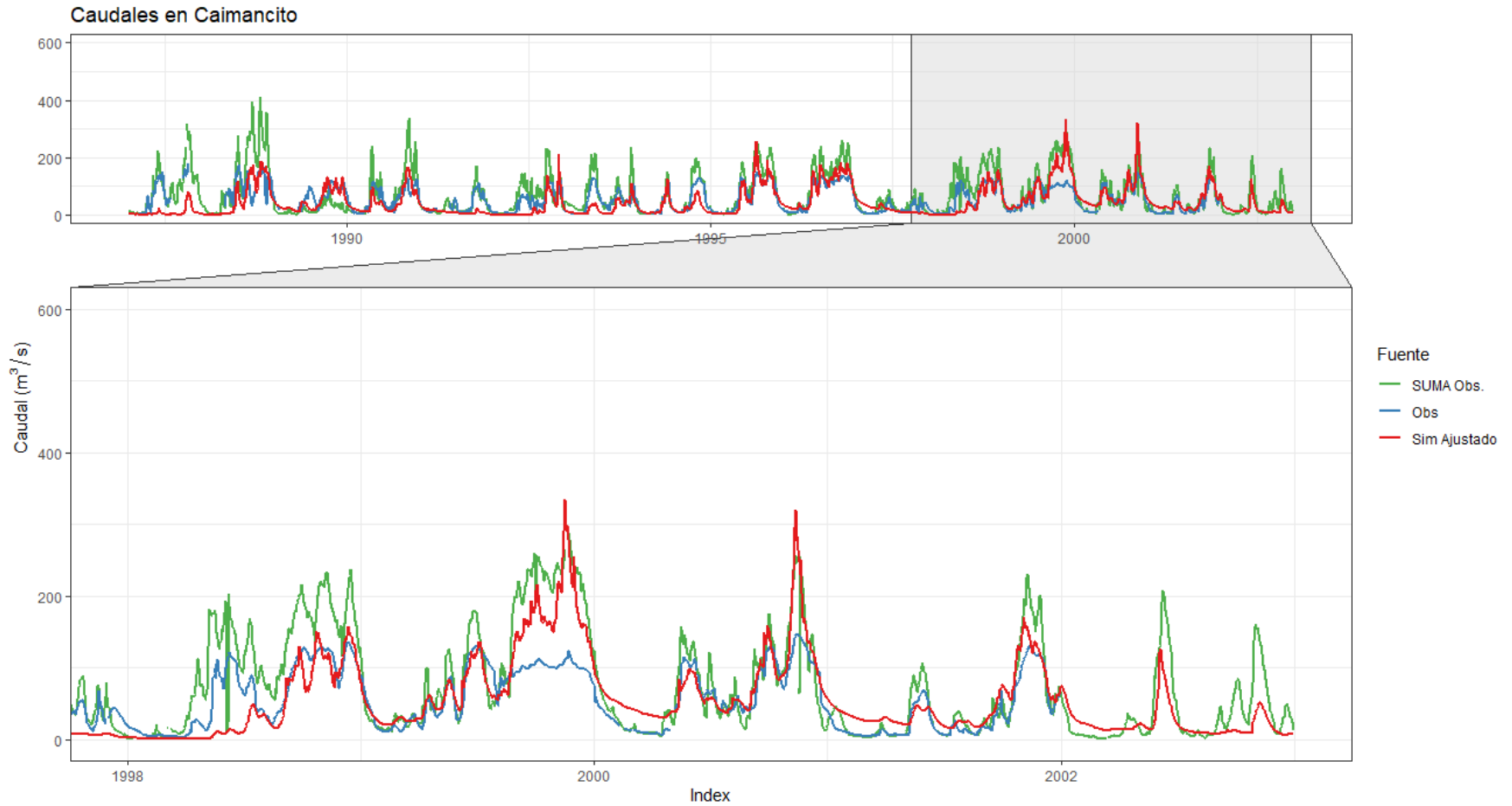
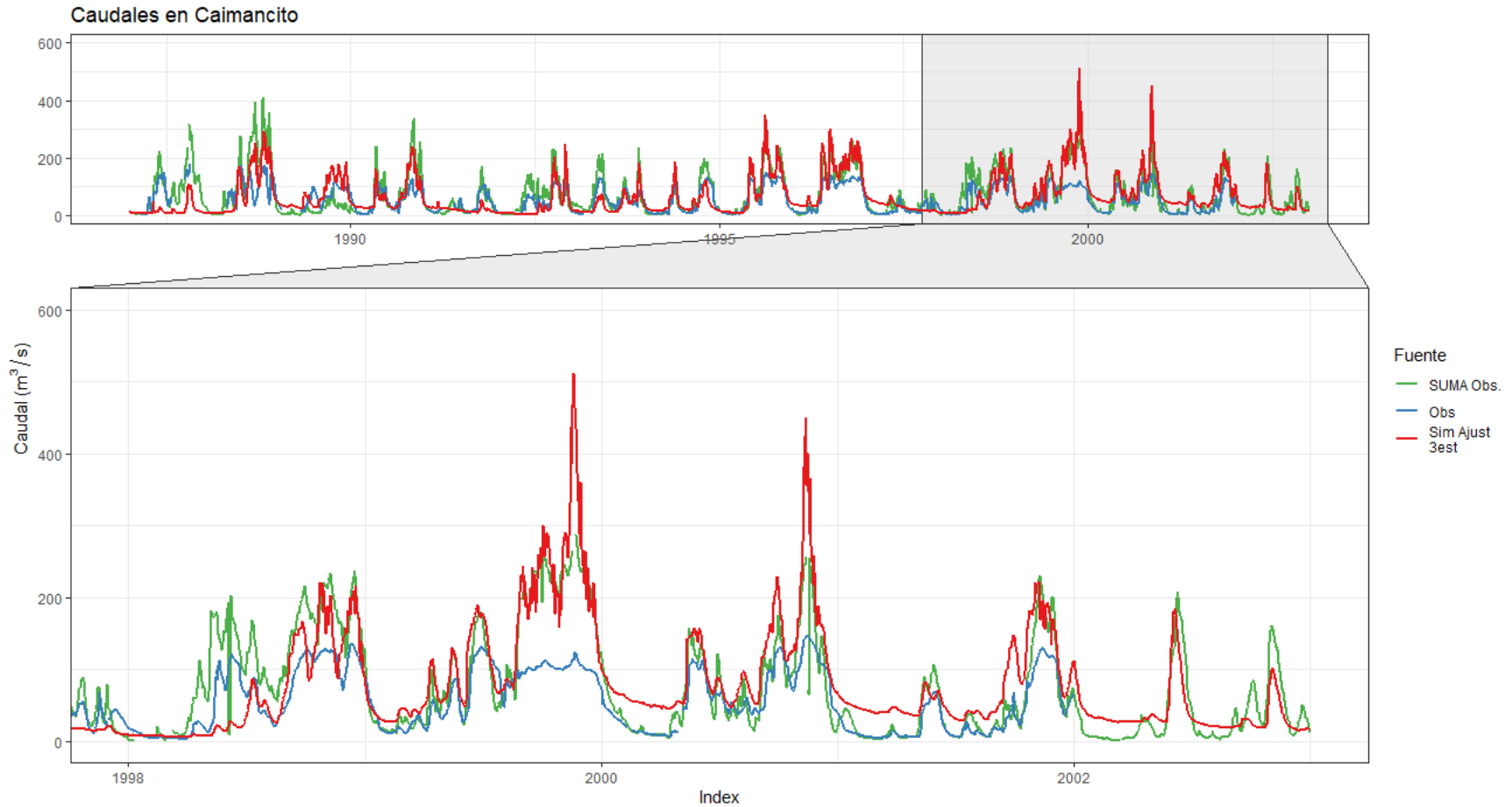


Figura 3-32. Simulación en Caimancito, ajustando los parámetros para reproducir la serie original de Caimancito



**Figura 3-33. Simulación en Caimancito, ajustando los parámetros para reproducir la serie de la suma de las estaciones Palmariguaní, Puente Canoas e Islandia**

## Implicaciones y recomendaciones sobre los análisis realizados a la estación Caimancito

Considerando que:

- se encontró que la estación Caimancito presenta un caudal menor que la suma de los caudales de las estaciones aguas arriba.
- Asimismo, se identificaron periodos en los cuales las simulaciones del aplicativo hidrológico SWAT indicaban un caudal mucho mayor que los caudales observados; que en dichos periodos se encontró con imágenes satelitales que se producían desbordamientos por zonas aledañas a la sección transversal donde se encuentra la estación Caimancito.
- Igualmente, considerando que se revisaron estimaciones complementarias de la demanda a través de los registros de captaciones en el Sistema de Información del Recurso Hídrico y de las concesiones otorgadas por CorpoCesar. Que esas estimaciones focalizadas a la zona de influencia de los cauces que van hacia la estación Caimancito, no evidenciaron una extracción de agua que pudiera igualar la diferencia de caudal que se da entre la suma de las estaciones y la estación Caimancito.
- Que además se realizó la estimación del requerimiento hídrico del cultivo de Palma, cultivo que en la zona tiene grandes extensiones, a pesar de que dicho cálculo ya está incluido en la estimación de demanda de agua hecha en los POMCAs y en el ENA2018; que dicho análisis también reveló que la cantidad de agua requerida es de aproximadamente 2.18 m<sup>3</sup>/s que tampoco es suficientemente grande para explicar las diferencias de la estación Caimancito.
- Igualmente se debe resaltar que el aplicativo SWAT logra los flujos de caudal en la estación Caimancito a través de ajustar la percolación del agua en el canal en la que se transita; se resalta también que dicha percolación puede estar correlacionada con las estructuras geológicas que siguen las mismas direcciones y en algunos casos las posiciones de los tramos de cauces, pero que el espesor de las capas geológicas que se encuentran en el tramo comprendido entre Puente Canoas y Caimancito no es suficiente para almacenar todo el volumen de agua que se reportó en la diferencia de las estaciones.

Se desprende de todos los análisis que:

- una explicación probable a la diferencia del balance hídrico entre las estaciones Palmariguaní, Islandia, Puente Canoas y Caimancito, es que el agua principalmente percola por el lecho del cauce compuesto por materiales aluviales porosos (CorpoCesar; Consorcio Guatapurí-Cesar, 2016), y que en algunos periodos el río Cesar y el río Ariguaní desbordan sus cauces principales causando que el volumen de agua que fluía no fuera registrada en la estación. Estos dos fenómenos en conjunto explican las diferencias evidenciadas en el ejercicio de balance que se hizo sobre las cuatro estaciones.
- En el aplicativo SWAT lo anterior se ve representado a través de los ajustes de los parámetros de percolación y de excluir del análisis de desempeño esos periodos donde, con imágenes satelitales, se evidenciaron desbordamientos en el flujo que no pueden ser representados por un aplicativo hidrológico. Sin embargo, esto solo constituye unos eventos particulares que no afectan en gran medida



el desempeño general del aplicativo hidrológico y que mantiene un buen desempeño en los otros periodos de tiempo.

Se recomienda que del ajuste de parámetros hecho al bloque 5:

- Se tenga en cuenta los valores encontrados para ajustar las simulaciones a los registros de la estación Caimancito, así exista duda sobre dichos registros.
- Aunque el ejercicio con la serie sintética aplicada a la posición de la estación Caimancito haya producido buenos resultados, sigue siendo una serie sintética que ingresa incertidumbre al ajuste de parámetros; se recomienda consolidar el ajuste de Caimancito buscando otros fenómenos de desbordamiento y percolación y la forma de ser representados en el aplicativo hidrológico.
- Buscar formas alternativas de subdividir la agrupación de subcuencas que se definieron para el bloque 5.

Posterior a los análisis realizados con respecto a las inundaciones, se modificaron algunos valores asociados al tránsito del caudal. Por tanto, se consignan en la Tabla 3-13 los valores posteriores a esos ajustes. En la Tabla 3-14 se muestran los valores para el ejercicio del bloque 5 en el que se determinaron unos parámetros para representar la serie de caudales sintéticos en la estación Caimancito.

**Tabla 3-13. Variación de los parámetros ajustados, caso cuenca del río Cesar**

Parámetro	Variación	BQ1. Montaña	BQ2. Planicie 1	BQ3. Planicie 2	BQ4. Planicie 3	BQ5. Planicie 4
CN2	Relativa	-0.583	-0.618	-0.501	-0.402	-0.645
RCHRG_DP	Reemplazo	0.163	0.790	0.856	0.168	0.579
SOL_AWC	Relativa	2.125	3.553	1.225	2.280	5.404
SOL_K	Relativa	-0.755	-0.709	-0.675	0.012	-0.988
GW_DELAY	Relativa	-0.922	-0.481	7.85	-0.637	7.93
CH_K	Reemplazo	86.294	38.960	14.623	227.394	205.06
ALPHA_BF	Reemplazo	0.620	0.367	0.305	0.984	0.613
CH_N	Reemplazo	0.014	0.061	0.265	0.224	0.150
TRNSRCH	Reemplazo	0.20				

**Tabla 3-14. Parámetros del bloque 5 para ajustar la serie sintética en Caimancito**

Parámetro	Variación	BQ5. Planicie 4
CN2	Relativa	-0.308
RCHRG_DP	Reemplazo	0.598
SOL_AWC	Relativa	-0.745
SOL_K	Relativa	-0.612
GW_DELAY	Relativa	8.06
CH_K	Reemplazo	86.294
ALPHA_BF	Reemplazo	0.819
CH_N	Reemplazo	0.228



### 3.4.4.4 Datos de caudal para el acople del aplicativo hidrológico con el aplicativo de modelación hidráulica

Se describe a continuación el traspaso de información entre el aplicativo hidrológico y el hidráulico para la cuenca del río Cesar y el complejo cenagoso de la ciénaga de Zapatosa. Dadas las necesidades de información de cuerpos de agua que son afluentes a la ciénaga, se extrajeron las series de tiempo de caudal en los puntos de control que se definieron como afluentes a la ciénaga en el producto 4, bajo los criterios allí descritos. Otros afluentes de la ciénaga que no cumplen con los requisitos pueden ser extraídos en el futuro bajo las siguientes opciones:

- Definir el cuerpo de agua afluente, delimitar su área de drenaje, la identificación de las unidades de respuesta hidrológica (HRUs) que se encuentran dentro de ese territorio.
  - Se procede a determinar las series de tiempo de escorrentía de cada HRU dentro del área drenada por el cuerpo de agua, el porcentaje de área que ocupan dichos HRUs sobre la cuenca del cuerpo de agua.
  - Se realiza un promedio ponderado de las series de tiempo de escorrentía teniendo en cuenta los porcentajes determinados
- Definir el cuerpo de agua afluente, delimitar su área de drenaje, redefinir la subcuenca planteada en el aplicativo mediante subdivisión.
  - Delimitar la cuenca afluente a la ciénaga
  - Subdividir la subcuenca actual del aplicativo en la cuenca de interés afluente a la ciénaga y otra subcuenca intermedia
  - Reconstruir el aplicativo y asignar los factores de calibración ya hallados para la zona a las dos subcuencas redefinidas
  - Extraer las series de tiempo de interés de la nueva entidad que representa el cuerpo de agua de interés.

Los cuerpos de agua que son afluentes a la ciénaga y cumplieron con los criterios definidos para el traspaso de información son enuncian en la Tabla 3-15, las coordenadas se encuentran en el sistema Magna Colombia Bogotá.

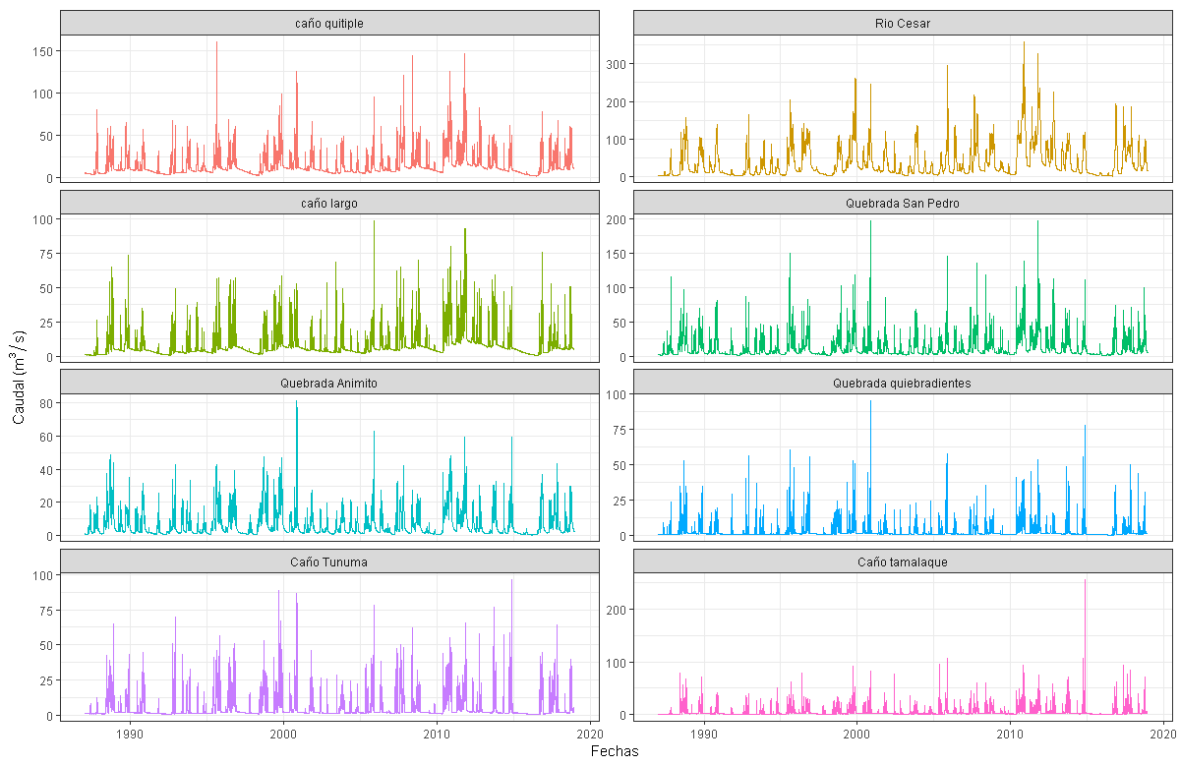
**Tabla 3-15. Cuerpos de agua escogidos para acoplar con el modelo hidrodinámico**

Cuerpo de agua afluente a la ciénaga	Subcuenca aplicativo	Este	Norte
caño Quitiple	149	1029874.29	1483480.4
Río Cesar	152	1032108.91	1483008.17
caño largo	160	1043835.48	1506172.93
Quebrada San Pedro	162	1036284.55	1519824.62
Quebrada Animito	169	1040412.5	1531062.13
Quebrada quiebradientes	170	1048848.6	1518636.97
Caño Tunuma	184	1045285.53	1515636.82
Caño Tamalaque	185	1046473.11	1531351.13



Los datos de las series de tiempo y el shapefile con las coordenadas de los puntos de descarga de los cuerpos de agua a la ciénaga se adjuntan a este documento y su ruta dentro del servidor 25275 se detalla en el anexo 1.

La Figura 3-34 muestra las series de tiempo de caudal de los afluentes definidos. Se puede ver que las series de tiempo también presentan un ciclo bimodal y que dependiendo del tamaño de la cuenca extraída la atenuación de los picos con respecto a la duración de las curvas de recesión varía. Es decir, para cuencas pequeñas como el Caño Tunuma o la quebrada Quebradientes, existen picos de caudal muy altos pero con curvas de recesión muy cortas. Por el contrario, para cuencas grandes como la quebrada Animito o el río Cesar, se tienen picos más bajos con curvas de recesión más amplias.



**Figura 3-34. Series de tiempo de los afluentes escogidos a la ciénaga de Zapatosa**

### 3.4.5 Calibración cantidad de sedimentos

Tomando en cuenta los ensayos de sensibilidad de sedimentos presentados en el producto 5, se realizaron los siguientes ajustes a los parámetros de sedimentos como se muestran en la Tabla 5-4. En cada caso se tuvo un objetivo como se describirá en la tabla, pero se debe resaltar que también se siguió una estrategia de escalera en la cual se ajustaron los parámetros de los bloques 1 y 2 que drenan hacia la estación Puente Salguero [28037030], para proseguir con el bloque 3 que drena hacia la estación Puente Canoas [28037090] y por último modificar los parámetros

en los bloques 4 y 5 que drenan hacia la estación Caimancito [25027590]. Se debe resaltar que a pesar de hacer modificaciones al bloque 1, los resultados en las estaciones [28017080] y [28047010] no presentaron cambios considerables en el comportamiento temporal y solo se vieron incrementados o disminuidos los valores originalmente reportados. Las estrategias de calibración también se basaron en mantener los parámetros lo más cercanos a los valores originalmente ingresados al modelo a partir de las capas de suelos y coberturas.

**Tabla 3-16. Procedimiento de ajuste de parámetros relacionados para la cantidad del agua seguido para la cuenca del río Cesar**

Opción	No. Sim.	Desempeño General	Objetivo/Observaciones
Bloques 1 y 2	1000 simulaciones (bloques 1 y 2)	$KGE_{prom} = 0.015$	Se busca evidenciar la influencia de los parámetros USLE_P y USLE_K en las simulaciones de las estaciones asociadas al bloque 1 y 2 ([28017080], [28047010] y [28037030]). Se comprueba que no se presentan cambios en la variación temporal de las simulaciones en las series de transporte a escala mensual.
	40 simulaciones manuales (Bloque 1)	-	Variación del parámetro USLE_K de forma individual para confirma lo encontrado por las 1000 simulaciones anteriores. Se confirma que se mejora un poco el desempeño de algunos picos de transporte al dejar un valor de aumento relativo del 36%.
			Variación del parámetro USLE_P de forma individual para confirma lo encontrado por las 1000 simulaciones anteriores. Se confirma que se mantiene un buen desempeño de algunos picos de transporte al dejar un valor cercano al valor original ingresado al modelo que es de 1 (valor correspondiente a ninguna practica de conservación, en los documentos POMCA para las zonas del bloque 1 no se evidencia que haya prácticas de conservación de suelos)
40 simulaciones manuales (Bloque 2)	-	Variación del parámetro USLE_K en las subcuencas del bloque 2 de forma individual para confirma lo encontrado por las 1000 simulaciones anteriores. Se encuentra que se obtiene un buen desempeño de algunos picos de transporte en la estación Puente Salguero al redirigir el valor del parámetro a sólo un aumento relativo del 3%.	

			<p>Variación del parámetro USLE_P de forma individual en el bloque 2 para confirma lo encontrado por las 1000 simulaciones anteriores. Se confirma que se mantiene el mejor desempeño de la variación intraanual de los picos de transporte al dejar un valor cercano al valor original ingresado al modelo que es de 1 (valor correspondiente a ninguna practica de soporte o conservación, en los documentos POMCA para las zonas del bloque 2 no se evidencia que haya prácticas de conservación de suelos)</p> <p>Al final de estos ajustes se tienen una representación del ciclo intraanual de transporte, pero se sigue presentando una subestimación en la estación Puente Salguero y las estaciones aguas abajo (Puente Canoas y Caimancito) tomando en cuenta que no se han ajustado los parámetros hacia aguas abajo.</p>
A_SPCON	20 simulaciones manuales (intento 1)	KGE <sub>prom</sub> = 0.47	Se varía el parámetro en un rango amplio (0.0001, 0.01) para experimentar los efectos sobre todas las estaciones siendo que en el análisis de sensibilidad no se tuvo un cambio significativo en el orden de magnitud. Se descubre que un leve aumento mejora la subestimación que se encontró en las anteriores iteraciones. El valor original asignado por el modelo es 0.0001
	20 simulaciones manuales (intento 2)		Se varía el parámetro en un rango mucho más estrecho (0.0001, 0.001) descubriendo que un valor de 0.0003 genera un mejor en la estación Puente Salguero y también mejora el desempeño en Puente Canoas y Caimancito, siendo que el parámetro se aplica a toda la cuenca
Simulaciones en Bloque 3	40 simulaciones manuales	KGE <sub>PteCanoas</sub> = 0.66	Ajuste del parámetro USLE_K en el bloque 3. Se busca un mejor desempeño en el rango de cambio relativo (-0.5, 0.5) donde se encuentra que solo se modifican un poco las simulaciones en el periodo 1995-1996 por cambiar el valor del parámetro y que esto conlleva un muy leve aumento en la función objetivo. En consecuencia, se deja un cambio relativo muy cercano a 0 (-0.0463) porque el cambio del

			<p>parámetro no es significativo en el aumento del desempeño.</p>
	1000 simulaciones		<p>Ajuste del parámetro USLE_P en el bloque 3. Se busca un mejor desempeño en el rango 0.5 a 1, donde se encuentra que solo se modifican un poco las simulaciones por cambiar el valor del parámetro y que esto no conlleva un aumento en la función objetivo. En consecuencia, se deja el valor original ingresado al modelo porque tampoco se encontraron evidencias de prácticas de soporte o conservación en los documentos consultados principalmente los POMCAs para la zona.</p>
			<p>Se realizaron 1000 simulaciones automáticas para corroborar los valores de los parámetros USLE_K y USLE_P encontrados en las simulaciones manuales. Se confirma las tendencias evidenciadas en las simulaciones manuales.</p>
Bloque 4 y 5	1000 simulaciones (bloque 4)	$KGE_{Caimancito} = 0.22$	<p>Simulaciones que tuvieron por objetivo evidenciar la influencia que tiene el bloque 4 sobre los estimados de transporte de sedimentos en la estación Caimancito [25027590]. Se evidencia que en el bloque se debe reducir el valor del USLE_P cercanos a 0.9 y el USLE_K a -0.45 para que haya influencia o mejoría sobre lo simulado en la estación Caimancito.</p>
	2000 simulaciones (bloque 5)		<p>Simulaciones que tuvieron por objetivo evidenciar la influencia que tiene el bloque 5 sobre los estimados de transporte de sedimentos en la estación Caimancito [25027590]. Se evidencia que en el bloque se debe reducir el valor del USLE_P cercanos a 0.4 y el USLE_K a -0.75 para que haya influencia o mejoría sobre lo simulado en la estación Caimancito.</p>

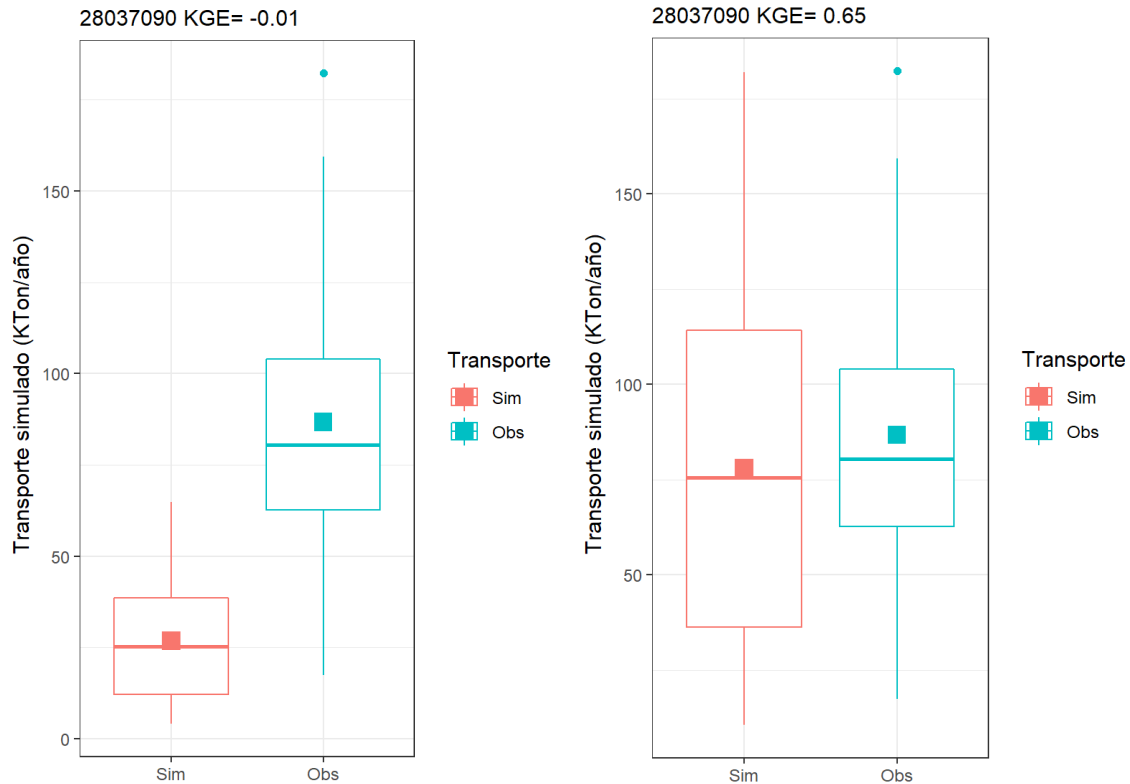


	<p>2000 simulaciones (bloque 4 y 5)</p>		<p>Simulaciones que buscaron las posibles combinaciones de los parámetros USLE_K y USLE_P tanto en el bloque 4 y en el 5. Se corroboró que con la combinación con los valores encontrados para el bloque 4 y los valores de 0.5 y -0.79 para el bloque 5, se logra reducir la cantidad de sedimentos simulados</p>
--	---	--	--

### 3.4.5.1 Descripción de los resultados del transporte de sedimentos simulados y observados en el periodo para calibración (1987-2002)

Se describe aquí los análisis de la comparación entre las simulaciones y los datos observados de transporte de sedimentos. Las descripciones se harán tomando en cuenta que la ecuación universal de pérdida de suelos fue formulada para obtener estimados de largo plazo de erosión hídrica. Por tanto, se empezará por analizar los resultados a escala anual multianual, para posteriormente ir detallando con escalas menores.

La Figura 3-35 muestra la variación interanual de la producción de sedimentos antes y después del ajuste de parámetros en los bloques 1, 2 y 3, cuyos efectos se ven reflejados en la estación Puente Canoas. Previo al ajuste se presentaba una subestimación de la cantidad de sedimentos simulados con respecto de los observados (panel izquierdo). A través de los ajustes se logró representar el transporte anual multianual con un error de 11 % (diferencia entre los puntos cuadrados sobre los boxplot, en el panel derecho). Se puede ver que la distribución atemporal en las simulaciones ajustadas se encuentra entre 15 y 180 KTon/año que es aproximadamente el mismo rango que las observaciones de transporte de sedimentos.



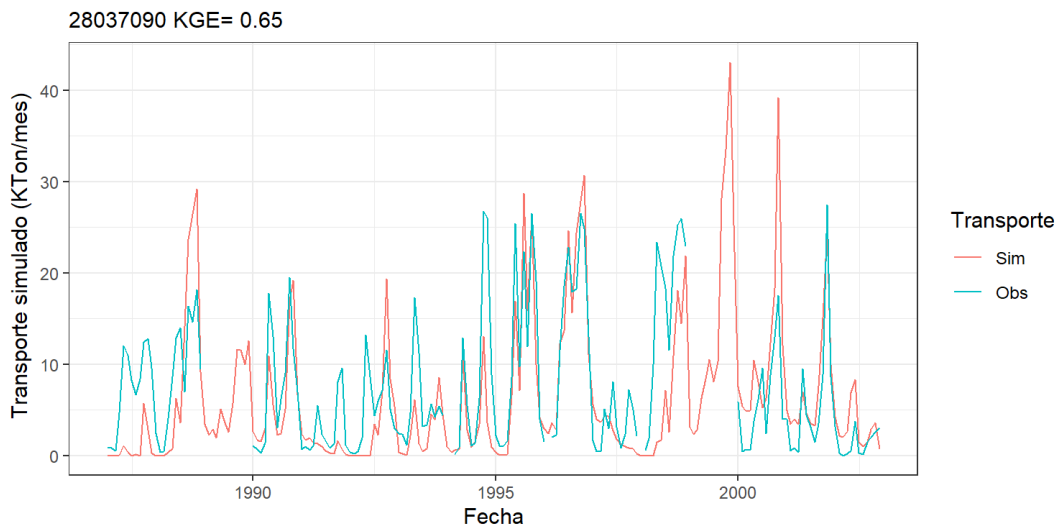
**Figura 3-35. Variación anual multianual del transporte de sedimentos en la estación Puente Canoas. Sin ajustar a la izquierda y ajustada a la derecha.**

La Figura 3-36 muestra que también hay una correspondencia temporal a escala anual entre las simulaciones y las observaciones. Se puede ver algunas subestimaciones para los años 1993 y 1994 propias de las estimaciones de la modelación. Las gráficas de las demás estaciones se adjuntan a este documento en el anexo 2. Para las demás estaciones se presenta una correspondencia temporal pero también con subestimaciones. Se resalta el caso de la estación Puente salguero en la que 1987, 1988 y 1990 los valores observados fueron bastante altos, datos que no pudieron ser bien representados por la simulación; asimismo la estación Islandia presentó subestimaciones consistentes lo que aparenta ser debido al ajuste de los parámetros USLE\_K y USLE\_P en el bloque 5.



**Figura 3-36. Transporte de sedimentos anual para la estación Puente Canoas**

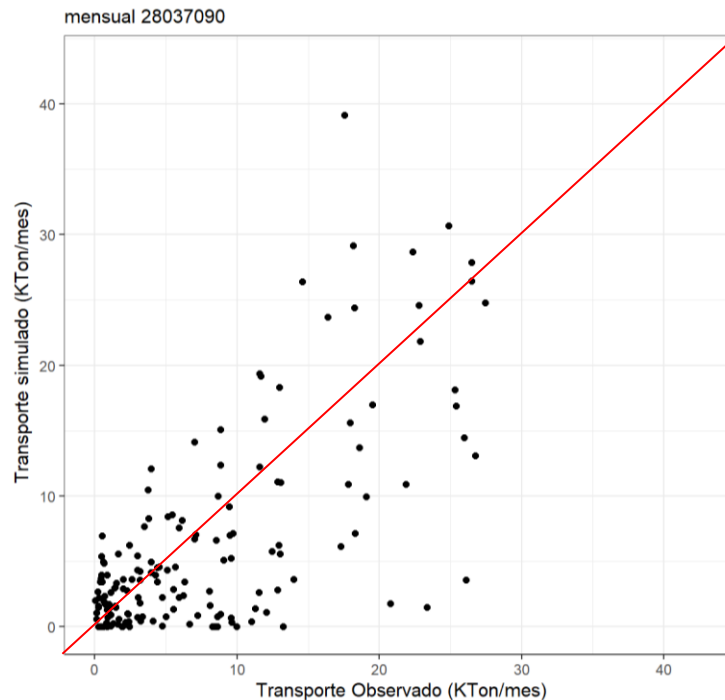
A escala mensual se puede ver que también hay una correspondencia temporal y de la variación intranual que también es registrada en los datos observados. La Figura 3-37 muestra las series para la estación Puente Canoas donde se observan algunas subestimaciones para los años 1987, 1991 y 1997. Para las demás estaciones se puede observar una correspondencia temporal de las simulaciones con las observaciones, pero se debe resaltar que para la estación Puente Salguero se tienen valores mensuales bastante altos para las dos temporadas invernales de los años 1987, 1988 y la segunda de 1990. Las gráficas de las demás estaciones se adjuntan a este documento en el anexo 2.



**Figura 3-37. Transporte de sedimentos mensual en la estación Puente Canoas.**

La correspondencia mensual también fue evaluada a través de scatter plots. La Figura 3-38 muestra también la correspondencia entre simulaciones y

observaciones a escala mensual para la estación Puente Canoas, donde se puede ver que para valores bajos y medios los puntos se agrupan alrededor de la línea de 45°. Para los valores altos también se encuentra una correspondencia alrededor de la línea, pero con una varianza mayor, es decir más dispersos. Para las demás gráficas que se adjuntan a este documento en el anexo 2, se puede ver algo similar a lo descrito para la serie de tiempo mensual, las estaciones Puente Salguero e Islandia presentan subestimaciones para algunos meses en particular.



**Figura 3-38. Scatter plot del transporte de sedimentos mensuales en la estación Puente Canoas**

Del ajuste de los parámetros relacionados con la producción y el transporte de sedimentos se encontraron los valores consignados en la Tabla 3-6, valores que producen las simulaciones descritas en este numeral. Se aprecia que los valores de los parámetros SPCON, SPEXP y ADJ\_PKR, están muy cercanos a los valores originales predefinidos por la construcción del modelo lo que indica que los datos ingresados son adecuados para representar los procesos físicos que se dan en la cuenca. Se debe resaltar que se debió ajustar los parámetros USLE\_K y USLE\_P en mayor medida para algunos bloques, pero que el cambio en algunos fue ínfimo (USLE\_K en bloques 2 y 3, y USLE\_P en bloques 1 a 4). Esas modificaciones se contrastaron en el caso del USLE\_P con la información contenida en documentos de gestión del territorio para la zona, principalmente POMCAs, como se describió en la Tabla 5-4. Para el caso del USLE\_K, se hace un reemplazo relativo con el fin de mantener la distribución espacial de los valores ingresados con base en la información de suelos que, además, según los valores encontrados, fueron

bastante cercanos a los ingresados en la construcción del modelo para los bloques 1, 2 y 3.

**Tabla 3-17. Variación de los parámetros ajustados para la fase de sedimentos, caso cuenca del río Cesar**

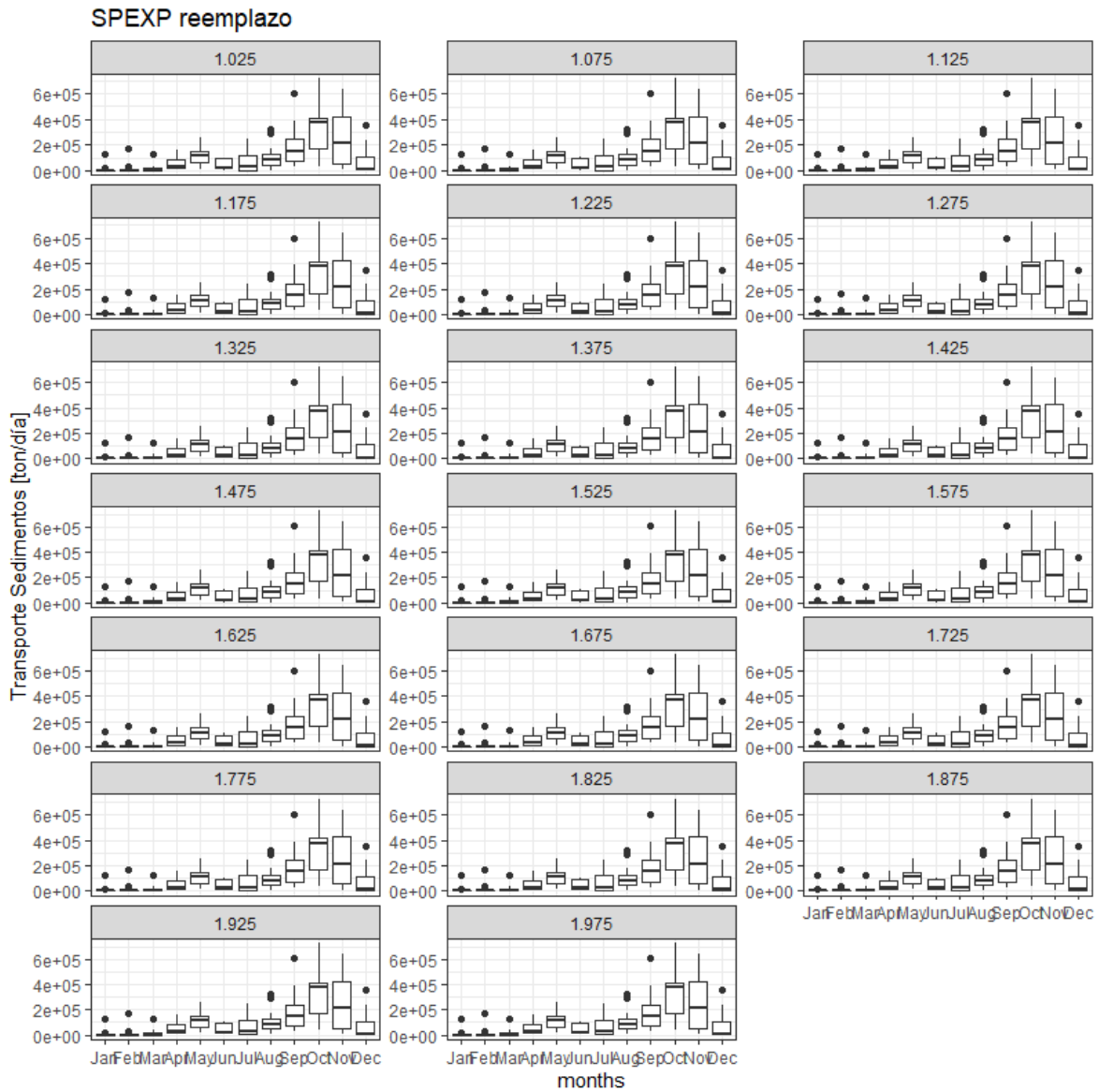
Parámetro	Variación	BQ1. Montaña	BQ2. Planicie 1	BQ3. Planicie 2	BQ4. Planicie 3	BQ5. Planicie 4
SPCON	Reemplazo	0.003				
SPEXP	Reemplazo	1				
USLE_K	Relativa	0.3655	0.03	-0.0463	-0.465	-0.7912
USLE_P	Reemplazo	0.94	1	1	0.895	0.5015
ADJ_PKR	Reemplazo	1				

Las demás figuras relacionadas con el transporte de sedimentos simulados y observados para la cuenca del río Cesar, se adjuntan a este documento en el anexo 2.

### 3.4.5.2 Ajustes a los parámetros que controlan la cantidad de sedimentos

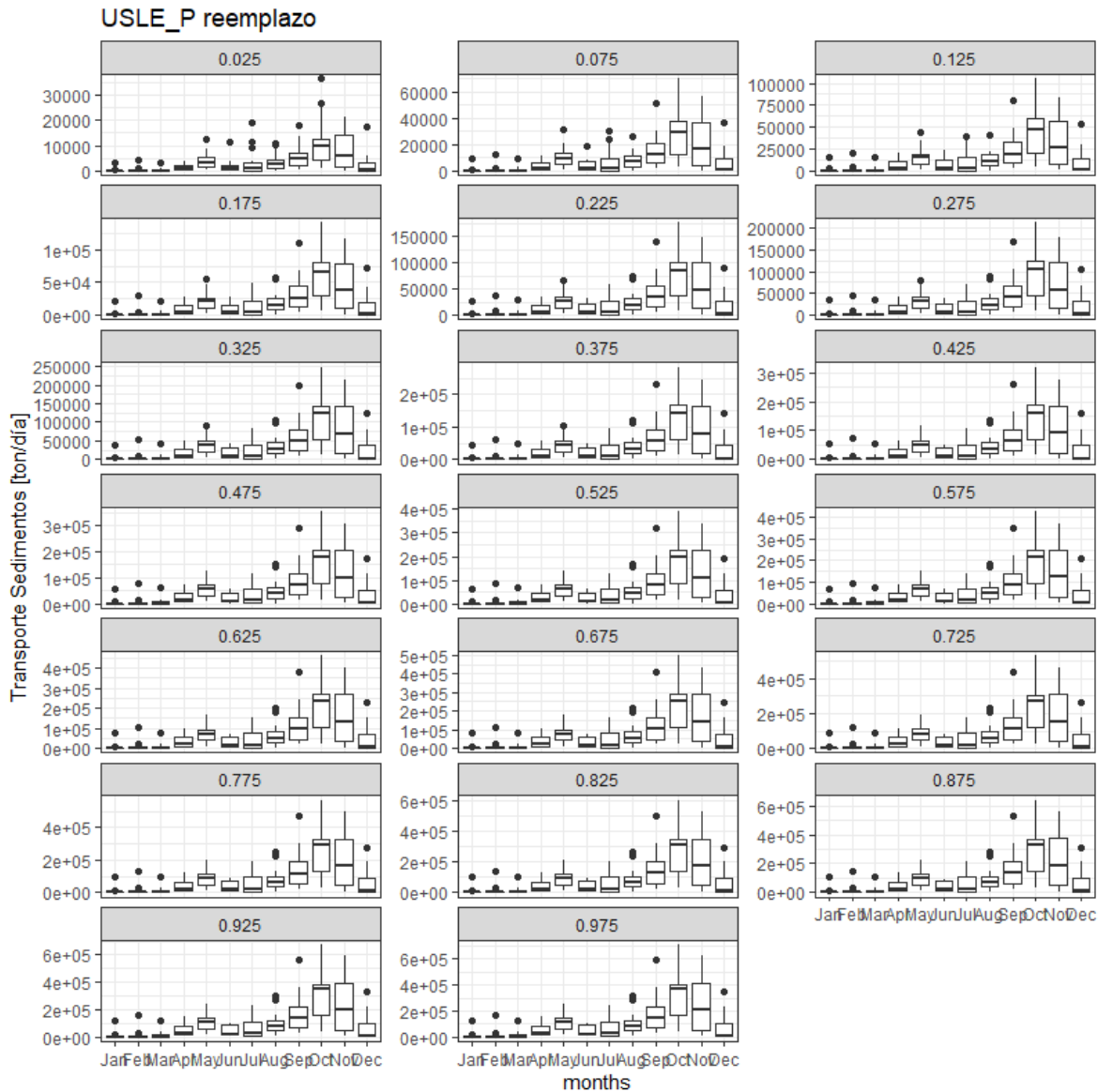
La determinación de los sedimentos en el aplicativo SWAT se hace a partir de la Ecuación Universal de Perdida de Suelo Modificada (MUSLE, por sus siglas en ingles) (William & Berndt, 1977).

De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada en el producto 4, se identificaron que parámetros influenciaban el comportamiento de las simulaciones de sedimentos. Sobre estos parámetros se realizaron muestreos en el rango parametral posible para analizar su influencia sobre las simulaciones de la cantidad de sedimentos producidos en el modelo. Los análisis se realizaron sobre la estación Pte Salguero [28037030]. En la Figura 3-39 y Figura 3-40 se puede ver como al variar algún parámetro se producen cambios, en el encabezado de cada panel se encuentra el valor del parámetro ensayado. Para el parámetro USLE\_P se registraron principalmente cambios en el valor de la producción total de sedimentos, pero no en la variabilidad temporal de los estimados; mientras que al variar el SPEXP no se registran cambios en el transporte de sedimentos, tampoco en la variabilidad temporal ni en la producción total de sedimentos. El análisis de las variaciones sobre estos parámetros y los demás ensayados se puede ver en la Tabla 3-18.



**Figura 3-39. Cambios en los estimados de sedimentos producto de variar el parámetro SPEXP en la cuenca del río Cesar**





**Figura 3-40. Cambios en el transporte de sedimentos simulados debido al cambio en el parámetro USLE\_P para la cuenca del río Cesar**

**Tabla 3-18. Análisis de los cambios por variación en los parámetros asociados a los sedimentos**

Estático	Razón de no calibrar	Sensible y priorizado [Rango posible]	Efecto sobre el transporte de sedimentos
USLE_C	Este parámetro se ha establecido bajo muchos experimentos para diferentes coberturas, se	PRF (0,1]	Al reducir este parámetro se registró un aumento de la producción de sedimentos. No



	<p>realizaron análisis de cambios en las simulaciones debidos al cambio en el parámetro. No obstante, no se modificará este parámetro debido a que la bibliografía indica que se ha identificado su valor claramente para los diferentes tipos de coberturas.</p>		<p>evidencia incidencia en la variación temporal de la estimación.</p>
SPCON	<p>Este parámetro no generó cambios apreciables en los estimados de producción de sedimentos. Por tal razón se deja con el estimado previo.</p>	USLE_K	<p>La variación del parámetro evidencia una gran influencia sobre la producción de sedimentos. También se observa una influencia sobre la estimación temporal de la cantidad de sedimentos, con la reducción del parámetro se evidencia una mayor reducción sobre los meses de la primera temporada invernal.</p>
CH_COV1	<p>Este parámetro no generó cambios apreciables en los estimados de producción de sedimentos. Por tal razón se deja con el estimado previo.</p>	ADJ_PKR	<p>Con la reducción del parámetro se reduce de manera significativa la producción de sedimentos. No se evidencia cambio en la variabilidad temporal de la estimación.</p>
CH_ERODMO	<p>Este parámetro no generó cambios apreciables en los estimados de producción de sedimentos. Por tal razón se deja con el estimado previo.</p>	USLE_P	<p>Con la reducción del parámetro se reduce de manera significativa la producción de sedimentos. No se evidencia cambio en la variabilidad temporal de la estimación.</p>

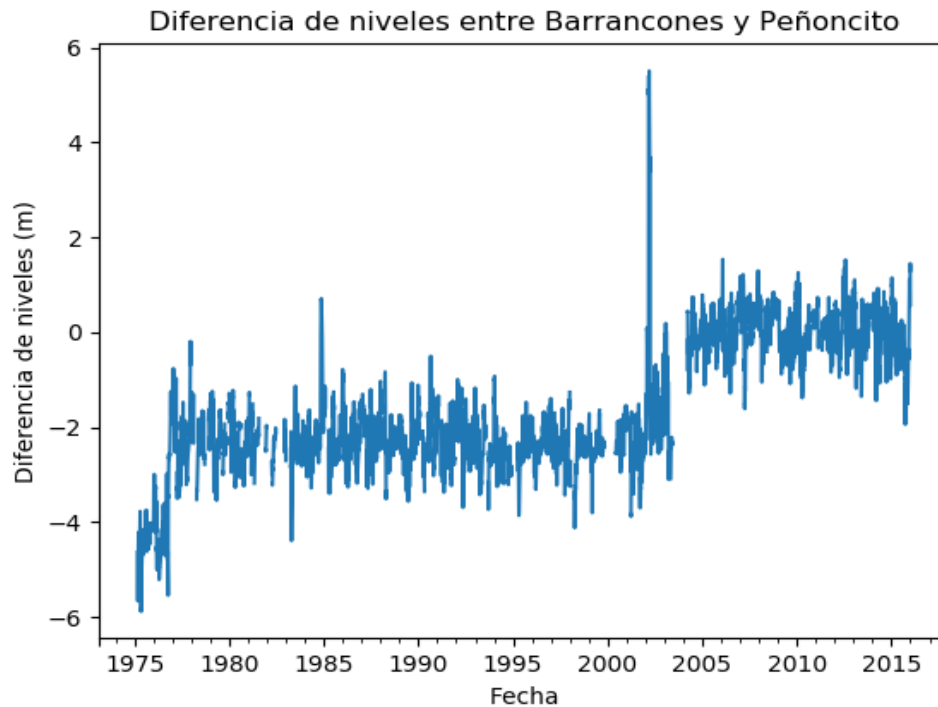
## 4. MODELO HIDRODINAMICO COMPLEJO CENAGOSO CIENAGA ZAPATOSA

### 4.1 MODELO CONCEPTUAL

Una primera aproximación del funcionamiento de la Ciénaga está dada por el trabajo presentado en el artículo Modelación de balances hídricos de ciénagas fluviales y costeras colombianas presentado (Díaz-Granados, Camacho, & Maestre, 2001), este basa su análisis en una modelación de balance de masa, que brinda una aproximación de los volúmenes de agua que ingresan y abandonan la ciénaga para diferentes periodos de tiempo, para esta modelación fue empleado un paso de tiempo de diez días y se cubrió la ventana de tiempo 1977-1994. Debe considerarse que dada la escala de este estudio no es posible considerar variabilidad espacial dentro del cuerpo de agua.

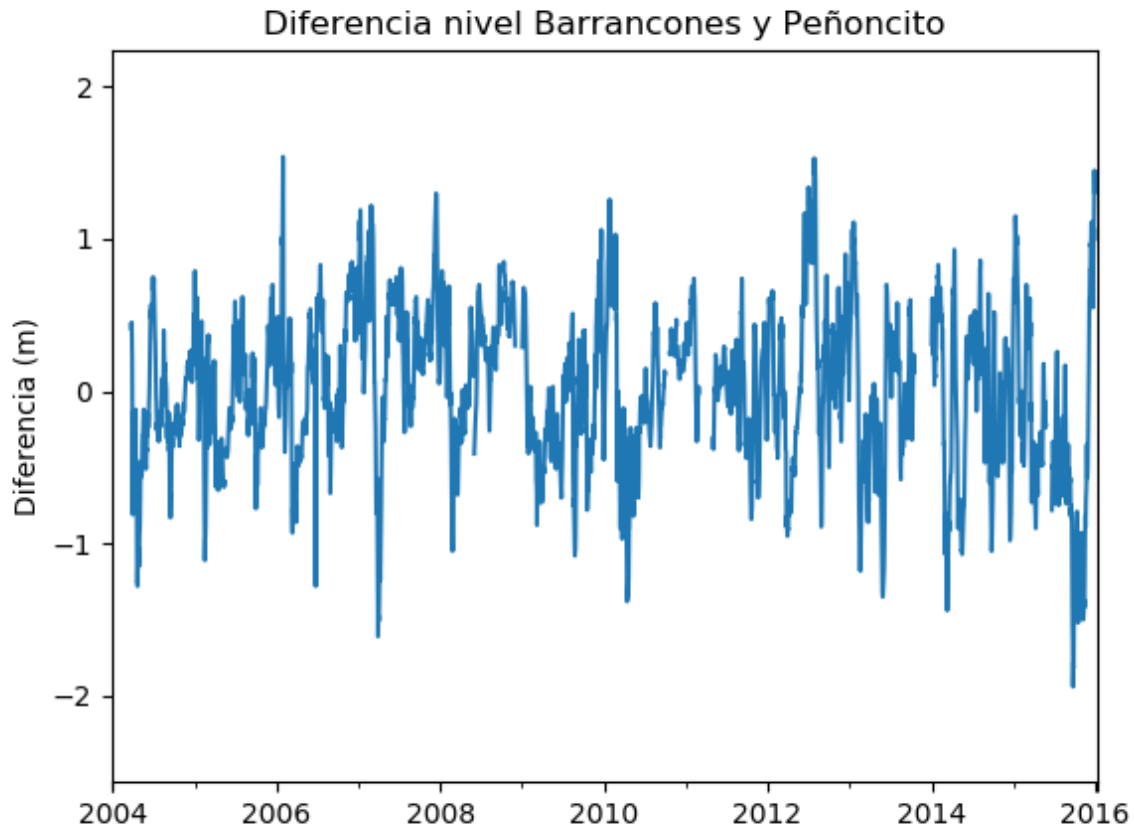
En este artículo se presenta un modelo conceptual de la dinámica de la ciénaga, en el que esta se conecta únicamente al Río Magdalena a través del Río Cesar, destacando que en el pasado existía la conexión por los Caños Patón y Tamalacué, pero dicha conexión se encuentra actualmente interrumpida por varios diques y terraplenes. Esta descripción brindará entonces una primera aproximación de la configuración de las condiciones de frontera para un modelo piloto, se destaca que, aunque el Río es bidireccional, predomina el flujo en dirección Ciénaga-Río, por lo que la Ciénaga principalmente evacúa la escorrentía de la cuenca del Río Cesar. De acuerdo a los resultados presentados en el documento se estima que el flujo Río-Ciénaga se da en el periodo de marzo a mayo, este criterio podrá ser considerado para los aforos a realizar, considerando que la condición de frontera correspondiente al Río Magdalena, serán requeridos los valores de las variables de estado a modelar, para la otra época del año en que el río Cesar funcione como una salida de la Ciénaga, estos valores cumplirán la función de validación de los valores obtenidos por el modelo a la salida del dominio computacional. En esta modelación también se considera como escenario la rehabilitación de la conexión por medio del Caño Patón, se estimó que en promedio los caudales de entrada a la Ciénaga por este Caño serían de  $15 \text{ m}^3/\text{s}$ , teniendo este una capacidad hidráulica entre  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $35 \text{ m}^3/\text{s}$  siendo inferior a las entradas esperadas desde el Magdalena (hasta  $150 \text{ m}^3/\text{s}$ ), caso en el cual se presentarían desbordamientos, se estimó que la entrada de agua hacia a la Ciénaga a través de este caño se daría en los meses de mayo, junio, julio, septiembre, octubre, noviembre y diciembre.

Un análisis de la diferencia de los niveles registrados en las estaciones, permitiría inferir las direcciones del flujo entre la Ciénaga y el Río para diferentes periodos, de manera exploratoria se ha realizado un análisis con las estaciones limnimétricas disponibles en la zona, en donde el cambio en la dirección de la pendiente de la superficie de agua sería testigo de la bidireccionalidad del río Cesar en su desembocadura al Magdalena.



**Figura 4-1. Diferencia de los niveles registrados por las estaciones de Peñoncito (corriente Magdalena) y la estación de Barrancones (Ciénaga de Zapatosa).**

La Figura 4-1, muestra la diferencia aritmética entre los niveles registrados entre las dos estaciones, aproximadamente a partir del año 2003, se presenta una marcada diferencia entre los valores observados, en donde la media de la diferencia de los valores observados, es cercana a 2m, a partir del año 2004 se aprecia un comportamiento (esta se presenta en la Figura 4-2), en que la diferencia de los niveles está centrada en el valor de cero y se muestran fluctuaciones entre -2m y 1.5m, lo que de manera exploratoria, parece indicar un registro más adecuado, teniendo en cuenta la naturaleza bidireccional del Río Cesar en su desembocadura, descrito por (Díaz-Granados, Camacho, & Maestre, 2001) y la cercanía geográfica de las estaciones, este hecho entonces indica la necesidad de realizar verificaciones de la precisión de los valores de la cota cero de las estaciones a emplear en el análisis.



**Figura 4-2. Diferencia de niveles registrados 2004-2016**

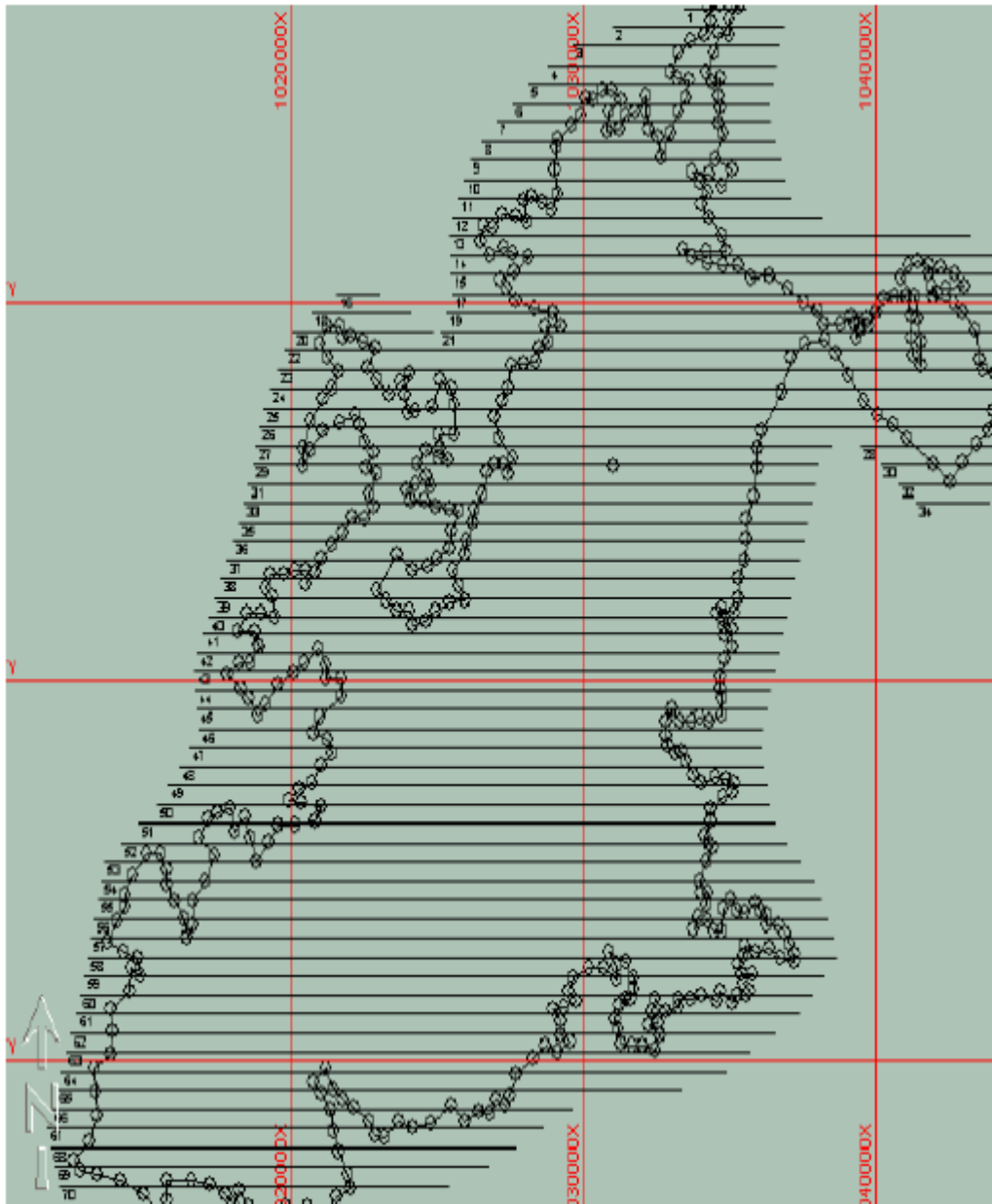
En la Figura 4-2 se logra apreciar una gran fluctuación en la diferencia de niveles reportados entre las dos estaciones, implicando cambios en la pendiente a lo largo del año, encontrándose que en promedio para marzo, abril, mayo, agosto, septiembre y octubre, las elevaciones de la estación de el Peñoncito (corriente Magdalena) superan a la estación de Barrancones ubicada en la ciénaga, pudiendo implicar temporadas en las que predomina la entrada de agua hacia la Ciénaga desde el río Magdalena, esta apreciación concuerda parcialmente con la modelación de balance de masa realizado por (Díaz-Granados, Camacho, & Maestre, 2001). En caso de emplear el nivel de río Magdalena como condición de frontera agua abajo del modelo, será importante la verificación de los ceros de mira a emplear, ya que estos podrían influenciar fuertemente el régimen de entrada o salida de la ciénaga.

#### **4.1.1 Información topo-batimétrica para la Ciénaga de Zapatosa.**

Producto de la recopilación secundaria del proyecto se encontraron dos fuentes de información referente a levantamientos batimétricos, el primero de ellos



realizado en 2005 por (Arellano & Rangel-Ch, 2007) y el segundo realizado el presentado en el documento (Aristizabal, 2014).



**Figura 4-3. Cubrimiento reportado de las batimetrías realizadas presentadas por (Arellano & Rangel-Ch, 2007)**

El levantamiento llevado a cabo durante 2005, muestra un buen cubrimiento del cuerpo de agua, sin embargo, la separación entre líneas podría limitar la representación adecuada de la geometría del fondo del lecho especialmente en zonas con geometrías complejas, como las que se pueden encontrar en la parte



Sur de la Ciénaga, esto se pudo evidenciar mediante el análisis de imágenes satelitales de la zona, que permiten apreciar parcialmente la configuración geométrica del lecho para estas zonas, mostrando formas complejas, con múltiples conexiones entre cuerpos de agua que quedan aislados en temporadas bajas.

Adicional al levantamiento realizado a la Ciénaga en 2005, se tuvo acceso a un levantamiento realizado por el IDEAM en 2014, este levantamiento fue realizado en dos etapas, este levantamiento no cubrió la zona sur del cuerpo de agua, por lo que tampoco logra captar el detalle de esta zona de alta complejidad.

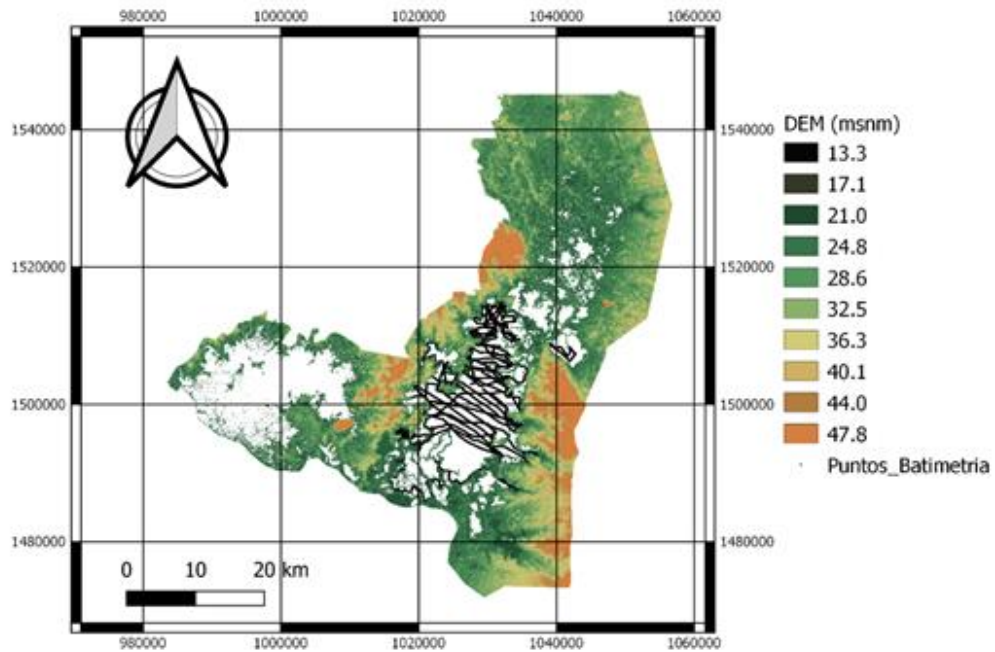


Figura 4-4. Cubrimiento de la batimetría realizada por el IDEAM en 2014.

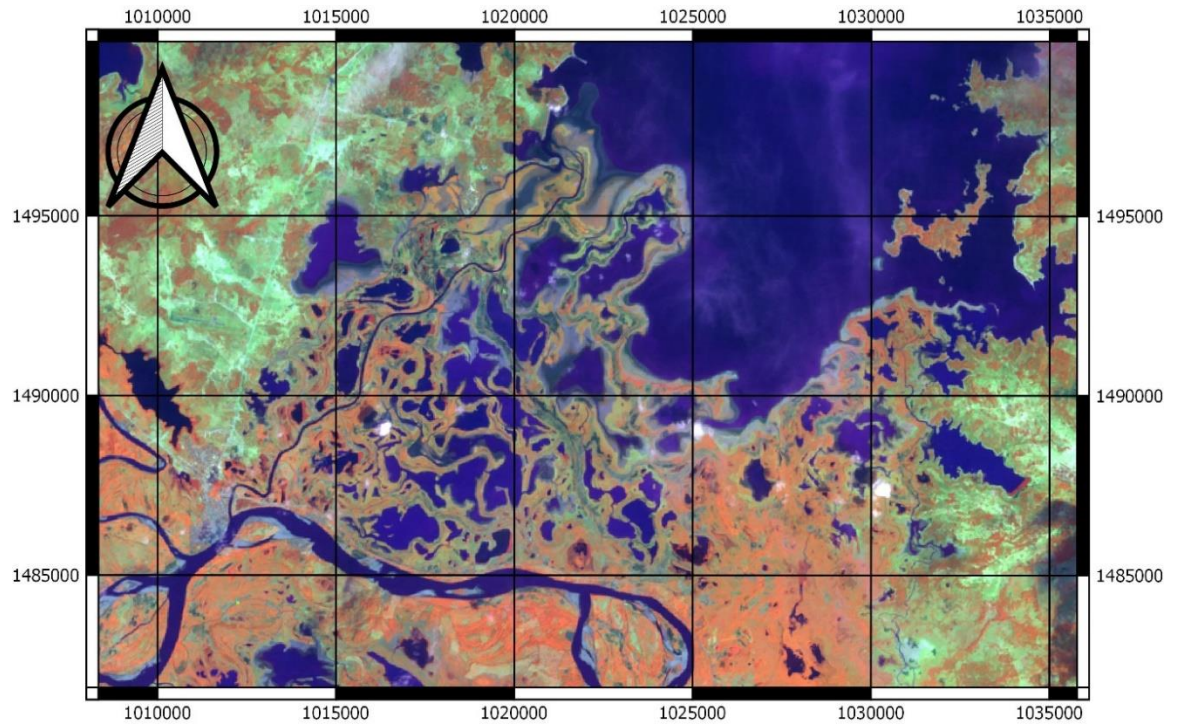


Figura 4-5. Detalle de la zona de sur de la ciénaga.

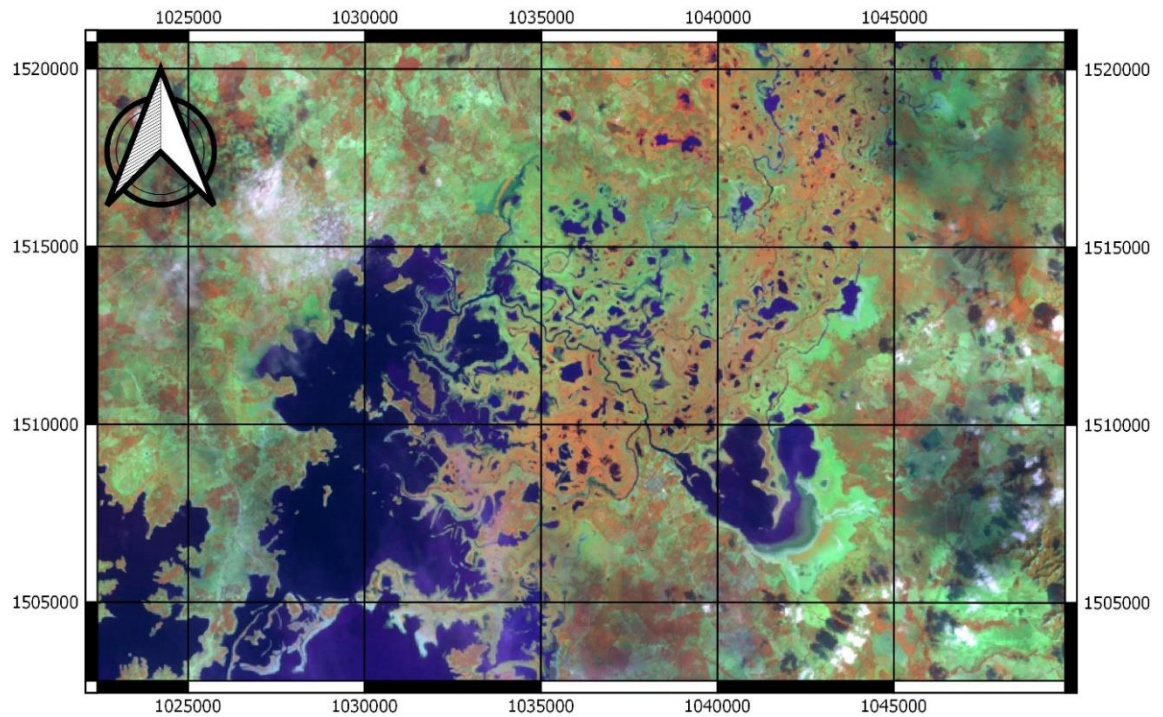


Figura 4-6. Detalle de la zona norte de la ciénaga.

Se emplearon tanto imágenes Sentinel como Landsat para observar el cubrimiento de la lámina de agua de la ciénaga para diferentes condiciones de nivel, el análisis de estas imágenes permite estimar una serie de patrones a encontrar en diferentes zonas de la Ciénaga, a continuación se presentan imágenes correspondiente a niveles con frecuencias de excedencia de (7%, 32%, y 66%), correspondiendo los porcentajes más altos a periodos más secos, se presentan las diferencias para dos sectores de la Ciénaga. Para el análisis se empleó el Índice de Agua Normalizado (NDWI por sus siglas en inglés), en donde valores superiores a 1 (color azul en la escala empleada) representan al espejo de agua.

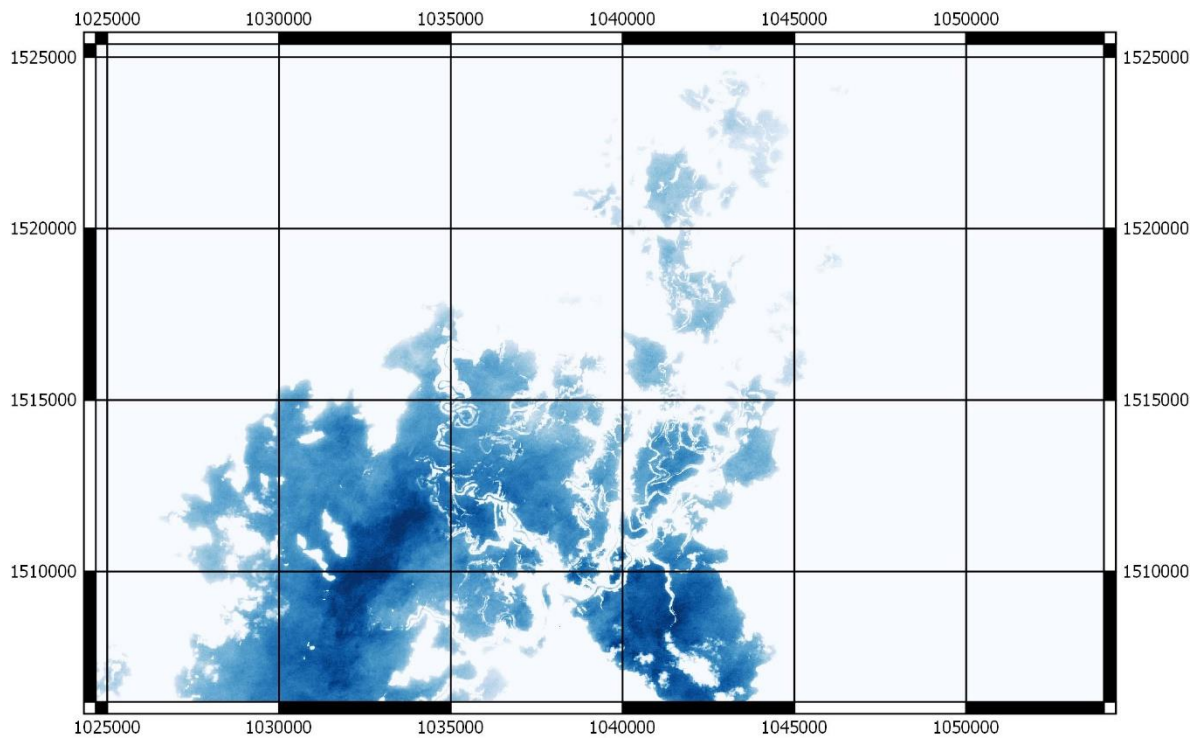
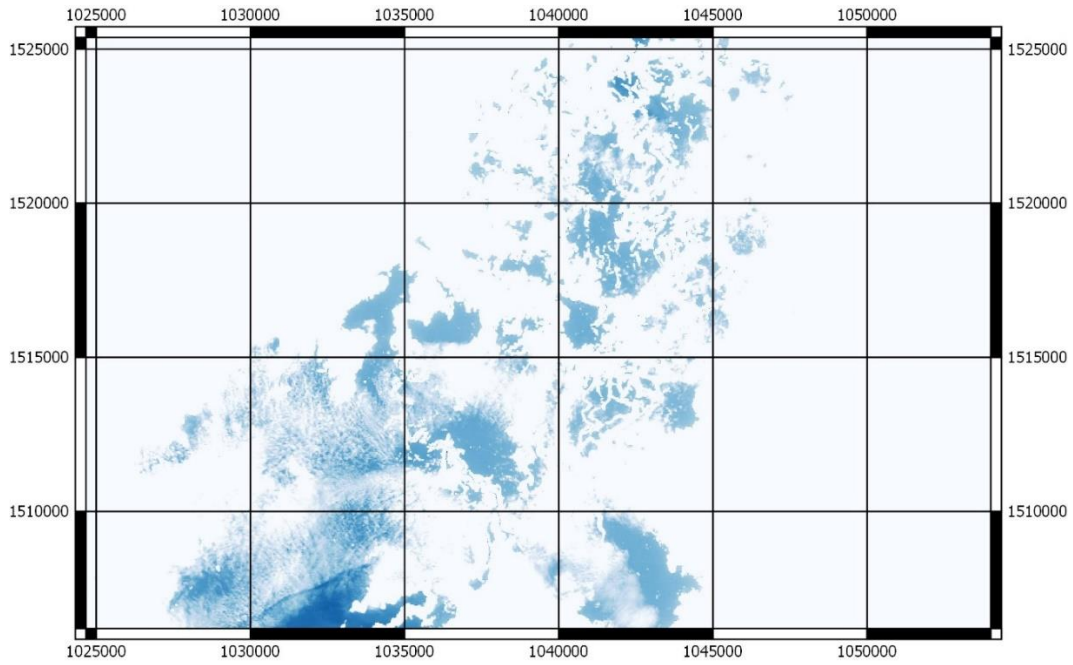
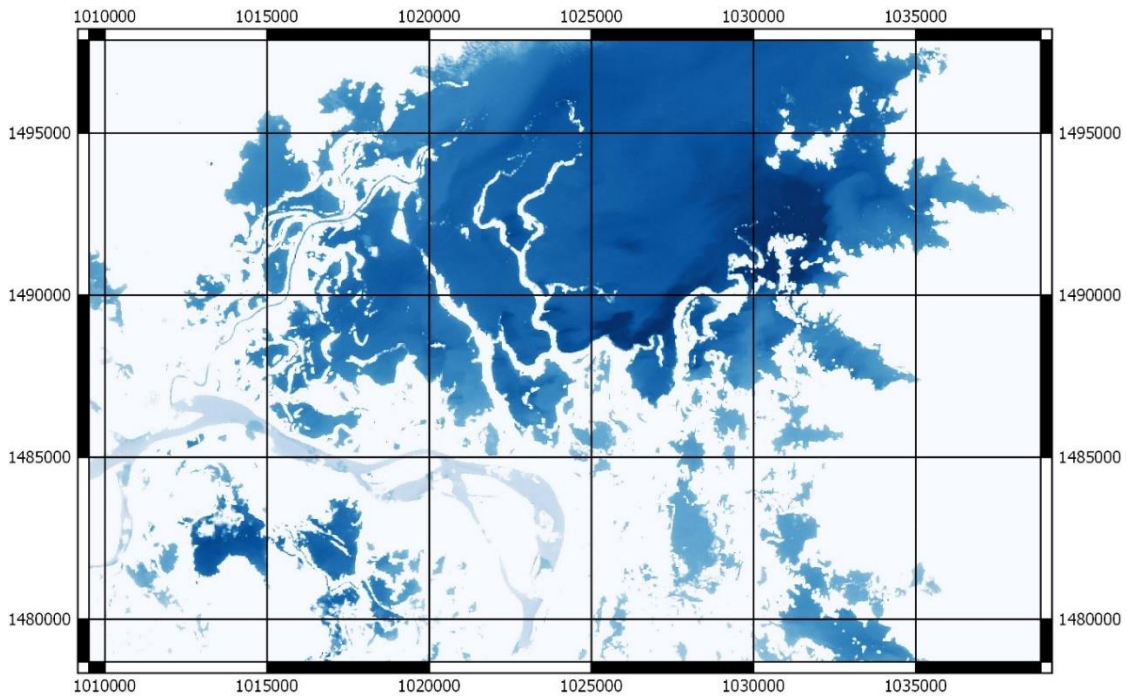


Figura 4-7. Sector norte de la ciénaga para aguas altas.

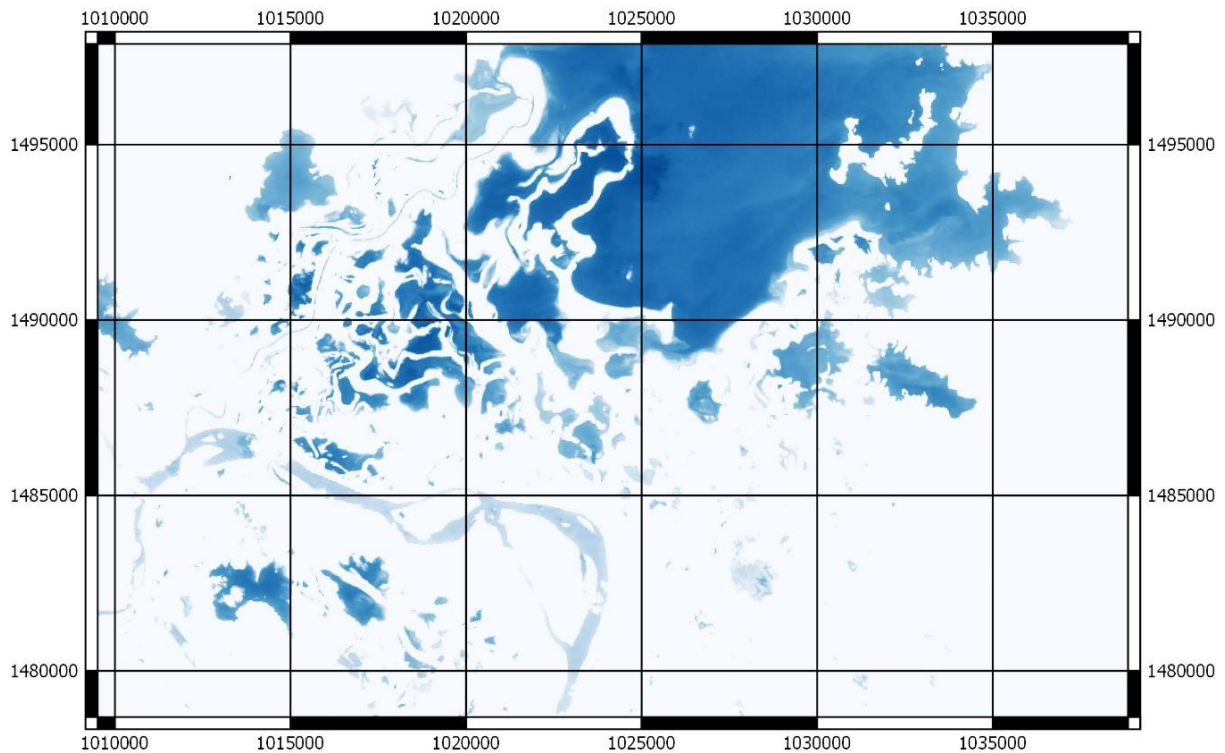




**Figura 4-8. Imagen del sector norte de la ciénaga para aguas bajas.**



**Figura 4-9. Imagen del sur la ciénaga para aguas altas**



**Figura 4-10. Imagen del sur de la ciénaga para aguas bajas.**

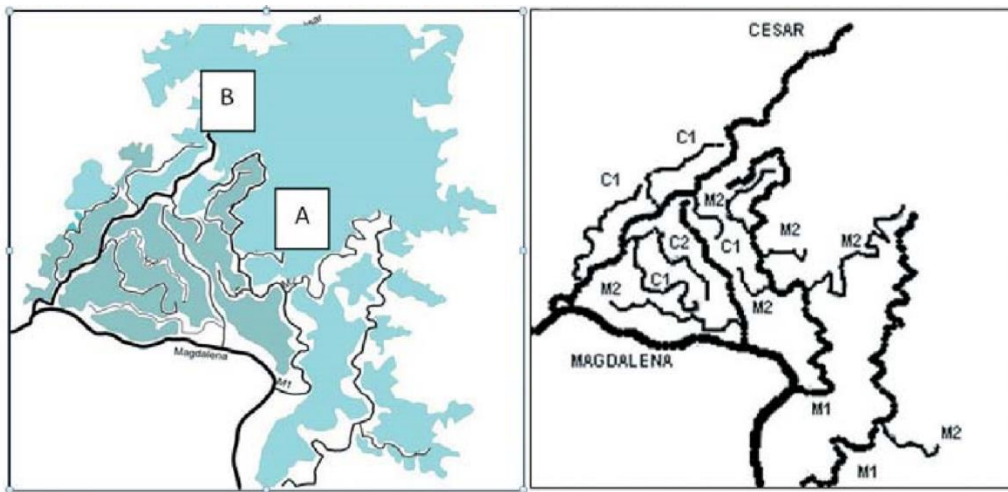
La comparación permite apreciar la posible complejidad del cuerpo de agua en estudio, en términos de la conexión entre diferentes cuerpos, debe tenerse en cuenta que las imágenes empleadas también cuentan con restricciones de resolución (30m para el caso de imágenes Landsat y 10m para el caso de Sentinel-2), siendo posible hallar mayor complejidad en la realidad, aun así se debe considerar que en las superficies mostradas en los levantamientos disponibles, no permiten apreciar los detalles de los cuerpos mostrados, bien sea en el caso del levantamiento de 2014, porque no se cubrió el sector (caso del sector norte y sur) o en el caso del levantamiento de 2005 porque aunque se cubrió el sector sur, el detalle del levantamiento no logró capturar la geometría a dicha escala.

#### 4.1.2 Dinámica fluvial

El artículo “La estratigrafía de los sedimentos de fondo de ciénagas del caribe y el registro de los cambios de clima en los últimos 4.900 años” (Jaramillo, Rangel-Ch, Parra, & Ruiz, 2012) clasifica los sistemas cenagosos en tres grandes grupos de acuerdo a su modo de funcionamiento: en ciénagas rivereñas, que mantienen conexiones con los grandes ríos y quebradas; ciénagas de litoral con conexión con el mar Caribe y sistemas cerrados interiores con escasa o nula conectividad a ríos y quebradas, muestra a modo de ejemplo un análisis sobre el sector Sur de la Ciénaga, en donde se identifican caños formados por el rompimiento de los diques formados previamente por ríos como el Cesar y el Magdalena, además hace énfasis en la importancia de la formación de estos caños como mecanismos del



sistema río-ciénaga para aliviar su caudal y carga de sedimentos. Este proceso de bifurcación y consolidación de los denominados caños funcionales, el proceso es denominado por Jaramillo como la conformación de una red hidrodinámica de caños, pudiéndose hablar de caños maduros ya consolidados, siendo estos muy estables, caños embrionarios abortados y caños seniles, que pudieron funcionar durante muchos años y dejar de funcionar abruptamente, estos caños pueden estar activos dentro de la ciénaga aunque no sean visibles durante periodos de aguas altas. Estas mallas hidrodinámicas cumplen con tres funciones notables, aumentan la capacidad de almacenamiento de la ciénaga, segmentan la ciénaga en cuerpos de agua menores y vuelven muy compleja la relación hidrodinámica entre el río y sus ciénagas. La generación de estas ciénagas menores implicará entonces que cada cuerpo pudiese tener su propia dinámica.



**Figura 4-11. Malla de caños Zapatoza sur. La M indica caños originados en el río Magdalena y C caños originados por río Cesar. Figura tomada de (Jaramillo Justinico, Rangel-Ch, Parra Sánchez, & Ruiz, 2007)**

Dada la descripción realizada por (Jaramillo, Rangel-Ch, Parra, & Ruiz, 2012) de la función de los caños en la formación y evolución de los caños que la conforman, se entiende la importancia de considerar y entender el complejo de caños que conforman las ciénagas de manera que las obras civiles planes de manejo que se planteen sean compatibles con la dinámica propia de las ciénagas y los caños que las forman. Volviendo al análisis del sector sur de la ciénaga y haciendo uso de imágenes satelitales, se puede observar fácilmente la complejidad descrita por Jaramillo, en donde se pueden observar caños internos dentro de la ciénaga, seguramente en estado de madurez, que ya han conformado diques, segmentando dicha zona de la ciénaga en cuerpos de agua estacionalmente independientes, es preciso recordar que los levantamientos batimétricos disponibles no representan adecuadamente esta complejidad. Para verificar la madurez del sistema de caños, se emplearon imágenes Landsat para el máximo periodo de registro posible, a fin de observar si se ha presentado alguna evolución aparente en el sistema, la Figura 4-12, la Figura 4-13 y la Figura 4-14 muestran el



espejo de agua para periodos similares (febrero y marzo) para el año 1973 y para el año 2018. Una comparación visual preliminar entre las imágenes muestra una estabilidad de la conformación de los caños tanto en la zona norte como la zona sur, incluyendo la conformación de la desembocadura del río Cesar. Esta ventana de tiempo de 45 años, muestra la estabilidad de la zona en términos de la configuración de los caños. En cuanto a las tasas de sedimentación, de acuerdo a (Jaramillo, Rangel-Ch, Parra, & Ruiz, 2012) se estima que para este tipo de ciénagas el orden de la tasa de sedimentación es de 0.44cm/año.

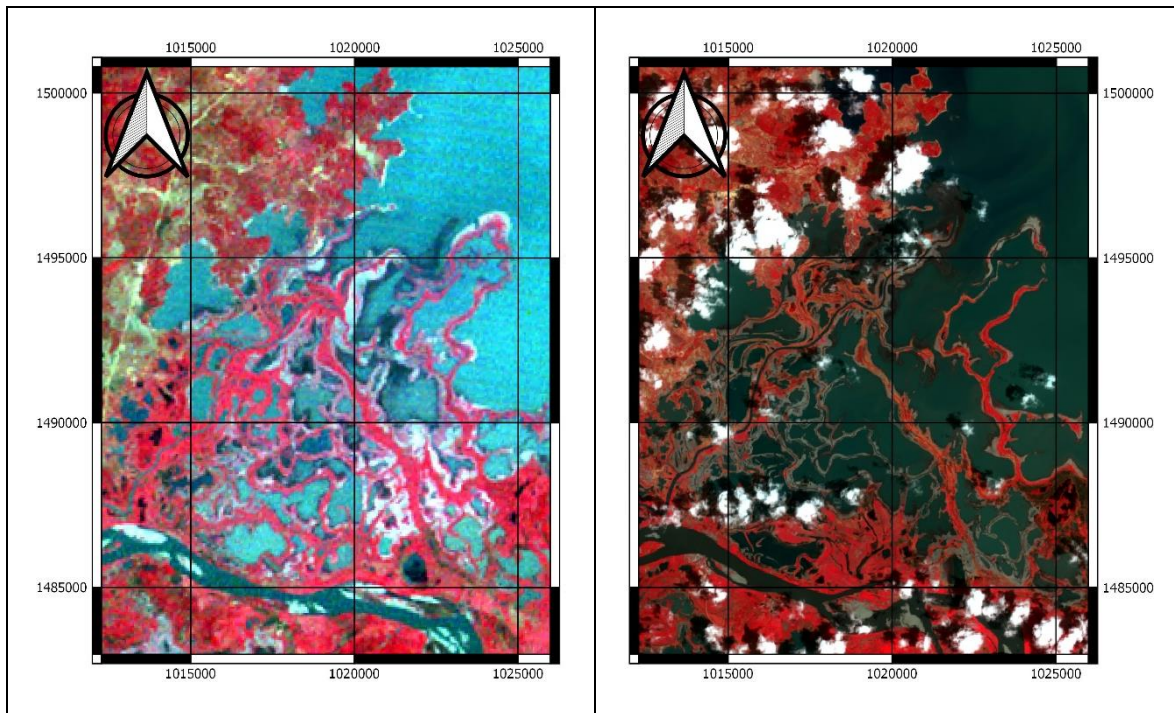


Figura 4-12. Zona sur de le ciénaga febrero 1973 y marzo de 2018.

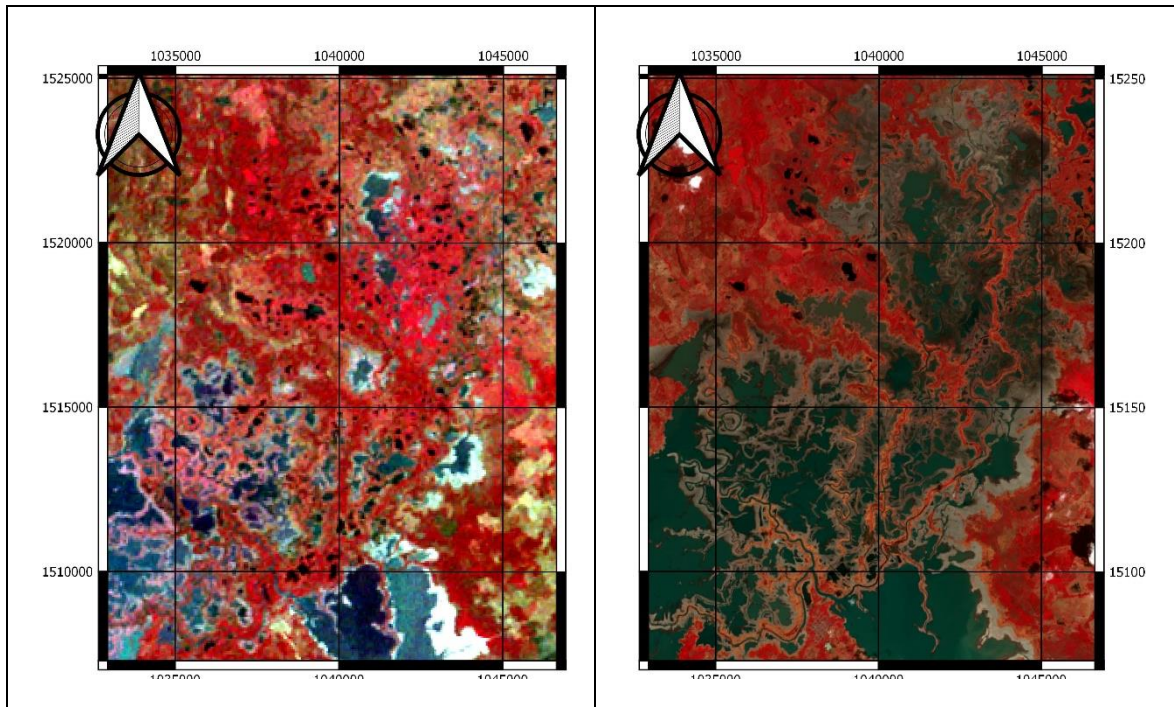


Figura 4-13. Zona norte de la ciénaga febrero de 1973 y marzo de 2018.

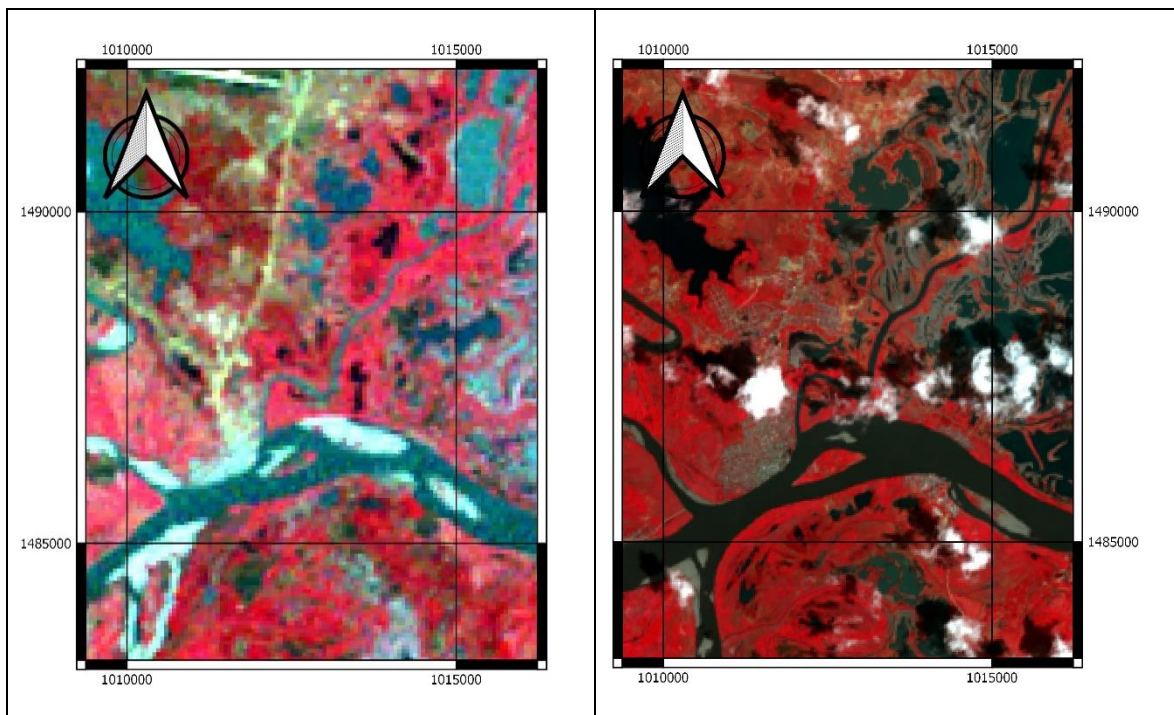


Figura 4-14. Conformación de la desembocadura del río Cesar 1973-2018.

Moreno (2007) señala la Ciénaga de Zapatosa como un depresión cóncava al interior del río Cesar, convirtiéndola en la mayor trampa de sedimentos con mayor extensión de la planicie inundable del río Magdalena. La dinámica fluvial de la ciénaga está dominada por los aportes de sedimentos tanto del Cesar como del Magdalena, estando la dinámica fluvial de la ciénaga dominada por el río Cesar en los periodos de verano y principalmente por el río Magdalena en épocas de invierno, en donde el río adquiere capacidad de transporte de sedimentos gruesos que llegan a la ciénaga mediante el desbordamiento lateral del río.

### 4.1.3 edimentos

El estudio Análisis de los sedimentos de la Ciénaga de Zapatosa, Cesar (Moreno, 2007). Destaca que el sistema tiene dos fuentes principales de sedimentos: Aquellos que son transportados por el Río Cesar y el Río Magdalena. Una descripción general de los sedimentos superficiales encontrados en la Ciénaga da cuenta de la presencia de sedimentos arcillosos y limo-arcillosos.

En términos de la modelación se requerirá determinar las épocas del año en la cual, el régimen permite la entrada de agua desde el Río Magdalena hasta la Ciénaga, transportando así sedimentos en suspensión o en arrastre hacia esta. Nuevamente, tanto como en el caso de hidrodinámica y la modelación de calidad del agua, al convertirse la desembocadura del Río Cesar a la ciénaga en una entrada de agua al dominio computacional, en lo posible, se deberá contar con información en estas épocas para alimentar al modelo por medio de las condiciones de frontera implementadas.

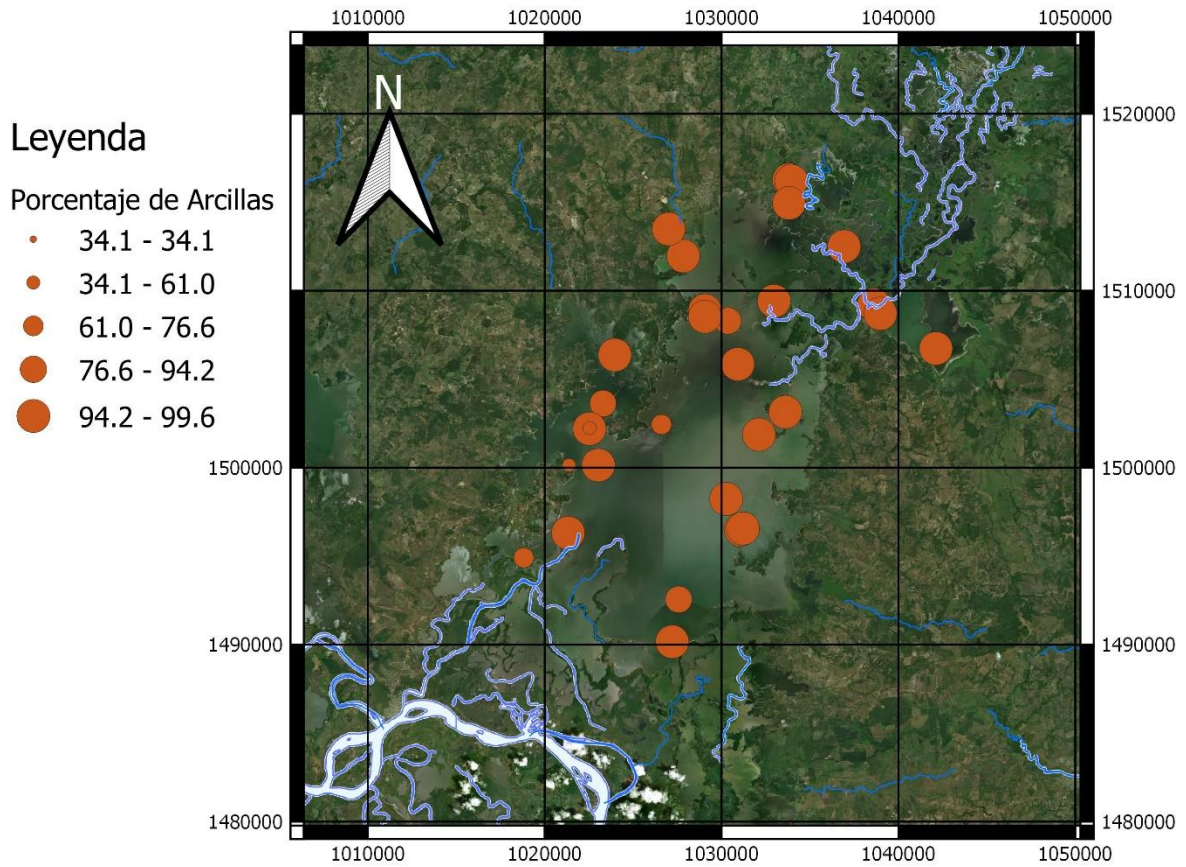
Los sedimentos que se encuentran en la ciénaga actualmente son inconsolidados de color gris a negro, con alta humedad y tamaño heterogéneo con un espesor variable para cada estación, los sedimentos están compuestos por una fase inorgánica que corresponde aproximadamente al 60% y un 30% de materia orgánica, definiendo a la ciénaga como "un lugar con condiciones fisico-químicas adversas para la sedimentación de materia orgánica y/o alta desintegración de la misma". Se aclara además que algunos de los registros altos de materia orgánica obedecen a muestreos que quedaron descubiertos durante una época seca permitiendo la formación de suelo y no a la sedimentación de materia orgánica en suspensión. Se destaca además que el 80% de los sedimentos que se encuentran cubierto por el espejo de agua corresponden a minerales de tamaño arcilla depositados en ambientes de baja energía, también se reporta la presencia limitada de arenas movilizadas posiblemente en los periodos de invierno en los cuales aumentan los caudales y con ellos la capacidad de transporte requerida para movilizar partículas de mayor tamaño. El artículo además reporta la composición granulométrica para 46 sitios de aforo.



Tabla 4-1. Granulometría por floculación de arcillas. Tomado de: (Moreno, 2007)

Estación	X			Y			Muestra	Testigo	Bateo		Tamaño de grano (%)	
	Latitud			Longitud					Recobro	Testigo	Arcilla	Limo + Arena
1	9	10	29.7	73	51	34	ZCR-1	148.23	1.19	1.49	99.2	0.8
2	9	9	0.47	73	51	56	ZCR-2	144.89	9.67	1.42	93.33	6.67
3	9	8	14.1	73	52	21	ZCR-3	174.51	0.68	0.45	99.61	0.39
4	9	8	15.5	73	52	21	ZCR-4	169.85	66.24	2.31	61	39
5	9	7	7	73	52	4.6	ZCR-5	150.89	1.11	1.1	99.26	0.74
6	9	7	7	73	52	59	ZCR-6	34.07	16.78	1.18	50.75	49.25
9	9	5	2.5	73	53	0.6	ZCR-7	182.64	7.48	0.42	95.9	4.1
10	9	1	42.1	73	49	48	ZCR-8	93.76	1.16	1.16	98.76	1.24
11	9	2	59.9	73	49	36	ZCR-9	165.04	22.9	0.66	86.12	13.88
12	9	11	32.4	73	48	4.4	ZCR-10	175.12	10.2	0	94.18	5.82
13	9	4	16.8	73	54	23	ZCR-11	76.19	17.8	2.14	76.64	23.36
18	9	4	42.1	73	47	47	ZCR-12	40.3	26.57	2.21	34.07	65.93
19	9	5	8.4	73	47	41	ZCR-13	163.54	1.85	1.3	98.87	1.13
20	9	5	10.4	73	47	37	ZCR-14	165.59	0.88	0.31	99.47	0.53
21	9	6	4.7	73	48	7.7	ZCR-15	122.11	0.67	0.32	99.45	0.55
23	9	8	3.1	73	47	6.9	ZCR-16	173.57	2.4	2.4	98.62	1.38
26	9	8	44.5	73	46	18	ZCR-17	170.87	2.18	1.82	98.72	1.28
27	9	10	12.6	73	47	46	ZCR-18	183.98	2.21	1.67	98.8	1.2
28	9	11	51.6	73	48	47	ZCR-19	180.02	4.54	1.84	97.48	2.52
29	9	13	31.7	73	49	27	ZCR-20	168.02	2.3	0.66	98.63	1.37
31	9	14	21.4	73	49	54	ZCR-21	121.63	2.69	2.69	97.79	2.21
32	9	12	8.8	73	46	39	ZCR-22	176.14	2.14	1.17	98.79	1.21
33	9	15	51.8	73	46	11	ZCR-23	195.3	2.03	1.13	98.96	1.04
34	9	15	49.7	73	46	6.7	ZCR-24	172.09	2.69	0.89	98.44	1.56
35	9	15	9	73	46	11	ZCR-25	172.09	1.67	1.14	99.03	0.97
37	9	13	49	73	44	29	ZCR-26	180.17	1.57	1.29	99.13	0.87
38	9	12	1.9	73	43	34	ZCR-27	175.19	1.54	1.54	99.12	0.88
39	9	11	45.4	73	43	22	ZCR-28	152.18	0.82	0.81	99.46	0.54
41	9	10	41.3	73	41	39	ZCR-29	124.58	0.51	0.32	99.59	0.41
43	9	8	21.8	73	50	7.7	ZCR-30	144.94	35.02	2.62	75.84	24.16
44	9	11	40.2	73	48	47	ZCR-31	177.88	2.73	2.73	98.47	1.53
46	9	15	32.2	73	42	52	ZCR-32	149.9	0.27	0.28	99.82	0.18

En la Figura 4-15 se presenta un mapa con los porcentajes de arcilla hallados en las 46 estaciones reportadas, esta muestra como los menores porcentajes de arcilla (mayores contenidos de limos y arenas) se encuentran especialmente hacia el sector sur de la ciénaga, pudiendo esto ser un indicativo de mayores capacidades de transporte asociadas a la entrada de agua desde el Río Magdalena y no descarga de materiales gruesos desde el río Cesar.



**Figura 4-15. Porcentajes de arcilla reportados. Elaboración propia con datos tomados de (Moreno, 2007).**

#### 4.1.4 Análisis de la mancha de inundación con sensores remotos

Para aproximar el comportamiento de la ciénaga de Zapatosa a lo largo del ciclo hidrológico, se ha avanzado en el análisis de imágenes satelitales Landsat (con tamaño de pixel de 30m), para ello inicialmente se realizó la descarga de 102 imágenes con nivel de procesamiento básico, estas imágenes corresponden al Path=8, Row=54 que cuenta con una cobertura total del dominio extendido. Como parte del proceso se generaron las máscaras de nubes y sombras de las imágenes, para ello se empleó la implementación en Python (disponible en: <http://pythonfmask.org/en/latest/>) del algoritmo Fmask (Zhu, 2015).

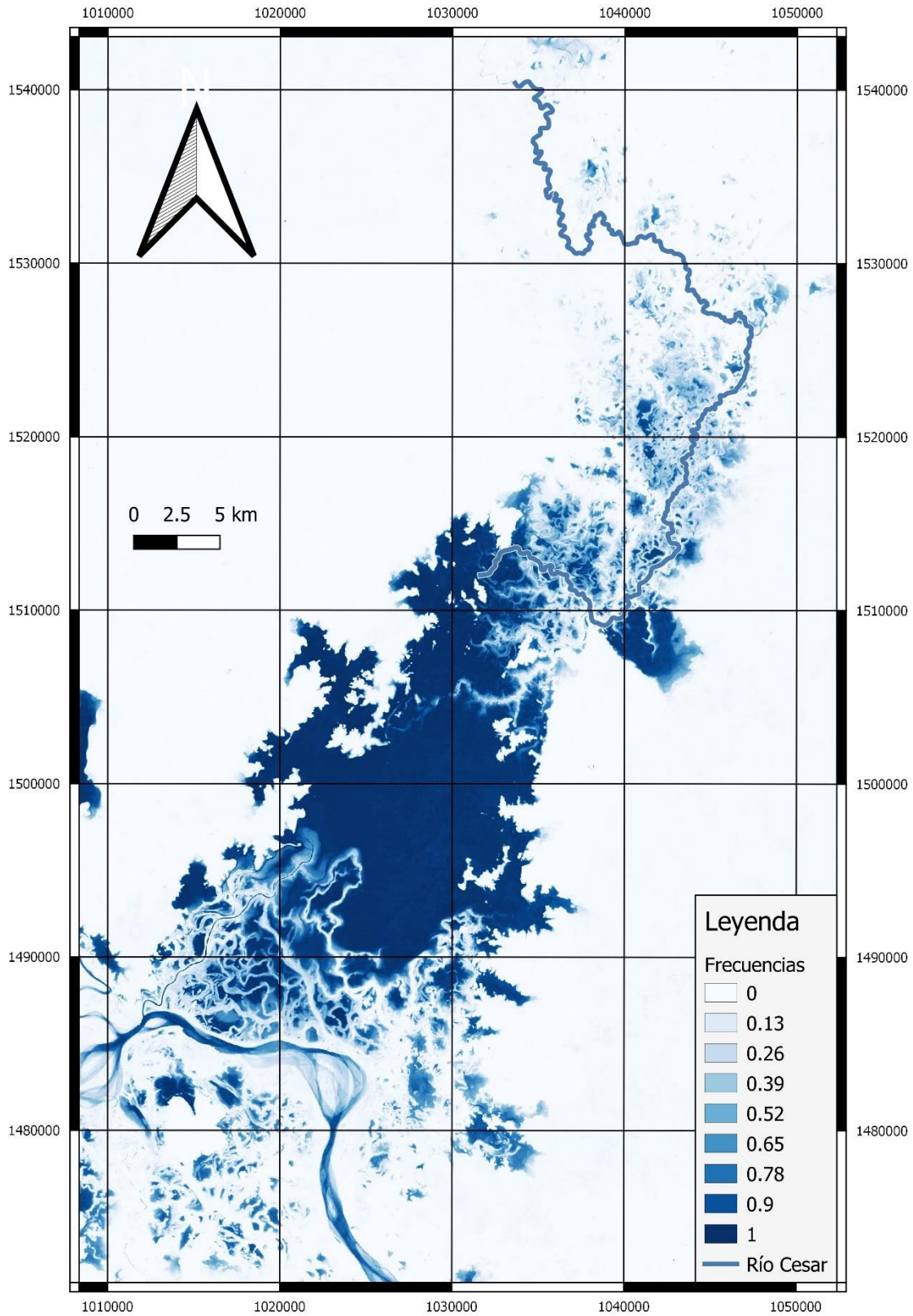
Se aplicó la máscara correspondiente a cada una de las imágenes para evitar la detección errónea de zonas cubiertas por nubes con zonas de tierra firme, también es posible aplicar como máscara el cubrimiento que corresponde a sombras y podría generar resultados erróneos, para el caso de identificación de agua no se encontraron dificultades en la identificación de zonas con presencia de sombras.

Posterior a la remoción de las zonas con cobertura de nubes, se calculó el índice de agua normalizado (NDWI), adoptándose un umbral de 0.5 para diferenciar entre agua y terreno firme, de esta manera se logró generar un archivo ráster para cada imagen que identifica la presencia o no de agua. La totalidad de las imágenes fue combinada para generar un archivo ráster en el que se indica la frecuencia en que fue detectada la presencia de agua, para este cálculo, las zonas cubiertas por nubes no son consideradas en la estimación, así una zona identificada con frecuencia de 1, implica que en la totalidad de las imágenes dicha zona fue visible (excluyendo imágenes cubiertas por nubes). Por el contrario, un valor de cero indicaría que en la totalidad de imágenes una zona fue identificada como tierra firme. Valores intermedios, indicarían zonas que están o no cubiertas por agua a lo largo del año. Así, zonas para las que fueron identificados valores inferiores a 0.2 tendrán una alta probabilidad de encontrarse descubiertas, durante los meses de febrero y marzo. Como se presentará más adelante esta información podrá guiar la selección de los polígonos a levantar bien sea por técnicas de batimetría o de topografía, en función de la probabilidad de encontrar cierta zona cubierta o no y el porcentaje del área a cubrir. Así zonas con valores de 1, no podrán ser levantados con técnicas convencionales de topografía.





MAGDALENA - CAUCA  
**VIVE**





**Figura 4-16. Frecuencia de tiempo inundado, procesamiento imágenes Landsat.**

El análisis efectuado ha apoyado la selección del dominio extendido, logrando identificar áreas que han sido cubiertas de agua en eventos extremos, tantas zonas constantemente inundadas.

## 4.2 CONFIGURACION DEL MODELO

### 4.2.1 Condiciones iniciales

La solución del conjunto de ecuaciones diferenciales parciales de la aguas someras, empleadas por la mayoría de software de modelación bidimensional y con algunas modificaciones para representaciones tridimensionales, requiere de la especificación de condiciones iniciales en todo el dominio para todas las variables a solucionar (profundidades, velocidad, concentraciones, etc.). Esto implicaría la determinación instantánea de todas las variables en todo el dominio, lo que resulta con la técnicas actuales de medición imposible para la zona en estudio, por facilidad se emplea la siguiente estrategia: Se adoptan condiciones iniciales artificiales, que sean fáciles de definir y que favorezcan la estabilidad del modelo en sus primeros instantes modelados, particularmente se empleó como condición inicial una superficie horizontal para todo el dominio, obviando la pendiente hidráulica que pudiera existir para un instante, asociado a esta condición, se selecciona un campo de velocidades nulo. En el caso de las concentraciones se adopta un valor uniforme que coincide con el valor inicial de la serie de tiempo a emplear como condiciones de frontera para los trazadores a emplear (incluyendo las concentraciones de sedimentos). Estas condiciones si bien son fáciles de implementar podrían diferir de manera importante de las condiciones reales, para ellos se hace uso del concepto de "calentamiento" que consiste en descartar el periodo inicial de la simulación de manera que de este periodo de calentamiento en adelante los resultados estén influenciados de manera mínima por la selección de los valores iniciales.

### 4.2.2 Condiciones de frontera

De manera semejante a los requerimientos del modelo para la condiciones iniciales, en la fronteras establecidas del modelo se deberán especificar para todo el periodo de simulación las variables a resolver, (niveles, velocidades, concentraciones. Actualmente para el modelo piloto se adoptó la siguiente configuración:

Hacia el norte del dominio, se tiene como condición de frontera el Río Cesar: En este caso se adoptaron las siguientes condiciones de frontera: Velocidades: La serie de tiempo de velocidades se obtiene a partir de la serie histórica de caudales obtenida de la estación de Caimancito, a futuro el caudal podrá ser reemplazado

por el generado por un modelo hidrológico. En cuanto a los niveles en esta frontera no serán impuestos y serán calculados por el modelo, el valor obtenido tanto en la frontera como en otros puntos de interés podrán entonces ser empleados para la calibración y validación del modelo en puntos en donde se disponga de registro de niveles (por ejemplo las estaciones de Belén, Barrancones y Saloa), información redundante que no será usada como entrada por el modelo, pero permitirá juzgar el desempeño del modelo. Con el cubrimiento actual del dominio el desprendimiento del brazo Limón del río Cesar ya ha ocurrido, por lo que es necesaria la división de esta condición de frontera en dos entradas de caudal, actualmente se definió una distribución de caudales entre los brazos arbitraria, a futuro el dominio se ampliará de manera que la distribución de caudales será resulta por el modelo.

Hacia el sur del dominio: Río Cesar en la desembocadura al Río Magdalena. Dado el comportamiento bidireccional del río Cesar en su desembocadura con el río Magdalena, se decidió implementar en este caso un tipo de frontera que permita la entrada o salida de agua hacia a la ciénaga, esto en función del nivel registrado en el Río Magdalena, los caudales (o velocidades) serán calculadas por el modelo para satisfacer la conservación de la masa en el dominio, los niveles impuestos serán los de la estación Peñoncito (aguas arriba de desembocadura del río Cesar) serán reemplazados por los niveles registrados en la estación de El Banco (justo aguas abajo de la desembocadura) en cuanto se disponga de un valor de cero de mira, que haga los registros comprobables con los registrados en la Ciénaga. La serie de caudales obtenida de la modelación podrá ser comparada con la serie obtenida de la diferencia de caudales entre las estaciones de El Banco y Peñoncito, sin bien la incertidumbre asociada a la obtención de caudales mediante una curva de gasto limita la cuantificación de los caudales que intercambia el río Magdalena con la ciénaga podrán dar estimativos de la tendencia.

La configuración previamente expuesta corresponde a una aproximación inicial y pueden ajustarse en la medida en que se avance en el levantamiento de información primaria y se avance en la implementación del modelo hidrológico.

Esta configuración permite:

- Ingreso de agua a la ciénaga calculada o medida de la cuenca del Río Cesar.
- Intercambio de agua con el río Magdalena calculado por el modelo, sin emplear datos de estaciones hidrológicas.
- Posibilidad de calibración y validación de la modelación con series de la red hidrometeorológica del IDEAM (niveles de las estaciones limnimétricas disponibles).

### 4.2.3 Selección del dominio computacional

El dominio computacional consiste en la zona o área a modelar hidrodinámicamente, la selección de este estará dada por el área de mayor interés



para el proyecto, por tratarse de la implementación del modelo piloto del modelo la selección del dominio estuvo limitada por la información secundaria disponible, especialmente por el cubrimiento del levantamiento batimétrico. Una selección para un dominio computacional más extenso fue guiada por el análisis multitemporal de manchas de inundación presentadas en la ciénaga, en el que el dominio computacional se extiende hasta proximidades de la estación de Caimancito. La Figura 4-17 muestra los posibles dominios a adoptar en la modelación, el dominio interior, mostrado en blanco, muestra el dominio el adoptado para los modelos piloto ( $457 \text{ km}^2$ ), estando actualmente limitado por la información disponible a la fecha. Un dominio extendido ( $1286 \text{ km}^2$ ), mostrado en la Figura 4-17 en negro ha sido limitado usando como criterio el análisis de frecuencia de inundación, en donde el dominio extendido incluye la máxima inundación registrada por la constelación de satélites Landsat. En este punto se debe aclarar que la selección del dominio es temporal, en el dominio piloto se avanzará en la implementación de los acoples y partes de la modelación hidrodinámica, pero podrá ser ampliado en función de la disponibilidad de nueva información.



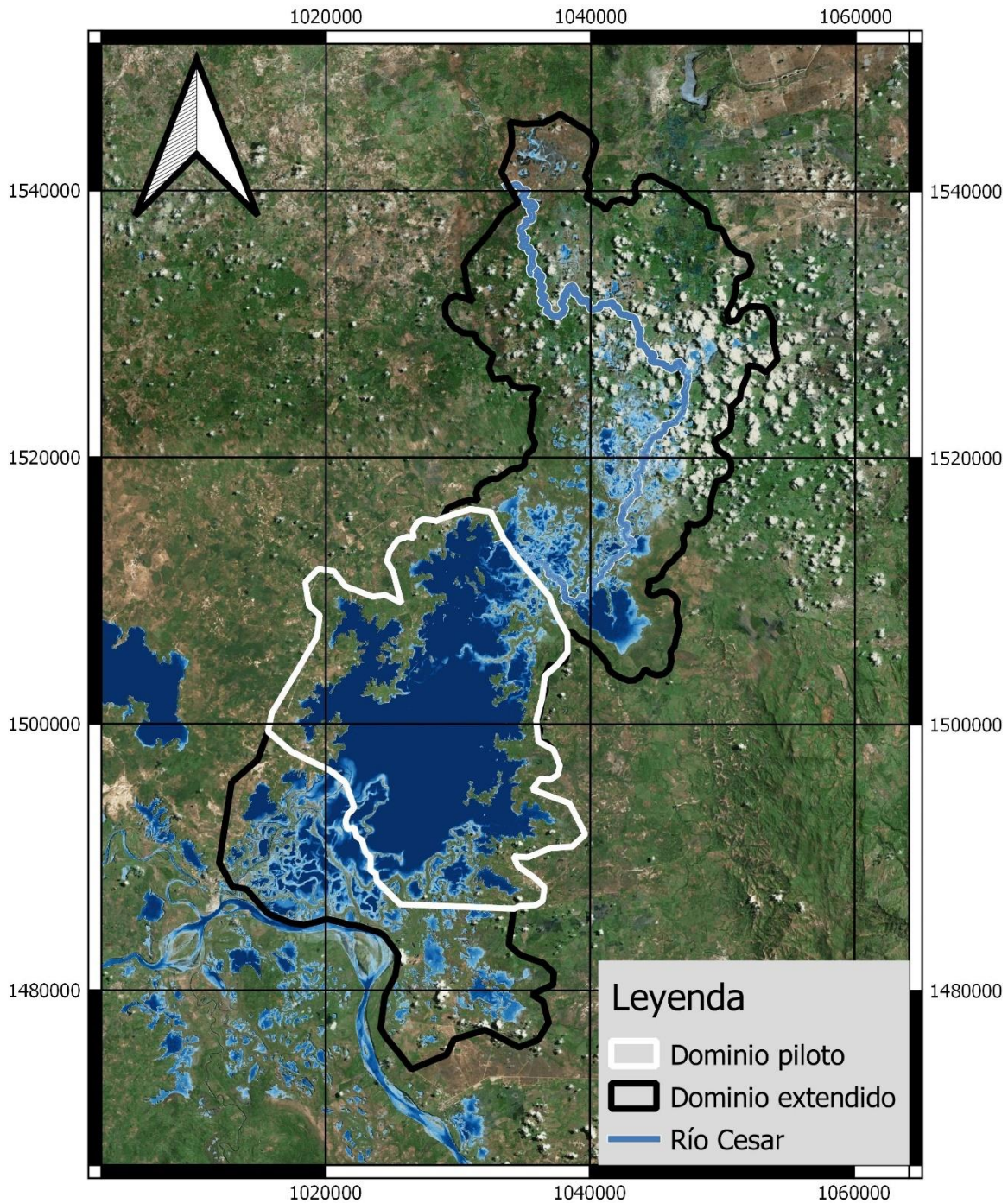


Figura 4-17. Posibles dominios de cómputo.

#### 4.2.4 Entrada del modelo

Como entradas del modelo se tendrán las descritas en las secciones de condiciones iniciales y condiciones de frontera, además de la serie de parámetros numéricos sujetos de ajuste durante la fase de calibración del modelo. Además, se

requerirán series de tiempo de los nutrientes y demás cantidades a modelar mediante la ecuación de transporte, estas series serán generadas mediante modelación hidrológica de la cuenca del río Cesar.

#### 4.2.5 Refinamiento del modelo de elevación digital

Además de las entradas descritas previamente, la modelación hidrodinámica requiere como insumo la representación geométrica de la superficie dentro del dominio computacional, previamente se realizó un ejercicio de generación de un modelo topo-batimétrico continuo, durante esta etapa se refinaron detalles del modelo continuo, empleando información de imágenes satelitales de alta resolución se detallaron algunos caños que no contaban con representación en el modelo inicial. Para ello fue necesaria la realización de los siguientes procesos:

- Filtrado de la información obtenida del DTM. En donde fueron removidos puntos identificados como tierra firme, pero coincidían con zonas inundables de acuerdo a imágenes satelitales de mayor resolución.
- Adición de información adicional en el proceso de interpolación, mediante la incorporación de breaklines, que consisten en la adición de líneas entre puntos de la batimetría conocidas, entre los que se generan líneas tridimensionales que unen dichos puntos, estas líneas fueron adicionadas siguiendo la geometría de los caños internos de la ciénaga de acuerdo a la interpretación de las imágenes disponibles. La adición de estos breaklines permitió una generación de un DTM con la representación de algunos caños. Debe aclararse que en este momento, muchos de estos caños no contaban con cubrimiento alguno en el levantamiento batimétrico, por lo que para la incorporación de los breaklines, se adicionó información basada en la distancia de los datos disponibles, este proceso será mejorado en la medida de que se genere información topobatimétrica. Un proceso similar se llevó a cabo con la información del DEM, en las que se adicionan líneas que conectan puntos conocido, o lo más cercanos disponibles, esto para la correcta definición de las orillas. En la Figura 4-18 se muestrasn los breaklines adicionados para refinar la interpolación.

Resultado de la adición de breaklines para mejorar la interpolación y posterior generación del DTM, se obtiene un DTM con algunos detalles no presentes en el modelo original, como en la entrada del río Cesar a la ciénaga y su posterior bifurcación en caño Limón y Caño las Garzas.



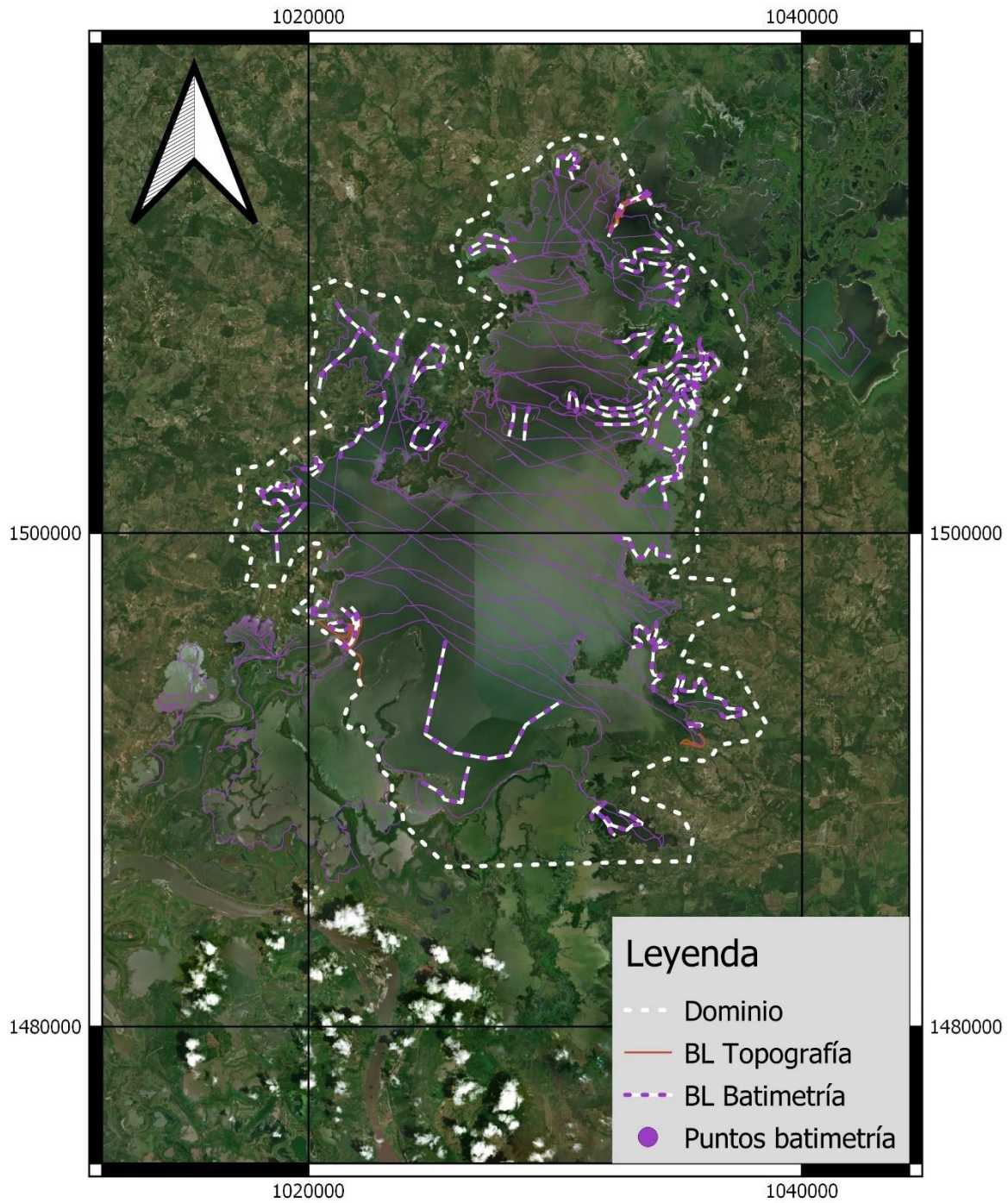


Figura 4-18. Breaklines introducidos en el proceso de generación del DTM

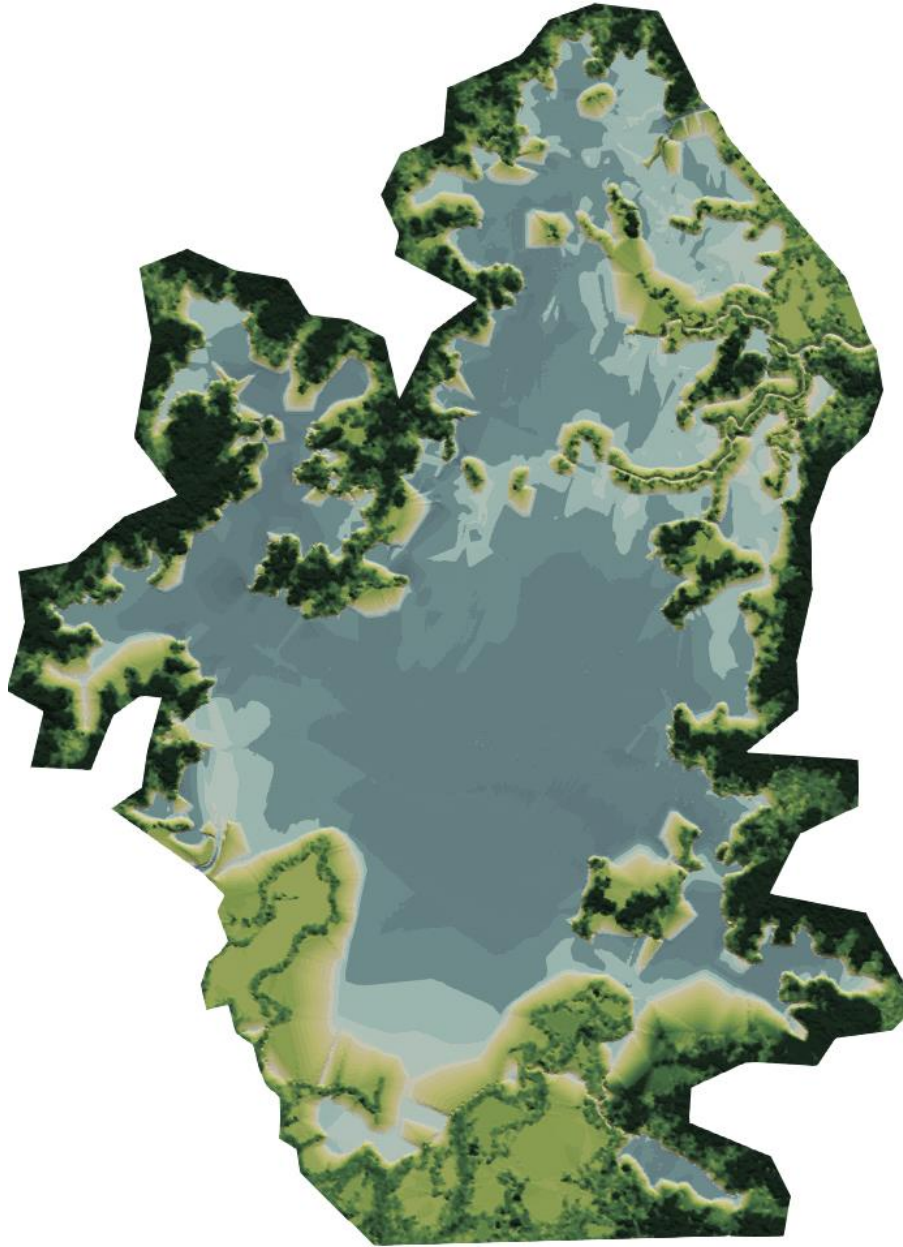
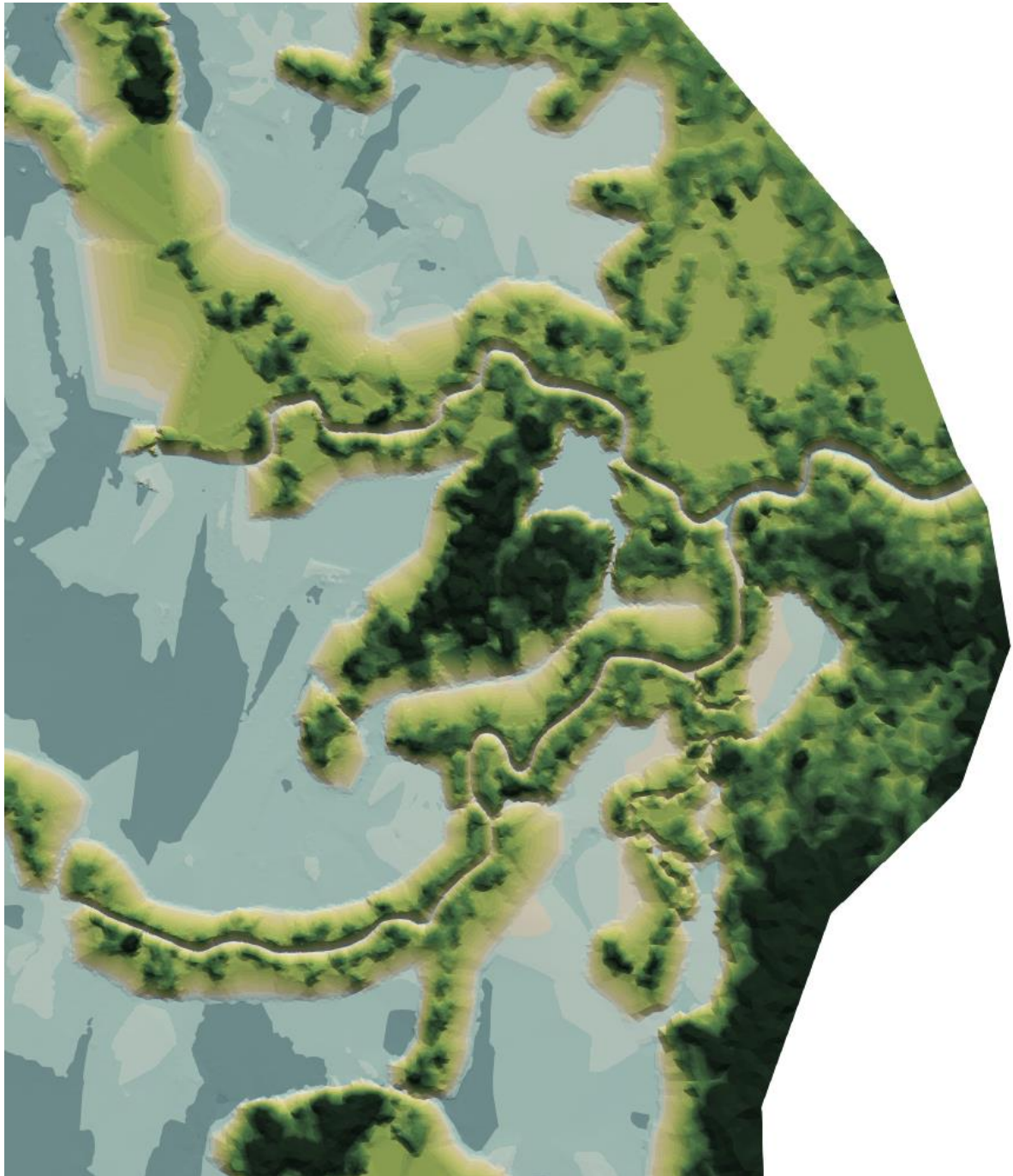


Figura 4-19. Superficie generada con la inclusión de breaklines.





**Figura 4-20. Detalle entrada río Cesar a la ciénaga de Zapatosa.**

#### **4.2.6 Generación de la malla de cómputo**

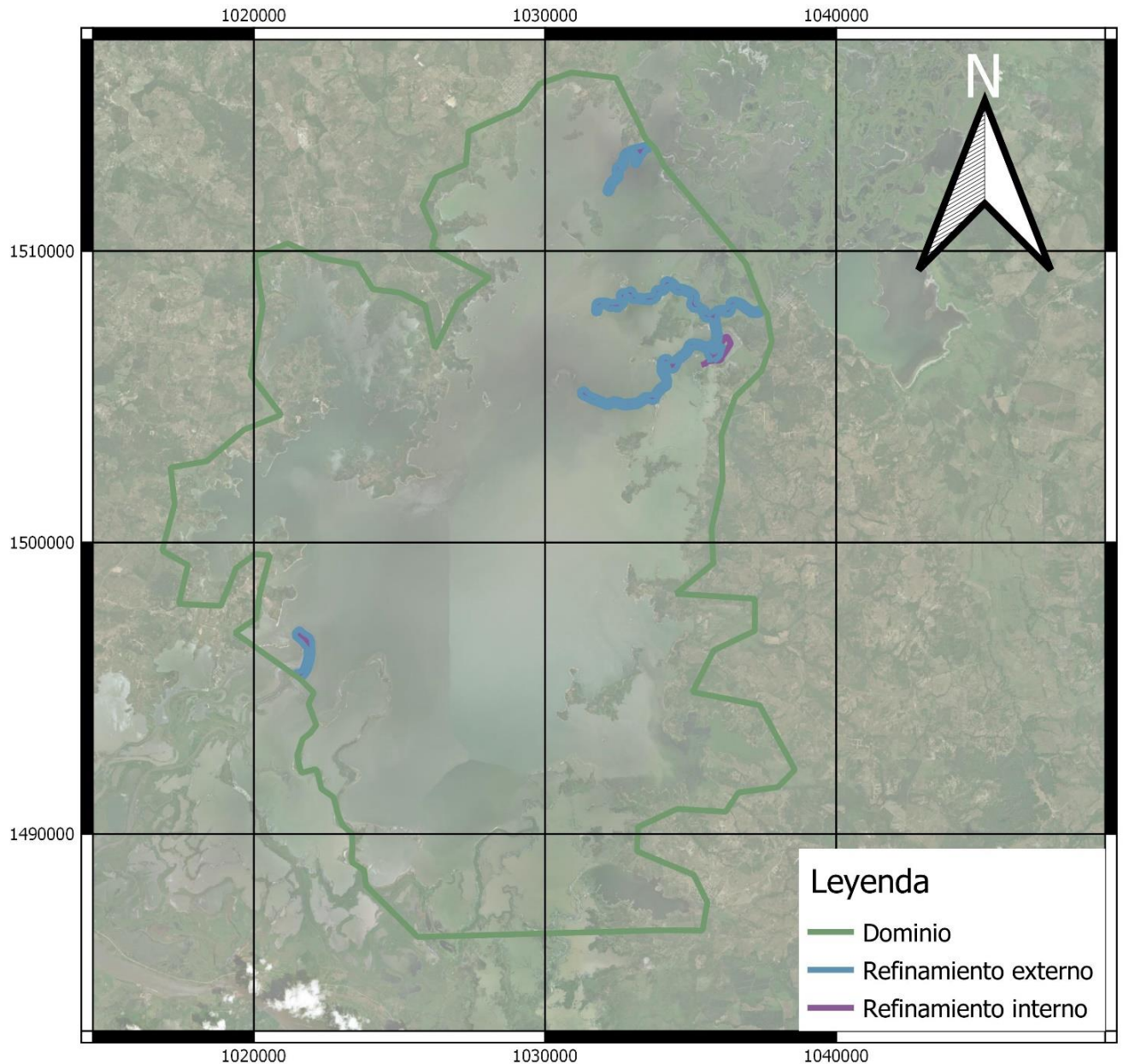
La malla de cómputo consiste en la discretización espacial del dominio computacional seleccionado, en este caso se empleó el software GMSH, para ello es necesario especificar un polígono con constituirá el límite exterior del dominio

computacional , además de polígonos en los que se generen distintos niveles de refinamiento, la conformación geométrica de estos elementos se presenta en la Figura 4-21. Para ello se emplearon los siguientes tamaños de elementos en las diferentes zonas del dominio, la elección de los tamaños a emplear para la generación de la malla están en función de los requerimientos mínimos para una correcta representación de las geometrías, requiriendo entidades como los caños internos de la ciénaga tamaños de malla inferiores.

Para el modelo piloto se han empleado los siguientes tamaños de elementos:

**Tabla 4-2. Tamaños de celda empleados para la generación de la malla de cómputo**

Zona	Tamaño de celda (m)
<b>Conexiones</b>	6
<b>Interior del dominio</b>	40
<b>Contorno del dominio</b>	80
<b>Fronteras</b>	6



**Figura 4-21. Entradas para la generación de la malla.**

Luego de la especificación de la geometría y los tamaños a emplear para cada zona, se genera una malla que cubre todo el dominio con elementos de los tamaños especificados, esta incluye elementos de tamaños intermedios para lograr las transiciones entre diferentes tamaños a emplear. Para este caso la malla generada consta de 203.519 nodos que conforman 405.265 elementos.



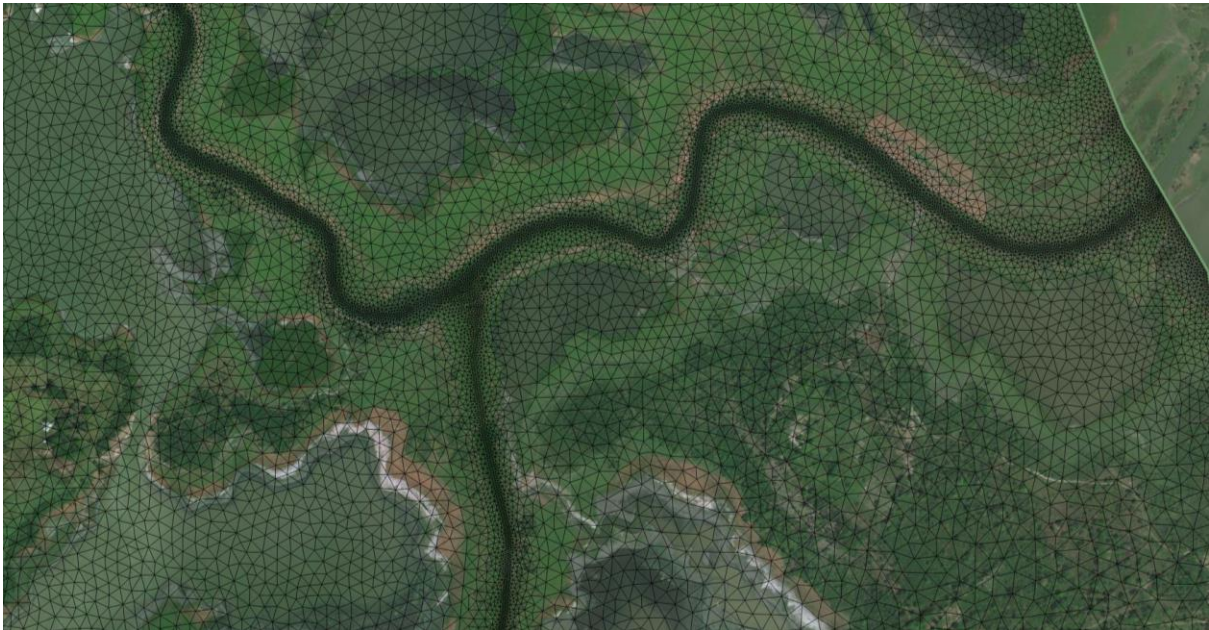


Figura 4-22. Detalle malla de cómputo en la entrada del Caño Limón al dominio del modelo.

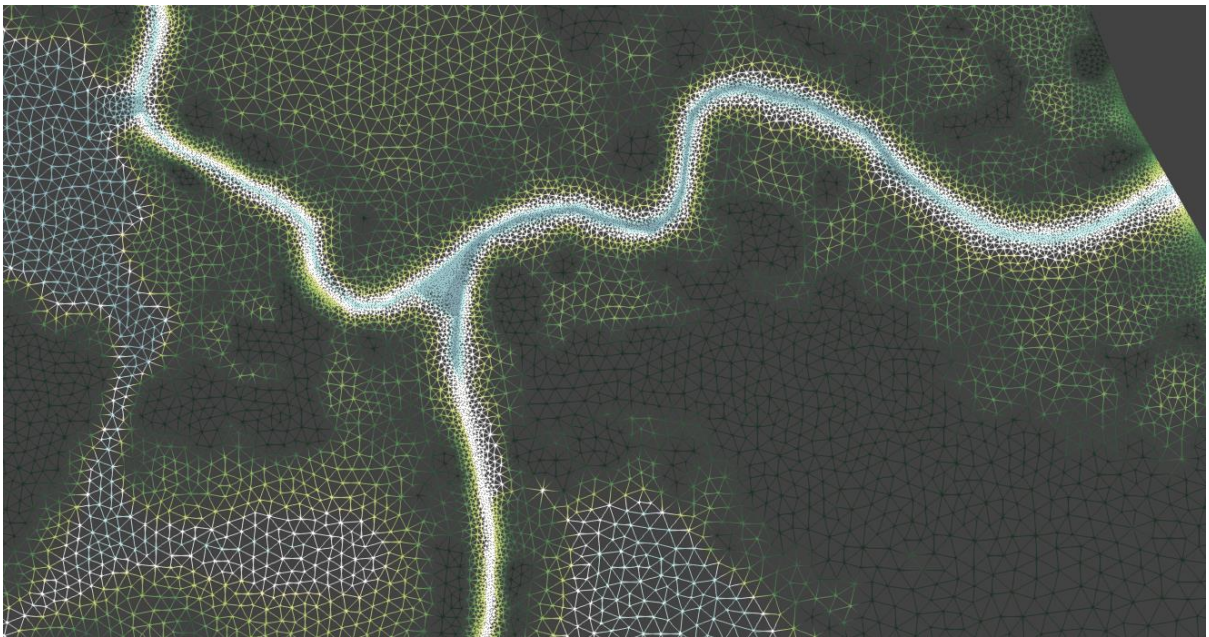


Figura 4-23. Atributo de elevación transferido a la malla de cómputo



### 4.3 PRIMEROS RESULTADOS MODELO HIDRODINÁMICO.

A continuación, se presentan algunos resultados obtenidos con el modelo en su estado actual y corresponden con las variables básicas de un modelo hidrodinámico (profundidad y velocidad). En este caso se presentan los resultados de un solo paso de tiempo para todo el dominio, con el fin de ilustrar el formato de respuesta del modelo hidrodinámico de la ciénaga, a futuro se podrán generar series de tiempo modeladas para ambas variables, para todos los puntos del dominio. A la fecha estos resultados son únicamente ilustrativos.

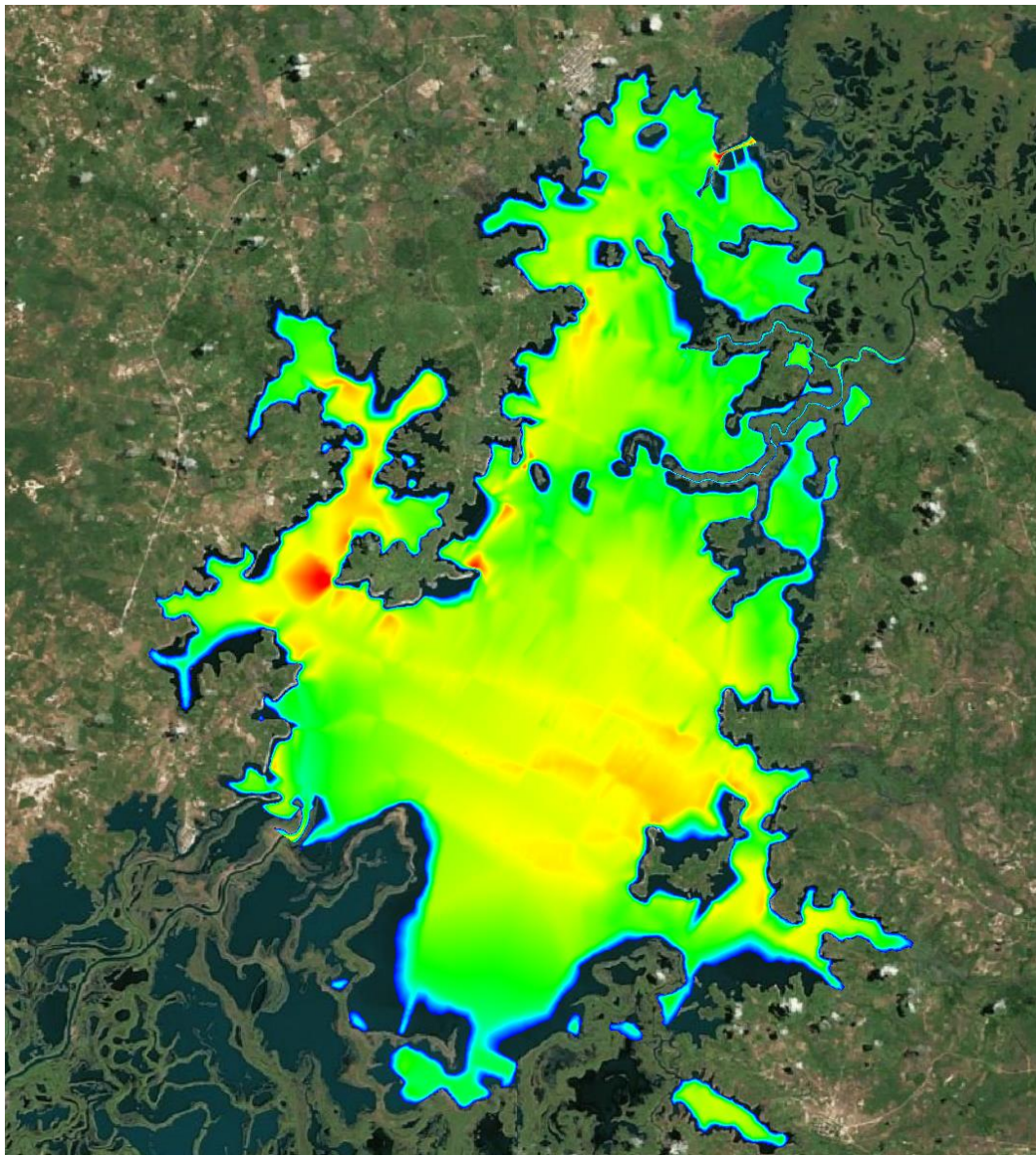
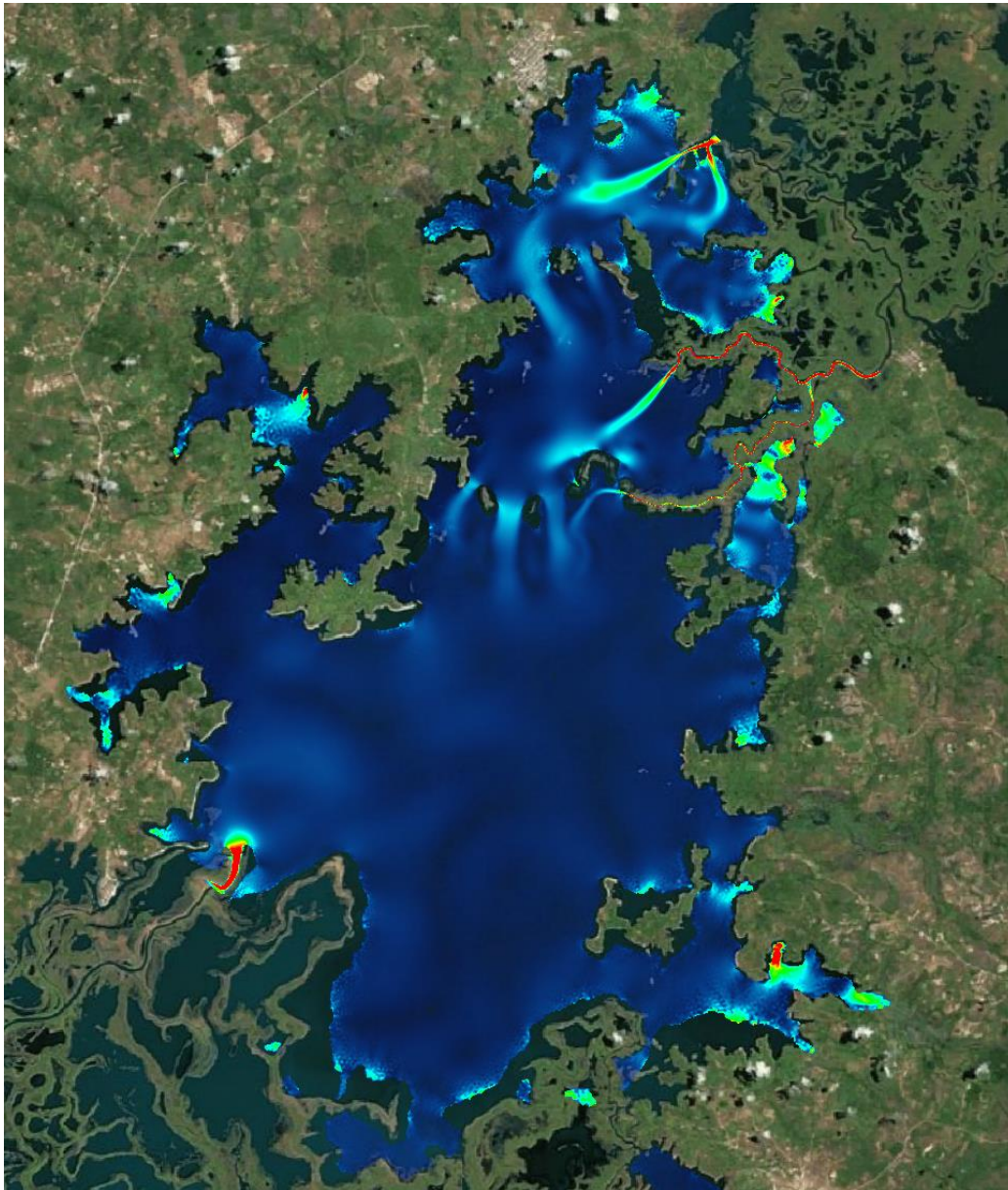


Figura 4-24. Campo de profundidades calculadas en el dominio.





**Figura 4-25. Magnitud de la velocidad calculada por el modelo para un paso de tiempo**

#### **4.4 PRÓXIMOS PASOS EN LA MODELACIÓN**

A continuación, se describen los procesos requeridos para la continuación de la modelación, recordando que hasta el momento se presenta un avance de la modelación hidrodinámica.

- Incorporación de la información a ser levantada en campo: Deberá adicionarse información topo-batimétrica que sea generada al proceso de generación del DTM.

- Refinamiento de la malla, se deberá incorporar información de cuerpos de agua que no hayan sido incorporados en el modelo piloto, como caños y conexiones entre ciénagas adicionales que se puedan observar con la información disponible.
- Incorporación de la información generada en la modelación hidrológica y de series de tiempo de la red de monitoreo del IDEAM.
- Definición de la estrategia de calibración.
- Inicio del proceso de calibración y validación del modelo hidrodinámico.
- Incorporación de los módulos de sedimentos y calidad de agua al modelo hidrodinámico.
- Definición de la estrategia de calibración de los módulos adicionales de sedimentos y calidad del agua.
- Calibración y validación de los modelos de sedimentos y calidad del agua.
- Desarrollo de los acoples de las variables físicas resueltas en la modelación con el modelo biótico a implementar en el modelo.

#### 4.5 REQUERIMIENTOS DE INFORMACIÓN TOPO-BATIMÉTRICA

De acuerdo a los resultados obtenidos en el desarrollo del ítem anterior y los modelos conceptuales construidos para cada hidrosistema se presenta un análisis de las falencias en la información disponible con énfasis en la implementación de modelos hidrodinámicos en la zona de estudio.

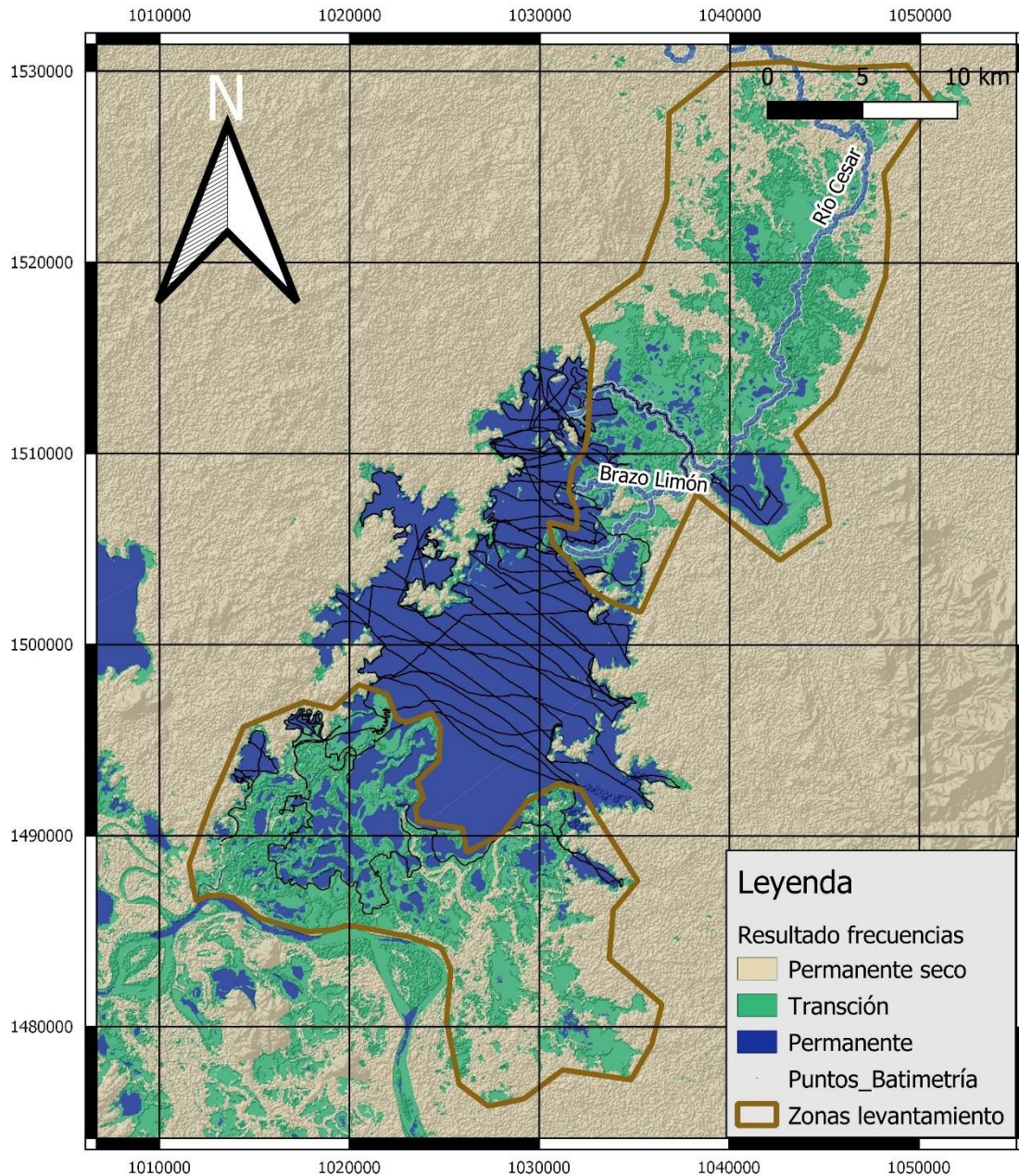
En esta sección se presentan las zonas en las cuales en detalle de la información topo-batimétrica no es el adecuado para los modelos a implementar.

Además se presenta un análisis basado en el ráster de frecuencias generado con imágenes satelitales, en el que se distinguen 3 zonas, como muestra la Figura 4-26: Una primera zona en la que no se identificó en ningún momento la presencia de agua (frecuencia  $\leq 0.05$ ), una segunda zona en las que se identificó agua el 85% o más del tiempo (frecuencia  $\geq 0.85$ ) y una zona de transición ( $0.05 \leq$  frecuencia  $\leq 0.85$ ). Esta zona es de especial interés si se considera, que se inunda durante algunas épocas del año, pero durante la temporada seca existe una alta probabilidad de que esta zona se encuentre descubierta. Si se compara esta zona con la información disponible se evidencia que la zona de transición, que hace parte del espejo de agua en aguas altas pero está descubierta durante la temporada de verano, coincide con las zonas que no han sido previamente cubiertas con levantamientos batimétricos. Además, estas zonas son las que evidencian mayor complejidad en su configuración en términos de caños y cuerpos de agua interconectados. Dadas estas razones se recomienda considerar un levantamiento topográfico en temporada de verano en la zona de transición. Se han identificado dos polígonos a levantar empleando esta estrategia, a continuación (ver la Tabla 4-3), se presenta un resumen de los dos polígonos identificados en términos de áreas cubiertas. Se observa que en los polígonos seleccionados la proporción de área de espejo de agua a ser levantada supera el 50% en ambos casos.

**Tabla 4-3. Composición de las zonas a levantar**

Descripción	Zona Norte	Zona Sur
<b>Área (<math>km^2</math>)</b>	327.67	270.24
<b>Permanente Seco</b>	39.05%	28.21%
<b>Transición</b>	50.54%	51.31%
<b>Permanente</b>	10.40%	20.46%





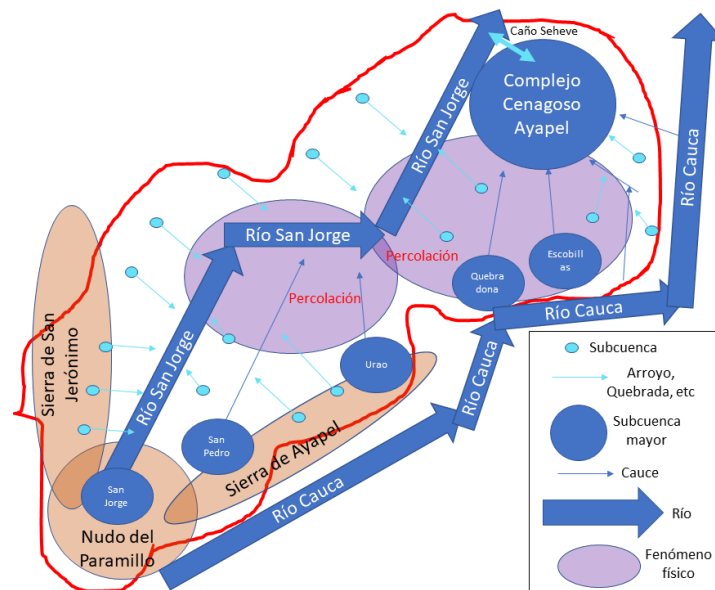
**Figura 4-26. Zonificación frecuencia levantamiento propuesto**

De acuerdo a la selección del dominio se tendrán diferentes zonas a cubrir con levantamiento topo-batimétrico, en el caso de fuentes libres de información el DEM de libre acceso ALOS-PALSAR no logra el detalle requerido para la modelación hidrodinámica planteada, al ser insuficiente su precisión para la escala a modelar y carecer de cubrimiento de la mayoría de zonas cubiertas por el cuerpo de agua.



## 5. CUENCA DEL RÍO SAN JORGE HASTA EL CAÑO SEHEVE

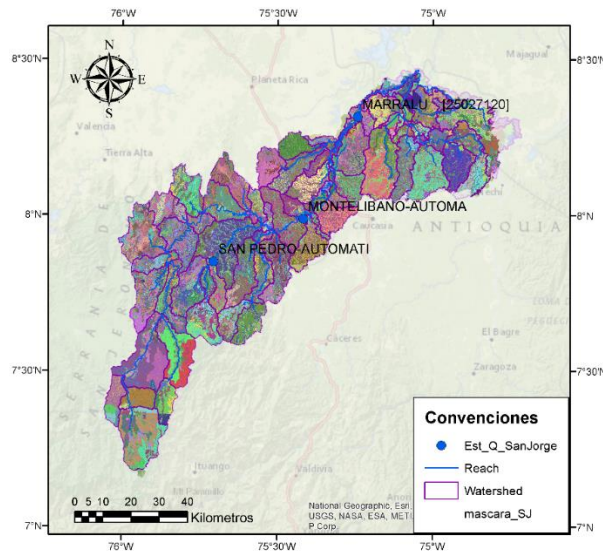
La Figura 5-1 muestra el esquema espacial para la cuenca del río San Jorge hasta el caño Seheve. Se puede ver que las subcuencas principales son aquellas nacidas en el nudo del paramillo como el río San Jorge, y las subcuencas de los ríos San Pedro y Uraó en la serranía de Ayapel. Existen otras subcuencas de menor tamaño que se encuentran sobre la serranía de San Jerónimo y drenan hacia el río San Jorge directamente. Se resalta que, bajo las investigaciones realizadas, se reconoce que la parte baja del río San Jorge antes de llegar a la ciénaga de Ayapel se presentan percolaciones de agua hacia acuíferos profundos que se esquematizan y se implementaran en las subcuencas asociadas a esos espacios. También se resalta la importancia del fenómeno de interacción hidráulica que existe entre el río San Jorge y el complejo cenagoso de Ayapel a través del caño Seheve.



**Figura 5-1. Esquema del modelo conceptual espacial de los cuerpos de agua en la cuenca del río San Jorge aferente a la ciénaga de Ayapel**

### 5.1 CONFIGURACIÓN MODELO

El modelo computacional para el río San Jorge hasta el caño Seheve consta de 70 subcuencas. Las subcuencas generadas son de aproximadamente 100.4 km<sup>2</sup> (Chow, Maidment, & Mays, 1988). Con respecto a la cantidad de HRUs, el modelo tiene 750 HRUs, dando un promedio de aproximadamente 9.2 km<sup>2</sup> por HRU; con esto nuevamente se busca captar la heterogeneidad de comportamientos hidrológicos en la cuenca.



**Figura 5-2. Distribución de los HRUs en la cuenca del río San Jorge**

Dentro de la cuenca existen registros de 3 estaciones. Se incluyeron dentro del análisis de la modelación las 3 estaciones de caudal, ya que todas pasaron los análisis de homogeneidad y se le retiraron los datos anómalos. Las estaciones seleccionadas pueden verse en la Tabla 5-1.

**Tabla 5-1. Estaciones de caudal consideradas para el modelo en la cuenca del río San Jorge**

CODIGO	CAT	NOMBRE	CORRIENTE
25017010	LG	MONTELIEBANO	SAN JORGE
25017020	LG	SAN PEDRO	SAN PEDRO
25027120	LM	MARRALÚ	SAN JORGE

Se tuvieron en cuenta las demandas las demandas estimadas en el Estudio Nacional del Agua 2018 (ENA2018), y en el POMCA del bajo río San Jorge – Mojana. Debido a que la demanda solo se encuentra por subzona para el ENA2018, se incluyó esta demanda en la subcuenca modelada en SWAT que se encontrara más aguas abajo del polígono asociado a la subzona. Los valores de las demandas pueden verse en la Tabla 5-2 y su asignación a las subcuencas modeladas por SWAT se puede ver en la Tabla 5-3. La información se transfirió a los archivos “.wus” que requieren los datos en metros cúbicos por día divididos por 10000.

- Cuenca del río San Jorge hasta la ciénaga de Ayapel
  - POMCA del bajo río San Jorge – La Mojana Documento Fase de diagnóstico Caracterización Biofísica
    - Tabla III.80. Descripción de las infraestructuras hidráulicas en la Cuenca del Rio Bajo San Jorge
    - Tabla III.104. Demanda hídrica subcuencas

**Tabla 5-2. Demandas hídricas del POMCA y del ENA 2018 para la cuenca del río San Jorge**

Cuerpos de agua POMCA	
CA	Demanda (m <sup>3</sup> /s)
Caño El Bejuco (Caño Gavalda)	1.184428
Caño Las Catas	1.8764029
Caño Muñoz	3.7019328
Caño Rabon	2.1925654
Caño San Matias	2.2187878
Quebrada Aguas Claras	3.9995688
Quebrada Escobillas	1.1790634
Quebrada Gonzalo	0.1359737
Quebrada La Manuelita	0.2295056
Quebrada Las Mellizas	0.0033461
Quebrada Los Micos	0.1844186
Quebrada Los Zambitos	0.0172178
Quebrada Los Zambos	3.9111223
Quebrada Quebradona	2.1942418
Rio Cauca	1.8412909
ENA2018	Demanda (m <sup>3</sup> /s)
SZH2501	4.02

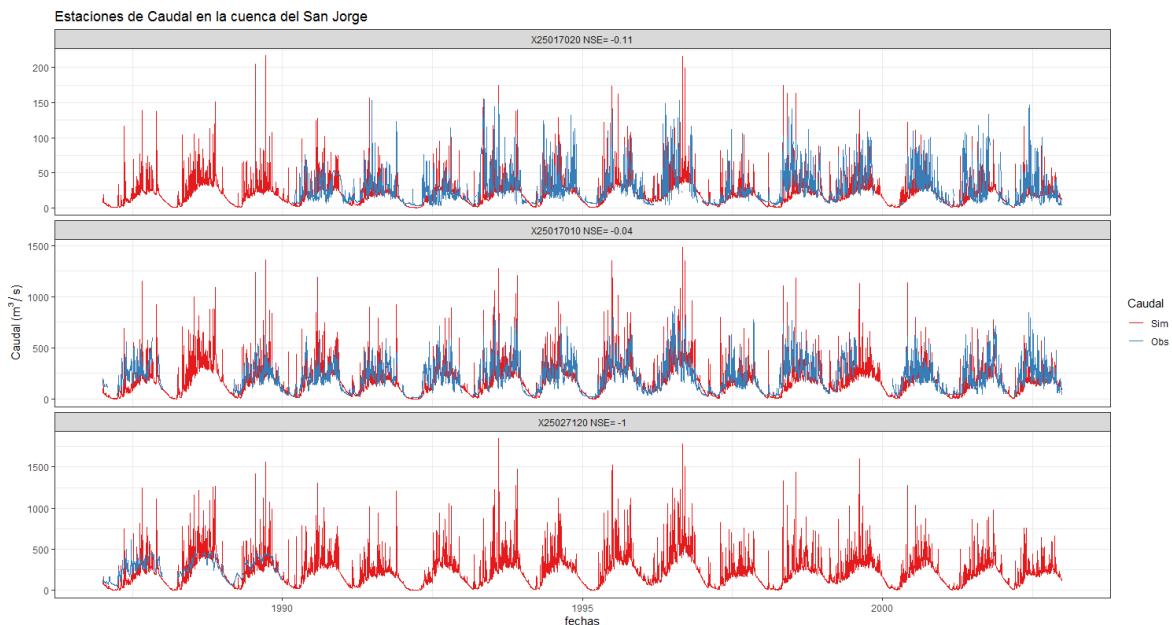
**Tabla 5-3. Demandas asignadas a las subcuencas de SWAT, caso cuenca del río San Jorge**

Subcuenca SWAT	Demanda (m <sup>3</sup> /s)	Demanda (m <sup>3</sup> /día/10000)	Justificación
1	15.97	138.01	POMCA Bajo San Jorge
5	2.22	19.17	POMCA Bajo San Jorge
14	3.70	31.98	POMCA Bajo San Jorge
15	0.00	0.03	POMCA Bajo San Jorge
21	1.18	10.19	POMCA Bajo San Jorge
23	4.00	34.56	POMCA Bajo San Jorge
26	3.91	33.79	POMCA Bajo San Jorge
30	1.88	16.21	POMCA Bajo San Jorge
32	2.19	18.96	POMCA Bajo San Jorge
34	0.02	0.15	POMCA Bajo San Jorge
42	4.02	34.76	ENA2018 SZH Alto San Jorge
44	0.55	4.75	POMCA Bajo San Jorge

Para la precipitación se utilizaron series de tiempo provenientes de interpolaciones de solo estaciones usando el método IDW que después fueron promediados dentro de cada subcuenca. EL mismo procedimiento se llevo a cabo para las series de

temperatura, pero el método de interpolación usado fue el IDW con correlación con la altura.

Se describen a continuación las simulaciones de caudal obtenidas en los tres canales, cuya ubicación de salida corresponde a la posición de las tres estaciones de caudal (en la Figura 5-3 se grafican las simulaciones y las observaciones). Esto corresponde a un análisis preliminar del desempeño de las simulaciones con miras al proceso de ajuste de parámetros que controlan los procesos físicos de cantidad de agua. Se puede ver una correspondencia de las simulaciones con el comportamiento de las observaciones. A pesar de no estar ajustados los parámetros, las simulaciones siguen el ciclo monomodal que registran las estaciones, y los volúmenes de agua simulados y observados son similares. Se presentan altos picos de caudal tanto en los caudales simulados como en los observados, cuyo comportamiento se ajusta a través de la calibración.



**Figura 5-3. Hidrógrafas sin calibrar producidas por las simulaciones del modelo del río San Jorge hasta el caño Seheve**

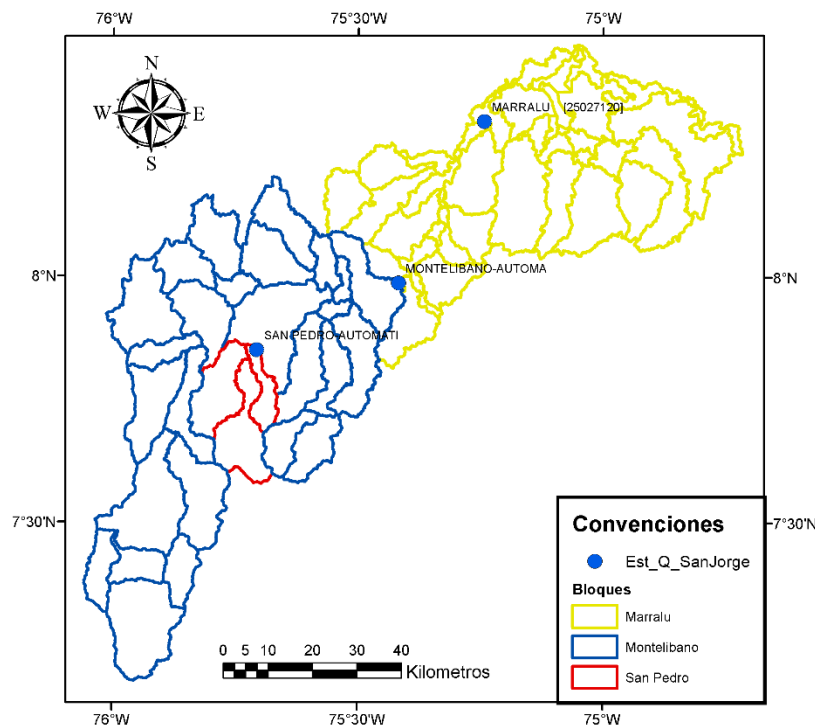
## 5.2 CALIBRACIÓN CANTIDAD DE AGUA

Para el ajuste de los parámetros se definieron bloques de calibración que agrupan subcuencas con una metodología similar a la seguida para la cuenca del río Cesar. En el caso de la cuenca del río San Jorge hasta el caño Seheve, se plantearon tres bloques de calibración asociados a las tres estaciones de caudal disponibles. Estos pueden verse en la Figura 5-4. Los bloques propuestos se denominaron:



- Bloque 1: subcuencas que la red de drenaje lleva la escorrentía hacia la estación San Pedro
- Bloque 2: subcuencas que la red de drenaje lleva la escorrentía hacia la estación Montelibano a excepción de las consideradas para el bloque 1
- Bloque 3: subcuencas que la red de drenaje lleva la escorrentía hacia la estación Marralú a excepción de las consideradas para los bloques 1 y 2.

Por otra parte, se definieron los periodos de calibración y validación de igual manera que se hizo para la cuenca del río Cesar. Los periodos escogidos fueron los mismos ya que también se presenta una buena disponibilidad de datos en dichos periodos y es un registro lo suficientemente largo, lo que da robustez al análisis de las simulaciones de caudal y demás variables; además es un periodo reciente que busca representar las condiciones actuales del sistema.



**Figura 5-4. Bloques de ajuste de parámetros planteados para la cuenca del río San Jorge hasta el caño Seheve**

En primera medida se extrapolaron los análisis de sensibilidad de parámetros ensayados en la cuenca del río Cesar hacia la cuenca del San Jorge. En este proceso, se evidenció que era necesario ajustar los mismos parámetros que en la cuenca del río Cesar a excepción del parámetro TRNSRCH. Esto se evidencio gracias a que los resultados del modelo previo al ajuste de los parámetros mostraban un ajuste general de los volúmenes de caudal acorde con los caudales observados, ver Figura 5-3. Implicando así que no existe en esta zona del río San Jorge una gran cantidad de agua que percole hacia acuíferos profundos.



Segundo, se ajustaron los parámetros con el algoritmo de búsqueda automática PSO del aplicativo SWAT-CUP, con 2000 simulaciones. Esto tuvo como objetivo hallar las zonas del espacio parametral donde se producen buenas simulaciones en comparación con las observaciones de caudal. Los resultados del algoritmo fueron analizados y filtrados para verificar que los resultados de las simulaciones estuvieran dentro del rango apropiado para cada parámetro. El listado de parámetros evaluados, los ensayos de calibración y los scripts de análisis se adjuntan a este documento en el anexo 1.

Posteriormente se variaron los parámetros en rangos cercanos al valor encontrado por el algoritmo PSO. Esto tuvo como objeto verificar que los valores encontrados correspondan con lo indicado por otros documentos sobre los procesos físicos que se dan en la cuenca. Al realizar las variaciones de los parámetros no se encontró mejoras sustanciales sobre el desempeño del modelo. La lista de las variaciones puede verse en la Tabla 5-4.

**Tabla 5-4. Procedimiento de ajuste de parámetros seguido para la cuenca del río San Jorge aferente a la ciénaga de Ayapel**

Opción	No. Sim.	Desempeño General	Objetivo/Observaciones
Iter1_2000	2000 simulaciones	$KGE_{prom} = 0.6$	<p>Todos los bloques todos los parámetros al tiempo. Análisis posterior con filtración de las simulaciones en rangos de parámetros que probablemente representan mejor algunos fenómenos físicos que se dan en la cuenca.</p> <p>Al filtrar los parámetros se encuentra que las simulaciones de caudal siguen el ciclo monomodal que se registra en las estaciones. La variabilidad diaria también es bien representada en la estación Monteliebano y Marralú, pero no es tan bien representada en la estación San Pedro. Se busca refinar los parámetros en dicha estación.</p>
Bloque San Pedro	1000 simulaciones	$KGE_{SanPedro} = 0.51$	<p>Simulaciones automáticas para mejorar el desempeño en la estación San Pedro. Se encuentra que, aunque mejora el coeficiente KGE para esa estación, desmejora en gran medida el coeficiente de correlación producto de que las simulaciones tienden ahora a parecerse a una serie de tiempo de promedio de cada mes. En consecuencia, no se toman en cuenta los resultados de esta corrida.</p>
Simulaciones variando los rangos	20 sim. En cada		<p>Sobre estos ajustes realizados sobre el bloque 1, se realiza un cambio de función objetivo al coeficiente de correlación R2 con el objetivo</p>

<p>manualmente</p>	<p>búsqueda</p>		<p>de aumentar la representatividad diaria de los picos de caudal. Esto se hace porque una mejor representatividad diaria producirá en consecuencia unos mejores resultados a escala mensual, anual, etc.</p> <p>Bloque 1 Variación del CN en la estación San Pedro en el rango -90% a -30%. Se encuentra que no hay mayor afectación en los picos de caudal debido a la variación de este parámetro. Sin embargo, se verifica en otro rango de parámetros el desempeño de las simulaciones.</p> <p>Bloque 1 Variación del CN en la estación San Pedro en el rango -30% a 30%. Se encuentra que no hay mayor afectación en los picos de caudal debido a la variación de este parámetro. Por el contrario, se disminuye en gran medida el coeficiente de correlación entre el caudal simulado y observado.</p> <p>Bloque 1: Variación del CH_K en la estación San Pedro en el rango 25 a 50. Se encuentra que no hay mayor afectación en los picos de caudal debido a la variación de este parámetro lo que se traduce en que no se mejora el desempeño a escala diaria, que es el objetivo de esta variación. Por el contrario, se disminuye en gran medida el coeficiente de correlación entre el caudal simulado y observado.</p> <p>Bloque 1: Variación del SOL_K en la estación San Pedro en el rango -0.25 a 0.25, con el objetivo de verificar el valor encontrado por las simulaciones anteriores y mejorar la representatividad de los picos diarios de caudal. No se evidencia cambio o mejora significativa, se deja el valor hallado previamente.</p> <p>Al finalizar estos ajustes se ve que la hidrógrafa simulada para la estación San Pedro sigue manteniendo el ciclo monomodal que se observa en los datos observados. Se ha logrado mejorar un poco el tamaño de los picos de caudal simulado en comparación con el observado, pero en general la representación sigue siendo muy parecida a la encontrada en las primeras simulaciones. Se prosigue con el bloque 2</p>
--------------------	-----------------	--	--

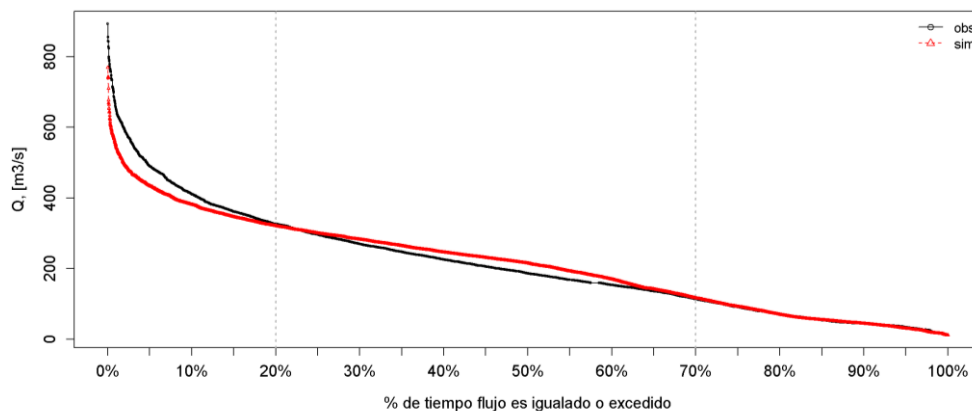
			<p>Bloque 2 Variación del CN en la estación San Pedro en el rango -99% a -50% para verificar los valores encontrados por el algoritmo PSO. Se encuentra una mejor representación del valor pico de los caudales diarios en comparación con los observados con un valor más cercano al ingresado con base en los datos de suelos y coberturas. Se cambia el valor encontrado por el algoritmo PSO.</p> <p>Bloque 2 Variación del CH_K en la estación San Pedro en el rango 100 a 200 mm/día para verificar los valores encontrados por el algoritmo PSO. Se encuentra que hay un leve retardo y anticipación de la ocurrencia de los picos diarios. El valor encontrado anteriormente sigue siendo el que mejor representa los picos diarios.</p> <p>Bloque 2 Variación del SOL_K en la estación San Pedro en el rango 0 a 100 % para verificar los valores encontrados por el algoritmo PSO. Se encuentra que se modifica el comportamiento de la curva de recesión, profundiza un poco la pendiente de ese decaimiento, pero la variación no es significativa como para mejorar el desempeño en comparación con los caudales observados.</p> <p>Bloque 2 Variación del RCHRG_DP en la estación San Pedro en el rango 0 a 0.8 para verificar los valores encontrados por el algoritmo PSO. Se encuentra que se modifica el comportamiento de la curva de recesión y de los picos en gran medida, pero el valor hallado por el algoritmo PSO es el que mejores resultados produce porque valores más altos causan que las curvas de recesión se eleven y los picos diarios de caudal se disminuyan de manera excesiva, lo que no corresponde con los registros de caudal observado. En consecuencia, se deja el valor de 0.179 hallado por el algoritmo PSO.</p> <p>Al finalizar estos ajustes, la hidrógrafa simulada de la estación Monteliebano representa en general el ciclo monomodal captado por la estación y representa aceptablemente los picos diarios de caudal y de manera muy buena la variación mensual. Asimismo, hay una buena coincidencia de las curvas de recesión</p>
--	--	--	---

			<p>debido a los ajustes en la permeabilidad del suelo. Se prosigue con el bloque 3</p> <p>Bloque 3: Variación del CN en la estación San Pedro en el rango -50% a -0% para verificar los valores encontrados por el algoritmo PSO. Se encuentra que no hay mayor afectación en los picos de caudal debido a la variación de este parámetro, y que el valor encontrado anteriormente por el algoritmo PSO produce los resultados más acordes comparando contra los registros observados.</p> <p>Bloque 3: Variación del CH_K en la estación San Pedro en el rango 40 a 105 mm/día para verificar los valores encontrados por el algoritmo PSO. Se encuentra que no hay mayor afectación en los picos de caudal debido a la variación de este parámetro, y que los cambios se presentan en las partes finales de la curva de recesión. Se deja en consecuencia el valor ajustado anteriormente, que es el que produce los resultados más acordes con las observaciones y que con cuerda con la información registrada en el mapa de recarga hídrica potencial del ENA2018.</p> <p>Bloque 3: Variación del SOL_K en la estación San Pedro en el rango 0 a 100% para verificar los valores encontrados por el algoritmo PSO. En este caso se encontró que no se presentan cambios importantes en los caudales simulados y que un valor cercano al original ingresado al modelo logra un buen desempeño en las simulaciones incluso a escala diaria. El valor se encuentra registrado en la Tabla 5-5.</p> <p>Bloque 3: Variación del SOL_AWC en la estación San Pedro en el rango -70% a 0% para verificar los valores encontrados por el algoritmo PSO. No existe variación importante en las simulaciones de caudal, por tanto, no hay mejora en el desempeño y representación de los caudales simulados con respecto a los observados.</p> <p>Al terminar estos análisis en el bloque 3, la hidrógrafa simulada de la estación Marralú representa en general el ciclo monomodal captado por la estación y representa</p>
--	--	--	--

			aceptablemente los picos diarios de caudal y de buena manera a escala mensual. Asimismo, hay una buena coincidencia de las curvas de recesión debido a los ajustes en la permeabilidad del suelo.
--	--	--	---

### 5.2.1 Descripción de los caudales simulados y observados en el periodo usado para calibración (1987-2002)

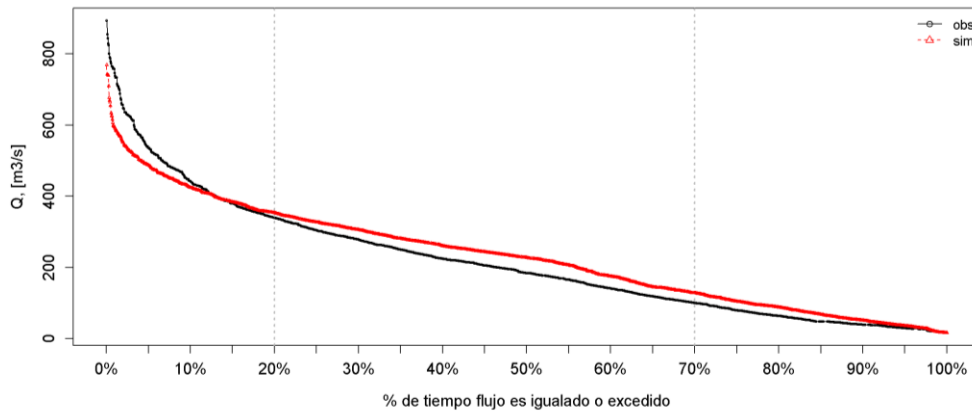
Al finalizar estos procesos de ajuste de parámetros se realizó una comparación alterna de las simulaciones y las observaciones. A través de la curva de duración de caudales (CDC), se pudo comparar como el modelo estaba representando los caudales altos medios y bajos. Esto se realizó también para varios periodos. En la Figura 5-5 se puede ver que para la estación Monteliebano se tiene una buena representación de los caudales medios y bajos, y aceptable para los caudales altos. Esto se repitió para las otras estaciones encontrando comportamientos similares.



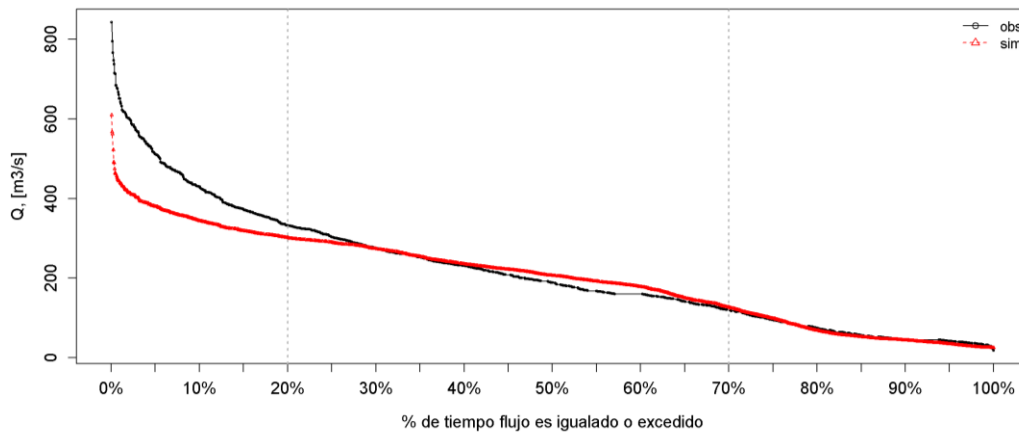
**Figura 5-5. Curva de duración de caudales simulada y observada para la estación Monteliebano**

También se analizó la variación temporal de la representación de los flujos altos, medios y bajos, en los periodos 1987-1992, 1993-1997 y 1998-2002. De dicho análisis se desprende que: para la estación San Pedro, se tiene una buena representación de los caudales bajos y medios; para la estación Monteliebano, existe una buena representación de los caudales bajos y medios en los tres periodos pero solamente es buena para los altos en los primeros dos intervalos (como ejemplo mirar la Figura 5-6 y la Figura 5-7); para la estación Marralú solo se contó con información para el primer intervalo de tiempo (1987-1992), y se encontró una buena correspondencia para los caudales medios y bajos con sobreestimaciones en los caudales altos.





**Figura 5-6. CDC simulada y observada para la estación Monteliebano para el periodo 1993-1997**



**Figura 5-7. CDC simulada y observada para la estación Monteliebano para el periodo 1998-2002**

Los parámetros encontrados reflejaron dicho comportamiento. En cada uno de estos bloques se ajustaron los parámetros que se encuentran en la Tabla 5-5, listado de parámetros que proviene de la revisión bibliográfica realizada en el producto 4, de los análisis de sensibilidad local y de los ajustes mencionados. En la misma tabla se encuentran la forma de variación de los parámetros y su valor.

**Tabla 5-5. Parámetros ajustados para mejorar el desempeño, caso cuenca del río San Jorge hasta ciénaga de Ayapel**

Parámetro	Variación	BQ1. San Pedro	BQ2. Monteliebano	BQ3. Marralú
CN2	Relativa	-0.725	-0.537	-0.444
RCHRG_DP	Reemplazo	0.422	0.179	0.714
SOL_AWC	Relativa	0.735	-0.754	-0.619
SOL_K	Relativa	-0.657	0.442	0.075

GW_DELAY	Relativa	-0.997	-0.391	1.635
CH_K	Reemplazo	35.713	151.954	103.464
ALPHA_BF	Reemplazo	0.620	0.472	0.377

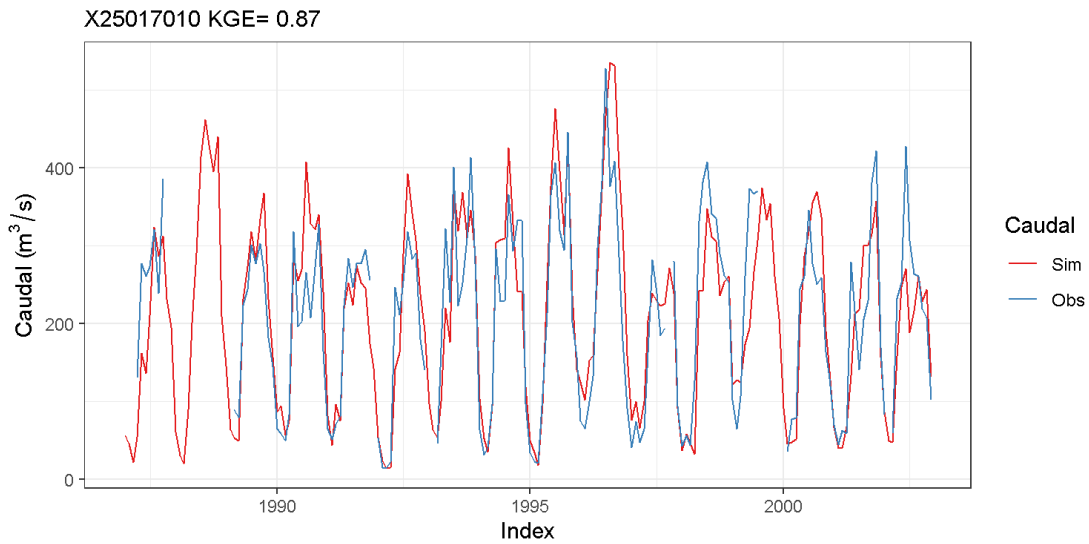
Se analizaron los valores de los parámetros encontrados y se compararon contra información complementaria. El mapa de recarga potencial del ENA2018 identifica que para el territorio que comprende los bloques Monteliebano y Marralú, existe una recarga baja y moderada, mientras que para el bloque San Pedro la recarga potencial es muy baja (IDEAM, 2019). Los valores encontrados para los parámetros SOL\_K y CH\_K (que están asociados al fenómeno percolación), tienen valores más altos para los bloques Monteliebano y Marralú, lo que coincide con el mapa potencial de recarga. Igualmente, el valor del parámetro RCHRG\_DP, que controla el paso hacia el acuífero profundo dentro de la esquematización de SWAT, para el bloque Marralú también tiene un valor bastante alto.

Algunas métricas de desempeño de las simulaciones a nivel diario y mensual pueden verse en la Tabla 5-6. Puede verse que a nivel mensual el desempeño en la estación Monteliebano y en la estación Marralú son buenos y muy buenos de acuerdo con D. N. Moriasi et al (2007). El error porcentual en la estación monteliebano es de a penas 0.8% y en la estación Marralú existe una subestimación del 3.4%.

**Tabla 5-6. Desempeño de las simulaciones, caso cuenca del río San Jorge**

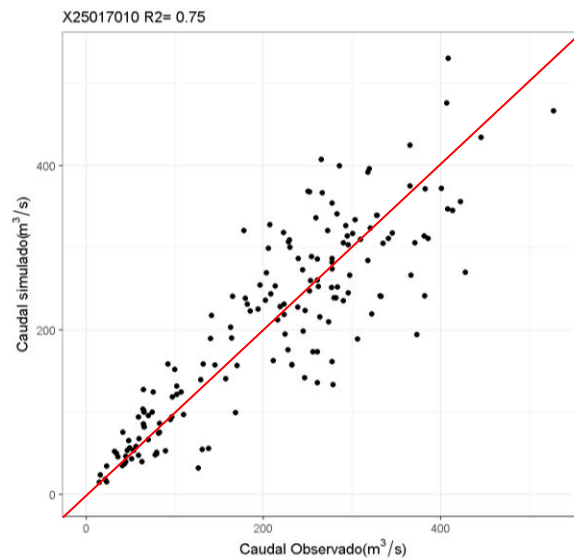
Métrica \ Estación	Diario			Mensual		
	X25017020 San Pedro	X25017010 Monteliebano	X25027120 Marralú	X25017020 San Pedro	X25017010 Monteliebano	X25027120 Marralú
NSE	0.212	0.516	0.501	0.413	0.730	0.643
KGE	0.338	0.693	0.706	0.541	0.866	0.733
RMSE	20.434	102.450	84.034	12.464	60.530	65.630
PBIAS (%)	-24.7	0.6	-3.5	-23.6	0.8	-3.4
R2	0.292	0.532	0.675	0.557	0.753	0.776

Ejemplos de las simulaciones con los parámetros ajustados pueden verse en la Figura 5-8 y Figura 5-9. Allí se puede ver una buena correspondencia de las simulaciones mensuales contra los datos observados, donde se logra representar el ciclo monomodal de la estación. Las discrepancias que se dan entre los resultados simulados y observados se deben a las incertidumbres propias de la estructura del modelo utilizado que es una representación de la realidad. Por ejemplo, aunque para el año 1996 se presenta una buena estimación del caudal durante todo el año, persiste una pequeña discrepancia hacia mitad de año en la que dos picos se registraron en las observaciones, pero el modelo solo logró representar uno de los picos de caudal.



**Figura 5-8. Hidrógrafa mensual para la estación 25017010 caso río San Jorge**

La correspondencia se evidencia más claramente en el scatter plot (las figuras de las demás estaciones se adjuntan en el anexo 2 de este informe). En ella se puede ver que la dispersión general de los puntos se asienta sobre una línea de 45° que representaría un desempeño perfecto. A medida que se aumenta el valor simulado y observado, los puntos se alejan de la recta, pero en general la representación sigue siendo buena.

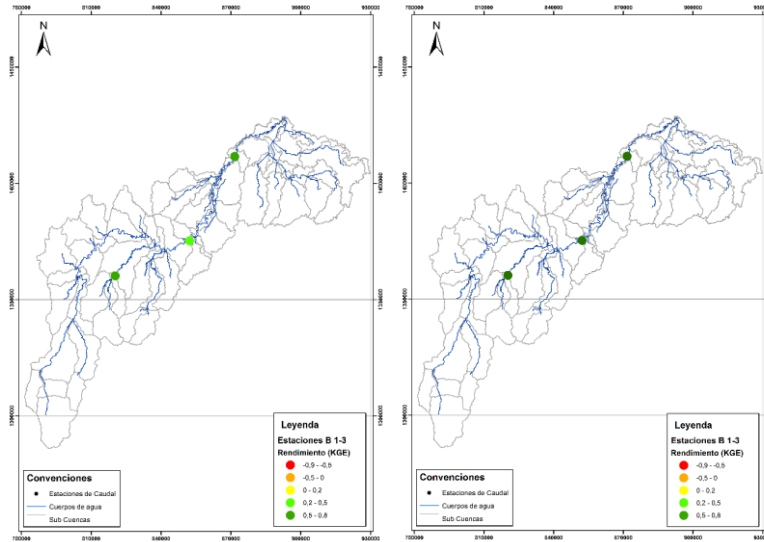


**Figura 5-9. Dispersión de los datos mensuales para la estación Monteliebano [25017010], caso río San Jorge**

Un mapa del desempeño con respecto a la cantidad de agua en la cuenca puede verse en la Figura 5-10. Tanto a nivel diario como a nivel mensual se encuentra que



el desempeño en las tres estaciones es bueno, siendo la estación Monteliebano la que mejor desempeño presenta con una clasificación de muy buena de acuerdo con D. N. Moriasi et. al. (2007). La estación San Pedro que se encuentra en la parte media-alta de la cuenca tiene un desempeño bueno, sobre todo a nivel mensual.

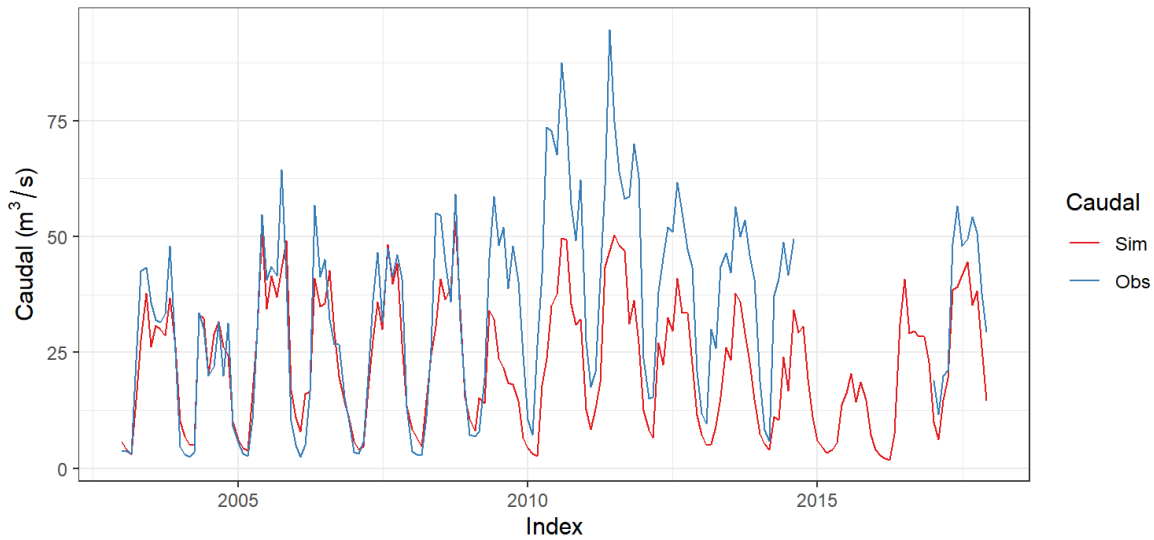


**Figura 5-10. Desempeño de las simulaciones en la cuenca del río San Jorge a nivel diario (izq) y mensual (der) aferente a la ciénaga de Ayapel**

### 5.2.2 Análisis en el periodo 2003 - 2017

Para este periodo de tiempo sólo se hicieron evaluaciones en las estaciones San Pedro y Monteliebano, porque la estación Marralú no posee datos en ese periodo. Se puede ver en la Figura 5-11 que las simulaciones hasta el año 2009 son bastante parecidas a los datos observados, posterior a este año se evidencia un sesgo negativo en las simulaciones. Esto se debe a que desde ese año existe una reducción en la cantidad de pluviómetros disponibles, sobre todo en los cercanos a la cuenca aferente a la estación, lo que causa incertidumbres sobre la cantidad de agua que se produce en las subcuencas que drenan hacia la estación. Sin embargo, la buena representación para el periodo 1987-2002 y desde el 2003 al 2008 evidencian un buen ajuste de los parámetros del modelo.

X25017020 KGE= 0.52

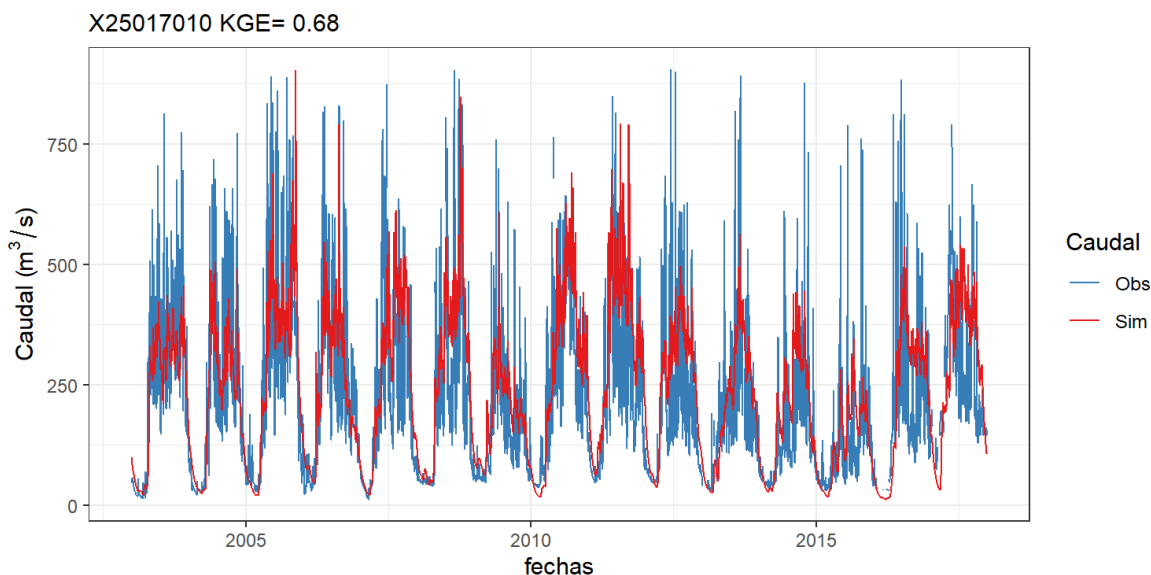


**Figura 5-11. Caudales simulados y observados en la estación San Pedro en el periodo 2003-2017**

La Figura 5-12 muestra los caudales simulados y observados para la estación Monteliebano. Se evidencia nuevamente que las simulaciones tienen una buena representación del ciclo monomodal registrado en la estación. Los picos diarios de caudal no son tan bien representados, pero si la variación mensual. Al tener en cuenta que los registros observados para este periodo no fueron tenidos en cuenta para el ajuste de parámetros, se evidencia un buen ajuste de los parámetros del modelo. Las demás figuras se adjuntan a este documento en el anexo 2.

La Tabla 5-7 muestra las métricas calculadas en el periodo mencionado. Se debe destacar que las simulaciones en la estación San Pedro desmejoraron su desempeño debido a lo explicado en la Figura 5-11. Por otra parte, la estación Monteliebano presenta una leve mejora en el desempeño, siendo el mayor el indicado por el coeficiente de correlación a escala mensual.





**Figura 5-12. Caudales simulados y observados a escala diaria en la estación Monteliebano para el periodo 2003-2017**

**Tabla 5-7. Desempeño de las simulaciones, caso cuenca del río San Jorge en el periodo 2003-2017**

Métrica \ Estación	Diario		Mensual	
	X25017020 San Pedro	X25017010 Monteliebano	X25017020 San Pedro	X25017010 Monteliebano
NSE	0.27	0.50	0.41	0.73
KGE	0.38	0.68	0.52	0.82
RMSE	22.87	116.00	15.97	65.77
PBIAS (%)	-30.8	9.1	-30.1	10.6
R2	0.42	0.53	0.68	0.81

Se realizaron análisis en varios intervalos de este periodo de tiempo. Por ejemplo, la Figura 5-13 muestra la curva de duración de caudales para el periodo 2003-2008. Se puede ver que se tiene un buen ajuste para los caudales medios y bajos, mientras que para los caudales altos hay una subestimación de los valores. Al analizar esta estación en los periodos 2008-2014 y 2015-2017 se evidencia una subestimación tanto de los flujos bajos, medios y altos. Para la estación Monteliebano hay una buena estimación de los caudales bajos y altos, y una estimación aceptable de los caudales medios que es buena para el periodo 2003-2008. Las gráficas se adjuntan a este documento en el anexo 2.

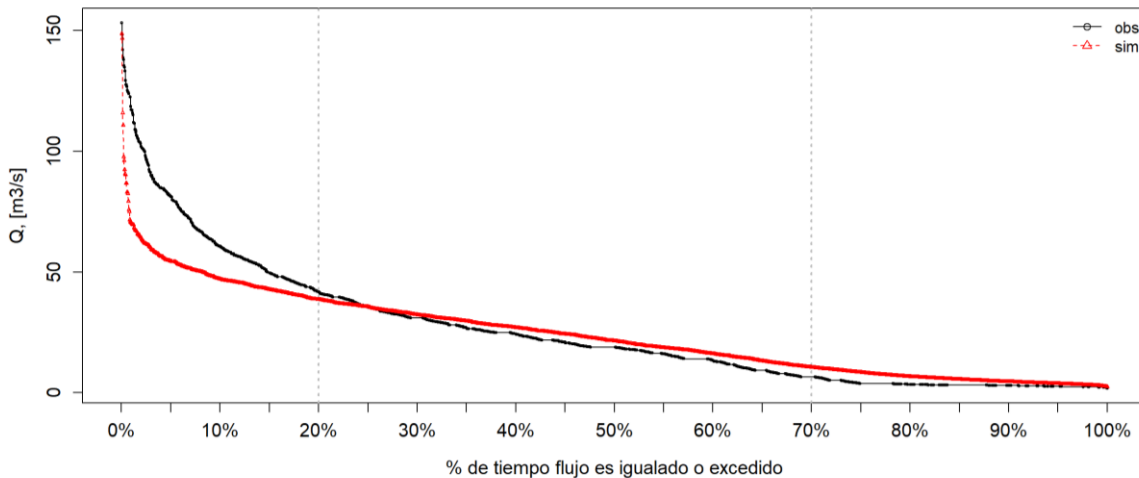


Figura 5-13. CDC para la estación San Pedro en el periodo 2003-2008

### 5.2.3 Análisis de la correspondencia entre la lluvia y el caudal simulado

A parte de las curvas de duración de caudales y de la comparación de los caudales simulados contra los observados, se analizó la correspondencia entre la lluvia y el caudal. La Figura 5-14 muestra que a nivel mensual en la estación San Pedro se tiene una buena correspondencia del ciclo monomodal que se registró en la estación. Se resalta la una falta de representación del pico del mes de mayo de 1995, que se debe a vacíos en los pluviómetros para esos meses, vacíos que generaron un menor volumen en la precipitación ingresada al modelo. Esto es un comportamiento particular del periodo mencionado y no es un problema sistemático en la determinación de la lluvia.

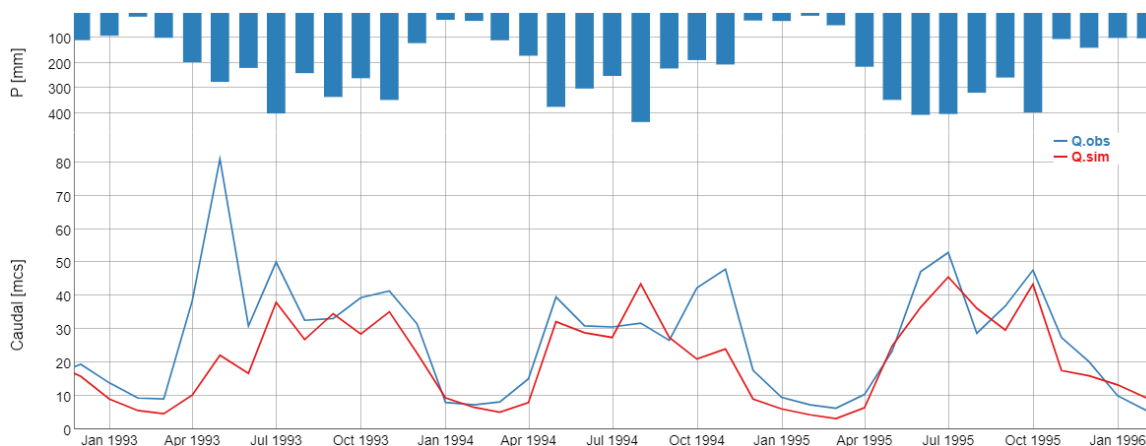
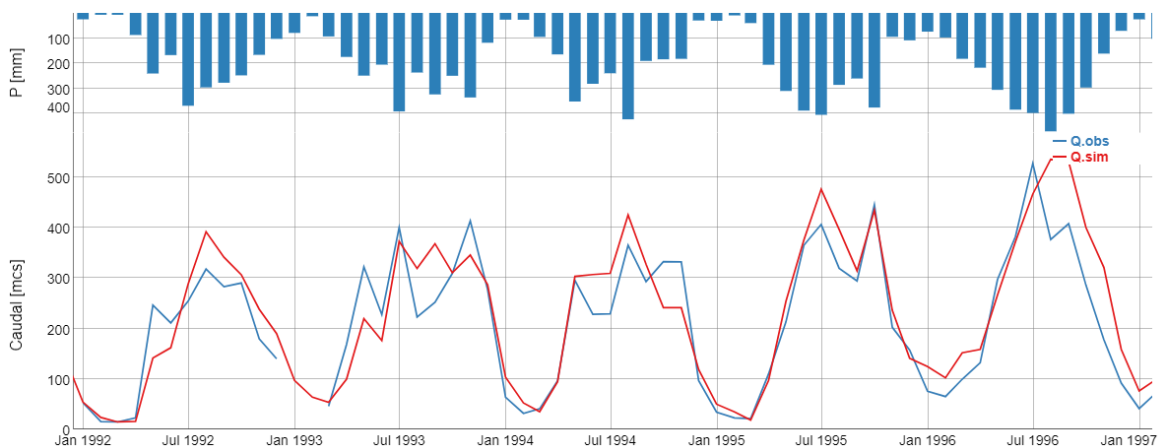


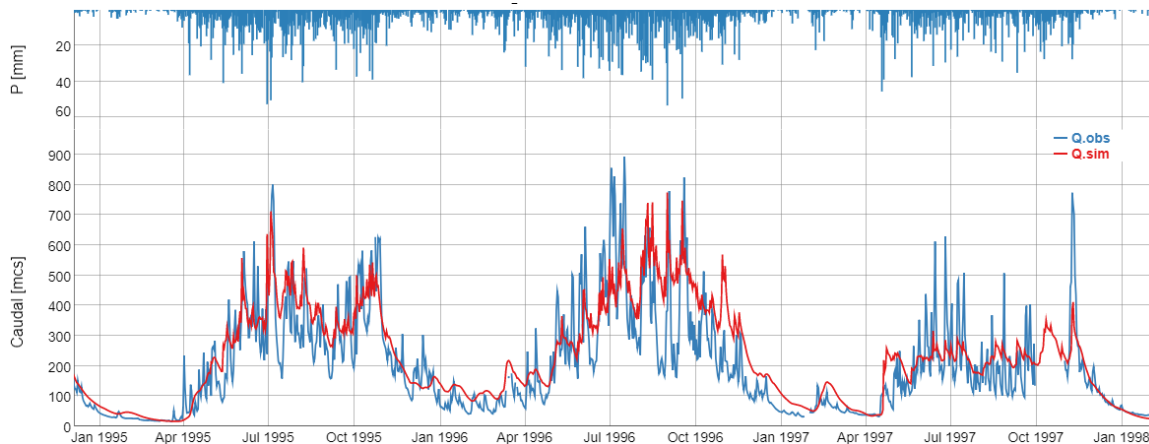
Figura 5-14. Precipitación promedio sobre la cuenca drenante a la estación San Pedro e hidrógrafas simuladas y observadas para el periodo 1993-1995

La Figura 5-15 muestra en la estación Monteliebano también los registros mencionados a escala mensual. Se puede ver también una buena representación del ciclo monomodal de precipitación que se da en la cuenca y como dicho registro es transformado a la escorrentía simulada por el aplicativo SWAT. En el mes de septiembre de 1993 se puede ver una sobreestimación del caudal que puede deberse a las incertidumbres propias de la estimación que hace la estación del caudal o a sobreestimaciones la precipitación sobre la cuenca. Las incertidumbres hacen parte del proceso ya que lo que se busca es representar la realidad y esa representación no es perfecta.



**Figura 5-15. Precipitación promedio sobre la cuenca drenante a la estación Monteliebano e hidrógrafas simuladas y observadas para el periodo 1992-1996**

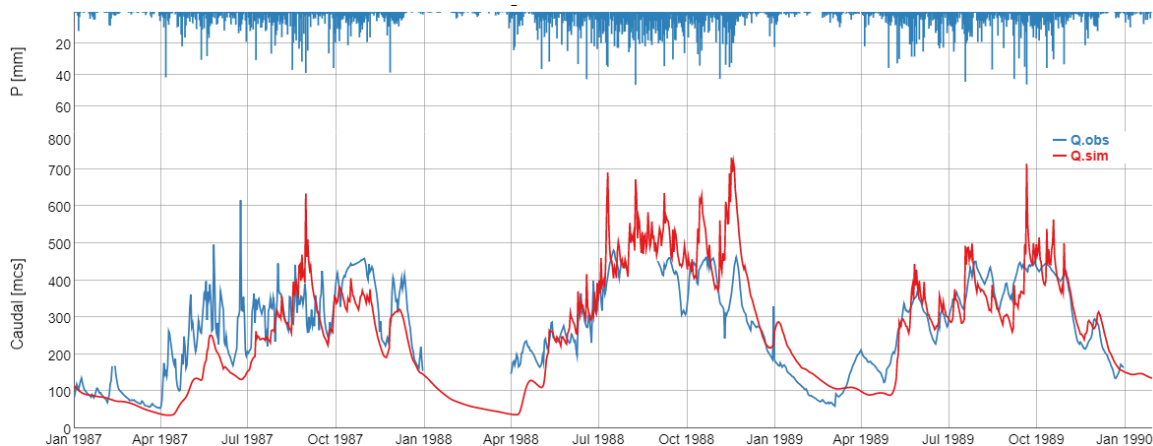
La Figura 5-16 muestra los detalles para la estación Monteliebano pero a escala diaria. Se puede ver que no solamente se tiene una buena representación del ciclo monomodal en la cuenca sino que también existe una buena correspondencia con los picos diarios de caudal, que corresponden a los pulsos de lluvias registrados. Se presentan algunas sobre y subestimaciones de los caudales simulados en algunos días, producto de la atenuación de los picos de precipitación que realiza el modelo hidrológico y que en algunos casos es mayor a la que evidencian las observaciones de caudal. Esto se puede deber al ajuste de los parámetros relacionados con la cantidad de agua que fueron ajustados para obtener un desempeño general buena de las simulaciones en comparación con las observaciones. Algunos de los valores de los parámetros fueron analizados contra otro tipo de información cartográfica como se evidenció en el producto 5.



**Figura 5-16. Precipitación promedio sobre la cuenca drenante a la estación Monteliebano a nivel diario e hidrógrafas simuladas y observadas para el periodo 1995-97**

También se realizó la comparación de las simulaciones y la precipitación ingresada al modelo contra los registros de la estación Marralú (ver Figura 5-17). Al comparar la precipitación contra el caudal observado se evidencia una atenuación de varios de los picos de precipitación que se registraron como picos suaves. Muchos de esos impulsos de precipitación son también atenuados por las simulaciones del modelo, sin embargo, la estructura conceptual del aplicativo no es perfecta y por tanto no logra representar todos los picos fielmente. No obstante, se debe resaltar que en general para esta estación que se encuentra en la parte baja de la cuenca, se logra también representar el ciclo monomodal que registro la estación de caudal.

Otras figuras que detallan la relación entre la precipitación, el caudal simulado y observado se adjuntan este documento en el anexo 2.



**Figura 5-17. Precipitación promedio sobre la cuenca drenante a la estación Marralú e hidrógrafas simuladas y observadas para el periodo 1987-1989**

### 5.2.4 Datos de caudal para el acople del aplicativo hidrológico con el aplicativo de modelación hidráulica

Se describe a continuación el traspaso de información entre el aplicativo hidrológico y el hidráulico para la cuenca del río San Jorge hasta el caño Seheve y el complejo cenagoso de la ciénaga de Ayapel.

Los cuerpos de agua que son afluentes a la ciénaga y cumplieron con los criterios definidos para el traspaso de información se enuncian en la Tabla 5-8, las coordenadas se encuentran en el sistema Magna Colombia Bogotá.

**Tabla 5-8. Cuerpos de agua escogidos para acoplar con el modelo hidrodinámico ciénaga de Ayapel**

Cuerpo de agua afluente a la ciénaga	Subcuenca aplicativo	Este	Norte
Quebradona	32	881833.519	1408468.87
Caño Barro	21	893406.15	1405372.6
Quebrada escobillas	18	889130.607	1405070.38
Caño Muñoz	13	899094.816	1413087.34
Rio San Jorge	8	892294.313	1427886.3

Los datos de las series de tiempo y el shapefile con las coordenadas de los puntos de descarga de los cuerpos de agua a la ciénaga se adjuntan a este documento y su ruta dentro del servidor 25275 se detalla en el anexo 1.

La Figura 5-18 muestra las series de tiempo de los caudales de los afluentes a la ciénaga que fueron definidos para la extracción. Las gráficas indican que los afluentes tienen un ciclo monomodal, característico de la región de la Mojana y del nudo del paramillo. Se resalta que a pesar de su menor tamaño en comparación con la cuenca del río San Jorge, la cuenca del caño Barro y del caño Muñoz presentan flujos de caudal elevados que van desde los 10 hasta los 90 e incluso 100 m<sup>3</sup>/s.



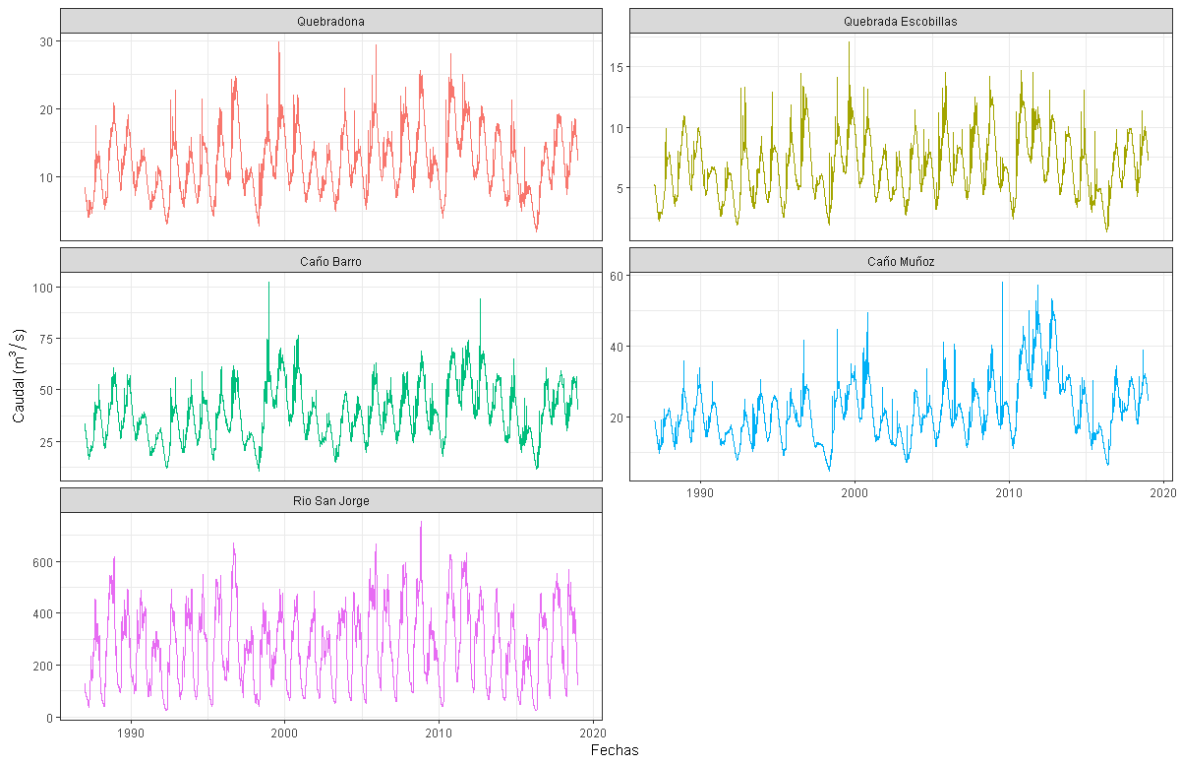


Figura 5-18. Series de tiempo de caudales en los afluentes a la ciénaga de Ayapel

### 5.3 CALIBRACIÓN CANTIDAD DE SEDIMENTOS

Tomando en cuenta los ensayos de sensibilidad de sedimentos presentados en el producto 5, se realizaron los siguientes ajustes a los parámetros de sedimentos como se muestran en la Tabla 5-4. En cada caso se tuvo un objetivo como se describirá en la tabla, pero se debe resaltar que también se siguió una estrategia de escalera en la cual se ajustaron los parámetros de los bloques 1 y posteriormente los del bloque 2. EL bloque 3 no se ajustó debido a que la estación Marralú [25027120] no cuenta con datos de sedimentos. Las estrategias de calibración también se basaron en mantener los parámetros lo más cercanos a los valores originalmente ingresados al modelo a partir de las capas de suelos y coberturas.

Tabla 5-9. Procedimiento de ajuste de parámetros relacionados para la cantidad del agua seguido para la cuenca del río Cesar

Opción	No. Sim.	Desempeño General	Objetivo/Observaciones
Bloque1			Establecer la influencia de los parámetros USLE_K y USLE_P en el desempeño del transporte de sedimentos en la estación San Pedro.
	20 simulaciones	$KGE_{prom} = -0.25$	Simulaciones que varían el parámetro USLE_K, donde se reduce el parámetro que mejora la representación mensual de las simulaciones,

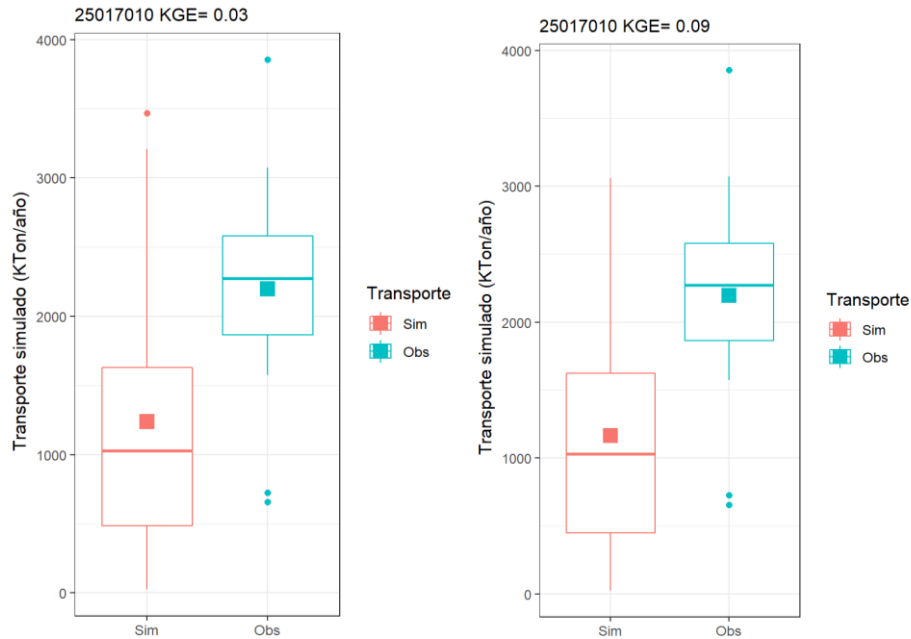
			<p>pero reduce la estimación anual generando una subestimación con respecto a los datos observados para dicha estación. La subestimación se debe a que existen meses en los que el modelo no se presenta producción de sedimentos. Se deja el valor reducido porque se mejora la representación mensual a pesar de que se mantengan las subestimaciones anuales.</p>
	20 simulaciones		<p>Simulaciones que varían el parámetro USLE_P, donde se reduce el parámetro que mejora la representación mensual de las simulaciones, pero reduce la estimación anual generando una subestimación con respecto a los datos observados para dicha estación. La subestimación se debe a que existen meses en los que el modelo no se presenta producción de sedimentos. Se deja el valor reducido porque se mejora la representación mensual a pesar de que se mantengan las subestimaciones anuales.</p>
Todos los bloques parámetro ADJ_PRK	20 simulaciones		<p>Variación del parámetro ADJ_PRK para establecer si para la cuenca se presenta un mejor desempeño con la variación. No se evidencia que haya una mejora sustancial con respecto al valor original ingresado al modelo. Se deja en consecuencia un valor muy cercano al original.</p>
Bloque 2	20 simulaciones	KGE <sub>prom</sub> = -0.17	<p>Simulaciones que varían el parámetro USLE_K, donde se dejó el parámetro con el valor ingresado originalmente porque no se presentaron mejoras sustanciales en el desempeño de los transportes de sedimentos simulados respecto de los observados.</p>
	500 simulaciones		<p>Variación de los parámetros USLE_K y USLE_P en los bloques 1 y 2 para verificar que con la interacción paramétrica se pueda mejorar el desempeño de las simulaciones. Los resultados no indican que asignar a los parámetros mencionados valores muy diferentes a los ya encontrados mejores las simulaciones del transporte de sedimentos.</p>

Variación de parámetros para toda la cuenca			En los ajustes descritos a continuación se buscó mejorar la representación en las dos estaciones donde se contó con información de transporte de sedimentos.
	20 simulaciones (SPEXP)		Simulaciones que varían el parámetro SPEXP relacionado con la capacidad para transportar sedimentos en los canales, donde se dejó el parámetro con el valor ingresado originalmente porque no se presentaron mejoras sustanciales en el desempeño de los transportes de sedimentos simulados respecto de los observados.
	40 simulaciones (SPCON)		Simulaciones que varían el parámetro SPCON relacionado con la capacidad para transportar sedimentos en los canales. Se hicieron dos pruebas en un rango amplio y posteriormente en un rango detallado. Se dejó el parámetro con el valor ingresado originalmente porque no se presentaron mejoras sustanciales en el desempeño de los transportes de sedimentos simulados respecto de los observados.
Variaciones de la rugosidad del lecho	40 simulaciones (Bloque 1)		<p>En los ajustes descritos a continuación se buscó mejorar la representación en las dos estaciones donde se contó con información de transporte de sedimentos, pero enfocándose en la influencia de ciertos parámetros en el transporte de sedimentos en el canal.</p> <p>Simulaciones que varían el parámetro CH_N en el bloque 1 relacionado con la capacidad para transportar el volumen de agua y en consecuencia sedimentos en los canales. Se hicieron dos pruebas: primero se probó sin interacción con el parámetro SPCON que también influye en la capacidad de transporte de sedimentos pero que en la formulación de Bagnold también influye la cantidad de agua transportada. Se dejó el parámetro con el valor ingresado originalmente porque no se presentaron mejoras sustanciales en el desempeño de los transportes de sedimentos simulados respecto de los observados.</p>

	20 simulaciones (Bloque 2)		Se realizaron simulaciones variando también el parámetro CH_N en el bloque 2, teniendo en cuenta su interacción con el parámetro SPCON. Se dejó el parámetro con el valor ingresado originalmente porque no se presentaron mejoras sustanciales en el desempeño de los transportes de sedimentos simulados respecto de los observados.
Variación del parámetro de infiltración en suelos	20 simulaciones		Se hicieron ensayos para evaluar la influencia en la fase de sedimentos del valor del parámetro CN calibrado en la fase de cantidad de agua. La variación evidencio que cualquier modificación a los parámetros ya modificados en la fase anterior, empeora el desempeño del modelo cuando se comparan las series simuladas y observadas de transporte de sedimentos. Por tanto, se deja el valor ya ajustado previamente.

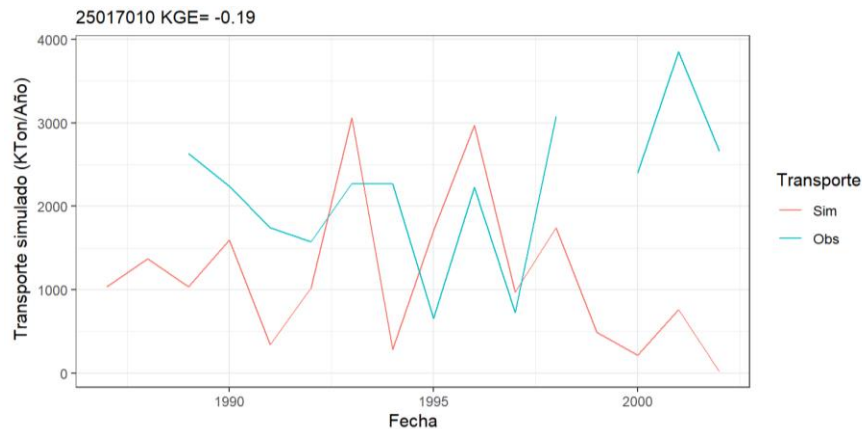
Las descripciones se harán tomando en cuenta que la ecuación universal de pérdida de suelos fue formulada para obtener estimados de largo plazo de erosión hídrica.

La Figura 5-19 muestra la variación interanual de la producción de sedimentos antes y después del ajuste de parámetros en los bloques 1 y 2, cuyos efectos se ven reflejados en la estación Monteliebano. Previo al ajuste se presentaba una subestimación de la cantidad de sedimentos simulados con respecto de los observados (panel izquierdo). A través de los ajustes se logró solamente mejorar el desempeño de algunos picos simulados de sedimentos que influyen poco sobre la magnitud del transporte anual multianual, pero la mayor diferencia se presenta en que se presenta en la escala mensual genera que haya una subestimación general del transporte de sedimentos. Se puede ver que la distribución atemporal en las simulaciones ajustadas se encuentra entre 100 y 3000 KTon/año que al momento tiene una diferencia importante con las simulaciones que se encuentran en el rango de 1500 a 3000 KTon/año.



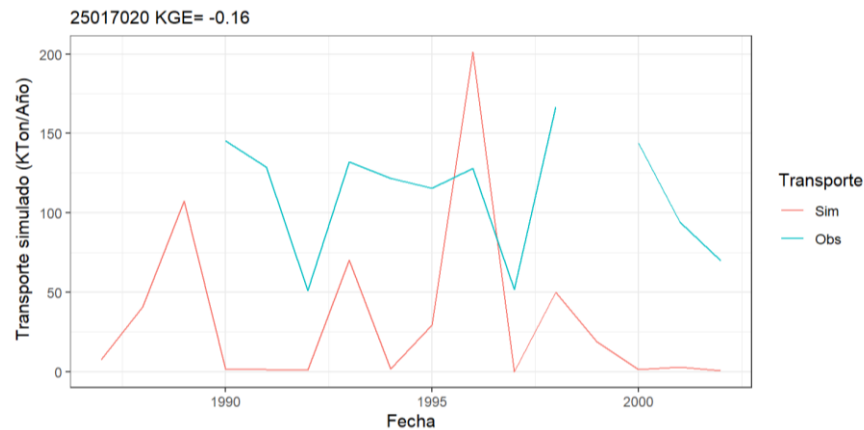
**Figura 5-19. Transporte anual multianual para la estación Monteliebano en la cuenca del río San Jorge hasta el caño Seheve**

La Figura 5-20 muestra que a escala anual también unas discrepancias pero que en algunos años se tiende a presentar ascensos y descensos similares entre las simulaciones y las observaciones. Se puede ver algunas subestimaciones para los años anteriores a 1992 y posteriores a 1999, pero con un periodo intermedio donde hay confluencia entre las simulaciones y las observaciones. La Figura 5-21 muestra las simulaciones para la estación San Pedro en la que se puede ver una subestimación generalizada del transporte a pesar del ajuste realizado a las simulaciones.



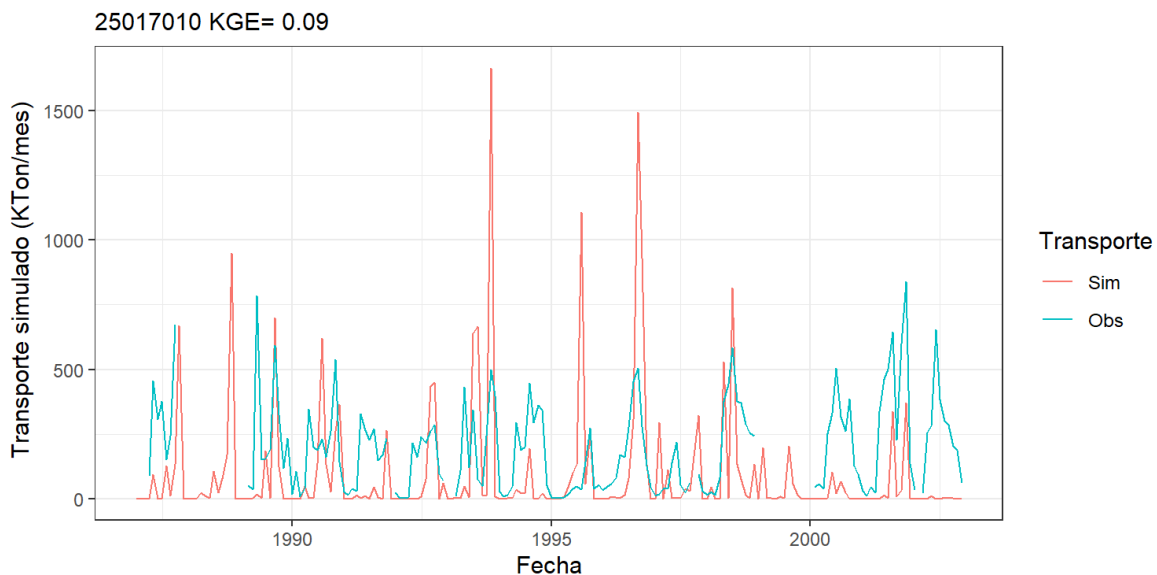
**Figura 5-20. Transporte de sedimentos a escala anual en la estación Monteliebano**





**Figura 5-21. Transporte de sedimentos a escala anual en la estación San Pedro**

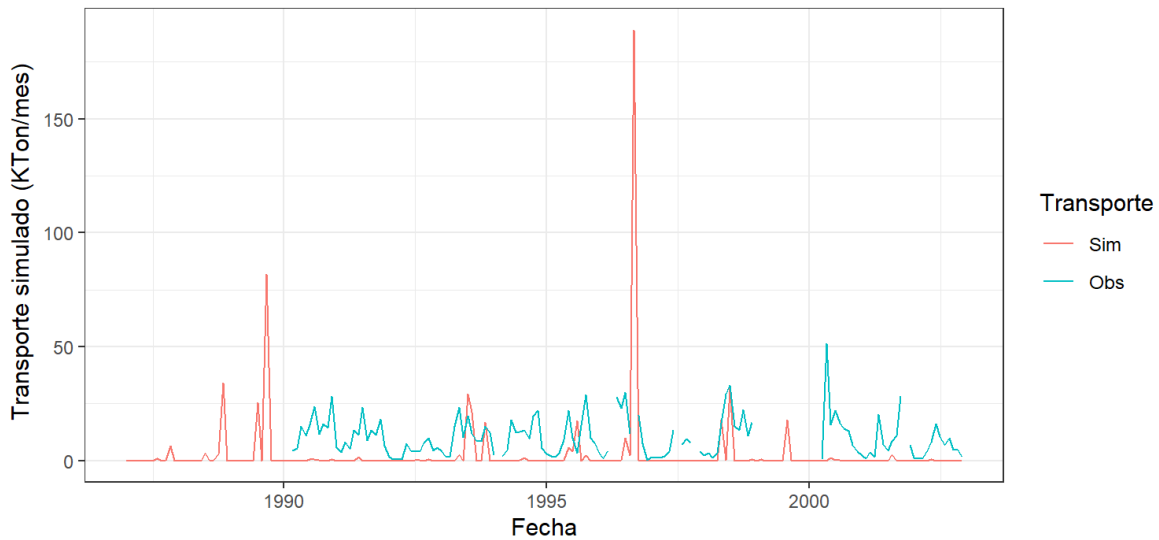
La Figura 5-22 muestra las simulaciones del transporte a escala mensual para la estación Monteliebano, donde se puede ver que en algunos periodos hay una correspondencia de las temporadas invernales con los picos de transporte. Sin embargo, las simulaciones al inicio de cada temporada invernal no presentan los transportes observados en la estación, revelando que las subestimaciones generalizadas a escala anual y multianual se deben a los inicios de los periodos de lluvia mencionados. En la Figura 5-23 se pueden ver que para la estación San Pedro la subestimación es mucho más generalizada. La falta de erosión se puede deber a que para las subcuencas que drenan hacia dicha estación de limnimétrica no se cuenta con una estación pluviométrica dentro de la cuenca que permita establecer correctamente el factor erosivo del agua.



**Figura 5-22. Transporte de sedimentos a escala mensual en la estación Monteliebano**

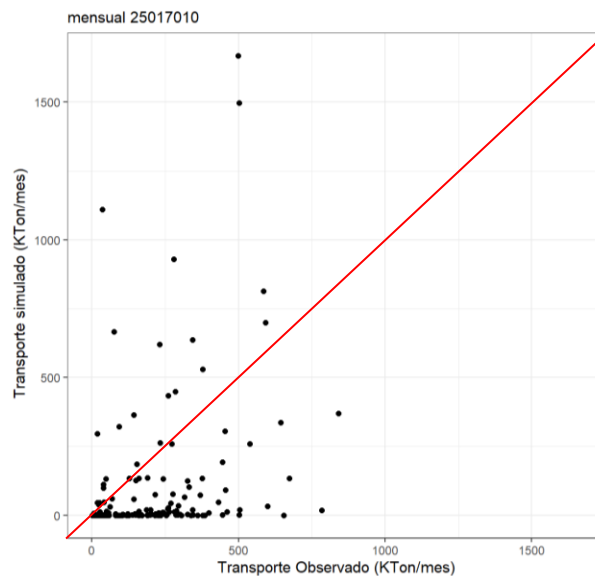


25017020 KGE= -0.22

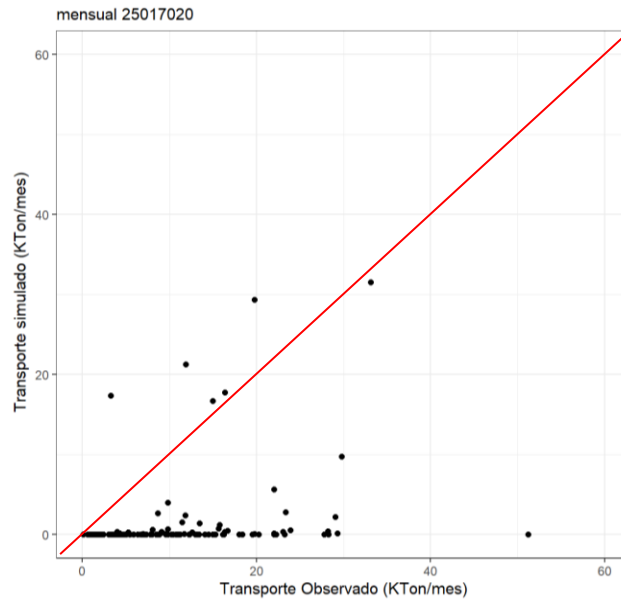


**Figura 5-23. Transporte de sedimentos a escala mensual en la estación San Pedro**

A través de los scatter plot se puede ver la subestimación dado que los puntos se agrupan sobre la parte baja de las gráficas. Al compara la Figura 5-24 y la Figura 5-25 se puede ver que es mucho más evidente la subestimación en la estación San Pedro y que se da para todos los niveles de transporte, bajo, medianos y altos. Para la estación Monteliebano se da para los bajos y medios y en algunos casos hay sobreestimaciones para los transportes de sedimentos con valores altos.



**Figura 5-24. Scatter plot de las simulaciones de sedimentos a escala mensual para la estación Monteliebano**



**Figura 5-25. Scatter plot de las simulaciones de sedimentos a escala mensual para la estación San Pedro**

Del ajuste de los parámetros relacionados con la producción y el transporte de sedimentos se encontraron los valores consignados en la Tabla 5-10, valores que producen las simulaciones descritas en este numeral. Se aprecia que los valores de los parámetros SPCON, SPEXP y ADJ\_PKR, son muy cercanos a los valores originales predefinidos por la construcción del modelo o no se modificaron, debido a que no mejoraron de forma sustancial las falencias en las simulaciones descritas. Se debe resaltar que se debió ajustar los parámetros USLE\_K y USLE\_P en mayor medida para el bloque 1, mejorando así la representación en algunos meses, pero sin mayores efectos a escala anual. Para el caso del bloque 2, a pesar de los cambios realizados no se presentaron mejoras ni a escala mensual ni anual, por tanto, se han dejado los parámetros originales ingresados basados en la información fisiográfica ingresada.

**Tabla 5-10. Variación de los parámetros ajustados para la fase de sedimentos, caso cuenca del río San Jorge**

Parámetro	Variación	BQ1. San Pedro	BQ2. Monteliebano	BQ3. Marralú
SPCON	Reemplazo	0.001		
SPEXP	Reemplazo	1		
USLE_K	Relativa	-0.4885	0	0
USLE_P	Reemplazo	0.5265	1	1
ADJ_PKR	Reemplazo	1.025		



Las demás figuras relacionadas con los sedimentos del río San Jorge se adjuntan a este documento en el anexo 2.









## 6. MODELO HIDRODINAMICO CIENAGA DE AYAPEL

El modelo piloto planteado para la Ciénaga, contempla el aporte de los rompederos del Río Cauca (Nuevo Mundo y Santa Anita), además de la interacción de la ciénaga con el río San Jorge y el caño Cecilia, permitiendo para estos dos casos flujo bidireccional en función de los niveles reportados, como en los otros modelos hidrodinámicos desarrollados se requiere información en las fronteras planteadas, para el caso de los rompederos del río Cauca, se propone realizar el balance de masa con las estaciones hidrológica disponibles en el sector (estaciones La Esperanza, Las Flores, La Coquera y la Raya) para determinar el flujo de agua que deriva directamente hacia la ciénaga de Ayapel.

### 6.1 CONFIGURACIÓN DEL MODELO

#### 6.1.1 Definición del dominio computacional

Dada la inclusión de los rompederos del río Cauca en la modelación, se extendió la modelación hasta el dique marginal del río, se incluyó además un sector del río San Jorge en donde se presenta la conexión con el Caño Seheve que conecta al río con la Ciénaga y un pequeño tramo del Caño Cecilia por el que también se presenta intercambio de flujo de la ciénaga con el resto del complejo de la Mojana.

#### 6.1.2 Condiciones de frontera

Como condiciones de frontera para la modelación se especifica el caudal en las zonas de los rompederos, y aguas arriba del río San Jorge, las dos fronteras restantes (aguas abajo del río San Jorge y aguas abajo del Caño Cecilia), se tratarán como fronteras con niveles prescritos, permitiendo así el flujo bidireccional (entrada y salida de agua a través de éstas).

#### 6.1.3 Condiciones iniciales

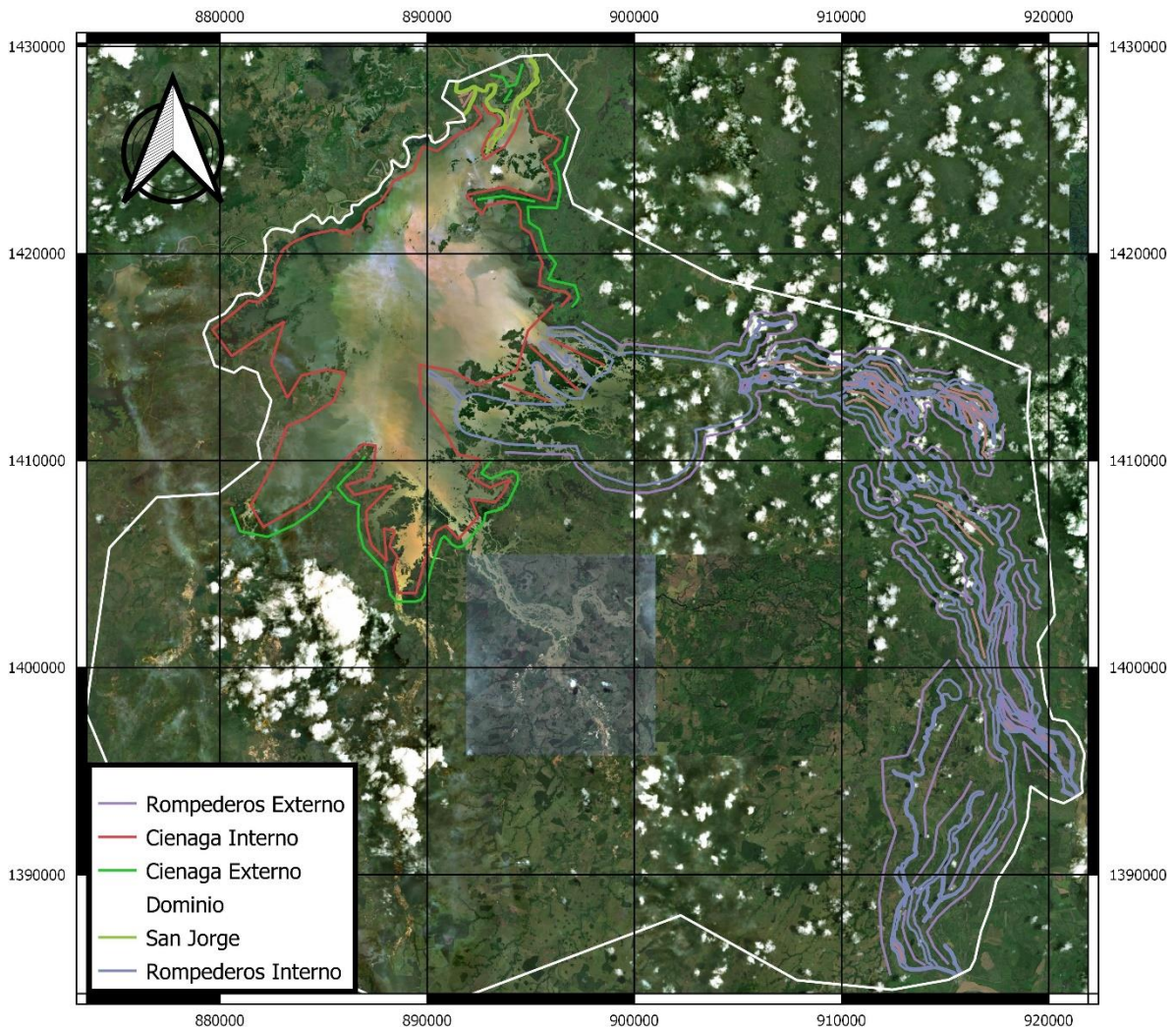
Como condiciones iniciales para el modelo piloto se adoptó una profundidad constante en todo el dominio, al ser esta condición tan idealizada se hace obligatorio un periodo de calentamiento del modelo, tal como se mencionó para el caso de Zapatosa, transcurrido un tiempo de la modelación se llegará a una condición de profundidades y velocidades más realista que podrá ser empleada como condición inicial para futuras modelaciones (arranque en caliente del modelo)

#### 6.1.4 Generación de la malla de cómputo

En el caso de Ayapel, tal como en los otros modelos piloto se empleó la posibilidad de una malla no estructurada para generar refinamientos en zonas que requieren un nivel de detalle superior para su correcta representación geométrica, en este se

caso se refinaron los rompederos del río Cauca, hasta su llegada al espejo principal de la ciénaga, el tramo del río San Jorge previamente descrito en la definición del dominio, su conexión con la ciénaga a través del Caño Seheve y el tramo del Caño Cecilia incluido en el dominio, estos fueron tratados con elementos entre 17 y 20m de lado, para el espejo principal de la ciénaga se empleó un refinamiento intermedio de 120m y para el resto del dominio se emplearon elementos de hasta 200m de lado, al no ser requerido mayor detalle y considerando su extensión.

Como insumos para la generación de la discretización espacial se especificaron las siguientes entidades, estas empleando el DTM proporcionado por el Fondo Adaptación.



**Figura 6-1. Entrada para la generación de la malla de Ayapel**

### 6.1.5 Malla de cómputo generada para la ciénaga de Ayapel

La malla generada para la Ciénaga de Ayapel está conformada por 851841 nodos y 1702546 elementos, para su generación se emplearon elementos triangulares aproximadamente equiláteros entre 17 y 200m de lado, empleándose elementos más finos de manera que se lograra la representación adecuada de caños, el sector incorporado del río San Jorge y las secciones más angostas de la zona de rompederos que provienen desde el río Cauca. Algunas zonas correspondientes a la zona sur del dominio fueron discretizadas con elementos más gruesos al no presentarse necesidad de representar geometrías con mayor detalle. Las figuras Figura 6-2, Figura 6-3 y Figura 6-4 muestran los resultados de la generación de la malla de cómputo.

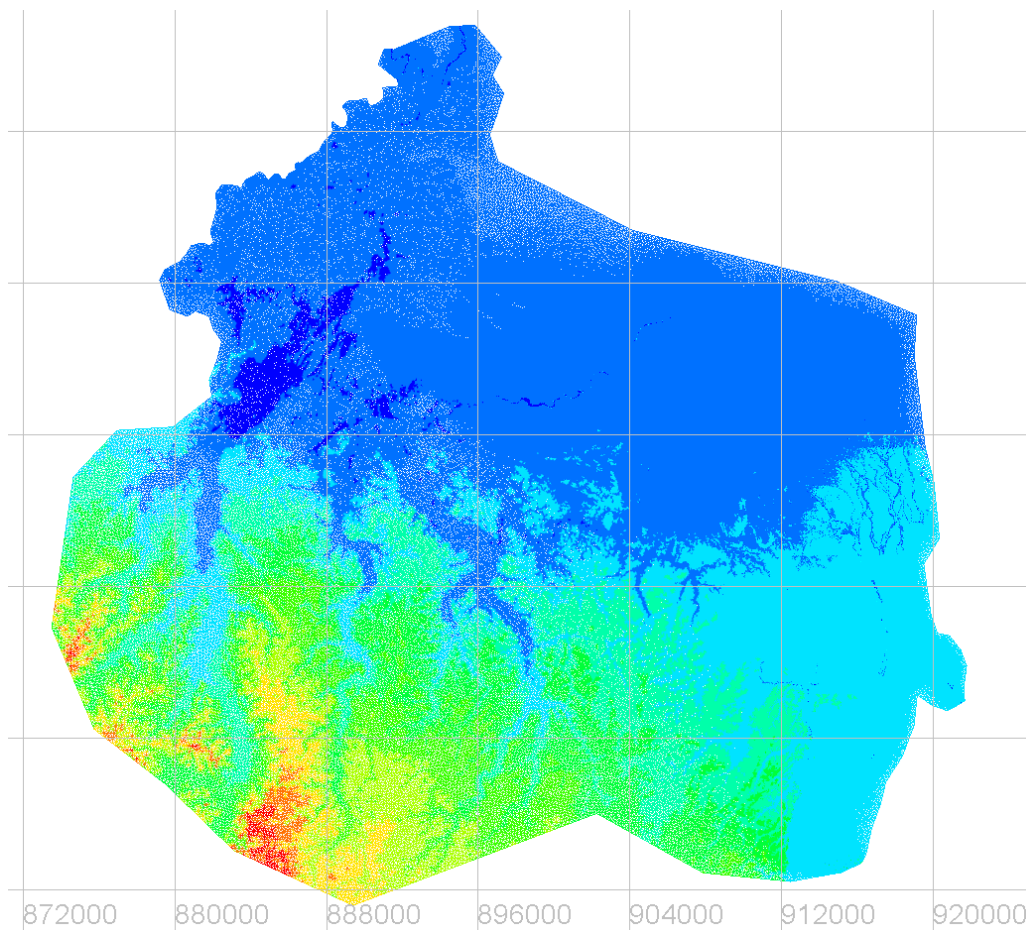
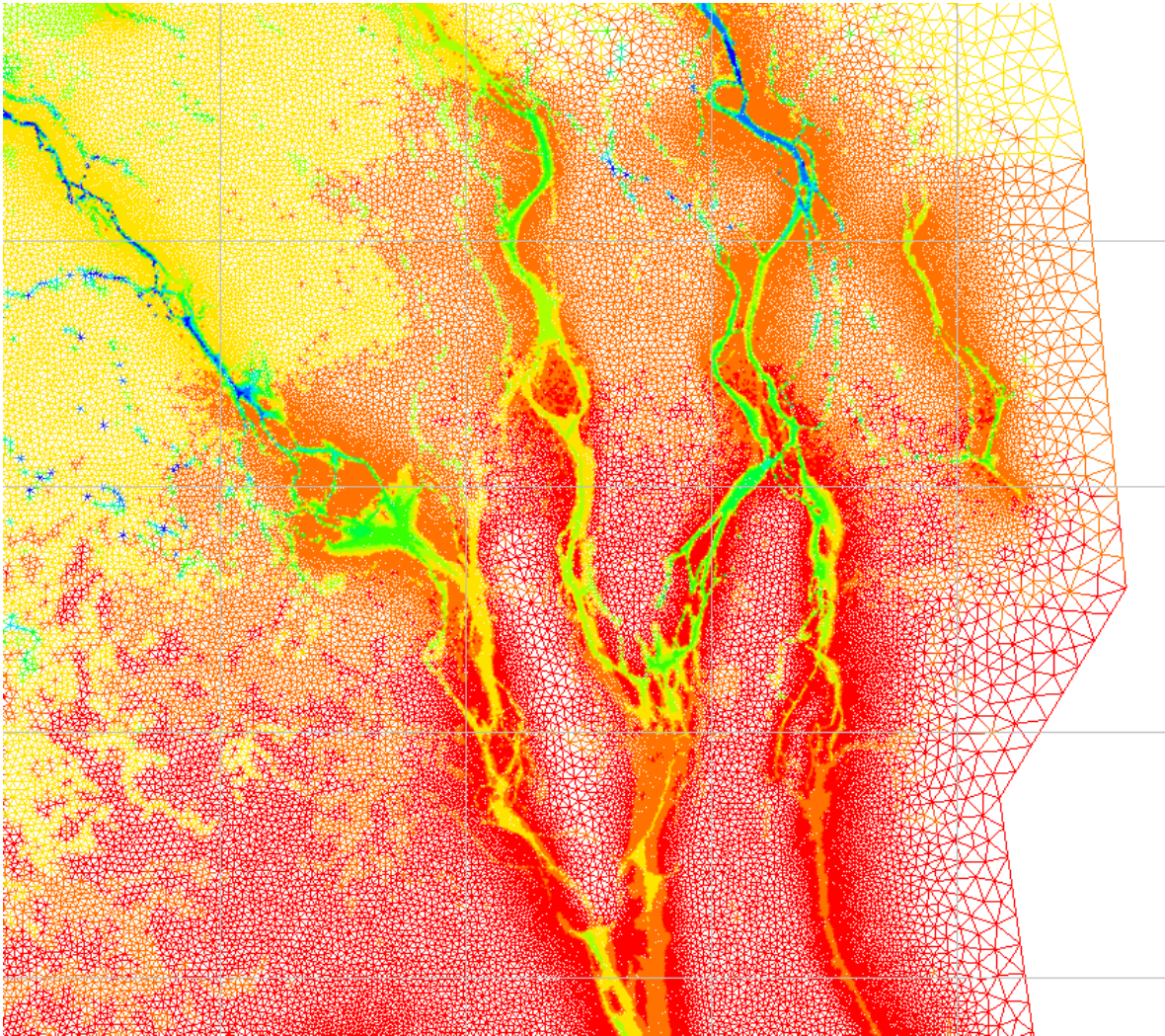


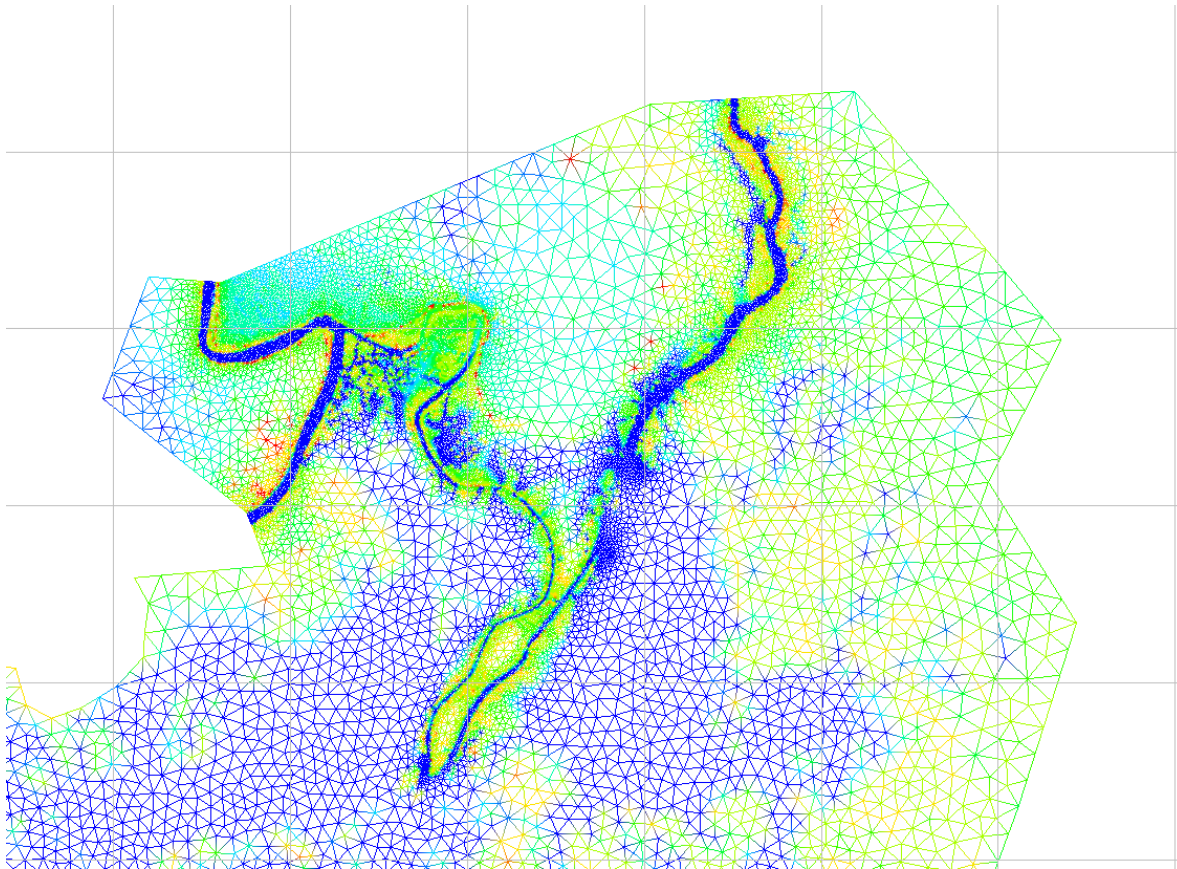
Figura 6-2. Malla de cómputo generada para la el modelo piloto de la ciénaga de Ayapel.





**Figura 6-3. Detalle de los refinamientos en la zona de rompederos.**





**Figura 6-4. Refinamiento en la entrada de la ciénaga, de oeste a este, Río San Jorge, Caño Seheve, Caño Cecilia.**

La asignación de los atributos de elevación a la malla de cómputo fue realizada empleando como entrada el DEM generado por el Fondo Adaptación para la Mojana, en el caso particular se puede observar que el caño Seheve no está adecuadamente representado obstruyendo de manera artificial el flujo desde el río San Jorge hacia la ciénaga, entre otros detalles del insumo, siendo requerida para la fase de refinamiento de modelos la corrección de la topografía de entrada.

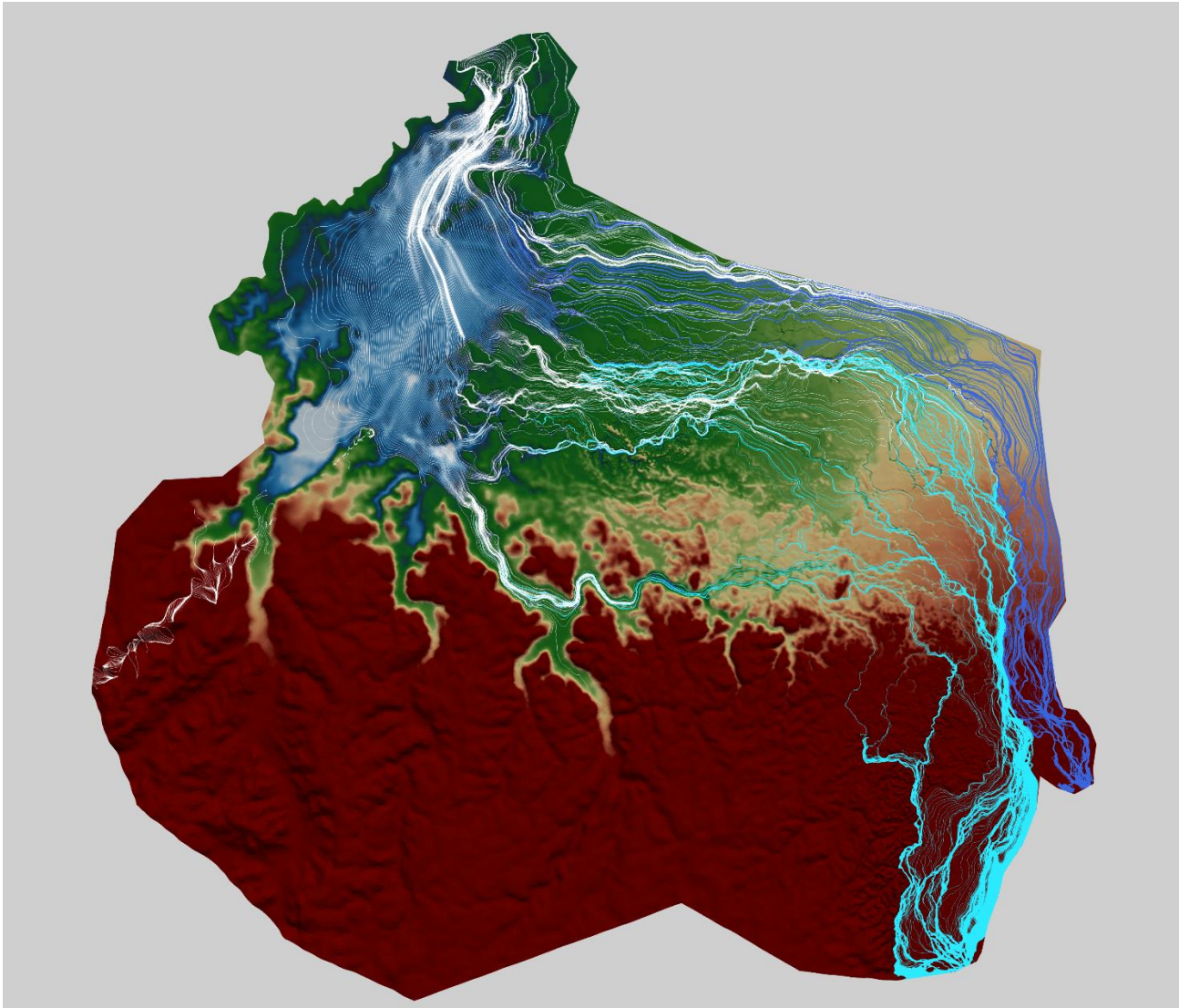
## **6.2 RESULTADOS DE LA MODELACIÓN PILOTO DE LA CIÉNAGA DE AYAPEL**

A continuación, se presentan resultados piloto para la ciénaga, teniendo en cuenta que corresponden a una modelación estacionaria, se presentan los resultados para el último paso de tiempo de la simulación.

### **6.2.1 Patrones de flujo en la ciénaga**

Se presentan las líneas de corriente obtenidas para el último paso de la modelación estacionaria realizada, en diferentes colores se presentan las líneas de corriente de

los flujos derivados de los diferentes rompederos del río Cauca evidenciados en el DTM disponible. Los patrones permiten evidenciar como el flujo proveniente de los rompederos del río Cauca cubre una extensa zona, sin poderse tratar este como un simple canal, por el contrario, se evidencia una compleja configuración de múltiples canales, observándose diferencia de kilómetros en los puntos de entrega de agua a la ciénaga de flujos provenientes del mismo rompedero.



**Figura 6-5. Líneas de corriente para todo el dominio computacional**



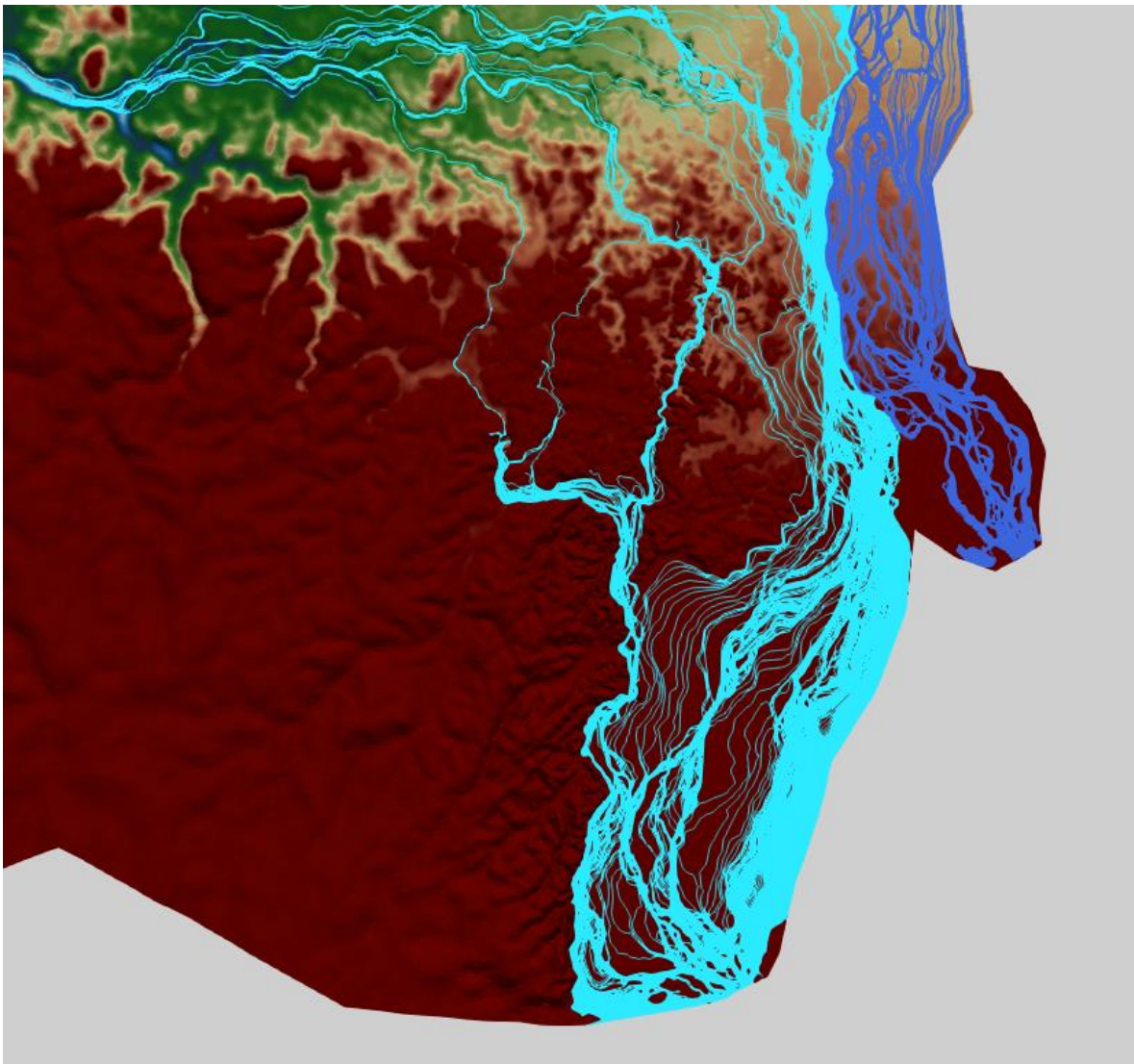
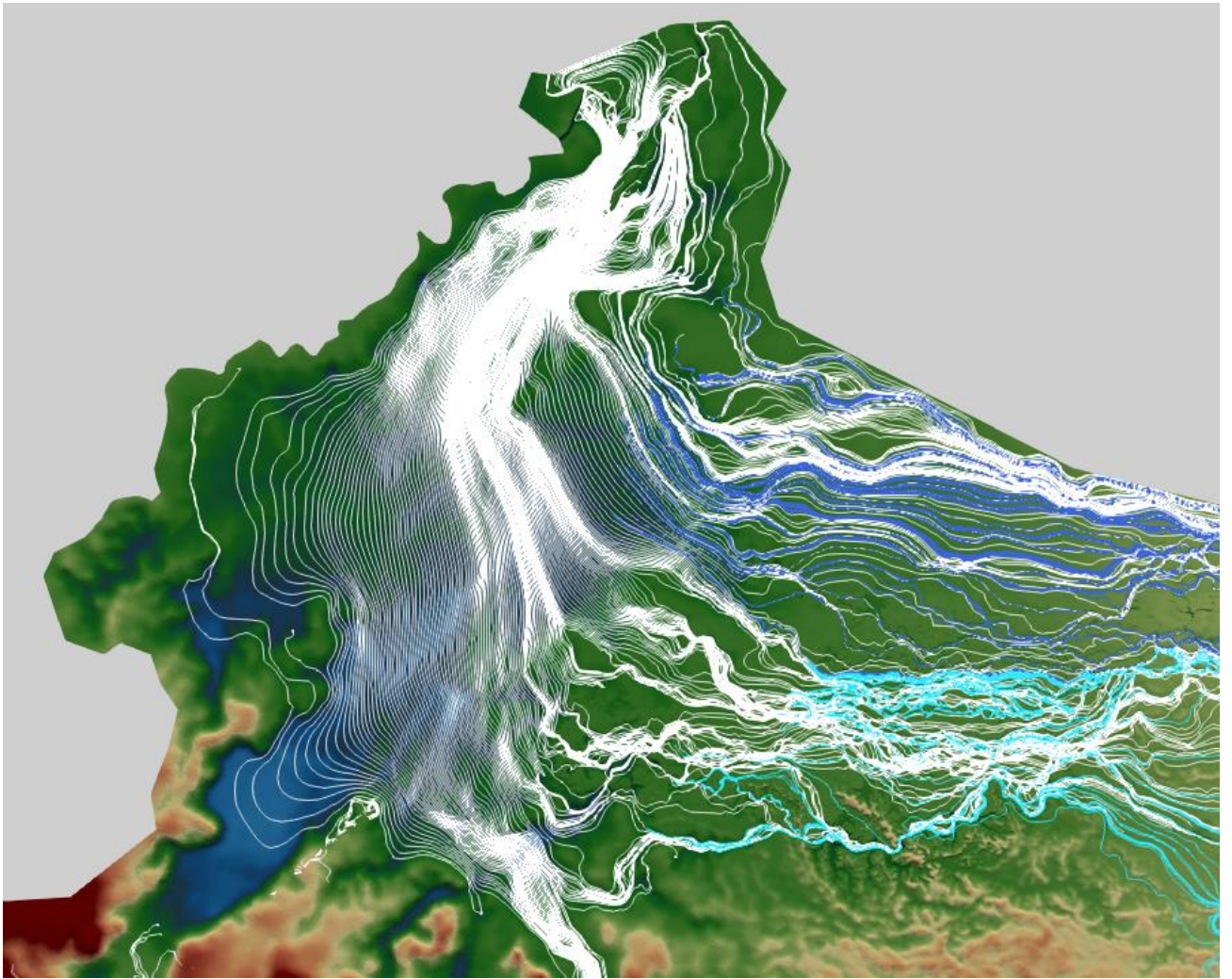


Figura 6-6. Líneas de corriente para la zona de rompdederos



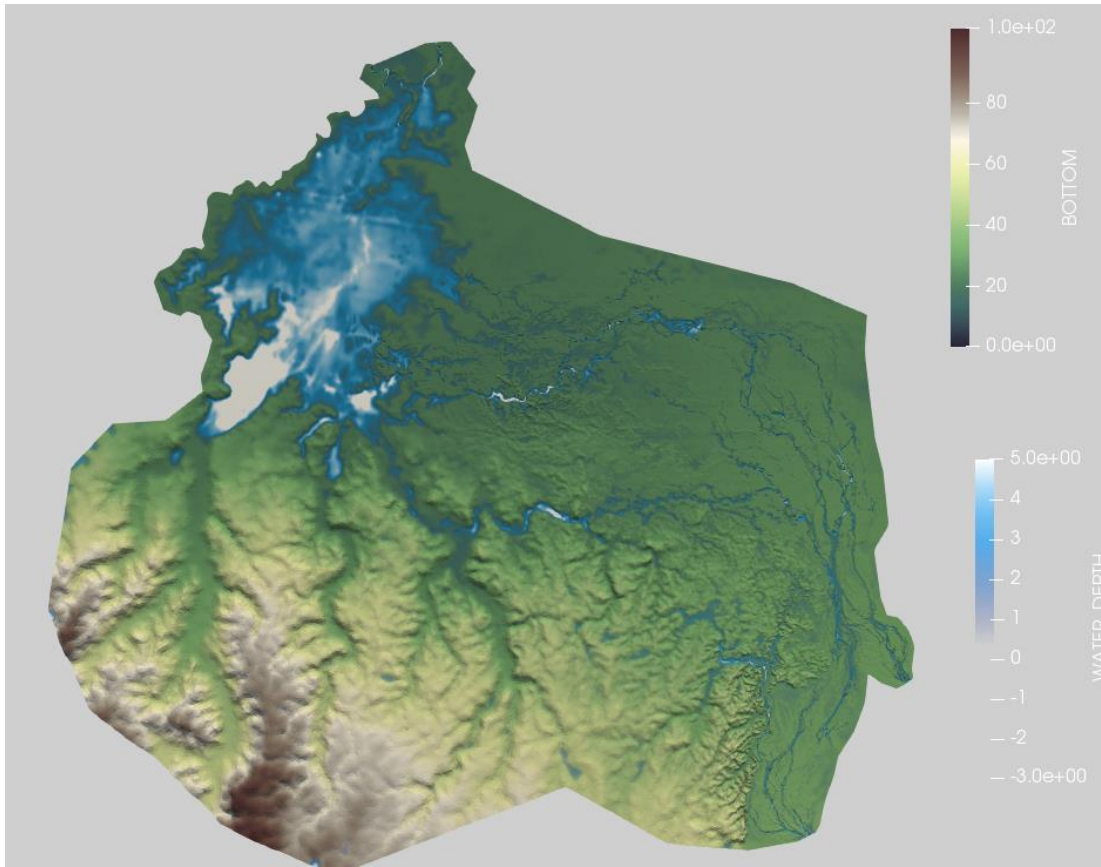
**Figura 6-7. Líneas de corriente dentro de la ciénaga.**

La Figura 6-7 permite evidenciar como el flujo dentro de la ciénaga se desarrolla principalmente en dirección Sur-Norte, (para la condición de flujo modelada), con menor concentración de flujo en la zona Sur-Oeste, y alta concentración en la zona Norte, en donde la ciénaga presenta una contracción para drenar flujo hacia el caño Seheve como hacia el Caño Cecilia.





### 6.2.1.1 Campo de profundidades calculado en la ciénaga



**Figura 6-8. Profundidades calculadas para la ciénaga de Ayapel**



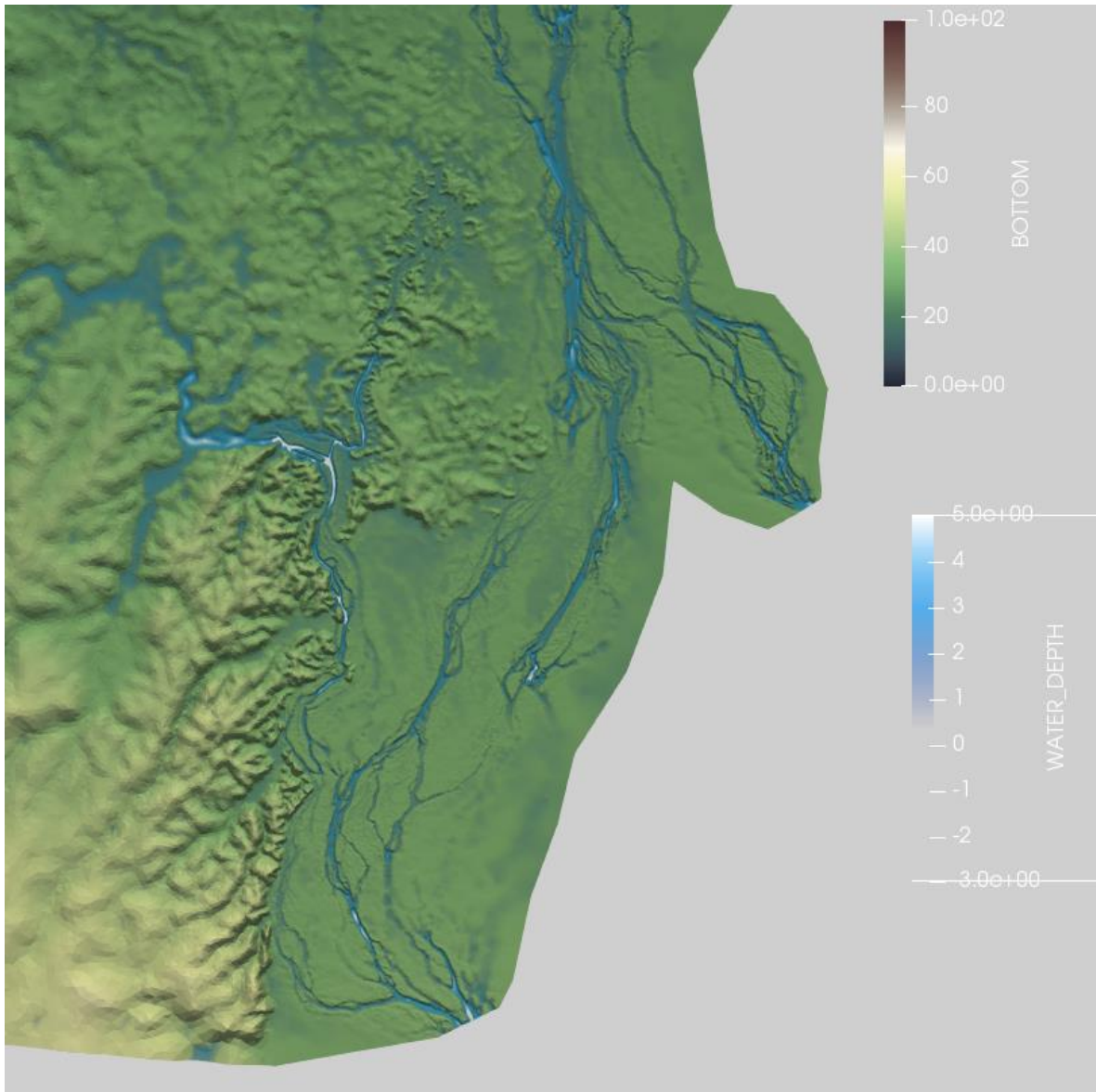
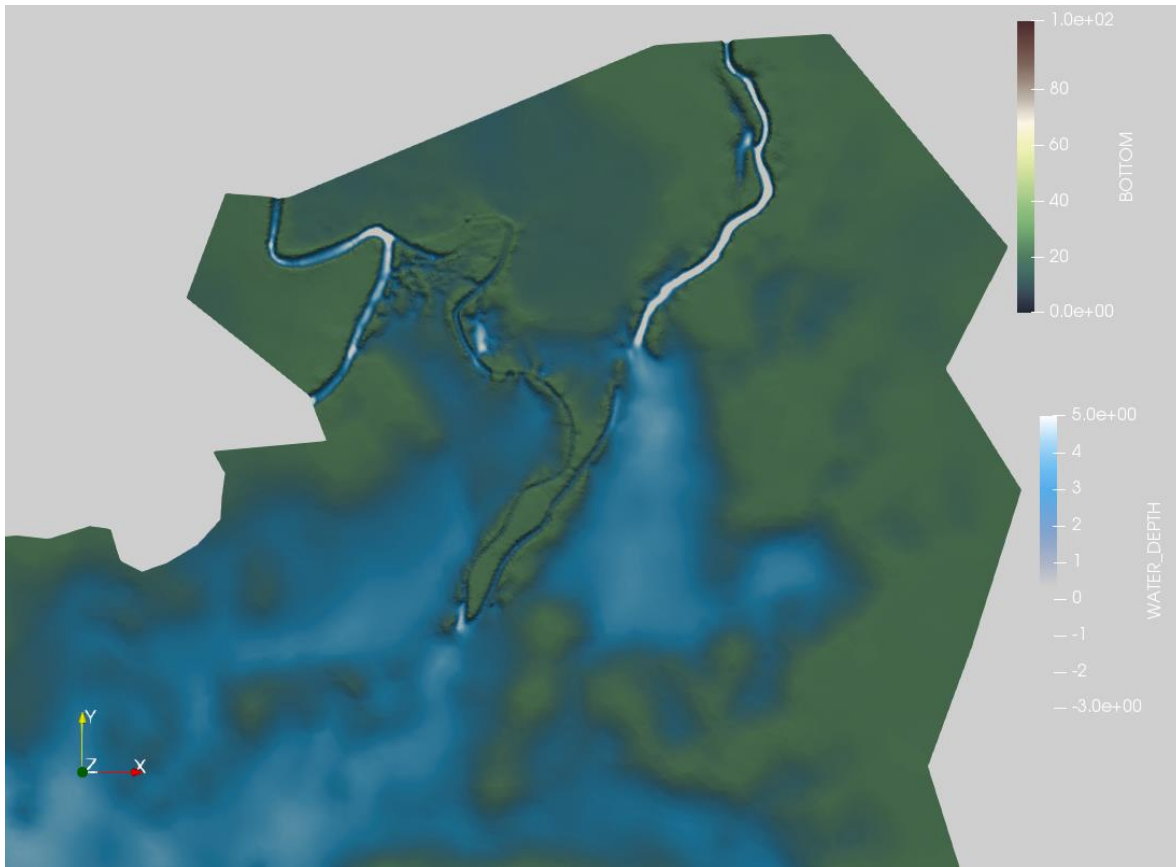


Figura 6-9. Profundidades calculadas en la zona de rompederos



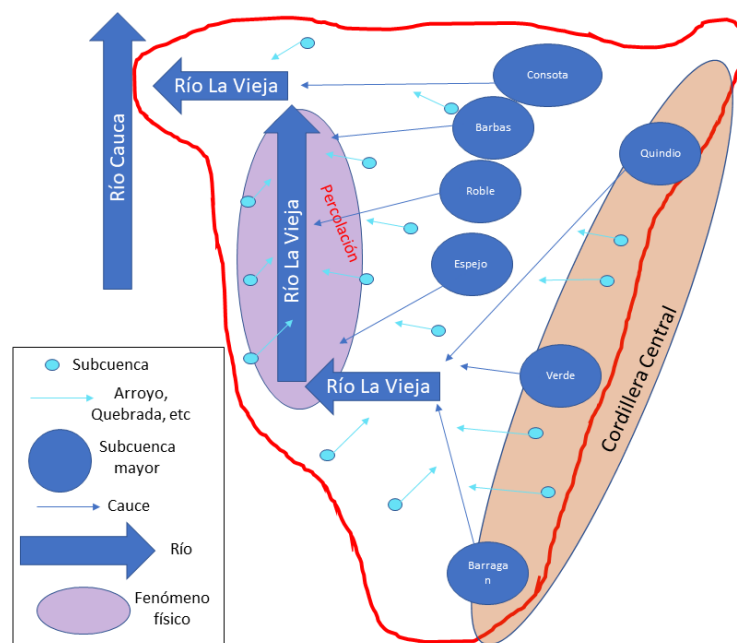
**Figura 6-10**Figura 6-11. Profundidades calculadas en la salida de la ciénaga.

En la Figura 6-10 se puede evidenciar una mala representación del Caño Seheve limitando la interacción de la Ciénaga con el río San Jorge, esto debido a imperfecciones presentes en del DTM empleado. Deberá incorporarse nueva información batimétrica a fin de lograr una mejor representación del terreno y por tanto del flujo.

## 7. MODELO HIDROLOGICO CUENCA RIO LA VIEJA

### 7.1 MODELO CONCEPTUAL HIDROLÓGICO

La Figura 3-24 muestra el esquema espacial para la cuenca del río La Vieja. Se reconoce que la topografía de la cuenca es ampliamente influenciada por la cordillera central en la cual nacen los principales afluentes del río La Vieja. De ellos se resaltan los ríos Quindío, Barragán y el río Verde (existen otros afluentes de menor tamaño que también son considerados). Posterior a la unión de los ríos Barragán y Quindío se forma el río La Vieja, que tiene como afluentes que nacen en la cuenca media como lo son: el río Espejo, el Roble, el Barbas y el Consota. Dentro de la información consultada, se pudo identificar que en el tramo medio del río La Vieja pueden existir percolaciones hacia acuíferos profundos, como es indicado en el esquema.



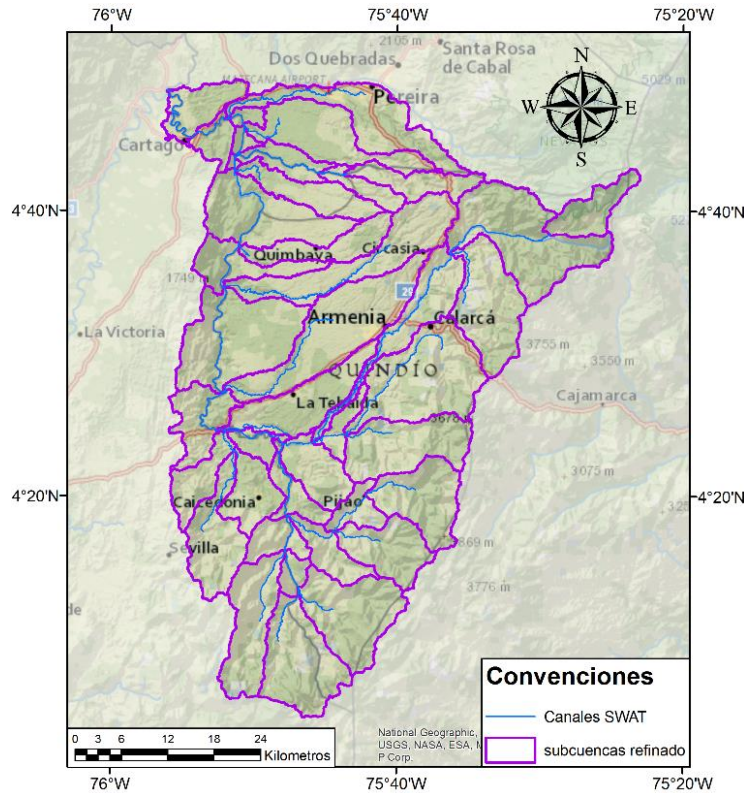
**Figura 7-1. Esquema del modelo conceptual espacial de los cuerpos de agua en la cuenca del río La Vieja**

### 7.2 CONFIGURACIÓN DEL MODELO COMPUTACIONAL

En la Figura 7-2 se puede ver la distribución de las subcuencas representadas en el aplicativo SWAT para la cuenca del río La Vieja. Como resultado de aplicar los criterios mencionados, se obtuvieron 43 subcuencas con un promedio de área de 66 km<sup>2</sup> y que en un 75% (tercer cuartil), tienen un área menor a 109.2 km<sup>2</sup>. La suma total del área de la cuenca es de 2836.34 km<sup>2</sup>.



- Cuenca del río La Vieja
  - POMCA del río La Vieja
    - Geodatabase recopilada por el componente 2 del proyecto GEF Magdalena-Cauca



**Figura 7-2. Subcuencas del modelo del río La Vieja**

En la se puede ver la posición de los puntos que se definieron por: la posición de las cinco estaciones de caudal que se encuentran en el área de estudio y cambios o límites en el mapa de sistemas morfogénicos.



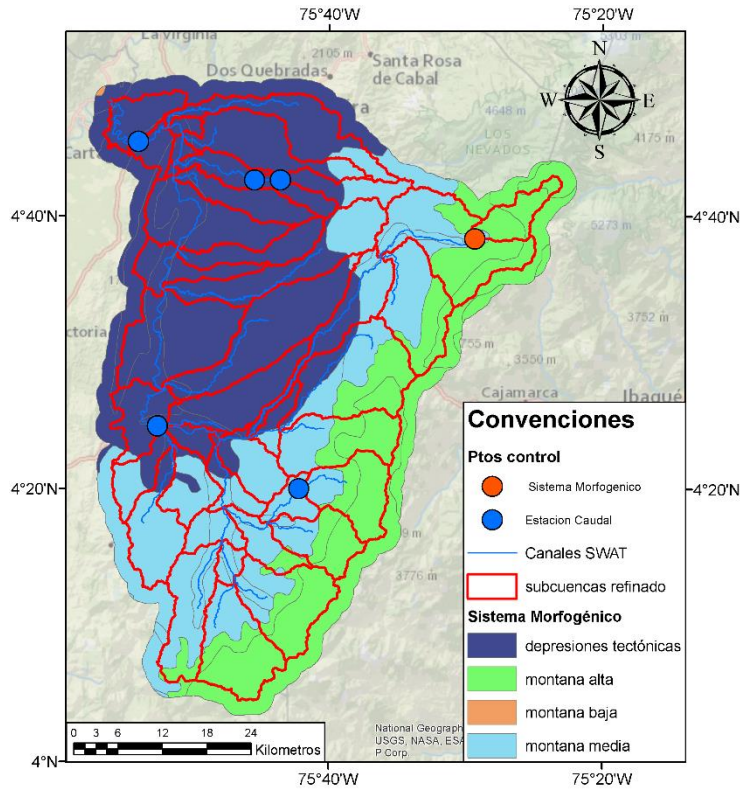
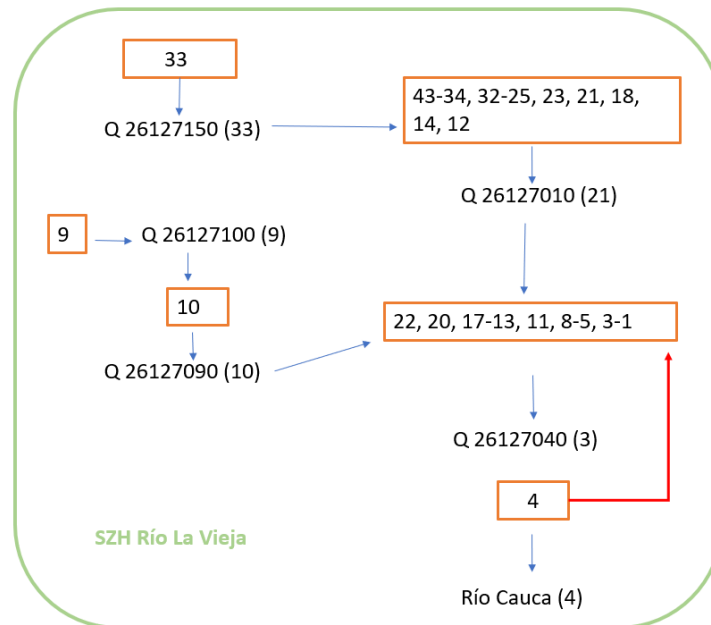


Figura 7-3. Puntos de control en la cuenca del río La Vieja

### 7.3 MODELO TOPOLÓGICO CUENCA DEL RÍO LA VIEJA

En la Figura 7-4 se puede ver el esquema de la topología que el aplicativo ArcSWAT creó para la cuenca del río La Vieja.





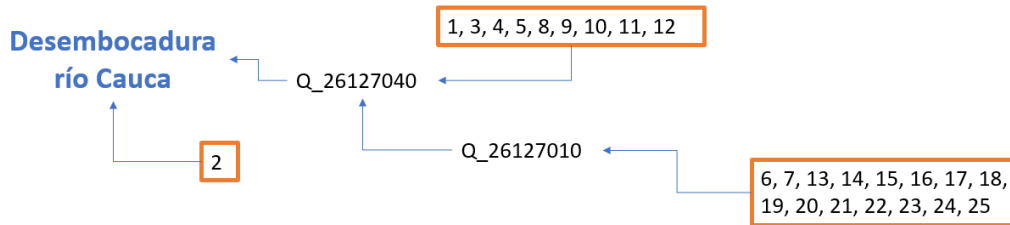
**Figura 7-4. Modelo topológico para la cuenca del río La Vieja**

Cada una de estas subcuencas tiene varios ríos identificados en la cartografía hídrica del IGAC. Para documentación del modelo, se realizó una identificación del cauce principal que esta al interior de cada subcuenca.

### 7.3.1.1 Calibración del modelo

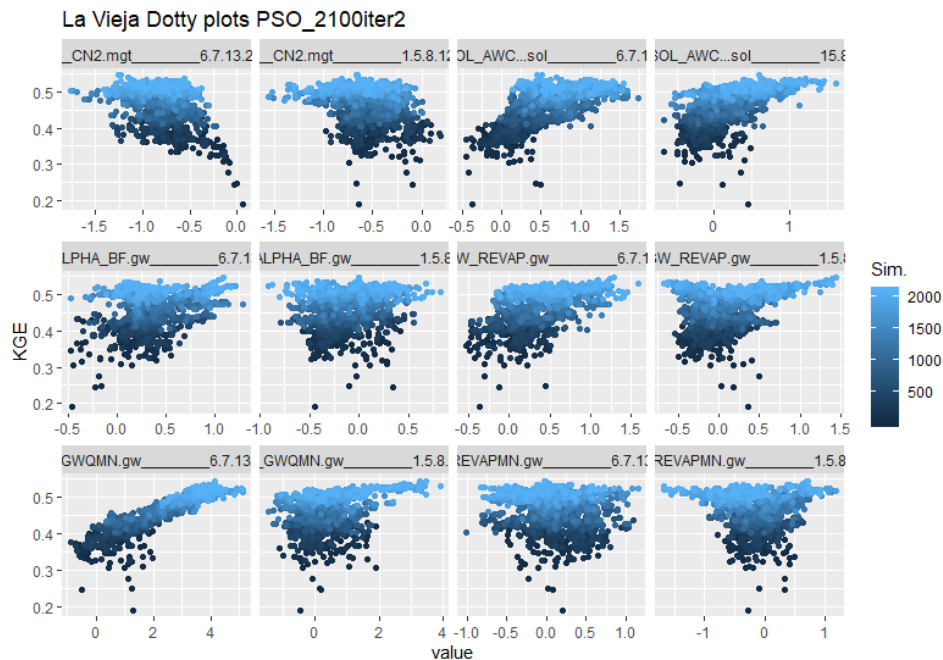
Para esta cuenca se escogieron 2 estaciones de caudal para usarlas en la calibración de los parámetros. Las estaciones definieron bloques de subcuencas sobre las que se definía un factor de calibración de cada parámetro. Este modelo puede verse en Figura 7-5.

Existen una subcuenca que drenan directamente hacia el río Cauca y que no tienen una estación de caudal que permita la calibración de los parámetros. En consecuencia, se deben asignar sus parámetros con base en el traspaso de información desde las cuencas más cercanas. Por esta razón se asignaron los factores de calibración de las subcuencas [1,3,4,5,8-12], que es la que se encuentra más cercana a esa subcuenca (2).



**Figura 7-5. Modelo topológico piloto para la cuenca del río La Vieja**

A continuación se muestra el diagrama de dispersión del algoritmo PSO. Para este caso no se calibró el parámetro SOL\_K, pero posteriormente se hizo revelando que este es bastante sensible. Por otro lado, también se identifica que existe cierta equifinalidad en varios factores de calibración. Esto se corroboró con el algoritmo Sufi2.

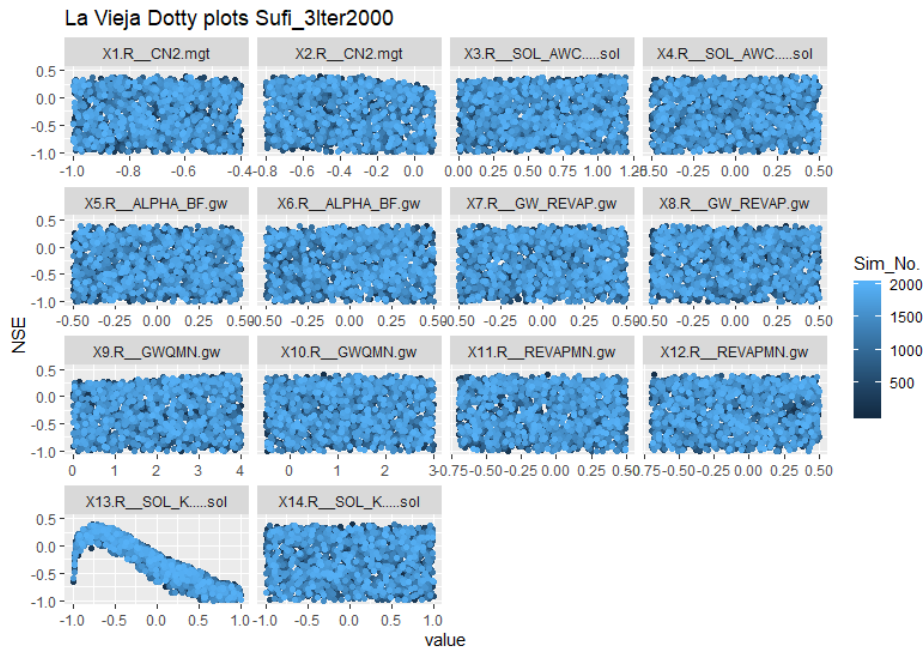


**Figura 7-6. Dotty plots del algoritmo PSO del modelo piloto para la cuenca del río la Vieja**

Un muestreo aleatorio con el algoritmo Sufi2 revela que, al hacer la calibración simultánea, solo un factor de calibración resulta sensible, este fue el CN2 para la subcuenca 13-25. Este ajuste de los parámetros de la zona alta de la cuenca puede deberse a deficiencias en la estimación de la lluvia o en la estimación previa de los parámetros asignados por SWAT. Asimismo, el valor para el factor del SOL\_K para esas subcuencas también presenta gran sensibilidad, lo que indica que la



asignación previa de los parámetros requirió refinación de parámetros asociados a las características de los suelos.



**Figura 7-7. Dotty plots del algoritmo Sufi2 del modelo piloto para la cuenca del río la Vieja**

Con los parámetros calibrados, se procedió a realizar una validación de las simulaciones. Esto se hizo en las dos estaciones de caudal destinadas para calibración y validación; el periodo de calibración fue de 1988-01-01 hasta 2000-12-31, mientras que para la fase de validación se definió desde 2001-01-01 hasta 2015-12-31. En la Figura 7-8 se pueden ver las hidrógrafas en los canales que tienen a su salida las estaciones de caudal destinadas para calibración y validación. Se puede apreciar una alta representatividad de los caudales diarios observados, que se pierde en algunos picos. La Tabla 7-1 muestra los valores del coeficiente NSE para los dos periodos en ambas estaciones con los caudales a escalas diarias y mensuales.

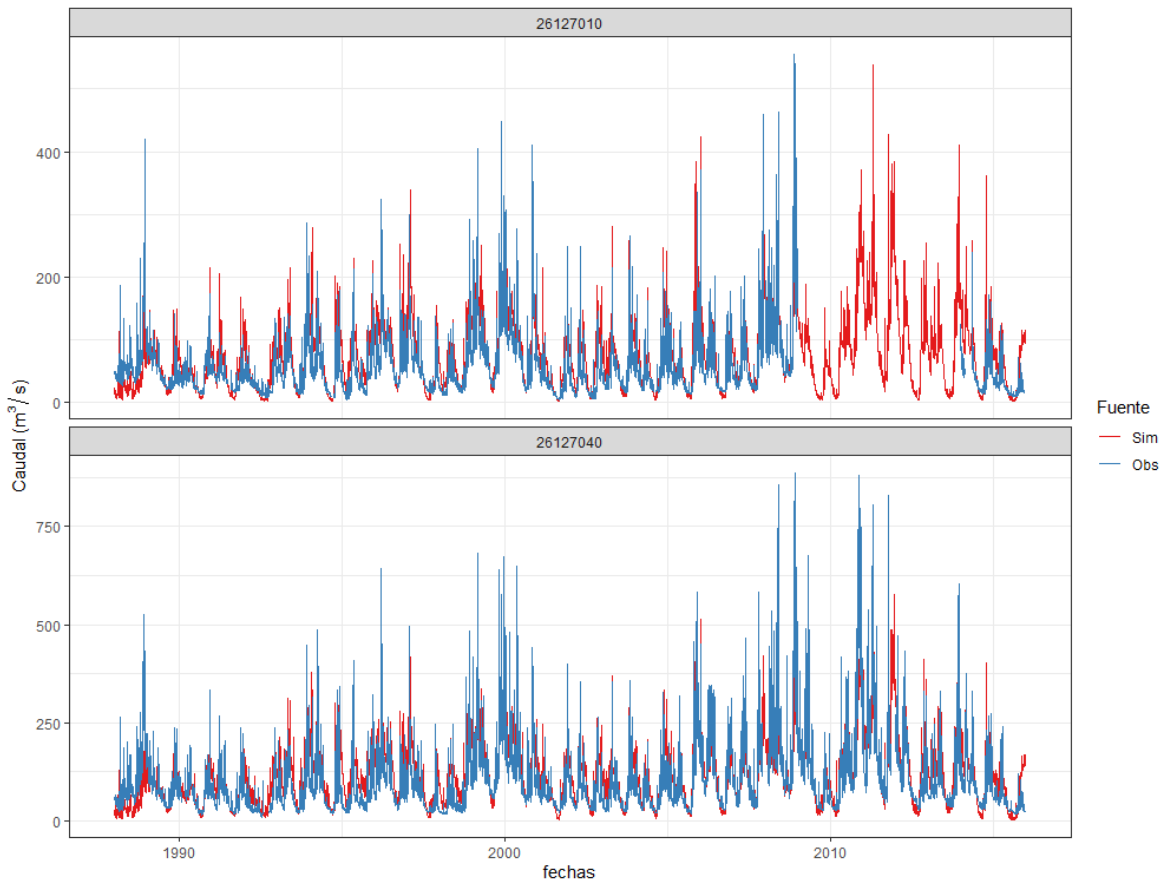
**Tabla 7-1. Coeficientes de desempeño NSE para las dos estaciones del río La Vieja**

Estación	26127010	26127040
Calibración	0.34 diario 0.40 mensual	0.35 diario 0.43 mensual



	0.30 diario	0.56 diario
Validación	0.34 mensual	0.69 mensual

Estaciones de Caudal en la cuenca del río Cesar



**Figura 7-8. Hidrógrafas del modelo piloto calibrado para el río La Vieja**

Al momento, no se ha definido en que lugares es necesario realizar una modelación hidrodinámica en algunos afluentes de la cuenca del río La Vieja. Por otra parte, en el documento FN-115-17, no se especifica que se deba hacer una modelación hidrodinámica y no se describen los puntos donde deba hacerse. Por esta razón no se presentan aquí datos en lugares de acople entre los modelos para este hidrosistema. La definición de las zonas a modelar hidrodinámicamente y donde se deba hacer un acople de modelos se pretende realizar en el futuro, dada la disponibilidad de tiempo y avance de los acoples en las otras ventanas de modelación.

## 8. FASE II MONITOREO Y POSTPROCESO

De las tres ventanas de estudio (Ciénaga de Zapatosa, Ciénaga de Ayapel y Cuenca del río la Vieja) sólo se realiza muestreo en la ciénaga de Zapatosa. Para las otras ventanas se utilizará la información secundaria existente, que en Ayapel es especialmente abundante. El componente 2 Salud de los Ecosistemas, tiene dentro de su planeación y presupuesto general la ejecución de cuatro campañas de muestreo.

Es importante mencionar que como parte del aporte al fortalecimiento del Ideam, el componente 2 conformó el grupo de profesionales para los análisis de laboratorio, los análisis de laboratorio se realizan en las instalaciones del laboratorio de calidad ambiental del Ideam, empleando los equipos del Ideam. Así mismo, como parte del fortalecimiento del Ideam, a partir de los protocolos de muestreo del Ideam, el PMEH elaboró instructivos de muestreo para las diferentes comunidades a muestrear así como los instructivos de análisis de laboratorio para cada una de las comunidades hidrobiológicas.

### 8.1 DISEÑO DE MUESTREO

Para el muestreo se desarrolló un plan de muestreo y un plan de análisis de tal forma que respondiera a los objetivos del muestreo y determinara la localización de los puntos, los períodos y cantidad de muestreos, además de los parámetros físicos, químicos y biológicos.

Dado que los muestreos se concentran en la ciénaga de Zapatosa, se seleccionaron los períodos en los cuales era relevante realizar las campañas de muestreo, para el objetivo de muestreo planteado para el PMEH que incluye la actualización de la línea base biológica físico química del ecosistema y el aporte de información clave para la calibración y validación de los modelos computacionales a desarrollar para la ciénaga.

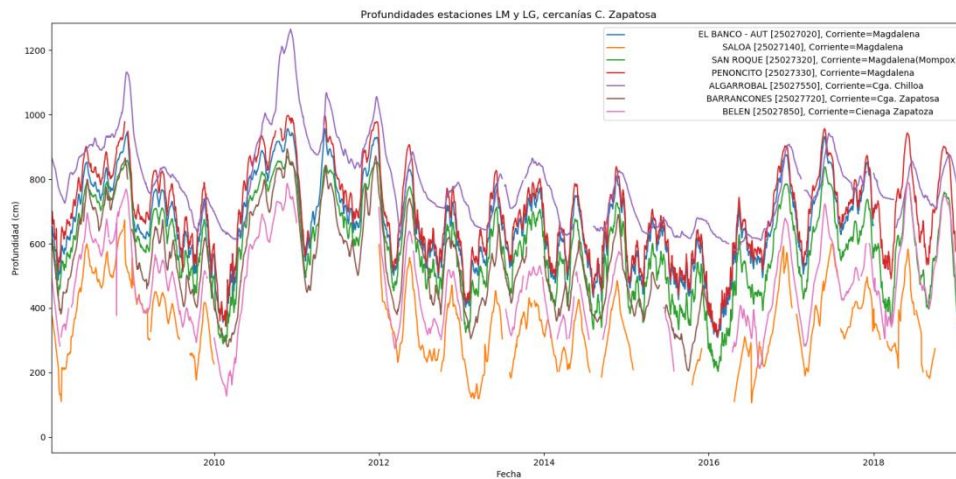
Por lo anterior se estableció la necesidad de llevar a cabo un monitoreo que diera respuestas de las variaciones del ciclo hidrológico en la zona, para lo cual se proyectaron 4 campañas de muestreo que cubrieran las condiciones de: llenado, vaciado, aguas máximas y aguas mínimas de la ciénaga para conocer y caracterizar no sólo las comunidades hidrobiológicas ((fitoplancton, zooplancton, perifiton, macroinvertebrados asociados a fondos blandos, macroinvertebrados asociados a macrófitas, ictiofauna e ictioplancton), la calidad del agua (iones, cationes principales y algunos metales y pesticidas) si no también los biogeoelementos (Nitrógeno, Carbono y Fósforo) en las matrices de tejido animal, tejido vegetal y sedimentos de tal forma que proporcione valores para el balance de estos elementos en la modelación.

El período de muestreo para cada uno de estas condiciones se determinó con base en la serie histórica de niveles mensuales multianuales de la estación Belén, la cual

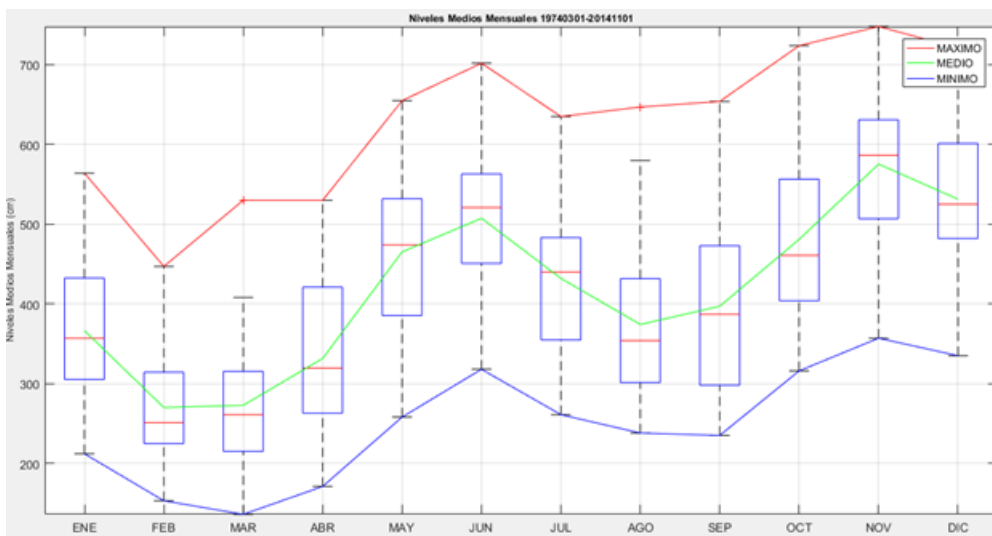




se encuentra dentro de la ciénaga de Zapatosa y tiene un registro de más de 20 años. Con base en esta información se identificó que el mes de Noviembre es en donde se presentan los niveles más altos en la ciénaga y el mes de Febrero-Marzo los niveles más bajos. Dado que los niveles tienen un comportamiento bimodal, se presenta a finales de mayo inicios de junio el aumento de niveles (etapa de transición) y en septiembre una disminución de niveles.



**Figura 8-1 Serie histórica de niveles mensuales multianuales para las estaciones de la zona aferente a la ciénaga de Zapatosa.**



**Figura 8-2 Serie histórica de niveles mensuales multianuales para la estación de Belén en la ciénaga de Zapatosa.**

Por este comportamiento se seleccionaron para el muestreo los periodos de:

- Finales de Mayo principios de Junio Llenado en etapa de transición
- Septiembre vaciado en etapa de transición
- Noviembre aguas máximas
- Finales de Febrero principios de Marzo aguas mínimas.

Los sitios de muestreo se seleccionaron igualmente respondiendo a los objetivos del muestreo. Para su selección se empleó toda la información secundaria compilada en el estudio: los sitios de muestreos de otros estudios, el mapa de frecuencia de inundación para la ciénaga desarrollado por el PMEH y más de 100 imágenes satelitales y se limitó por el presupuesto disponible para tal fin.

Los sitios brindan información de los principales aspectos del modelo conceptual de la ciénaga, es decir:

Entradas al sistema: La entrada principal tanto de agua como de sedimentos corresponde al río Cesar, por lo cual se seleccionó un punto sobre el río Cesar aguas arriba de la ciénaga de Zapatosa. (E4. Río Cesar Aguas Arriba)

Otras entradas al sistema corresponden a algunos ríos/quebradas que drenan directamente a la ciénaga. De ellos se escogieron los que tienen un carácter permanente y que pueden tener el mayor aporte a la ciénaga. En el costado oriental el Arroyo Grande desemboca en el sector sur de Saloa, en el costado Occidental el Arroyo Hondo desemboca en el sector norte Candelaria y hacia el sur de la ciénaga se encuentran el Caño Patón. (E1. Arroyo Grande; E2. Arroyo Hondo; E5. Caño Patón).

Salidas del sistema: Básicamente corresponde al río Cesar antes de su desembocadura en el Río Magdalena. (E3. Río Cesar Aguas Abajo)

Zonas de influencia: La conectividad hídrica y el intercambio de sedimentos que es esencial para mantener el complejo cenagoso de Zapatosa y sus condiciones características como hábitat. Es claro que adicional al río Cesar, el Río Magdalena tiene un aporte fundamental hacia la ciénaga, por lo cual se seleccionó un sector de muestreo dentro de la ciénaga en la cual por el avance de drenajes el caudal y los sedimentos Río Magdalena llegan a la ciénaga y otro sector al norte de la ciénaga fuera del cauce del río Cesar, que represente igualmente la influencia del Cesar en la ciénaga. (E8. Influencia Río Cesar; E11. Influencia Río Magdalena)

Agua Abierta: A partir de la información de batimetrías desarrolladas por el Ideam en 2007 y 2012 y con base en el análisis de imágenes de satélite se seleccionaron los sitios de mayor profundidad de la ciénaga que estuviesen al interior de la misma. Se considera aguas abiertas y condiciones propias de la ciénaga. (E7. Sector Sempegua; E9. Sector Caño Cañagunal).

Áreas de litoral: Seleccionados nuevamente a partir del análisis de más de 100 imágenes de satélite y con base en el mapa de frecuencia de inundación del PMEH, se escogieron

los sectores al occidente en el sector candelaria y en el costado oriental de la ciénaga. (E6. Sector Candelaria; E10. Sector Saloa)

Lo anterior corresponde a sectores de muestreo que tienen objetivos específicos que no representan una coordenada específica si no un área en donde se cumple el objetivo de muestreo, lo anterior anticipándose a las potenciales restricciones de acceso que puedan darse por la presencia de macrófitas y/o disminución de caudal y nivel en la ciénaga.

## 8.2 PLAN DE MUESTREO

Para cada una de las matrices, se estableció un protocolo que garantice el adecuado manejo en cada una de las etapas del muestreo y análisis que cómo parte del fortalecimiento del Ideam se propusieron como instructivos de colecta, manejo, preservación y análisis de muestras.

- Instructivo para colecta y manejo de muestras de macrófitos
- Instructivo para colecta, manejo y análisis de muestras y resultados de muestras de peces
- Instructivo para colecta y manejo de muestras de sedimento para C:N:P
- Instructivo para colecta y manejo de muestras de tejido vegetal para C:N:P
- Instructivo para colecta y manejo de muestras de tejido animal -peces para C:N:P
- Instructivo para productividad primaria – ensayo en campo
- Instructivo para colecta, manejo y análisis de clorofila en agua
- Instructivo para colecta, manejo y análisis de muestras y resultados de muestras de macroinvertebrados bénticos y asociados a macrófitas
- Instructivo para colecta, manejo y análisis de muestras y resultados de muestras de zooplancton
- Instructivo para colecta, manejo y análisis de muestras y resultados de muestras de fitoplancton
- Instructivo para colecta, manejo y análisis de muestras y resultados de muestras de perifiton
- Instructivo para colecta, manejo y análisis de muestras y resultados de muestras de ictioplancton
- Instructivo para colecta, manejo y análisis de muestras de vegetación inundable

## 8.3 PLAN DE ANALISIS

A partir de la revisión de información preliminar y la consulta de otras fuentes disponibles, se determinó que el modelo debe atender a un balance de masas, considerar las interacciones de las poblaciones en la comunidad y estar inmerso en las propiedades emergentes del ecosistema. Desde esta perspectiva se consideraron los siguientes parámetros de especial importancia (Tabla 8-1).

**Tabla 8-1. Parámetros a evaluar durante los muestreos**

### Variables Físico – Químico en Muestras de agua



COT	[mg/L C ]	Fósforo total	[mg/L - P]
DQO	[mg/L O2 ]	Ortofosfato	[mg/L - P]
DBO	[mg/L O2 ]	Sólidos totales, sedimentables, disueltos, suspendidos	[mg/L ]
O2D	[mg/L O2 ]	Temperatura	°C
Demanda béntica	[mg/L O2 ]	Potencial redox	mV
Nitrógeno total	[mg/L N ]	Turbiedad	Unidades nefelométricas
Formas de nitrógeno	[mg/L N ]	Conductividad	µS/cm
Alcalinidad	[mg/L CaCO3 ]	PH	Unidades
Dureza	[mg/L CaCO3 ]	Aluminio	[mg/L Al ]
Bario	[mg/L Ba ]	Cromo	[mg/L Cr ]
Cobre	[mg/L Cu]	Niquel	[mg/L Ni ]
Calcio	[mg/L Ca ]	Cadmio	[mg/L Cd ]
Magnesio	[mg/L Mg ]	Zinc	[mg/L Zn ]
Hierro	[mg/L Fe ]	Manganeso	[mg/L Mn ]
Plomo	[mg/L Pb ]	Mercurio	[mg/L Hg ]
Selenio	[mg/L Se ]	Organoclorados	[mg/L]
Organofosforados	[mg/L]	Sulfatos	[mg/L SO4 ]
Tensoactivos	[mg/L ]	Plata	[mg/L Ag ]
Color	Unidades Platino / Cobalto	Cloruros	[mg/L Cl ]
<b>Biológico</b>			
Perifiton algal	[Org/cm2 ]	Macroinvertebrados asociados a macrófitos	No. de organismos / m2
Fitoplancton	[Org/L ]	Macrófitos	No. de organismos / m2
Zooplancton	[Org/L ]	Ictioplancton	NMP/100ml
Macroinvertebrados bénticos	[Org/m2 ]	Clorofila a	µgr/l
Peces	Organismos	Productividad primaria	mg/l O2
<b>Bacteriológico</b>			
Coliformes totales	NMP/100ml	Coliformes fecales	NMP/100ml
E. coli	Presencia		

#### 8.4 CAMPAÑA DE MUESTREO 1 PMEH

La primera campaña de muestreo del PMEH se realizó del 16 al 30 de junio de 2019. Esta primera campaña de campo corresponde al periodo de transición lluvias-seco, luego de que la ciénaga recibe aguas del río Magdalena y del río.

Durante la primera campaña de muestreo se colectaron en total 11 muestras (Tabla 8-2 y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**)

**Tabla 8-2 Sectores de muestreo campaña 1**

Código	Nombre del sitio de muestreo	Fecha de muestreo	Coordenadas	
			Latitud	Longitud
E1	Arroyo Grande	19/06/2019	9°11'11,8"	73°40'20,7"
E2	Arroyo Hondo - Corozal	20/06/2019	9°12'18,0"	73°53'36,4"
E3	Río Cesar aguas abajo CCZ	21/06/2019	9°00'45,5"	73°57'17,9"
E4	Río Cesar aguas arriba CCZ	22/06/2019	9°12'42,4"	73°42'40,1"
E5	Caño Patón	23/06/2019	9°01'06,1"	73°51'53,3"
E6	Litoral - Sector Candelaria	24/06/2019	9°08'36,5"	73°54'28,7"
E7	Occidental - Sector Sempegua	25/06/2019	9°07'05,9"	73°48'29,5"
E8	Influencia Cesar	27/06/2019	9°10'53,3"	73°49'04,4"
E9	Oriental Sector Caño Cañagunal	28/06/2019	9°05'27,5"	73°49'11,7"
E10	Oriental - Sector Saloa	29/06/2019	9°05'49,3"	73°46'20,2"
E11	Influencia Magdalena	30/06/2019	9°01'00,5"	73°55'43,7"

En la Figura 8-3 se señalan los puntos de muestreo y su distribución, de las cuales el PMEh realizó el análisis de las comunidades hidrobiológicas (fitoplancton, zooplancton, perifiton, macroinvertebrados asociados a fondos blandos, macroinvertebrados asociados a macrófitas, ictiofauna e ictioplancton), la medición de caudales, batimetrías y toma de muestras de agua para calidad y sedimentos para biogeoelementos y el análisis de biogeoelementos en matriz sedimentos. Las muestras de calidad de agua las analizó el laboratorio de calidad del Ideam.

**Figura 8-3 Ubicación de los puntos de muestreo de la primera campaña del PMEh en la ciénaga de Zapatosá**

A excepción del muestreo en el río Cesar aguas arriba de la ciénaga en donde la alta presencia de macrófitas impidió el acceso, y en el arroyo Tamalague en donde la inundación de la ciénaga no permitió encontrar el cauce del mismo, se realizó el muestreo en las coordenadas inicialmente planteadas.

## 8.5 CAMPAÑA DE MUESTREO 2 PMEh

### 8.5.1 Ciénaga de Zapatosá

**Tabla 8-3 Sectores de muestreo campaña 2**

Nombre	Localización	Norte	Oeste
Ciénaga Saloa (E14)	Se ubica al costado nor-oriental del complejo cenagoso Zapatosá, en el sector sur oriental de la ciénaga de Saloa. Muestreo en agua abierta de la ciénaga de Saloa	9° 10' 54.81"	73° 41' 53.03"



Ciénaga Candelaria (E15)	Se ubica al costado occidental del complejo cenagoso Zapatosa, cercano a la población de Candelaria. Muestreo en agua abierta del sector norte de la ciénaga de Candelaria	9° 9' 50,10"	73° 51' 51,09"
Río Cesar aguas abajo CCZ (E3)	Se ubica al costado sur occidental del complejo cenagoso de Zapatosa, cercano al municipio El Banco (Magdalena); el punto se toma aguas abajo del punto donde el caño Inacica vierte sus aguas.	9°00'45,5"	73°57'17,9"
Río Cesar aguas arriba CCZ (E4)	Se ubica en la zona nor occidental del complejo cenagoso Zapatosa.	9° 12' 42,4"	73° 42' 40,1"
Caño Patón (E5)	Se ubica al costado sur oriental del complejo cenagoso Zapatosa, hacia la margen norte del río Magdalena.	9°01'06,1"	73°51'53,3"
Occidental sector Candelaria (E6)	Se ubica en una zona litoral, al costado occidental del complejo cenagoso Zapatosa, al sur occidente de la población de Candelaria.	9°08'36,5"	73°54'28,7"
Occidental -Sector Sempegua (E7)	Aguas abiertas de la ciénaga de Zapatosa, costado occidental.	9°07'05,9"	73°48'29,5"
Influencia Cesar (E8)	Aguas abiertas de la ciénaga de Zapatosa, en la zona norte, donde el río Cesar vierte sus aguas y éstas se dispersan en el sistema léntico, al nor oriente de Sempegua	9°10'53,3"	73°49'04,4"
Oriental - Sector Caño Cañagunal (E9)	Aguas abiertas de la ciénaga de Zapatosa, costado oriental.	9° 05' 27,5"	73° 49' 11,7"
Oriental - sector Ultimo caso (E10)	Se ubica en una zona litoral, en el costado oriental del complejo cenagoso de Zapatosa, en cercanías a la población Último caso	9°05'49,3"	73°46'20,2"
Influencia Magdalena (E11)	Ubicado al sur del complejo cenagoso Zapatosa, recibe influencia del agua del río Magdalena se encuentra al nor oriente de la población de El Banco.	9°01'00,5"	73°55'43,7"
Río Cesar arriba E12	Sobre el río Cesar al Norte del complejo cenagoso Zapatosa.	9°23'54,12"	73°42'46,17"
UIMEP1 (E13)	Localizado en las coordenadas para la primera unidad integral de mejoramiento pesquero (UIMEP) en el sector nor occidental del complejo cenagoso de Zapatosa, a la altura de la población de Sempegua.	9°10'9,74"	73°50'4,96"



### 8.5.1.1 Datos Físicos obtenidos en la campaña de campo

#### 8.5.1.1.1 Profundidades del lecho (batimetrías)

Se muestreó con el equipo ADCP las profundidades del lecho en zonas en las que se requiere un refinamiento de la batimetría y en sectores con información deficiente. La Figura 8-7 muestra las zonas que fueron levantadas. Adicional se realizó el proceso de la batimetría levantada por el equipo de hidrología, que consiste en la recopilación, procesamiento y conversión de los archivos gpx generados durante el levantamiento con la ecosonda Garmin Echomap 93s.



MAGDALENA - CAUCA  
**VIVE**

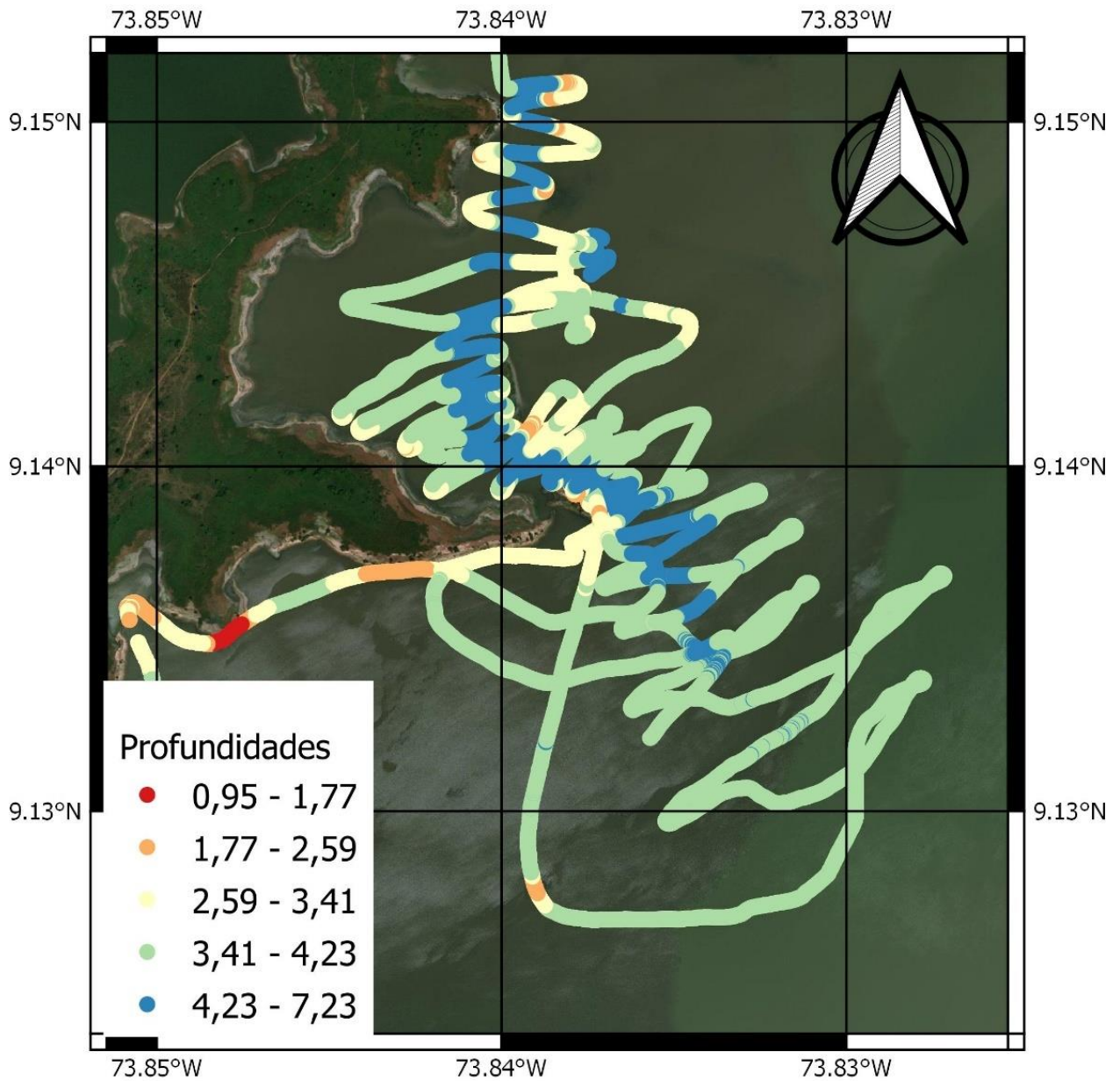


Figura 8-4. Batimetrías levantadas Cesar sector California (Sur)

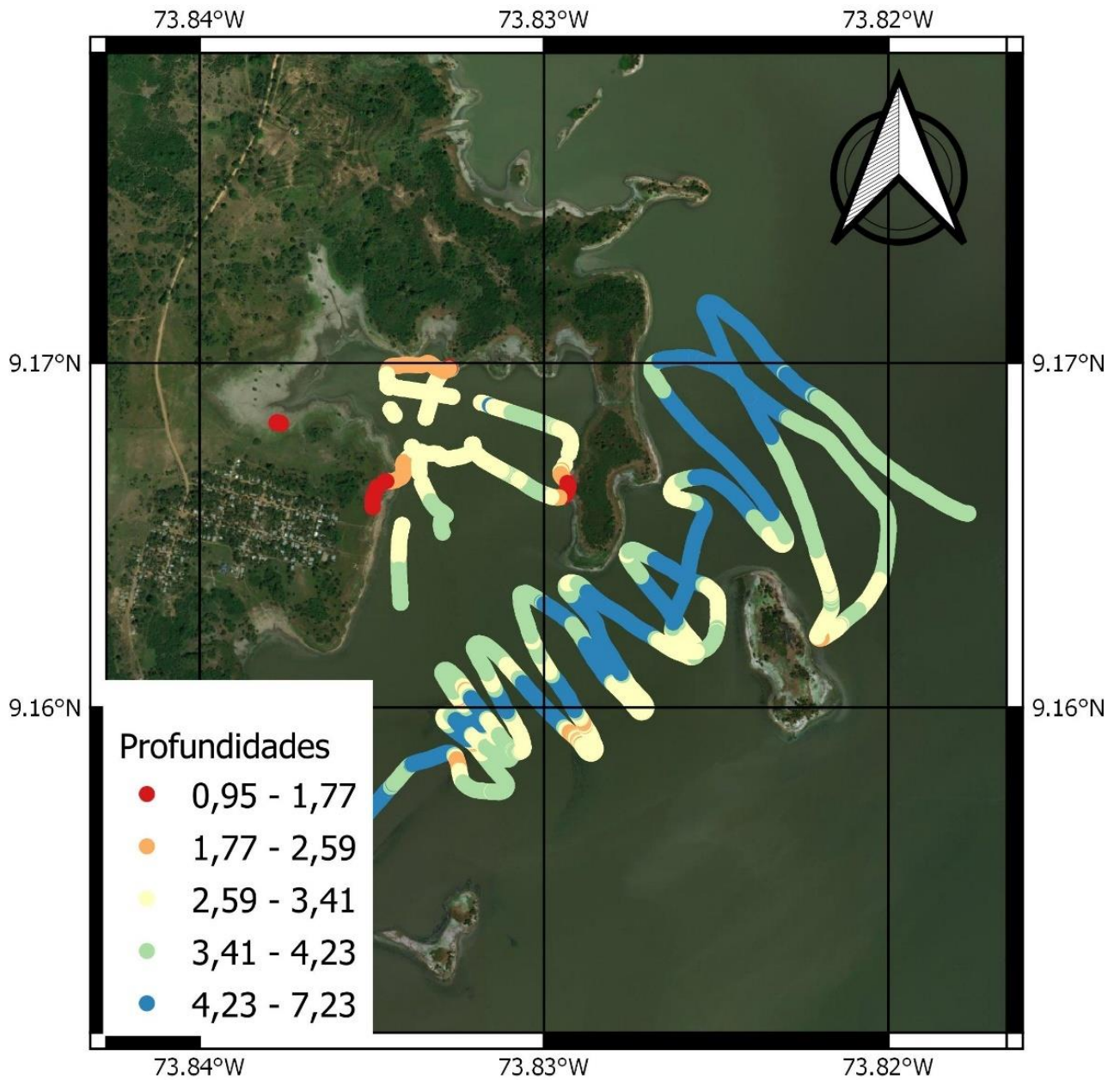


Figura 8-5. Batimetrías levantadas Cesar sector California (Norte)



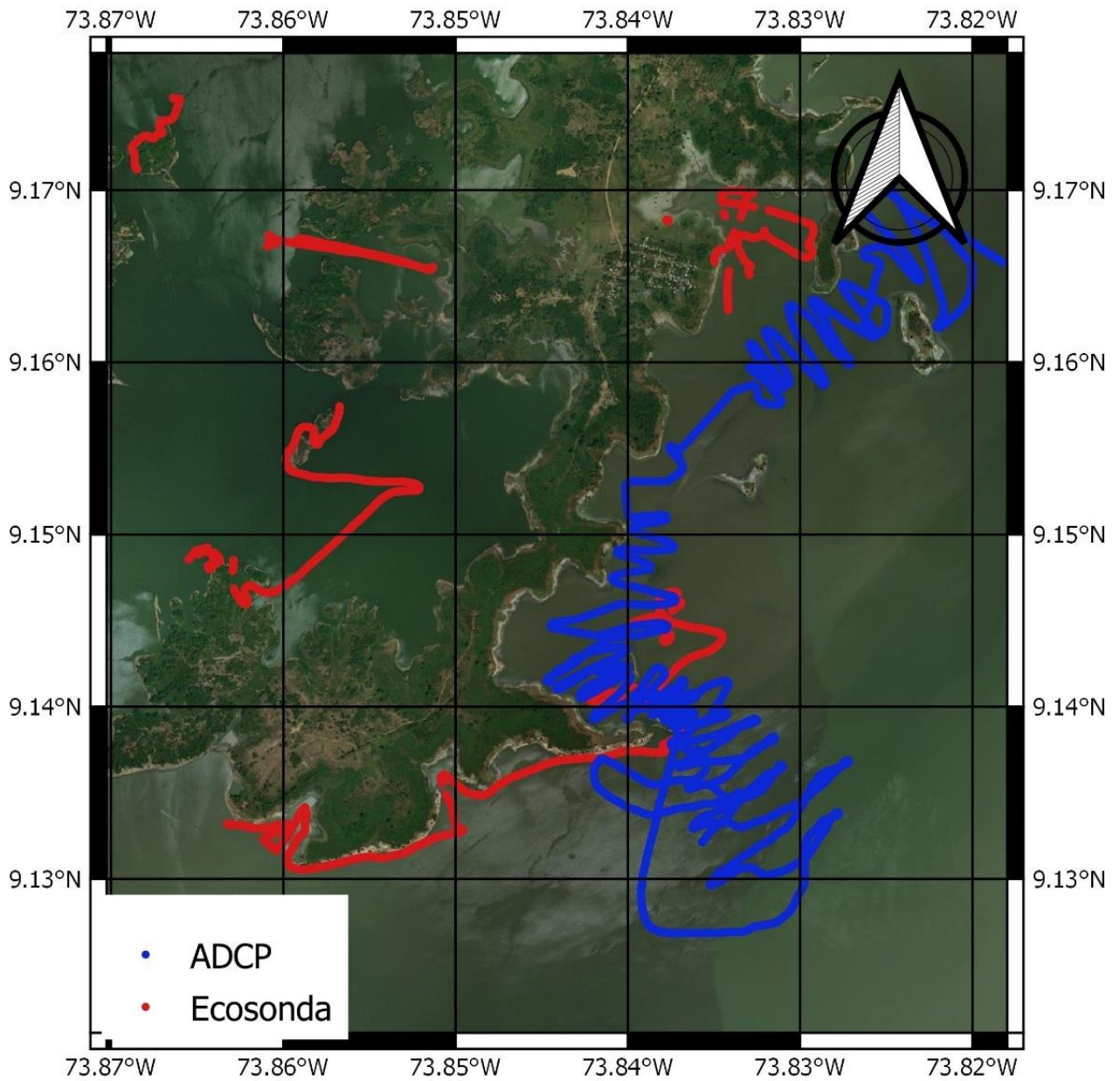
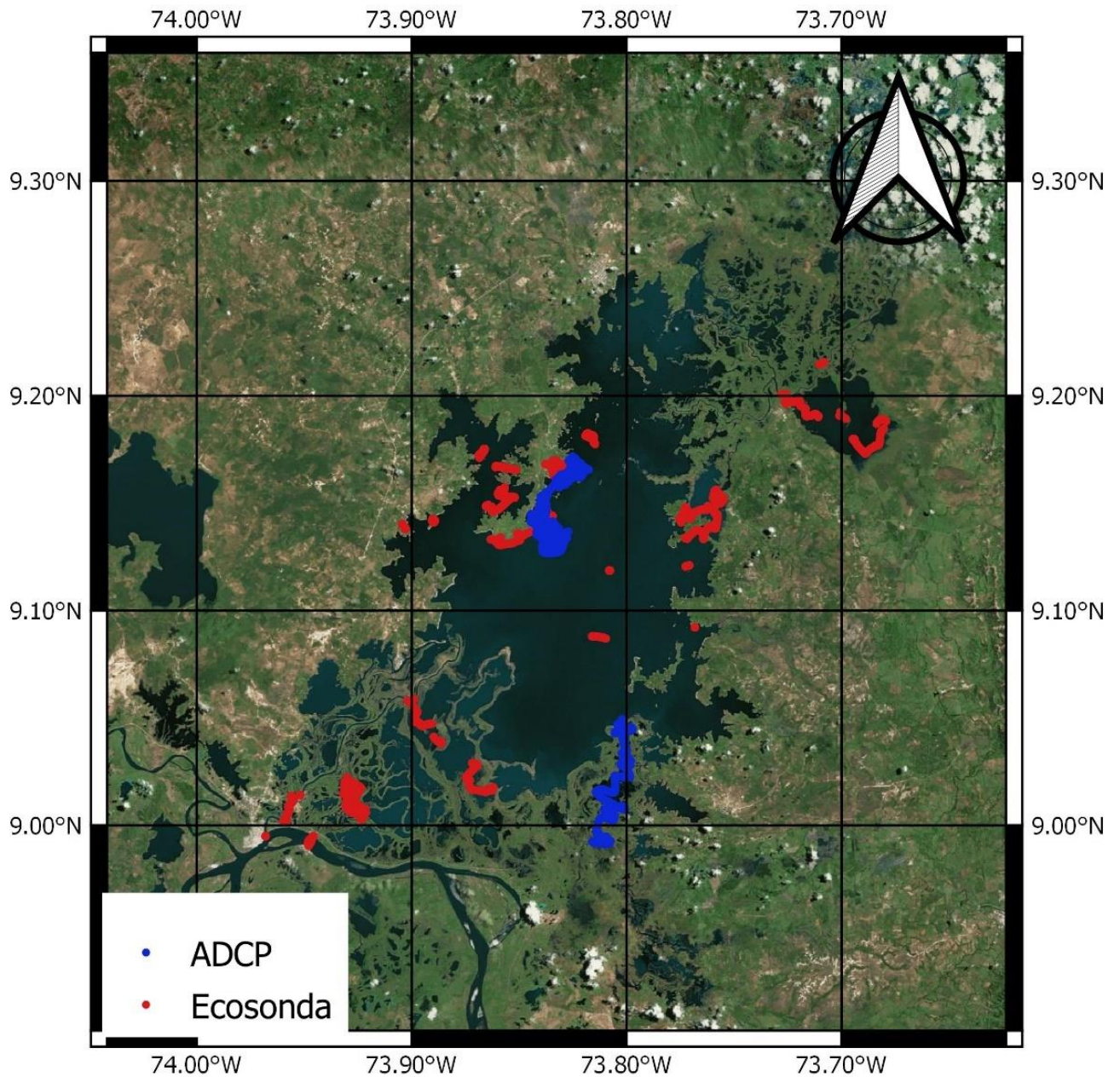


Figura 8-6. Detalle sector California

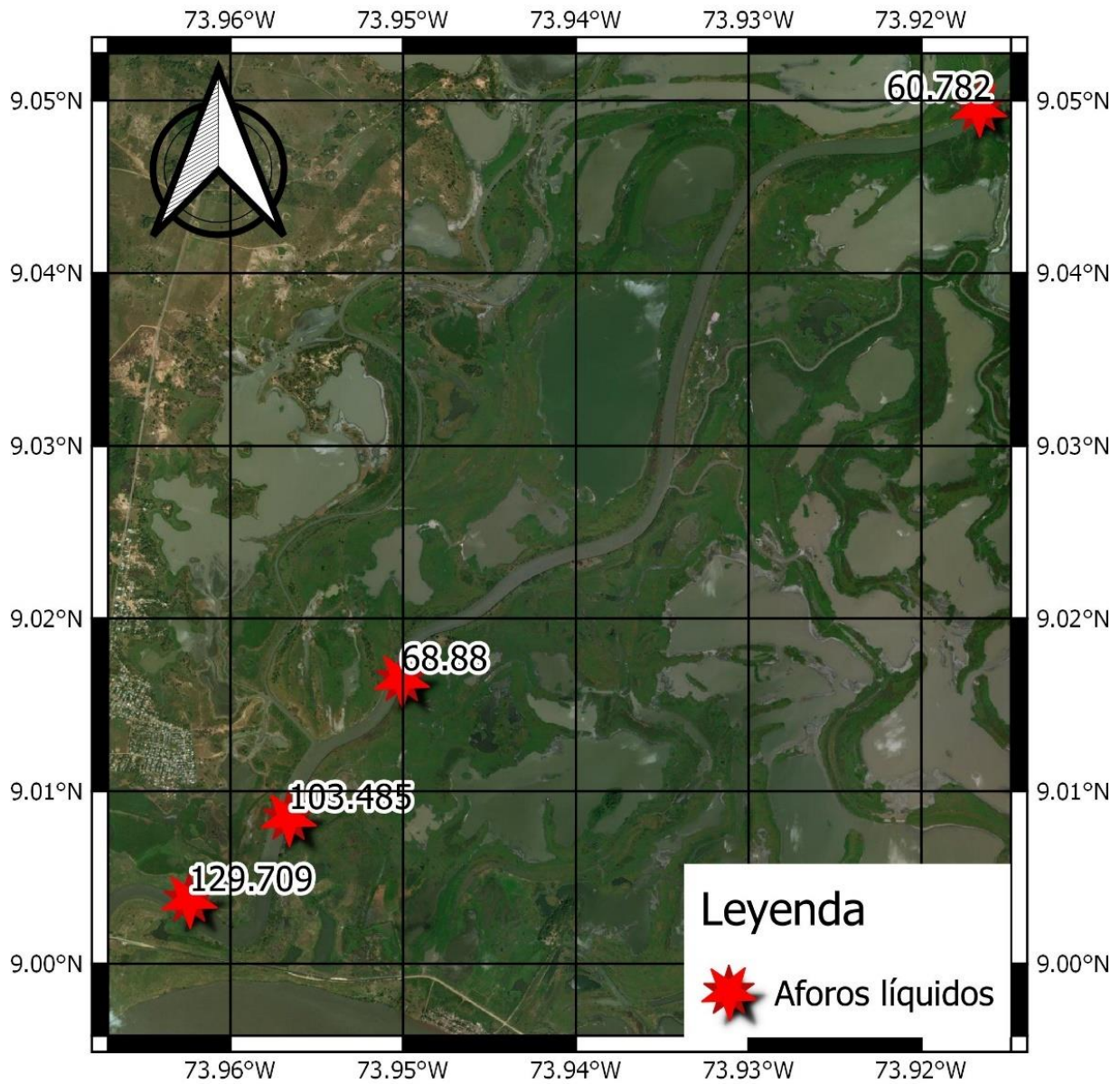




**Figura 8-7. Totalidad de los levantamientos realizados**

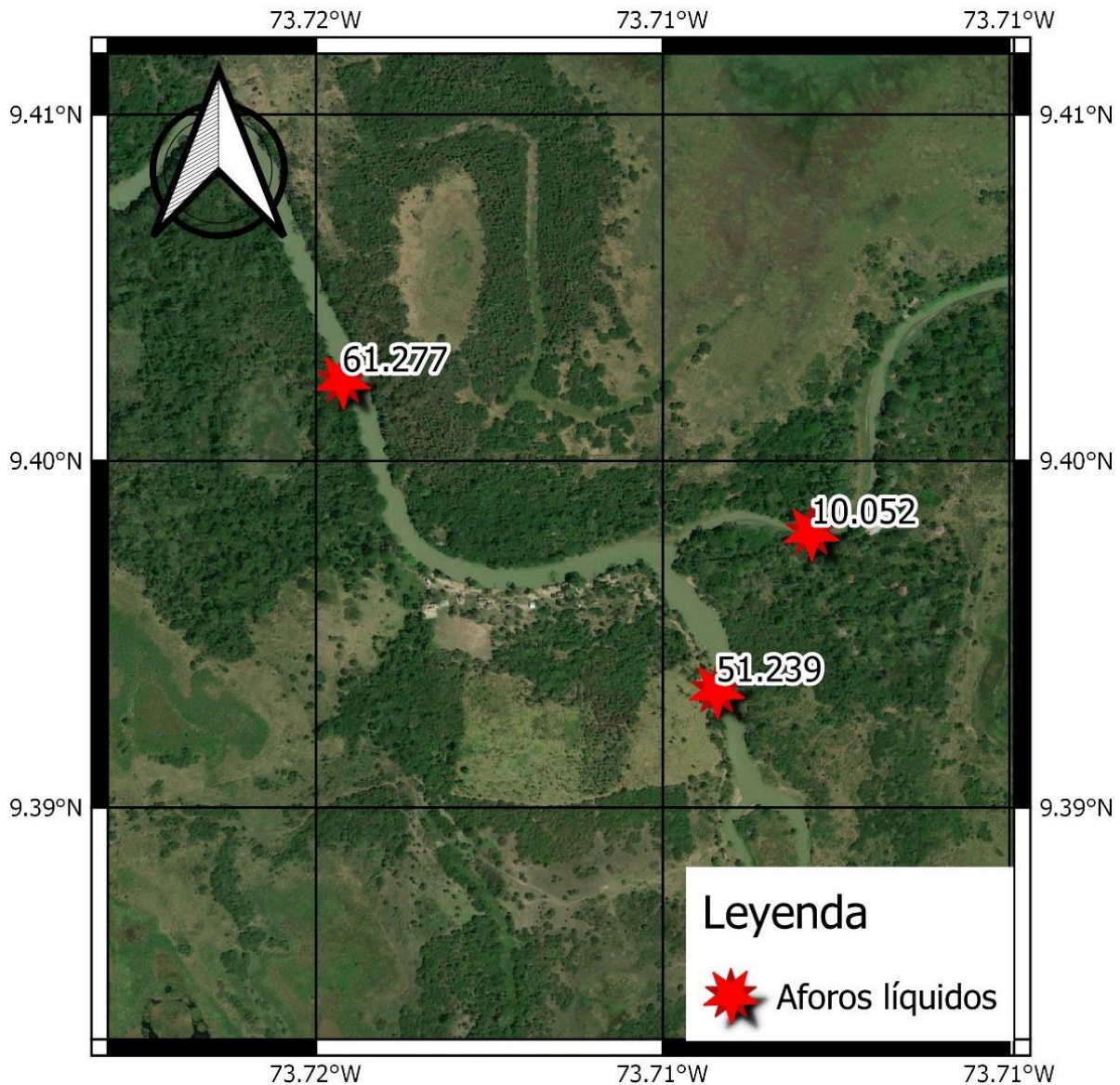
### 8.5.1.1.2 Aforos líquidos

Para los aforos líquidos se conservaron algunos de los puntos realizados durante la campaña pasada y se adicionaron puntos que corresponden a la zona norte de la ciénaga en el Sector de Rancho Claro.



**Figura 8-8. Aforos líquidos realizados en la segunda campaña**





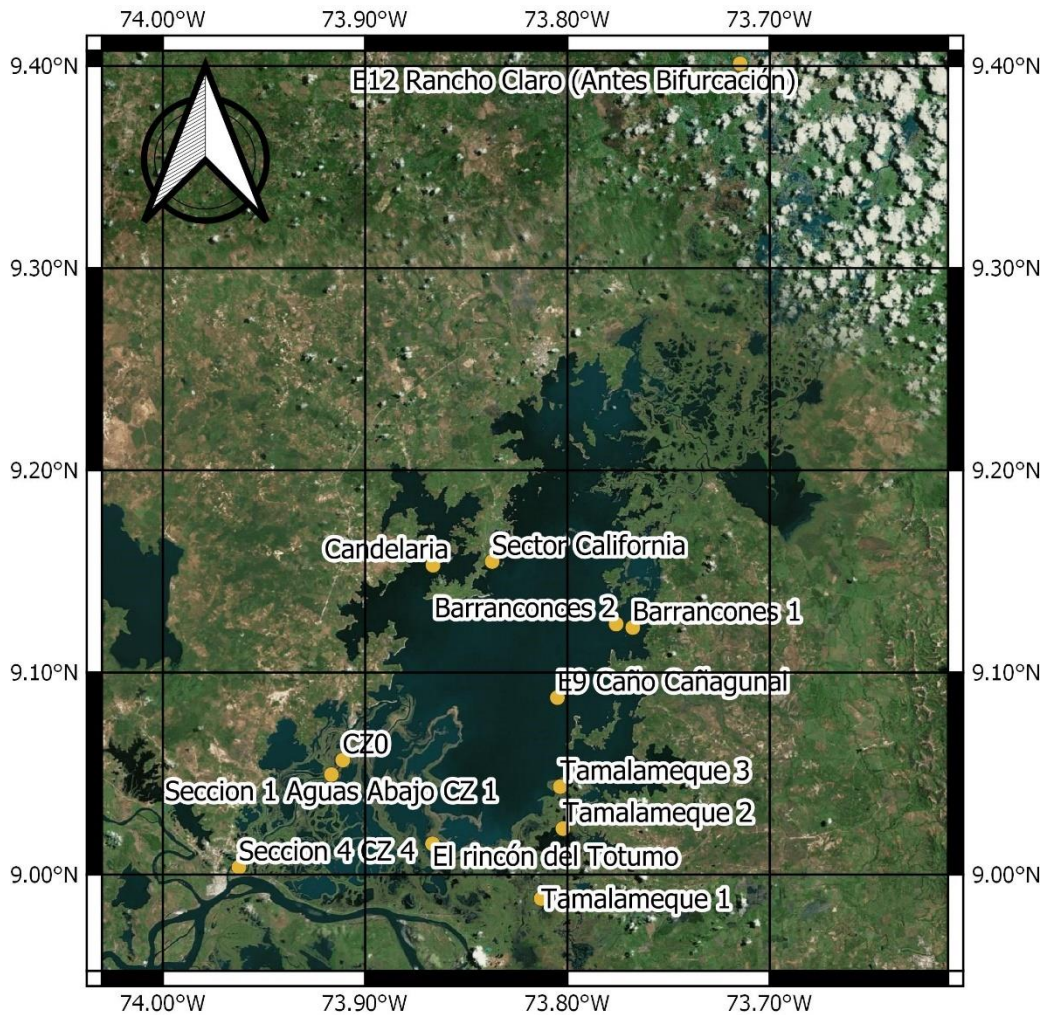
**Figura 8-9. Aforos líquidos realizados en la segunda campaña, sector Rancho Claro**

### 8.5.1.1.3 Aforos sólidos

Se realizaron dos aforos sólidos, estando estos ubicados de manera que permitan realizar el balance de sedimentos en la ciénaga (puntos que por la geometría del hidro-sistema concentran prácticamente la totalidad de sedimentos que entran y salen de la ciénaga, exceptuando cuencas adyacentes de menor extensión y la conexión intermitente con el río Magdalena a través del Caño Patón). La repetición de estos aforos en el tiempo permitirá aproximar el balance de sedimentos en la ciénaga.

### 8.5.1.1.4 Toma de muestras del lecho

Estas muestras fueron obtenidas para su posterior caracterización granulométrica, los puntos seleccionados pretenden aportar al entendimiento de los mecanismos de transporte de sedimentos presentes en la ciénaga y la determinación tanto de condiciones iniciales como insumo para la estimación de parámetros del modelo de transporte de sedimentos. Procurando su distribución espacial de capturar las variaciones de acuerdo a la fuente y modificaciones esperadas del flujo dentro de la ciénaga.



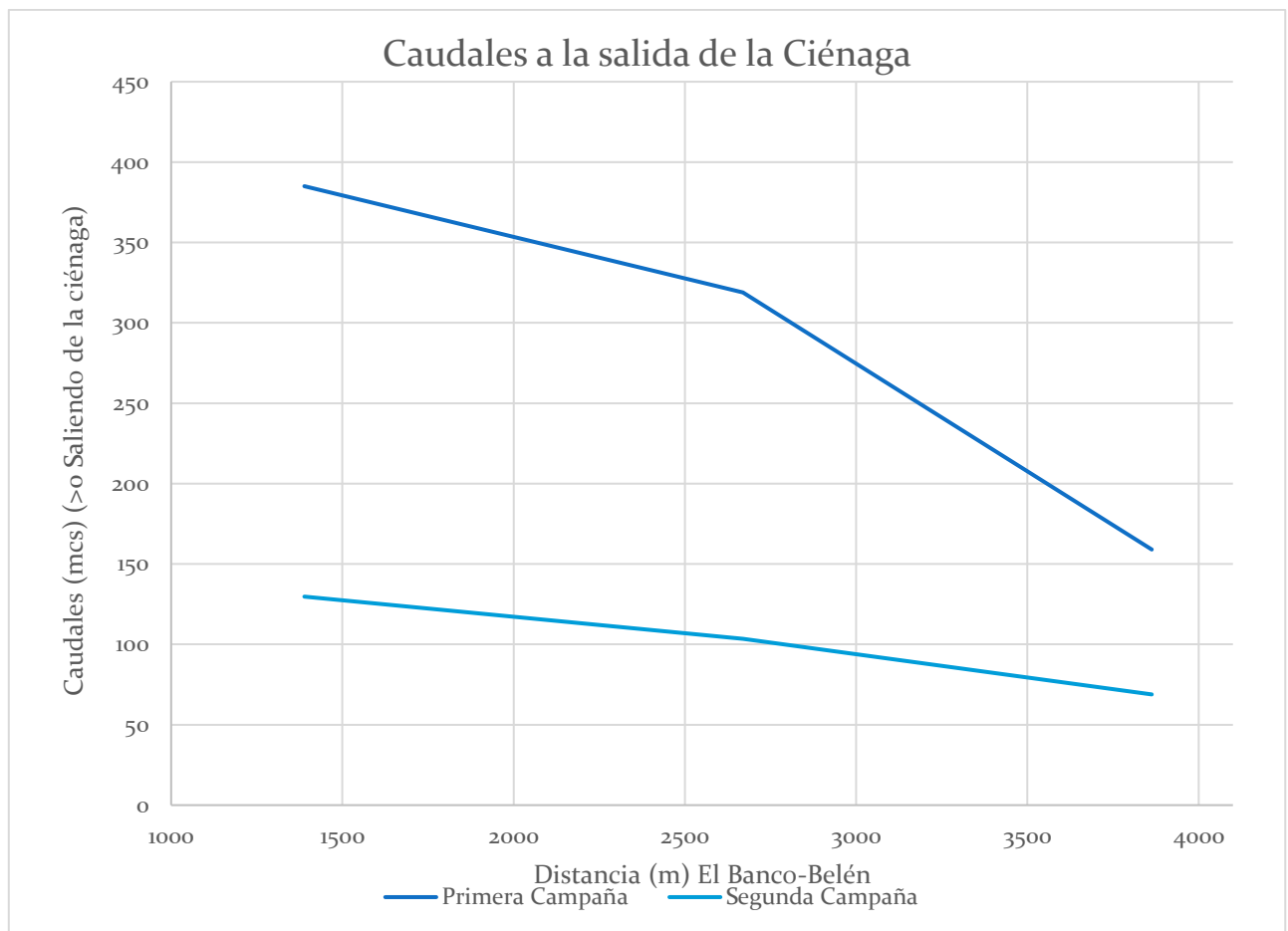
**Figura 8-10. Muestras de fondo obtenidas para su caracterización granulométrica.**



## 8.5.1.2 Análisis de los resultados de la segunda campaña de campo

### 8.5.1.2.1 Salida de agua de la ciénaga hacia el río Magdalena

Se evidenció un comportamiento similar al observado durante la primera campaña de campo, en la que la ciénaga descargaba caudal hacia el río Magdalena de  $129.7 \text{ m}^3/\text{s}$ , también se observó un aumento progresivo del caudal en la medida en que se realizaban aforos más próximos a la desembocadura del río Cesar, dando cuenta de cómo ciénagas adyacentes al río aportan masa al cauce principal tal como se evidenció en la primera campaña de campo. La Figura 8-11 resume los caudales obtenidos en las dos campañas.



**Figura 8-11. Caudales obtenidos a la salida de la ciénaga durante las campañas realizadas**

### 8.5.1.2.2 Caudales a la entrada del sistema (Sector Rancho Claro)

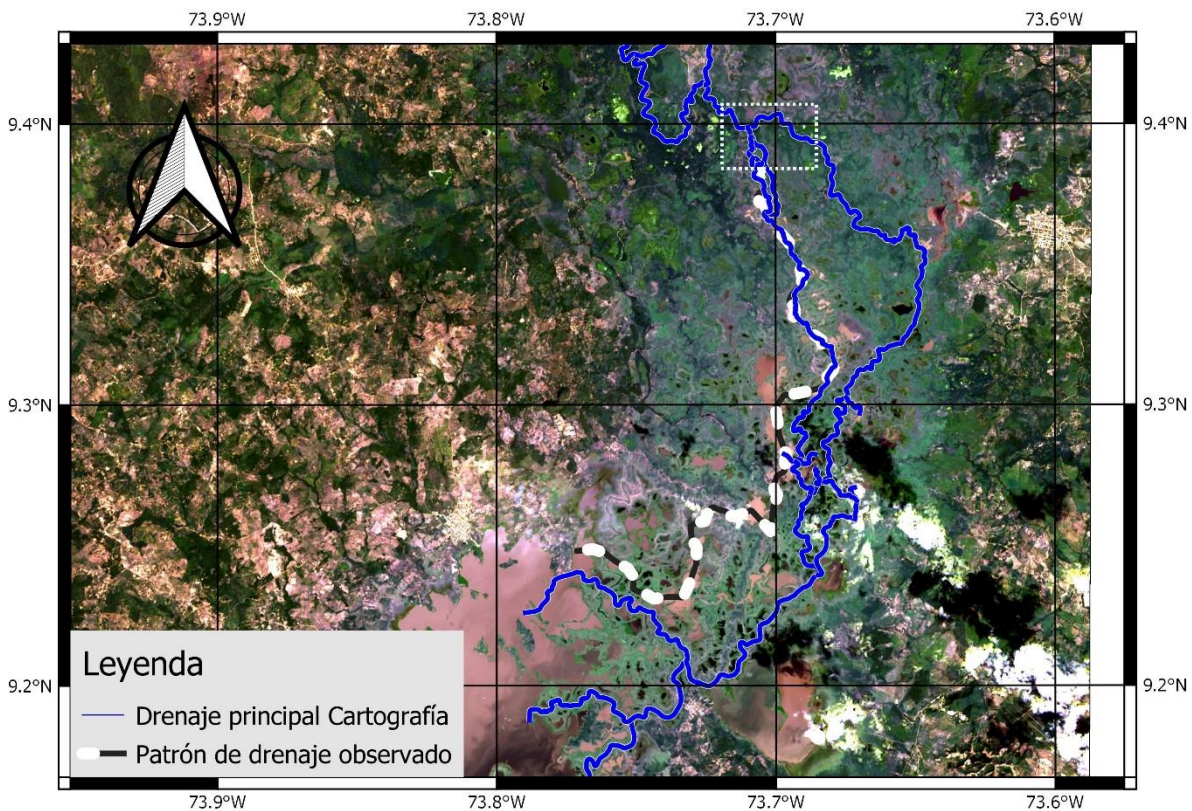
Durante la segunda campaña fue posible acceder el sector de Rancho Claro que coincide con la condición de frontera del modelo, este de punto es de interés si se



considera que allí es posible cuantificar la totalidad de agua superficial y sedimentos que aporte el río Cesar a la ciénaga. En este sector se presenta una bifurcación importante que modificará la forma en la que el río Cesar distribuye sus aportes al sistema. La Figura 8-12 muestra la configuración de la bifurcación en la zona norte y un patrón de flujo que se ha observado en épocas altas, en donde el flujo aparentemente abandona el trazado original y toma un curso más alineado hacia el occidente con respecto al curso original. La observación de la zona norte permite entender como el comportamiento hidráulico de esta bifurcación afectará la descarga en la ciénaga.

De acuerdo con los aforos líquidos realizados para el momento de la campaña el brazo izquierdo (Zona occidental) presentó un caudal de  $53.24 \text{ m}^3/\text{s}$  y el otro brazo (el río Cesar, de acuerdo con la cartografía oficial) un caudal de apenas  $10.05 \text{ m}^3/\text{s}$  (15% del total).

Este aforo permite una observación adicional, el caudal aforado en Rancho Claro (entrada del sistema con  $61.28 \text{ m}^3/\text{s}$ ) comparado con el aforo realizado en cercanías a El Banco (salida del sistema con  $129.71 \text{ m}^3/\text{s}$ ) sugiere que para cerrar el balance de masa en la ciénaga se requerirá considerar entrada de agua desde el río Magdalena, este aspecto será muy relevante en la calibración del modelo.



**Figura 8-12. Configuración del drenaje río Cesar (Imagen de fondo Landsat 8 del 22 de diciembre de 2015).**

### 8.5.1.2.3 Batimetrías

En esta campaña se logró completar un tramo faltante del río Cesar frente al sector California, que en conjunto con el levantamiento batimétrico realizado durante la primera campaña, muestran la configuración geométrica del río en medio de la ciénaga.

## 8.6 CAMPAÑA DE MUESTREO 3 PMEH

La tercera campaña de muestreo se realizó entre el 1 y el 14 de marzo de 2020 en época de estiaje. Se cubrió, en esta campaña, un total de 15 sectores de muestreo. Se muestrearon los sitios de las campañas 1 y 2 y se adicionaron 2 puntos de muestreo sobre el río Magdalena (Figura 8-1) .

**Tabla 8-4 Sectores de muestreo campaña 3**

Sector de Muestreo	Nombre del sitio	Fecha de Muestreo	Latitud (grados)	Longitud (grados9
<b>E3</b>	R.Cesar aguas abajo Inacica CGZ	<b>10/03/2020</b>	9,013	-73,955
E4	RIO CESAR AGUAS ARRIBA CCZ	4/03/2020	9,212	-73,732
E14	CIÉNAGA SALOA	4/03/2020	9,181	-73,697
E8	INFLUENCIA CESAR	5/03/2020	9,181	-73,818
E13	UIMEP 1	5/03/2020	9,168	-73,833
E7	OCCIDENTAL SECTOR SEMPEGUA	6/03/2020	9,118	-73,798
E10	OCCIDENTAL SECTOR ULTIMO CASO	6/03/2020	9,097	-73,772
E9	OCCIDENTAL SECTOR CAÑO CAÑAGUNAL	7/03/2020	9,093	-73,817
E12	RIO CESAR ARRIBA	7/03/2020	9,273	-73,700
E6	OCCIDENTAL SECTOR CANDELARIA	8/03/2020	9,143	-73,901
E15	CIÉNAGA CANDELARIA	8/03/2020	9,164	-73,864
E11	INFLUENCIA MAGDALENA	9/03/2020	9,017	-73,929
E17	FUERA PATÓN	9/03/2020	9,020	-73,846
E16	Río Magdalena	10/03/2020	8,987	-73,977
E18	Río Magdalena Box Couvert	10/03/2020	8,982	-73,905



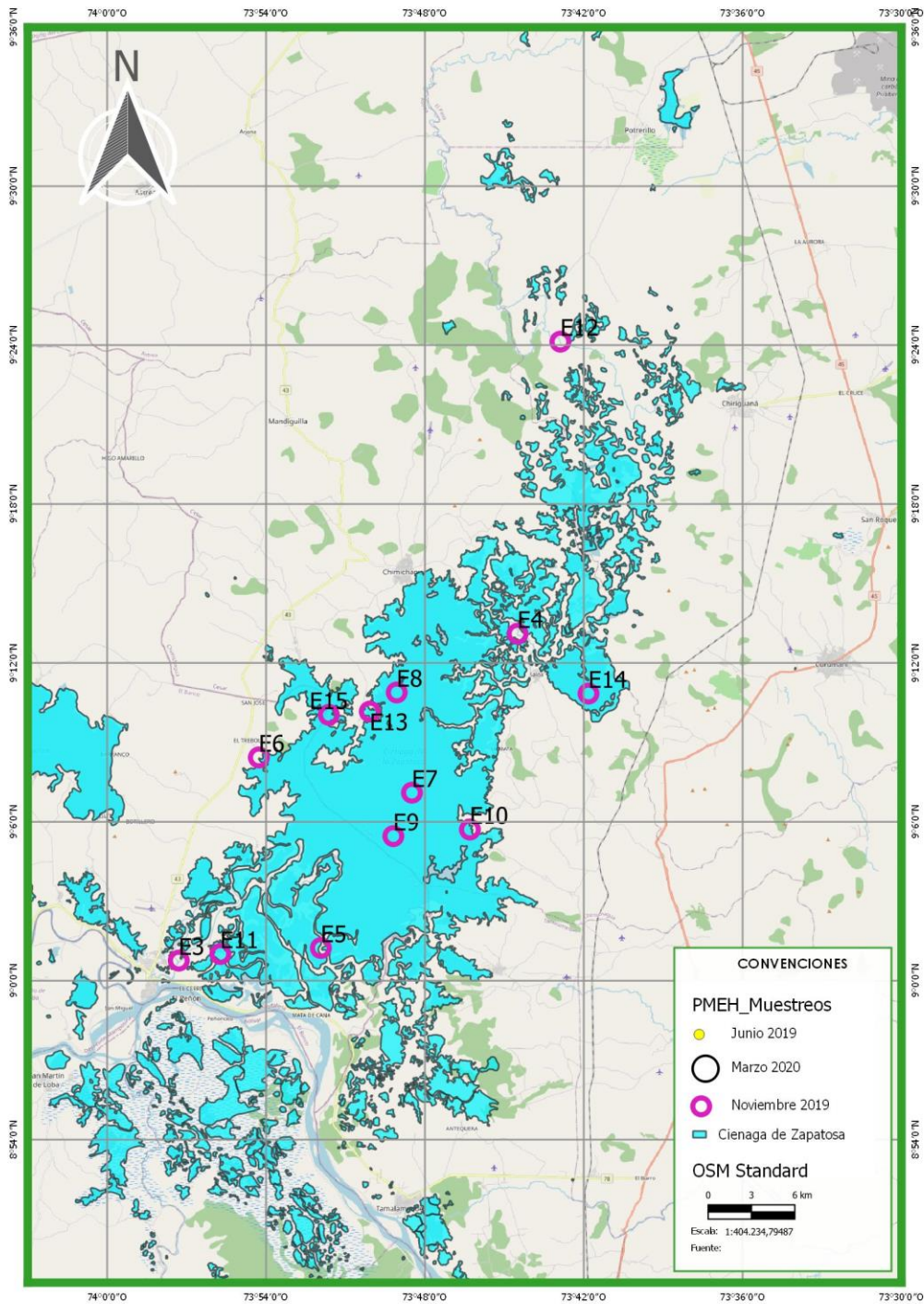


Figura 8-1. Sectores de muestreo durante la Tercera campaña de muestreo del PMEH

### 8.6.1 resultados físicos

Se muestra en esta sección el análisis de la variación con respecto a la profundidad de las variables temperatura, oxígeno disuelto y turbiedad registradas con la sonda HL7. Se graficaron los datos por día y por nombre de puntos definidos en el muestreo hidrobiológico.



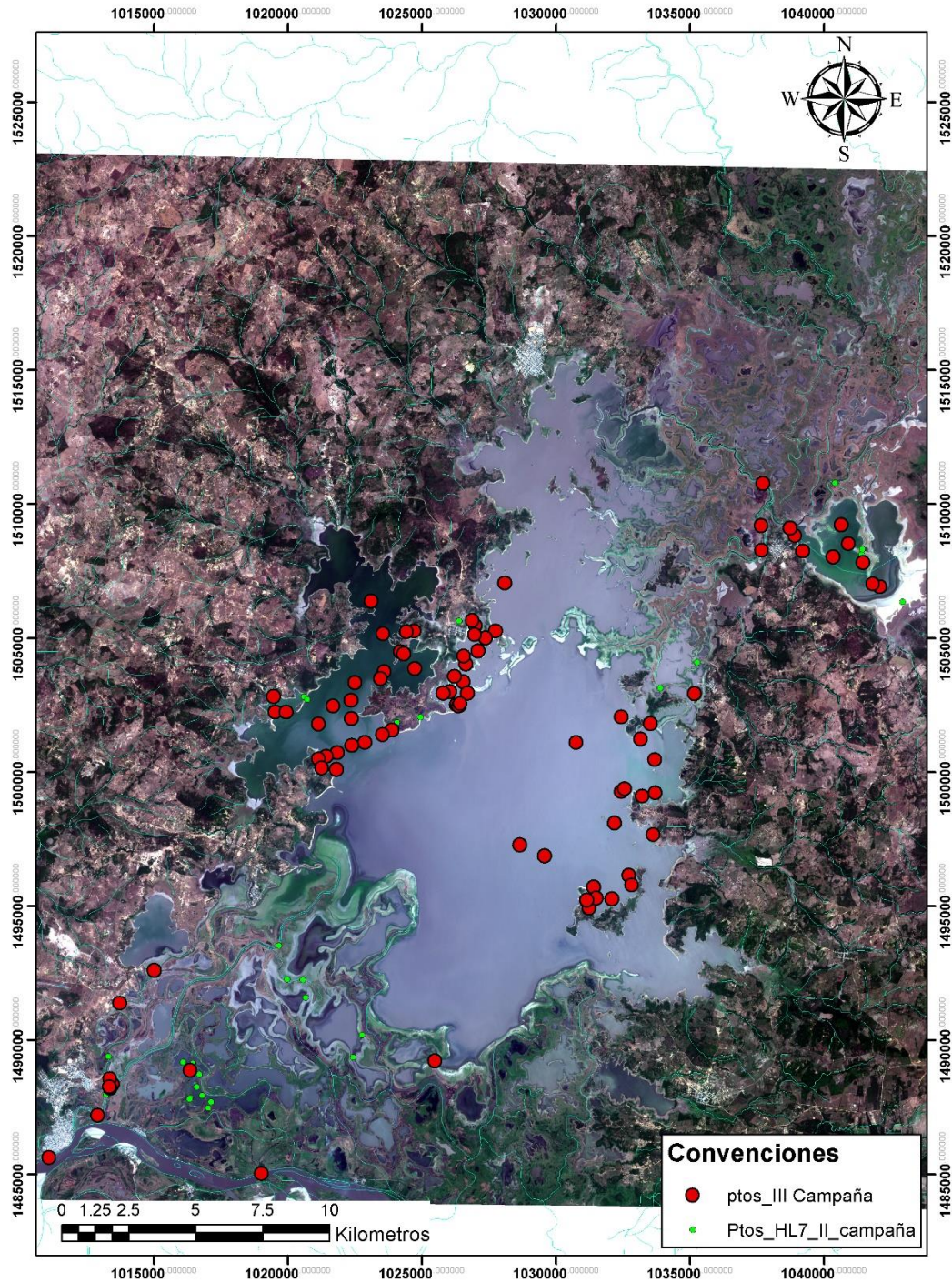
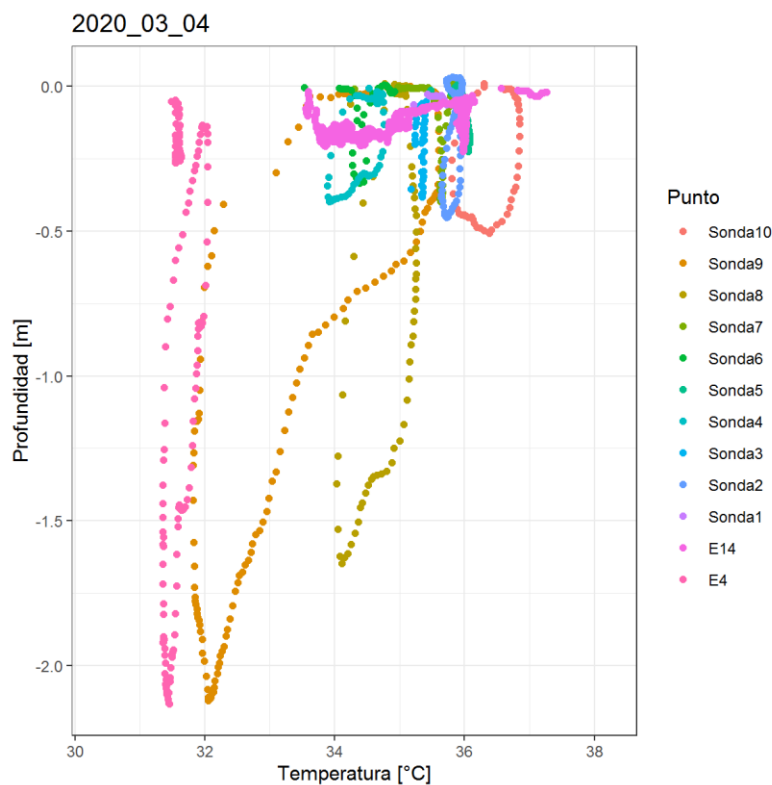


Figura 8-2. Puntos de muestreo con la Sonda HL7 durante la Tercera y la Segunda campaña de muestreo



### 8.6.2 Temperatura

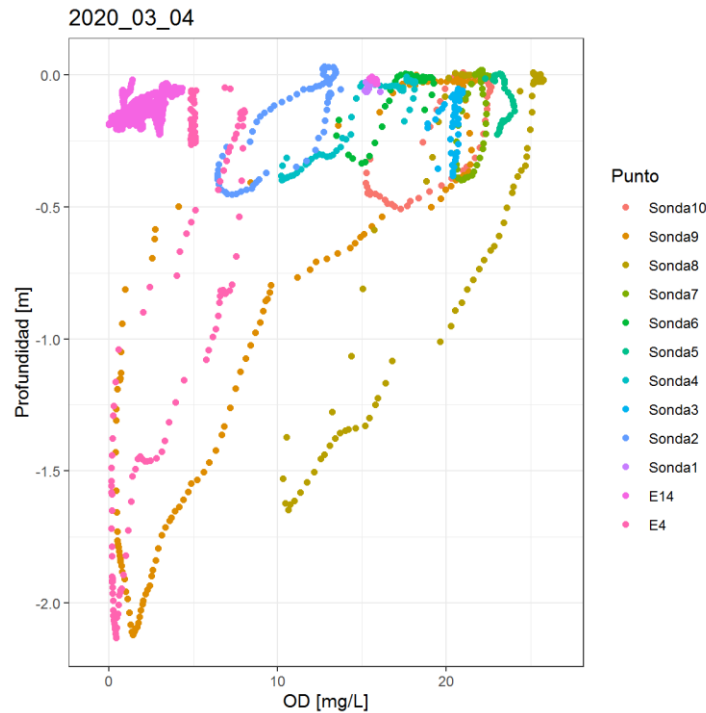
De los registros se evidenció que, debido a la poca profundidad, muchos de los puntos muestreados presentaron temperaturas constantes. Sin embargo, en varios puntos ubicados sobre los brazos del río Cesar o en el denominado canal oculto del río en la ciénaga, donde se presentó una mayor profundidad, se alcanzó a presentar variación en la temperatura entre la superficie y el fondo mayor a 2 °C. Un ejemplo de los datos obtenidos se puede ver en la Figura 8-3. Se debe resaltar que en algunos puntos donde se presentaba flujo de agua, como los puntos E16 y E18, la variable temperatura no cambió con la profundidad probablemente debido a la mezcla de agua que se da por el flujo.



**Figura 8-3. Distribución vertical de la temperatura para el día 4 de marzo de 2020 en los puntos muestreados en el complejo cenagoso Zapatosa**

### 8.6.3 Oxígeno Disuelto

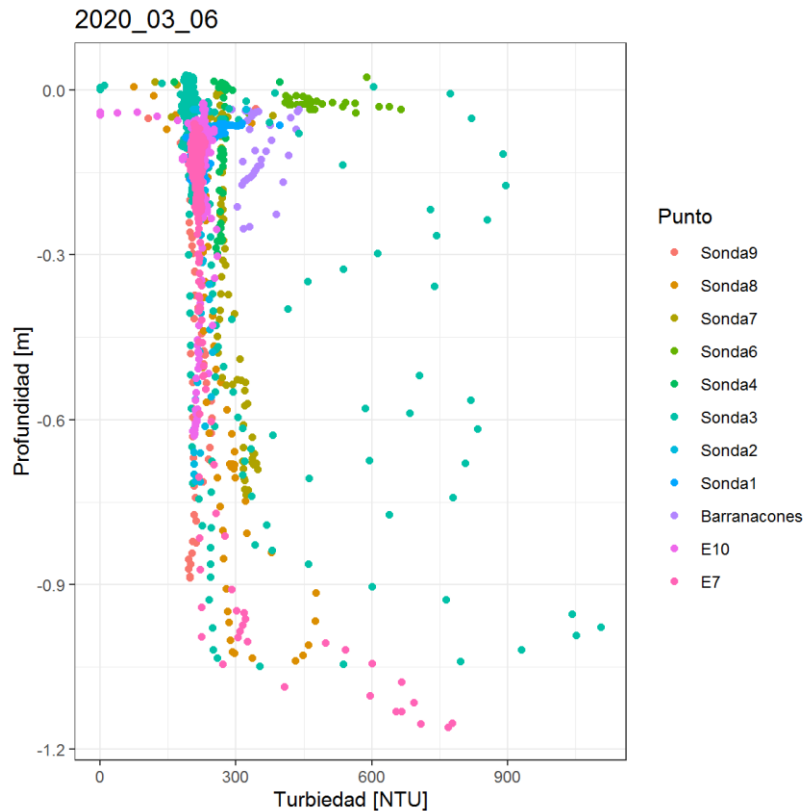
Para la tercera campaña, se encontró que la cantidad de oxígeno en algunos puntos de la ciénaga era bastante alto. Muchas de las mediciones realizadas con la sonda HL7, se corroboraron con el titulador de campo Aquamerck debido a que sorprendían los valores tan altos que se estaban presentando. También en dichos lugares se presentó una gran reducción de la variable con la profundidad que en los lugares poco profundos fue menor. Un ejemplo de estos comportamientos se puede ver en Figura 8-4.



**Figura 8-4. Oxígeno disuelto para el día 4 de marzo de 2020 en los puntos muestreados en el complejo cenagoso Zapatosa**

### 1.1.1 Turbiedad

Para la tercera campaña se registraron altos valores de turbiedad en gran parte del complejo cenagoso. Solamente se algunos puntos del sector candelaria se redujo la turbiedad registrada por la sonda a rangos menores a 100 NTU, en todos los otros sectores la turbiedad siempre se mantuvo en valores más altos que 100 NTU. Lo anterior supone un aumento con respecto a los valores registrados en la segunda campaña. Con respecto a la profundidad, no se registro un aumento o disminución considerable de la turbiedad, fenómeno que puede deberse a las pocas profundidades que se registraron en la ciénaga. En la Figura 8-5 se pueden ver dichos comportamientos y se puede ver que existen algunos registros muy elevados que se debieron a que con la sonda se alteró el fondo causando una mayor resuspensión de sedimentos y en consecuencia aumentando los valores registrados.



**Figura 8-5. Turbiedad del agua registrada el día 6 de marzo en los puntos muestreados en el complejo cenagoso Zapatosa**

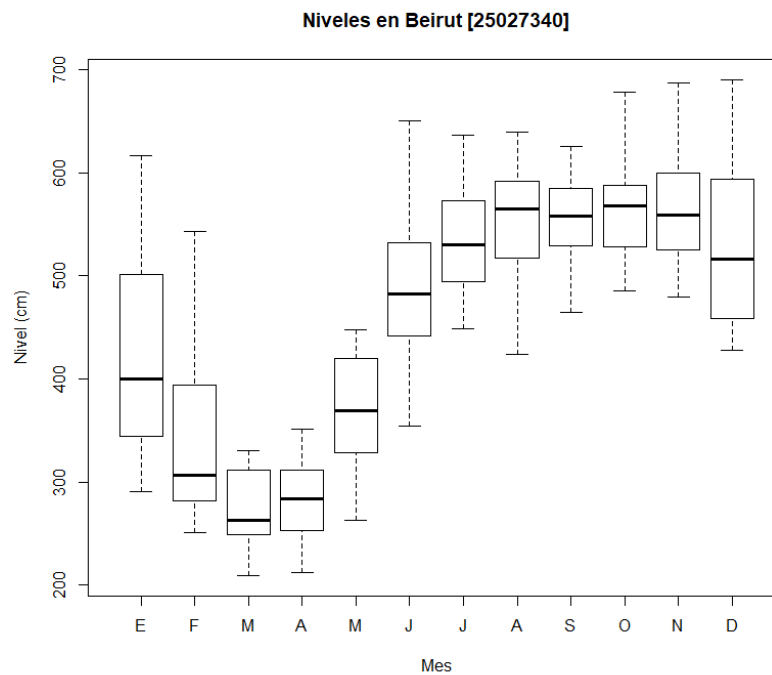
## 8.7 PRIMERA CAMPAÑA DE MUESTREO CIÉNAGA DE AYAPEL

Entre los días 7 al 13 de diciembre de 2019 se realizó trabajo de campo en la ciénaga de Ayapel, la finalidad de este trabajo estaba centrada en el levantamiento de información batimétrica relevante para la modelación de la ciénaga.

### 8.7.1 Plan de muestreo ciénaga de Ayapel

La primera campaña de muestro en la ciénaga de Ayapel tuvo como objetivo levantar información primaria relevante para la modelación hidrodinámica a desarrollar en el programa de modelamiento eco-hidrológico PMEH en la Ciénaga de Ayapel. Con enfoque en los parámetros físicos como son: batimetrías en sectores con deficiencia de información, caudales en las fronteras del dominio computacional contemplado para la modelación y parámetros de calidad del agua en sitios estratégicos, medidos con el kit de análisis Aquamerck y la sonda multiparamétrica HL7 (fronteras del dominio, puntos intermedios de la ciénaga y cuerpos de agua que descargan a la ciénaga).

Dado que se desarrollarán principalmente actividades de levantamiento batimétrico, las condiciones de niveles altos que se presentan en esta época (como se observa en la Figura 8-13) facilitan la navegación para el levantamiento batimétrico. La Figura 8-13 muestra el espejo de agua que presenta la ciénaga dos semanas antes del levantamiento propuesto (24 de noviembre), siendo las condiciones adecuadas para los levantamientos en las zonas propuestas.



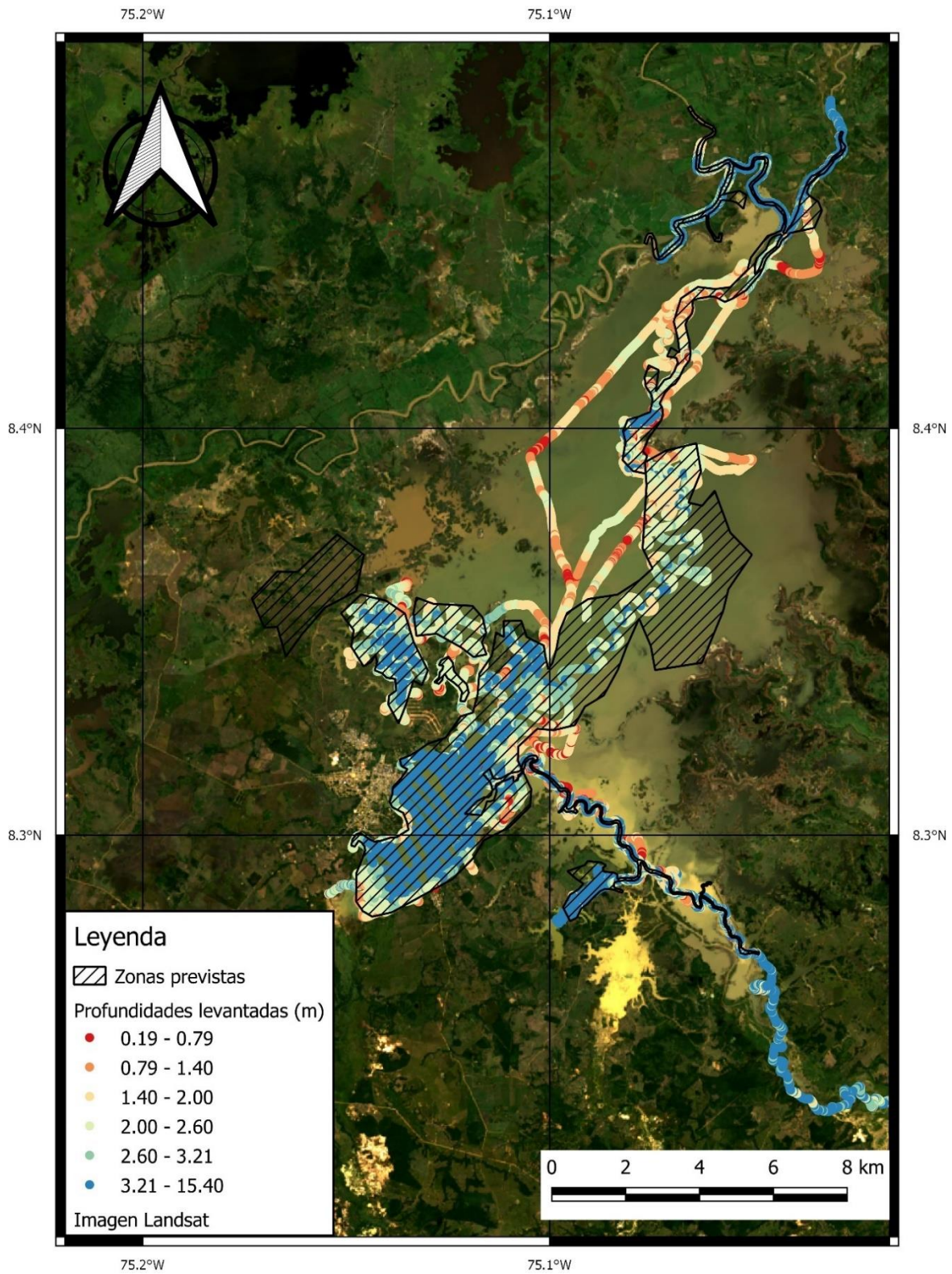
**Figura 8-13. Niveles mensuales multianuales registrados en la ciénaga de Ayapel.**

## 8.7.2 Resultados de la campaña de campo

### 8.7.2.1 Batimetrías levantadas

Se presenta el cubrimiento de las zonas levantadas, que incluyen un tramo adyacente del río San Jorge, el Caño Seheve, una sección del Caño Viloría, una sección del caño Barro y zonas que fueron estimadas previamente como las más profundas de la ciénaga de Ayapel.





**Figura 8-14. Batimetrías levantadas Ayapel**



### 8.7.2.2 Toma de parámetros físico-químicos con Aquamerck y sonda multiparamétrica HL7

A continuación, se presentan las coordenadas en las cuales fueron obtenidos parámetros fisicoquímicos.

**Tabla 8-5. Coordenadas determinaciones parámetros en Ayapel**

Nombre	Coordenadas
Calidad 1	8°14'15.9"N 75°00'38.0"W
Calidad 2	8°14'11.9"N 75°02'23.7"W
Calidad 3	8°16'52.9"N 75°05'39.8"W
Calidad 4	8°17'05.3"N 75°05'39.3"W
Calidad 5	8°22'19.5"N 75°05'20.7"W
Sonda 6	8°22'55.2"N 75°04'06.0"W
Sonda 7	8°19'32.1"N 75°06'46.3"W
Sonda 8	8°18'47.4"N 75°06'50.1"W
San Jorge 1	8°26'51.4"N 75°04'03.5"W
Seheve 1	8°27'52.0"N 75°02'47.7"W
Cecilia	8°27'48.7"N 75°01'57.2"W
Intersección Cecicila      Seheve	8°26'52.2"N 75°02'35.1"W

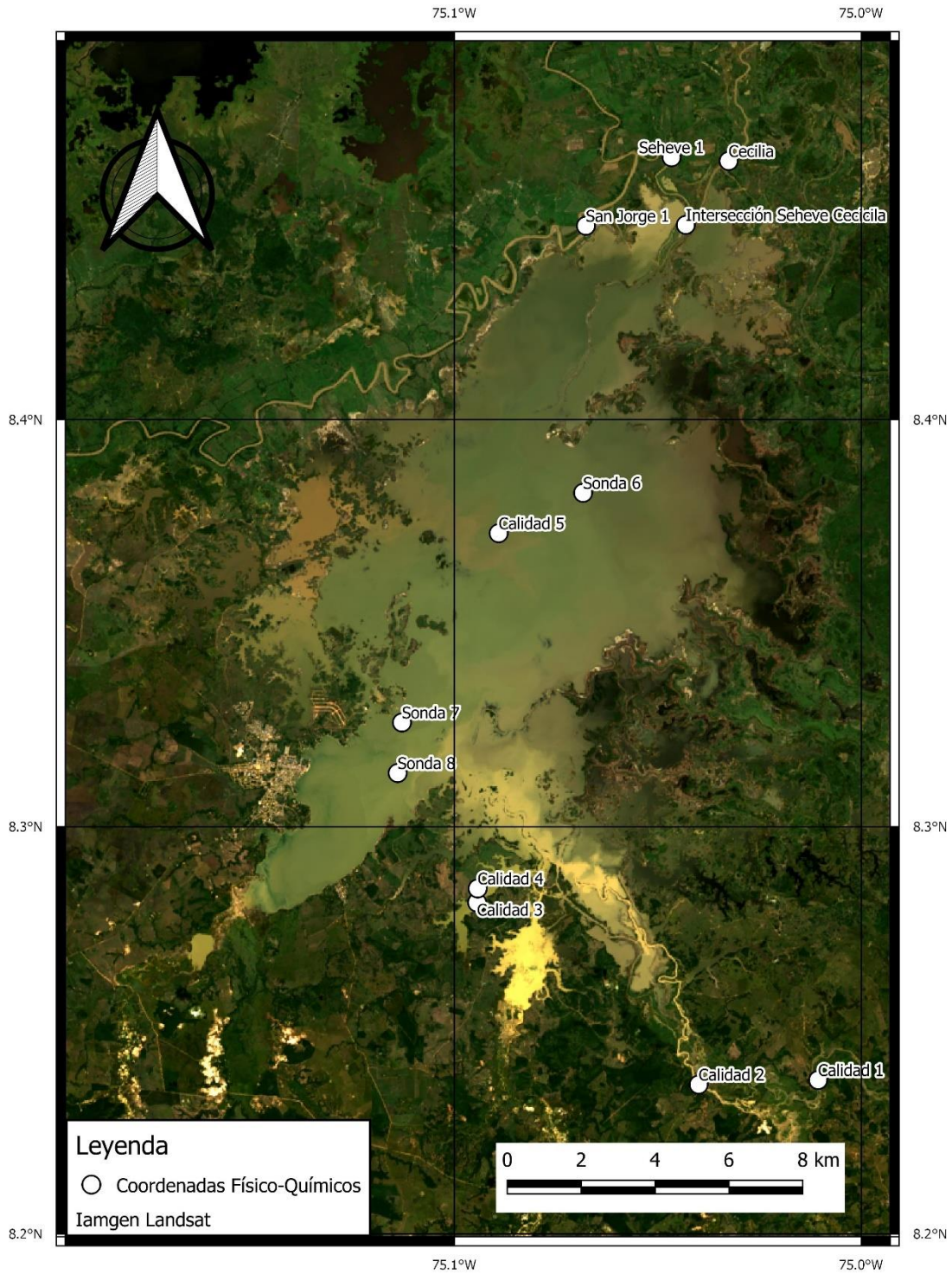


Figura 8-15. Puntos con determinaciones de parámetros fisicoquímicos

## 9. PASOS A SEGUIR PARA EL REFINAMIENTO DE MODELOS

Con base en los primeros resultados de los modelos piloto y la información colectada y procesada en la fase II se identifica acciones necesarias para refinar los modelos de tal forma que se llegue a una abstracción de la realidad más precisa.

1. El dominio computacional modelo piloto de la Ciénaga de Zapatosa fue limitado por la información topo-batimétrica disponible para la zona que no cubría todos los aspectos fisiográficos esenciales para reflejar el comportamiento de los ecosistemas en la ciénaga. Por lo anterior, como parte de la fase 3 de refinamiento de modelos se seleccionó el dominio computacional del modelo que respondiera a las características y necesidades del ecosistema en lugar de las restricciones de información y que además permitiera la implementación de condiciones de frontera adecuadas para la configuración del modelo numérico.
2. Se requiere la generación de nueva información que permita la extensión del dominio computacional al área idónea para la modelación adelantada. Para ello el análisis de imágenes multi-temporales derivadas de sensores remotos, permiten estimar la contracción y expansión del espejo de agua permite realizar una estimación de la configuración geométrica del sistema cenagoso, identificando cuerpos de agua permanentes, intermitentes conexiones entre estos y demás.
3. Se requiere depurar el DEM del modelo de la ciénaga de Ayapel empleando metodologías que permitan detallar aspectos hidrodinámicas de relevancia.
4. Las fronteras para las simulaciones de transporte de sedimento requieren ajustarse acorde con los resultados de las simulaciones hidrológicas.
5. El modelo hidrológico debe detallarse para cubrir aspectos de drenaje a la ciénaga de Zapatosa
6. Acorde con los resultados de las campañas del muestreo del PMEH ajustar los modelos pilotos

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Arellano, H., & Rangel-Ch, O. (2007). Modelo batimétrico semidetallado y detallado de la Ciénaga de Zaposa y sistemas aledaños. *Colombia. Diversidad Biótica XIII*, 355-374.
- Aristizabal, V. (2014). *Hidrología, batimetría Ciénaga de Zapatosa*.
- Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., Williams, J. R., Haney, E. B., & Neitsch, S. L. (2012). *SWAT input/output documentation*. Austin: Texas Water Resources Institute.
- Beck, H., Van Dijk, A., de Roo, A., Miralles, D., McVicar, T., Schellekens, J., & Bruijnzeel, L. (5 de 2016). Global-scale regionalization of hydrologic model parameters. *Water Resources Research*, 52(5), 3599-3622.
- Bodman, G. B., & Mahmud, A. J. (s.f.). *The use of moisture-equivalents in the tectural classification of soil*.
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1988). *Applied Hydrology*. Singapore: McGraw-Hill Book Co.
- CorpoCesar; Consorcio Guatapurí-Cesar. (2016). *FORMULACIÓN DEL POMCA DEL RÍO BAJO CESAR - CIÉNAGA DE ZAPATOSA*. Bucaramanga: CorpoCesar.
- D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, & T. L. Veith. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Díaz Henández, J. M. (2007). *Metodologías para la evaluación de la erosión hídrica en cuencas vertientes*. Popayan: Universidad del Cauca.
- Díaz-Granados, M., Camacho, L., & Maestre, A. (2001). Modelación de balances hídricos de ciénagas fluviales y costeras colombianas. *Revista de Ingeniería* 47.
- Dile, Y., & Srinivasan, R. (10 de 2014). Evaluation of CFSR climate data for hydrologic prediction in data-scarce watersheds: an application in the Blue Nile River Basin. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 50(5), 1226-1241.
- Environmental Systems Research Institute, Inc. (Esri). (2014). *ARC HYDRO TOOLS OVERVIEW*. Redlands, California: Environmental Systems Research Institute, Inc. (Esri) .
- Gupta, H., Kling, H., Yilmaz, K., & Martinez, G. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria : Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1-2), 80-91.
- IDEAM. (2010). *Sistemas morfogénicos del territorio colombiano*. Bogotá D.C.: IDEAM.





- IDEAM. (2013). *Zonificación hidrográfica de Colombia*. Bogotá: IDEAM.
- IDEAM. (2019). *Estudio Nacional del Agua 2018*. Bogotá: IDEAM.
- IDEAM y CorpoCesar. (2006). *APROVECHAMIENTO Y PROTECCION INTEGRAL DEL AGUA SUBTERRANEA EN LAS ECORREGIONES DE LOS VALLES DE LOS RIOS CESAR Y MAGDALENA DEPARTAMENTO DEL CESAR*. Bogotá.
- INFOCOL LTDA. (2016). *INFORME DE CALCULO DE OFERTA HÍDRICA* . Bogotá.
- Jaramillo Justinico, A., Rangel-Ch, O., Parra Sánchez, L., & Ruiz, D. A. (2007). La estratigrafía de los sedimentos de fondo de ciénagas del Caribe y el registro de los cambios de clima en los últimos 4.900 años. *Diversidad biótica XII*.
- Jaramillo, A., Rangel-Ch, O., Parra, L., & Ruiz, D. A. (2012). La estratigrafía de los sedimentos de fondo de ciénagas del Caribe y el registro de los cambios de clima en los último 4900 años. *Colombia. Diversidad Biótica XII: La región Caribe de Colombia*, 1-65.
- JAXA/METI. (2019). *ALOS PALSAR L1.5*. doi:10.5067/NXY378J3DFZQ
- Moreno, C. (2007). Análisis de de los sedimentos de la ciénaga de Zapatosa, Cesar. *Colombia. Diversidad Biótica XIII*, 1-17.
- Munsell Color. (s.f.). *Munsell Color Theory*. Recuperado el Diciembre de 2019, de <https://munsell.com/about-munsell-color/how-color-notation-works/>
- NOAA climate prediction center. (Abril de 2020). *Cold & Warm Episodes by Season*. Obtenido de [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)
- Post, D. F., Fimbres, A., Matthias, A. D., Sano, E. E., Accioly, L., Batchily, A. K., & Ferreira, L. G. (2000). Predicting Soil Albedo from Soil Color and Spectral Reflectance Data. *Journal of the Soil Science Society of America*, 1027-1034.
- Poveda, G., Waylen, P., & Pulwarty, R. (2006). Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 234(1), 3-27.
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.-L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., . . . Goldberg, M. (8 de 2010). The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(8), 1015-1058.
- Texas A&M University. (2020). *Global Weather Data for Swat*. Recuperado el Enero de 2020, de <https://globalweather.tamu.edu/>
- U.S. Geological Survey. (2016). *Landsat—Earth observation satellites*. Washington D.C.: U.S. Geological Survey Fact sheet. doi:10.3133/fs20153081





United States Department of Agriculture. (s.f.). *Estimating Moist Bulk Density by Texture*. Recuperado el Diciembre de 2019, de [https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/office/ssr10/tr/?cid=nrcs144p2\\_074844](https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/office/ssr10/tr/?cid=nrcs144p2_074844)

William, J. R., & Berndt, H. D. (1977). SEDIMENT YIELD PREDICTION BASED ON WATERSHED HYDROLOGY. *Transactions of the ASAE*, 1100-1104.

WMO. (2012). *Weather reporting: Volume A Observing stations*. Geneva, Switzerland.

Zhu, Z. W. (2015). Improvement and expansion of the Fmask algorithm: Cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4–7, 8, and Sentinel 2 images. *Remote Sensing of Environment* 159, 269-277.



## 7. ANEXO1

