



CONVENIO INTERADMINISTRATIVO No. 209 DE 2017 PRY-GEO-018-17

Estudio integral de la Ciénaga Grande de Santa Marta - Fase II (B): modelaciones hidráulica, hidrosedimentológica y biogeoquímica

**Anexo 3.1. Modelo de balance hídrico y modelo hidro-sedimentológico del
complejo cenagoso de la CGSM para condición actual y escenarios de
variabilidad climática.**



Santa Marta, Diciembre 7 de 2018

Convenio CORPAMAG-INVEMAR 209

CUERPO DIRECTIVO

Director

Francisco Armando Arias Isaza

Subdirector Coordinación de Investigaciones (SCI)

Jesús Antonio Garay Tinoco

Subdirectora de Recursos y Apoyo a la Investigación (SRA)

Sandra Rincón Cabal

Coordinadora Coordinación de Investigación e Información para la Gestión Marina y Costera (GEZ)

Paula Cristina Sierra Correa

Coordinador Programa Biodiversidad y Ecosistemas Marinos (BEM)

David Alonso Carvajal

Coordinador Programa Valoración y Aprovechamiento de Recursos Marinos Vivos (VAR)

Mario Rueda Hernández

Coordinadora Programa Calidad Ambiental Marina (CAM)

Luisa Fernanda Espinosa Díaz

Coordinadora Programa de Geociencias Marinas (GEO)

Constanza Ricaurte Villota

Coordinador Servicios Científicos (CSC)

Julián Mauricio Betancourt

Programa Geociencias Marinas y Costeras (GEO)

Constanza Ricaurte Villota

Martha Bastidas Salamanca

Contratistas GEO

Fabián Mauricio Caicedo Carrascal

Imagen de portada: Puente sobre el río Sevilla, aguas debajo de la estación hidrológica 2 de noviembre de 2018, Fuente: Fabián Caicedo



El INVEMAR, realiza investigación básica y aplicada de los recursos naturales renovables y del medio ambiente en los litorales y ecosistemas marinos y oceánicos de interés nacional con el fin de proporcionar el conocimiento científico necesario para la formulación de políticas, la toma de decisiones y la elaboración de planes y proyectos que conduzcan al desarrollo de éstas, dirigidos al manejo sostenible de los recursos, a la recuperación del medio ambiente marino y costero y al mejoramiento de la calidad de vida de los colombianos, mediante el empleo racional de la capacidad científica del instituto y su articulación con otras entidades públicas y privadas.

Calle 25 No. 2 -55 Playa Salguero – Rodadero, Santa Marta, Colombia. PBX: (57) (5) 4328600

Fax: (57) (5) 4380801, <http://www.invemar.org.co>

CLÁUSULA DERECHOS DE AUTOR

"De acuerdo con la Decisión Andina 351 de 1993, Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993 y demás normas modificatorias, complementarias y concordantes la presente propuesta de carácter científico goza de protección legal, siendo el INVEMAR el único titular de los derechos patrimoniales de autor, por lo que tiene el control sobre cualquier forma de utilización y ostenta la facultad exclusiva para autorizar o prohibir cualquier explotación que sobre la obra se realice, incluyendo la reproducción, comunicación, distribución pública, traducción, adaptación, arreglo o cualquiera otra forma de la obra. Por todo lo anterior para su utilización se requerirá autorización previa y expresa, no requerirá autorización para el ejercicio del derecho de cita en las reproducciones parciales para lo cual se deberá indicar expresamente la fuente y la autoría de INVEMAR"

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	7
2. METODOLOGÍA.....	8
3. RESULTADOS	14
3.1 MODELO DE BALANCE HÍDRICO	14
3.2 ANÁLISIS DE VARIABILIDAD CLIMÁTICA.....	48
3.3 MODELO SEDIMENTOLÓGICO	53
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	60
5. BIBLIOGRAFÍA.....	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Zonificación climática y conceptual de la CGSM, (UNIANDES-CETIH, 1978) .	8
Figura 2 Topología complejo lagunar de la CGSM, Fuente: (Deeb, 1993).....	10
Figura 3 Modelo conceptual hidrológico de la CGSM	11
Figura 4 Diagramas topológicos de los sistemas de entradas a la CGSM por escorrentía	15
Figura 5 Caudales concesionados por CORPAMAG, Fuente: CORPAMAG, 2016.....	16
Figura 6 Caracterización hidrológica del río Frío Est. Río Frío	17
Figura 7 Caracterización hidrológica de la quebrada Orihueca (Est. Santa Rosalía)..	17
Figura 8 Caracterización hidrológica del río Sevilla (Est. Canal Florida).....	18
Figura 9 Caracterización hidrológica del río Tucurínca (Est. El Trébol)	19
Figura 10 Caracterización hidrológica del río Aracataca (Est. Puente Ferrocarril).....	19
Figura 11 Caracterización hidrológica del río Fundación (Est. Fundación)	20
Figura 12 Series caracterizadas para los ríos Fundación, Aracataca y Sevilla	21
Figura 13 Curvas de gastos ríos Fundación, Aracataca y Sevilla, antes de su ingreso a la CGSM	22
Figura 14 Series de caudales en ríos Fundación, Aracataca y Sevilla (Hda. Palmira), antes de su ingreso a la CGSM.....	24
Figura 15 Oferta hídrica mensual ríos Fundación, Aracataca y Sevilla	25
Figura 16 Aportes promedios mensuales ríos Fundación, Aracataca y Sevilla a la CGSM	27
Figura 17 Condición de frontera modelo hidrodinámico a la altura de Calamar.....	28
Figura 18 Serie hidrológica de entrada al modelo hidrodinámico por el río Magdalena	28
Figura 19 Polígonos de Thiessen y localización de las estaciones de precipitación ...	31
Figura 20 Precipitación media multianual en la Eco región Ramsar de la CGSM.....	32
Figura 21 Precipitación media mensual multianual en la CGSM	32
Figura 22 Serie de precipitación diaria de entrada al modelo de balance hídrico condición actual	33

Figura 23 Curvas de gastos caños Aguas negras y Clarín Nuevo, aforos caño Renegado	35
Figura 24 Series de caudales en caños Clarín y Aguas Negras, niveles caño Renegado	36
Figura 25 Volumen de agua neto por Caño Grande y Clarín Nuevo que ingresan al modelo de balance hídrico	37
Figura 26 Estaciones climáticas con registros de evaporación de tanque	39
Figura 27 Cálculo de evaporación en reservorio con información de la estación Apto. Simón Bolívar	40
Figura 28 Cálculo de evaporación por Reservorio Est. Apto. E. Cortissoz y Tanque Est. Normal Manatí	41
Figura 29 Serie de evaporación diaria de salida al modelo de balance hídrico	41
Figura 30 Características del acuífero Ciénaga – Fundación, Fuente: Invemar-2017	42
Figura 31 Descripción litológica de Núcleos N° 2, 6, 10, 11, 23 de sedimentos en la CGSM, Fuente: Invemar-2015	43
Figura 32 Volumen de agua de intercambio entre la CGSM y el mar Caribe	44
Figura 33 Resultados balance hídrico de la CGSM para su condición actual	45
Figura 34 Gráfica de dispersión modelos de balance hídrico e hidráulico	45
Figura 35 Balance hídrico CGSM, períodos de déficit y excesos condición actual	46
Figura 36 Distribución espacial del volumen de agua en (Mm³) para la condición actual de la CGSM	47
Figura 37 Curva cota – volumen de la CGSM	48
Figura 38 Curva de diferencia integrales y anomalías de caudales medios en la estación Calamar (29037020)	51
Figura 39 Curva y ecuación de calibración del río Magdalena en Calamar, Fuente: (Restrepo Angel, 2005)	53
Figura 40 Serie histórica de transporte diario de sedimentos en suspensión río Magdalena	54
Figura 41 Topología modelo sedimentológico del complejo lagunar CGSM	55
Figura 42 Topología del modelo conceptual sedimentológico	57

Figura 43 Imagen PlanetScope Scene (3m) de la CGSM para el día 16 de junio de 2018	58
Figura 44 Plataforma FEWS Colombia del IDEAM para consultas de series de tiempo en línea	59

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Consumos de agua en la zona agrícola para la condición actual del estudio.	25
Tabla 2 Listado de estaciones con disponibilidad de datos diarios de precipitación	29
Tabla 3 Porcentajes de datos faltantes a nivel mensual variable precipitación	30
Tabla 4 Distribución temporal de datos faltantes de precipitación	31
Tabla 5 Listado de estaciones con disponibilidad de datos diarios de evaporación	37
Tabla 6 Balance hídrico agregado de la CGSM condición actual	47
Tabla 7 Índices Océano Atmosféricos	51
Tabla 7 Transporte potencial de sedimentos en suspensión anual por los caños Renegado, Aguas Negras y Clarín Nuevo	55
Tabla 8 Transporte de sedimentos en suspensión anual de los ríos de la SNSM	56

1. Introducción

En el marco de la OS-012-18 cuyo objeto es: Elaborar un modelo de balance hídrico y un modelo hidrosedimentológico del complejo cenagoso de la CGSM para condición actual y escenarios de variabilidad climática, se ha preparado el segundo informe de avance en el que se presenta la recopilación y análisis de la información hidrológica y sedimentológica que hará parte de las entradas al modelo numérico integral de balance hídrico y sedimentológico de la CGSM acoplado con el modelo hidráulico que se soporta en el levantamiento topobatimétrico de la Ecorregión Ramsar.

La modelación de la condición actual de la CGSM está contemplada para el periodo agosto 2017 / agosto 2018, tiempo en el que se han obtenido mediciones diarias de niveles en los diversos caños y ríos que confluyen al sistema cenagoso y en el cuerpo de agua mismo (Est. Aguas vivas, Boca de La Barra y Nueva Venecia), siguiendo el protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua propuesto por IDEAM bajo recomendaciones y estandarizaciones de la OMM (IDEAM, 2004), realizando dos lecturas de niveles, una a las 6 a.m. y otra a las 6 p.m. Adicionalmente, se han realizado campañas de aforos líquidos que permitirán la obtención de las curvas de gastos de cada sección o estación hidrométrica. En promedio a la fecha se tienen 10 aforos por estación, aunque la OMM indica que se deben realizar alrededor de 20 aforos para definir una curva H-Q (nivel – caudal) en estaciones nuevas y mínimo 10 aforos anuales para estaciones en proceso de calibración, en este informe se presenta una primera aproximación de las curvas de gastos para los ríos Fundación, Aracataca y Sevilla en su parte baja. Así como para los caños Clarín Nuevo y Aguas Negras por el costado occidental de la CGSM.

Los escenarios de variabilidad climática se caracterizan mediante el análisis de anomalías y determinación de fases de humedad en las estaciones estudiadas, estas fases se identifican mediante el desarrollo de curva de diferencias integrales (CDI), de esta manera se pueden identificar los periodos extremos en el que el ecosistema ha estado amenazado. Posteriormente se asocia la anomalía, las diferencias integrales y la precipitación con los diversos índices océano atmosféricos (IOA) con el ánimo de determinar correspondencia entre eventos extremos, tipo ENSO.

La caracterización conceptual de los sedimentos en suspensión que potencialmente se depositarían por el costado occidental de la CGSM en particular los provenientes del río Magdalena, se realizó teniendo en cuenta el desarrollo propuesto por (Restrepo Angel, 2005). En el capítulo 7 de su investigación se presenta el estudio de la variabilidad temporal en el transporte de sedimentos en suspensión del río Magdalena a la altura de la estación Calamar (Cód. 29037020), la relación numérica que propone es a partir de la ecuación potencial clásica o curva de calibración que relaciona la concentración de sedimentos (C_s = masa de sedimentos / volumen de agua) y la carga – caudal (Q = volumen de agua / tiempo). Con esta ecuación y conociendo el caudal registrado en la estación, se pudo cuantificar la carga de sedimentos que transporta el río Magdalena en su tramo final, para los diversos escenarios identificados.

En relación con el costado oriental de la CGSM, en particular los aportes de sedimentos de los ríos Fundación, Aracataca y Sevilla, la carga de material en suspensión fue calculada a

partir de los datos de transporte ($T_s = \text{masa de sedimento} / \text{tiempo}$) que el IDEAM tiene monitoreado en las estaciones hidrológicas existentes.

Finalmente, la dinámica morfológica de las bocas de los ríos se interpreta con fotografías aéreas e imágenes PlanetScope y Rapideye, disponibles para visualización en la plataforma <https://www.planet.com/>.

2. Metodología

La Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) es la laguna costera más grande de Colombia, con una extensión aproximada de 430 km² y una profundidad entre 1 y 2 m (Díaz-Granados O., Alejandro Camacho, & Maestre, 2001). Su conexión con el mar se realiza por un único punto conocido como Boca de la barra, puente sobre la vía que comunica los municipios de Ciénaga (Magdalena) con Barranquilla (Atlántico), y la conexión con el complejo lagunar de Pajarales mediante el caño Grande, presentando permanente intercambio de agua entre estos cuerpos como consecuencia de la oscilación periódica del nivel del mar, causada por las mareas y por los excesos o déficits de agua en las ciénagas del complejo.

La CGSM ha sido objeto de numerosos estudios por parte de universidades, entes gubernamentales y no gubernamentales, ONG, empresa privada, etc., uno de los estudios de mayor trascendencia fue el realizado por la Universidad de los Andes (CETIH)-1978, DIAGNÓSTICO SOBRE EL COMPORTAMIENTO HÍDRICO DE LA CGSM, en este se presenta una zonificación climática y conceptual del complejo lagunar y su área de influencia (**Figura 1**), estructurando un modelo conceptual de balance hídrico por tanques o volúmenes de control para cinco zona.

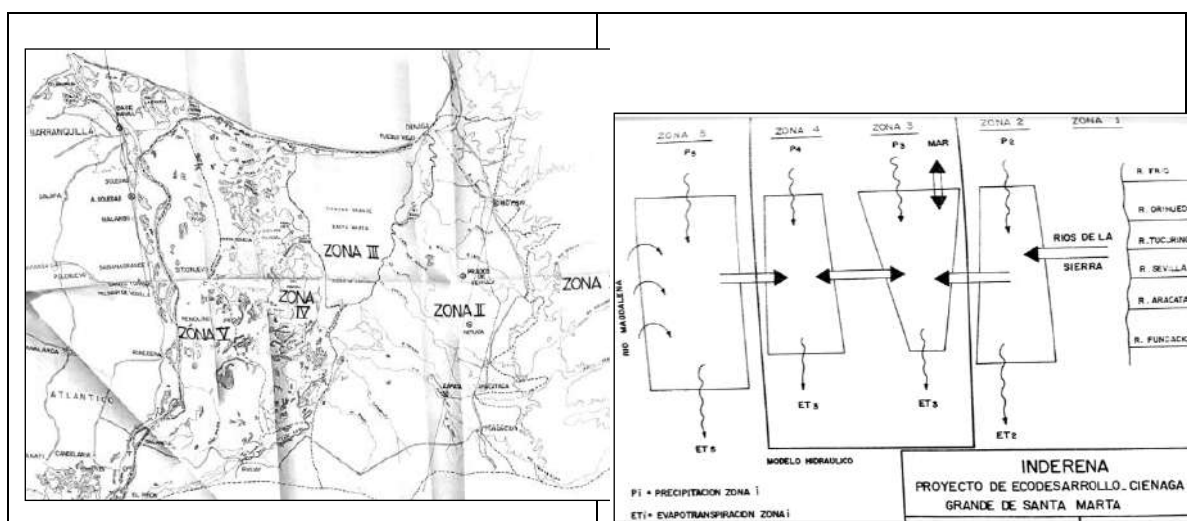


Figura 1 Zonificación climática y conceptual de la CGSM, (UNIANDES-CETIH, 1978)

Las zonas se describen de la siguiente manera:

- Zona I: Ríos de la Sierra (Fundación, Aracataca, Sevilla, Tucurínca, Orihueco* y Frío)-
*El nombre está errado, debe ser río Orihueca.
- Zona II: Zona agrícola
- Zona III: Espejo de agua CGSM
- Zona IV: Sistemas de ciénagas internas
- Zona V: Aporte del río Magdalena

Esta estructura ofrece una línea muy bien conceptuada de los aportes e intercambios para la realización del balance hídrico del complejo lagunar.

Otra conceptualización del sistema topológico de la CGSM es la propuesta por (Deeb, 1993), PLAN DE RECUPERACIÓN DEL COMPLEJO LAGUNAR DE LA CGSM. La propuesta está planteada en un desarrollo más detallado de intercambios inter-lagunares con la ciénaga Grande. En la **Figura 2** se pueden identificar los caños más representativos de ingreso de agua dulce del río Magdalena a las ciénagas internas del complejo lagunar y su aporte a la CGSM. Entre estos están de sur a norte: caño Renegado, El Salado, Aguas Negras, canal La Ceja, canal del Clarín.

En la actualidad son muchos los caños y canales, así como pequeñas ciénagas que han perdido su capacidad hidráulica y por ende la conexión con todo el complejo cenagoso, los caños El Salado, canal La Ceja – (El Burro), están siendo objeto de dragado y rectificación de su sección hidráulica. Caños como Bristol, Covado, Tambor y Auyama son proyectos que está desarrollando CORPAMAG para futuros dragados con el ánimo de llevar agua dulce a ciénagas y recuperar la conectividad del complejo y por ende la de los Manglares.

Dado este panorama, los volúmenes de agua ($Mm^3/año$) presentados en el documento de (Deeb, 1993), deben actualizarse a las condiciones reales de conectividad y condición hidroclimática resiente. Cabe mencionar que en el diagrama topológico de la **Figura 2**, no se cuantificó el aporte de los ríos que drenan de la Sierra Nevada de Santa Marta luego de su paso por la zona de producción agrícola y tampoco los valores climáticos de precipitación y evaporación del cuerpo de agua principal.

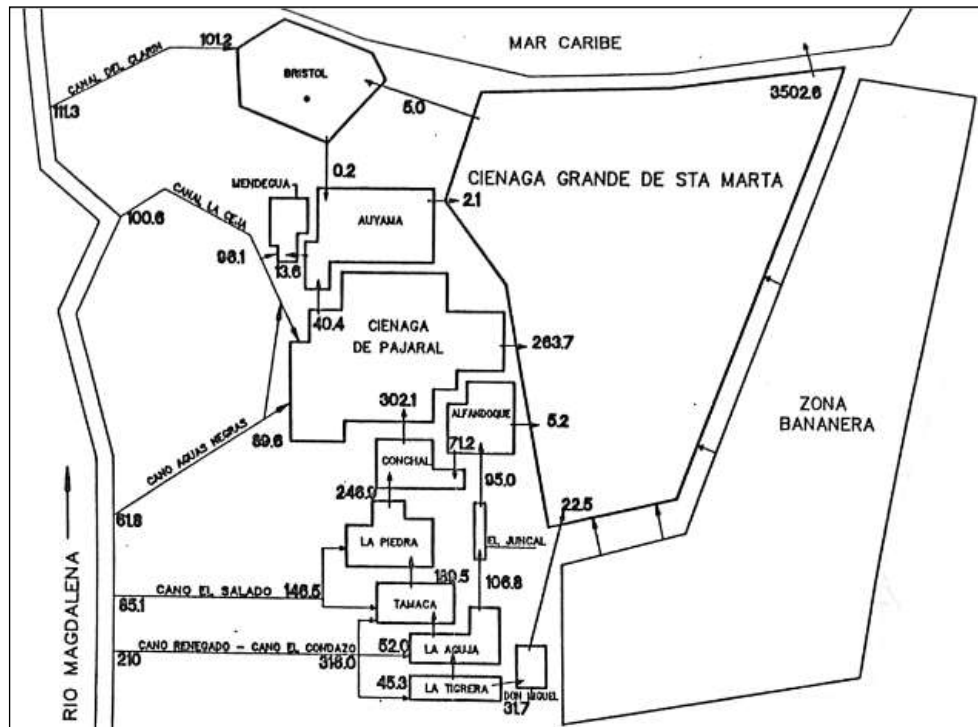


Figura 2 Topología complejo lagunar de la CGSM, Fuente: (Deeb, 1993)

Los límites de la CGSM se describen así: por el norte, el límite de la ciénaga es la Troncal del Caribe que separa al Vía Parque Isla de Salamanca (VIPIS) y el mar Caribe de la CGSM. Por el oriente, está constituida por la vertiente occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta, cuyos ríos aportan agua a la ciénaga luego de atravesar la zona de producción agrícola donde es notorio el uso consuntivo de agua por las actividades productivas. El límite sur, está definido por la divisoria natural de agua entre la vertiente de la ciénaga de Sapayán y el complejo lagunar de la ciénaga Grande. El río Magdalena es el límite occidental de la cuenca. Entre el río Magdalena y la CGSM se encuentra el complejo de ciénagas de Pajara, integrado por numerosos cuerpos de agua entre los cuales se pueden mencionar las ciénagas de La Piedra, Alfandoque, Pajarales, Auyama y Conchal, conectadas mediante caños y canales de poca profundidad y reducida sección hidráulica. Entre este conjunto de ciénagas y el río Magdalena se encuentra una planicie de inundación, formada por el mismo río al desplazarse de oriente a occidente. En esta zona se ubican varias poblaciones y en los últimos años ha experimentado un rápido proceso de incorporación a la producción agropecuaria mediante la construcción de diques de protección contra inundaciones. Estos diques actualmente representan una barrera casi continua de más de 50 km que impiden los desbordamientos naturales del río Magdalena, dejando solo pasar volúmenes reducidos a través de algunas bocas controladas con compuertas (caño Renegado y Aguas Negras).

Finalmente, el modelo conceptual que se propuso para determinar el balance hídrico en la CGSM para su condición actual es el que se presenta en la **Figura 3**.

La topología descrita contempla las siguientes consideraciones, toda vez que la conectividad y los valores que se obtengan como intercambio de agua en términos de volumen anual, depende del modelo topobatimétrico ensamblado por INVEMAR durante el periodo 2015-2017.

- Se agrupan dos complejos de ciénagas debido a su cercanía y en algunos casos intercambios someros de agua por su poca profundidad.
 - Complejo de pajaral: ciénaga de Pajarales, Conchal, Tigre, Piedra, Cherle, La Luna, Mendegua norte y Auyama.
 - Complejo sur: ciénaga La Tigrera, Don Miguel y Aguja.
 - Ciénaga de Juncal y Alfandoque.
- Los caños el Burro y el Salado, se presentan en la topología como futuras entradas al modelo de balance, en la actualidad su adecuación está en proceso y no se han aperturado sus bocas desde el río Magdalena.
- Por el costado nor – occidental de la CGSM, se presentan en la topología los caños Bristol, Covado y Canaleta del Tambor en proceso de dragado, su principal aporte

sería el agua que se deriva del río Magdalena por el caño Clarín Nuevo, este último también está en adecuación.

- Dos importantes caños que están en proceso de apertura y que entrarían en la dinámica de flujos del cuerpo principal de la CGSM, son la Auyama y Pajarales. En la actualidad la única conexión entre la CGSM y el complejo de Pajarales es caño Grande, sin exceptuar los interflujos que se presentan por las coberturas de manglar.
- Por último, los aportes e intercambios contemplados en la topología hacen referencia a los ríos Fundación, Aracataca, Sevilla, caño Renegado, caño Aguas Negras, caño Clarín Nuevo, caño Grande y Boca de La Barra.

La base física del balance hídrico es la formulación de las ecuaciones de conservación de masa para volúmenes de control o unidades hidrográficas determinadas (Luengas C., 1989) ver Ecuación 1. Para este ejercicio la variable de mayor incertidumbre es la interacción Mar – Ciénaga en el volumen de control establecido. De acuerdo con (Chow, Maidmente, & Mays, 1994) , la conservación de masa es el principio físico más útil en un análisis hidrológico.

$$I_{(t)} - O_{(t)} = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad \text{Ecuación 1}$$

Ecuación de continuidad integral para el flujo no permanente de densidad constante, el almacenamiento neto en determinado instante de tiempo ΔS es igual al flujo de entrada $I_{(t)}$ menos el flujo de salida $O_{(t)}$.

Para el cuerpo de agua principal de la ciénaga seleccionado como volumen de control para el balance, se presentan las siguientes condiciones:

Entradas $I_{(t)}$

- Precipitación área propia de la ciénaga principal
- Escorrentía superficial cuencas SNSM (Sierra Nevada de Santa Marta)
- Agua de mar por pleamar - mar Caribe
- Aportes del río Magdalena – Caños Renegado, Aguas Negras y Clarín Nuevo
- Aporte agua subterránea - acuífero

Salidas $O_{(t)}$

- Evaporación cuerpo de agua ciénaga principal
- Agua de ciénaga por bajamar al mar caribe
- Salida agua subterránea – acuífero

Almacenamiento ΔS

- Almacenamiento en ciénaga a resolución diaria

$$P_{ciénaga} + Esc(SNSM) + Caños(R_{Mag}) + Pleamar - Bajamar - Ev + / - Acuífero = \Delta S + / - \varepsilon$$

Ecuación 2

Consideraciones:

- La información correspondiente a las entradas y salidas por Boca de La Barra, caño Clarín Nuevo y Caño Grande, se consideran del modelo Hidrodinámico de la CGSM a resolución horaria.
- La información de pleamar y bajamar que representa las mareas mixtas semidiurnas como condición de frontera, fue obtenida a resolución horaria del modelo hidrodinámico, luego se agregó a nivel diario en términos de volumen de agua con el ánimo de identificar lo que entra y sale por Boca de la Barra de la CGSM.
- Los cambios en el almacenamiento del modelo hidrodinámico calibrado para la condición actual, se igualan al cambio en el almacenamiento del modelo de balance hídrico (Ecuación 2), con el fin de validar dicho procedimiento y determinar la sensibilidad de los parámetros del modelo de balance.
- Los aportes del acuífero se consideran nulos en ambos modelos, dada la morfología del lecho o fondo de la CGSM (más adelante se documenta esta hipótesis).
- La demanda multisectorial de la zona agrícola localizada en el costado oriental de la CGSM se obtuvo de las concesiones de agua que CORPAMAG ha otorgado desde el año 2014. La oferta neta que los ríos Fundación, Aracataca y Sevilla aportan a la CGSM, para los años categorizados como extremos y normal, se obtuvo de restar el caudal concesionado al caudal registrado en las estaciones hidrológicas del IDEAM.
- Todas las series contempladas en el análisis están expresadas en volumen diario, con magnitud de millones de metros cúbicos (Mm³).
- Dado que los componentes del balance están sujetos a errores de medida o estimación, y puede que el balance no cierre, se incluye un término residual o de diferencia (ε).
- Las bases de datos pueden consultarse en el **Anexo 1. Información Hidroclimática**

3. Resultados

3.1 Modelo de balance hídrico

Entradas ríos Sierra Nevada de Santa Marta al modelo de balance hídrico integrado

A continuación, se presentan las entradas consideradas como escurrimiento al volumen de control propuesto. Se asocian 3 grandes aportantes, río Fundación, río Aracataca y río Sevilla, estos a su vez cuentan con otros afluentes que tienen estaciones hidrológicas con series históricas de caudales, por lo anterior, no es necesario realizar procesos de simulaciones hidrológicas, adicionalmente la interacción de estos sistemas con las zonas agrícolas hace de estas estimaciones algo muy complejo. Por esta razón el proyecto contempló la instalación de estaciones hidrológicas (miras con observador) después del paso de estos ríos por la frontera agrícola. No obstante, para la estimación de los balances de escenarios extremos en los que no se tiene información aguas abajo de estos ríos, se propuso lo siguiente:

La propuesta desarrollada fue la caracterización de las corrientes hasta las estaciones de monitoreo hidrológico del IDEAM, sumando la oferta diaria de acuerdo a la zonificación de cada sistema. En la **Figura 4** se presentan los diagramas topológicos correspondientes a cada sistema hídrico priorizado como entrada.

- El río Sevilla como afluente principal es monitoreado en la estación Canal Florida (29067050), confluyen dos afluentes, el río Orihueca con monitoreo en la estación Santa Rosalía (29067040) y el río Frío con monitoreo en la estación río Frío (29067070). La oferta hídrica del río Sevilla como entrada a la CGSM es la sumatoria de los registros de las estaciones citadas, antes de su ingreso a la zona agrícola.
- El río Aracataca es monitoreado en la estación Puente Ferrocarril (29067130), confluye el río Tucurín con monitoreo en la estación El trébol (29067010). La oferta hídrica del río Aracataca como entrada a la CGSM es la sumatoria de los registros de las estaciones citadas, antes de su ingreso a la zona agrícola.
- El río Fundación presenta dos puntos de monitoreo sin ningún afluente importante, las estaciones de referencia son Hda. Puerto Rico (29067060) y Fundación Aut. (29067120). La oferta hídrica del río Fundación como entrada a la CGSM es la serie hidrológica de la estación Fundación Aut., antes de su ingreso a la zona agrícola.

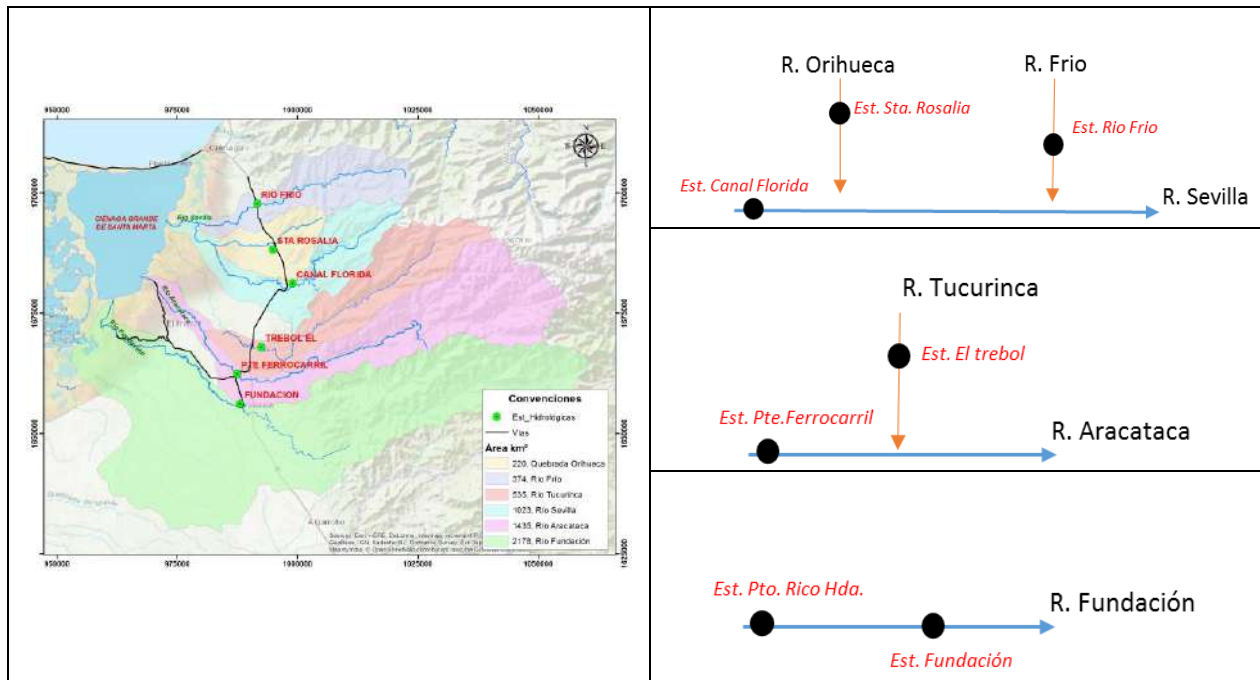


Figura 4 Diagramas topológicos de los sistemas de entradas a la CGSM por escorrentía

La estimación de la demanda en la zona agrícola, se realizó con datos oficiales de concesiones otorgadas por CORPAMAG; de esta manera los aportes de dichos ríos a la CGSM, estará limitado por dichas extracciones para los periodos en los que no se cuente con información después de la zona agrícola. En la **Figura 5** se presentan puntos de concesiones de aguas superficiales para la zona agrícola y poblacional, el caudal concesionado se suma por sistema hídrico y se cuantifica su valor en litros por segundo.

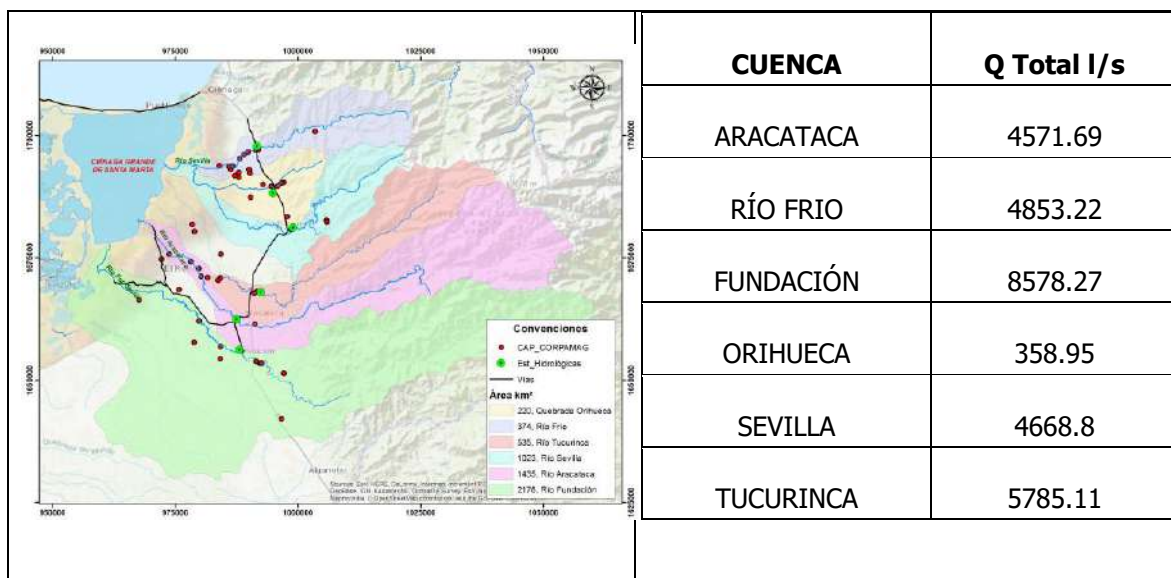
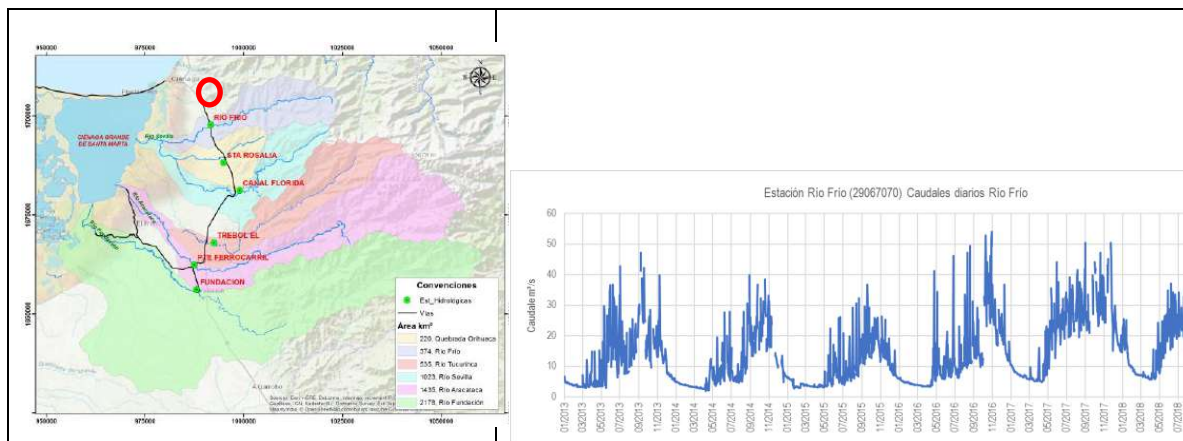


Figura 5 Caudales concesionados por CORPAMAG, Fuente: CORPAMAG, 2016

La sumatoria del caudal concesionado para el sistema productivo y poblacional, por lo menos hasta el año 2016 para las cuencas priorizadas es:

- Río Sevilla: 9880.97 l/s.
- Río Aracataca: 10356.8 l/s
- Río Fundación: 8578.27 l/s

De acuerdo con la tesis planteada, se hace necesario conocer la oferta hidrológica de cada sistema y plantear una extracción de agua por demanda antes de su ingreso a la CGSM, por lo anterior se diseñaron las plantillas que a continuación se presentan por cada sistema hídrico (ver **Figura 6** a la **Figura 11**), se destaca la información diaria de los últimos 5 años de mediciones (2013/2018) y se presenta el gráfico de barras del caudal mensual multianual histórico.



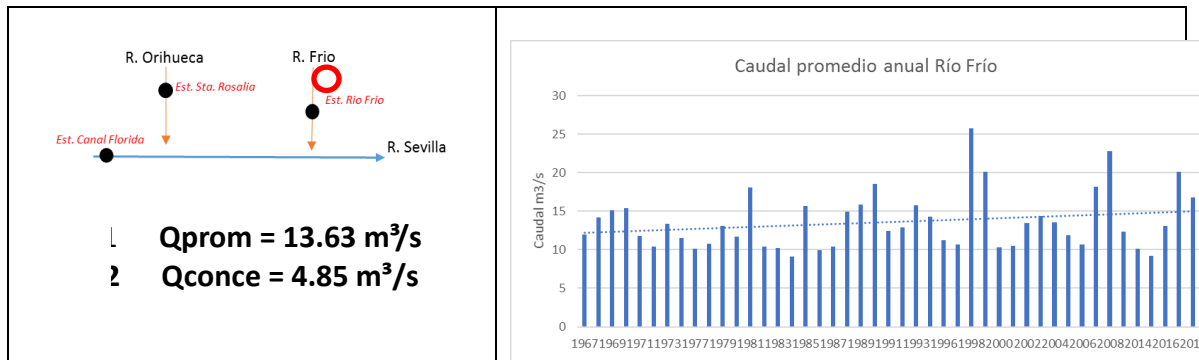


Figura 6 Caracterización hidrológica del río Frío Est. Río Frío

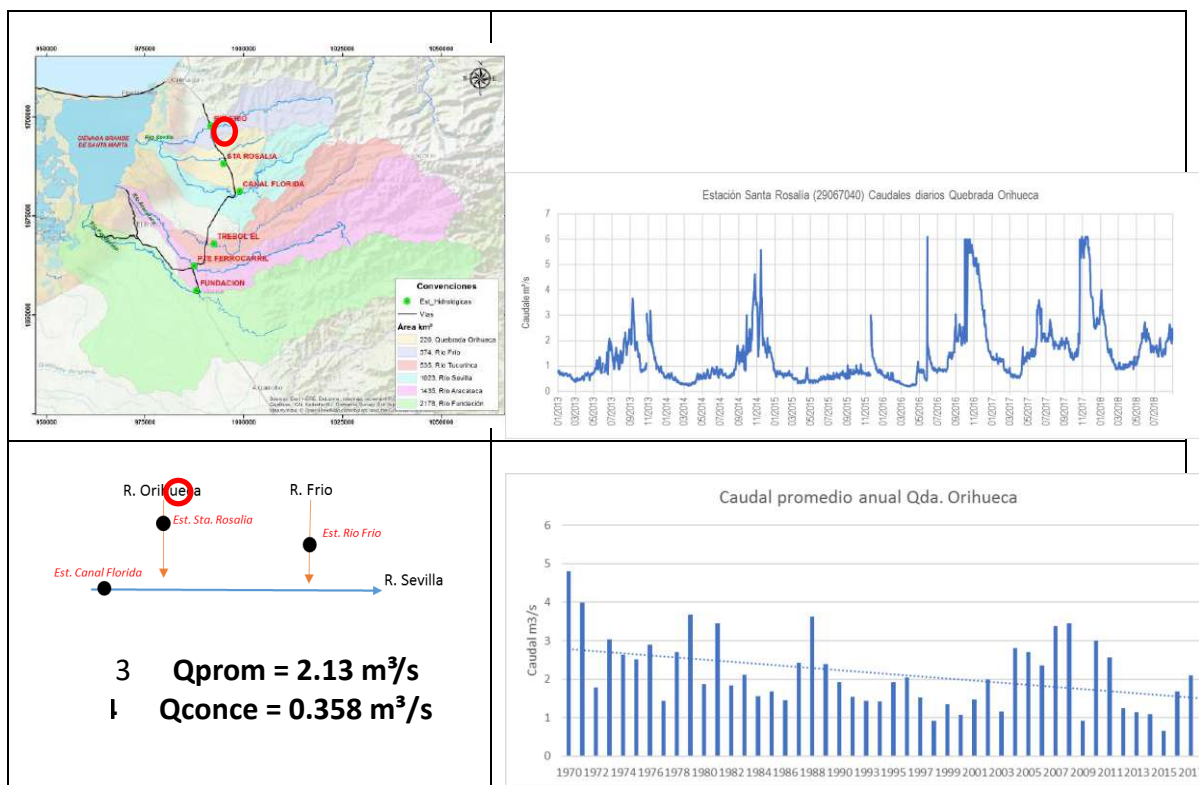


Figura 7 Caracterización hidrológica de la quebrada Orihueca (Est. Santa Rosalia)

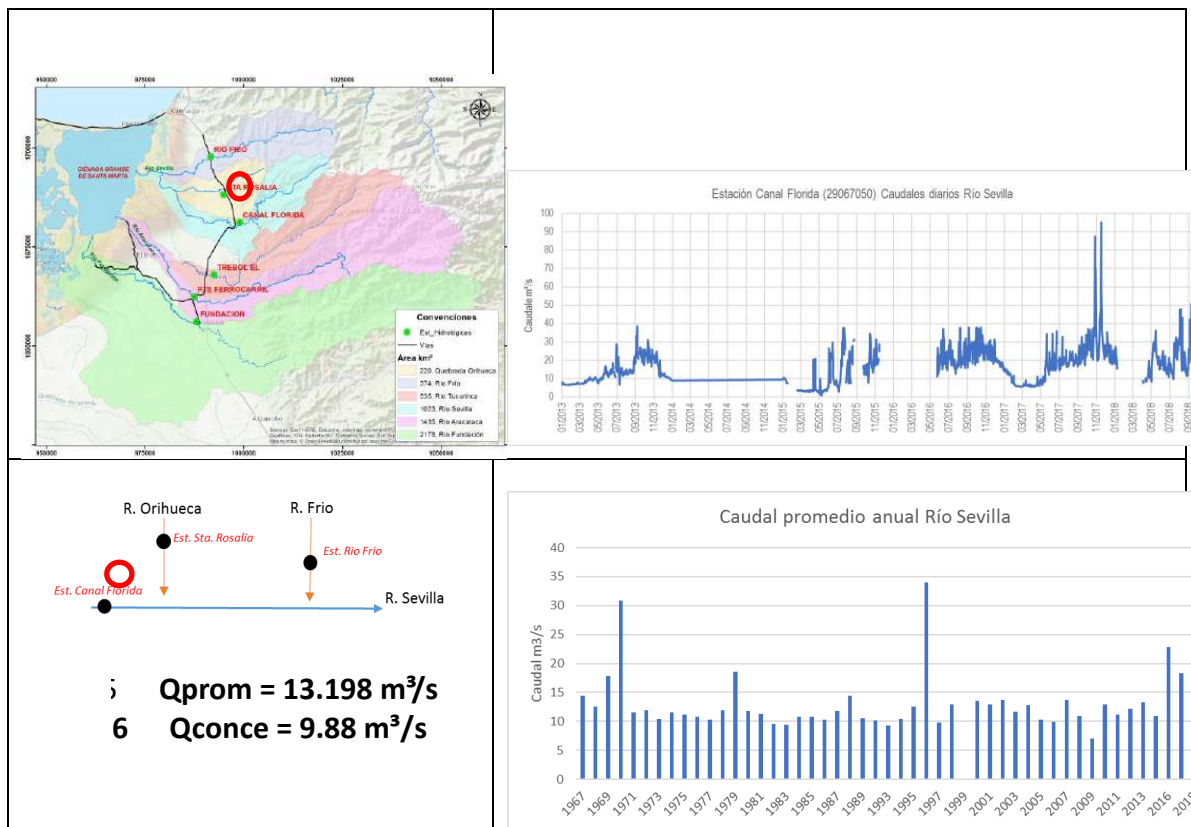
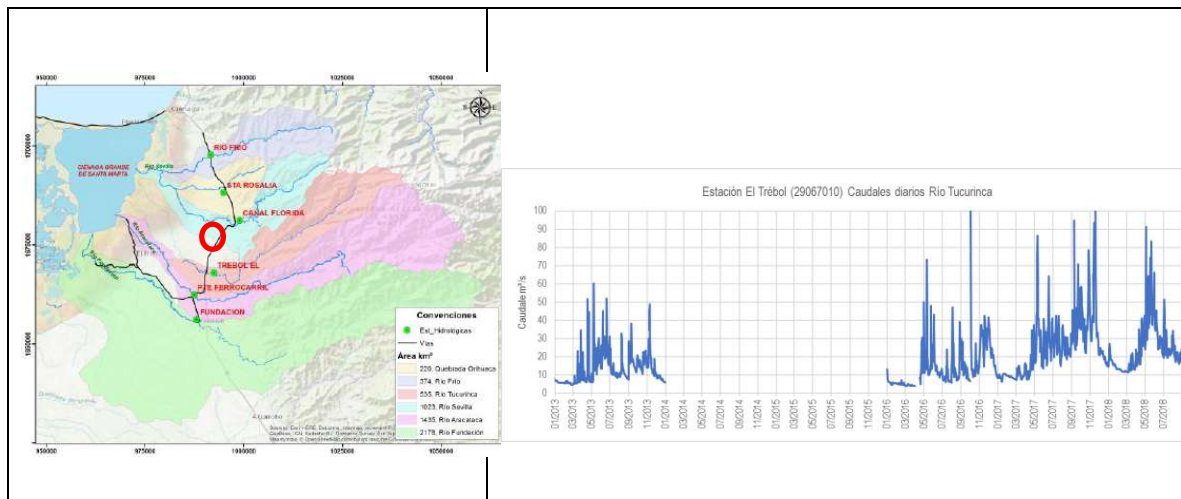


Figura 8 Caracterización hidrológica del río Sevilla (Est. Canal Florida)



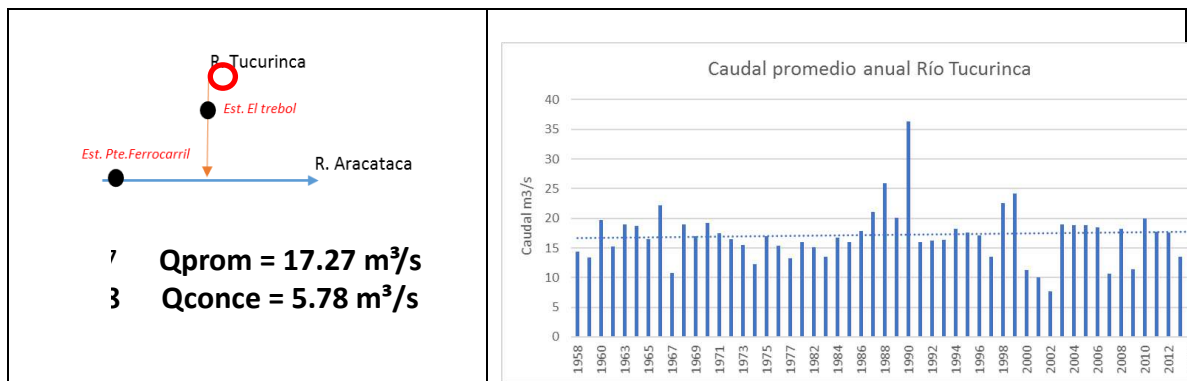


Figura 9 Caracterización hidrológica del río Tucurínca (Est. El Trébol)

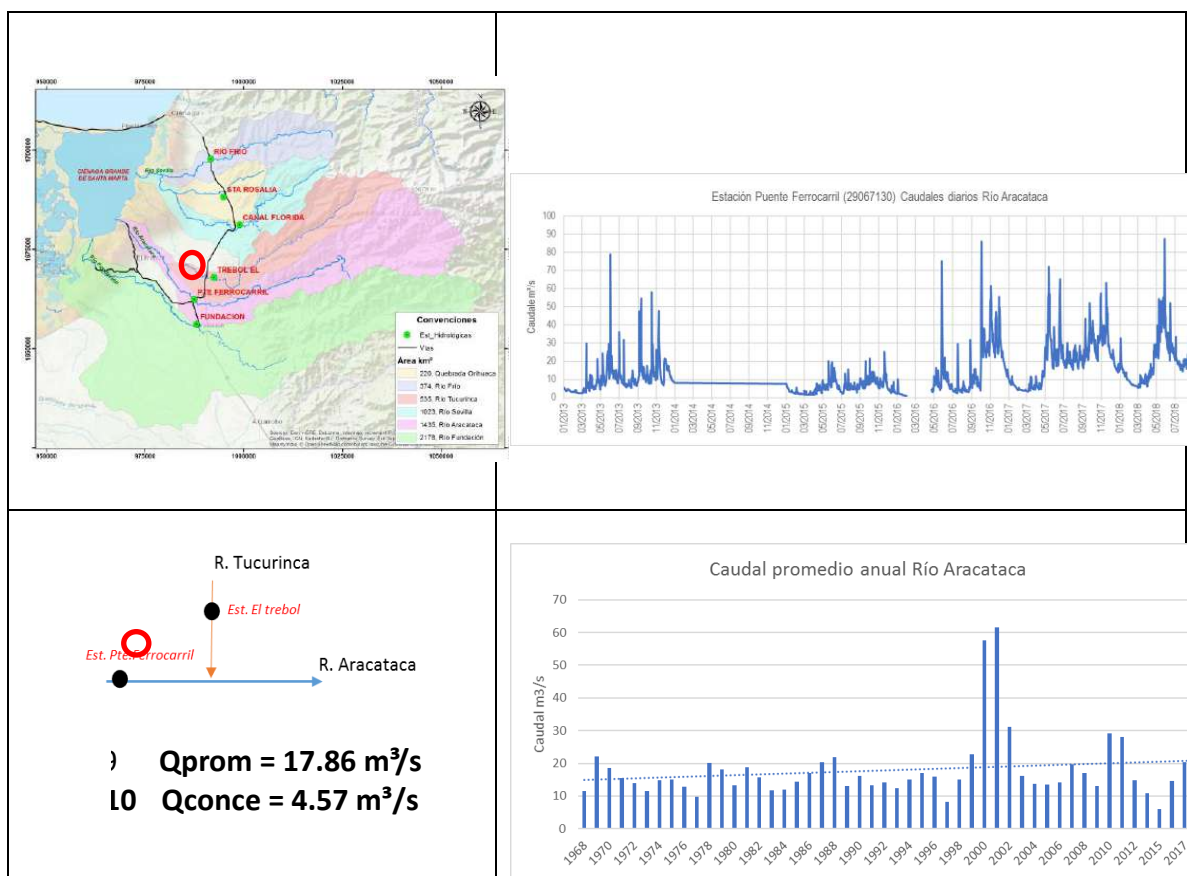


Figura 10 Caracterización hidrológica del río Aracataca (Est. Pte. Ferrocarril)

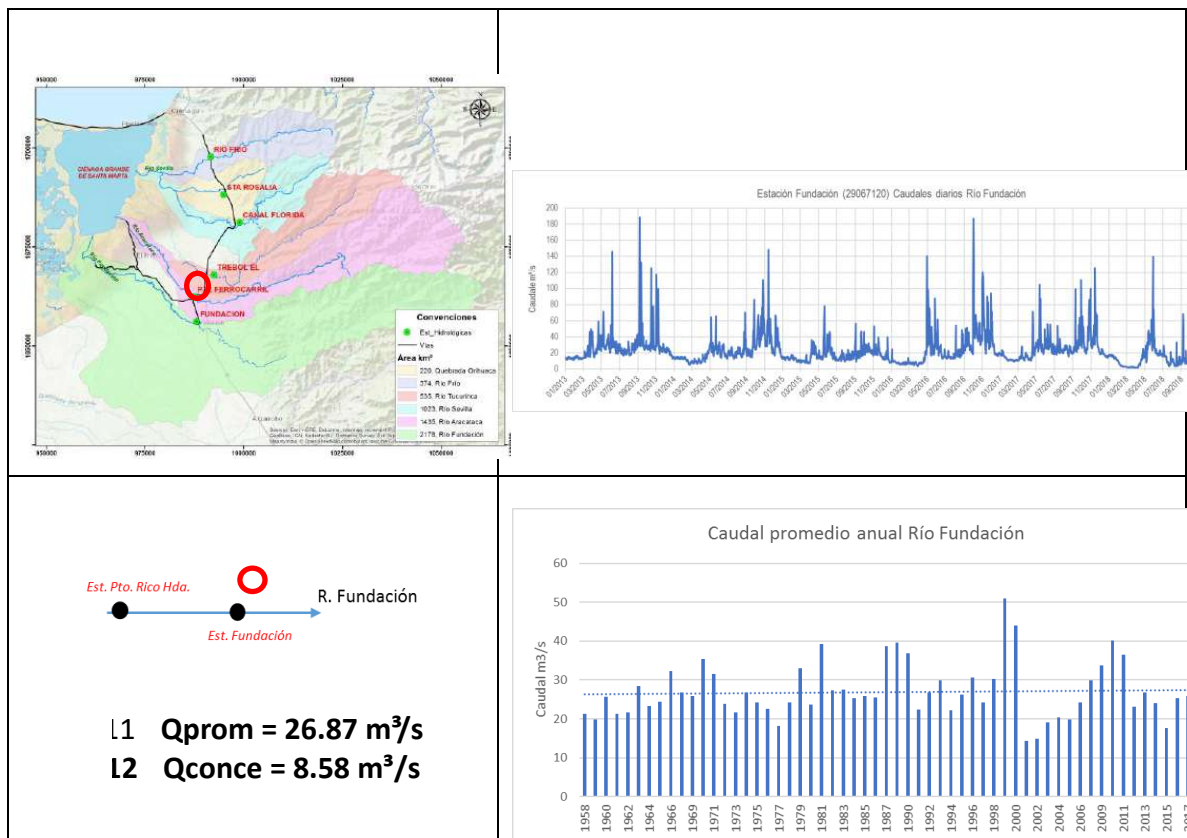


Figura 11 Caracterización hidrológica del río Fundación (Est. Fundación)

En la **Figura 12** se presenta la información de caudales diarios agrupados para los ríos Fundación, Aracataca y Sevilla para el periodo 2016, 2017, hasta el 31 de agosto de 2018. Las series que se ingresan al modelo hidrodinámico corresponden a la oferta obtenida de estos sistemas hídricos, menos los valores de concesión calculados por cada cuenca para los escenarios de variabilidad climática y condiciones normales, toda vez que para la condición actual se cuenta con información de la oferta medida después de la zona agrícola.

Como caso especial se menciona el río Sevilla, cuya estación hidrológica fue instalada aguas arriba de la confluencia de los ríos Frío y Orihueca por condiciones de accesos, lo que no permite para la condición actual conocer como sistema río Sevilla (Sevilla + Frío + Orihueca) el aporte después de la zona agrícola, esto llevó a plantear un híbrido entre: medición sobre el río Sevilla después de su paso por la zona agrícola más el aporte neto de los ríos Frío y Orihueca extrayendo las concesiones a los que estos están expuestos.

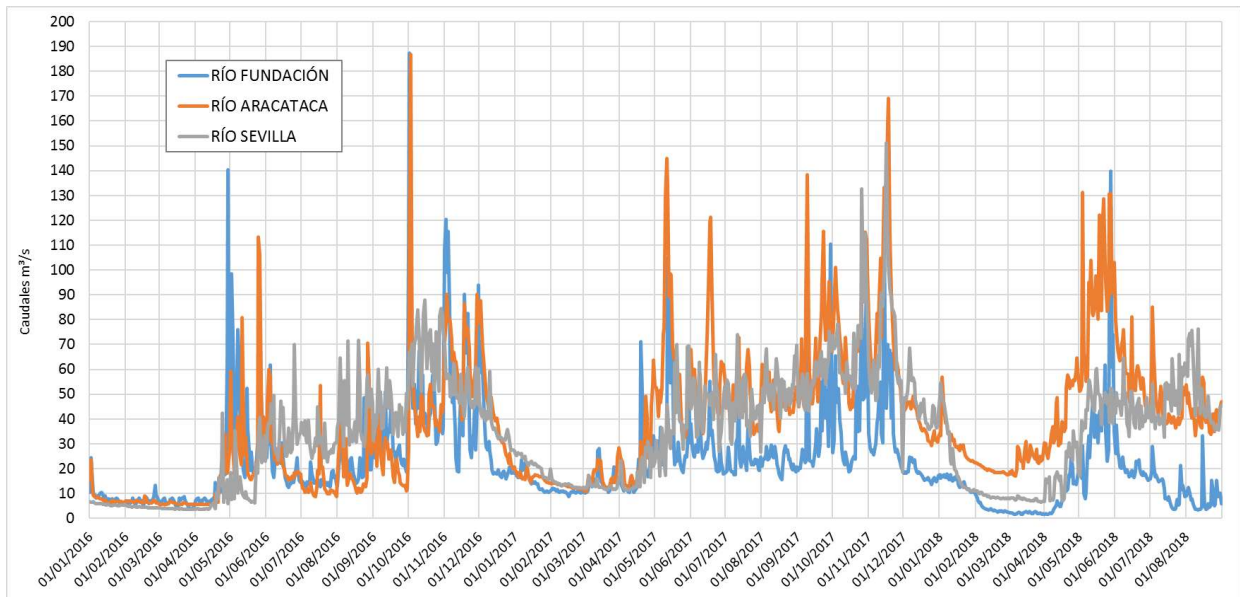
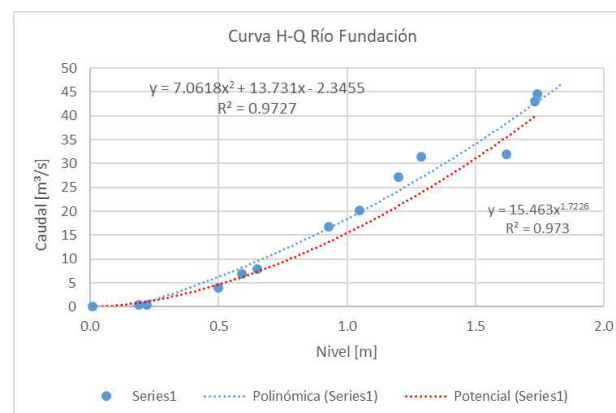


Figura 12 Series caracterizadas para los ríos Fundación, Aracataca y Sevilla

A continuación, se presenta la caracterización de la oferta hídrica de los ríos Sevilla, Aracataca y Fundación en las estaciones hidrológicas del proyecto, después de su paso por la zona agrícola.

Curvas de gasto ríos SNSM después de la zona agrícola

El monitoreo en los ríos Fundación, Aracataca y Sevilla, ha permitido la obtención de 10 aforos líquidos en promedio para estos sistemas hídricos aguas abajo de la zona de producción agrícola. A continuación, se presenta la primera aproximación de las curvas de gastos (Nivel – Caudal) realizada para estos ríos. La obtención de esta relación (H-Q), permite obtener el valor real de caudal que ingresa a la Ciénaga Grande de Santa Marta, ya que los registros diarios de niveles (6 am – 6 pm), pueden ser expresados en caudales (m^3/s) y analizados con respecto a los valores medidos y agrupado aguas arriba de la zona agrícola, de acuerdo con el modelo conceptual presentado a lo largo de la investigación.



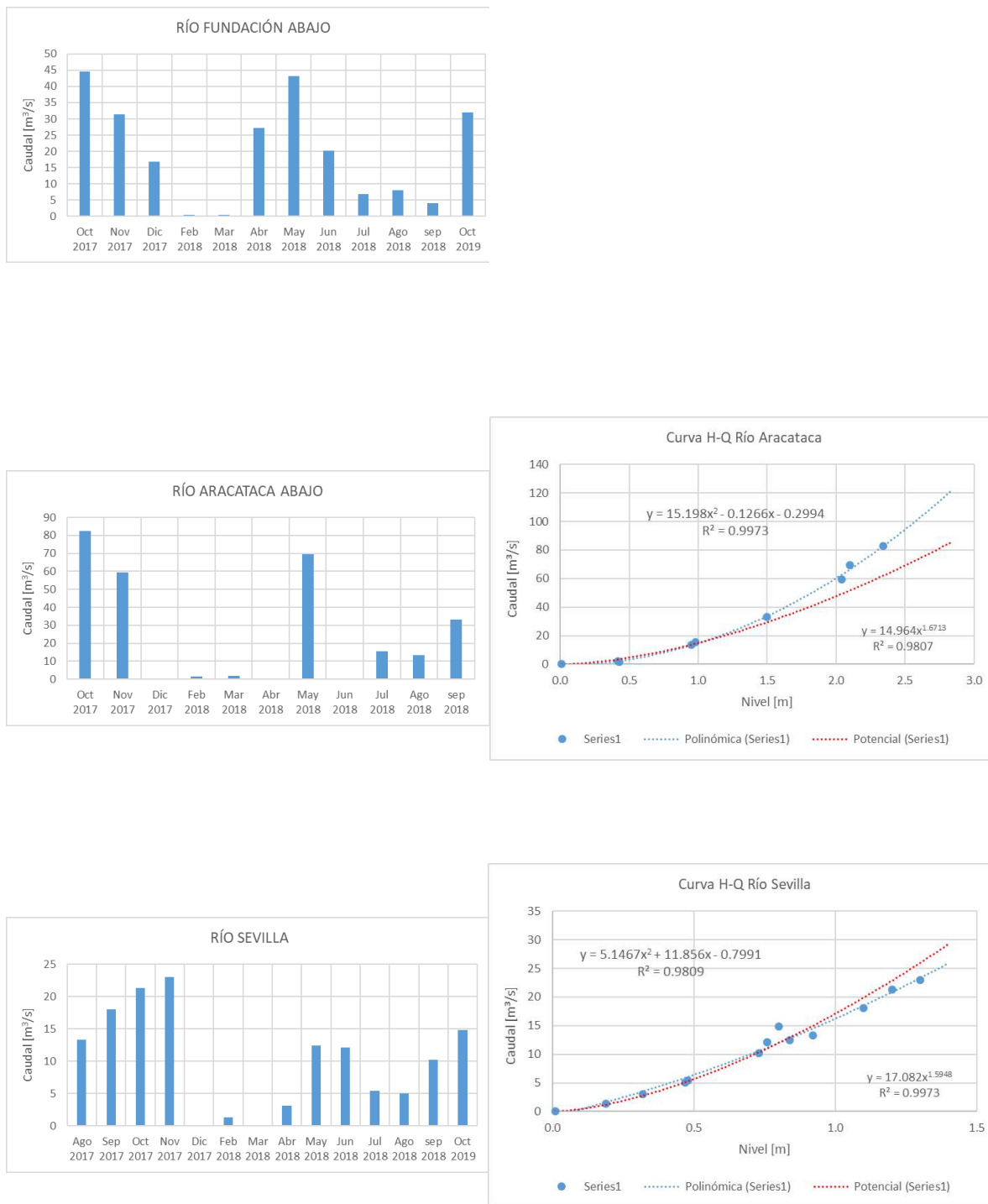
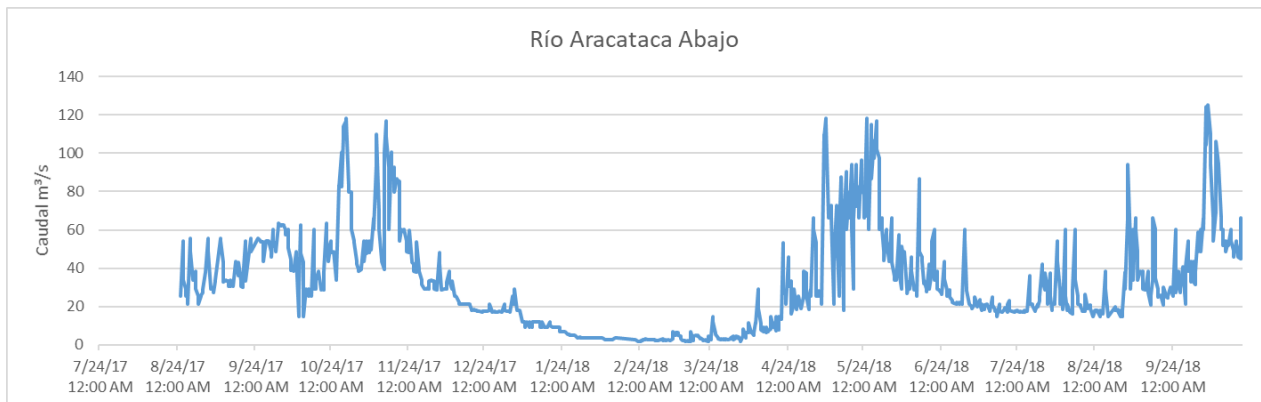


Figura 13 Curvas de gastos ríos Fundación, Aracataca y Sevilla, antes de su ingreso a la CGSM

En las siguientes figuras se pueden consultar las series de caudales obtenidas de las ecuaciones polinómicas presentadas.



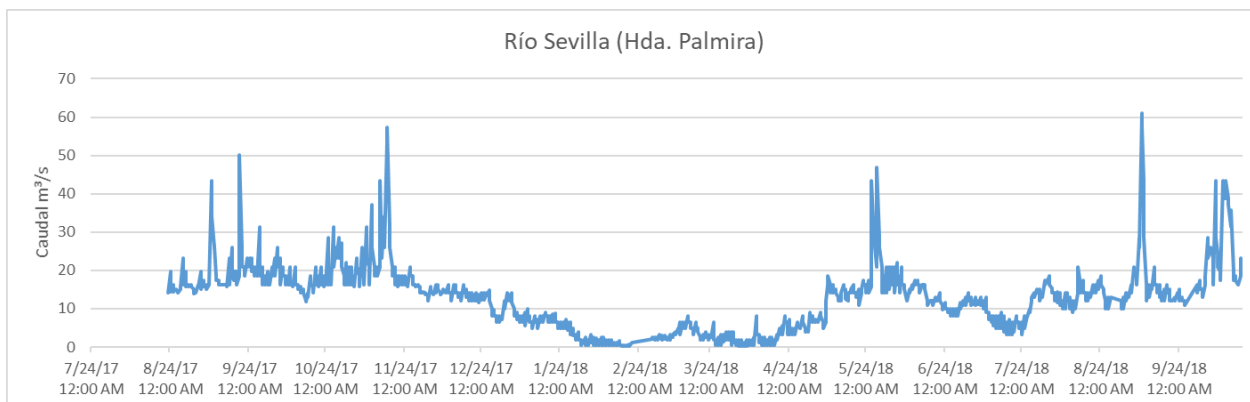
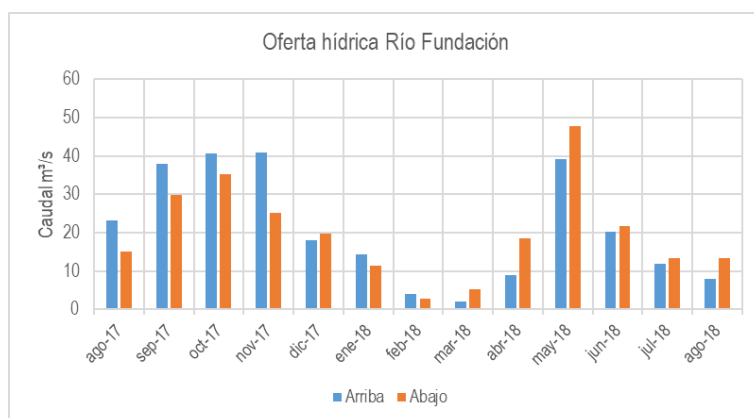


Figura 14 Series de caudales en ríos Fundación, Aracataca y Sevilla (Hda. Palmira), antes de su ingreso a la CGSM

Se destacan los eventos extremos que naturalmente son presentados en estos sistemas hídricos y que el observador ha podido registrar en su bitácora, puede ocurrir que algunas crecientes haya pasado en el intermedio de las lecturas y no hayan sido registradas, sin embargo, se aprecian gran cantidad de registros con estos eventos.

Los siguientes gráficos, sintetizan a nivel mensual los aportes de cada río y se logra identificar en términos porcentuales cuanto es en realidad el caudal que se capta en dichos sistemas a nivel mensual, se aclara que es una primera aproximación y se destaca la necesidad de implementar una gestión integrada del recurso hídrico para estas necesidades hídricas de los sectores ambiental, agrícola y poblacional.

Se indica que los aportes obtenidos en el río Sevilla sector hacienda Palmira, se deben adicionar los aportes netos de los ríos Frío y Orihueca, estos se obtienen de restar a la oferta obtenida en la estación hidrológica de cada río, las concesiones que espacialmente fueron ubicadas en su cuenca aferente. De esta manera se tiene la oferta del río Sevilla a la ciénaga Grande de Santa Marta.



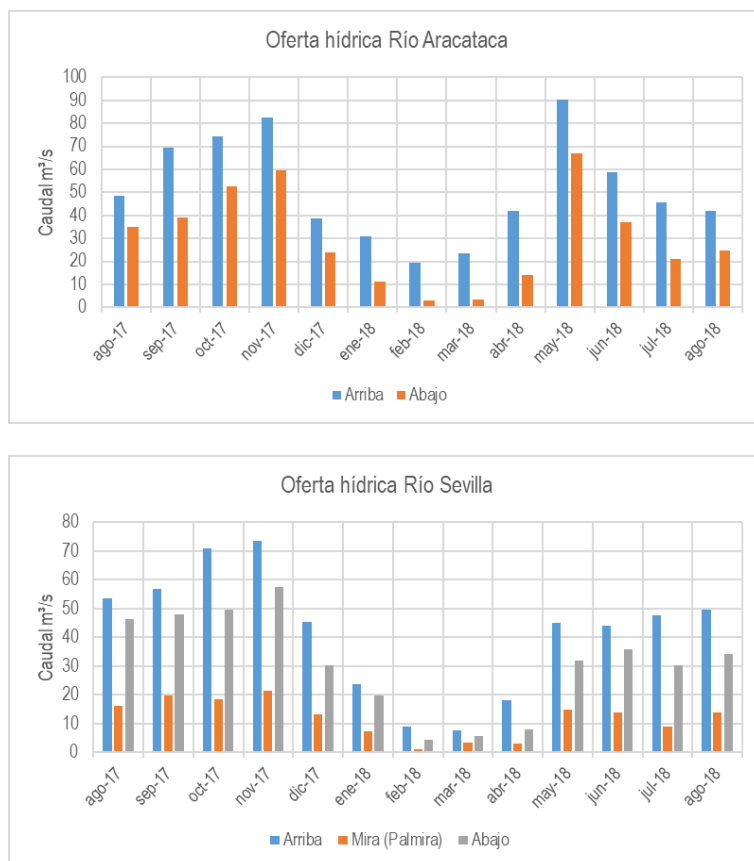


Figura 15 Oferta hídrica mensual ríos Fundación, Aracataca y Sevilla

En términos porcentuales ponderados los valores que fueron extraídos durante el periodo actual de las diversas fuentes se presentan en la Tabla 1. Los valores son caudales promedios mensuales expresados en m³/s. El término “arriba” son los valores obtenidos de las sumatorias de caudales de los ríos antes de su ingreso a la zona agrícola; el término “abajo” son los valores obtenidos de las series de caudales en las nuevas estaciones ubicadas después de la zona agrícola.

Tabla 1 Consumos de agua en la zona agrícola para la condición actual del estudio

Fecha		ago-17	sep-17	oct-17	nov-17	dic-17	ene-18	feb-18	mar-18	abr-18	may-18	jun-18	jul-18	ago-18
RÍO FUNDACIÓN	Arriba (m³/s)	23.25	38.08	40.57	40.92	18.02	14.42	4.07	2.13	9.00	39.18	20.26	11.84	8.07
	Abajo (m³/s)	15.10	29.84	35.23	25.09	19.88	11.51	2.82	5.16	18.51	47.90	21.79	13.33	13.29
Porcentaje de consumo		35%	22%	13%	39%	-10%	20%	31%	-142%	-106%	-22%	-8%	-13%	-65%

RÍO ARACATACA	Arriba (m³/s)	48.48	69.54	74.32	82.34	38.48	31.02	19.56	23.33	41.83	90.20	58.75	45.4 4	41.91
	Abajo (m³/s)	34.90	39.01	52.47	59.63	24.02	11.23	2.94	3.62	13.95	67.07	37.12	21.2 2	24.79
Porcentaje de consumo		28%	44%	29%	28%	38%	64%	85%	84%	67%	26%	37%	53%	41%

RÍO SEVILLA	Arriba (m³/s)	53.53	56.68	70.99	73.55	45.52	23.62	8.92	7.60	18.10	45.12	44.20	47.8 0	49.52
	Abajo (m³/s)	46.49	47.90	49.63	57.53	30.42	19.65	4.51	5.71	7.99	31.83	35.77	30.1 3	34.16
Porcentaje de consumo		13%	16%	30%	22%	33%	17%	49%	25%	56%	29%	19%	37%	31%

SOLO RÍO SEVILLA	Canal Florida	20.07	23.43	34.70	33.52	23.05	20.92			11.17	22.85	17.01	21.5 5	22.69
	Hda. Palmira	16.10	19.86	18.56	21.59	13.15	7.32	1.08	3.32	2.92	14.78	13.80	9.09	13.89
Porcentaje de consumo		20%	15%	47%	36%	43%	65%			74%	35%	19%	58%	39%

Los valores negativos resaltados en color verde en la tabla anterior, obtenidos principalmente en el río Fundación pueden ser entendidos de la siguiente manera: i) se registra mayor caudal aguas abajo que aguas arriba, ii) estos aportes adicionales registrados aguas abajo, puede ser derivaciones del río Aracataca u otro aportante no identificado en esta fase del proyecto, iii) una tesis que se puede manejar es el aporte de agua subterránea del acuífero “Ciénaga – Fundación” a este sistema superficial. Todo lo anterior está sujeto a verificación y ajuste en futuras fases del proyecto.

Los valores positivos resaltados en color rojo indican porcentajes de consumo durante el periodo de mediciones, estos porcentajes (13 y 85%) dejan en evidencia que no existe un control real sobre las extracciones que se realizan en estos sistemas hídricos.

El río Aracataca y sus afluentes, es el sistema hídrico con mayor presión sobre su oferta, en los meses de mayor estrés hídrico (diciembre, enero, febrero y marzo) extraen entre el 40 al 85% de su oferta. Para este mismo periodo al río Sevilla le extraen cerca del 56% de su oferta hídrica.

En la **Figura 16** se puede observar gráficamente que los meses de menores aportes a la CGSM, (menos de 5 m³/s en algunos casos) son: enero, febrero, marzo y abril. Por su parte, mayo, octubre y noviembre son los de mayor aporte.

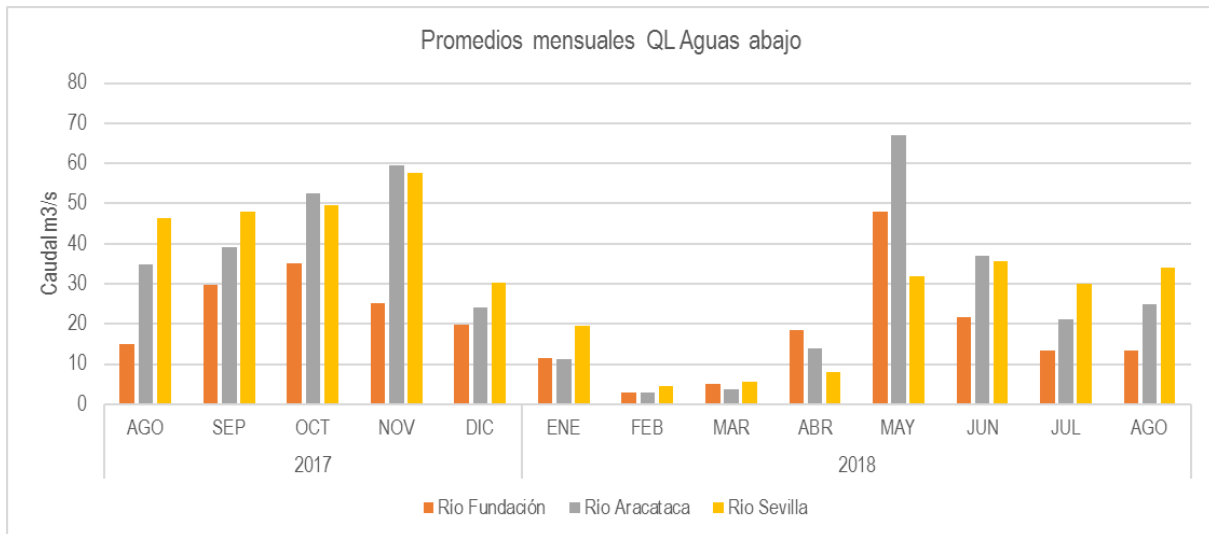
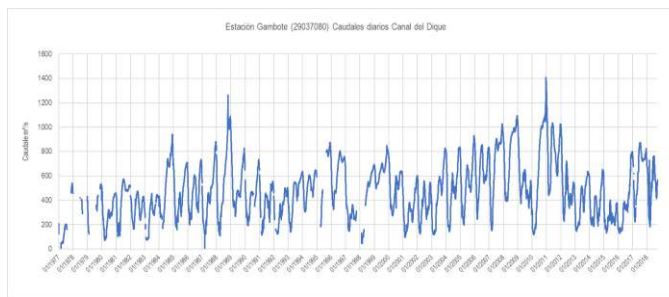


Figura 16 Aportes promedios mensuales ríos Fundación, Aracataca y Sevilla a la CGSM

Caracterización de la serie de caudales de ingreso al modelo hidrodinámico por el río Magdalena a la altura de Calamar.

Por otra parte, la entrada principal o condición de frontera del modelo hidrodinámico sobre el río Magdalena es la diferencia en caudales de las estaciones Calamar y Gambote.



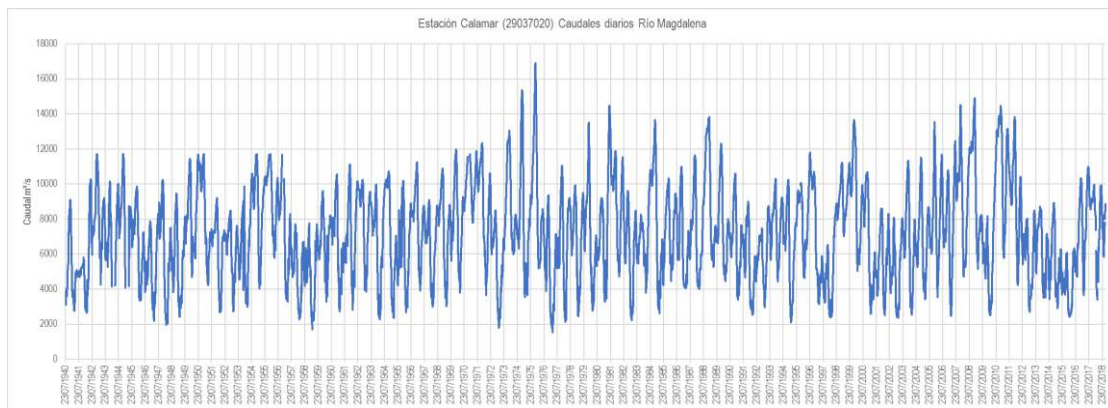


Figura 17 Condición de frontera modelo hidrodinámico a la altura de Calamar

La serie hidrológica transitada por el modelo hidrodinámico y que a la postre producirá las entradas para el modelo de balance hídrico y la calibración para el periodo actual se presenta en la **Figura 18**, se ilustran los valores diarios para el periodo 2016, 2017, hasta septiembre de 2018.



Figura 18 Serie hidrológica de entrada al modelo hidrodinámico por el río Magdalena

Entrada por precipitación al modelo de balance hídrico integrado

La estimación de la precipitación sobre el cuerpo de agua principal de la CGSM, se estimó empleando el método de interpolación polígonos de Thiessen (Garcia, Peters-Lidard, & Goodrich, 2008). En principio se seleccionaron estaciones con disponibilidad de información para el periodo 1977 a 2017 para estimar las estadísticas climáticas de la zona, sin embargo para la condición actual fue necesario caracterizar la serie hasta el mes de agosto de 2018,

el resultando un total de 16 estaciones, en la Tabla 2 se pueden consultar las estaciones que cumplieron este criterio.

Tabla 2 Listado de estaciones con disponibilidad de datos diarios de precipitación

ID	CÓDIGO	NOMBRE	CATEGORIA	ALTITUD	LATITUD	LONGITUD	DEPTO	MUNICIPIO
1	29040070	PONEDERA	PM	8	10.642	-74.771	Atlántico	Ponedera
2	29045190	AEROPUERTO E. CORTISSOZ	SP	14	10.918	-74.780	Atlántico	Soledad
3	29060540	SAN RAFAEL	PM	10	10.591	-74.647	Magdalena	Remolino
4	29060550	RUBY EL	PM	20	10.845	-74.188	Magdalena	Zona Bananera
5	29065000	MEDIA LUNA - AUT	CP	20	10.510	-74.507	Magdalena	Pivijai
6	29065030	PRADO SEVILLA	CO	18	10.764	-74.155	Magdalena	Zona Bananera
7	15015020	YE LA	CP	20	10.992	-74.211	Magdalena	Ciénaga
8	15015050	AEROPUERTO SIMON BOLIVAR	SP	4	11.128	-74.229	Magdalena	Santa Marta
9	29060030	BONGO EL	PM	20	10.649	-74.376	Magdalena	El Retén
10	29060080	COCOS LOS	PM	4	11.006	-74.684	Magdalena	Sitionuevo
11	29060120	TASAJERA	PM	2	10.976	-74.362	Magdalena	Puebloviejo
12	29060160	ENANO EL	PM	25	10.902	-74.189	Magdalena	Zona Bananera
13	29060170	GAVILAN	PM	20	10.680	-74.331	Magdalena	El Retén
14	29060180	ESPERANZA LA	PM	25	10.743	-74.306	Magdalena	Puebloviejo
15	29060210	PALMA LA	PM	23	10.967	-74.205	Magdalena	Ciénaga
16	29060310	SEVILLANO	PM	5	10.933	-74.252	Magdalena	Ciénaga

Fuente: IDEAM, 2018

Análisis de consistencia de la información

Teniendo en cuenta la Guía de Prácticas Hidrológicas de la OMM No 168 (WMO, 2011) y los estándares de calidad aplicables para Colombia, se realizó el análisis de consistencia de la información a series a una resolución mensual para esta variable, el procedimiento aplicado propende por la obtención de la mejor calidad en la información y de esta manera la reducción de la incertidumbre en la caracterización climatológica y posterior balance hídrico. Se incluyó un criterio de consistencia consistente en un porcentaje de datos faltantes inferior al 30 %. El periodo efectivo de registro de la serie no puede ser inferior a 15 años.

En la Tabla 3 se presentan el resumen del análisis de consistencia para la variable precipitación, con las longitudes potenciales en años y el porcentaje de datos faltantes.

Tabla 3 Porcentajes de datos faltantes a nivel mensual variable precipitación

ESTACIÓN	Fecha inicio	Fecha fin	Datos potenciales	Datos reales	Datos Faltantes
A.E.CORTISSOZ	ene-77	dic-17	492	490	0.4%
A.S.BOLIVAR	ene-77	dic-17	492	475	3.5%
EL_BONGO	ene-77	dic-17	492	486	1.2%
EI_ENANO	ene-77	dic-17	492	477	3.0%
EL_RUBY	mar-84	abr-15	406	361	11.1%
GAVILAN	ene-77	dic-17	492	476	3.3%
LA_ESPERANZA	ene-77	dic-17	492	488	0.8%
LA_PALMA	ene-77	dic-17	492	481	2.2%
LA_YE	ene-77	dic-13	492	365	25.8%
LOS_COCOS	ene-77	dic-17	492	436	11.4%
MEDIA_LUNA	ene-85	dic-17	396	396	0.0%
PONEDERA	feb-77	dic-17	491	387	21.2%
PRADO_SEVILLA	ene-77	abr-14	492	445	9.6%
SAN_RAFAEL	jul-82	dic-17	426	419	1.6%
SEVILLANO	ene-78	dic-17	480	465	3.1%
TASAJERA	ene-77	dic-17	492	485	1.4%

Las estaciones con mayor cantidad de datos faltantes a nivel mensual son La Ye (15015020) con un 25.8% y Ponedera (29040070) con un 21.2%, no obstante, estas estaciones presentan periodos con información importante que pueden constituir series para los escenarios climáticos a desarrollar. En la **Tabla 4** se pueden identificar de manera gráfica los periodos en los que las estaciones no presentaron información satisfactoria.

Tabla 4 Distribución temporal de datos faltantes de precipitación

Año	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
A.E.CORTISSOZ	621.9	1102.2	1003.7	676	1068.8	941.9	656.6	782.1	831.2	962.8	306.1	1243.5	985.9	988.5	966.3	736.4	1116	438.6	908.8	812.2	470.2	1284.7	1140.1	796.2	807.8	707.3	1147.8	873.6	967.1	866.4	1093.8	1162.9	500.9	1060	100	876.3	821.1	731.5	603.1	1130.6	1102.2
A.S.BOLIVAR	418.8	388.2	588.3	434.5	726.6	288.7	380.1	274	556.2	365.7	313.5	786.8	356.6	616.7	263.1	430.6	467.5	346.5	644.3	467.8	460.7	614.6	566.3	337.1	463.1	486.6	565.3	564.6	768.5	250.3	803.8	461.4	406.1	1064	1016.6	361.1	512.1	337.3	266.1	741.1	869.2
EL BONGO	672	1660	1804	1132	2140	883	631	1225	1181	912	1267	1638	1277	1460	941	1465	1350	816	1640	1009	805	1266	1645	1454	1758	1548	1078.5	1422	1634.7	2035	2263	3338	380	2752	1462	362	564.1	645	533	1129	616.2
EL ENANO	569	1113	1220	951	1381	677	657	959	908	812	1038.1	1764.4	918.2	998.4	567.1	1922.9	793.4	695	1319.8	1115	561.7	551.5	1632.7	536.2	463.3	912.8	1035.6	1169.3	1242.3	361.9	1771.8	1201.1	622.6	1163.7	1754.3	702.7	773	613.8	496.7		1289.6
EL RUBY																																									
GAVILAN	1029	1386	1207	1045	2089	952	811	855	1172			1395	1237	1078	936.4	554.5	275	846	893.3	1492	1289	763	1427.7	1284	571	555	610	1244.3	1664	1057.9	651.3	637.6	126	2213	2254.3	1563.2	816	1072.7	838.8	417.2	1092.5
LA ESPERANZA	1589	1003	850	1153	2601	936	134	111	1325	707	758	858	952	817	844	583.5	88	741	1429	1246	858	84	1351	994.5	981	2793	229	1211	1291	1210	1849	1456	412	651	1452	238	1595	638	543	1258	988
LA PALMA	726	1256	780	146	129	66	86.6	46	327	582	499.2	1279.1	180.3	1120	442	856.2	117.8	818.3	1025.1	703.1	803	109.8	1287	571.8	402.8	531	104.5	812.8	963.2	1198.6	798.6	577.3	1035.3	1386.5	724.9	747	422	56.3	1073.7	1328.4	
LA YE	276.8	333.8	864	135.4	1312.9	467.4	521.1	403	845.1	469.8			1286.7	1281	862.2	389.8	484.2	1211.3	583.2	1111.9	734.8	204.4	813.2	1364	624.8	2143	263.4	481.8	779	807.8											
LOS COCOS	966.3	914	796	508	619.2	611.8	334.9	675.3	554.5	344	1033.3	1036.6	788.2	750.9	410.8	715.3	643.7	273.8	1004.4	266	389	736.1	885	331	266.8	2311.7	287.1														
MEDIA LUNA																																									
PONEDERA	217	308																																							
PRADO SEVILLA	1444.1	1437.2	1730.3	1534.7	1658.8	1564.2	1594	1727.3	1681.5	812	1264.6	1036.8	1135.5	1359.7	930.5	1226.2	1284.1	1168.6	1732.5	1564.4	768.6	1793.3	2018.7	1863.3	1257.3	893.8	1667.1	1457.2	1657.4	1403.2	1689.2	1890.5	1268.5	2623.2	2168.4	1250	1152	156.5			
SAN RAFAEL																																									
SEVILLANO	1143.8	233	637	945	428	518	83	657	668	387	1547	578	1047	681	637	537	627	1558	1306	1235	1068	2503	750	633	577	610	715	311	1088	1597	1468	1172	2366	1347	1088	155.8	281	268	715	454	
TASAJERA	417	562	324	519	425	264	230	265	350.1	586.3	336	1319.9	697.7	560.8	163.2	336	42	261.6	789.8	76.7	46	410	16	1123.6	79	151.5	410	768.6	516	163.5	712.1	427	220	162	65	435	428	56	151	242	

En la **Figura 19** se presenta la distribución de las estaciones en el territorio y los polígonos obtenidos por el método de Thiessen.

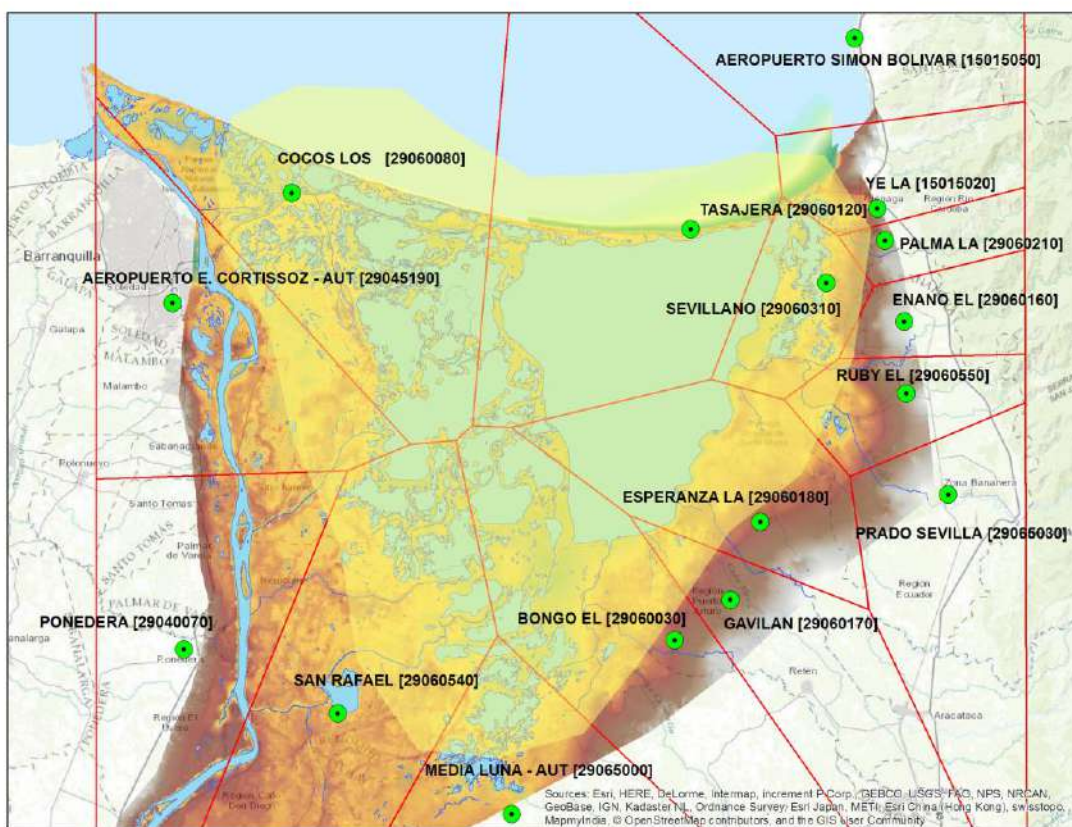


Figura 19 Polígonos de Thiessen y localización de las estaciones de precipitación

Según la distribución de los polígonos de Thiessen en la CGSM, la precipitación está influenciada principalmente por 6 estaciones: en un 24% por la estación Los Cocos (Cod.29060080) con una lluvia anual de 938 mm/año, con un 22% Tasajera (Cód. 29060120) con una lluvia de 402 mm/año, con un 13% El Bongo (Cód. 29060030) con una lluvia de 1361 mm/año, con un 12% San Rafael (Cod. 29060540) con una lluvia anual 1117

mm/año, la estación La Esperanza (Cód. 29060180) con un porcentaje de 10% presenta un registro de 1380 mm/año y finalmente la estación Sevillano (Cód. 29060310) registra una lluvia de 961 mm/año.

Dado lo anterior, el régimen de lluvia multianual y mensual de la región Ramsar se puede consultar en la **Figura 20** y **Figura 21**.

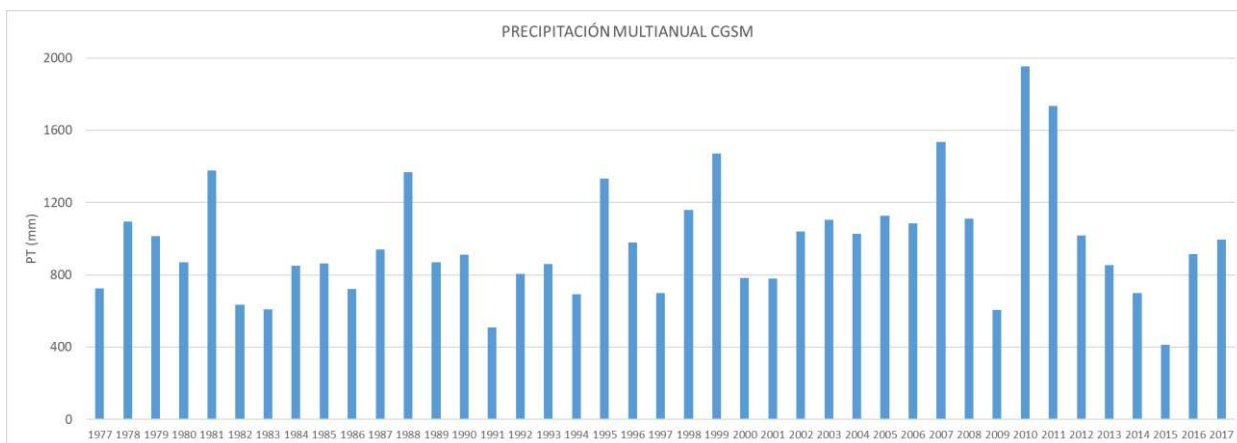


Figura 20 Precipitación media multianual en la Eco región Ramsar de la CGSM

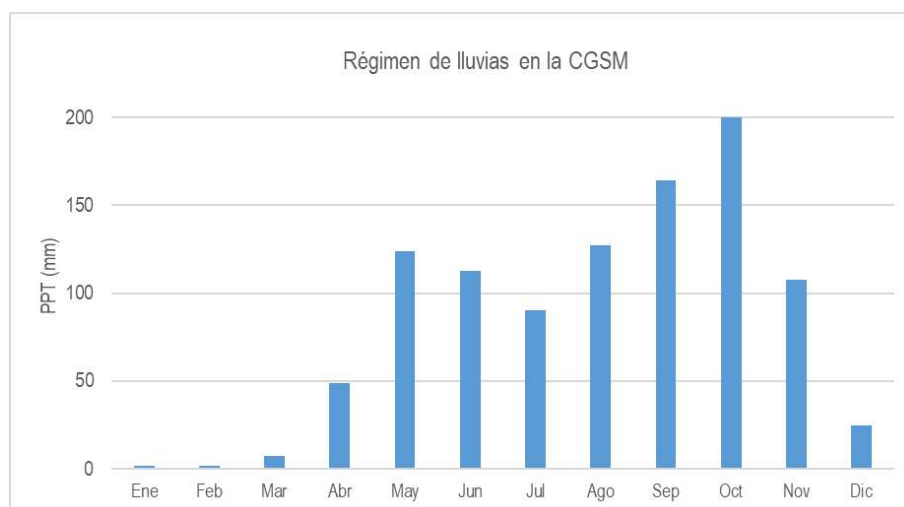


Figura 21 Precipitación media mensual multianual en la CGSM

En atención al comportamiento de la precipitación multianual, se puede observar un patrón muy similar durante los años 1977 al 1997, periodo en el que se evidenció por un lapso de 7 años la ocurrencia de eventos mayormente húmedos como lo fueron (1981, 1988 y 1995). Los dos periodos de mayor humedad en la región han sido los años 2010 y 2011, con más de 1600 mm/año. El periodo de menores precipitaciones corresponde a 2015 con solo 400 mm/año.

La estacionalidad de las lluvias durante el año, presentan dos periodos húmedos correspondientes a mayo y octubre y un cuatrimestre de pocas lluvias que comienza en diciembre y finaliza en marzo.

Para la condición actual (agosto/2017 - agosto/2018) se generó una serie de precipitación diaria con las estaciones con disponibilidad de información. En la **Figura 22** se pueden observar los registros de las series diarias y mensuales.

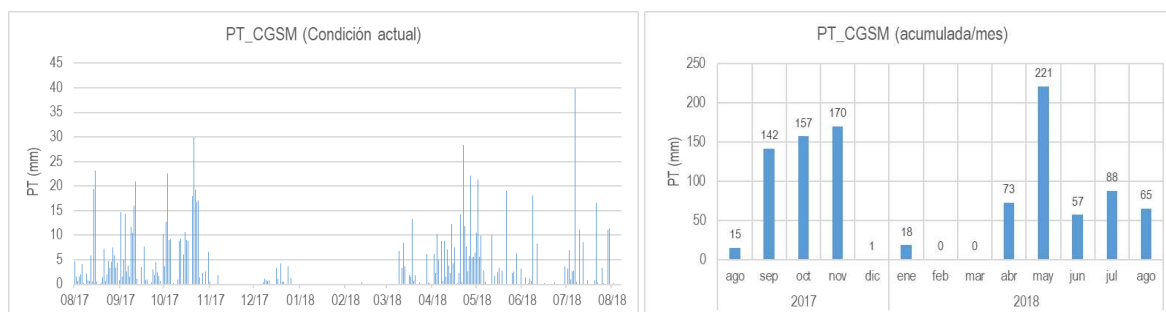


Figura 22 Serie de precipitación diaria de entrada al modelo de balance hídrico condición actual

La información del mes de agosto de 2017 solo se limita a 6 días, toda vez que el inicio de las mediciones es el 25 de agosto de 2017.

Entrada por Caños derivados del río Magdalena al modelo de balance hídrico integrado

Son tres los caños que fueron contemplados en el modelo hidrodinámico para su calibración en condición actual (Renegado, Clarín Nuevo y Aguas negras), sin embargo, el caño que aporta directamente sus aguas a la CGSM es el caño Clarín Nuevo, este cuerpo de agua no tiene conectividad alguna con ciénagas u otros caños o canales.

El agua que se deriva por el caño Renegado tiene un tránsito muy complejo y es muy poco el aporte que desde este sistema llega al cuerpo principal, de hecho, una vez se cumpla la dinámica de interconexión con ciénagas como Buenavista, Mendegua, La Tigresa, Aguja, Juncal, Alfandaque y Pajarales, entrega sus aguas por Caño Grande al sistema CGSM.

Un tránsito más directo tiene el caño Aguas Negras que una vez se deriva del río Magdalena su única conexión es con el complejo Pajarales, el aporte a la CGSM se realiza de la misma manera por el caño Grande.

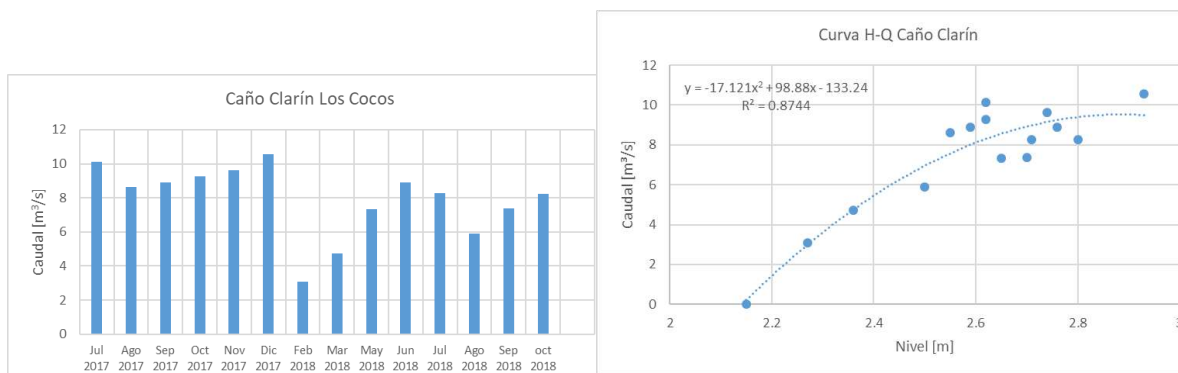
Aunque el modelo de balance hídrico contempla dos entradas al sistema (Caño Clarín Nuevo y Caño Grande), más adelante se presentan los volúmenes de agua que desde los caños

Renegado y Aguas Negras, se derivan en cada ciénaga o complejo de ciénagas propuestas topológicamente.

Curvas de gasto caños Clarín Nuevo y Aguas Negras

El monitoreo en los caños Clarín Nuevo, Renegado y Aguas Negras, ha permitido la obtención de 12 aforos líquidos en promedio para estos sistemas hídricos. En la **Figura 23** se presenta la primera aproximación de las curvas de gastos (Nivel – Caudal) realizada para estos caños, excepto el caño Renegado que está controlado por compuertas y no es viable la generación de dicha curva, solo se ilustran las campañas de aforos realizada y el comportamiento de los niveles para el periodo actual.

La generación de esta relación (H-Q), permite obtener el valor real de caudal que ingresa a la Ciénaga Grande de Santa Marta por estos caños del costado occidental del complejo ya que los registros diarios de niveles (6 am – 6 pm), pueden ser expresados en caudales (m^3/s).



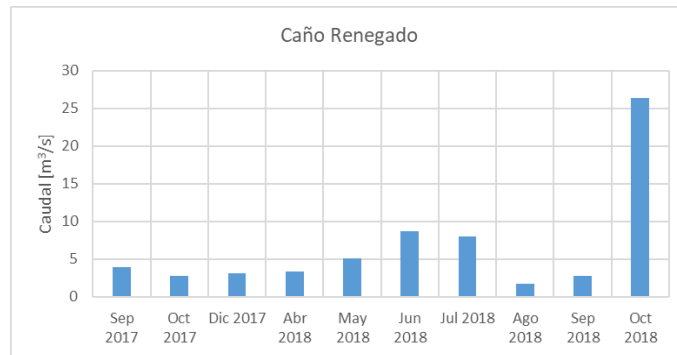
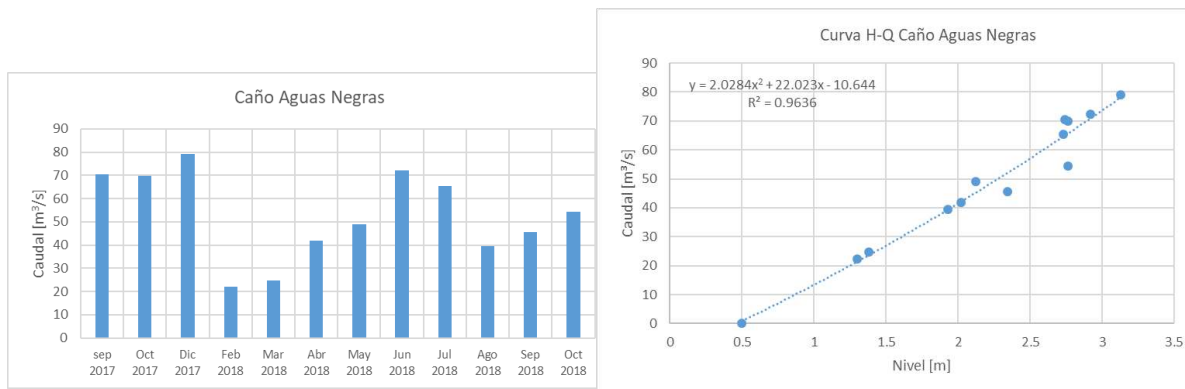


Figura 23 Curvas de gastos caños Aguas negras y Clarín Nuevo, aforos caño Renegado

La ecuación matemática que mejor se ajusta a estos aforos, es la Polinómica de segundo grado. La forma de presentación es el valor de las abscisas como variable independiente, en este caso los niveles de lámina de agua expresados en metros.

En el **Anexo 2 Bases de datos de niveles y curvas de gasto**, se pueden consultar las series de niveles registradas en todas las estaciones hidrológicas del proyecto desde su puesta en marcha, con su respectivo análisis y depuración de errores.

En las siguientes figuras se pueden consultar las series de caudales obtenidas de las ecuaciones polinómicas presentadas para Clarín Nuevo y Aguas Negras y la serie de niveles de lámina de agua del caño Renegado.

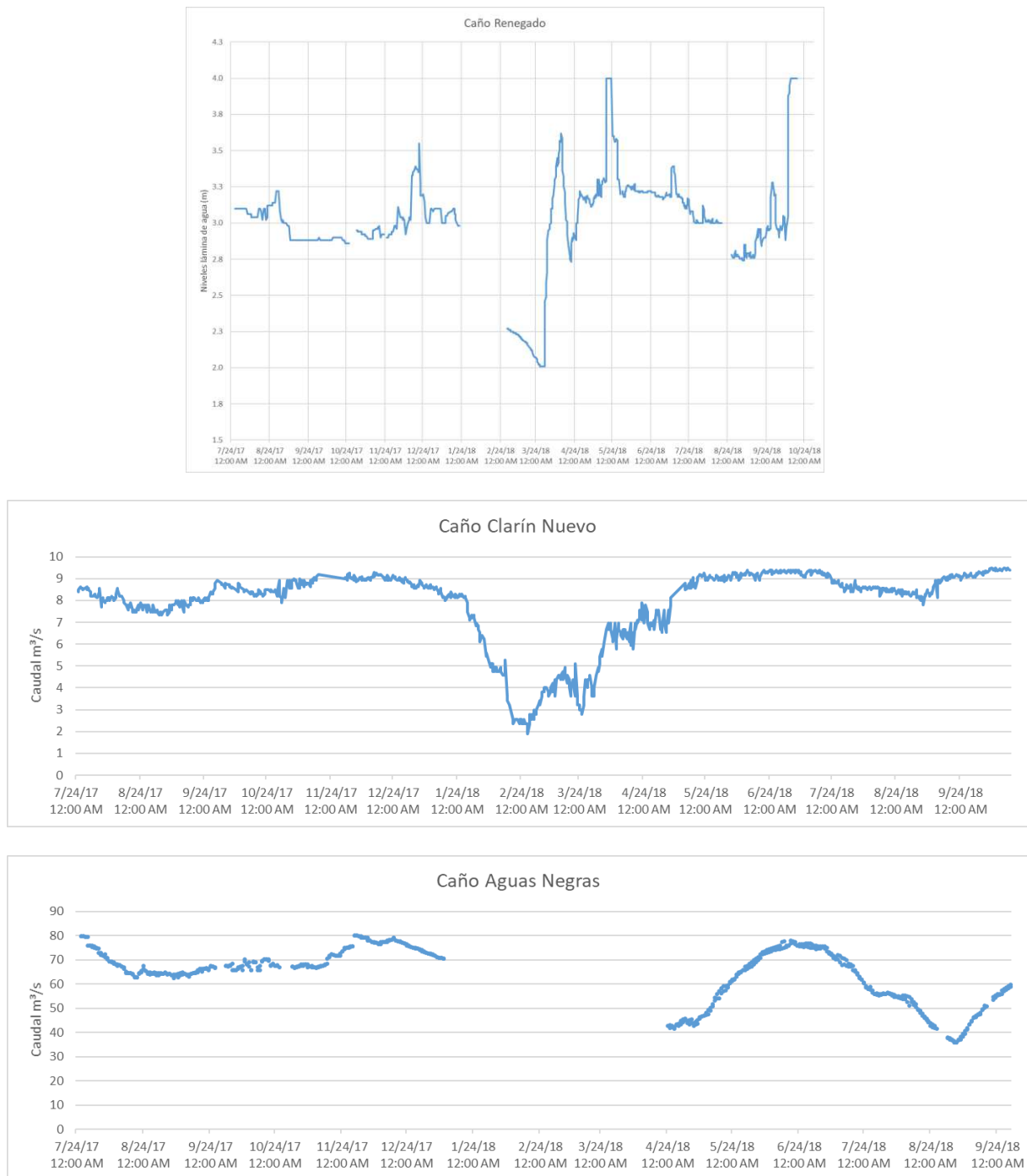


Figura 24 Series de caudales en caños Clarín y Aguas Negras, niveles caño Renegado

Las lecturas de mira en la estación Renegado, muestran el comportamiento de la variación de niveles en dicho sistema, es evidente los cambios repentinos de niveles que obedecen a

las aperturas o limpieza de las compuertas obstruidas por material vegetal y demás basuras transportadas por el río Magdalena.

Estas series hidrológicas de la condición actual del hidrosistema, fueron incluidas en el modelo hidrodinámico, el cual transita dichos caudales y genera en las bocas del caño Clarín y Caño Grande, series de volúmenes horarios que fueron agregados a nivel diario como aportes al cuerpo de agua principal de la CGSM. En la **Figura 25** se pueden observar los volúmenes de aporte diario en Mm^3 que recibe la CGSM para el periodo de análisis.

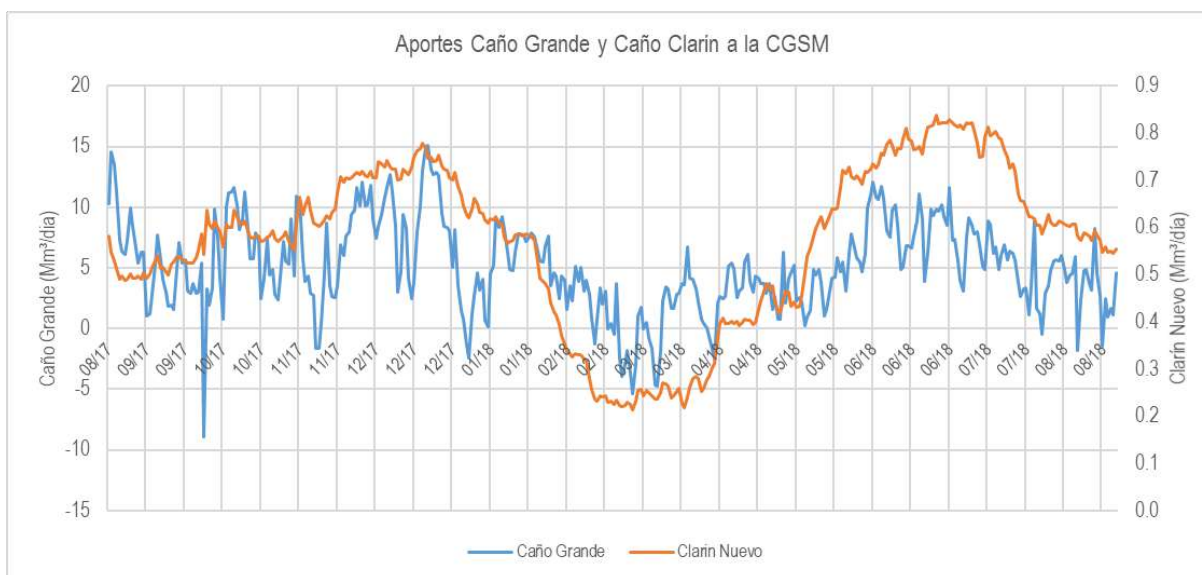


Figura 25 Volumen de agua neto por Caño Grande y Clarín Nuevo que ingresan al modelo de balance hídrico

Los valores negativos de ambas series de volúmenes, están asociados a las salidas de agua del cuerpo de agua principal, en el caso de Caño Grande se interpreta como el aporte de la CGSM al complejo de Pajaral, de la misma manera para Clarín Nuevo, salidas de la CGSM con dirección al río Magdalena.

Salida por evaporación del modelo de balance hídrico integrado

La variable evaporación, aunque es la de mayor incertidumbre en su proceso de medición, es la que más homogeneidad presenta espacial y temporalmente. En la **Tabla 5** se presenta el listado de estaciones climáticas con disponibilidad de información de evaporación de tanque a resolución diaria.

Tabla 5 Listado de estaciones con disponibilidad de datos diarios de evaporación

ID	CÓDIGO	ESTACIÓN	TIPO	FECHA_INST	ELEVACIÓN	LAT.	LONG.
1	15015020	YE LA	CO	15/07/1967	20	10,99	-74,211
2	15015050	APTO SIMON BOLIVAR	SP	15/06/1952	4	11,13	-74,229
3	29035080	NORMAL MANATI	CP	15/10/1963	10	10,45	-74,955
4	29045020	APTO E CORTISSOZ	SP	15/05/1940	14	10,88	-74,78
5	29065030	PRADO SEVILLA	CO	15/07/1970	18	10,76	-74,155

En la **Figura 26** puede consultarse la localización espacial de las estaciones identificadas; debe aclararse que la única estación con disponibilidad de datos diarios de evaporación para el periodo actual es Normal Manatí (Cód. 29035080). La Ye y Prado Sevilla solo cuentan con datos al año 2013. Los Aeropuertos Simón Bolívar y E. Cordisoz, tienen series a 2015. Para darle validez a la serie de evaporación de la estación Normal Manatí siendo la única en la zona, se procedió a obtener la evaporación por una metodología alterna y compararla con los datos anuales.

La metodología utilizada para realizar la estimación de la evaporación del espejo de agua de la ciénaga es la empleada por el Buró Climático de los Estados Unidos (USWB por sus siglas en inglés) la cual toma como base la ecuación de Penman (Penman, 1951). La fórmula para la estimación de la evaporación se presenta a continuación:

Donde:

E : Evaporación del espejo de agua [mm].
 Δ : Gradiente de presión de vapor saturado.
 γ : Constante psicrométrica.
 Q_n : Radiación neta efectiva [mm].

E_a : Evaporación total de tanque evaporímetro Clase A [mm].

Para resolver la Ecuación 3 se debe contar con datos de evaporación (validar el método), temperatura media, velocidad del viento, humedad relativa y brillo solar. Se elige el año 2013 en la estación Aeropuerto Simón Bolívar que cuenta con dicha información, los resultados se presentan en la **Figura 27**.

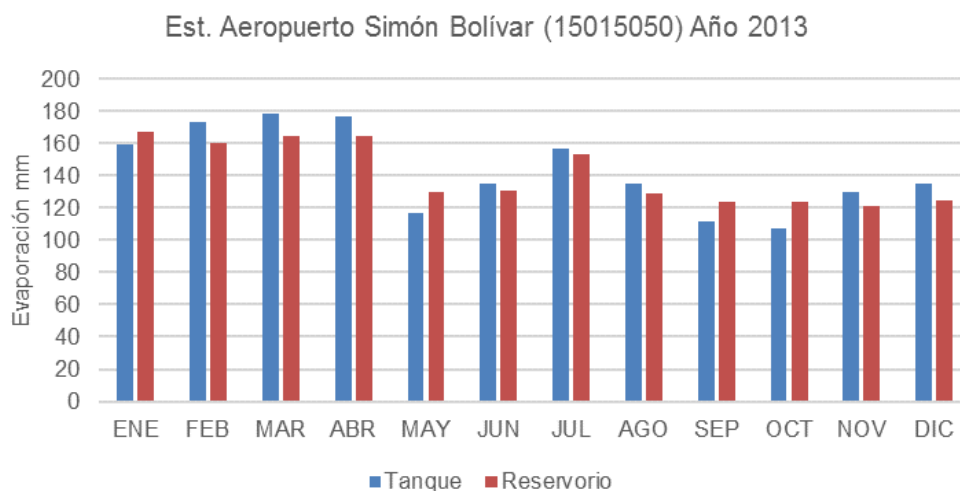


Figura 27 Cálculo de evaporación en reservorio con información de la estación Apto. Simón Bolívar

Se observa que el comportamiento es el mismo, mayor evaporación en épocas secas y menor en épocas húmedas, los valores anuales por el método de Reservorio fueron de 1692 mm/año, por medición de tanque 1715 mm/año porcientualmente la diferencia es de 1,4%. Otro punto de validación fue la estación Prado Sevilla cuyo valor de evaporación anual para el año 2013 también fue de 1715 mm/año.

Finalmente, la estación Aeropuerto E. Cortissoz cuenta con datos climáticos a 2016 para el cálculo de evaporación por el método de Reservorio, se calculan estos valores y se comparan con los datos de evaporación de tanque de la estación Normal Manatí. En la **Figura 28** se puede observar los resultados para el periodo 2016 de las estaciones mencionadas.

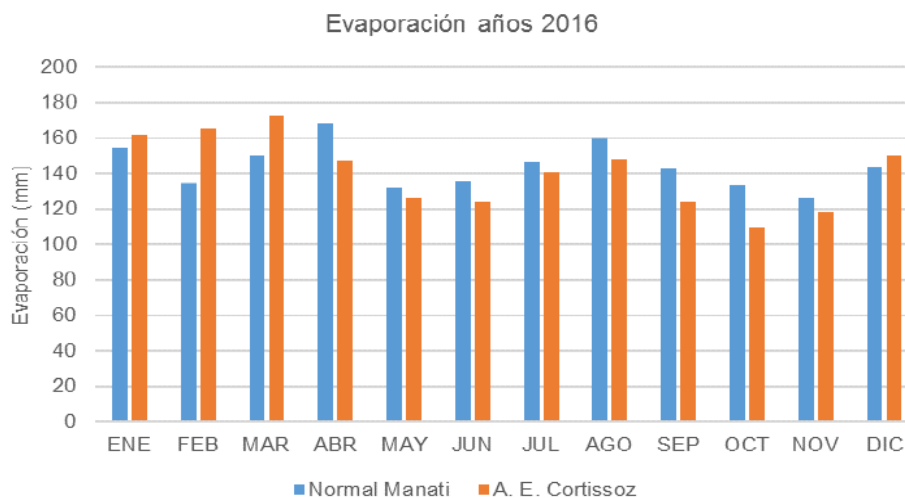


Figura 28 Cálculo de evaporación por Reservoirio Est. Apto. E. Cortissoz y Tanque Est. Normal Manatí

Se observa que el comportamiento del régimen es muy similar, aunque en algunos meses como febrero, marzo, septiembre y octubre las diferencias oscilan alrededor de los 20 mm, los valores anuales por el método de Reservoirio en la estación Apto. E. Cortissoz fueron de 1692 mm/año, por medición de tanque en la estación Normal Manatí 1729 mm/año porcientualmente la diferencia es de 2,3%. Dada estas verificaciones se procede a incorporar al balance hídrico la salida por evaporación aportada de la estación Normal Manatí (ver **Figura 29**), se aclara que por ser datos provenientes del tanque evaporímetro dichos valores deben ser afectados por un coeficiente de tanque que oscila entre 0.6 y 0.8 según (FAO), para este ejercicio se adopta el valor de 0.7 como coeficiente de tanque.

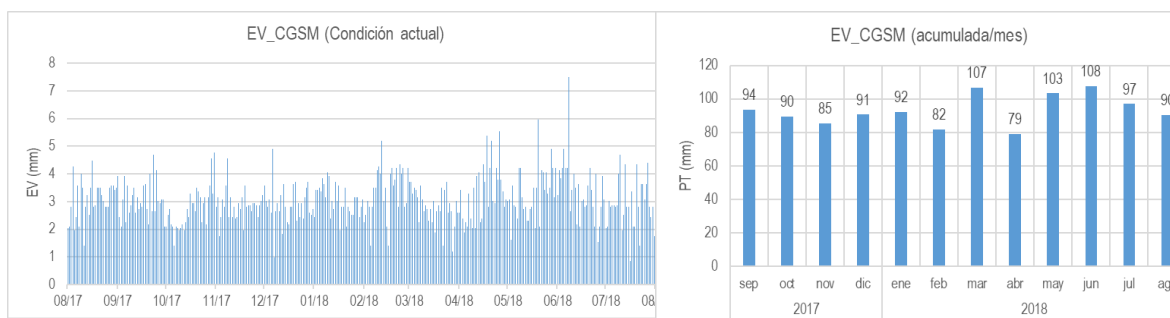


Figura 29 Serie de evaporación diaria de salida al modelo de balance hídrico

Entradas y salida por flujo subterráneo del modelo de balance hídrico integrado

De acuerdo con el Estudio Nacional del Agua – 2014, (IDEAM, 2015) y el trabajo desarrollado por INVEMAR en la caracterización del acuífero Ciénaga – Fundación en la zona costera del departamento del Magdalena; se concluye que se trata de un acuífero de tipo libre a semiconfinado. El estudio de (INVEMAR, 2017) establece que las profundidades a las cuales se encuentra el acuífero libre oscila de 4 a 24 m (ver **Figura 30**), este acuífero está localizado en el costado occidental de la CGSM.

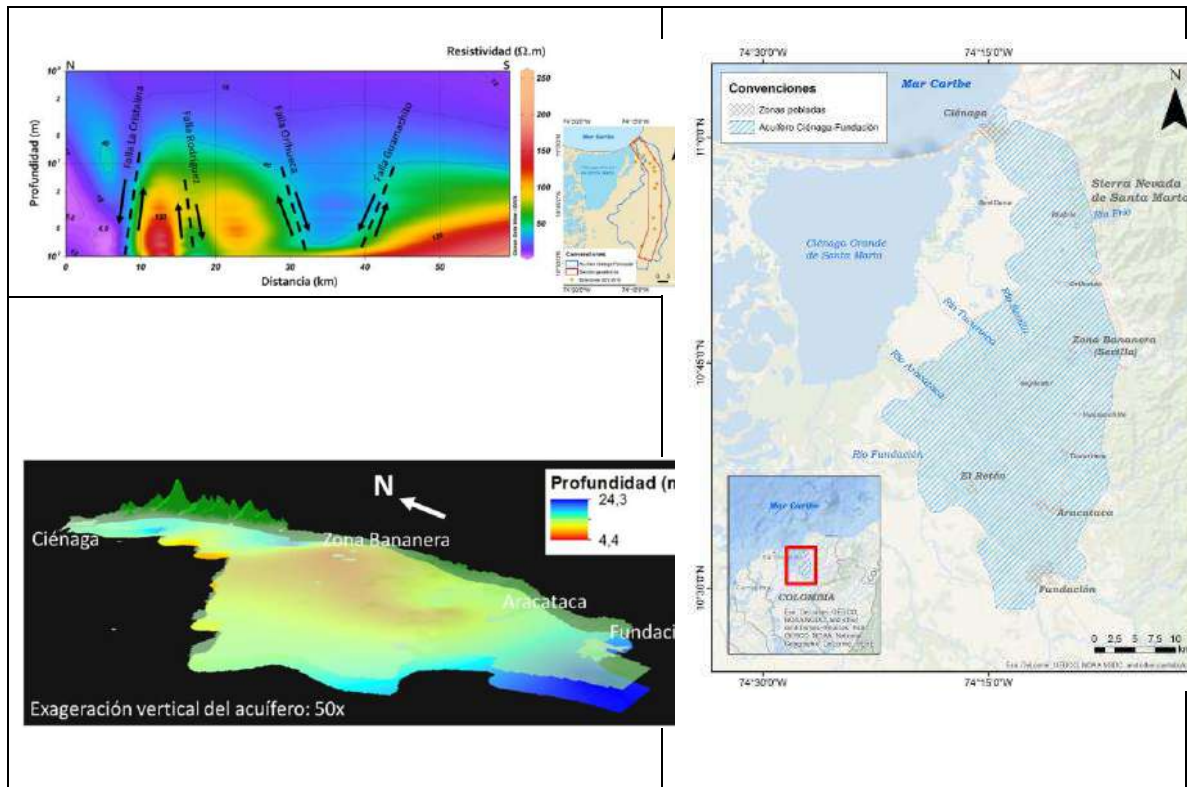


Figura 30 Características del acuífero Ciénaga – Fundación, Fuente: Invemar-2017

Con respecto al cuerpo de agua principal de la Ecorregión Ramsar, INVEMAR desarrolló una investigación de la Dinámica Sedimentológica de la Ciénaga Grande de Santa Marta (INVEMAR, 2015). De acuerdo con los resultados de la descripción sedimentológica de los núcleos obtenidos en el cuerpo principal de la CGSM, la mayoría de sus sedimentos son lodo-arcillosos y lodo-arenosos con contenidos variables de material biogénico, representados generalmente por conchas vacías y fragmentos de estas. Los sedimentos de tamaños más gruesos se encuentran en la parte noreste de la laguna cerca a la boca de la barra, los cuales consisten en arena lodosa, arena fina y arena de tamaño medio a grueso.

En la **Figura 31** se presenta la caracterización litológica de algunos núcleos de sedimentos obtenidos del cuerpo principal de la CGSM.

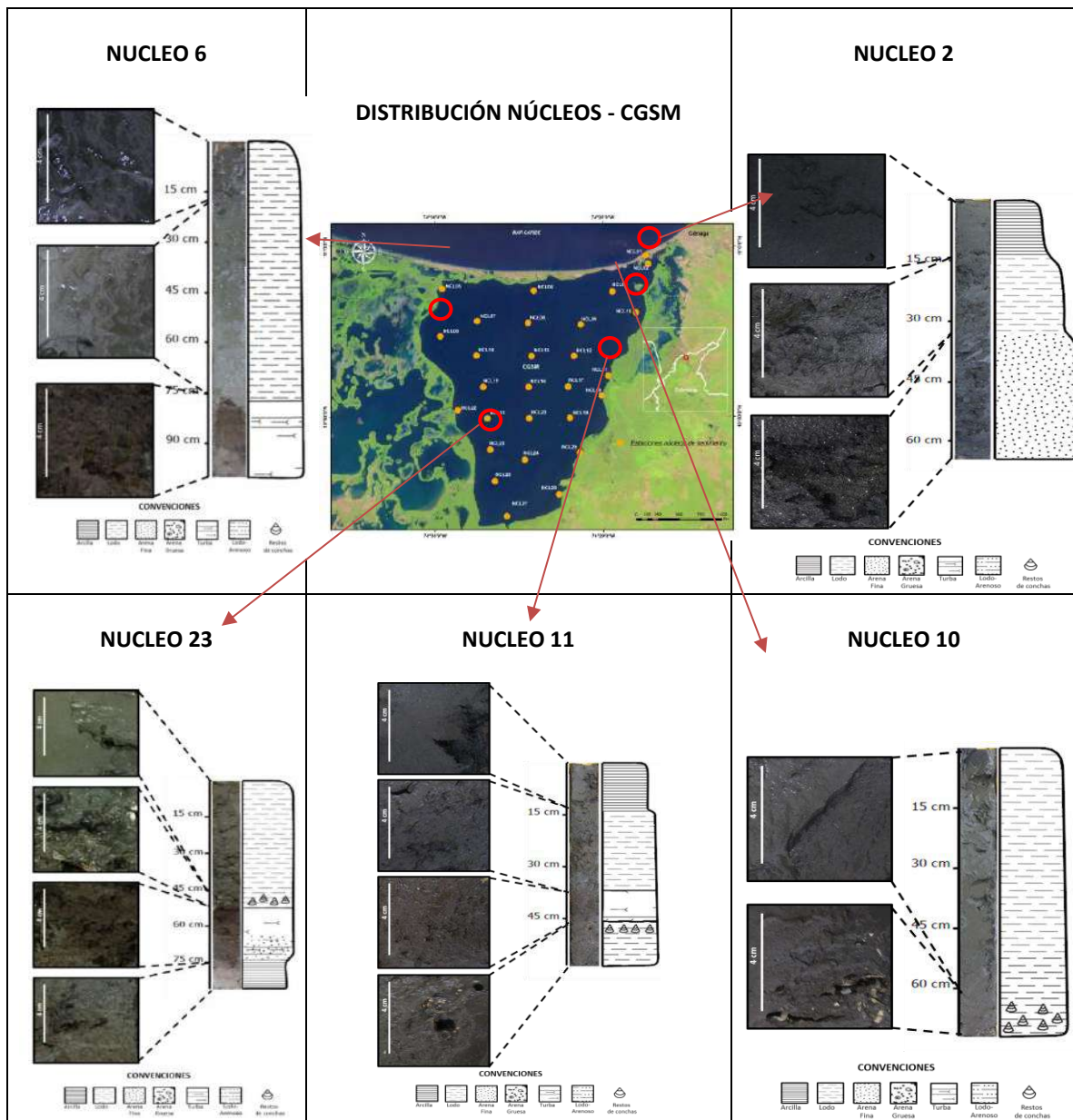


Figura 31 Descripción litológica de Núcleos N° 2, 6, 10, 11, 23 de sedimentos en la CGSM, Fuente: Invemar-2015

De acuerdo con esta caracterización en la que se evidencia una capa impermeable en los primeros 80 cm del fondo de la CGSM, no se espera que exista ni entradas ni salidas de agua subterráneas al volumen de control propuesto para el balance, por tal motivo los valores correspondientes al acuífero se establecen como cero (0) en la Ecuación 2.

Entradas y salida de flujo por bajamar y pleamar en Bocas de La Barra condición horaria del modelo de balance hídrico integrado

Los intercambios de volúmenes de agua entre la ciénaga y el mar Caribe que se efectúan en Boca de la Barra fueron obtenidos del modelo hidrodinámico a resolución horaria, los aportes del mar a la ciénaga ocurrieron principalmente para épocas climáticas de déficit de agua en la ciénaga, particularmente en enero y marzo de 2018.

En la **Figura 32** se pueden observar los volúmenes de intercambio diarios en Mm^3 que recibe y aporta la CGSM al mar Caribe.

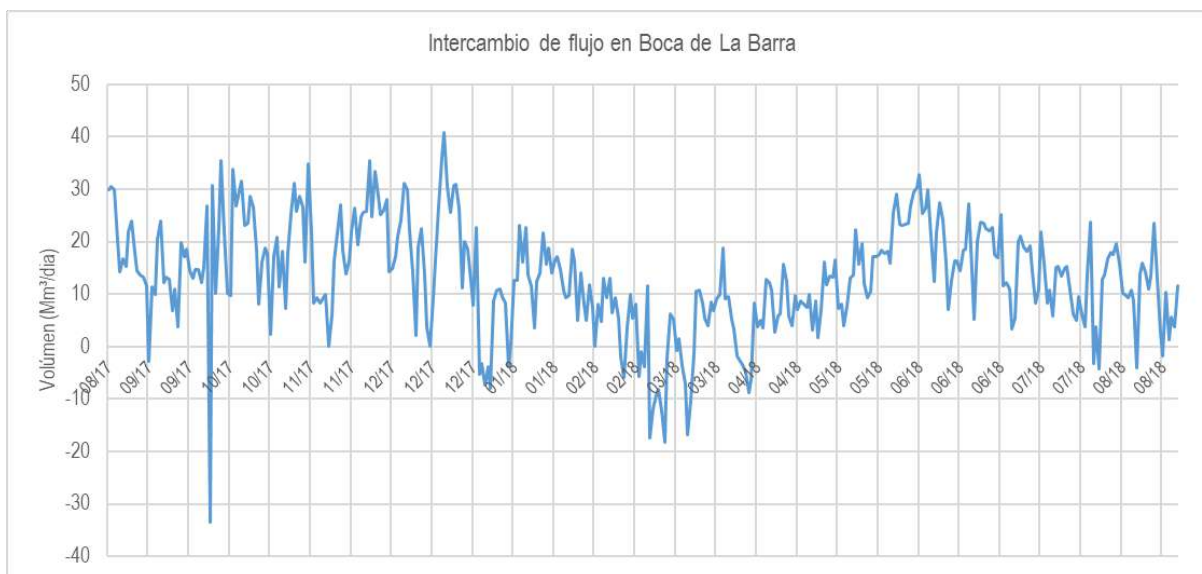


Figura 32 Volumen de agua de intercambio entre la CGSM y el mar Caribe

Los valores negativos de la serie de volúmenes están asociados a la entrada de agua del mar Caribe al cuerpo de agua principal y los valores positivos se asocian a las salidas de la CGSM hacia el mar.

Resultados del balance hídrico de la CGSM para su condición actual

Una vez obtenidos cada uno de los componentes del balance hídrico el procedimiento siguiente fue obtener los déficits y los excesos del sistema, es decir los cambios en el almacenamiento. Como ya se había establecido, los resultados de los cambios en el almacenamiento obtenidos con cada uno de los componentes descritos, será comparado con los resultados de cambio en el almacenamiento del modelo hidrodinámico, este proceso de validación permitirá identificar cual es la variable de mayor sensibilidad en la ecuación de balance hídrico. Los procedimientos realizados, así como la preparación de los componentes del balance se pueden consultar en el **Anexo 3. Balance hídrico**

En la **Figura 33** se presenta el comportamiento del almacenamiento en la CGSM a resolución diaria para el periodo 25 de agosto de 2017 a 31 de agosto de 2018. Las líneas de

color azul representan los resultados del modelo de balance hídrico y las líneas de color rojo las variaciones en el almacenamiento obtenidos del modelo hidrodinámico.

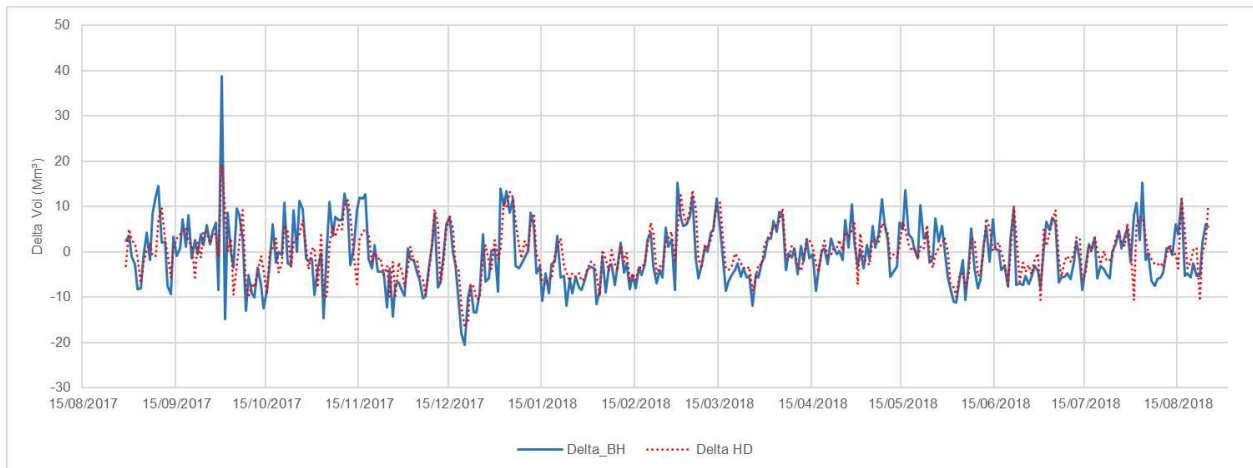


Figura 33 Resultados balance hídrico de la CGSM para su condición actual

Los resultados se consideran satisfactorios, dado que el modelo de balance hídrico representa en términos medios el comportamiento hidráulico del sistema cenagoso, toda vez que se puede interpretar que el modelo hidráulico no contiene variables como la precipitación y evaporación, que si considera el modelo de balance hídrico. Esta correspondencia puede verse en un gráfico de dispersión (ver **Figura 34**) con métrica de desempeño coeficiente de determinación (R^2).

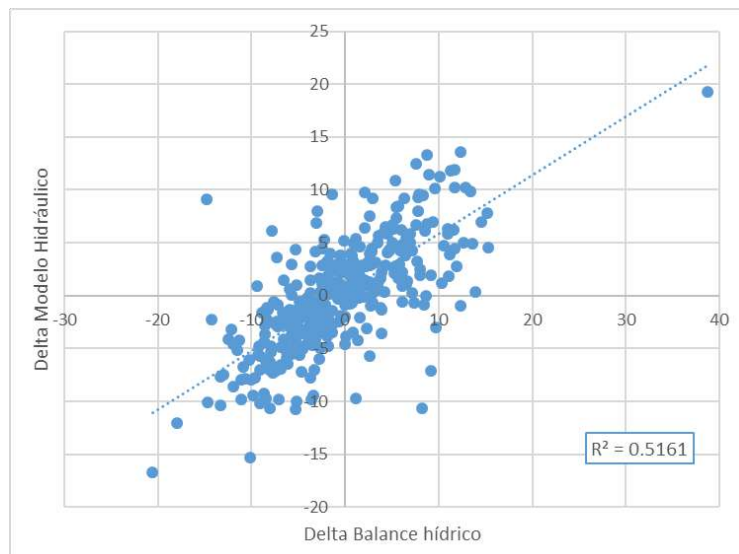


Figura 34 Gráfica de dispersión modelos de balance hídrico e hidráulico

El coeficiente de determinación es bueno ($R^2=0.52$), lo que indica que en un 72% el modelo de balance hídrico describe el comportamiento hidráulico de la CGSM, al incorporar variables como la precipitación y evaporación a un modelo hidrodinámico, la correspondencia se espera mejore en gran proporción, ya que estas variables, sobre todo la evaporación extrae un volumen importante de agua del sistema, mejorando la serie en los periodos de mínimos, y la precipitación aporta a mejorar la serie en épocas de mayor humedad.

En la **Figura 35** se presenta en términos promedios, las diferencias en almacenamiento mensual durante el periodo de análisis.

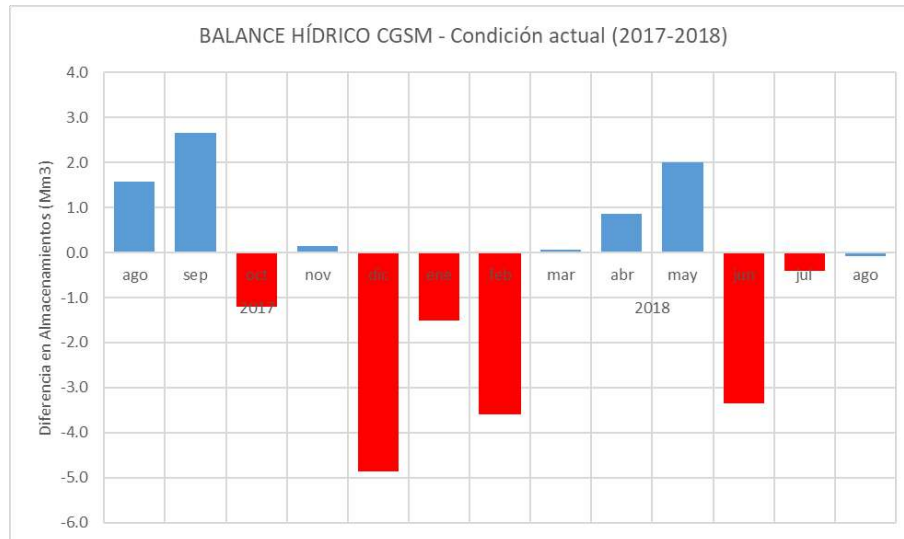


Figura 35 Balance hídrico CGSM, períodos de déficit y excesos condición actual

Llama la atención que durante el periodo de análisis (condición actual), el ecosistema estuvo mayormente en déficit, siendo el mes de diciembre de 2017 el más deficitario con casi 5 Mm³/mes menos. Adicionalmente el mes de octubre en el que las precipitaciones en la zona son mayores y por ende el aporte de caudal, se obtuvo un déficit en la ciénaga por orden de 1.2 Mm³/mes.

Finalmente, en la **Figura 36** se presentan los intercambios de volúmenes de agua en Mm³ para la topología del modelo de balance hídrico propuesto; adicionalmente se expresan estos volúmenes promedio anuales en caudal (m³/s) variable que es quizá de mejor manejo por algunos sectores.

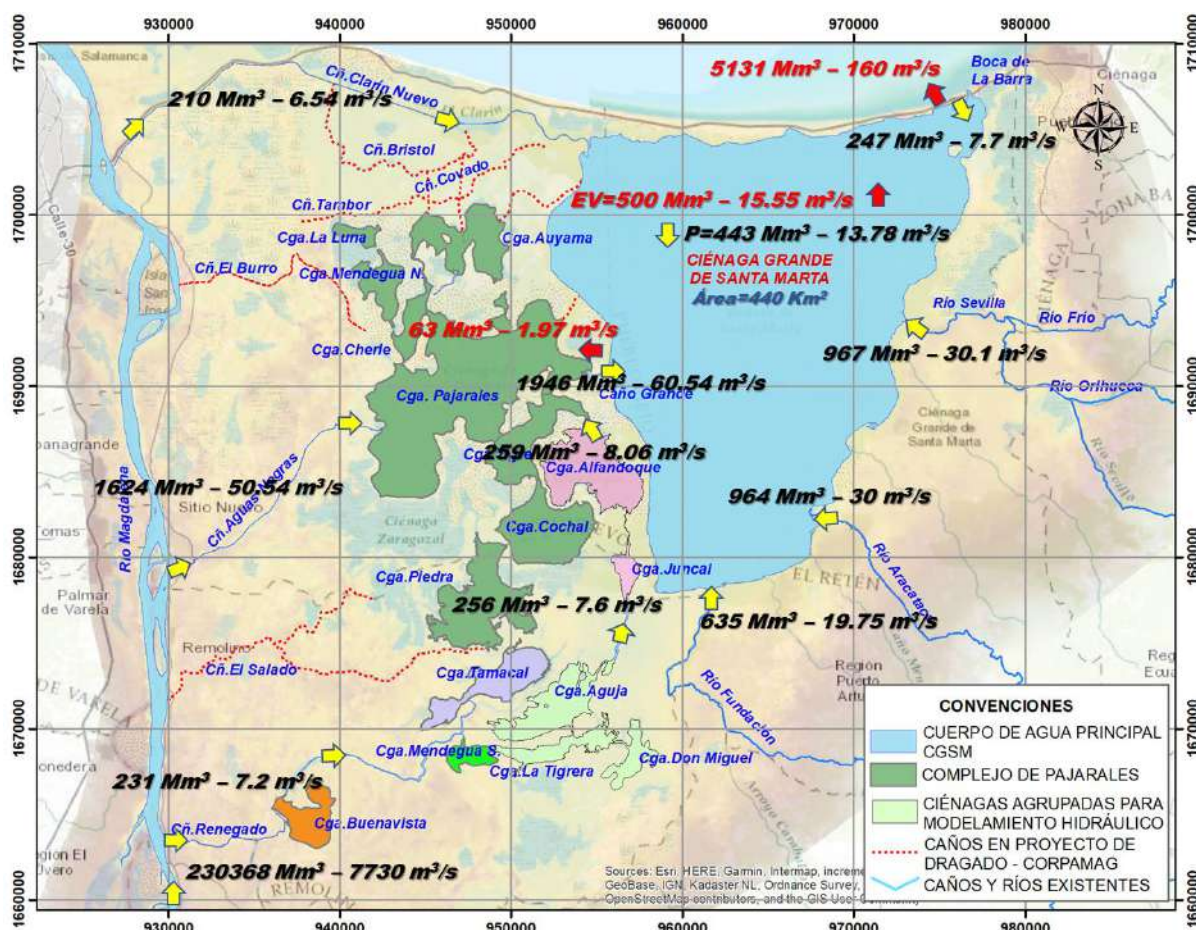


Figura 36 Distribución espacial del volumen de agua en (Mm³) para la condición actual de la CGSM

Al contabilizar las entradas y salidas de agua del sistema, se logró de manera agregada obtener órdenes de magnitud de los intercambios a nivel anual, en la **Tabla 6** se pueden consultar los valores agregados del balance hídrico de la CGSM para la condición actual.

Tabla 6 Balance hídrico agregado de la CGSM condición actual

Variable	Vol. (Mm ³)
Entradas	5412
Salidas	5696
Déficit	-284
Cota (0 msnm)	663.3

Residual	380
----------	-----

El valor del volumen presentado para la variable Cota (cero (0) msnm), corresponde al volumen de la CGSM obtenido de la curva cota – volumen derivada del modelo topobatimétrico (ver **Figura 37**).

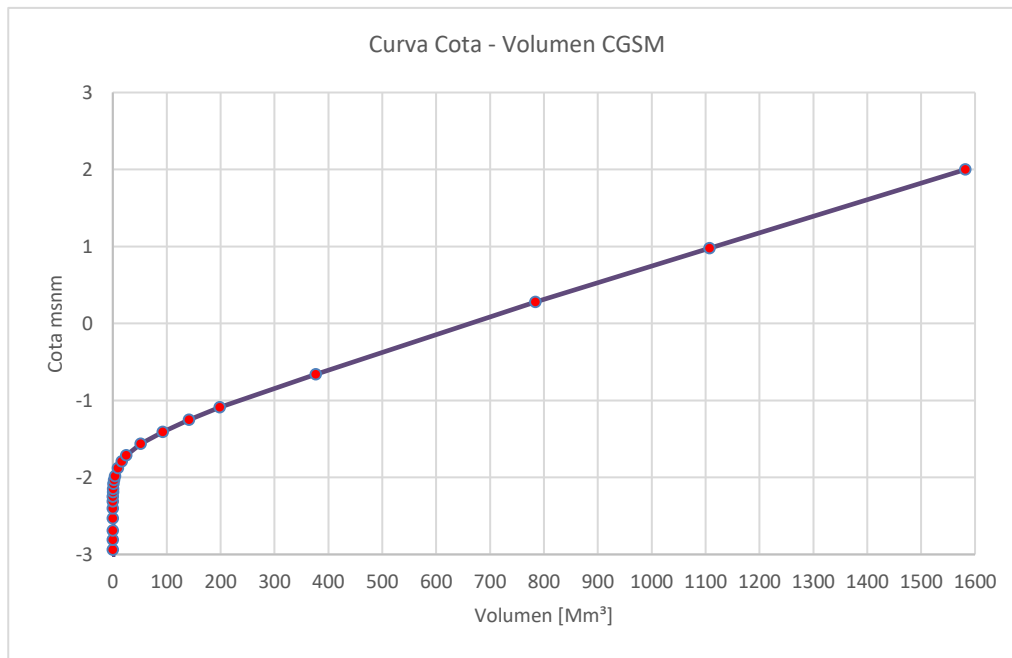


Figura 37 Curva cota – volumen de la CGSM

Según esta curva para las condiciones de balance del sistema la CGSM en una cota de (0) msnm, tiene un volumen de 663.3 Mm³, esto considerando el sistema en equilibrio, si se compara con el obtenido del balance hídrico agregado anual se estima un valor residual de 380 Mm³, es decir que este valor fue el almacenamiento mínimo que la CGSM alcanzó para el periodo en estudio.

3.2 Análisis de variabilidad climática

De acuerdo con (Pabón C, 2011), la variabilidad climática se define como las fluctuaciones del clima en diferentes escalas temporales como meses, años o decenios, registrando valores por encima o por debajo de las condiciones normales. Esta diferencia es perturbada cuando cada una de esas fluctuaciones en sus respectivas escalas de tiempo, (intraestacional, interanual, inter-decadal y secular), interactúan entre sí de manera que intensifican o debilitan los parámetros meteorológicos.

Para Colombia, la variabilidad climática está condicionada por procesos geofísicos desde la escala horaria hasta la escala interanual, entre ellos el ciclo diurno de temperaturas, las ondas tropicales del este, el ciclo semi-anual debido al paso de la ZCIT, El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), y la Oscilación Inter Decadal del Pacífico (Poveda, 2004).

Con el fin de establecer la afectación de fenómenos regionales como el Niño sobre el régimen climático de la Ecorregión Ramsar, se determinó el grado de asociación lineal entre los distintos índices que monitorean las oscilaciones en el clima a nivel global y regional (NOAA¹), con series de precipitación y caudal lo suficientemente representativas del territorio. Así como, la identificación de periodos extremos con base en la anomalía de las series (diferencia entre el valor registrado de la variable y su promedio anual).

La identificación de la variabilidad climática y los fenómenos macroclimáticos se abordó desde un análisis de teleconexiones, el cual consiste en una serie de correlaciones cruzadas entre las series de precipitación, caudales y las fases de humedad a resolución mensual, contra los índices océano- atmosféricos.

Fases de humedad y anomalías de caudales

Con el fin de establecer los ciclos de humedad para la identificación de escenarios extremos, es necesario construir la **curva de diferencias integrales** (Domínguez, Dawson, Ramírez, & Abrahart, 2011), la cual representa un balance de masa en el tiempo; es decir, identifica la fase de humedad del régimen hídrico.

Para construir la curva de diferencias integrales se siguen los siguientes pasos:

Se estiman el promedio y el coeficiente de variación C_v de la serie de caudales (observados o simulados).

$$\bar{Q} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{n}$$

Ecuación 4

$$C_v = \frac{\sigma_Q}{\bar{Q}}$$

Ecuación 5

Se calcula el coeficiente modular

$$k_i = \frac{Q_i}{\bar{Q}}$$

Ecuación 6

¹ <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>

Se evalúan las ordenadas de la curva de diferencia integral ξ_i cómo

$$\xi_i = \sum_{i=1}^n \frac{(k_i - 1)}{C_v} \quad \text{Ecuación 7}$$

Sí la diferencia $\sum_{i=1}^{n_1} (k_i - 1) - \sum_{i=1}^{n_2} (k_i - 1)$ es menor que cero el periodo de tiempo $T_2 - T_1$ comprende una fase de baja humedad, si por el contrario es mayor que cero será una fase de alta humedad. Para que la serie hidrológica sea representativa se requiere que la curva de diferencias integrales contenga igual número de fases de alta y baja humedad. Numéricamente, la representatividad en este sentido se puede establecer calculando el coeficiente modular promedio de n registros:

$$\bar{k} = 1 + \frac{[\sum_{i=1}^{t_2} (k_i - 1)_f - \sum_{i=1}^{t_1} (k_i - 1)_c]}{n} \quad \text{Ecuación 8}$$

Cuán más cerca esté \bar{k} de 1 cuanto más representativa será la longitud n de la serie de caudales anuales, dado que el promedio de la muestra estará muy cercano al promedio del proceso general.

Siguiendo este procedimiento, en la **Figura 38** se pueden identificar las fases de humedad del río Magdalena a la altura de Calamar (Cód. 29037020), la tendencia de sus valores indican que la fase actual del río es de una fase seca, este sistema hídrico es muy vulnerable a los cambios hidrológicos y eventos de variabilidad climática, se observa que los porcentajes de variación de la oferta ante eventos extremos oscilan entre el – 40 % en déficit y 40% de excesos (anomalías).

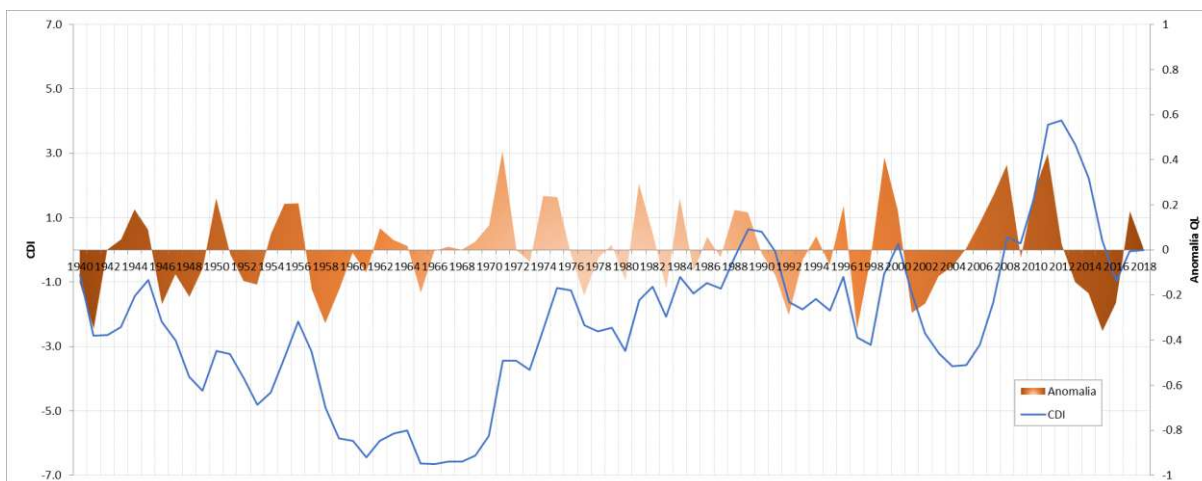


Figura 38 Curva de diferencia integrales y anomalías de caudales medios en la estación Calamar (29037020)

Índices océanos atmosféricos

Estos índices pueden dividirse entre los que representan las Teleconexiones climáticas, la Temperatura Superficial del Océano Pacífico (SST Pacífico) y la atmósfera sobre éste, especialmente en la franja tropical, y los representativos de la Temperatura Superficial del Océano Atlántico (SST Atlántico) y su atmósfera, así como los que monitorean el ENSO en el pacífico tropical, los cuales han sido divididos en un número de zonas llamadas Niño 1, 2, 3, 4, y 3.4 (el cual es un traslape de las regiones 3 y 4).

El Centro de Predicciones Climáticas (CPC - The Climate Prediction Center) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos (NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration), ha generado información semanal de estos índices a partir de 1990 y mensual desde 1950, mientras la División de Ciencias Físicas (PSD - Physical Sciences Division) de la NOAA, tiene información mensual de las regiones conjuntas Niño 1 y 2 desde 1948 (Niño 1 + 2).

En la **Tabla 7** se describen los índices Océano Atmosféricos objeto de los análisis de este POMCA.

Tabla 7 Índices Océano Atmosféricos

ACRÓNIMO	ÍNDICE	DESCRIPCIÓN
PNA	Patrón del Pacífico y América del Norte	Patrón de variación de baja frecuencia en la circulación atmosférica y teleconexión sobre el Pacífico Norte y América del Norte
WP	Índice del Pacífico Oeste	Cambios en la locación e intensidad de la corriente de chorro del Pacífico Norte

ACRÓNIMO	ÍNDICE	DESCRIPCIÓN
NAO	Oscilación del Atlántico Norte	Cambios en la intensidad y posición de la corriente de chorro del Atlántico Norte, de la trayectoria de las tormentas y con el transporte de calor y humedad sobre el Atlántico Norte
PDO	Oscilación Decadal del Pacífico	Variabilidad interanual e inter-decadal del Pacífico Norte
SOI	Índice de la Oscilación del Sur	Variabilidad interanual de la posición geográfica e intensidad de los centros de baja y alta presión sobre el Pacífico Sur Ecuatorial (ENSO).
QBO	Oscilación bienal	Oscilación bianual de los vientos zonales en la estratósfera sobre el ecuador
MEI	Índice Multivariado del ENSO	Variabilidad interanual del ENSO sobre el Pacífico Tropical
Niño 1+2	Índices del ENSO	Efectos de la variabilidad interanual del ENSO sobre la TSM en distintas regiones del Pacífico Tropical.
Niño 3		
Niño 4		
Niño 3.4		
BEST	Serie bivariado del ENSO	Variabilidad interanual de los procesos oceánicos y atmosféricos relacionados al ENSO sobre el Pacífico Sur Ecuatorial
ONI	Índice de la Oscilación del Norte	Eventos climáticos tropicales (ENSO) y extra tropicales sobre el Pacífico Norte
TNI	Índice Trans-Niño	Evolución del ENSO en el Pacífico Tropical.
WHWP	Alberca Cálida Occidental	Anomalías de la TSM de la región del Pacífico Oriental Tropical, Golfo de México y Mar Caribe con TSM > 28,5°C
TNA	Índice del Atlántico Norte/Sur tropical	Variabilidad de la TSM en la parte tropical del Atlántico Norte/Sur
TSA		
AMO	Oscilación Multi-decadal del Atlántico	Variabilidad decadal de la TSM en el Atlántico Norte
CAR		
TNI		
HURACANES	HURACANES	

3.3 Modelo sedimentológico

Antes de abordar la conceptualización o implementación de algún modelo numérico que dé cuenta del transporte y deposición de los sedimentos producidos en la cuenca del río Magdalena – Cauca y la producción de la vertiente occidental de la SNSM, se procedió a indagar la información histórica de los sedimentos en suspensión y formular un modelo conceptual de la producción de sedimentos que potencialmente llegarían al complejo lagunar y CGSM. Los procedimientos realizados se pueden consultar en el **Anexo 3. Modelo conceptual sedimentológico**.

En la **Figura 41** se presenta el esquema topológico de las cuencas productoras y las estaciones hidrológicas en las que se tienen registros de transporte diarios de sedimentos en suspensión. En particular, el transporte que se realiza por las derivaciones del río Magdalena: caño Renegado, Aguas Negras y Clarín, se obtuvo con los caudales modelados y la ecuación de concentración de sedimentos en suspensión (Kg/m^3) obtenida por (Restrepo Angel, 2005) a la altura de la estación Calamar (29037020), cuya dispersión se puede consultar en la **Figura 39**.

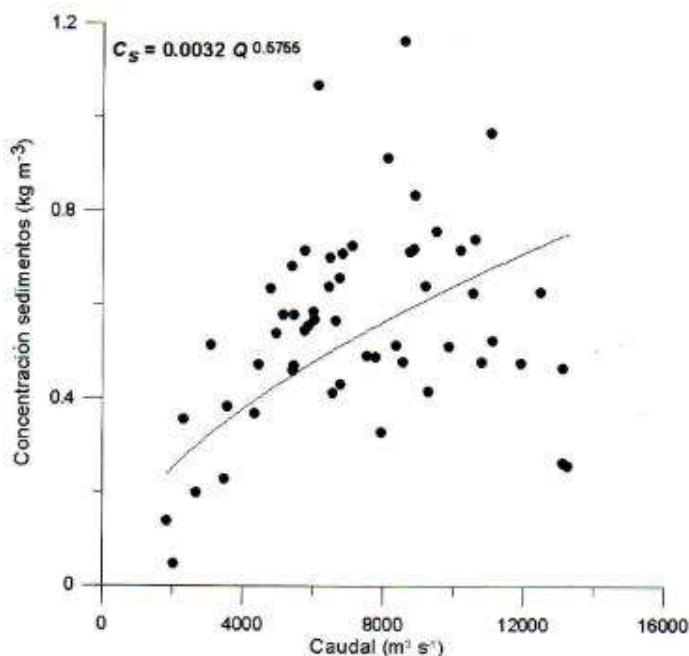


Figura 39 Curva y ecuación de calibración del río Magdalena en Calamar, Fuente: (Restrepo Angel, 2005)

De acuerdo con Restrepo, la variabilidad temporal del transporte de sedimentos tiene una fuerte correlación con el caudal del río, variando ampliamente de un periodo climático a otro y en descargas específicas de agua, siendo producto principalmente de: i) el efecto de "histéresis", ii) de los cambios morfológicos en eventos climáticos extremos, iii) del cambio climático y iv) de otros procesos como los inducidos por el hombre (deforestación, agricultura, minería, ganadería, urbanización). En particular la "histéresis" se refiere a la

variación temporal en la concentración de sedimentos en suspensión para diferente tipo de flujo o caudal.

A la altura de la estación Calamar, IDEAM cuenta con una serie de más de 40 años de datos diarios de transporte de sedimentos expresado en Kton/día. En la **Figura 40** se puede consultar su régimen. Se estima según esta información que la entrada de material en suspensión por el río Magdalena sin descontar lo que por el canal del dique se evacua, es del orden de las 396 Kton/día, es decir 144.5 GTON/año.

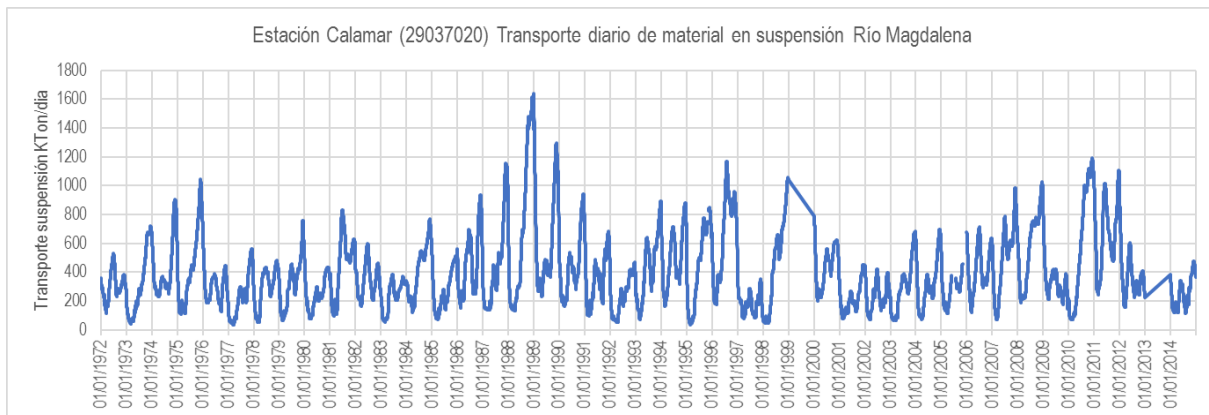


Figura 40 Serie histórica de transporte diario de sedimentos en suspensión río Magdalena

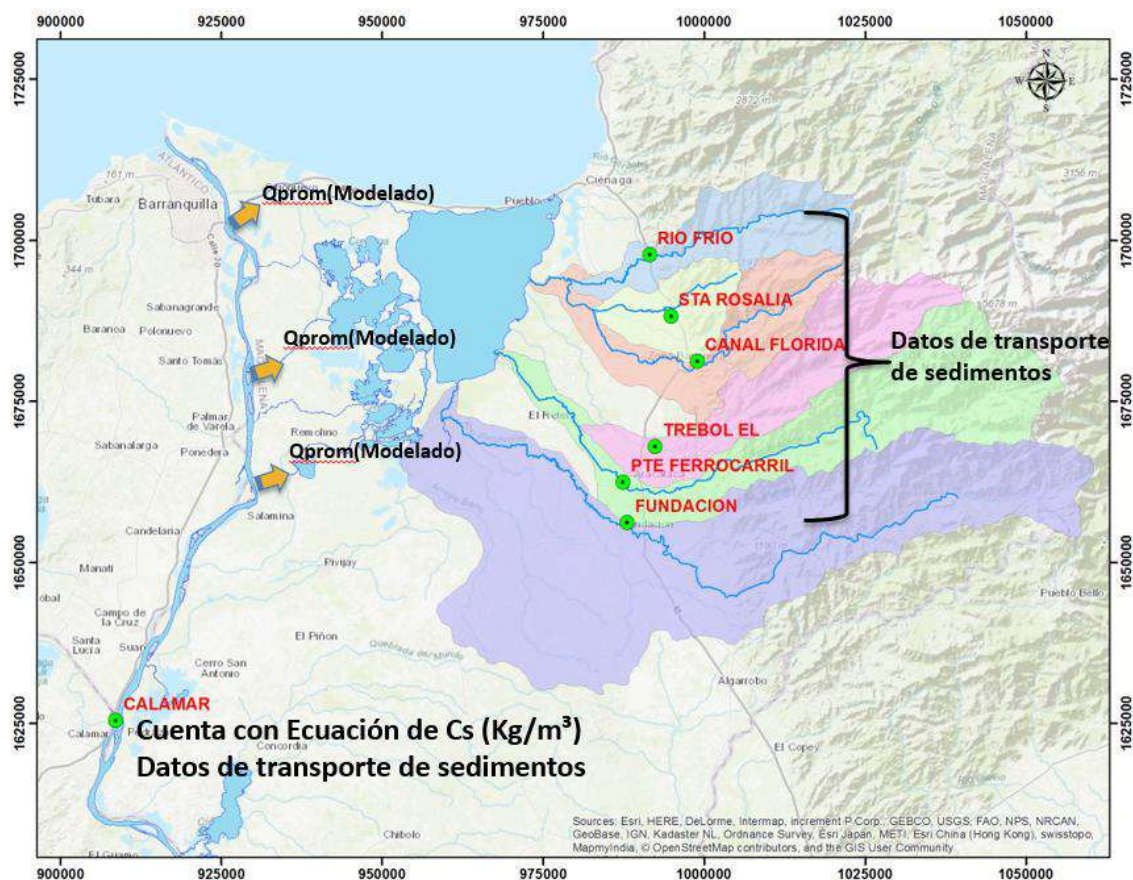


Figura 41 Topología modelo sedimentológico del complejo lagunar CGSM

Con las series de caudal diario en cada una de las derivaciones (caños) y empleando la ecuación de concentración de sedimentos en suspensión se obtuvo el transporte total para el año 2016. En la **Tabla 8** se pueden consultar las cargas de sedimentos que potencialmente ingresarían al complejo cenagoso por el río Magdalena.

Tabla 8 Transporte potencial de sedimentos en suspensión anual por los caños Renegado, Aguas Negras y Clarín Nuevo

Caño	Transporte Ton/año
Renegado	79644
Aguas Negras	209753
Clarín Nuevo	8760
Total	298157

Con respecto a la carga de sedimentos en suspensión de los ríos que drenan de la SNSM, el cálculo se obtuvo con el valor medio de transporte diario medido hasta la estación hidrológica en un periodo promedio 30 años (1982 a 2012). Adicionalmente se presenta la producción total anual de cada cuenca con cierre en la estación hidrológica.

Tabla 9 Transporte de sedimentos en suspensión anual de los ríos de la SNSM

Estación hidrológica	Río	Área Km²	Transporte Ton/año	Producción Ton/(Km²*año)
Fundación	Fundación	1010	89898	89,0
Pte. Ferrocarril	Aracataca	759	35874	47,3
El Trébol	Tucurínca	433,62	39846	91,9
Santa Rosalia	Orihueca	58,5	3650	62,4
Río Frío	Río Frío	320	32429	101,3
Canal Florida	Río Sevilla	248	18040	72,7
		Total	219736,5	

La cuenca de mayor producción de sedimentos por km² es la del río Frío con un total de 101,3 Ton/(km²*año). Agrupando los valores obtenidos de carga de sedimentos para los tres ríos afluentes directos a la CGSM se tiene:

- Río Fundación carga a la CGSM 90.000 Ton/año
- Río Aracataca carga a la CGSM 75.700 Ton/año
- Río Sevilla carga a la CGSM 54.120 Ton/año

Para un total aproximado de 220.000 Ton/año.

En la **Figura 42** se preparó la topología del modelo sedimentológico conceptual de producción y carga de sedimentos en suspensión para la CGSM.

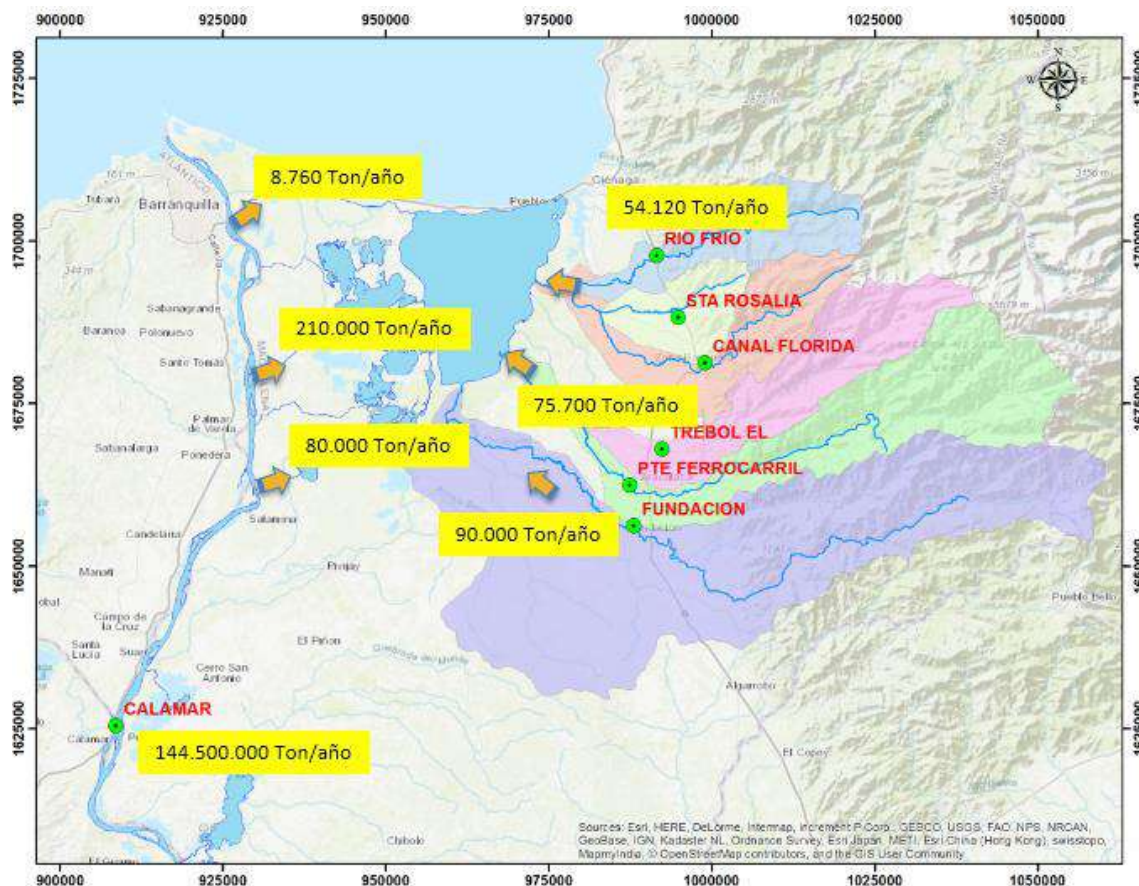


Figura 42 Topología del modelo conceptual sedimentológico

La información presentada hasta este momento del modelo conceptual hace referencia a cargas en suspensión de sedimentos que potencialmente ingresan a la CGSM y su complejo cenagoso, se contabiliza un total de 518.000 Ton /año de ingreso por todos sus flancos, información que no incluye la carga del material del lecho, tema que abre otra brecha en la investigación.

El análisis que se presenta a continuación se basó en las imágenes disponibles en la plataforma Planet Explorer (www.planet.com), actualmente usada por el IGAC para la adquisición de imágenes de alta resolución a nivel nacional (3 a 5 m de resolución espacial, tales como RapidEye, Sentinel 2, PlanetScope).

La imagen de la **Figura 43** fue capturada por el sensor el 16 de junio de 2018 para toda la ecorregión Ramsar, en ella se puede apreciar la pluma de sedimentos que se genera por las descargas de los ríos Fundación y Aracataca, siendo la pluma del río Aracataca la que representa mayor zona de mezcla dentro del cuerpo de agua. Recurriendo a los datos que IDEAM tiene disponibles en su página web mediante la plataforma FEWS (<http://www.ideam.gov.co/web/agua/fews>), se consultó el caudal registrado en la estación Puente Ferrocarril para la fecha indicada de captura de la imagen.

En la **Figura 44** se aprecia el entorno de la plataforma FEWS y los valores de caudales del río Aracataca a la altura de la estación Puente Ferrocarril.

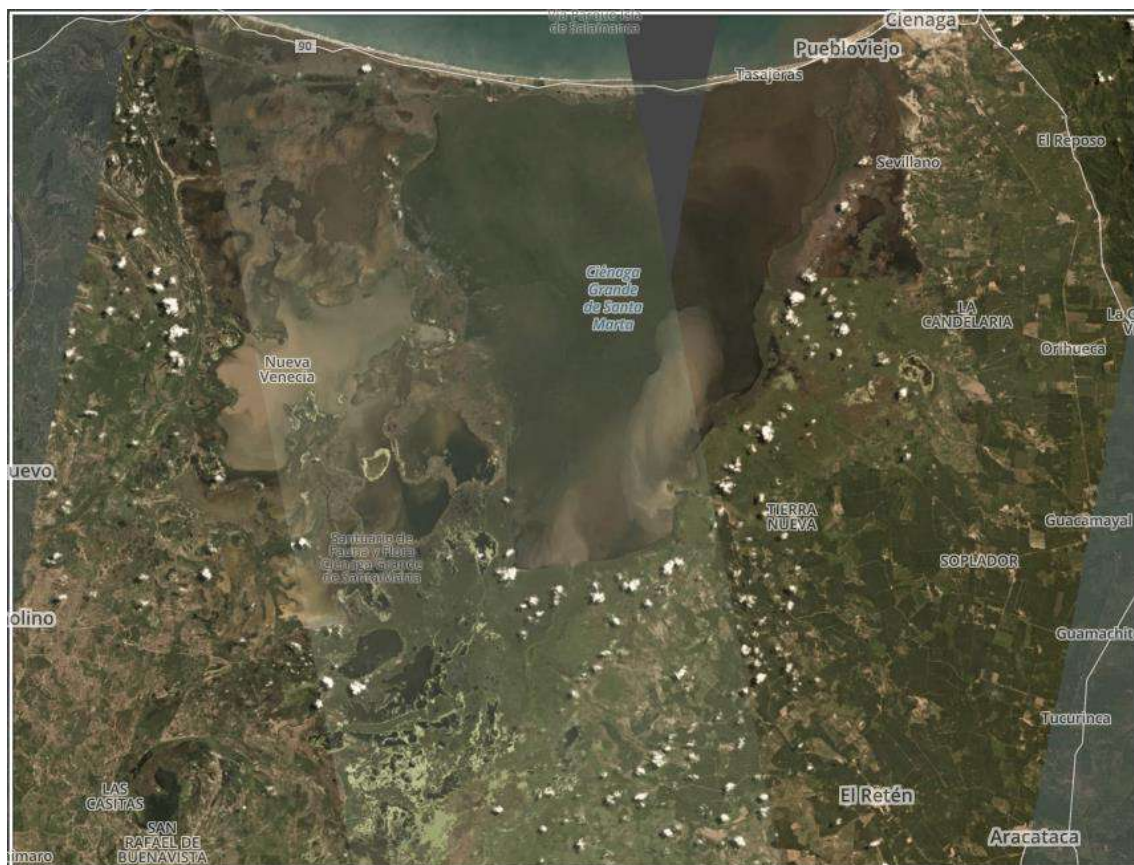


Figura 43 Imagen PlanetScope Scene (3m) de la CGSM para el día 16 de junio de 2018

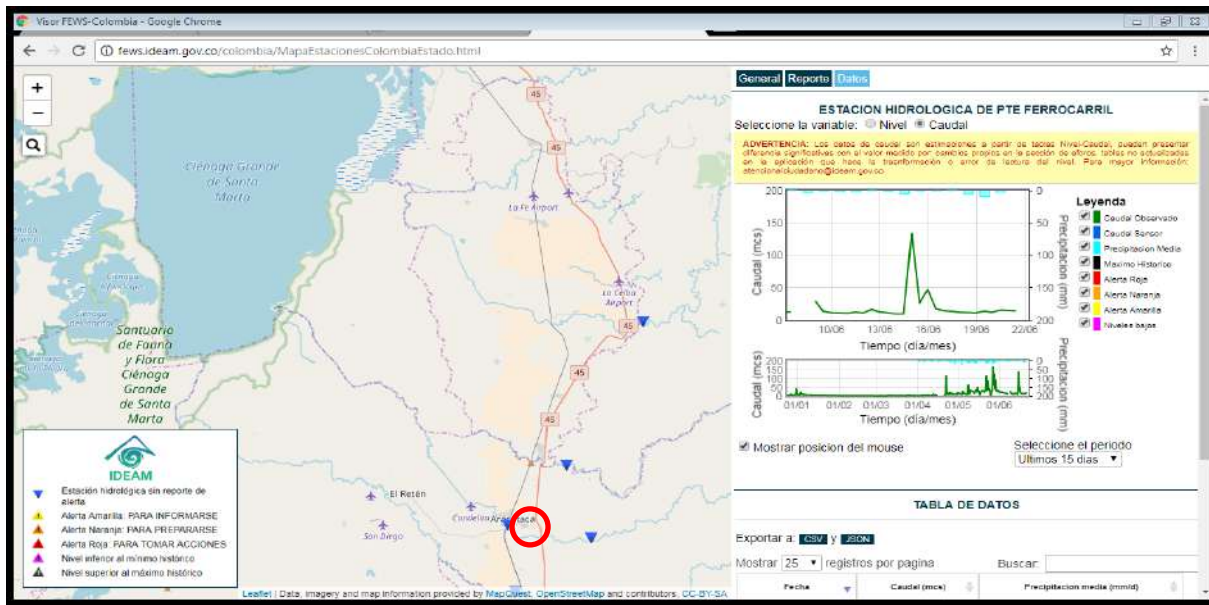


Figura 44 Plataforma FEWS Colombia del IDEAM para consultas de series de tiempo en línea

Se identifican dos picos o crecientes súbitas de caudales que corresponden eventos ocurridos el 14 de junio de 2018 a las 6 pm con una magnitud estimada por curva de gastos de $133.6 \text{ m}^3/\text{s}$ y el otro el 15 de junio a las 6 pm de $47.05 \text{ m}^3/\text{s}$. Si la imagen es del 16 de junio de 2018, puede inferirse que cuando ocurren este tipo de eventos hidrológicos en la cuenca, es tanto el aporte del río al sistema cenagoso que la pluma puede alcanzar una difusión de hasta 10 km.

Lo anterior puede ser una herramienta de validación en aras de la construcción de un modelo numérico Hidrosedimentológico para la CGSM, que dé cuenta de la dispersión de los sedimentos en suspensión principalmente.

4. Conclusiones y recomendaciones

La compleja conectividad hidráulica entre caños, canales, ciénagas y áreas inundables de la Ecorregión Ramsar de la CGSM fue simplificada topológicamente para la condición actual del hidrosistema. Se entiende que en la actualidad son muchos los caños y canales, así como pequeñas ciénagas que han perdido su capacidad hidráulica y por ende la conexión con todo el complejo cenagoso, los caños El Salado, canal La Ceja – (El Burro), están siendo objeto de dragado y rectificación de su sección hidráulica. Caños como Bristol, Covado, Tambor y Auyama son proyectos que está desarrollando CORPAMAG para futuros dragados con el ánimo de llevar agua dulce a ciénagas y recuperar la conectividad del complejo y por ende la de Manglares.

Los trabajos desarrollados por (Deeb, 1993), enmarcados en el PLAN DE RECUPERACIÓN DEL COMPLEJO LAGUNAR DE LA CGSM, se actualizan con esta nueva propuesta de conectividad y condición hidroclimática resiente.

Los resultados del balance hídrico junto con el modelo hidrodinámico de la CGSM se esperan sean herramientas para la toma de decisiones en cuanto a la pertinencia y conveniencia de dragar canales internos para dulcificar algunas zonas del complejo cenagoso, máxime si estas derivaciones se plantean sin considerar escenarios reales como el viaducto de la doble calzada Ciénaga – Barranquilla (kilómetro 19), en el cual se consideraría un nuevo punto de intercambio (mar-ciénaga), similar al de Bocas de la Barra en cuanto a dinámica hídrica.

El modelo de balance hídrico debe estar en una actualización periódica toda vez que los caños El Burro y El Salado, se presentan en la topología como futuras entradas al modelo de balance, en la actualidad su adecuación está en proceso y no se han aperturado sus bocas desde el río Magdalena.

Con respecto a la oferta real de los ríos que drenan de la Sierra Nevada de Santa Marta y que finalmente confluyen por el costado oriental de la CGSM una vez irrigan la zona bananera (Fundación, Aracataca y Sevilla), cobra vital importancia para el proyecto la continuidad en las mediciones (nivel – caudal) de las estaciones nuevas localizadas sobre estos sistemas hídricos, ya que así se contaría con valores más precisos de oferta neta y no estimaciones como la realizada en este estudio.

La precipitación es el parámetro de mayor sensibilidad en el cálculo del balance hídrico, por ende se hace necesario emprender proyectos para la densificación de la red de medición de lluvia en la Ecorregión; de los resultados obtenidos se encontró que la estación La Esperanza (29060180) es la que mayor influencia tiene sobre el cuerpo de agua, durante el año 2016 registró una lluvia total de 1298 mm/año, valor muy alejado de los establecidos en algunas publicaciones que citan valores de 600 mm/año en el cuerpo de ciénaga. Los meses de mayor precipitación son mayo, septiembre, octubre y parte de noviembre.

La evaporación es el parámetro más homogéneo en todo el sistema (1700 mm/año en promedio), el método de Reservorio adaptado por el Buró Climático de los Estados Unidos (USWB por sus siglas en inglés) y empleado para la estimación de este parámetro en el estudio, arrojó resultados muy similares a los medidos por tanque evaporímetro en algunas

estaciones, esto lleva a pensar que con la ubicación de algunas estaciones climatológicas automáticas en sitios estratégicos del complejo que registren variables como: temperaturas, brillos solar, humedad relativa, radiación, velocidad y dirección del viento, se puede estimar indirectamente la evaporación.

La hipótesis planteada en cuanto a: las entradas y salidas de agua subterránea al sistema no son significativas y se consideran cero (0), en sí, por la caracterización litológica de algunos núcleos de sedimentos obtenidos del cuerpo principal de la CGSM, fue corroborada de acuerdo con los resultados del balance hídrico en el que no hizo falta agua para su cierre.

Los resultados del balance hídrico se consideran satisfactorios, dado que dicho modelo representa en términos medios y bajos el comportamiento hidráulico del sistema cenagoso.

Durante el periodo 2016 la CGSM estuvo en estrés hídrico o déficit en los meses de enero, febrero y julio, siendo el mes de enero el más crítico, con casi 2.5 Mm³ menos de agua. Caso opuesto a octubre, mes en que se recibió un exceso de 6 Mm³ en promedio de agua. Estos resultados y su buena correspondencia para el cierre del balance corroboran que los intercambios con el acuífero son nulos.

De acuerdo con el modelo conceptual hidrosedimentológico, se estimó una carga potencial de sedimentos en suspensión de 518.000 Ton/año de ingreso al sistema cenagoso, información que no incluye la carga del material del lecho, tema que abre otra brecha en la investigación.

Se recomienda la continuidad en el estudio del modelo hidrosedimentológico de la CGSM, así como las mediciones de aforos sólidos en las entradas conceptuadas, esto con el fin de estimar y conocer los valores de depósito y zonificación de la CGSM en cuanto a sedimentación.

5. Bibliografía

- Chow, V., Maidmente, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada* (McGraw-Hil). Bogota, Colombia.
- Deeb, S. PLAN DE RECUPERACIÓN DEL COMPLEJO LAGUNAR DE LA CGSM (1993).
- Díaz-Granados O., M., Alejandro Camacho, L., & Maestre, A. (2001). MODELACIÓN DE BALANCES HÍDRICOS DE CIÉNAGAS FLUVIALES Y COSTERAS COLOMBIANAS. (Spanish). *Revista de Ingeniería*, (13), 12–20. Retrieved from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=agh&AN=20248147&lang=es&site=ehost-live>
- Garcia, M., Peters-Lidard, C. D., & Goodrich, D. C. (2008). Spatial interpolation of precipitation in a dense gauge network for monsoon storm events in the southwestern United States. *Water Resources Research*, 44(5), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2006WR005788>
- IDEAM. (2004). *Guía para el Monitoreo y Seguimiento del Agua- Mediciones Hidrométricas* (1st Editio). Imprenta Nacional de Colombia.
- IDEAM. (2015). *Estudio Nacional del Agua 2014*. Bogota, D.C.
- INVEMAR. (2015). *DINÁMICA SEDIMENTOLÓGICA DE LA CIÉNAGA GRANDE DE SANTA MARTA*. Sanra Marta D.T.C.H.
- INVEMAR. (2017). *CARACTERIZACIÓN DEL ACUÍFERO CIÉNAGA-FUNDACIÓN EN LA ZONA COSTERA DEL DEPARTAMENTO DE MAGDALENA*. Sanra Marta D.T.C.H.
- Luengas C., B. (1989). *Metodología para el Balance Hídrico Nacional*. HIMAT.
- Penman, H. L. (1951). The water balance of catchment areas. *IAHS Publications*, (346).
- Restrepo Angel, J. D. (2005). *Los sedimentos del río Magdalena: Reflejo de la crisis ambiental*. Medellín: Fondo editorial Universidad de EAFIT.
- UNIANDES-CETIH. DIAGNÓSTICO SOBRE EL COMPORTAMIENTO HÍDRICO DE LA CGSM (1978).