

METODOLOGÍA DE BALANCE HÍDRICO Y DE SEDIMENTOS COMO HERRAMIENTA DE APOYO PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DEL COMPLEJO LAGUNAR DEL BAJO SINÚ

*Paula Lizet Correa V., Jaime Ignacio Vélez U., Ricardo Agustín Smith Q., Andrés Julián Vélez
Adriana Elizabeth Barrientos & Jesús David Gómez
Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos
Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín
plcorrea@unalmed.edu.co*

Recibido para evaluación: 17 de Septiembre de 2005 / Aceptación: 30 de Septiembre de 2006 / Versión final: 21 de Octubre de 2006

RESUMEN

Para definir un plan de manejo integral adecuado en pro del desarrollo sostenible de los humedales es necesario entender su funcionamiento desde diferentes puntos de vista: hídrico, biótico, sedimentológico, entre otros. La dinámica hídrica determina su funcionamiento y soporta otras dinámicas, debido al efecto sobre las complejas relaciones que ocurren en este tipo de sistemas hídricos; de ahí la importancia que tiene en el estudio de humedales. En este trabajo se presenta una metodología de balance hídrico, y una primera aproximación de la aplicación de un modelo de balance de sedimentos como apoyo para la gestión integral de humedales en el complejo lagunar del Bajo Sinú (Córdoba, Colombia) cuya problemática principal es la alteración de la dinámica hídrica debido a la ganadería, la agricultura, el urbanismo, la construcción de vías en su interior y la operación de la central hidroeléctrica de Urrá I. Además, se presentan los resultados de la simulación de tres escenarios, planteados para evaluar: (i) la evolución del complejo bajo condiciones naturales, (ii) de intervención antrópica, y (iii) de operación de la central hidroeléctrica. Con la aplicación del modelo se caracteriza el régimen de caudales, niveles y sedimentos en los principales cauces y ciénagas del sistema, y se cuantifican las tasas de depositación y pérdida de volumen de los principales cuerpos de agua.

PALABRAS CLAVES: Balance Hídrico, Sedimentos, Complejo Lagunar del Bajo Sinú, Simulación, Modelos Hidrológicos, Carga de Sedimentos, Humedales, Cuenca del Río Sinú.

ABSTRACT

A sustainable development plan for the comprehensive management of wetlands requires understanding its hydrology, hydraulics, sediment transport, and biotic dynamics, among others. The hydrological dynamics determines the functioning and supports all related dynamics, due to its strong effect on the complex interactions and relations within these systems. A water budget model and a first approach to a sediment balance model, as a decision support system for the comprehensive management of wetlands is applied to the Bajo Sinú (Cordoba, Colombia) wetland system. Many factors disrupt the natural functioning of this systems, including cattle ranch, agriculture, urbanism, road construction and operation of Urrá I hydropower project. Results of simulation for three scenarios are presented. Such scenarios were proposed in order to take into account uncertainties in the region future developments. The scenarios were developed in order: (i) to evaluate the evolution of the wetland complex system under natural conditions, (ii) to compare the previous results with man made interventions (road construction, urbanism, cattle ranch and intensive agriculture), and (iii) to consider the operation of the hydropower project. The streamflow regime was characterized for the channels, using the results of the applied models, as well as wetlands levels, sediment loads, and deposition rates and loss of volume of the main water bodies.

KEY WORDS: Water Budget, Sediments, Bajo Sinú Wetland System, Simulation, Hydrological Models, Sediment Load, Wetlands, Rio Sinú Basins.

1. INTRODUCCIÓN

Los humedales son un elemento de vital importancia dentro del amplio mosaico de ecosistemas que tiene Colombia y se constituyen, por su oferta de bienes y prestación de servicios ambientales, en un sector importante de la economía nacional, regional y local. Dentro del ciclo hidrológico, los humedales juegan un papel importantísimo como reguladores hídricos de cuencas hidrográficas, estuarios y aguas costeras. Estos desarrollan, entre otras, funciones de mitigación de impactos por inundaciones, absorción de contaminantes, retención de sedimentos y recarga de acuíferos; además proveen hábitats para animales y plantas. Sin embargo, estos ecosistemas han sido afectados y, en algunos casos, destruidos por diferentes factores entre los que se encuentran la planificación inadecuada, y las políticas de desarrollo sectorial inconsistentes y desarticuladas. Estas intervenciones se asocian a la falta de conciencia sobre el valor e importancia de los humedales y, por consiguiente, su omisión en los procesos de planificación de los sectores económicos que determinan las decisiones, que en muchos casos afecta la sostenibilidad de los mismos. (MAVDT, 2001).

Para definir un plan de manejo integral adecuado en pro del desarrollo sostenible de humedales es necesario entender su funcionamiento desde diferentes puntos de vista: hídrico, biótico y sedimentológico, entre otros. Es precisamente la dinámica hídrica la que determina su funcionamiento y soporta las otras dinámicas que se presenten, debido a que afecta directamente las complejas relaciones que ocurren en este tipo de sistemas, de ahí la importancia que tiene en el estudio de humedales.

En este trabajo se presenta una metodología de balance hídrico y una primera aproximación de un modelo de balance de sedimentos como herramientas de apoyo a la gestión integral de humedales. Como caso de aplicación se utiliza el complejo lagunar del Bajo Sinú, en el departamento de Córdoba, como una aproximación al entendimiento de las complejas relaciones que ocurren en este sistema, buscando evaluar los impactos que tienen las diferentes obras que han afectado su dinámica hídrica, y dando luces sobre cómo se podrían restituir en alguna medida las condiciones naturales de este sistema, que permitan la sostenibilidad del mismo y eviten su desecación. Con la aplicación del modelo se caracterizó el régimen de caudales, niveles y sedimentos en cauces y

ciénagas pertenecientes al sistema y se cuantificaron las tasas de depositación y pérdida de volumen de sedimentos de los principales cuerpos de agua.

El trabajo se desarrolla básicamente en tres secciones, inicialmente se describe la metodología y la información utilizada para la implementación de los modelos, posteriormente se muestra el uso del modelo para la evaluación del comportamiento del sistema ante diferentes intervenciones, a través de la simulación de escenarios. Se menciona la información y se explica el proceso metodológico, porque a medida que se explican los modelos en la sección tres, se muestra su implementación y calibración en el complejo lagunar. Finalmente, se presentan las conclusiones.

2. PROPUESTA METODOLÓGICA

Inicialmente se requiere entender conceptualmente el sistema como un conjunto de elementos que interactúan entre sí: las ciénagas, los caños y canales de conexión entre ciénagas y/o con el río, las cuencas de drenaje directo a ciénagas y a los caños. En el método propuesto cada ciénaga es representada por un tanque, cada tanque en el sistema constituyen un volumen de control. Sin embargo, los volúmenes de control no sólo representan ciénagas, algunas veces se utilizan para representar elementos de apoyo para el balance, como por ejemplo: bifurcaciones y confluencias de ríos o canales. Es muy importante tener en cuenta que el modelo se plantea para cada sistema de acuerdo con su complejidad y la información disponible. A grandes rasgos, el modelo de balance hídrico y de sedimentos representan, los procesos de producción de escorrentía e intercambios de agua y sedimentos a nivel diario, mediante cuatro submodelos: (1) submodelo de producción hidrológica en las cuencas que entregan agua al sistema mediante un modelo lluvia-escorrentía; (2) submodelo de producción de sedimentos en las cuencas que entregan al sistema (3) submodelo de transferencia y balance de agua, que representa los intercambios de agua realizados entre los elementos y actualiza los almacenamientos en cada volumen de control, el flujo entre los caños está en función del desnivel como una aproximación hidráulica con una ecuación de flujo uniforme como la de Chézy; (4) submodelo de transferencia y balance de sedimentos, que estima los intercambios de sedimentos entre los cuerpos de agua, como una función de la capacidad de transporte de los cauces y los volúmenes de sedimentos depositados

en la ciénaga, además, actualiza las curvas de capacidad. En la Figura 1 se muestra un esquema conceptual del

modelo y en los siguientes numerales se explicarán todas sus variables.

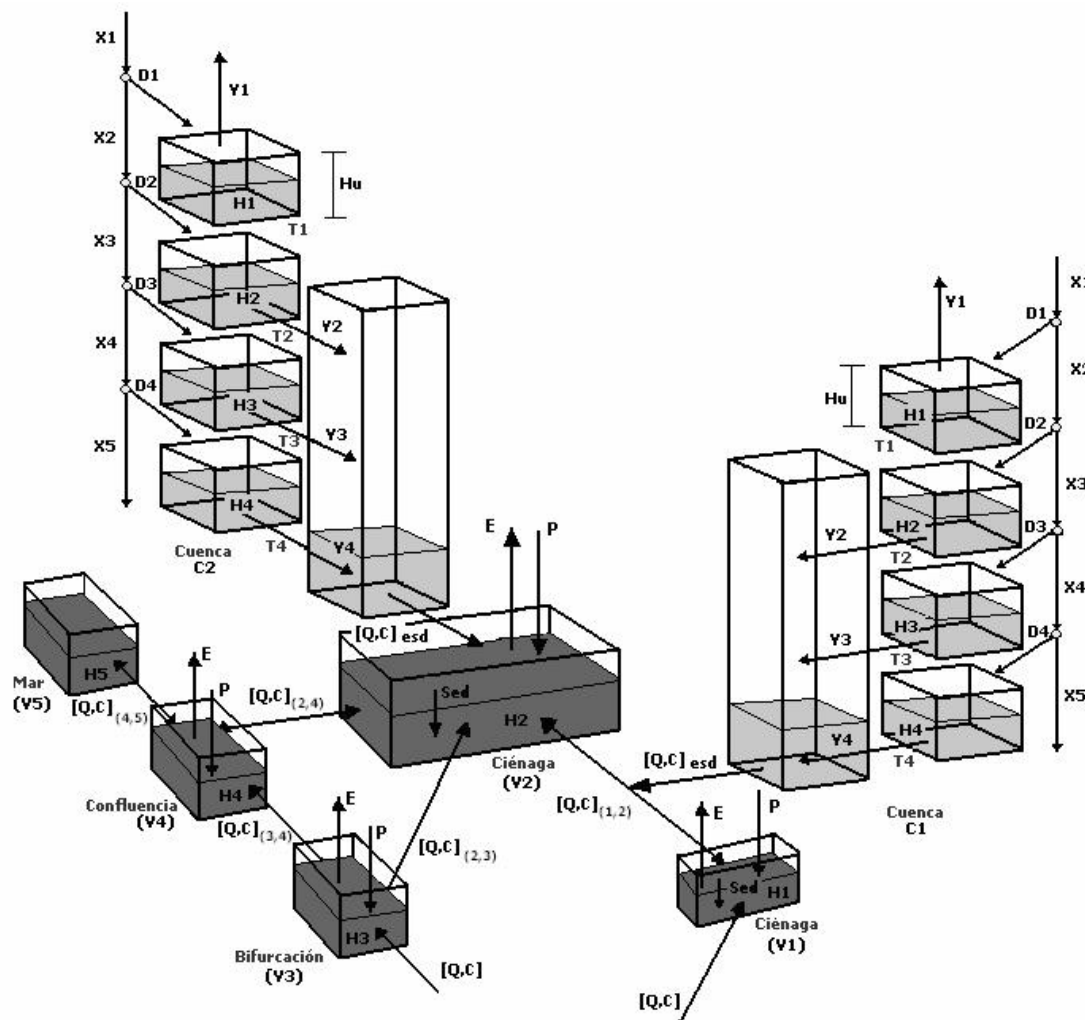


Figura 1. Esquema conceptual del modelo de balance hídrico y de sedimentos.

El sistema de tanques en color claro representa los submodelos 1 y 2, en los cuales se producen agua y sedimentos en las cuencas que aportan a cada elemento del sistema. En la Figura 3 se presentan, a manera de ejemplo, dos cuencas aportantes, una que drena directamente hacia una ciénaga y la otra hacia una canal. Los tanques en color oscuro representan los submodelos 3 y 4, en los cuales se intercambia agua y sedimentos y donde se actualizan los volúmenes en los elementos de almacenamiento. En este ejemplo se propone un sistema compuesto por dos ciénagas, un río, una bifurcación, una confluencia y el mar. Es importante mencionar nuevamente que la configuración del modelo dependerá de cada subsistema.

2.1. Información Utilizada

Según la configuración de los submodelos, se necesitan tres tipos de información. El modelo de producción hidrológica se alimenta básicamente de información climática (precipitación y temperatura), y de las características topográficas y del tipo de suelo de las cuencas hidrográficas que drenan el sistema. El modelo de transferencia y balance de agua requiere información que está ligada a las características de los cuerpos de almacenamiento y a los canales de conexión. Por otro lado, el modelo de transferencia y balance de sedimentos, necesita las características de los sedimentos y las cargas que llegan a las ciénagas. Para la realización de este

trabajo se contó con la siguiente información:

- 71 estaciones de precipitación, 20 estaciones de caudal y 32 estaciones de niveles, 2 estaciones de caudales sólidos, todas a resolución temporal diaria, que varían desde 1970 hasta el año 2003. esta información fue suministrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –IDEAM- .
- Serie de mareas, simulada en el sitio de desembocadura del río Sinú en el mar utilizando el software gnotide (<http://gnotide.unalmed.edu.co/>) se desarrollado por Cardona y Fernández (2001).
- Cartografía a escala 1:25000 levantada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi y a escala 1:100000 resultado del proyecto “Diagnóstico Ambiental de la Cuenca del Río Sinú”, ambas suministradas por la Corporación Autónoma Regional de los Valles de Sinú y San Jorge –CVS-
- Fotografías aéreas del año 1966 e imágenes de satélite LANDSAT de las fechas: enero 24 de 1985 (Landsat TM), enero 30 de 1987 (Landsat TM), agosto 21 de 2000 (Landsat ETM+), enero 12 de 2001 (Landsat ETM+), julio 7 de 2001 (Landsat ETM+) y julio 26 de 2002 (Landsat ETM+)
- Campaña de aforos sólidos, líquidos y granulometrías realizadas a lo largo de l río Sinú y en algunos caños de conexión al complejo lagunar por la empresa URRÁ S.A. E.S.P

- Relaciones morfométricas del complejo lagunar elaboradas a finales de los años 70’s por SCET-CVS-DNP (1981), citado por Ambiotec (1997), en el marco del proyecto “Plan Maestro de la cuenca Hidrográfica del Río Sinú”.

2.2. Conceptualización General del Sistema

Como ya se mencionó, entender el sistema es el primer paso y de este depende la configuración del modelo. El complejo lagunar del Bajo Sinú es un sistema constituido por una red compleja de caños y leves depresiones o ciénagas. Éste se alimenta de la escorrentía superficial producida por su propia cuenca y por los caudales que le entrega el río Sinú, principalmente a través del caño Bugre. Todos los aportes recogidos por el complejo, desembocan al río Sinú a través del caño Aguas Prietas, a la altura del municipio de Loricá. En la planicie del complejo se identifican cuatro ejes principales de drenaje: el caño Aguas Prietas, el cual drena la zona oriental del complejo; un eje central asociado al caño Espino y al dren Principal o Berástegui; el caño Bugre, que funciona como conexión principal del complejo lagunar con el río Sinú; y finalmente, un eje de menor envergadura en la parte occidental del sistema, cuyos elementos principales de drenaje son los caños María y Chimancito, este sistema es el más pequeño, pero al mismo tiempo el que más intervenciones antrópicas ha sufrido (ver Figura 1).

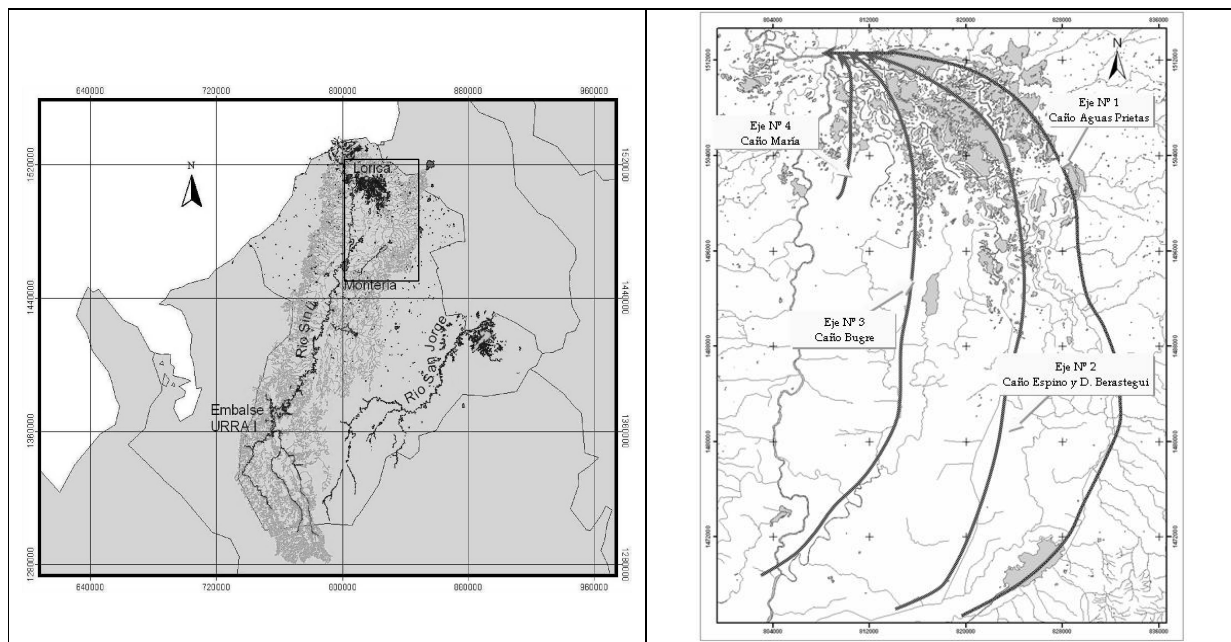
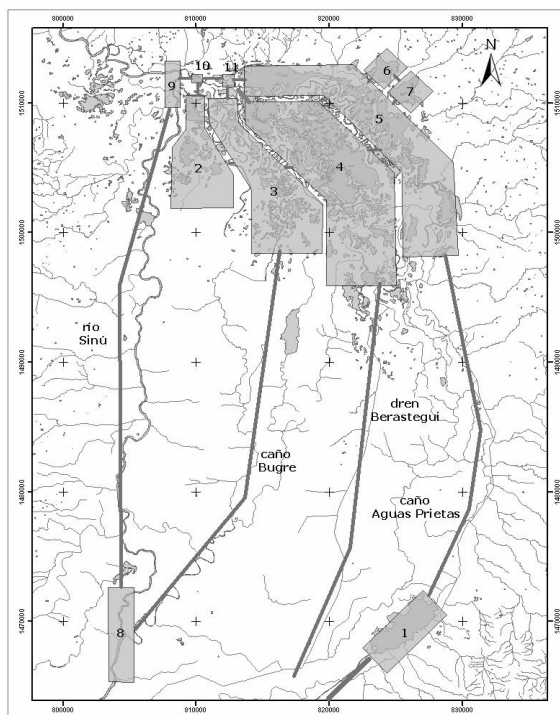


Figura 2. Localización del complejo lagunar del Bajo Sinú y ejes de drenaje.

El esquema conceptual del complejo lagunar del Bajo Sinú se diseñó teniendo en cuenta los ejes de drenaje identificados. Aunque el complejo lagunar se dividió en varios subsistemas, en aguas altas el sistema se comporta como un único cuerpo. En la Figura 2 se muestra la conceptualización adoptada. Allí se identifican las ciénagas agrupadas en los elementos de almacenamiento o tanques, identificados con los números 1 a 7, un

elemento de apoyo que representa la difluencia del río Sinú (caño Bugre – elemento 8), las confluencias de los ríos -elementos 9,10 y 11-, los elementos de conexión entre volúmenes de control y las cuencas que drenan a cada uno. Como un elemento adicional se tiene el río Sinú que desemboca en el mar; por tanto el mar es un elemento más dentro de la modelación



1. Ciénaga de Oro.
 2. Ciénaga Mosquitos y otras.
 3. Ciénaga Varadero y otras.
 4. Ciénaga Castañuela y otras.
 5. Ciénaga Guatinaja y otras.
 6. Ciénaga Playón de Momil.
 7. Ciénaga Sapal.
 8. Bifurcación caño Bugre*.
 9. Confluencia caño Aguas Prietas en Sinú*.
 10. Confluencia caño María en Aguas Prietas*.
 11. Confluencia ejes de drenaje 1, 2 y 3*.
- * Representan elementos de apoyo en la modelación

Figura 3. Esquema conceptual del complejo lagunar del Bajo Sinú.

2.3. Esquema general del modelo

2.3.1. Modelo de Producción Hidrológica

Con el propósito de representar la producción de escorrentía se utiliza un modelo conceptual de base física desarrollado inicialmente como modelo distribuido por Vélez (2001), aplicado con excelentes resultados en cuencas de diferente tamaño en Francia y España (Vélez et al. 2002), y adaptado como modelo agregado por Correa y Vélez (2002), el cual ha sido aplicado para distintos fines y en varias cuencas en Colombia, siempre con excelentes resultados. En el modelo de producción hidrológica, la cuenca está representada por una serie de cuatro tanques o niveles de almacenamiento que interactúan entre sí, como se muestra en la Figura 3 (sistema de tanques en color claro). En cada intervalo de tiempo, la precipitación, X_p , se distribuye a los diferentes

almacenamientos, donde, en función del volumen almacenado en cada uno de ellos, H_i se determina su contribución a la escorrentía, Y_i . El modelo realiza el balance de agua y actualiza los volúmenes almacenados en cada tanque.

En el modelo de producción hidrológica, los parámetros de la cuenca se van modificando hasta obtener el modelo que mejor represente la producción de escorrentía natural en la cuenca, que es lo que se busca con este submodelo. Considerando la existencia del proyecto hidroeléctrico Urrá I, así como la calidad y la localización de la información disponible, se calibraron dos estaciones: una localizada en el proyecto hidroeléctrico (Angostura de Urrá) y la otra localizada aguas abajo del mismo (Montería) durante el periodo 1984-1994. Lo anterior con el objetivo de reconstruir los efectos hidrológicos

del proyecto hidroeléctrico en el sistema. Así, los caudales de la cuenca complementaria entre ambas estaciones siempre representarán una condición natural de producción de escorrentía; mientras que la primera estación (Angostura de Urrá I) mostrará los efectos de la intervención antrópica. En la Figura 4 se muestran los resultados de la calibración del modelo de producción hidrológica. Tanto para la calibración como para la

validación se prestó mayor importancia al ajuste de las curvaturas de los hidrogramas, buscando obtener el menor error cuadrático medio. La similitud entre la rama descendente de los caudales simulados con la curvatura de los observados, indica que las distintas componentes de la escorrentía son coherentes con la realidad, y que las relaciones funcionales asumidas para cada componente son acertadas para su representación.

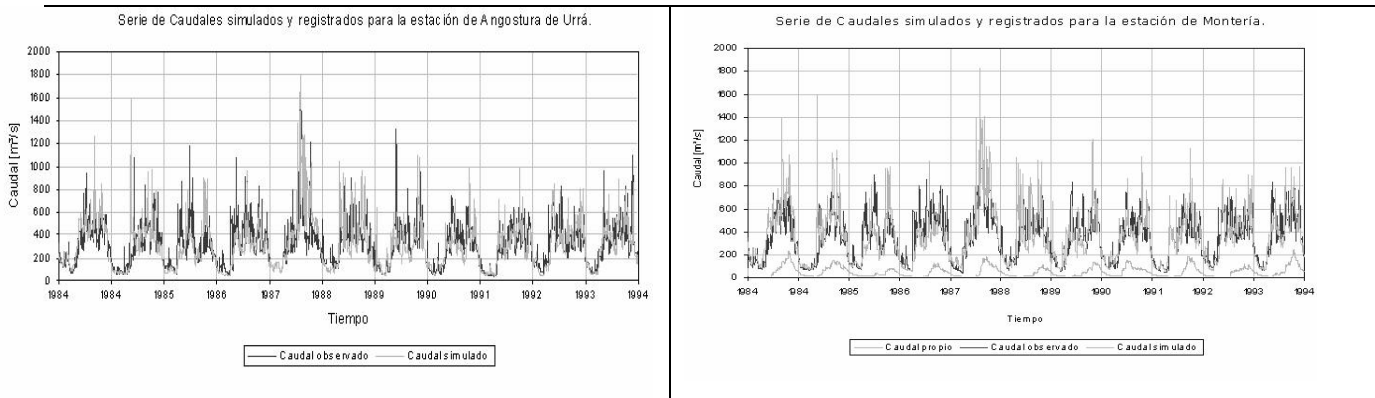


Figura 4. Series de caudales simulados y registrados en las estaciones utilizadas para la calibración (periodo 1984-1994). A la izquierda la estación Angostura de Urrá y a la derecha la estación Montería.

2.3.2. Modelo de Producción de Sedimentos en las cuencas aportates

La mayoría de los modelos para estimar los sedimentos en suspensión relacionan la carga de sedimentos con el caudal líquido y en muchos casos usan modelos de correlación; utilizan como hipótesis la relación potencial simple que existe entre el caudal líquido, Q , y la descarga de sedimentos, Q_s ($Q_s = aQ^b$). Esta ecuación es

comúnmente llamada curva de calibración del sedimento o curva del transporte sólido. Leopold y Maddok (1953); Posada y Montoya (2000); Zuluaga y Poveda (2003); Syvitski et al (2000), son algunos de los autores que utilizan estas relaciones para obtener la carga de sedimentos en suspensión. Ellos han encontrado que el exponente en varía entre 1.8 y 2.5, explorando con los datos disponibles en la cuenca del río Sinú se encontró un exponente cercano a 2. En la Figura 5 se muestra la curva de calibración obtenida para la estación Montería.

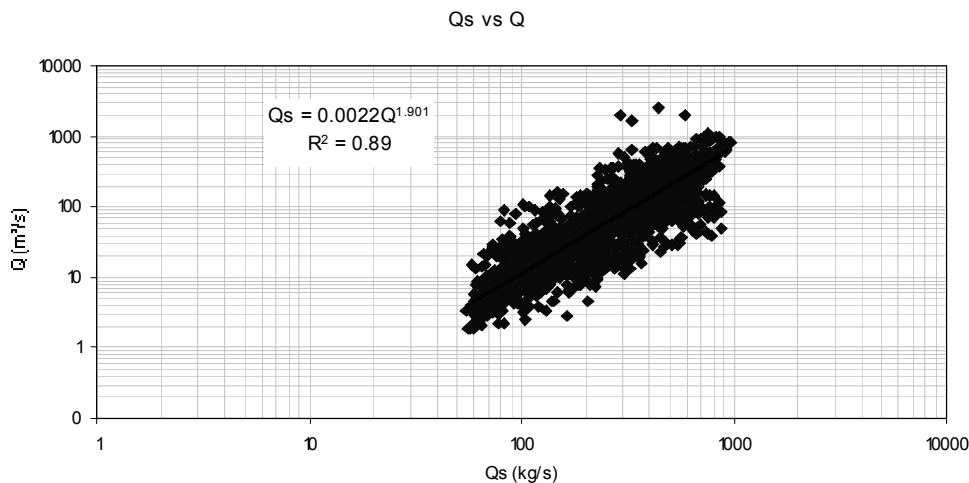


Figura 5. Relación entre el transporte sólido y el caudal líquido para la estación Montería

Al disponerse de información en las cuencas que drenan la parte oriental de sistema, se consideró que la ecuación (1):

$$Q_s = 1.445 * 10^{-3} Q^{1.934} \quad (1)$$

Es representativa de las condiciones de transporte de sedimentos para el resto de la cuenca, en donde Q_s es el caudal sólido [kg/s] y Q es el caudal líquido [m³/s].

2.3.3. Modelo de transferencia y balance de agua

El modelo de transferencia de agua del sistema considera cada cuerpo de agua como un tanque único de almacenamiento que interactúa con la atmósfera y con las otras unidades de almacenamiento a través de los caños o canales de conexión. En cada tanque las entradas están representadas por la escorrentía superficial directa que proviene de su cuenca, por los aportes de los otros elementos o tanques que componen el sistema y por la precipitación sobre su superficie de agua; mientras que las salidas están asociadas con los flujos hacia otros elementos y la evapotranspiración sobre su superficie. Las conexiones son canales que pueden transportar agua en ambos sentidos dependiendo de los niveles relativos de la superficie del agua en los dos cuerpos. Así mismo, el volumen de intercambio entre ellos es función de la diferencia de niveles, representada mediante la ecuación de flujo uniforme.

El intercambio subterráneo es función del gradiente hidráulico y de las características hidráulicas del suelo que componen los acuíferos de la zona; siendo la permeabilidad la característica más importante, pues representa el potencial del medio poroso para permitir el flujo. Bajo estas consideraciones, en muchos casos se puede asumir que el flujo subterráneo es una variable de segundo orden dentro del balance y podría desprejarse. En el caso específico del complejo lagunar, es válida esta hipótesis porque la región está conformada por suelos de textura arcillo- limosa, agrupados en diques y basines producto de los procesos de sedimentación asociados a los eventos de inundación, lo que sugiere que la permeabilidad es baja; además, los gradientes entre las ciénagas también son relativamente bajos.

Matemáticamente, bajo las consideraciones anteriores y aplicando la ecuación de balance en la ciénaga i se tiene:

$$\left(\frac{S_t^i - S_{t-\Delta t}^i}{\Delta t} \right) = \left(Q_{atm(t)}^i + Q_{esd(t)}^i \pm \sum_{j=i}^{Nc} Q_{intercambio}^{ij} \right) \quad (2)$$

En esta expresión, el superíndice i se refiere a la ciénaga donde se está haciendo el balance, el superíndice j se refiere a las demás ciénagas que están conectadas con la ciénaga i ; $Q_{atm(t)}^i$ es el flujo neto de intercambio con la atmósfera dado por la diferencia entre la precipitación y la evaporación en la superficie de la ciénaga; $Q_{esd(t)}^i$ es la escorrentía directa del área tributaria de la ciénaga; y $Q_{intercambio}^{ij}$ es el caudal que se transfiere entre las ciénagas a través de los caños.

La velocidad de transferencia de flujo entre las ciénagas está formulada con la ecuación de flujo uniforme propuesta por Chézy, de manera que el caudal de intercambio está dado como:

$$Q_{intercambio}^{ij} = Ac_{(t)}^{ij} \cdot C^{ij} \cdot \sqrt{Rh_{(t)}^{ij} \left(\frac{h_{(t)}^i - h_{(t)}^j}{L^{ij}} \right)} \quad (3)$$

en donde Ac es el área mojada, Rh es el radio hidráulico, C es el coeficiente de Chézy y L es la longitud del canal de conexión entre las dos ciénagas.

La influencia del mar está considerada en el modelo como una condición de frontera definida por el nivel de la marea en el sitio donde interactúa con él, en este caso de aplicación, en la desembocadura del río Sinú. Este nivel establece el volumen que aporta el río Sinú al mar.

Aplicando la ecuación (2) para todo el sistema de ciénagas interconectadas se obtiene un sistema de ecuaciones simultáneas no lineales, que se resuelve mediante el proceso iterativo de Gauss-Newton (Press et al., 1986).

Para la calibración se utilizó la serie de niveles de la estación Momil, en el periodo 1980- 1987, localizada en uno de los elementos de almacenamiento del complejo lagunar. Durante el proceso de calibración, para cada uno de los canales se realizó un análisis de sensibilidad de las velocidades y caudales obtenidos, ajustando y modificando los factores de rugosidad del flujo. Estas variaciones se realizaron en teniendo en cuenta representar adecuadamente la respuesta de los caños. En la Figura 5 se muestran los resultados de la calibración en esta estación para el periodo 1980-1986.

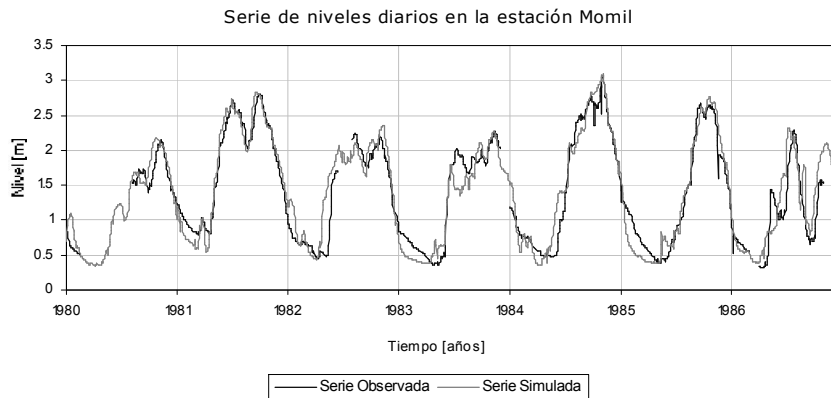


Figura 6. Resultados de la calibración del modelo de balance hídrico y de sedimentos en el Complejo lagunar del Bajo Sinú. Estación Momil. Periodo (1980-1987)

2.4. Modelo de transferencia y balance de sedimentos

El balance de sedimentos permite estimar la cantidad de sedimentos que intercambian los volúmenes de control y actualiza las cantidades que permanecen almacenadas. Sin embargo, este método es bastante complejo, ya que responde a las ecuaciones de conservación de masa, advección y difusión en el medio, las cuales deben estar parametrizadas y calibradas convenientemente para lograr una aproximación realista a este problema (Múnera, 2003). Por la escala espacial a la que se plantea el modelo de balances en el complejo lagunar, no es posible dar cuenta de estos procesos. Por lo tanto, se aplica una representación muy simplificada de este método.

El modelo de transferencia de sedimentos conceptualmente es igual al modelo de transferencia y balance de agua. Considera cada cuerpo de agua como un tanque único de almacenamiento que interactúa con las otras unidades de almacenamiento a través de los caños o canales de conexión. Según el principio de continuidad de masa, el cambio en la cantidad de masa almacenada durante el periodo de evaluación debe ser igual a la diferencia neta entre las entradas y las salidas del volumen de control. Aplicando la ecuación de balance en la ciénaga *i* se tiene:

$$\left(\frac{S^i_{(t)}C^i_{(t)} - S^i_{(t-\Delta t)}C^i_{(t-\Delta t)}}{\Delta t} \right) = Q^i_{esd(t)}C^i_{esd(t)} + \sum_{j=1}^{Nc+} Q^{ij}_{intercambio}C^j_{(t)} - \sum_{k=1}^{Nc-} Q^{ik}_{intercambio}C^i_{(t)} - Q^{s_{entrada}}E \quad (4)$$

En la ecuación (4), el superíndice *i* se refiere a la ciénaga donde se está haciendo el balance, el superíndice *j* se refiere a las ciénagas que entregan agua y sedimentos a la ciénaga *i*; el superíndice *k* se refiere a las ciénagas que reciben agua y sedimentos de la ciénaga *i*. El último término en la ecuación (4) se refiere a la masa que se sedimenta en cada volumen de control, en cada intervalo de tiempo *t*, en función de la eficiencia de atrapamiento, *E*, y de la carga de sedimentos suspendidos que llegan a él, *Q_s*.

Hay que tener en cuenta que el modelo presentado es una simplificación del proceso de sedimentación, pero que en otros casos será importante considerar algunas variables con más detalle. Es el caso de la resuspensión, la cual en esta simplificación queda inmersa dentro de la eficiencia de atrapamiento, pero que a veces, dependiendo del tamaño y la profundidad de las ciénagas y las corrientes de vientos que afecten el sistema será importante incluirla con mucho más detalle.

En la ecuación (4), la eficiencia de atrapamiento hace referencia a la relación porcentual del total de sedimento que entra y el retenido por cada ciénaga. Para la aplicación en el complejo lagunar se utilizó la metodología propuesta por Chen y citada por Asselman (2002), formulada como:

$$E = 1 - \exp\left(-Vs \frac{A}{Q}\right) \quad (5)$$

en donde *V_s* es la velocidad de caída de las partículas de sedimento suspendido [m³/s], *A* es el área superficial de volumen de control [m²], y *Q* es el caudal que entra al sistema [m³/s]. La velocidad de caída de cada partícula

de sedimento se estimó a partir de la ecuación de Rubey (Julien, 1995)

Al aplicar la ecuación (4) en cada ciénaga, se obtiene un sistema de ecuaciones simultáneas lineales, donde la variable desconocida es la concentración de sedimentos al final del periodo. Este sistema de ecuaciones se resuelve utilizando el método de Gauss (Press et al., 1986), para cada instante de tiempo t . Resolviendo el sistema es posible conocer las cantidades de sedimento que son transferidas en el sistema en cada t , y se actualizan las condiciones en cada volumen de control.

2.4.1. Actualización de las curvas de capacidad

Adicionalmente, el modelo planteado estima la cantidad de sedimentos que quedan atrapados en las ciénagas, a nivel diario. A la escala temporal del análisis los cambios físicos en estos sistemas son insignificantes, por esta razón se acumula el sedimento y cada 5 años se evalúan los cambios estimados en la capacidad de la ciénaga y se construyen unas curvas modificadas de capacidad de las ciénagas, que son actualizadas automáticamente en el modelo. Para esto, la masa acumulada en las ciénagas se convierte de unidades de masa a unidades de volumen, con el objeto de conocer el espacio ocupado por el

sedimento y, posteriormente, éste se distribuye dentro del elemento de almacenamiento.

Para obtener el peso específico del material depositado se utilizó la metodología resumida por Strand (1974), donde se concluye que después de T años el peso específico de la mezcla γ_{mT} , incrementa su peso específico inicial γ_{ml} en función del tiempo de acuerdo con:

$$\gamma_{mT} = \gamma_{ml} + 6.9566K \left(\frac{T}{T-1} \ln T - 1 \right) \quad (6)$$

en donde γ_{mT} y γ_{ml} (ecuación 6) están dados en kg/m^3 y K es una constante de consolidación que depende del tamaño del sedimento analizado (Julien, 1995). La ecuación para

$$\gamma_{ml} = +16.01794 \left(\gamma_{m(\text{arena})} P_{\text{arena}} + \gamma_{m(\text{arcilla})} P_{\text{arcilla}} + \gamma_{m(\text{limo})} P_{\text{limo}} \right) \quad (7)$$

En esta ecuación P representa el porcentaje de arena, arcilla y limo que se depositan en la ciénaga. Para P y la constante de consolidación K , se utilizan los coeficientes obtenidos por Lane y Koelzer (1943). En la Tabla 2 se presentan los valores de los coeficientes y constantes de consolidación propuestos por estos autores.

Tabla 1. Coeficientes y constantes de consolidación, propuestos por los autores para obtener el peso específico inicial y el peso específico en un tiempo T .

Operación embalse	Lane y Koelzer (1943)					
	Arena		Arcilla		Limo	
	γ_m	K	γ_m	K	γ_m	K
I	97	0	26	16	70	5.7
II	97	0	35	10.7	71	2.7
III	97	0	40	6.0	72	1.0
IV	97	0	60	0	73	0

El modo de operación del embalse es quizás el factor que más influencia tiene en el peso específico del sedimento depositado. Lane y Koelzer (1943) clasifican

los embalses en cuatro tipos según su modo de operación, como se muestra en la Tabla 2

Tabla 2. Clasificación de los embalses según el modo de operación.

TIPO EMBALSE	LANE Y KOELZER (1943)
I	Embalses normalmente llenos que son vaciados de un modo no frecuente y por espacios cortos de tiempo. Dando lugar a sedimentos sumergidos o casi siempre sumergidos
II	Embalses que generalmente están en niveles medios de operación; con niveles más bajos de los normales, incluyendo los denominados filo de agua
III	Embalses que normalmente se encuentran a niveles muy bajos; esto incluye embalses con largos periodos de bajo nivel, en años normales
IV	Embalses generalmente vacíos; incluye embalses de disipación y embalses vacíos en años normales

En cuanto a la distribución de los sedimentos al interior de la ciénaga, se propone un método muy sencillo, porque en el complejo lagunar no hay información asociada a este proceso. Teniendo en cuenta el patrón típico de depositación en un embalse, el sedimento se distribuye en cada cuerpo de agua de la siguiente forma: el porcentaje del sedimento que corresponde a arenas y limos se deposita uniformemente en los taludes de la ciénaga, generando de esta forma una disminución del área superficial, y a su vez de su capacidad. El porcentaje correspondiente a la fracción de arcillas continúa su recorrido y se distribuye uniformemente en el fondo de la ciénaga, conformando los depósitos del fondo. Éste es un método iterativo muy simple que permite establecer las nuevas relaciones de capacidad de los cuerpos de agua, haciendo un balance entre el volumen de sedimento calculado y el que se espera que se sedimente. El procedimiento se realiza cada 5 años, y las curvas de capacidad obtenidas pasan ser las curvas actuales en la modelación. El balance se realiza mediante

$$V_{sed} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{H-h_0}{\Delta h} \right)^{i-1} \left(\frac{A_i + A_{i-1}}{2} \right) * \Delta h * P_i \quad (8)$$

en donde, V_{sed} es el volumen de sedimentos que se va a distribuir en el sistema en m^3 ; Δh es el incremento de altura para el paso de calculo; H , es la profundidad máxima en m.s.n.m; h_0 es la altura inicial del sedimento acumulado en m.s.n.m; A es el área $[m^2]$ superficial de la ciénaga a la altura h_i en m^2 ; y P es la fracción de área que se sedimenta, en cada paso.

Con el objetivo de verificar la validez del modelo e identificar la robustez del mismo frente a la evaluación de diferentes escenarios, se utilizaron los datos de caudales sólidos en la estación Sabana Nueva, y Cotoca Abajo (Ver Figura 1). La primera localizada aguas abajo de la derivación del río Sinú por el caño Bugre y la segunda localizada después de la confluencia del río Sinú con el caño Aguas Prietas, justo a la salida del sistema. Los registros de estas estaciones se compararon con los que entrega el modelo en los volúmenes de control No.8 y No.9, respectivamente. De igual forma, se utilizó la serie de registros de carga de sedimentos en suspensión de la estación Cotoca Abajo. En la Figura 7 se muestran los resultados obtenidos para la estación Cotoca Abajo. Con estas series se confirma la validez del modelo; en ambos casos se representa adecuadamente los caudales, las cargas de sedimentos y sus ciclos.

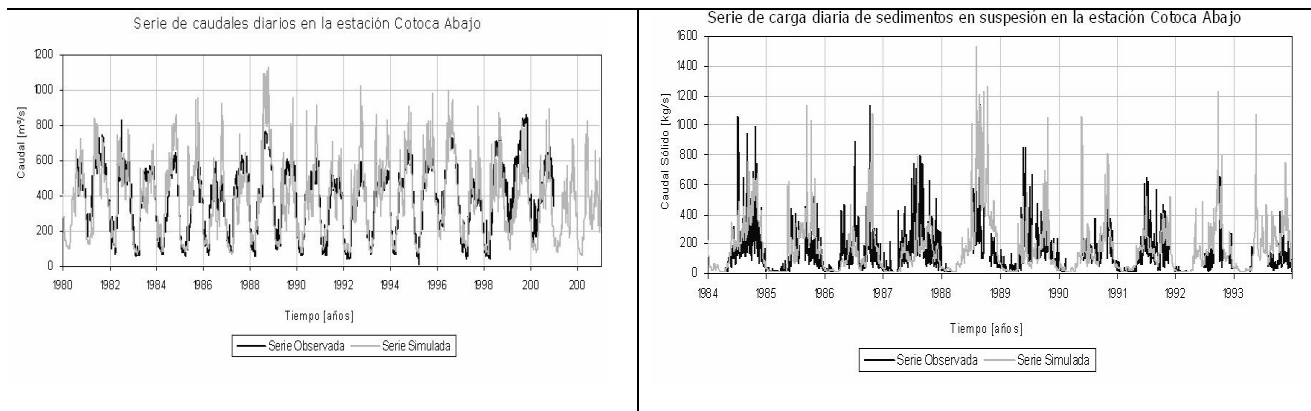


Figura 7. Resultados de la validación del modelo en el Complejo Cenagoso del Bajo Sinú. A la izquierda estación Cotoca Abajo y a la derecha estación Sabana Nueva. Periodo (1980-2000)

2.5. Limitaciones del modelo propuesto

El modelo de balance de agua y sedimentos tiene básicamente dos limitaciones importantes que se resumen a cotinuación:

En el modelo de balance de agua, las bifurcaciones de los caños se hacen de manera ficticia asumiendo que estas

corresponden a la ciénaga más próxima. Además, no se tiene en cuenta la componente de flujo subterráneo por las razones ya expuestas, ni se consideran las demandas de agua y sus respectivos retornos; en una primera valoración se considera que no son demasiado importantes frente a los caudales y volúmenes que se manejan en el sistema.

El modelo de balance de sedimentos no considera los procesos de erosión y de sedimentación en los caños, lo que quiere decir que en la ecuación de balance de sedimentos sólo se da cuenta de la masa en los caños, y no se consideran las transformaciones que éstas puedan experimentar en su recorrido. Además, no se representan otros fenómenos como difusión-dispersión, que son muy importantes si se quiere obtener una aproximación de la distribución e los sedimentos en el dominio espacial. Para esto se requiere un modelo hidráulico acoplado a un modelo de transporte, implementado en una malla de cálculo de alta resolución espacial y resuelto mediante técnicas numéricas.

3. EVALUACIÓN DE ESCENARIOS

Para evaluar la dinámica hídrica y sedimentológica del complejo lagunar del Bajo Sinú, con diferentes condiciones hidrológicas y antrópicas se plantearon tres escenarios: el primero busca representar las condiciones naturales del sistema, sin intervenciones antrópicas; el segundo considera la pérdida de área inundable del complejo, ocasionado por el proceso de adecuación de tierras; y un tercer escenario plantea la puesta en operación del Proyecto Hidroeléctrico de Urrá I.

Escenario 1: Condiciones Naturales

Según los resultados obtenidos en el escenario que representa las condiciones naturales, la Ciénaga de Oro solo almacena agua en épocas de invierno, y durante los meses de verano se seca casi completamente. Los niveles en los diferentes cuerpos de agua tienen un régimen unimodal con una época de recesión en los meses de enero a abril y otra de niveles altos que comienza en el mes de mayo, alcanzando su máximo valor en el mes de octubre; sin embargo se observa un leve veranillo en los meses de junio y julio (Ver Figura 7).

En este escenario se observa que los elementos de almacenamiento alcanzan como máximo el 50% de su capacidad. Los vasos de almacenamiento más significativos en cuanto al área se refiere, son los asociados a las ciénagas Castañuela, Guatinaja y Varadero; estos suman aproximadamente el 75% del área total. El área máxima inundada del complejo lagunar obtenida en este escenario comprende zonas que actualmente están altamente intervenidas, como es el caso de la ciénaga de Mosquitos que es atravesada por un gran dique, esto indudablemente cambia las condiciones hídricas del sistema como se mostrará en el siguiente escenario.

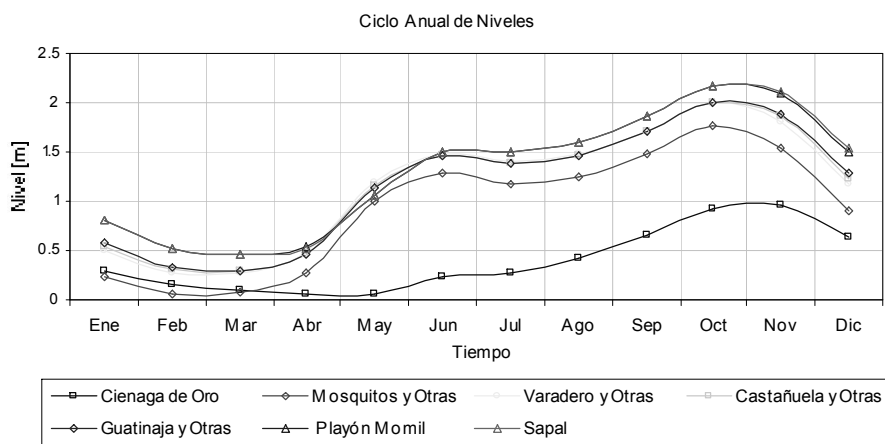


Figura 8. Ciclo anual de niveles para las condiciones naturales.

El río Sinú se comunica con el complejo lagunar a través de los caños Bugre y Aguas Prietas, este último tiene un comportamiento bidireccional, que durante las épocas de niveles altos entrega aguas al río Sinú con caudales que alcanzan los 245 m³/s y durante el verano ocasionalmente las recibe, con caudales hasta de 80 m³/s. Por el contrario el caño Bugre siempre entra al sistema y

en verano los caudales de este caño son muy pequeños, muchas veces cercanos a cero; en promedio transporta aproximadamente 50 m³/s. Otro canal importante de conexión es el caño Aguas Prietas que comunica a Ciénaga de Oro con el complejo cenagoso, al igual que el caño Bugre es unidireccional en casi todo su recorrido. Las ciénagas son retenedoras de sedimentos, esto se ve

claramente reflejado en los caudales sólidos que intercambian los cuerpos de agua. El sistema Mosquitos atrapa la mayor cantidad de sedimentos, del orden del 92% de los sedimentos que le llegan; mientras que Guatinaja atrapa la menor cantidad del sedimento, aproximadamente el 50%. Teniendo en cuenta que el aporte más significativo de sedimentos lo realiza el río Sinú a través del caño Bugre y que este llega directamente al sistema Varadero, además que el sistema Mosquitos es el que más sedimentos retiene, se espera que sean estos dos los que experimentan mas drásticamente problemas de sedimentación. Según los resultados obtenidos por el modelo en este escenario, el sistema Varadero alcanza una reducción del 10% en los 20 años; y los cambios en los demás sistemas son casi imperceptibles.

Escenario 2: Ampliación de la Frontera Agrícola y Ganadera

Una vez se modelan las intervenciones antrópicas asociadas con la ampliación de las fronteras agrícola y

ganadera, se observa que el complejo lagunar responde a estos estímulos externos mediante una alteración de los niveles, aumentado en verano, y disminuyendo su variabilidad en invierno, pero conservando su magnitud, todo esto en comparación con lo que ocurriría en condiciones naturales. El caso más notorio de aumento de niveles se presenta en el Playón de Momil, el cual en verano aumenta sus niveles hasta en un 1 m, como consecuencia de los taponos que construyen los pescadores para aislar este sistema en épocas de aguas bajas, pero que remueven en invierno para permitir el intercambio con las ciénagas adyacentes (ver Figura 9) En términos de áreas inundadas, uno de los principales efectos asociados con este tipo de intervención, es la disminución de las áreas inundables del complejo lagunar en el mes de octubre, cuando se presentan los niveles más altos en todo el sistema, disminuye el área inundada en este escenario en 47 km². Los cambios más drásticos se presentan en el sistema Varadero y Mosquitos, que son los que más están sometidos a intervenciones, sin embargo esta condición alcanza a afectar todo el sistema.

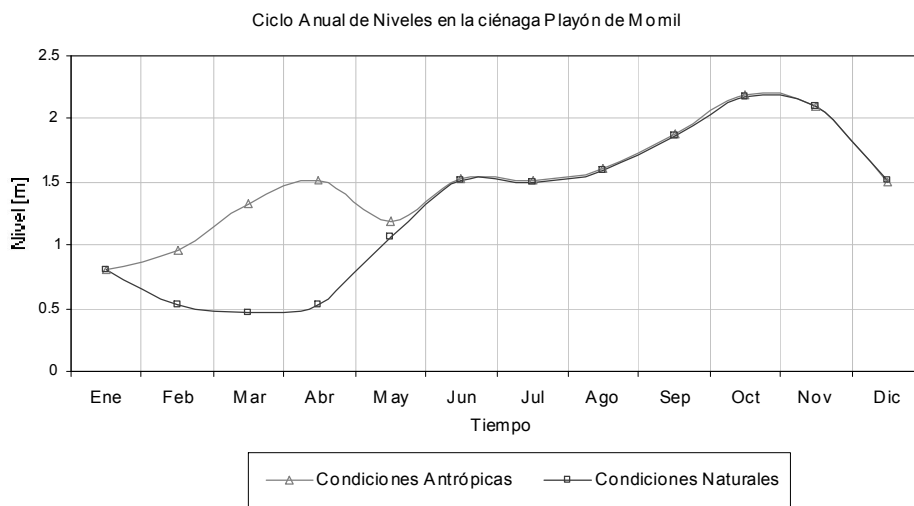


Figura 9. Comparación de Niveles simulados en el escenario en condiciones Antrópicas y Naturales en la ciénaga el Playón de Momil

El aumento en los niveles en la ciénaga Playón de Momil, se traduce en un aumento de 2 km² del área inundada. Es importante mencionar que esta disminución tan importante, alcanzada en algunos cuerpos de agua no solo se debe a la reducción del área inducida en las condiciones iniciales de la simulación, también es consecuencia de la aceleración de la tasa de sedimentación a la que conllevan las intervenciones consideradas en este escenario. Por ejemplo el sistema Varadero en el escenario

de condiciones naturales presenta una tasa de sedimentación 0.5 % por año; mientras que en este último escenario asciende a 1.5% por año (30% en 20 años). El Playón de Momil, también aumentó su tasa de sedimentación, porque al taponar sus bocas no solo se impide el intercambio de agua, además el de sedimentos, aumentando el tiempo de residencia del sedimentos en el cuerpo de agua, favoreciendo su depositación.

Todo lo contrario ocurre con los sistemas Mosquitos y Guatinaja, los cuales dejan de recibir los aportes de Momil y Varadero, respectivamente. En especial en el sistema Mosquitos la reducción es notoria (de 0.22 a 0.09% en 20 años) porque el mayor aporte de sedimentos de este sistema es el caño Bugre, el cual llega través de

los intercambios con Varadero, el jarillón construido interrumpe definitivamente estos intercambios disminuyendo así la sedimentación. En la Figura 9 se muestran las variaciones en las curvas de capacidad obtenidas para el sistema Varadero, el cual presenta las variaciones más significativas.

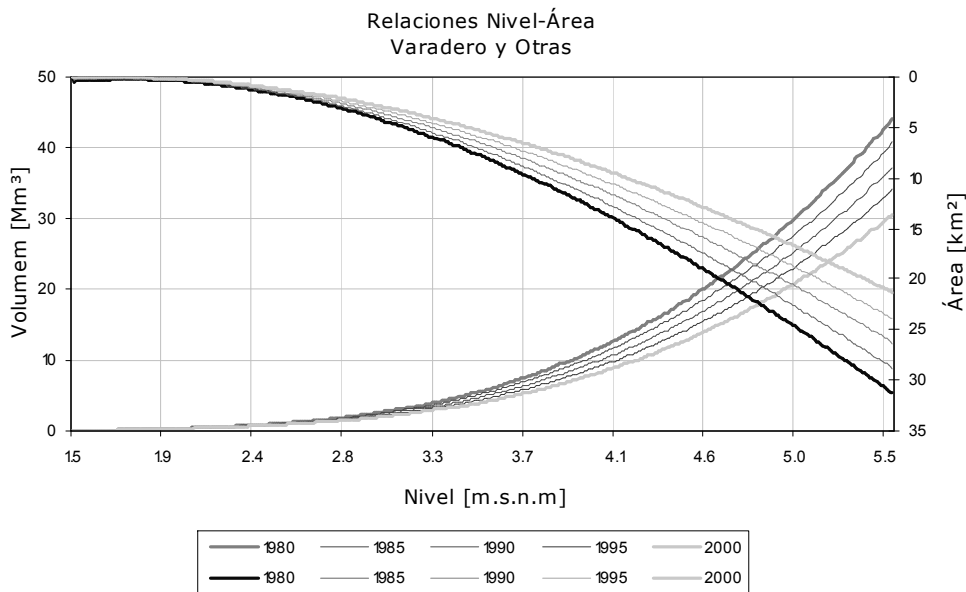


Figura 10. Variaciones en la curva de capacidad para el sistema Varadero.

Escenario 3: Operación del Proyecto Hidroeléctrico Urrá 1

Según los resultados obtenidos bajo el escenario de entrada en operación del Proyecto Hidroeléctrico Urrá I, el efecto de Urrá es básicamente atenuar los eventos máximos y controlar los mínimos; de forma que Urrá funciona como un factor de regulación en los caudales y niveles del complejo lagunar.

La presencia de Urrá propicia un aumento de los niveles medios en los subsistemas; durante el periodo enero - junio, se aprecia un incremento de los niveles medios del orden del 10%, en los meses de julio, agosto y diciembre se presenta un aumento del 50%, y entre septiembre - noviembre los cambios de nivel medio no son significativos. En términos de áreas inundadas, en algunos casos, como en la ciénaga de Varadero, en el mes de marzo, que pasa de tener 1.41 a 4.39 km² con un aumento de área del orden del 2.98 km². Sin embargo para los eventos máximos, las áreas inundables de todos los cuerpos de agua, en este escenario son menores, esto

genera que el área anegable pase de 234.5 km² en el escenario antrópico, a un área de 165.1 km² en el escenario de condiciones antrópicas más Urrá I, lo cual representa una variación porcentual del 29.5%.

Hasta ahora se han analizado los efectos que tendrían las intervenciones antrópicas en la dinámica hídrica del complejo lagunar, a nivel diario y mensual. Es evidente que cada una de estas intervenciones tendría efectos positivos y negativos sobre el sistema. Específicamente, en el caso del proyecto hidroeléctrico, la operación del embalse Urrá I tendría un efecto regulador de caudales, niveles y sedimentos a nivel mensual; pero a nivel diario produciría una variabilidad más alta en los mismos. Este efecto es aún más importante a nivel horario, porque la regla de operación actual del embalse produce pulsos horarios en sus descargas, los cuales son atenuados a otras escalas temporales mayores. Se planteó entonces, un escenario de 2 años de simulación horario (2001-2002), para tratar de inferir los efectos que tendría esta operación en la dinámica del sistema, especialmente en el caño Bugre que es el elemento de conexión entre el río

Sinú y el complejo lagunar. La simulación se realiza tomando como condiciones iniciales las condiciones antrópicas de intervención. En la Figura 11 se muestran los caudales obtenidos en el caño Bugre para dos periodos de simulación horaria, asociados a la época de verano (figura superior), entre los meses de noviembre de 2001 y marzo de 2002, y a invierno (figura inferior) entre mayo y diciembre de 2002.

Este resultado confirma nuevamente el efecto regulador

que tiene Urrá sobre los caudales a nivel mensual, la alta variabilidad a nivel diario y, más aún, a nivel horario. En verano se altera el patrón natural de la recesión por el efecto pulsátil de las descargas del embalse. En condiciones naturales, durante este periodo se presentan caudales cada vez menores; mientras que la operación de embalse induce caudales de altas magnitudes, característicos de la época de invierno. Por otro lado, en invierno se hace evidente el efecto atenuador de picos asociados con los eventos máximos naturales.

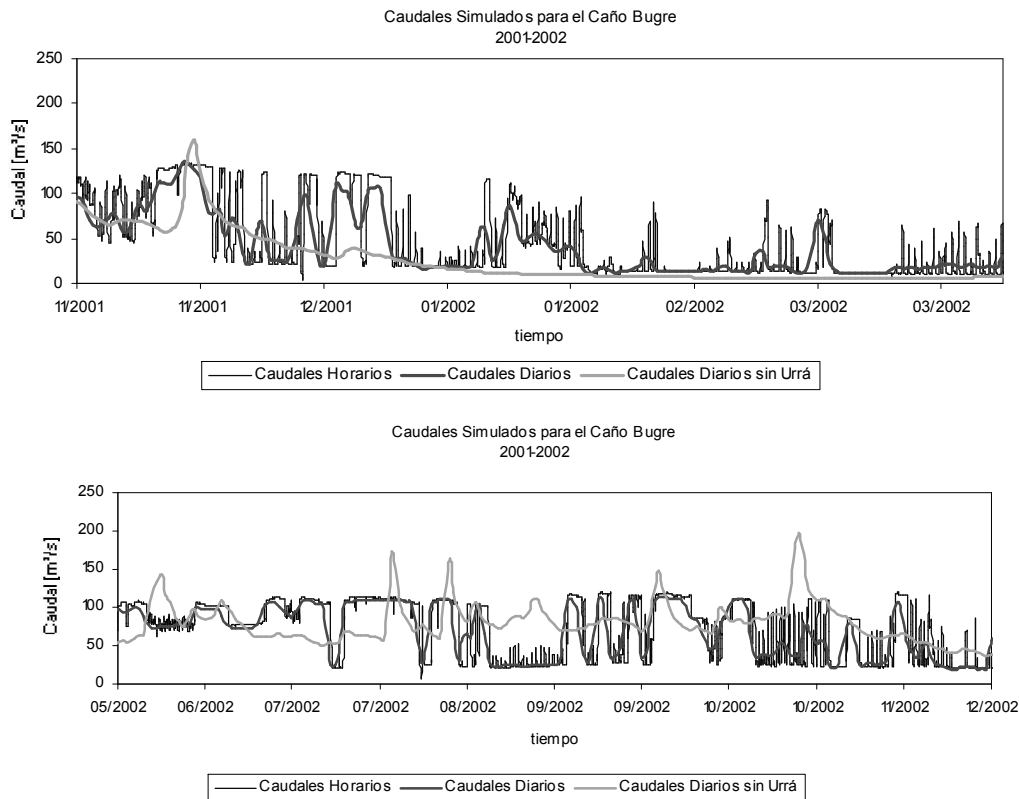


Figura 11. Caudales simulados para el caño Bugre 2001-2002.

La acción de pulsos de Urrá I genera variaciones drásticas en los caudales, sedimentos y niveles. El efecto de los pulsos se transmite a través del cauce del río Sinú, hasta encontrar los cuerpos de agua, que básicamente se comportan como una barrera que atenúa un poco dicho fenómeno. Es notorio el aumento de la variabilidad de las series de caudal diaria y horaria durante la operación del proyecto hidroeléctrico en comparación con el sistema sin Urrá I.

4. CONCLUSIONES

- Se desarrolló e implementó un modelo de balance hídrico y de sedimentos tratando de representar los procesos relacionados con la dinámica hídrica y sedimentológica del complejo lagunar del bajo Sinú. Teniendo en cuenta la escala espacio-temporal a la que se está trabajando se considera, según los resultados obtenidos durante la calibración y validación, que el modelo implementado es adecuado para representar esta dinámica. Las series

- hidrológicas (caudales, niveles y carga de sedimentos) obtenidas por el modelo representan adecuadamente los ciclos estacionales de las series registradas en las estaciones; hay una fuerte coincidencia en los periodos de aguas altas y bajas.
- Cada sistema requiere una adaptación del modelo de balance hídrico y de sedimentos, por eso es esencial la correcta conceptualización general del sistema. La construcción del modelo implica un conocimiento básico del sistema en el cual se aplicará.
 - Este estudio constituye una contribución al estudio de humedales en el país, esta vez desde la perspectiva de la dinámica hídrica y una primera aproximación a la sedimentológica. Para el complejo Lagunar del Bajo Sinú es una contribución al entendimiento de las complejas relaciones que ocurren en este sistema, buscando evaluar los impactos que sobre la dinámica hídrica han tenido las diferentes obras que han afectado este complejo, dando luces sobre cómo se podría restituir en alguna medida las condiciones naturales de este sistema, para evitar su desecación y permitir la sostenibilidad del sistema.
 - Con la aplicación del modelo se caracterizó el régimen de caudales, niveles y sedimentos en cauces y ciénagas pertenecientes al sistema y se cuantificaron las tasas de depositación y pérdida de volumen de los principales cuerpos de agua. Las series (caudales, niveles y carga de sedimentos) obtenidas por el modelo representan adecuadamente los ciclos estacionales de las series registradas en las estaciones, hay una fuerte coincidencia en los periodos de aguas altas y bajas.
 - Uno de los elementos más importantes en la aplicación de un modelo como el propuesto es la información batimétrica y topográfica. Bien es conocido que los resultados obtenidos y la veracidad de los mismos son función directa de la calidad de la información disponible. En este sentido, la información batimétrica del complejo lagunar del bajo Sinú es bastante deficiente, solo se disponía de los valores que representaban las relaciones morfométricas, pero no de curvas de nivel que permitieran representar espacialmente estas relaciones. Desafortunadamente esto limitó la aplicación del modelo, restringiendo un poco su potencial aplicabilidad. Por ejemplo, no se pudo determinar espacialmente la variación de las áreas inundadas del complejo para cada escenario, lo cual es fundamental para la implementación de medidas restrictivas en el complejo.
- El complejo lagunar del Bajo Sinú es un sistema que estaba sometido a un proceso natural de sedimentación, esto lo demuestra la conformación morfológica del complejo; sin embargo, las intervenciones antrópicas a las que ha sido sometido este sistema en los últimos años han cambiado esta dinámica. Actualmente el complejo cenagoso tiene su ciclo hidrológico alterado por la acción pulsátil de un embalse operado aguas arriba del mismo, acción que no solo modifica las condiciones hídricas, sino que también implica cambios en la dinámica sedimentológica del sistema.
 - Dos obras han afectado de manera directa las interrelaciones naturales entre el río Sinú y los cuerpos de agua del complejo: el embalse de Urrá y la carretera Cereté - Lórica. Igualmente hay algunas vías y carretables de importancia significativa en cuanto a su impacto sobre la dinámica hídrica del complejo, sobre los cuales será muy difícil actuar. Estas intervenciones antrópicas, especialmente el proyecto hidroeléctrico de Urrá y la carretera Cereté - Lórica, son de unas magnitudes tan importantes que es imposible pensar en recuperar la dinámica hídrica natural del complejo. En las tendencias futuras que se analicen del complejo estas dos intervenciones deben quedar inamovibles.
 - Uno de los elementos más importantes en la aplicación de un modelo como el propuesto es la información batimétrica y topográfica. Bien es conocido que los resultados obtenidos y la validez de los mismos son función directa de la calidad de la información disponible. En este sentido, la información batimétrica del complejo lagunar del bajo Sinú es bastante deficiente, y que solo se disponía de los valores que representaban las relaciones morfométricas, pero no de curvas de nivel que permitieran representar espacialmente estas relaciones. Desafortunadamente esto limitó la aplicación del modelo, restringiendo un poco su potencial aplicabilidad, por ejemplo no se pudo determinar espacialmente la variación de las áreas inundadas del complejo para cada escenario, lo cual es fundamental para la implementación de medidas restrictivas en el complejo.

5. AGRADECIMIENTOS

Al IDEAM, por suministrar toda la información hidrológica y sedimentológica, elemento fundamental para el desarrollo de la presente investigación

A la Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y San Jorge –CVS-, por la información bibliográfica, cartográfica y aerofotogramétrica suministrada, además por el acompañamiento durante la elaboración de este trabajo, especialmente a los funcionarios Rafael Espinosa, Isabel Raciny, Aldo Rincón

A URRÁ S.A. E.S.P, por suministrar toda la información relacionada con los monitoreos que esta realizando esta entidad en el río Sinú y los caños Aguas Prietas y Bugre.

6. BIBLIOGRAFIA

- Asselman N. y Van W. M., 2002. Development and application of a 1D floodplain sedimentation model for the River Rhine in The Netherlands. *Journal of Hydrology* 268. pp. 127–142.
- AMBIOTEC LTDA - Empresa Multipropósito URRÁ S.A., 1997. Diagnóstico ambiental de las ciénagas de Lorica y Betancí. Informe Final. Bogotá.
- Cardona y.M., y Fernandez J.M., 2001. Análisis de mareas por el Método de la descomposición en Armónicos. Trabajo Dirigido de Grado. Universidad Nacional de Colombia .Facultad de Minas. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Medellín.
- Correa P. L y Vélez J.I., 2002. Sistema de Información Geográfica para la Gestión Integral del Recurso Hídrico en la Cuenca de la Quebrada Chachafruto. Trabajo Dirigido de Grado. Universidad Nacional de Colombia .Facultad de Minas. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Medellín.
- Leopold, L. B. y Maddock. T., 1953. *The Hydraulic Geometry of Stream Channels and Some Physiographic Implications*. U.S Geol. Survey. Prof. Paper 282-A. Denver, EUA.
- Múnera, J. C., 2003. Dinámica Hidrológica de la Ciénaga Grande de Santa Marta Mediante Técnicas de Sensores Remotos. Tesis de Maestría en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Medellín.
- Julien P. (1995). *Erosion and Sedimentation*. Cambridge University Press. New York, 280 P.
- Press W. and Flannery B., Teukolsky S. y Vetterling W., 1986. *Numerical Recipies. The art of scientific computing*. Cambridge University Press. New York.
- Posada L. y Montoya L. J., 2000. Estimación de la carga de sedimentos en suspensión y total en ríos de montaña. *Memorias XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Tomo I. Córdoba. 22 al 27 de Octubre. Argentina.
- Syvitski J.P., Morehead M.D., Bahr D.B. y Mulder T., 2000. Estimating fluvial sediment transport: The rating parameters. *Water Resources Research*, 36(9), pp. 2747-2760.
- UNALMED-CVS, 2005. Diagnóstico de la Dinámica Hídrica Tenencia y Ocupación del Complejo Lagunar del Bajo Sinú. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Medellín.
- Vélez J., 2001. Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la simulación de las crecidas. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Escuela Técnica superior de ingenieros de Caminos y puertos. Departamento de Ingeniería. Hidráulica y medio Ambiente. Valencia. 7.
- Zuluaga M. y Poveda G., 2003. Relaciones de escala entre el transporte de sedimentos en suspensión y características morfoclimáticas de cuencas colombianas. *Memorias IX Congreso Colombiano de Geología*.