

Evaluación del comportamiento hídrico de la ciénaga de Cachimbero, implementando un modelo de balances de flujo

*Nelson Molina Giraldo**, *Carolina Piza Torres*, *Álvaro Wills Toro*

Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental —GAIA—. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.

(Recibido el 17 de noviembre de 2005. Aceptado el 30 de agosto de 2006)

Resumen

La ciénaga de Cachimbero, localizada en el municipio de Cimitarra, Santander, perteneciente a uno de los complejos de humedales inventariados por el Ministerio del Medio Ambiente y caracterizados como palustres, presenta valores ecológicos y ambientales de importancia regional. En este trabajo se realizó una aproximación conceptual y experimental a la hidrología de la ciénaga, determinando los componentes principales del balance hídrico y planteando un esquema de evaluación temporal. En este marco se implementó un esquema de observación y análisis de las variables hidrológicas, que permitió la construcción de un modelo de balances de flujo. Los controles básicos corresponden al régimen de lluvias en la cuenca tributaria, las características morfométricas del vaso, los procesos evapotranspirativos y las características del flujo en el caño de conexión con el río Magdalena cuyo nivel establece un control hidráulico aguas abajo. El principal objetivo fue formular un modelo operativo, a escala diaria, del funcionamiento hidrológico natural de la ciénaga, que permitió predecir los patrones temporales de variación de niveles y volúmenes de ésta.

-----*Palabras clave:* ciénaga, balance hídrico, hidrología, modelo de balances de flujo.

Use of a flow balance method for the evaluation of the hydrologic behavior of the wetland “ciénaga de Cachimbero”

Abstract

The Wetland “ciénaga de Cachimbero”, located in the municipality of Cimitarra, Santander, has ecological and environmental importance for the region. It has been

* Autor de correspondencia. Teléfono: +57+4+210 65 63, fax: 210 65 62, correo electrónico: nelsonalejandro88@yahoo.com.

inventoried by the Ministry of the Environment and been catalogued as Palustral. A combined modeling and experimental approach to the hydrology of the wetland was carried out aiming at establishing a temporal evaluation scheme; the principal components of the water balance were determined. A scheme of observation and analysis of the hydrological variables, allowing the modeling of the flow balance, was implemented. The main objective of this work was then to formulate a daily-scale operative model of the natural hydrology behavior of the wetland aimed at the prediction of the temporal patterns of the water level and volume variations. It was found that the hydrology behavior is primarily controlled by the rain patterns, the morphometric characteristics of the basin (bathymetry), the evapotranspiration processes, and the flow patterns of the river that communicates the wetland with the Magdalena River.

-----*Key words:* wetland, water balance, hydrology, flow balance model.

Introducción

Los humedales son un elemento vital dentro del amplio mosaico de ecosistemas con que cuenta el país y se constituyen, por su oferta de bienes y prestación de servicios ambientales, en un renglón importante de la economía nacional, regional y local [1]. En Colombia existen 1.938 ciénagas que cubren un área aproximada de 4.700 km² y se encuentran localizadas principalmente en los bajos de los ríos Magdalena, San Jorge y Cauca, y en los ríos Atrato y Sinú.

Dentro del ciclo hidrológico, los humedales juegan un rol crítico en el mantenimiento de la salud y regulación hídrica de sus cuencas hidrográficas, desarrollando entre otras, funciones de mitigación de impactos, retención de sedimentos y recarga de acuíferos [1]. La hidrología es probablemente el determinante más importante para el establecimiento y mantenimiento de tipos específicos de humedales y sus procesos [2]. Para conocer la hidrología de una ciénaga se hace necesario la formulación de un modelo matemático del balance hídrico. La hipótesis fundamental para implementar el algoritmo de cálculo del balance de agua en el sistema se basa en el principio de conservación de masa en su interpretación más simple, el cual establece que la diferencia entre las entradas y salidas de agua al volumen de control en un período de tiempo, debe ser igual al cambio en la cantidad de agua almacenada en dicho período [3]. Los principales componentes del balance hídrico son la precipitación, la escorrentía superficial y subsuperficial, y la evapotranspiración. La precisión de cada componente depende de cuán bien éste se pueda medir o calcular y de la magnitud de los errores asociados. Sin embargo, el balance hídrico junto con información sobre la geología local, nos provee una base para el entendimiento de los procesos hidrológicos y la química del agua de un humedal, entendiendo sus funciones y prediciendo los efectos de alteraciones hidrológicas naturales o antrópicas [4].

Un aspecto esencial en los complejos de humedales es la delimitación y caracterización espacial

de los diferentes elementos funcionales. El uso de sistemas de información geográfica (SIG), aplicados a modelos matemáticos, ha brindado a los ingenieros beneficios en la modelación y simulación de problemas que requieren interpretación y análisis de información espacial [5]. Además, son una gran herramienta para el almacenamiento, análisis y manipulación de información que puede ser referenciada a una situación geográfica [6], en este caso, con la identificación, mapeo y monitoreo de datos asociados a áreas de ciénagas el uso de un SIG puede facilitar su estudio. Así mismo, se podrán establecer indicadores de la hidrología en la ciénaga tales como modelos de drenaje, y predicciones de flujos de entrada y salida. Sirviendo además como soporte de mapeo para el cálculo y delimitación de áreas, volúmenes, polígonos de Thiessen y batimetría.

El estudio del comportamiento hídrico de la Ciénaga de Cachimbero se enmarcó dentro del proyecto “Estudio ecológico de la Ciénaga de Cachimbero” debido a la necesidad que se tenía de conocer su dinámica hidrológica. Dicho proyecto fue desarrollado por el Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental —GAIA— con el apoyo de la Corporación Laguna de Cachimbero. Esta ciénaga presenta valores ecológicos muy importantes para la región del Magdalena medio y por lo tanto su estudio y seguimiento es muy importante para su conservación.

Zona de estudio

En una escala de caracterización preliminar de los principales humedales colombianos, se han identificado 27 complejos de humedales de acuerdo con las condiciones topográficas e hidrográficas, destacándose en orden de importancia el complejo de la depresión momposina, el del Magdalena medio y el del río Atrato [1]. En el complejo del Magdalena medio se encuentran humedales estacionales y ciénagas permanentes de tamaño variable; dentro de las cuales están las Ciénagas de Cachimbero, el Encanto, Caño Negro y la Chiquita. Este sistema de ciénagas se encuentra ubicado en un sistema de terrazas bajas

erosionadas en depresiones asociadas al curso antiguo del río Magdalena.

La ciénaga de Cachimbero está ubicada en las coordenadas geográficas $6^{\circ} 24' N$, $74^{\circ} 48' W$ y a una altitud de 150 m. s. n. m. en el municipio de Cimitarra, departamento de Santander, en la región conocida como El Carare, valle medio del río Magdalena. La ciénaga cubre alrededor de 15 km^2 y está alimentada por una microcuenca de aproximadamente 141 km^2 , de la cual hacen parte los caños Mulerías, Gorgona, Herencia, El Diecinueve y otros caños menores. La ciénaga drena hacia el río Magdalena a través del caño Cachimbero, con una longitud aproximada de 5 km. El área de estudio está ubicada en la zona de vida bosque húmedo tropical, con una temperatura promedio anual de $28^{\circ} C$ y un régimen de precipitación bimodal, con dos períodos de lluvia de abril a mayo y de agosto a noviembre

separados por un período de verano fuerte en los meses de diciembre a febrero y un veranillo en los meses de junio a julio [7].

Metodología

Esquema de monitoreo

Se localizaron sitios de muestreo en tres zonas principales del sistema hidrológico (figura 1): zona de entrada a la ciénaga, zona ciénaga y zona de salida de la ciénaga, en los cuales se realizaron 6 campañas de muestreo entre octubre de 2003 y noviembre de 2004. La zona de entrada corresponde a las cuencas aportantes de los principales caños afluentes (caño Mulerías, Gorgona, El Diecinueve, Herencia). La zona ciénaga comprende el espejo de agua y la zona inundada (herbazal) y la zona de salida corresponde al caño Cachimbero el cual evacua las aguas de la ciénaga hacia el río Magdalena.

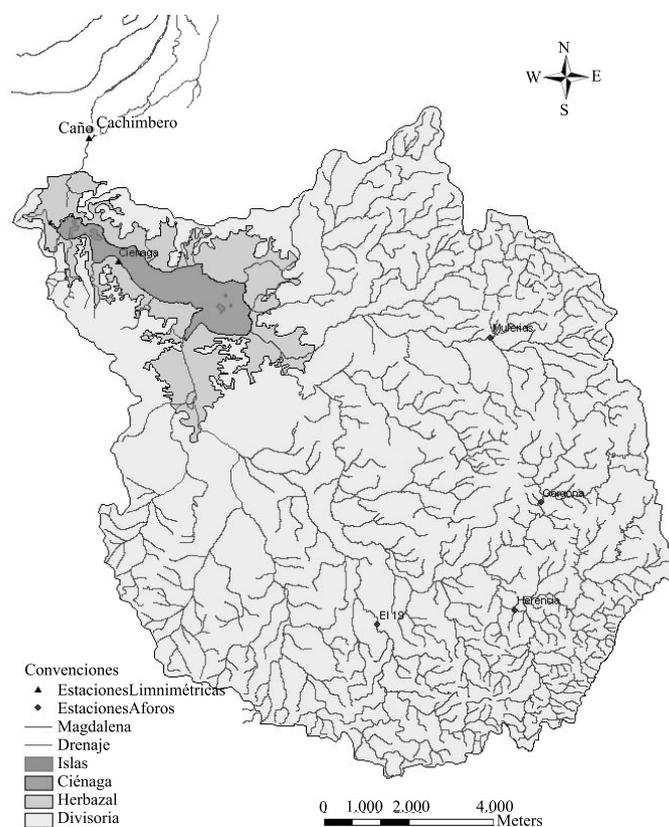


Figura 1 Zona de estudio

Se realizaron levantamientos topográficos de secciones transversales y aforos en el caño salida y en los principales caños de entrada. Se registraron diariamente los niveles en la ciénaga y en el caño de salida. Además, se levantó la batimetría de la ciénaga con transectos longitudinales y transversales cada cien metros.

Modelación

Balance Hídrico de Cuencas

Para la realización del cálculo de escorrentía proveniente de las cuencas tributarias, fue necesaria la implementación de un modelo que tuviera como base la relación lluvia-escorrentía, debido a que ninguna de las cuencas tributarias contaba con estaciones hidrométricas para la medición de caudal. El modelo se corrió a escala diaria entre 1994 y 2004. Se empleó el modelo de tanques [8], en el cual se asume que el agua se distribuye

$$V_{i+1} = V_i + P \frac{Ac_{i+1} + Ac_i}{2} + Esc \frac{Ad_{i+1} + Ad_i}{2} - \frac{Qc_{i+1} + Qc_i}{2} - (ETP_{esp} * A_{esp}) - ETP_{herb} \frac{Aher_{i+1} + Aher_i}{2}$$

Donde V_{i+1} y V_i son los almacenamientos en la ciénaga al final y al comienzo del período, P es la precipitación directa sobre la ciénaga, Ac , Ad , A_{esp} y A_{her} son las áreas superficiales de la ciénaga, la cuenca drenante, el espejo de agua y el herbazal, respectivamente. Esc es la escorrentía total aportada por la cuenca drenante obtenida a partir del modelo de tanques. Qc es el caudal evacuado por el Caño Cachimbero y ETP_{esp} y ETP_{herb} son la evapotranspiración desde el espejo de agua y el herbazal, respectivamente. El flujo subterráneo no se tuvo en cuenta en el modelo, considerando que esta componente no tiene gran influencia es los resultados del balance hídrico.

Por medio de la batimetría y la utilización de un sistema de información geográfica mediante la elaboración de un TIN (Triangular Irregular Network), se halló la relación nivel-área-volumen de la ciénaga. Se partió de una condición inicial teniendo en cuenta el fin de un periodo húmedo (noviembre 1993).

en cuatro tanques o niveles de almacenamiento conectados entre sí (figura 2).

Balance hídrico ciénaga

El modelo se realizó teniendo en cuenta las características particulares de cada una de las unidades hidrológicas del ecosistema, cuenca drenante, espejo de agua y herbazal.

Las variables de entrada del modelo son la precipitación sobre el herbazal y el espejo de agua, la escorrentía obtenida del modelo del balance hídrico diario de las cuencas aportantes y la evapotranspiración desde el herbazal y el espejo de agua. Las variables calculadas por el modelo son el volumen, el caudal evacuado por el caño y el nivel del agua de la ciénaga.

La hipótesis fundamental para implementar el algoritmo de cálculo del balance de agua se hizo con base en el principio de conservación de masa:

Para la determinación del caudal evacuado por el caño Cachimbero se elaboró una curva de calibración del caudal con respecto al nivel de la ciénaga. Esta curva se construyó con los aforos realizados en el caño y nivel de mira registrado en la ciénaga.

Se utilizaron diferentes métodos para la estimación de la evapotranspiración potencial tales como la ecuación Penman [9], la cual tiene fundamentos teóricos basados en la combinación del método de balance de energía y el de transferencia de masas, la ecuación de Turc modificado [10], la cual está en función de la radiación global incidente, la temperatura, la humedad relativa y una constante que depende del mes o período considerado, la ecuación de Thornthwaite [11] y la ecuación de Linacre que involucra los parámetros de humedad relativa y temperatura media mensual [12]. Sin embargo se seleccionó el método propuesto por Linacre

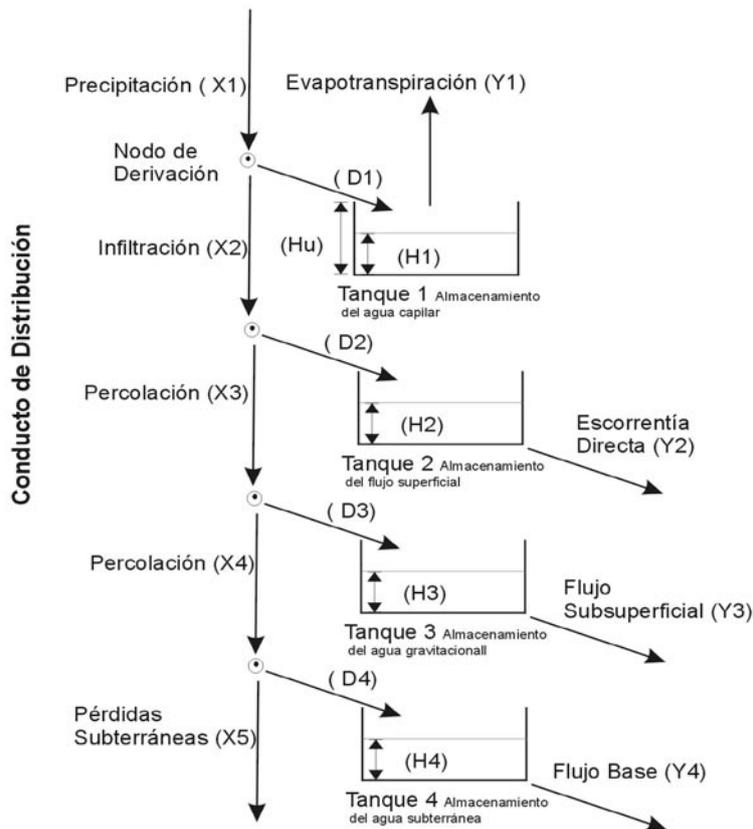


Figura 2 Esquema general del modelo (tomado de la referencia [9])

porque fue la fórmula que mejor se adaptó a las condiciones climáticas y geográficas de la zona de estudio.

Requerimientos de información

Información meteorológica

Se utilizaron registros de precipitación, temperatura, evaporación, humedad relativa, brillo solar y recorrido del viento de cinco estaciones hidrometeorológicas administradas por el IDEAM que fueron escogidas entre las estaciones disponibles gracias a su cercanía al área de estudio. Además de las estaciones del IDEAM, se contó con registros diarios de precipitación desde 1999 hasta 2004 de un pluviómetro ubicado en la Hacienda las Vegas, localizada en la cuenca drenante de la ciénaga Cachimbero.

Información geográfica

Se adquirieron planchas a escala 1:25.000 del IGAC, que se digitalizaron para su posterior montaje en un sistema de información geográfica, el cual fue un soporte de mapeo para el cálculo y delimitación de áreas, volúmenes, polígonos de Thiessen y batimetría. Además, se obtuvieron fotografías aéreas en el IGAC, que fueron fotointerpretadas, permitiendo así la delimitación del vaso, del área inundable (herbazal), caños y formaciones vegetales asociadas. Así mismo se dispuso de imágenes de satélite LANDSAT para los años 1991 y 2001. Esta información se empleó para detallar los rasgos geomorfológicos más importantes del sistema cenagoso. Para la identificación de las unidades hidrológicas se conjugaron el análisis de sensores remotos (imágenes de satélite y fotografías aéreas) y controles

de campo (GPS) para luego ser articulados en un sistema de información geográfica (ArcGis 8.2, ESRI).

Resultados y discusión

Información climatológica

La zona de estudio registra precipitaciones medias anuales de 2.453,5 mm/año, con un régimen de lluvias bimodal, con dos períodos secos, el

primero comprendido entre diciembre y febrero y el segundo se presenta en el mes de agosto y dos períodos lluviosos comprendidos entre abril a mayo y septiembre a octubre (figura 3). Los demás meses se pueden considerar como de transición. Las temperaturas más altas en la zona se presentan de enero a febrero y las más bajas se registran en los períodos lluviosos especialmente en septiembre, octubre y noviembre. La temperatura promedio anual de la zona de estudio es de 27,8 °C.

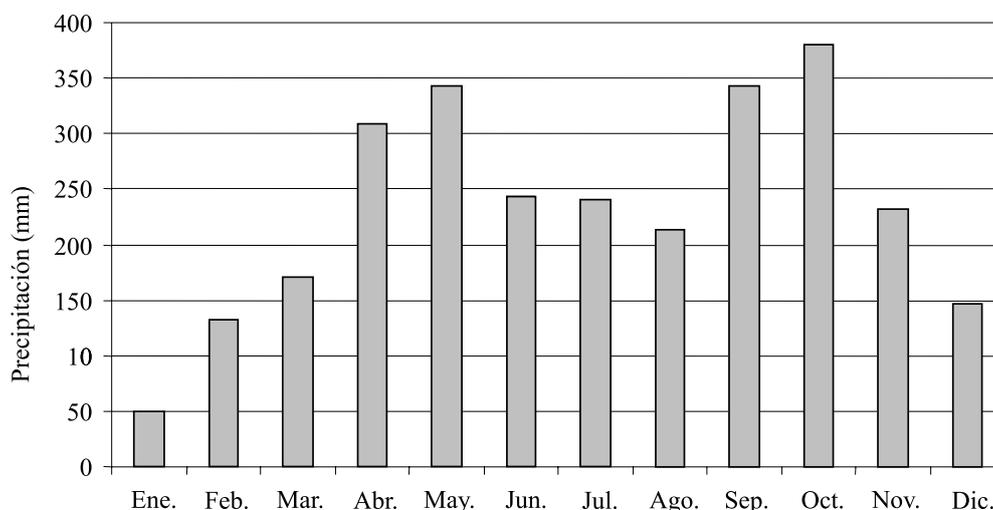


Figura 3 Precipitación media mensual multianual en la zona de estudio desde 1984 hasta 2000

La humedad relativa promedio en la zona es del orden del 83%, lo cual lo clasifica como una región húmeda y la evaporación de tanque media multianual en la ciénaga es del orden de 1.300 mm/año.

Balance hídrico de las cuencas aportantes

A través del modelo se pudo estimar el aporte total de agua de la cuenca drenante hacia la ciénaga. En la figura 4 se puede observar que el mayor aporte de caudal corresponde a los meses de mayo y octubre. La escorrentía total mensual

multianual aportada por la cuenca tributaria a la ciénaga de Cachimbero, tiene un valor mínimo de 2,5 m³/s, un promedio de 7,1 m³/s y un valor máximo de 12 m³/s. Igualmente el aporte de escorrentía, tiene el mismo comportamiento bimodal del régimen de lluvias.

En la figura 5 se presenta la serie de caudales simulados aportados por la cuenca drenante a la ciénaga para el período de 1998 a 2004 y se observa la respuesta de ésta con la precipitación de la zona, siendo los años con mayor aporte de escorrentía 2000 y 2004, debido a la alta precipitación reportada para esas épocas.

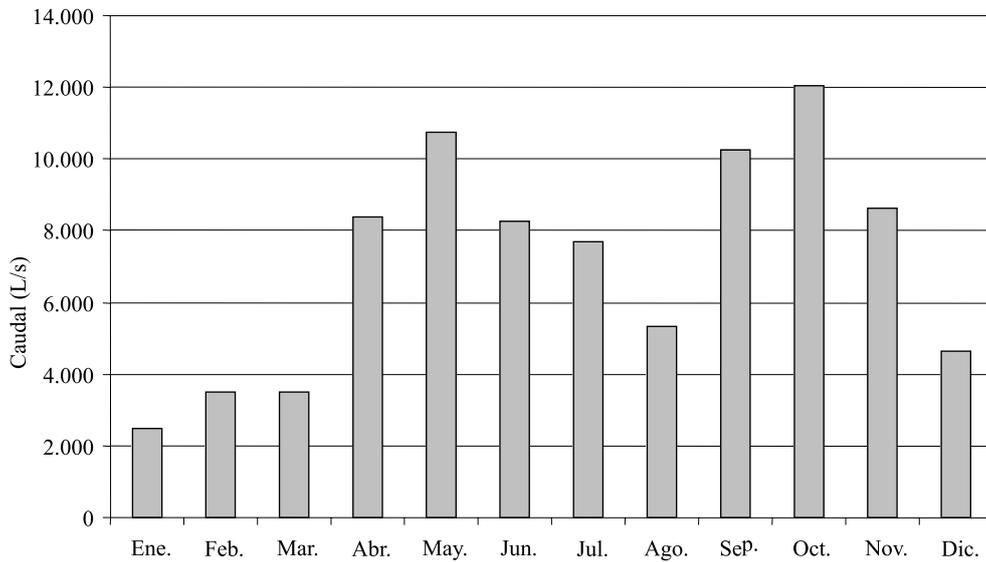


Figura 4 Escorrentía total aportada por la cuenca drenante

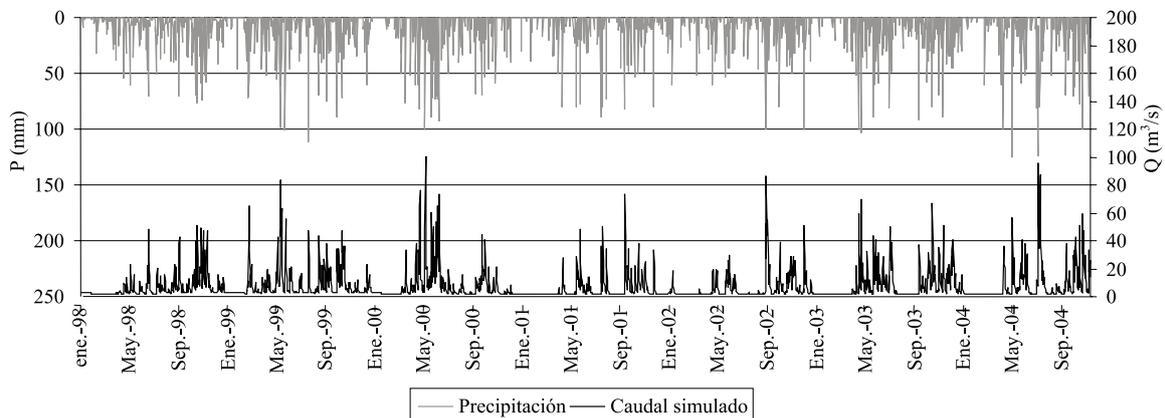


Figura 5 Serie diaria de caudales simulados de la cuenca drenante de la ciénaga

Balance hídrico de la ciénaga

Para la calibración del modelo se compararon los niveles y volúmenes simulados en la ciénaga con los niveles observados en la mira instalada en el espejo de agua durante el período comprendido entre el 23 de abril y el 5 de noviembre de 2004. En el análisis de sensibilidad, todos los parámetros y los datos de entrada se variaron individualmente en un porcentaje constante para determinar cuál parámetro, condición inicial o condición de

borde causa el mayor cambio en la simulación. Este proceso se realizó hasta obtener resultados que se consideraban aceptables.

El modelo de balance hídrico presenta un período de adaptación para el cálculo de la escorrentía y niveles de la ciénaga durante el período comprendido entre 1994 y 1998. Durante este lapso el modelo presentó una alta sensibilidad a la variación de las condiciones iniciales. A partir del año 1999 el modelo adquirió estabilidad,

dependiendo principalmente de las condiciones climatológicas diarias y no de las condiciones iniciales propuestas para el modelo.

Como se puede observar en la figura 6, la serie de niveles simulados y observados para el período de calibración presentan una tendencia similar, presentando un coeficiente de correlación de 0,79

y una desviación estándar de 0,27. Como se dijo anteriormente para la calibración del modelo sólo se contaba con información de niveles observados en la ciénaga para un período de tiempo muy corto. Sin embargo se obtuvo una buena aproximación al comportamiento de los niveles de la ciénaga y los resultados obtenidos reflejan en buena medida las condiciones observadas.

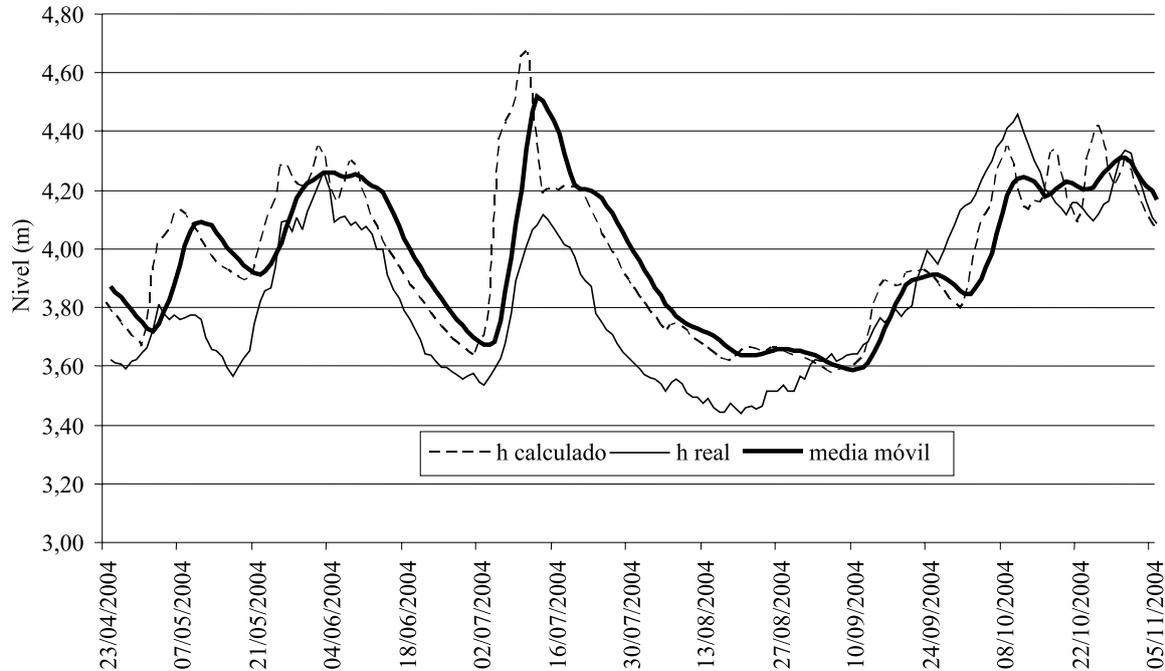


Figura 6 Niveles diarios de la ciénaga observados y simulados durante el período del 23 de abril al 5 de noviembre de 2004

También se evidencia la respuesta rápida en la variación del nivel de la ciénaga con la precipitación ocurrida sobre la zona de estudio, además se observa que el modelo sobreestima el nivel y por ende el volumen para la mayor parte del período, lo cual muestra que el modelo es sensible a los aportes de la escorrentía proveniente de la cuenca tributaria y a la precipitación.

En la figura 7 se muestra la serie de niveles simulados en la ciénaga para los años de 1998 a 2004, período durante el cual el modelo presentó mayor estabilidad de acuerdo con la calibración realizada. En ésta se observa la respuesta de los

niveles de la ciénaga con la precipitación ocurrida en la zona.

La ciénaga, como era de esperarse, presenta regímenes bimodales de almacenamiento de agua. En la figura 8 se observan dos períodos de flujo neto positivo en los que la ciénaga aumenta su almacenamiento de abril a mayo y de agosto a octubre y dos períodos de flujo neto negativo en los que la ciénaga evacua más agua de la que le ingresa, en los meses de junio a julio y noviembre a enero. Lo anterior está relacionado con el comportamiento bimodal de la precipitación en la zona de estudio, presentando aportes netos máximos de 6,2 Mm³/

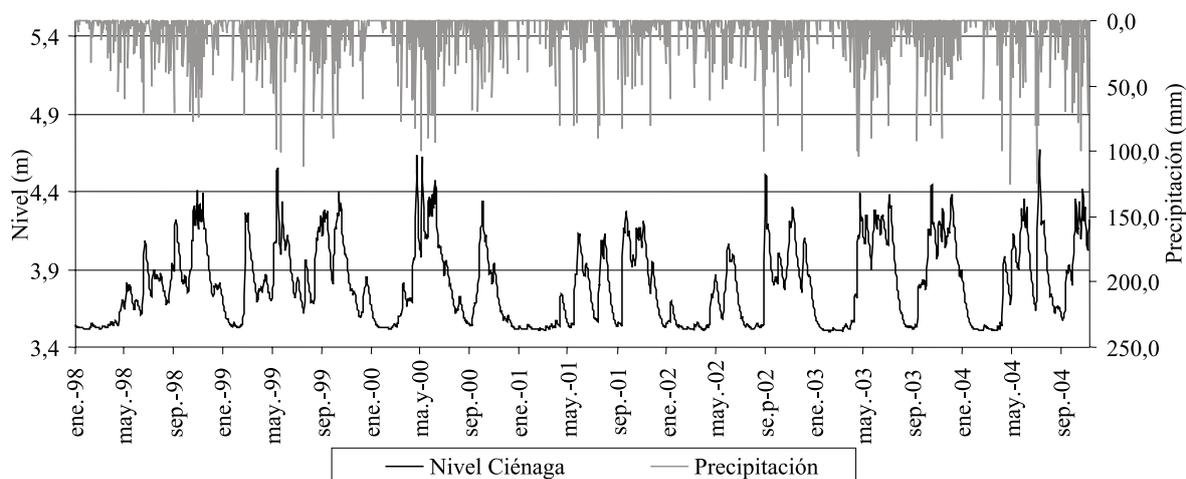


Figura 7 Serie diaria de niveles simulados y precipitación en la ciénaga

mes y extracciones netas máximas de $4,6 \text{ Mm}^3/\text{mes}$. Sin embargo se presenta una anomalía en el mes de marzo, cuando el flujo neto es negativo rompiendo con el comportamiento esperado. Esto se debe a que el mes de febrero es relativamente seco (90 mm/mes) y marzo es de transición de estiaje a invierno; sin embargo, en los 10 años en los cuales se corrió el modelo (1994-2004) se presentaron dos eventos extremos en los que cayeron fuertes lluvias en el mes de febrero (1996 y 1999) del orden de 350 mm/mes . Por esta razón, el nivel de la ciénaga aumentaba en gran medida en el mes de febrero para tales eventos extremos y luego en el mes de marzo este alto nivel de la ciénaga daba como resultado una alta evacuación de flujo por el Caño Cachimbero y esto sumado a que en este mes la precipitación disminuía con respecto al evento extremo del mes anterior, presentaba un flujo neto negativo. Además debido a la poca cantidad de años evaluados, estos eventos representaron un alto porcentaje estadístico en los promedios multianuales del flujo neto.

El caudal mensual multianual simulado que evacua la ciénaga por el caño Cachimbero se presenta en la figura 9, donde se observa de nuevo el comportamiento bimodal de acuerdo con la precipitación de la zona. Los mayores caudales se presentan en los meses de mayo y octubre con flujos de $10,8$ y $14 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente y

los menores caudales en febrero con $2,6 \text{ m}^3/\text{s}$ en promedio.

Estos caudales responden al nivel de la ciénaga por lo que los mayores caudales se dan cuando la ciénaga presenta igualmente niveles muy altos.

Discusión y conclusiones

Para la elaboración del modelo del balance hídrico de la ciénaga de Cachimbero, inicialmente se planteó que la variación en el nivel de agua, se encontraba asociado además de los aportes de la cuenca tributaria, con el control realizado por el nivel del río Magdalena. Sin embargo, debido a problemas en la adquisición de la información necesaria para establecer una relación entre ambos niveles, el modelo sólo se ensayó considerando únicamente de los procesos climatológicos inherentes a su cuenca tributaria.

A pesar de las limitaciones en la información disponible para la calibración del modelo, lo que impidió que se realizara una mejor calibración e incluso que se validara el modelo, se obtuvo una buena aproximación de los niveles simulados en la época en que se tenían registros de nivel de la ciénaga tomados en campo, por lo que el modelo es robusto en la determinación de los principales parámetros simulados como el nivel, el volumen y el caudal desalojado por el caño Cachimbero.

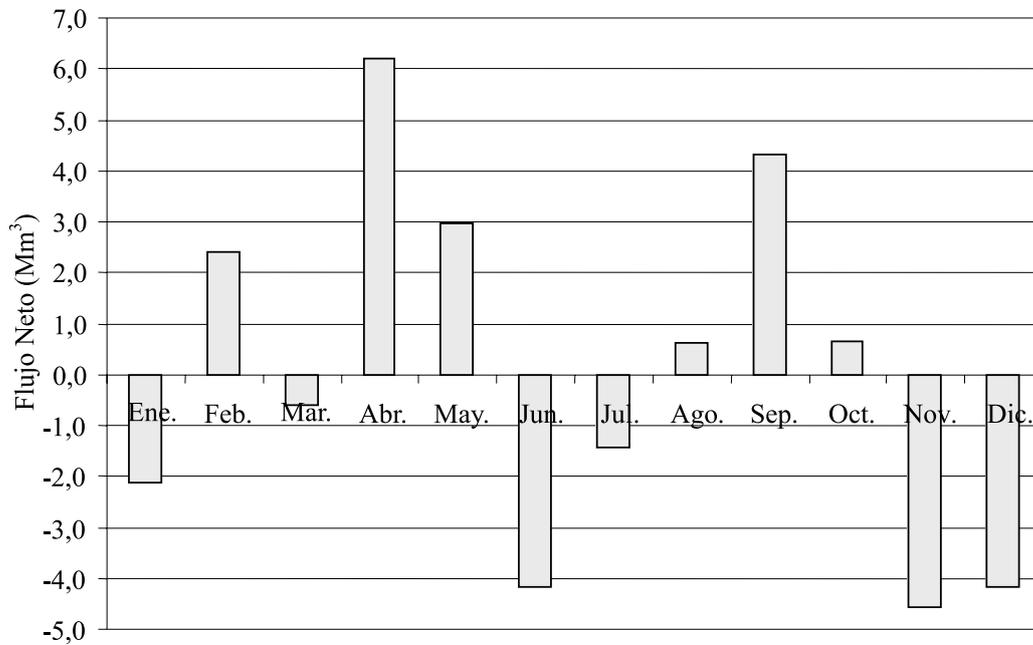


Figura 8 Flujo neto en volumen de agua en la ciénaga

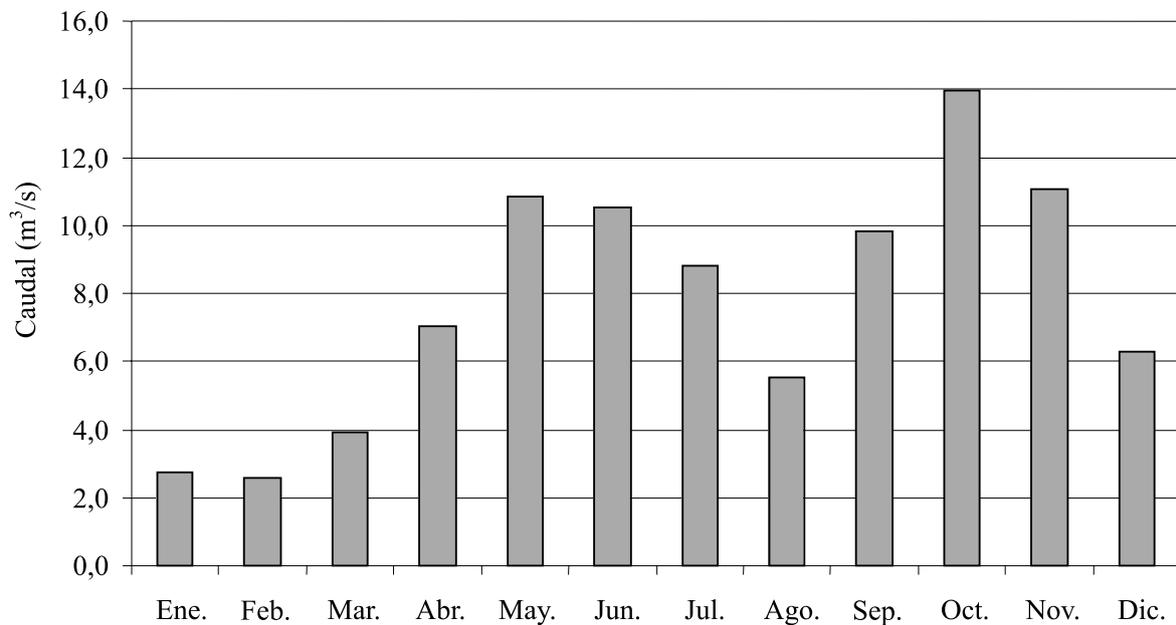


Figura 9 Caudal mensual multianual evacuado por caño Cachimbero

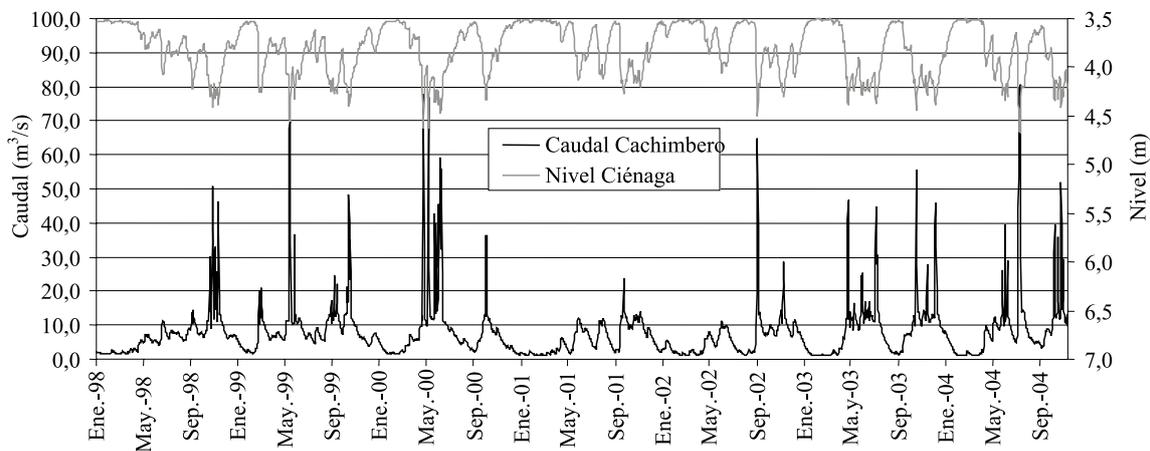


Figura 10 Serie diaria de caudales simulados de caño Cachimbero

Además, al realizar los análisis de sensibilidad con las condiciones iniciales del sistema se pudo observar que el modelo se debe correr para períodos largos de tiempo (> 6 años), puesto que así se obtiene una aproximación más exacta a los datos reales.

El funcionamiento hidrológico de la ciénaga depende fundamentalmente de los procesos climatológicos de su cuenca tributaria. Además, el patrón de inundación de la ciénaga, corresponde al régimen de lluvias de la zona; teniendo por ende un comportamiento bimodal, presentando los niveles más bajos en los meses de diciembre a febrero y en el mes de junio y los niveles más altos en los meses de abril a mayo y de septiembre a octubre.

Al comparar las diferentes entradas y salidas de agua de la ciénaga en el modelo de balance hídrico, se encontró que el factor dominante en las entradas es el aporte por escorrentía y en las salidas es el caudal que desaloja a través del caño Cachimbero. Sin embargo, en el herbazal se da una alta evapotranspiración diaria del orden de 4 mm, pero ésta no juega un papel fundamental en la salida de agua, puesto que la zona de estudio presenta una alta precipitación. Las fluctuaciones del nivel del agua en la ciénaga están influenciadas

principalmente por los aportes y las salidas de agua de la ciénaga por escorrentía, relacionados con las condiciones climáticas de la zona.

En la calibración del modelo se encontraron factores determinantes que pueden representarnos una mayor incertidumbre en la simulación del balance hídrico de la ciénaga. Estos factores son los registros de precipitación de zona, la batimetría del vaso de la ciénaga y la curva de calibración de nivel de ciénaga y el caudal efluente por el caño Cachimbero. Con el fin de obtener resultados óptimos al correr un modelo de cálculo de balance hídrico, es necesario contar con registros hidrológicos continuos, además de ubicar una estación meteorológica en la ciénaga. La batimetría del herbazal nos representó gran incertidumbre debido al difícil acceso a esta zona por la alta presencia de tapones y vegetación flotante e inundada por lo que se tuvieron que realizar interpolaciones gruesas en estas áreas para obtener la curva nivel-área-volumen la cual es fundamental al momento de establecer el balance hídrico de un sistema cenagoso. Es necesario no sólo mejorar la curva de calibración de caudales del Caño Cachimbero con el nivel de la ciénaga sino también realizar una modelación hidráulica de este caño para obtener una mejor aproximación al caudal que no sólo dependa del

nivel de la ciénaga sino también del nivel del río Magdalena, el cual puede representar un control hidráulico en alguna épocas del año.

La ciénaga de Cachimbero tiene una gran importancia ecológica regional, sin embargo, en el transcurso de la investigación se detectó la construcción de diques y terraplenes, que a corto y largo plazo pueden cambiar el funcionamiento hidrológico natural de ésta. Además, el alto crecimiento de la ganadería en la cuenca tributaria puede afectar en gran medida el aporte de agua a la ciénaga.

Finalmente, es bueno apuntar que el conocimiento integral del funcionamiento de los sistemas cenagosos debe ir de la mano con un estudio detallado del comportamiento hidrológico de éstos. Con el estudio realizado en la ciénaga de Cachimbero se pudo obtener una buena aproximación a su comportamiento hidrológico, estableciendo la variación temporal de las principales variables de salida del modelo como el nivel de la ciénaga y el caudal evacuado por el Caño Cachimbero.

Agradecimientos

Al Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental, GAIA y a la Corporación Laguna de Cachimbero por el apoyo logístico y financiero. A la Familia Ríos, del corregimiento La Ye de la Torre en el municipio de Cimitarra, Santander; por su hospitalidad y colaboración.

Referencias

1. Ministerio del medio ambiente. *Política nacional para humedales interiores de Colombia. Estrategias para su conservación y uso racional*. Bogotá, Colombia. 2001. p. 52.
2. L. Hawk, A. P. Lipstein, H.T. Solanki. *Wetland Hydroperiod Analysis*. Proc. 6th Biennial Stormwater Research & Watershed Management Conference. Tampa, Florida, South West Florida Water Management District. September 14-17, 1999. pp. 216-225 URL: <http://www.stormwater-resources.com/Library/107WWetlandHydroperiod.pdf>. Consultada en octubre de 2004.
3. J.C., Múnera, J. I. Vélez. “Dinámica Hidrológica de la Ciénaga Grande de Santa Marta”. *Avances en Recursos Hidráulicos*. N.º 10, 2003. pp. 47-62.
4. V. Carter. *Technical Aspects of Wetlands: Wetland Hydrology, Water Quality, and Associated Functions*. J.D. Fretwell, J.S. Williams, P.J. Redman (eds.), National Water Summary on Wetland Resources. United States Geological Survey Water Supply Paper 2425. 1996. 24 pp. URL: <http://water.usgs.gov/nwsum/WSP2425/hydrology.html>. Consultada en octubre de 2004.
5. A. Maestre, M. Díaz-Granados. “Balance hídrico de ciénagas: modelación matemática e implementación con un sistema de información geográfica”. *Memos de investigación CIFI*. No 251. Universidad de los Andes. Bogotá. 1996. pp 15.
6. C. J. Arbuttle, A.D. Huryn, S. A. Israel. *Applications of Remote Sensing and GIS to Wetland Inventory: upland bogs*. Tenth Annual Colloquium of the Spatial Information Research Center: University of Otago, Dunedin, New Zealand. 1998. pp. 15-24. URL: <http://divcom.otago.ac.nz/sirc/webpages/Conferences/SIRC98/98Abstracts/4/Arbuttle.pdf>. Consultada en octubre 2004.
7. J. C. Restrepo, J. L. Toro. Reserva Natural Laguna de Cachimbero: Caracterización Biofísica. CORANTIOQUIA-Corporación Laguna de Cachimbero. Medellín. 1997. pp. 60.
8. F. Quintero, J.I. Vélez. “La cuenta física del agua mediante modelación hidrológica distribuida”. *Gestión y Ambiente*. Vol. 8. 2005. pp. 95-104.
9. J. I. Vélez, G. Poveda, O. Mesa. *Balances hidrológicos de Colombia*. Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín Colombia. 2000. pp.150.
10. L. Turc “Estimation of irrigation water requirements, potencial evapotranspiration: A simple climatic formula evolved up to date”. *Ann Agron*. N.º 12.1962, pp.13-49
11. C.W Thornthwaite, J.R Mather,. “Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance”. *Climatology*. N.º 10: 1957. pp.183-311
12. E.T Linacre. “A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone”. *Agric. Meteorol*. N.º 18. 1977. pp. 409-424.