

INFLUENCIA DEL RÍO SINÚ Y EL MAR CARIBE EN EL SISTEMA LAGUNAR DE CISPATÁ

Mauricio Ruiz-Ochoa¹, Gladys Bernal¹ y Jaime Polanía²

1 Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Cra. 80 No. 65-223, AA 1027, Medellín, Colombia. maruizo@unalmed.edu.co (M.R.O.); gbernal@unalmed.edu.co (G.B.)

2 Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Instituto de Estudios Ambientales, Colombia. jhpolaniav@unalmed.edu.co

RESUMEN

La influencia del río Sinú y del mar Caribe en el sistema lagunar de Cispatá se estudió a través del análisis anual, interanual y de tendencia de las series de tiempo hidrológicas (precipitación, caudal) y marinas (TSM, nivel). Las series hidrológicas fueron correlacionadas con los índices macroclimáticos ONI, NAO y PDO y, a partir del registro de las estaciones de caudal ubicadas aguas abajo de la represa Urrá I, se estudiaron sus efectos sobre el sistema lagunar. No se encontró relación significativa entre la precipitación y los eventos ENSO. Los caudales de la parte alta de la cuenca aportan el 50% de la salida. El caudal que llega al sistema lagunar presentó un ciclo unimodal. Anomalías positivas de caudal estuvieron asociadas con La Niña y anomalías negativas con El Niño. Se encontró que el efecto de la regulación de caudales de Urrá I se marca en las estaciones Angostura de Urrá, Pasacaballo y Caño Grande, en tanto que en la estación Cotoca Abajo no es apreciable. El nivel del mar y la TSM registraron un ascenso de 25 cm en 44 años y de 0.6 °C en 20 años, respectivamente. Se plantearon cuatro escenarios prospectivos sobre la influencia río – mar en el sistema lagunar, considerando el ascenso del nivel del mar. En los dos primeros se supone que las comunicaciones entre el río Sinú y el sistema lagunar se mantendrán y en los dos siguientes que uno de los dos brazos que alimentan al sistema se taponará.

PALABRAS CLAVE: ENSO, Variabilidad climática, Cispatá, Río Sinú, Mar Caribe.

ABSTRACT

Influence of the Sinú River and the Caribbean Sea over the Cispatá lagoon system. The influence of the Sinú River and the Caribbean Sea over the Cispatá lagoon system was studied through annual and interannual analysis, as well as the tendency of hydrological (precipitation, discharge), and marine (SST, level) time series. The hydrological series were correlated with ONI, NAO and PDO macroclimatic indices, and, from data logging of flow stations down of Urrá I dam, their effects over the lagoon system were studied. No significant correlation between the precipitation and ENSO was found. The flow of the river basin highlands contribute with 50% of the one released. The flow coming into the lagoon system displayed a monomodal cycle. Positive flow anomalies



were associated with La Niña, negative ones with El Niño. We found that the regulation effect on the flow by Urrá I is noticeable in the Angostura de Urrá, Pasacaballo, and Caño Grande stations, whereas in the Cotoca Abajo station it is not substantial. The sea level and the SST registered a 25 cm rise in 44 years, and one of 0.6 °C in 20 years, respectively. Four prospective scenarios on the river – sea influence over the lagoon system were presented, considering the sea level rise. The first two scenarios suppose that the communications between the Sinú River and the lagoon system will last; and the following two that one of the two arms of the river that feed the system will clog.

KEY WORDS: ENSO, Climate variability, Cispatá, Sinú River, Caribbean Sea.

INTRODUCCIÓN

El sistema lagunar de Cispatá hace parte del plano deltáico del río Sinú en el Caribe colombiano. El desarrollo de este delta se ha dado en cuatro etapas, con diferentes bocas principales: Los Venados (antes de 1762), Mestizos (1762-1849), Cispatá (1849-1938) y Tinajones (desde 1938 hasta la actualidad). En promedio, el delta ha permanecido más o menos estable 100 años en cada etapa. La evolución del delta permitió la formación del sistema lagunar en el margen este de la desembocadura actual, conformado por lagunas interconectadas con el río y el mar (Robertson y Chaparro, 1998; Serrano, 2004).

Desde el momento en que se inició el crecimiento del delta de Tinajones se ha presentado erosión de playas en los sectores internos sur y sureste de la línea costera, debido a que gran parte de los aportes de arena fueron desviados hacia allí. Además, el represamiento del río Sinú por el embalse Urrá I en 1999, fragmentó el curso del río aguas arriba, en la zona del embalse, y aguas abajo (Atencio-García, 2000). Aunque en ocasiones el represamiento no afecta los sistemas que son alimentados por numerosos ríos (por ejemplo el Magdalena en Betania), sí lo hace en aquellos con pocos afluentes, como el Sinú (Márquez y Guillot, 2001). Otro cambio intenso en el sistema lagunar de Cispatá es el nivel del mar, que ha aumentado por el calentamiento global (Bernal *et al.*, 2006; Ruiz-Ochoa, 2006).

Orozco y Ruiz (1987) en México, Perú y Venezuela, Hogarth (1999) en Pakistán y Márquez y Guillot (2001) en Colombia reconocen que el represamiento de los ríos causa efectos sobre los ecosistemas ubicados aguas abajo. Estos efectos incluyen: modificación de la dinámica ambiental, cambios en la textura del suelo, intrusión de la cuña salina, acidificación (causante de pérdidas en fertilidad) y desaparición de flora.

Las formaciones de manglar del sistema lagunar son consideradas, por su extensión y conservación, las más importantes del Caribe colombiano (Sánchez-Páez *et al.*, 2005). Los manglares son ecosistemas abiertos, altamente productivos, que aportan a la producción primaria de sistemas costeros (Cintrón y Schaeffer-Novelli, 1983; Prah, 1989); se caracterizan por la alta capacidad de adaptación a las condiciones ambientales (Field,

1999) y dependen de los flujos hídricos para llevar a cabo el intercambio de nutrientes (Cintrón y Schaeffer-Novelli, 1983).

Orozco y Ruiz (1987), Atencio-García (2000) y Díaz *et al.* (2000) han señalado que algunos daños ecológicos en Cispatá se han debido a cambios en el intercambio de agua dulce y salada, motivados por el funcionamiento de la represa. Sin embargo, hasta el momento ningún trabajo ha documentado la variabilidad en la interacción fluvio-marina ni demostrado el efecto de la operación de la represa ni de fenómenos climáticos globales como el calentamiento actual.

Este trabajo analiza la variabilidad de las series de tiempo hidrológicas del río Sinú y marinas del Caribe, con el fin de entenderlas en distintas escalas temporales, su relación con eventos climáticos globales y su influencia sobre el sistema lagunar. A partir de estos análisis se plantean cuatro escenarios prospectivos, que deben ser considerados en los planes de manejo ambiental de la zona.

ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del río Sinú (Figura 1) está ubicada al noroeste de Colombia, entre los $7^{\circ} 49' - 9^{\circ} 26' N$ y los $75^{\circ} 20' - 76^{\circ} 29' O$ (Palacio y Restrepo, 1999). El río Sinú tiene su origen en el extremo norte de la cordillera occidental de los Andes, en la cuchilla de

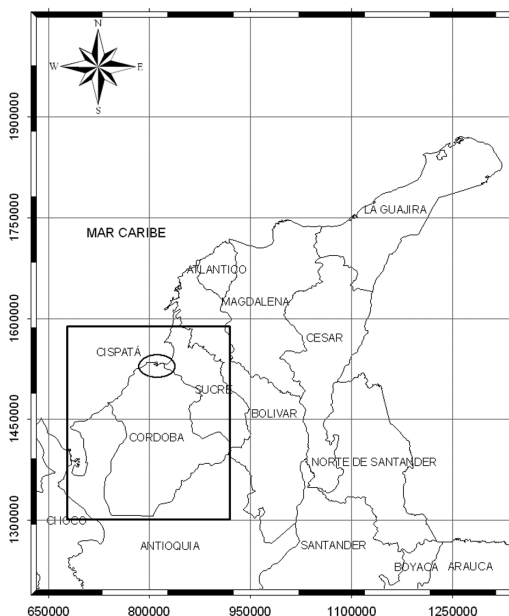


Figura 1. (a) Localización del área de estudio.

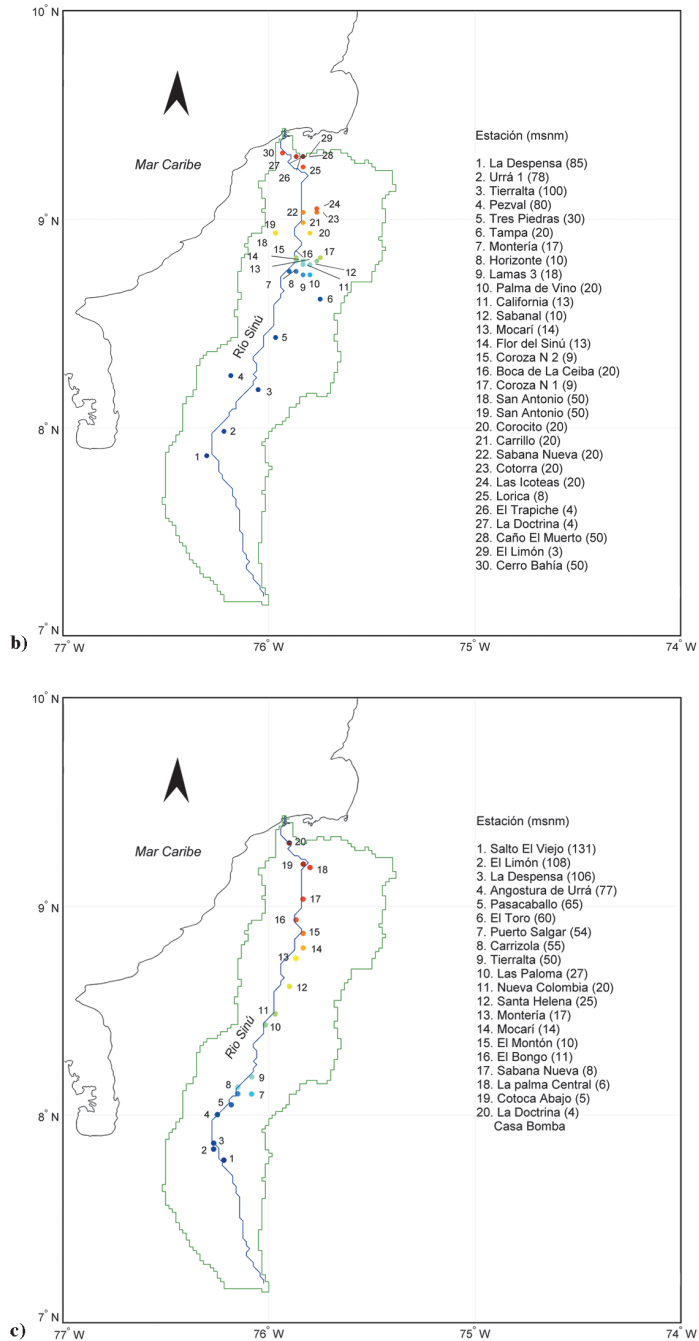


Figura 1. (b) Estaciones de precipitación, (c) Estaciones de caudal.

El Retiro y Paramillo, a más de 3000 msnm (Robertson y Chaparro, 1998). Atraviesa una cuenca joven, amplia e irregular (Gordon, 1983) en sentido sur-norte, a través de los departamentos de Antioquia y Córdoba, con una extensión de 380 km y desemboca en el delta de Tinajones (Robertson y Chaparro, 1998; Díaz *et al.*, 2000).

Con una superficie de 13700 km² (Palacio y Restrepo, 1999), el río forma muchos meandros y una amplia llanura de inundación, que alcanza una anchura aproximada promedio de 50-60 km y termina en el sistema de ciénagas y pantanos (Troll y Schmidt-Kraepelin, 1965). El río descarga en el mes 383 m³ s⁻¹, con máximos de 715 m³ s⁻¹ y mínimos de 240 m³ s⁻¹ (Serrano, 2004).

En la cuenca alta el río recibe tributarios como Verde, Esmeralda, Tigre, Manso, y quebradas como Naín, Cruz Grande, Caimán, Urrá, Tuistuis y Salvajina (Atencio-García, 2000). En esta zona, el río recorre una topografía de altas pendientes que le dan velocidad a sus aguas. Cerca de un tercio de la cuenca, es decir unos 4583 km², corresponden a una región montañosa al sur del valle denominado Alto Sinú. El resto está formado por tierras bajas, planas o ligeramente onduladas y cenagosas, que ayudan a regular el caudal del río. El sistema lagunar posee un clima subhúmedo a seco, con temperatura media anual entre 26.8 y 27.3 °C (Palacio y Restrepo, 1999), evaporación potencial anual promedio de 1826 mm y precipitación anual promedio de 1425 mm (Sánchez-Páez *et al.*, 2004).

Según Olaya *et al.* (1991) y Sánchez-Páez *et al.* (2003, 2004, 2005), en el sistema lagunar de Cispatá existen cinco especies de mangle: *Rhizophora mangle* (mangle rojo), *Avicennia germinans* (mangle negro), *Laguncularia racemosa* (mangle bobo), *Pelliciera rhizophorae* (mangle piñuelo) y *Conocarpus erecta* (mangle zaragoza). Además, la vegetación herbácea típica de los bosques de manglar contiene masas dispersas del helecho *Acrostichum aureum* (Ulloa-Delgado *et al.*, 2004).

MATERIALES Y MÉTODOS

La cuenca del río Sinú cuenta con más de 60 estaciones limnigráficas, limnimétricas y climatológicas (Figura 1 b y c), de las cuales se seleccionaron 15 (precipitación y caudal) con resolución temporal mensual (información aportada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, en adelante IDEAM). Los criterios de selección de las estaciones fueron la longitud de los registros y el porcentaje de datos faltantes. El intervalo de datos faltantes para las estaciones de precipitación estuvo entre 0 y 33% y para las de caudal entre 0 y 56% (Tablas 1 y 2).

La precipitación en la cuenca baja fue analizada a través de las estaciones El Limón y Lórica, que fueron concatenadas para obtener una serie más larga, denominada Limón-Lórica. Para asegurar la validez de la unión de estas series se hicieron comparaciones de



Tabla 1. Estaciones de precipitación. Información aportada por el IDEAM. La estación El Limón, ubicada en la baja no es la misma que se ubica en la cuenca alta para la variable caudal. A = alta, M = media, B = baja, μ = media y σ = desviación estándar.

| Código | Estación | Tipo | Municipio | | Cuenca | | Período de registro | | Datos faltantes (%) | | Estadísticos | |
|---------|------------------|---------------|-----------|---|-------------------------|---|---------------------|-------------------|---------------------|------|--------------|----------|
| | | | A | B | A | B | Año/mes | Años | Años | Años | μ | σ |
| 1302001 | La Despensa | Pluviométrica | X | | Tierralta | | | 1966/01 a 1990/05 | 24 | 0.34 | 185.10 | 117.42 |
| 1303001 | Tierralta | Pluviométrica | X | | Tierralta | | | 1959/02 a 2004/09 | 45 | 0.73 | 155.27 | 116.40 |
| 1307007 | Boca de La Ceiba | Pluviométrica | | X | Montería | | | 1970/01 a 2004/10 | 34 | 0.48 | 118.18 | 96.97 |
| 1307027 | Montería | Pluviométrica | | X | Montería | | | 1974/08 a 2004/02 | 29 | 0.85 | 115.05 | 89.15 |
| 1308001 | San Antonio | Pluviométrica | | X | San Pelayo | | | 1965/01 a 2004/02 | 39 | 0 | 112.50 | 90.22 |
| 1308002 | Lorica | Pluviométrica | | | Lorica | | X | 1958/01 a 1972/10 | 14 | 0 | 104.75 | 93.07 |
| 1307001 | El Limón | Pluviométrica | | | San Bernardo del Viento | | X | 1964/10 a 2004/09 | 39 | 1.67 | 112.17 | 101.51 |

Tabla 2. Estaciones de caudal seleccionadas para la cuenca. Información aportada por el IDEAM, excepto Caño Grande, aportada por Urrá S.A. A = alta, M = media, B = baja.

| Código | Estación | Tipo | Municipio | Cuenca | | | Período de registro | | Datos faltantes (%) |
|---------|-------------------|--------------|-------------------------|--------|---|---|---------------------|------|---------------------|
| | | | | A | M | B | Año/mes | Años | |
| 1301701 | La Despensa | Linnigráfica | Tierralta | X | | | 1965/11 a 1998/07 | 32 | 1.79 |
| 1301702 | El Limón | Linnigráfica | Tierralta | X | | | 1966/01 a 1998/11 | 32 | 2.03 |
| 1303701 | Angostura de Urrá | Linnigráfica | Tierralta | X | | | 1959/09 a 1995/10 | 36 | 7.62 |
| 1304705 | Pasacaballos | Linnimétrica | Tierralta | X | | | 1991/01 a 2000/12 | 9 | 12.61 |
| 1306702 | Montería | Linnigráfica | Montería | | X | | 1963/01 a 2000/12 | 37 | 0.44 |
| 1307701 | Sabana Nueva | Linnimétrica | San Pelayo | | X | | 1963/01 a 1995/12 | 32 | 4.56 |
| 1307704 | La Doctrina | Linnimétrica | Lorica | | | X | 1992/01 a 2001/01 | 9 | 0 |
| 1307706 | Cotoca Abajo | Linnigráfica | Lorica | | | X | 1965/01 a 2000/12 | 35 | 0.46 |
| - | Caño Grande | Linnimétrica | San Bernardo del Viento | | | X | 2001/06 a 2005/01 | 3 | 54.5 |

sus medias, desviaciones estándar y tendencias (Tabla 1). Para la detección de cambios y tendencias en la media y en la varianza las pruebas aplicadas fueron: T simple, T modificada, de Mann-Whitney, del Signo, de Friedmann, de Homogeneidad de Abbe, de Pettit, T de tendencia lineal, de Hotelling-Pabst, de Mann-Kendall, de Sen, F simple, F modificada, de Ansari-Bradley, de Bartlett y de Levene. Para evaluar independencia se aplicaron las pruebas de Corridas, de Punto Cambiante, de Spearman y de Anderson Modificada (Ceballos y Góez, 2003).

El análisis de los caudales se realizó a partir del registro histórico de la estación Cotoca Abajo, perteneciente a la cuenca baja, con 35 años (Tabla 2). Para los últimos cinco años (2000-2005) se compararon los caudales medios mensuales de las estaciones Pasacaballo, ubicada a la salida de la hidroeléctrica Urrá (cuenca alta), y Cotoca Abajo, con los registros de Caño Grande, que es la principal vía de comunicación fluvial entre el río Sinú y la bahía de Cispatá.

El análisis histórico de los eventos El Niño Oscilación del Sur (ENSO por sus siglas en inglés) y de las series, se realizó de acuerdo con Poveda y Mesa (1996). Los registros fueron estandarizados (restando la media y dividiendo entre la desviación típica mensual) con el objetivo de remover las tendencias de periodicidad anual de los registros hidrológicos. Para resaltar la asociación interanual entre las variables hidrológicas y los eventos ENSO, las series fueron filtradas a través de promedios móviles de 12 meses.

El ciclo anual para los eventos ENSO se inició en junio (año 0) y se terminó en mayo del año siguiente (año +1), porque Poveda y Mesa (1996) evidencian que el fenómeno ENSO está en fase con el ciclo anual. La dinámica hidrológica, bajo la óptica del ciclo anual, considera que las variaciones estacionales son relevantes en el comportamiento físico del sistema.

Las variables macroclimáticas utilizadas fueron: el Índice Oceánico de El Niño (ONI por sus siglas en inglés, www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml), la Oscilación del Atlántico Norte (NAO por sus siglas en inglés, www.cdc.noaa.gov/data/indices/index.html) y la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO por su sigla en inglés, <http://jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest>). Para cuantificar el grado de dependencia lineal entre las variables macroclimáticas e hidrológicas se estimaron coeficientes de correlación cruzados para valores de rezagos mensuales entre -12 y 12 meses. El procedimiento aplicado está descrito en Mesa *et al.* (1997) y Poveda *et al.* (2002), así: (1) estandarización de las variables macroclimáticas e hidroclimatológicas, (2) suavizado mediante un promedio móvil de tres meses, con el objeto de filtrar la variabilidad de alta frecuencia y preservar al máximo la señal original, (3) estimación de los coeficientes de correlación con las series filtradas. Los rezagos negativos indican que la variable macroclimática antecede a la variable hidrológica en el número de meses indicado por el rezago.

Los datos de altura del nivel del mar se encuentran en <http://ilikai.soest.hawaii.edu/uhs/c/html/0085A.html> y son registrados por un mareógrafo ubicado en Cartagena (estación 265A) con resolución temporal mensual en el periodo 1953 y 2000. Para identificar tendencias se graficó la serie histórica. La Temperatura Superficial del Mar (TSM) fue obtenida de *Comprehensive Oceanic and Atmospheric Data Set, COADS*, descargada de <http://ncardata.ucar.edu> a una resolución espacial de $1^\circ \times 1^\circ$ y con resolución temporal mensual entre 1981 y 2000 para el golfo de Morrosquillo (Bernal *et al.*, 2006).

RESULTADOS

De acuerdo con el análisis de homogeneidad, tanto en la media como en la varianza, la precipitación en la cuenca baja fue similar para las estaciones El Limón y Lórica. Ello validó la generación de la serie de precipitación Limón-Lórica. La Figura 2 presenta el ciclo medio anual de las series de precipitación seleccionadas a lo largo de la cuenca del río Sinú y los ciclos anuales de los eventos ENSO para la serie Limón-Lórica. La precipitación a lo largo de la cuenca del Sinú en promedio es mayor en la parte alta que en la media (en 30 mm mes^{-1}) y que en la baja (en 100 mm mes^{-1} ; Figura 2a). Esta variable no presentó relación significativa con los índices climáticos ONI ($r = -0.15$), NAO (r_{max} de -0.15) ni PDO (r_{max} de 0.21). Tampoco presentó tendencias de largo plazo. Durante los eventos ENSO no se encontró un comportamiento definido de la precipitación frente a este fenómeno (Figura 2b).

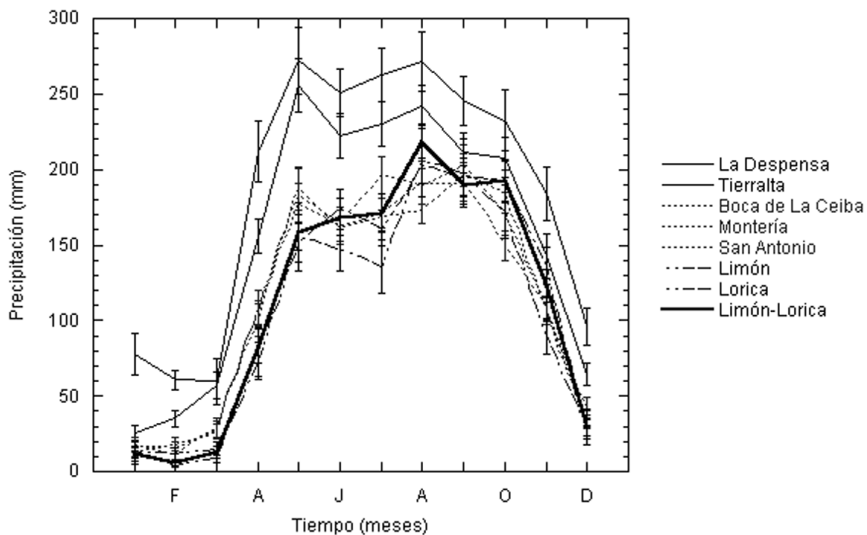


Figura 2. (a) Ciclo medio anual de las series de precipitación seleccionadas a lo largo de la cuenca.

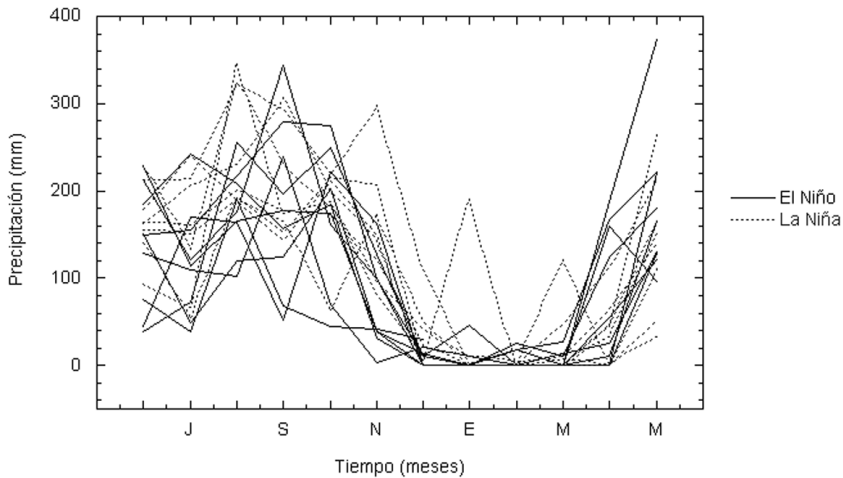


Figura 2. (b) Ciclos anuales de los eventos ENSO para la serie Limón-Lorica durante más de 40 años de registro. Años El Niño: 1957, 1965, 1972, 1982, 1986, 1991, 1994, 1997 y 2002. Años La Niña: 1964, 1970, 1973, 1974, 1975, 1988 y 1998.

En el Caribe colombiano se presentan: una época seca de diciembre a abril y una húmeda, interrumpida por un mínimo relativo en julio y agosto (conocido popularmente como “veranillo de San Juan”), durante el resto del año (Pujos y Le Tareau, 1988; Mesa *et al.*, 1997). Las Figuras 3 y 4 presentan los ciclos medios anuales de las estaciones de caudal, la serie de tiempo estandarizada y los ciclos anuales durante los eventos ENSO de la estación limnigráfica Cotoca Abajo. En general los promedios mensuales multianuales del caudal en la época seca son muy similares a lo largo de la cuenca, con variaciones entre 100 y $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. En época húmeda se registran diferencias mensuales de hasta $300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ entre las estaciones de las cuencas alta y baja.

Los mayores caudales (entre 300 y $600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) se presentan entre mayo y noviembre, mientras que diciembre y abril son meses de transición, y de enero a marzo ocurre un periodo de aguas bajas (entre 100 y $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Los caudales de la cuenca alta aportan más de la mitad del total. El veranillo es marcado en la cuenca alta en el mes de agosto, mas no en la baja, que presenta un ciclo unimodal (Figura 3).

No se encontraron tendencias de largo plazo en los caudales de la estación Cotoca Abajo, pero sí un aumento significativo, con valores cercanos a dos desviaciones estándar (en adelante d.s.), durante el Fenómeno de La Niña para 1972 y 1999, y cercanos a una d.s. para La Niña de 1996. El Fenómeno El Niño se reflejó en la disminución significativa de caudales (valores de una d.s.) durante los años 1973, 1977, 1987, 1992 y 1998. El Niño de 1983, muy importante globalmente, también está marcado por anomalías negativas de caudal, que se mantienen prácticamente hasta el próximo evento cálido de 1987, pero no

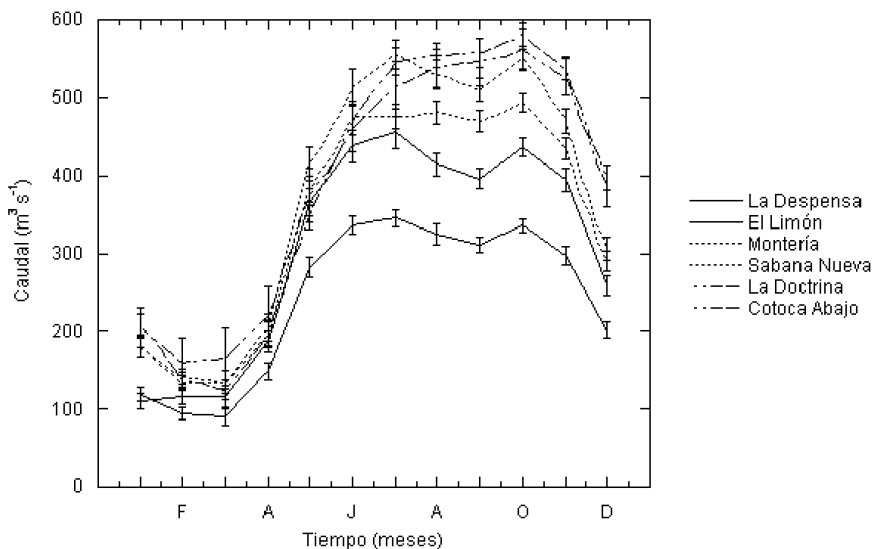


Figura 3. Ciclo medio anual de las series de caudal seleccionadas a lo largo de la cuenca.

son significativas (Figura 4a). La comparación entre los ciclos anuales La Niña y El Niño entre 1964 y 1998 muestra que los caudales durante aquella son mayores (diferencias del 50%) que durante éste, prácticamente en todos los meses; y que las anomalías no se concentran a un periodo específico (Figura 4b).

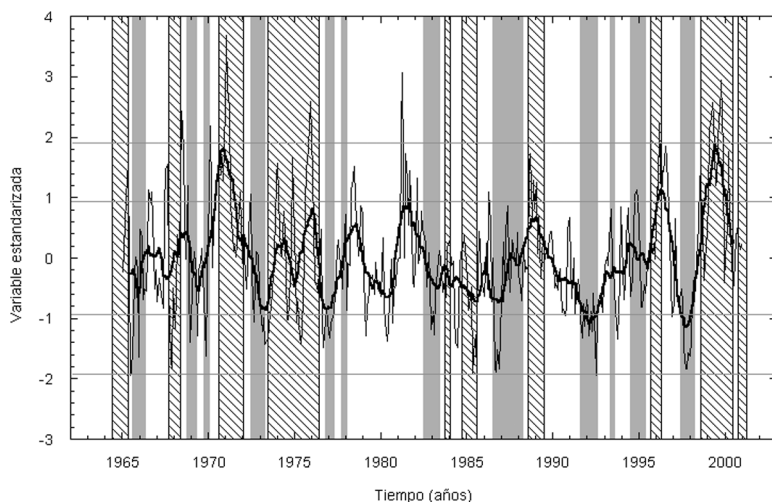


Figura 4. (a) Serie Cotoca Abajo estandarizada e interceptada con los eventos cálidos y fríos del índice ONI. La línea sólida representa el filtro de promedio móvil de 12 meses. Rectángulos sombreados eventos El Niño. Rectángulos con textura eventos La Niña.

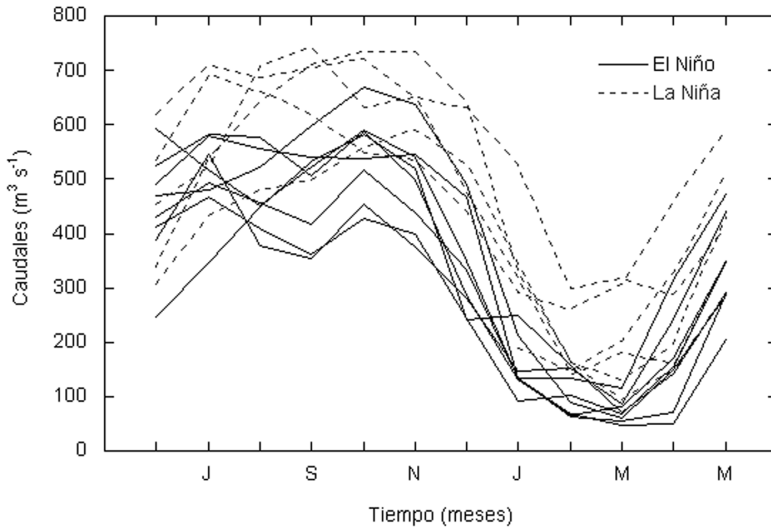


Figura 4. (b) Ciclos anuales de los eventos ENSO para la serie Cotoca Abajo durante más de 30 años de registro. Años El Niño: 1965, 1972, 1982, 1986, 1991, 1994 y 1997. Años La Niña: 1964, 1970, 1973, 1974, 1975, 1988 y 1998.

En los caudales medios mensuales de las estaciones Angostura de Urrá, Pasacaballo, Caño Grande y Cotoca Abajo de los últimos cinco años se encontró que el efecto del veranillo se marca en las tres primeras, pero no es apreciable en la última (Figura 5). Los caudales en Caño Grande presentaron una tendencia a disminuir desde el año 2002; así, durante la época húmeda los máximos pasaron de $12 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en 2001, a $8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en 2002 y 2003 y a $7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en 2004. Sin embargo, la serie es muy corta para definir si es significativa o está asociada con ciclos interanuales.

La Figura 6 presenta las series estandarizadas de Angostura de Urrá y Pasacaballo. En la primera, posterior a la puesta en funcionamiento de la represa (2000), no se encontró ninguna relación con eventos ENSO. Entre tanto, la segunda registró disminución y aumento de caudales asociados respectivamente a El Niño y La Niña para 1997-1998 y 1999-2000. Aunque no hay una serie continua que permita hacer comparaciones definitivas, a partir de la construcción de Urrá, se nota la regulación de los caudales, que hace menor su intervalo anual y suaviza los extremos de las épocas húmeda y seca. La media también sufrió una disminución (de $66.30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$).

De acuerdo con Olaya *et al.* (1991), los aportes del río Sinú al sistema lagunar de Cispatá se dan sólo a través de los caños Sicará y Grande durante las épocas húmedas, debido a que Caño Salado perdió la conexión con el río. A partir de los datos de caudal de Caño Grande es imposible determinar cuánta agua recibe el sistema pero, sin embargo, sus caudales muestran que el medio aportado es del orden de $5.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Mientras, en la

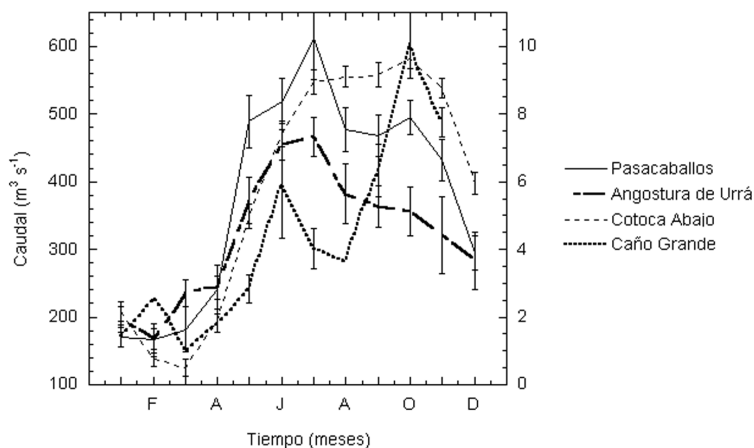


Figura 5. Comparación del caudal registrado durante los últimos cinco años en las estaciones Angostura de Urrá, Pasacaballos, Cotoca Abajo y Caño Grande.

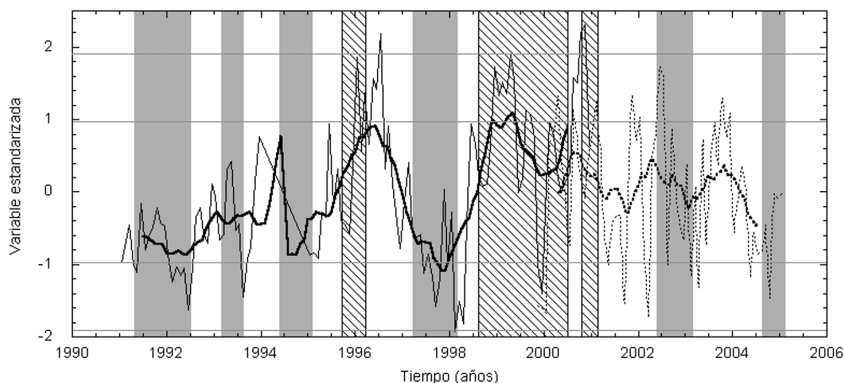


Figura 6. Series Angostura de Urrá (línea discontinua) y Pasacaballos (línea sólida) estandarizadas e interceptadas con los eventos cálidos y fríos del índice ONI. La línea sólida representa el filtro de promedio móvil de 12 meses. Rectángulos sombreados eventos El Niño. Rectángulos con textura eventos La Niña.

estación Cotoca Abajo sobre el río Sinú, el medio es de $350 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Ahora, si el Caño Sicará transporta caudales del orden de Caño Grande, significa que sólo el 3% del río Sinú llega al sistema lagunar por el de caños.

Las correlaciones entre los caudales de la estación Cotoca Abajo y los índices climáticos se presentan en la Figura 7. Los fenómenos ENSO se correlacionan inversamente con la serie de caudal sin rezago y con coeficiente de correlación significativo alto ($r = -0.5$, Figura 7a). La correlación con la NAO fue inversa pero no significativa ($r = -0.18$) con rezago de -10 meses (Figura 7b). Mientras que la serie de caudal antecedió a la PDO con un rezago de cuatro meses, correlacionada inversamente ($r = -0.4$, Figura 7c).

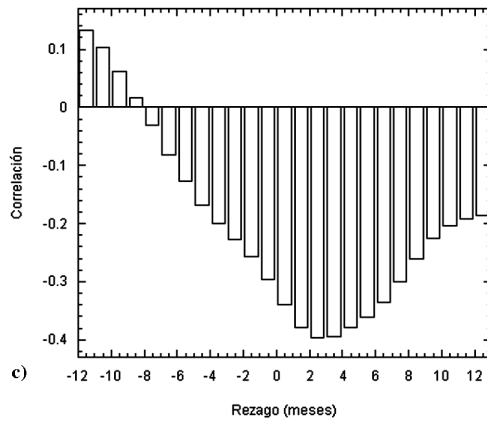
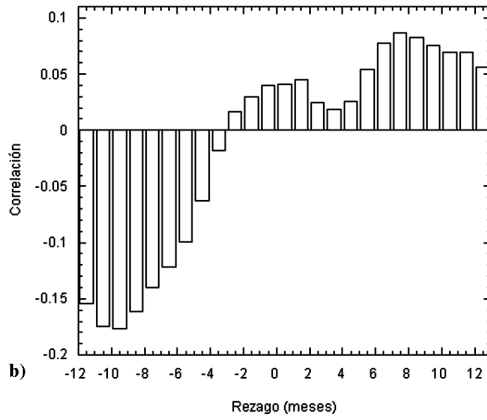
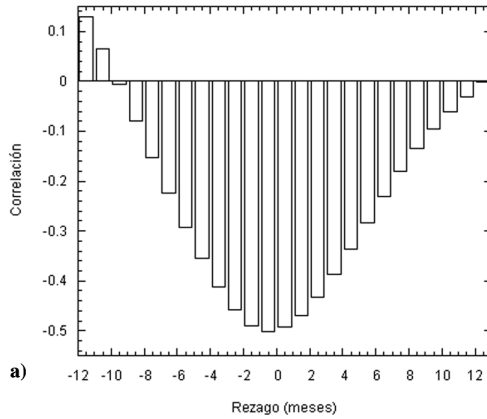


Figura 7. (a) Correlación cruzada entre el ONI y la serie Cotoca Abajo; (b) Correlación cruzada entre la NAO y la serie Cotoca Abajo; (c) Correlación cruzada entre la PDO y la serie Cotoca Abajo.

Aunque no hubo datos de nivel del mar en el golfo de Morrosquillo, en la serie de Cartagena se encontró un ascenso del nivel del mar de 6 mm año⁻¹, es decir 25 cm en 44 años (entre 1950 y 1993), que puede ser representativo para una amplia región del Caribe colombiano (Figura 8a). Se encontró una tendencia de ascenso en los registros de la TSM, correspondiente a 0.6 °C en 20 años (Figura 8b). En cuanto al ciclo anual de la TSM en Cartagena y en el golfo de Morrosquillo, se encuentra acoplado con el de los caudales del río Sinú (Figura 8c). Es decir, TSM menores de 27.5 °C en febrero (caudales mínimos) y máximas entre 28.5 y 29.5 °C (entre junio y octubre). En julio se produce un enfriamiento asociado con el veranillo, pero antecede a la disminución de caudal del río. Las TSM en el golfo de Morrosquillo son unas décimas de grado más altas que en Cartagena.

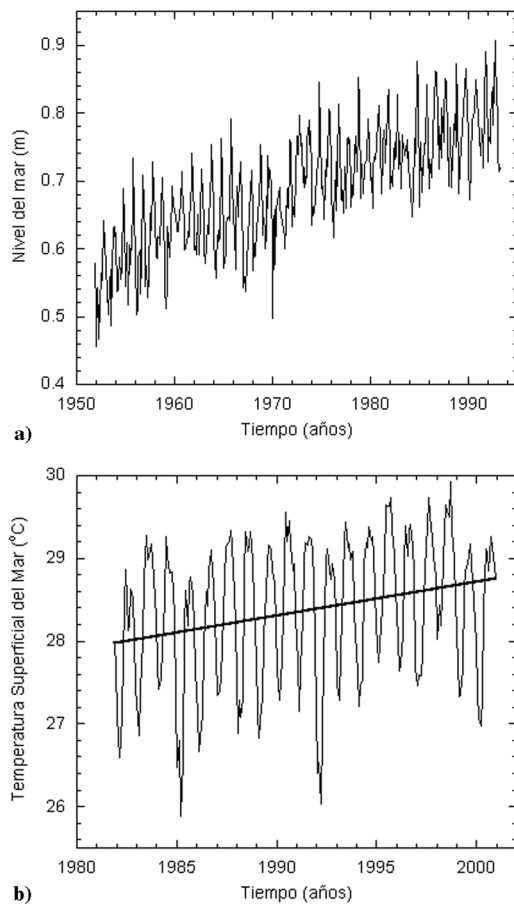


Figura 8. (a) Nivel del mar en la estación 265A ubicada en Cartagena, (b) Registro histórico de la TSM en el golfo de Morrosquillo.

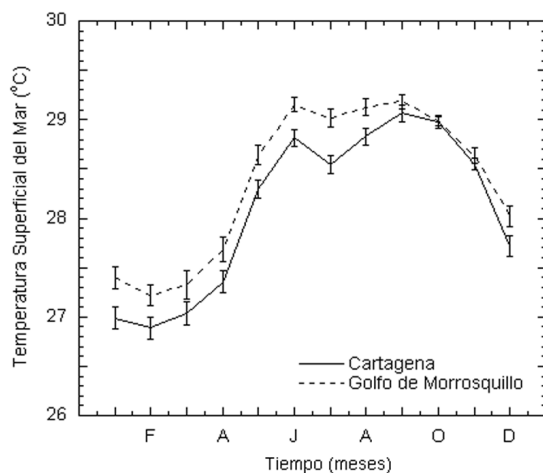


Figura 8. (c) Ciclo anual de la TSM en el golfo de Morrosquillo y Cartagena.

DISCUSIÓN

Las mayores precipitaciones en la cuenca alta están asociadas con el óptimo pluviográfico, uno de los rasgos más reconocidos de la distribución de la precipitación con la altitud en Colombia (Vélez *et al.*, 2000). La variabilidad anual y semi-anual de la precipitación en el Caribe colombiano puede ser explicada por la migración meridional de la Zona de Convergencia Inter Tropical (ZCIT) y la influencia de los vientos Alisios (Mesa *et al.*, 1997; Poveda y Mesa, 1997; Poveda *et al.*, 2005, 2006).

Aunque Poveda y Mesa (1996) y Mesa *et al.* (1997) presentan varios antecedentes de la incidencia del ENSO sobre la hidrología colombiana, han estado enmarcados dentro de una amplia región espacial, con el uso de varias estaciones hidrometeorológicas, mientras que este trabajo establece la relación de linealidad de manera muy local. Debido que la precipitación en un punto es errática, es casi imposible captar patrones de variabilidad interanual (Figura 2b) y de más largo periodo.

El comportamiento diferencial en las fases extremas del ENSO confirma los excesos de precipitación durante La Niña con relación a El Niño, especialmente en los trimestres septiembre-noviembre (SON, año 0) y diciembre-febrero (DEF, año +1), y un poco menos para junio-agosto (JJA, año 0). El ENSO amplifica las anomalías hidrológicas estacionales esperadas (Poveda *et al.*, 2001). El impacto de La Niña es más fuerte que el de El Niño a causa de las múltiples interacciones no lineales entre fenómenos geofísicos diversos y la relación no es 1:1. Las diferencias en amplitud, tiempo y duración necesitan mejor comprensión (Poveda y Mesa, 1997).

La relación entre los años El Niño y La Niña con los caudales ha sido registrada por Poveda y Mesa (1997) y Poveda *et al.* (2001), quienes reconocen que los medios en los ríos de Colombia durante El Niño disminuyen y durante La Niña crecen. Sin embargo, aún no se ha explicado por qué El Niño de 1983 no produjo anomalías intensas en Colombia.

El evento La Niña de 1972, considerado por Poveda y Mesa (1997) fuerte para el área, fue uno de los más lluviosos en Colombia, pero a nivel global fue un evento moderado. La literatura analiza menos la intensidad de los eventos La Niña sobre las variables hidrometeorológicas, debido a que en el siglo pasado hubo más eventos El Niño (Reyes-Coca y Tronco-Gaytán, 2004).

Aunque prácticamente en Colombia no se ha trabajado con el índice ONI para el ENSO, las correlaciones con el Índice de Oscilación del Sur (SOI, por su sigla en inglés) y con el Índice Multivariado del ENSO (MEI, por su sigla en inglés) son comparables (Poveda *et al.*, 2002). Poveda *et al.* (2001) registraron correlación positiva significativa entre el caudal del río Sinú del trimestre DEF y el SOI de éste, así como JJA y SON, cuya importancia se manifiesta porque relaciona estos índices con el ciclo anual.

Según Mesa *et al.* (1997), los ríos de la costa Caribe presentaron correlaciones significativas para rezagos negativos con la NAO, lo cual parece indicar una relación de dependencia lineal, pero este trabajo no lo confirma. Poveda *et al.* (2002) encontraron correlaciones negativas importantes entre la NAO del periodo marzo-mayo (MAM) y los caudales de DEF, al igual que correlaciones positivas importantes entre la NAO de JJA y los caudales de DEF. Poveda *et al.* (2001) resaltan correlaciones entre la NAO de DEF con los caudales de JJA y SON.

Correlaciones negativas significativas (aunque < -0.5) entre la PDO y los caudales de un trimestre determinado y el siguiente fueron registradas por Poveda *et al.* (2002), quienes reconocen que los mecanismos físicos deben investigarse. Este estudio indica que estas correlaciones en la cuenca del río Sinú son más importantes que las de la NAO, lo cual merece un estudio posterior más cuidadoso.

En cuanto al aumento del nivel del mar (Figura 8a), el sistema lagunar tendrá que acomodarse al ascenso futuro resaltado por Torres *et al.* (2006), de entre 2.01 y 3.58 mm año⁻¹. Su respuesta dependerá de los aportes fluviales y, por tanto, del clima. La TSM en el Caribe colombiano varía con la climatología y oceanografía de la región, con valores bajos en época seca, cuando los vientos Alisios son más fuertes, y altos en época húmeda, con vientos Alisios débiles y mayor desarrollo de la Contracorriente del Caribe en el nivel superficial (Bernal *et al.*, 2006).

De acuerdo con Sánchez-Páez *et al.* (2003, 2005) y Posada-Posada *et al.* (2004), la construcción de Urrá I varió el flujo hídrico del río Sinú y modificó la dinámica hidrológica general de la cuenca, sobre todo con cambios de nivel y ciclos de inundación natural,

producto de las temporadas de lluvias locales y regionales. Las inundaciones en el sistema lagunar de Cispatá están relacionadas con los mares de leva y las épocas húmedas fuertes, cuando el caudal del río se desborda sobre los caños, ciénagas y canales e inunda vastas zonas de la llanura costera y las planicies aluviales (Posada-Posada *et al.*, 2004).

Los resultados aquí obtenidos permiten plantear cuatro escenarios prospectivos de la dinámica del sistema lagunar considerando el ascenso del nivel del mar. Los dos primeros suponen que las comunicaciones entre el río Sinú y el sistema lagunar se mantendrán, mientras que los dos siguientes proyectan que uno de los dos brazos que alimentan al sistema se taponará, así:

- a) Aumento del nivel del mar y de la TSM, regulación de caudales por Urrá I, comunicación entre el río Sinú y el sistema lagunar e influencia de años La Niña sobre la precipitación: el punto de cambio de la PDO a índices negativos en la variabilidad interdecadal del clima implica para las próximas décadas mayor frecuencia e intensidad de eventos La Niña (Reyes-Coca y Tronco-Gaytán, 2004). Este escenario más probable contempla erosión en la línea de costa del complejo lagunar (proceso que depende de la topografía y la pendiente), muerte y volcamiento de los manglares de borde. Así mismo los mayores aportes del río Sinú a las lagunas contribuirán a que los cuerpos de agua sean más dulces y reciban mayores cantidades de materia orgánica por arrastre de sedimentos del río. Con ello las ciénagas y pantanos de manglar permanecerían inundados durante todo el tiempo. En este caso las especies de manglar empezarían a presentar cambios sucesionales.
- b) Aumento del nivel del mar y de la TSM, regulación de caudales por Urrá I, comunicación entre el río Sinú y el sistema lagunar e influencia de años El Niño sobre la precipitación: a pesar de lo esperado respecto a la PDO y su influencia para las próximas décadas, muchos factores climáticos son impredecibles con el cambio global actual. Este escenario, menos probable que el anterior, implica una disminución en la precipitación en la región. El área de influencia de la dinámica fluvio marina tendería a la salinización del sistema lagunar (debida a la evapotranspiración y la baja precipitación), se presentaría retroceso de la línea de costa y los manglares de la flecha Mestizos recibirían el oleaje directamente.
- c) Aumento del nivel del mar y de la TSM, regulación de caudales por Urrá I, sin comunicación entre el río Sinú y el sistema lagunar e influencia de años La Niña sobre la precipitación: este escenario favorece poco la adaptación del bosque de manglar, porque el agua del río Sinú no fluiría al complejo lagunar, la salinidad de éste se incrementaría y pocas especies de mangle tolerarían esas altas salinidades. El sistema sólo recibiría precipitaciones locales que, según Gordon (1983) y Mesa *et al.* (1997), en la cuenca baja del río Sinú son pobres a causa de la variabilidad interanual de

la ZCIT y los vientos Alisios. Este escenario considera la alimentación fluvial a los manglares por inundaciones, debidas a que el complejo lagunar está sobre una zona plana aluvial.

- d) Aumento del nivel del mar y de la TSM, regulación de caudales por Urrá I, sin comunicación entre el río Sinú y el sistema lagunar e influencia de años El Niño sobre la precipitación: en este escenario los manglares en el complejo lagunar podrían alcanzar un estrés hídrico, muerte de algunas especies y se formarían salitrales no colonizables por la vegetación. No existirían flujos ni reflujos para el intercambio de nutrientes en el complejo.

CONCLUSIONES

El funcionamiento del sistema lagunar de Cispatá está modulado por la variabilidad anual e interanual de la precipitación y los caudales de la cuenca del río Sinú, la comunicación entre éste y el sistema lagunar a través de Caño Grande y Caño Sicará y la acción del Mar Caribe.

En la serie de precipitación Limón-Lorica no se encontró relación con los patrones climáticos de variabilidad interanual e interdecadal, posiblemente por lo errático de ésta y el área considerada. Para precipitación, como para caudal, el veranillo en el ciclo anual se presentó en la cuenca alta, mas no en la baja.

No se encontraron tendencias de largo plazo en los caudales de la cuenca, pero la relación significativa entre el ONI y los caudales muestra disminución con El Niño y aumento con La Niña. Sin embargo, la intensidad de los eventos en el nivel global no corresponde con la de la cuenca sin que, hasta el momento, haya explicación plausible. Las anomalías se presentan en los caudales a lo largo de todo el año y no están concentradas en una época climática específica, como se demostró para la TSM.

La variabilidad decadal tiene mayor relación entre series hidrológicas y PDO, que la NAO. Esto implica que los caudales del río responden más a los eventos del Pacífico que a los del Atlántico Norte, pero esta relación deberá estudiarse más detalladamente.

El embalse Urrá I es un regulador de la influencia del río sobre el sistema lagunar. No se encontró una disminución de los caudales a partir de su funcionamiento, pero sí su regulación, que podría afectar las especies de mangle menos tolerantes a los cambios drásticos en el flujo y reflujo de agua dulce y salada.

El sistema lagunar tendrá que acomodarse al ascenso del nivel del mar y su respuesta dependerá de los aportes fluviales y del clima. Asimismo, sería importante considerar los resultados y las perspectivas climáticas planteadas en los cuatro escenarios prospectivos para el manejo ambiental del sistema lagunar.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos al DINAIN-DIME (direcciones de Investigación de la Universidad Nacional de Colombia y de Investigación de la Sede Medellín) por el apoyo económico para la realización del trabajo “Evaluación del impacto del cambio en los niveles de inundación por efectos antrópicos y naturales sobre los manglares del antiguo delta del río Sinú”; así como a la Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge (CVS) y al IDEAM por el apoyo logístico brindado durante el proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

- Atencio-García, V. 2000. Impactos de la hidroeléctrica Urrá en los peces migratorios del río Sinú. *Revista Temas Agrarios*, 5 (9): 29-40.
- Bernal, G., G. Poveda, P. Roldán y C. Andrade. 2006. Patrones de variabilidad de las temperaturas superficiales del mar en la costa Caribe colombiana. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 30 (115): 195-208.
- Ceballos, A. y C. Góez. 2003. Detección de valores anormalmente extremos “Outliers” en series hidrológicas. Trabajo de grado, Ingeniería Civil, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 113 p.
- Cintrón, G. y Y. Schaeffer-Novelli. 1983. Introducción a la ecología de manglar. Oficina regional de ciencia y tecnología de la UNESCO para América Latina y el Caribe, Montevideo. 109 p.
- Díaz, H., J. Suárez y I. Bustamante. 2000. Determinación de los tipos, clases y cantidades de sedimentos transportados por el río Sinú y su dinámica, antes de la fase de llenado del embalse Urrá I. *Revista Temas Agrarios*, 5 (10): 19-32.
- Field, C. 1999. Charter for mangroves. 1-3. En: Yáñez-Ancibia, A. y A. Lara-Domínguez (Eds.). *Ecosistemas de manglar en América tropical*. Instituto de Ecología, A. C., Xalapa, México, UICN International Wetland Program, Costa Rica, NOAA/NMFS South East Fisheries Center, Beaufort, NC, USA. 380 p.
- Gordon, B. 1983. *El Sinú: geografía humana y ecología*. Carlos Valencia Editores, Bogotá D.C. 142 p.
- Hogarth, P. 1999. *The biology of mangroves*. Oxford Academic Press., Nueva York. 228 p.
- Márquez, G. y G. Guillot. 2001. *Ecología y efecto ambiental de embalses. Aproximación con casos colombianos*. 1^{era} edición. Serie de publicaciones del posgrado en Gestión Ambiental. Universidad Nacional, Medellín. 218 p.
- Mesa, O., G. Poveda y L. Carvajal. 1997. *Introducción al clima de Colombia*. Imprenta Universidad Nacional, Bogotá D.C. 390 p.
- Olaya, H., D. Centenaro, I. Leguizamo y F. Pineda. 1991. *Los bosques de mangle en el antiguo delta del río Sinú (Córdoba-Colombia)*. Universidad de Córdoba, ICFES, CVS. Forestales FVE Ltda, Montería. 30 p.



- Orozco, J. y J. Ruiz. 1987. Revisión de la evaluación del impacto ambiental del proyecto hidro-eléctrico del alto Sinú. *Contaminación Ambiental*, 9 (17): 41-52.
- Palacio, H. y A. Restrepo. 1999. Influencia del delta del río Sinú en los procesos morfodinámicos del litoral Caribe Antioqueño. Trabajo de grado, Ingeniería Civil, Facultad Nacional de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 142 p.
- Posada-Posada, B., E. Causado y A. López. 2004. Diagnóstico de la unidad ambiental costera estuarina río Sinú-golfo de Morrosquillo. 121-138. En: Campos, N. y A. Acero (Eds.). *Contribuciones en ciencias del mar en Colombia: investigación y desarrollo de territorios promisorios*. Red de Estudios del Mundo Marino – REMAR. Universidad Nacional de Colombia, Comisión Colombiana del Océano e INVEMAR, Bogotá D.C. 260 p.
- Poveda, G. y O. Mesa. 1996. Las fases extremas del fenómeno ENSO (El Niño y La Niña) y su influencia sobre la hidrología de Colombia. *Ingeniería Hidráulica en México*, 9 (1): 21-37.
- Poveda, G. y O. Mesa. 1997. Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large-scale ocean-atmospheric phenomena. *J. Climate*, 10: 2690-2702.
- Poveda, G., A. Jaramillo, M. Gil, N. Quiceno y R. Mantilla. 2001. Seasonality in ENSO-related precipitation, river discharges, soil moisture, and vegetation index in Colombia. *Water Resour. Res.*, 37 (8): 2169-2178.
- Poveda, G., J. Vélez, O. Mesa, C. Hoyos, L. Salazar, J. Mejía, O. Barco y P. Correa. 2002. Influencia de fenómenos macroclimáticos sobre el ciclo anual de la hidrología colombiana: cuantificación lineal, no lineal y percentiles probabilísticos. *Meteorol. Colomb.*, 6: 121-130.
- Poveda, G., O. Mesa, L. Salazar, P. Arias, H. Moreno, S. Vieira, P. Agudelo, V. Toro y F. Álvarez. 2005. The diurnal cycle of precipitation in the Tropical Andes of Colombia. *Month Weater Rev.*, 133: 228-240.
- Poveda, G., P. Waylen y R. Pulwarty. 2006. Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeog., Palaeoclim., Palaeoecol.*, 234: 3-27.
- Prahl, H. von. 1989. *Manglares de Colombia*. Villegas Editores, Bogotá D.C. 206 p.
- Pujos, M. y J. Le Tareau. 1988. Hydrogeologie de la plateforme continentale Caraibe colombienne au large du delta du Dique en saison des pluies: Consequence sur la circulation. *Bull. Inst. Géol. Bassin Aquitaine*, 44: 97-107.
- Reyes-Coca, S. y R. Troncoso-Gaytán. 2004. Modulación multidecenal de la lluvia invernal en el noroeste de Baja California. *Cienc. Mar.*, 30 (1A): 99-108.
- Robertson, K. y J. Chaparro. 1998. Evolución histórica del río Sinú. *Cuadernos de Geografía*, 7 (1-2): 70-87.
- Ruiz-Ochoa, M. 2006. *Dinámica fluviomarina en los manglares de la bahía de Cispatá, Caribe colombiano*. Tesis de maestría, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 143 p.
- Sánchez-Páez, H., G. Ulloa-Delgado, H. Tavera-Escobar y W. Gil-Torres. 2003. Plan de manejo integral de los manglares de la zona de uso sostenible sector estuarino de la bahía de Cispatá departamento de Córdoba. Informe final, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. CVS. CONIF. OIMT, Montería. 289 p.

- Sánchez-Páez, H., G. Ulloa-Delgado y H. Tavera-Escobar. 2004. Manejo integral de manglares por comunidades locales, Caribe de Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. CONIF. OIMT, Bogotá D.C. 335 p.
- Sánchez-Páez, H., G. Ulloa-Delgado, H. Tavera-Escobar y W. Gil-Torres. 2005. Plan de manejo integral de los manglares de la zona de uso sostenible sector estuarino de la bahía de Cispatá departamento de Córdoba. OIMT. CVS. CONIF. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Bogotá D.C. 202 p.
- Serrano, B. 2004. The Sinú River delta on the northwestern Caribbean coast of Colombia: Bay infilling associate with delta development. *J. South Am. Earth Sci.*, 16: 623-631.
- Torres, R., J. Gómez y F. Afanador. 2006. Variación del nivel medio del mar en el Caribe colombiano. *Bol. Cient. CIOH*, 24: 64-72.
- Troll, C. y E. Schmidt-Kraepelin. 1965. Das neue delta des rio Sinu an der Karibischen küste kolombiens. *Erdkunde*, 19 (1): 13-23.
- Ulloa-Delgado, G., H. Sánchez-Páez y H. Tavera-Escobar. 2004. Restauración de manglares, Caribe de Colombia. Informe de Proyecto PD 60/01 Rev. I (F). Minambiente. CONIF. OIMT., Bogotá D.C. 25 p.
- Vélez, J., G. Poveda y O. Mesa. 2000. Balances hidrológicos de Colombia. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 150 p.

FECHA DE RECEPCIÓN: 22/06/07

FECHA DE ACEPTACIÓN: 04/03/08



