

APORTE DE CAUDALES DE LOS RÍOS BAUDÓ, SAN JUAN, PATÍA Y MIRA A LA CUENCA PACÍFICA COLOMBIANA

Juan Camilo Restrepo López

Grupo de Modelado Integral de Zona Costera con Énfasis en Riesgos Ambientales Marinos
y Procesos Costeros,
Centro Control Contaminación del Pacífico (CCCP),
Vía El Morro, Capitanía de Puerto de Tumaco, San Andrés de Tumaco, Nariño, Colombia
e-mail: jrestr48@eafit.edu.co jrestrepo@dimar.mil.co

Restrepo, J. 2006. Aporte de caudales de los ríos Baudó, San Juan, Patía y Mira a la cuenca Pacífica colombiana. Boletín Científico CCCP, (13): 17-32.

Recibido en mayo de 2006; aceptado en diciembre de 2006

RESUMEN

El caudal medio mensual de los ríos Baudó, San Juan y Patía fue estimado empleando un modelo clima-escorrentía. Este modelo utiliza datos de temperatura y precipitación que fueron proporcionados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales para más de 30 estaciones ubicadas en la cuenca Pacífica colombiana. Para las estaciones representativas localizadas dentro de cada cuenca hidrográfica se calculó la evapotranspiración potencial, el coeficiente de escorrentía y el caudal medio mensual. Se encontró que la estacionalidad en el caudal de estos ríos depende de las variaciones mensuales de la precipitación más que de los cambios mensuales de la temperatura. El caudal medio de los ríos Baudó, San Juan y Patía se estimó en 785.5, 2593.7 y 305.3 m³ s⁻¹, respectivamente.

PALABRAS CLAVE: modelo clima-escorrentía, caudal, precipitación, ríos de Colombia, costa Pacífica colombiana, río Baudó, río San Juan, río Patía.

ABSTRACT

Mean monthly water discharge for the Baudó, San Juan and Patía rivers were modeled with a simple climatic runoff model. The model requires temperature and rainfall data, which were obtained from Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales for more than 30 stations in the Pacific coast of Colombia. Monthly mean potential evapotranspiration, runoff ratio and the corresponding water discharge was calculated for representative station within each basin. Baudó, San Juan and Patía rivers monthly water discharge are more related to monthly rainfall variability than monthly temperature changes. A mean water discharge of 785.5, 2593.7 and 305.3 m³ s⁻¹ was estimated for the Baudó, San Juan and Patía rivers, respectively.

KEY WORDS: simple climatic runoff model, water discharge, rainfall, Colombian rivers, Pacific coast of Colombia, Baudó river, San Juan river, Patía river.

INTRODUCCIÓN

Las costas constituyen el ambiente vinculante entre los océanos, la atmósfera y los continentes, ya que cada uno de ellos contribuye a la evolución física, química y ecológica de la línea de costa (Haslett, 2000). Las costas son ambientes dinámicos, con aportes y salidas de materia y energía claramente identificables. Cualquier variación en los aportes origina cambios en la respuesta física, química o ecológica del sistema costero (Pethick, 1993). El aporte fluvial de agua y sedimentos, conocido como descarga fluvial, es uno de los parámetros que afecta en forma significativa la dinámica de los sistemas costeros. La descarga fluvial incide en la circulación gravitacional, mareal y estuarina; en la estratificación vertical, y en la distribución de la salinidad, entre otros factores oceanográficos (Kjerfve *et al.*, 1997).

El clima, la geología, el relieve y el área de drenaje son algunos de los factores que determinan la descarga de un sistema fluvial. La cuenca de la costa Pacífica colombiana, que mide 76365km², se extiende desde la latitud 01°30'N a la latitud 07°10'N y desde la longitud 77°40'W a la longitud 82°00'W (CCCP 2002). Se caracteriza por la presencia de sistemas de fallas activos; altas tasas de precipitación; pendientes mayores a 35° y la presencia de grandes extensiones de bosque húmedo tropical. Hacia el continente la cuenca se extiende cerca de 60 a 150km, conformando una amplia planicie costera limitada por la vertiente oeste de la cordillera Occidental (Restrepo y Kjerfve, 2004).

Los principales ríos de la cuenca pacífica colombiana de norte a sur son Baudó, San Juan, Patía y Mira. A pesar de que algunos datos de caudal de estos ríos han sido reportados dentro de balances hídricos globales (e.g. Shiklomanov, 1999; Global Runoff Data Centre - GRDC, 2000; UN/WWAP, 2003), aún se desconoce con exactitud su descarga de agua hacia el océano Pacífico. Lo anterior se debe a que algunos de ellos no presentan registros permanentes de caudal o las estaciones de monitoreo se encuentran a gran distancia de su desembocadura en el océano. Sólo recientemente, Restrepo y Kjerfve (2000) emplearon un modelo climático para estimar los caudales de los ríos Baudó, San Juan, Patía y Mira. Sin embargo, su estudio sólo reportó promedios anuales de caudal y no evaluó la variación estacional de las descargas de agua.

Este trabajo tiene como objetivo estimar, por medio de un modelo clima-escorrentía, la variación estacional del caudal en los ríos Baudó, San Juan, Patía y Mira, de manera que los resultados obtenidos sirvan como insumo para evaluar la circulación mareal en diferentes puntos de interés sobre las costas del Pacífico colombiano. Es importante señalar que esta información también es útil para evaluar la circulación gravitacional, la estratificación vertical y la distribución de la salinidad, entre otros factores (Kjerfve *et al.*, 1997).

ÁREA DE ESTUDIO

Litoral Pacífico colombiano: principales ríos

El litoral Pacífico colombiano está localizado en una zona húmeda tropical, caracterizada por temperaturas elevadas pero relativamente constantes (>24°C), altas precipitaciones y gran humedad. La precipitación promedio varía entre 2000 y 12700mm a⁻¹ (Eslava, 1992). La humedad al nivel del mar alcanza un 88% y decrece sólo en un 0.0035% por cada 100 m de ascenso en la elevación (Eslava, 1993). La distribución de la precipitación es bimodal. Las mayores precipitaciones se presentan entre septiembre y noviembre; la segunda estación de lluvias se presenta desde abril hasta junio (Snow, 1976)

De acuerdo con la distribución de la precipitación, la temperatura y la topografía, la cuenca pacífica se divide en tres zonas: norte, central y sur. La zona norte, que incluye las cuencas de los ríos Atrato, Baudó y San Juan (Figura 1), recibe en promedio 5600mm de precipitación anual y presenta una temperatura promedio de 26.2°C. La zona central, que incluye las cuencas de los ríos Dagua, Anchicayá, Cajambre, Raposo, Yurumanguí, San Juan de Micay, Iscuandé, Amarales, Satinga y Sanquianga, recibe cerca de 4100mm de precipitación anual y posee una temperatura media de 25.9°C. La zona sur, conformada por las cuencas de los ríos Patía y Mira, presenta una precipitación promedio anual de 2000mm y una temperatura media de 26.4°C (Snow, 1976; Mesa *et al.*, 1997) A continuación se presentan las condiciones específicas de precipitación y temperatura para las cuencas analizadas.

Río Baudó

Ocupa una cuenca de 5400km² de extensión. De acuerdo con el objeto de este estudio y la disponibilidad de información climatológica, la cuenca fue dividida en dos zonas: alta y baja. En la parte alta de la cuenca, representada por la estación Pie de Pato (Figura 1), la precipitación alcanza los 6483 ± 73mm anuales y la temperatura promedio llega a 25.9 ± 0.2°C. A escala mensual, la precipitación varía entre 390mm en febrero y 655mm durante agosto. Se observa un régimen de lluvias monomodal, con una estación lluviosa que comienza en mayo y se prolonga hasta noviembre (Figura 2A). La variación estacional de la temperatura sólo alcanza los 0.9°C. Las temperaturas máximas ocurren durante abril y mayo (>26.4°C), mientras que las menores se presentan en enero y marzo (<25.6°C) (Figura 2C)

En la parte baja de la cuenca, representada por la estación Pie de Pepe (Figura 1), la precipitación llega a los 6544 ± 40mm anuales y la temperatura promedio alcanza 25.9 ± 0.2°C. A escala estacional, la precipitación varía entre 468mm en marzo y 593mm en julio. El régimen de lluvias permanece casi constante a lo largo de todo el año (Figura 2B). La variación estacional de la temperatura sólo alcanza 1.0°C. Las temperaturas máximas ocurren durante abril y mayo (>26.3°C), mientras que la menor se presenta en enero (<25.6°C) (Figura 2D)

Río San Juan

Posee la mayor descarga de agua y sedimentos de todos los ríos ubicados a lo largo de la costa occidental de Suramérica (Restrepo y Kjerfve, 2000, 2004). El río, con una longitud de 352km, conforma una cuenca de 16465km² de extensión. Para este estudio, considerando condiciones de elevación, precipitación, temperatura y disponibilidad de información climatológica, se dividió la cuenca del San Juan en cuatro zonas: alta, media, media baja y baja.

En la parte alta de la cuenca, representada por la estación Itsmina (Figura 1), la precipitación alcanza los 7405 ± 58mm anuales y la temperatura promedio llega a 16.9 ± 0.2°C. A escala mensual, la precipitación varía entre 556mm en marzo y 722mm durante agosto. Se observa un régimen de lluvias monomodal con una estación lluviosa que comienza

en abril y se prolonga hasta octubre (Figura 3A). La variación estacional de la temperatura sólo alcanza los 0.6°C. Las temperaturas máximas ocurren durante febrero y marzo (>14.2°C), mientras que las menores se presentan en julio y noviembre (<13.6°C) (Figura 3E).

En la parte media de la cuenca, representada por la estación Andagoya (Figura 1), la precipitación llega a los 7394 ± 60mm anuales y la temperatura promedio alcanza 26.0 ± 0.2°C. A escala estacional la precipitación varía entre 563mm en enero y 747mm en mayo. El régimen de lluvias permanece casi constante a lo largo de todo el año (Figura 3B). La variación estacional de la temperatura sólo alcanza 1.0°C. Las temperaturas máximas ocurren durante abril y mayo (>26.3°C), mientras que la menor se presenta en enero (<25.6°C) (Figura 3F).

En la parte media baja de la cuenca, representada por la estación Noanamá (Figura 1), la precipitación alcanza los 6159 ± 89mm anuales y la temperatura promedio llega a 25.9 ± 0.2°C. A escala mensual, la precipitación varía entre 367mm en febrero y 648mm durante agosto. Se observa un régimen de lluvias monomodal con una estación lluviosa que comienza en abril y se prolonga hasta noviembre (Figura 3C). La variación estacional de la temperatura sólo alcanza los 0.9°C. La temperatura máxima ocurre durante mayo (26.5°C), mientras que la menor se presenta en enero (25.6°C) (Figura 3G).

En la parte baja de la cuenca, representada por la estación Malagueta (Figura 1), la precipitación llega a los 7588 ± 174mm anuales y la temperatura promedio alcanza 26.9 ± 0.2°C. A escala estacional la precipitación varía entre 342mm en febrero y 824mm en septiembre. Se observa un régimen de lluvias monomodal con una estación lluviosa que comienza en abril y se prolonga hasta diciembre (Figura 3D) La variación estacional de la temperatura sólo alcanza 0.8°C. Las temperaturas máximas ocurren durante abril y mayo (>27.4°C), mientras que las menores se presentan en enero y octubre (<26.7°C) (Figura 3H).

Río Patía

Conforma la mayor área de drenaje entre los ríos que drenan hacia el océano Pacífico colombiano (23700km²). Considerando la disponibilidad de información climática y el objeto de este estudio,

la cuenca del Patía se dividió en tres zonas: alta, media y baja.

En la parte alta de la cuenca, estación Caney El Mojarras (Figura 1), la precipitación alcanza los 1342 ± 55 mm anuales y la temperatura promedio llega a $23.6 \pm 0.3^\circ\text{C}$. A escala mensual, la precipitación varía entre 31.6 mm en agosto y 201.4 mm durante noviembre. Se observa un régimen de lluvias bimodal, la estación más lluviosa transcurre entre septiembre y diciembre, con una temporada de lluvias de menor intensidad entre enero y mayo (Figura 4A). La variación estacional de la temperatura sólo alcanza los 0.8°C . Las temperaturas máximas ocurren durante febrero y marzo ($>24.0^\circ\text{C}$), mientras que la menor se presenta en julio ($<23.2^\circ\text{C}$) (Figura 4D).

En la parte media de la cuenca, estación Pisanda (Figura 1), la precipitación alcanza los 1429 ± 57 mm anuales y la temperatura promedio llega a $23.4 \pm 0.3^\circ\text{C}$. A escala estacional, la precipitación varía entre 39.4 mm en julio y 207.0 mm durante octubre. Se observa un régimen de lluvias bimodal, la estación más lluviosa transcurre entre septiembre y diciembre, con una temporada de lluvias de menor intensidad entre enero y mayo (Figura 4B). La variación estacional de la temperatura sólo alcanza los 1.0°C . Las temperaturas máximas ocurren durante marzo y septiembre ($>23.8^\circ\text{C}$), mientras que las menores se presentan en junio y noviembre ($<23.0^\circ\text{C}$) (Figura 4E).

En la parte baja de la cuenca, estación Remolino Grande (Figura 1), la precipitación llega a los 2646 ± 55 mm anuales y la temperatura promedio alcanza $25.9 \pm 0.2^\circ\text{C}$. A escala mensual la precipitación varía entre 127 mm en agosto y 341 mm en mayo. Se observa un régimen de lluvias monomodal con una estación lluviosa que comienza en enero y se prolonga hasta junio (Figura 4C). La variación estacional de la temperatura sólo alcanza 0.9°C . Las temperaturas máximas ocurren durante abril y mayo ($>26.3^\circ\text{C}$), mientras que las menores se presentan en julio y octubre ($<25.7^\circ\text{C}$) (Figura 4F)

METODOLOGÍA

Modelo clima-escorrentía

El caudal de los ríos Baudó, San Juan, Patía y Mira se calculó con un modelo clima-escorrentía (Holland, 1978). Este modelo ha mostrado ser efectivo en un diverso número de sistemas (e.g.

Holland, 1978; Kjerfve, 1990; Medeiros y Kjerfve, 1993; Kjerfve *et al.*, 1996, 1997), incluyendo el Pacífico colombiano (Restrepo y Kjerfve, 2000). De acuerdo con este modelo, el caudal total (Q_R , m^3s^{-1}) de un área de drenaje se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$Q_R = \int \int_A r \left(\frac{\Delta f}{r} \right) dA \quad (1)$$

donde,

r es la precipitación (mm mes^{-1} ; pero convertida a m s^{-1} para usarla en (1)).

$\Delta f/r$ (-) es el coeficiente de escorrentía, que expresa la fracción de la precipitación que se convierte en escorrentía efectiva.

A (m^2) es el área de drenaje correspondiente.

El coeficiente de escorrentía se calcula como:

$$\frac{\Delta f}{r} = e^{\frac{-E_0}{r}} \quad (2)$$

donde,

E_0 es la evapotranspiración potencial (mm mes^{-1}), calculada usando la dependencia empírica en la temperatura del aire.

$$E_0 = 1.0 \times 10^9 e^{\frac{-4620}{T}} \quad (3)$$

donde,

T es la temperatura media mensual del aire en grados absolutos (K).

Considerando que la temperatura, la precipitación y el coeficiente de escorrentía varían dentro de una cuenca de drenaje, cada una de las cuencas analizadas fue dividida en varios polígonos (i.e. subzona) con condiciones de elevación, precipitación y temperatura aproximadamente uniformes. Cada uno de estos polígonos delimita una unidad hidrológica independiente (Tabla I). Para la definición de los polígonos también se consideró la disponibilidad de información hidroclimatológica.

Luego, se obtienen datos mensuales de temperatura y precipitación de una estación meteorológica representativa dentro de cada polígono y por medio de las ecuaciones (3), (2) y (1) se calcula para cada unidad hidrológica independiente

(i.e. subzona) la evapotranspiración, el coeficiente de escorrentía y el caudal, respectivamente. Finalmente, el caudal total del río (i.e. en la desembocadura) se obtiene sumando la descarga mensual de cada uno de los polígonos en que fue dividida su área de drenaje (Kjerfve *et al.*, 1997). Es importante precisar que el método propuesto consiste en un modelo climático y por lo tanto no es apropiado para la estimación de eventos episódicos de caudal o escorrentía (Kjerfve, 1990).

Información básica: precipitación y temperatura

El modelo requiere información de precipitación y temperatura a escala mensual en estaciones representativas (i.e. condiciones de elevación, temperatura y precipitación). Para este estudio el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, proporcionó información climatológica multi-temporal para más de 30 estaciones del litoral Pacífico colombiano (IDEAM, 2005). Esta información se complementó con información sobre temperatura obtenida por medio del software Hidro-SIG, un sistema de información geográfica con énfasis en el manejo de información hidroclimática desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia seccional Medellín (Vélez *et al.*, 2000).

El análisis estadístico de las series temporales de temperatura y precipitación permitió seleccionar nueve estaciones representativas: dos para el Baudó, cuatro para el San Juan y tres para el Patía (Tabla I y Figura 1). Cada una de estas estaciones define una subzona que es considerada como una unidad hidrológica independiente. El caudal del río Mira no pudo ser estimado por medio de este método porque no existe información climatológica para la parte alta de la cuenca, por lo que la aplicación del modelo clima-escorrentía no fue viable (Holland, 1978; Kjerfve, 1990). Para este estudio sólo se analizaron series climatológicas continuas con una extensión mayor a 20 años (Tabla I).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caudales simulados

Río Baudó

Se obtuvieron diferentes coeficientes de escorrentía para cada subzona, que varían desde

0.60 hasta 0.74 en Pie de Pato durante los meses de menor y mayor precipitación, respectivamente. En Pie de Pepe los coeficientes oscilan entre 0.65 y 0.72 para los meses de menor y mayor precipitación, respectivamente (Tabla II). Los cálculos de escorrentía indican que la estacionalidad de los caudales depende principalmente de las variaciones en la precipitación, más que de los cambios de temperatura. Los coeficientes de escorrentía medios fueron 0.69 para Pie de Pato y 0.70 para Pie de Pepe, y el caudal medio anual para las dos subzonas fue 570.4 y $218.1\text{m}^3\text{ s}^{-1}$, respectivamente. Basados en estos datos, el caudal medio anual del Baudó hacia el océano Pacífico se estimó en $788.5 \pm 119\text{m}^3\text{ s}^{-1}$ (Tabla III).

El caudal medio anual del Baudó ha sido estimado previamente o medido durante cortos periodos de tiempo (e.g. Mejía *et al.*, 1984; Restrepo y Kjerfve, 2000). Mejía *et al.* (1984) calcularon un caudal medio anual de $706\text{m}^3\text{ s}^{-1}$, mientras que Restrepo y Kjerfve (2000) estimaron una descarga media anual de $782\text{m}^3\text{ s}^{-1}$. Estos estimativos se aproximan en forma significativa a los resultados obtenidos por medio de este estudio ($788.5\text{m}^3\text{ s}^{-1}$).

Los caudales simulados muestran un incremento significativo a partir de marzo (Figura 5), coincidiendo con el inicio de la estación lluviosa en la cuenca. Para la parte alta (Pie de Pato) los caudales varían entre 358 y $734\text{m}^3\text{ s}^{-1}$ para los meses de febrero y agosto, respectivamente. Para la parte baja (Pie de Pepe) se presenta una tendencia estacional similar, con caudales medios mínimos de $176\text{m}^3\text{ s}^{-1}$ en marzo y medios máximos de $245\text{m}^3\text{ s}^{-1}$ en julio (Figura 5A y Tabla II). El caudal total en la desembocadura se incrementa a partir de marzo, alcanzando un máximo de $975\text{m}^3\text{ s}^{-1}$ en agosto, mientras que el mínimo se presenta en febrero ($545\text{m}^3\text{ s}^{-1}$) (Figura 5B y Tabla IV)

Río San Juan

Los coeficientes de escorrentía varían desde 0.54 en Malaguita, durante los meses de menor precipitación, a 0.84 en Itsmina, durante agosto, el mes de mayor precipitación. En las estaciones Itsmina y Andagoya el coeficiente de escorrentía permanece casi constante todo el año a causa del permanente exceso de humedad a lo largo del mismo período (Tabla II). Tal y como se observó en el Baudó, en el San Juan los cálculos de escorrentía también indican que la estacionalidad de los caudales depende

principalmente de las variaciones en la precipitación, más que de los cambios de temperatura. Los coeficientes de escorrentía medios fueron 0.82 para Itsmina, 0.72 para Andagoya, 0.67 para Noanamá y 0.70 para Malaguita. El caudal medio anual se estimó en 420.5, 656.3, 1148.3, y $368.4\text{m}^3\text{s}^{-1}$ para Itsmina, Andagoya, Noanamá y Malaguita, respectivamente. Basados en estos datos se estimó en $2593.7 \pm 470\text{m}^3\text{s}^{-1}$ el caudal medio anual del río San Juan hacia el océano Pacífico (Tabla III)

Los caudales simulados muestran un incremento significativo a partir de marzo-abril (Figura 5), coincidiendo con el inicio de la estación lluviosa en la parte media y baja de la cuenca. Para la parte alta (Itsmina) los caudales varían entre 369 y $506\text{m}^3\text{s}^{-1}$ para los meses de marzo y agosto, respectivamente. En la cuenca media (Andagoya) se observa una tendencia estacional opuesta, con caudales medios mínimos de $570\text{m}^3\text{s}^{-1}$ en diciembre y medios máximos de $834\text{m}^3\text{s}^{-1}$ en mayo. Para la cuenca media-baja (Noanamá) se simuló caudales del orden de $1566\text{m}^3\text{s}^{-1}$ en agosto, mientras que los medios mínimos se presentan en febrero ($705\text{m}^3\text{s}^{-1}$). En la cuenca baja (Malaguita) se presenta una tendencia estacional similar a la observada en la estación Noanamá, con caudales que varían entre $150\text{m}^3\text{s}^{-1}$ en febrero y $516\text{m}^3\text{s}^{-1}$ en septiembre (Figura 5C y Tabla II). En la desembocadura el caudal total se incrementa a partir de marzo, alcanzando un máximo de $3305\text{m}^3\text{s}^{-1}$ en agosto y un mínimo de $1835\text{m}^3\text{s}^{-1}$ en febrero (Figura 5D y Tabla IV)

Río Patía

Los coeficientes de escorrentía varían desde 0.01 en Caney El Mojarras, durante los meses de menor precipitación, a 0.55 en Remolino Grande durante mayo, el mes de mayor precipitación (Tabla II). Los cálculos de escorrentía también indican que la estacionalidad de los caudales depende principalmente de las variaciones en la precipitación más que de los cambios de temperatura. Los coeficientes de escorrentía medios fueron 0.20 para Caney El Mojarras, 0.22 para Pisanda y 0.40 para Remolino Grande. El caudal medio anual se estimó en 150.3, 106.9, y $48.0\text{m}^3\text{s}^{-1}$ para Caney El Mojarras, Pisanda, y Remolino Grande, respectivamente. Basados en los datos de la simulación, se estimó en $305.3 \pm 244\text{m}^3\text{s}^{-1}$ el caudal medio anual del Patía hacia el océano Pacífico (Tabla II)

Los caudales simulados muestran dos máximos durante enero-marzo y septiembre-diciembre, y un descenso significativo durante junio-agosto (Figura 10). Los períodos de caudales máximos coinciden con las estaciones lluviosas, particularmente con las que se observan en la parte alta y media de la cuenca. Para la parte alta (Caney El Mojarras) se presentan dos picos de 202 y $432\text{m}^3\text{s}^{-1}$ para los meses de abril y noviembre, respectivamente. En la cuenca media (Pisanda) se observa una tendencia estacional similar, con caudales medios máximos de $146\text{m}^3\text{s}^{-1}$ en enero y de $279\text{m}^3\text{s}^{-1}$ en noviembre. En la cuenca baja (Remolino Grande) se simuló un caudal medio máximo de $97\text{m}^3\text{s}^{-1}$ durante mayo. Es importante resaltar el descenso significativo de los caudales para toda la cuenca durante el periodo junio-agosto, particularmente en las estaciones Caney El Mojarras y Pisanda donde se obtuvieron valores menores a $3.0\text{m}^3\text{s}^{-1}$ (Figura 5E y Tabla II). El caudal total presenta dos picos máximos del orden $742.8\text{m}^3\text{s}^{-1}$, durante octubre, y uno de menor intensidad en abril ($378.1\text{m}^3\text{s}^{-1}$). Al igual que en las subzonas en que se dividió la cuenca, el descenso de los caudales medios durante el periodo junio-agosto es bastante significativo, alcanzando valores tan bajos como $16.8\text{m}^3\text{s}^{-1}$ (Figura 5F y Tabla IV)

Calibración del modelo

Para verificar la aplicabilidad del modelo se compararon los caudales simulados por medio de la Ecuación (1) con los caudales registrados en los ríos San Juan y Patía. A partir de registros diarios de nivel del agua tomados entre 1967 y 1977 en Malaguita, a 45km de la desembocadura del San Juan en el océano Pacífico, el IDEAM (2005) calculó un caudal medio anual para el río San Juan de $2580\text{m}^3\text{s}^{-1}$, con caudales medios-mínimos de $1844\text{m}^3\text{s}^{-1}$ en febrero y medios-máximos de $3969\text{m}^3\text{s}^{-1}$ durante noviembre (Figura 6A). La aplicación de una prueba *t* pareada (Montgomery y Runger, 1996) entre los caudales medios mensuales registrados por el IDEAM y los caudales medios mensuales estimados en este estudio, permite concluir con un nivel de confianza del 95% que los caudales medios mensuales simulados no son significativamente diferentes en comparación con los caudales medios mensuales registrados por el IDEAM ($t=0.09$; $p=0.92$; $P>0.05$). Lo anterior indica que el modelo es robusto y puede ser aplicado con certeza en cuencas caracterizadas por excesos de

humedad a lo largo del año, como ocurre en las cuencas del Pacífico colombiano.

El mismo procedimiento de validación se aplicó para el río Patía. A partir de registros diarios de nivel del agua tomados entre 1965 y 2002 en Puente Pusmeo, aproximadamente a 120km de la desembocadura del Patía en el océano Pacífico, el IDEAM (2005) calculó un caudal medio anual para el río Patía de $326.3\text{m}^3\text{s}^{-1}$, con caudales medios-mínimos de $163\text{m}^3\text{s}^{-1}$ en septiembre y medios-máximos de $470\text{m}^3\text{s}^{-1}$ durante diciembre (Figura 6B). Aun cuando la similitud entre la distribución estacional de los caudales simulados y registrados es menor para el Patía en comparación con el San Juan (Figura 11), la aplicación de una prueba t pareada (Montgomery y Runger, 1996) entre los caudales medios mensuales registrados por el IDEAM y los caudales medios mensuales estimados en este estudio, permite concluir con un nivel de confianza del 95% que los caudales medios mensuales simulados no son significativamente diferentes en comparación con los caudales medios mensuales registrados por el IDEAM ($t = -0.34$; $p = 0.73$; $P > 0.05$)

Caudal del río Mira

Como se mencionó anteriormente, el caudal del río Mira no pudo ser estimado por este método al no existir información climatológica para la parte alta de la cuenca, por lo que la aplicación del modelo clima-escorrentía no es viable (Holland, 1978; Kjerfve, 1990). Sin embargo, a partir de registros diarios de nivel del agua obtenidos durante 1980 y 2003 en la estación San Juan, el IDEAM (2005) ha podido determinar que el caudal medio anual del río Mira es $868.1 \pm 187\text{m}^3\text{s}^{-1}$. Se observan dos periodos de caudales medios-máximos en mayo ($1105\text{m}^3\text{s}^{-1}$) y diciembre ($965\text{m}^3\text{s}^{-1}$). Durante el periodo junio-septiembre el caudal desciende en forma significativa, alcanzando medios mínimos de $533\text{m}^3\text{s}^{-1}$ (Tabla IV).

CONCLUSIONES

- La aplicación de un modelo clima-escorrentía alimentado con datos de precipitación y temperatura, permitió calcular la evapotranspiración, el coeficiente de escorrentía y la descarga media de agua hacia el océano Pacífico de las cuencas de los ríos Baudó, San Juan y Patía.

- Se estimaron caudales medios mensuales de 788.5, 2593.7 y $305.3\text{m}^3\text{s}^{-1}$ para los ríos Baudó, San Juan y Patía, respectivamente. Estos valores son similares a estimaciones o registros obtenidos en forma previa por diferentes entidades. Además, la aplicación de pruebas estadísticas (prueba t pareada) señala que el modelo clima-escorrentía empleado es robusto y puede ser aplicado con fiabilidad en cuencas caracterizadas por excesos de humedad a lo largo del año.

- Para las cuencas analizadas, los cálculos de escorrentía indican que la estacionalidad de los caudales depende principalmente de las variaciones en la precipitación más que de los cambios de temperatura. En todos los casos los periodos de caudales medios-máximos coinciden con la estación de mayor precipitación, mientras que durante la época menos lluviosa se registran los caudales medios-mínimos.

- La ausencia de datos de precipitación y temperatura en la parte alta y media de la cuenca impidió estimar el caudal medio del río Mira por medio de este modelo. Sin embargo, el IDEAM ha monitoreado los caudales de este río en la estación San Juan durante el periodo 1980-2003, obteniendo un caudal medio anual de $868.1\text{m}^3\text{s}^{-1}$.

- Los resultados obtenidos en este estudio (caudales medios mensuales) son útiles en la aplicación o validación de modelos oceanográficos, particularmente en modelos de circulación mareal y estuarina, de estratificación vertical y de distribución de la salinidad.

AGRADECIMIENTO

Este estudio se desarrolla en el marco del proyecto "Modelos de Morfodinámica Litoral para definir Escenarios de Vulnerabilidad ante Amenazas Naturales: Bahía de Tumaco - Delta del Río Mira", ejecutado por la Universidad EAFIT y el Centro Control de Contaminación del Pacífico (DIMAR-CCCP) con el apoyo financiero de COLCIENCIAS (Código: 12160517616). Los autores también expresan su agradecimiento al IDEAM por la información suministrada (Convenio marco de cooperación No 154/02 entre el Instituto de Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM- y la Dirección General Marítima - DIMAR). El IDEAM proporcionó datos de series históricas mensuales en 30 estaciones climatológicas e hidrológicas ubicadas en el litoral Pacífico colombiano.

LITERATURA CITADA

Centro Control Contaminación del Pacífico. 2002. Compilación Oceanográfica de la Cuenca Pacífica Colombiana. Ed. DIMAR. Serie Publicaciones Especiales Vol 1. San Andrés de Tumaco. CCCP. 109 pp.

Eslava, J. 1992. La precipitación en la región del Pacífico colombiano (Lloró: el sitio más lluvioso del mundo). Rev. Zenit. (3): 47-71.

Eslava, J. 1993. Climatología. En: Leyva, P. (ed.). Colombia Pacífico (Vol. 1). Fondo para la Protección del Medio Ambiente "José Celestino Mutis" y Financiera Energética Nacional. Bogotá. Pp 136-147.

Global Runoff Data Centre GRDC. 2000. Global Runoff Distribution Database: GRDC Catalog Tool V.3. Global Runoff Data Centre, Koblenz, Germany. <http://www.bafg.de/grdc.htm>

Haslett, S. 2000. Coastal Systems. Routledge, London, 218 pp.

Holland, H. 1978. The Chemistry of the Atmosphere and Oceans. New York, Wiley, 351 pp.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. 2005. Información hidrológica y climatológica en 30 estaciones ubicadas en el litoral Pacífico colombiano. Series históricas a escala mensual. Formato digital. Bogotá: IDEAM, Colombia.

Kjerfve, B. 1990. Manual for investigation of hydrological processes in mangrove ecosystems. Unesco/ United Nations Development Program Regional Mangrove Project RAS 79/002 and RAS/86/120. Occas. Pap., 79 pp.

Kjerfve, B., C. Schettini, B. Knoppers, G. Lessa y H. Ferreira. 1996. Hydrology and salt balance in a large, hypersaline coastal lagoon: Lagoa de Araruama, Brazil. Estuarine Coastal Shelf Science. 42, 701-725.

Kjerfve, B., C. Ribeiro, G. Dias, A. Filipino y V. Quaresma. 1997. Oceanographic characteristics of an impacted coastal bay: Baía de Guanabara, Río de Janeiro, Brazil. Continental Shelf Research. 17, 1609-1643.

Medeiros, C. y B. Kjerfve. 1993. Hydrology of a tropical Estuarine System: Itamaracá, Brazil. Estuarine Coastal Shelf Science. 36, 495-515.

Mejía, A., H. Millán e I. Perry. 1984. Estudio Nacional de Aguas - Departamento Nacional de Planeación. Informe técnico. Bogotá: DNP, Colombia. 183 pp.

Mesa, O., G. Poveda y F. Carvajal. 1997. Introducción al clima de Colombia. Universidad Nacional de Colombia-sede Medellín. Imprenta de la Universidad Nacional, Bogotá, 390 pp.

Montgomery, D., y G. Runger. 1996. Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería. McGraw-Hill, México D.F., 895 pp.

Pethick, J. 1993. Shoreline adjustments and coastal managements - physical and biological processes under accelerated sea level rise. Geographical Journal. 159, 162-168.

Restrepo, J. y B. Kjerfve. 2000. Water Discharge and Sediment Load from the Western Slopes of the Colombian Andes with Focus on Rio San Juan. Journal of Geology. 108, 17-33.

Restrepo, J., y B. Kjerfve. 2004. The Pacific and Caribbean Rivers of Colombia: Water Discharge, Sediment Transport and Dissolved Loads. En: Lacerda, L., R., Santelli, E., Duursma, J. Abrao, (eds.). Environmental Geochemistry in Tropical and Subtropical Environments. Springer Verlag, Berlín. Pp. 169-187.

Shiklomanov, I. 1999. World Water Resources and their Uses: Discharge of Selected Rivers of the World. State Hydrological Institute and UNESCO, International Hydrological Programme. <http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/shiklomanov/index.shtml>

Snow, J.W. 1976. The climate of northern South America: Colombia. En: Schwerdtfeger, W., (ed.). Climates of South and Central America. Amsterdam, Elsevier Scientific. Pp. 358-379.

United Nations/World Water Assessment Programme - UN/WWAP. 2003. UN World Water Development Report: Water for People, Water for Life. Paris, New York and Oxford, UNESCO and Berghahn Books. http://www.unesco.org/water/wwap/wwdr/table_contents.shtml

Vélez, J., G. Poveda y O. Mesa, 2000. Balances hidrológicos de Colombia. En: Memorias XV Seminario

FIGURAS Y TABLAS

Nacional de Hidráulica e Hidrología. Universidad
Nacional-Sede Medellín. Formato digital. Medellín: UNAL,
Colombia.

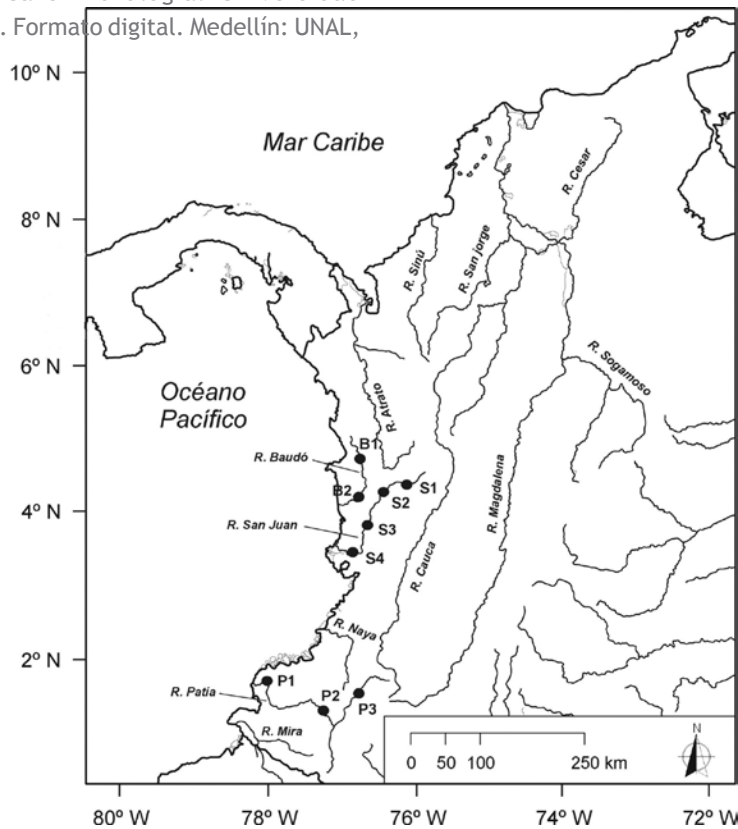


Figura 1. Mapa de las costas Pacífica y Caribe de Colombia con énfasis en las principales cuencas del Pacífico. Se muestran las estaciones climatológicas seleccionadas para este análisis (círculos negros). Río Baudó: Pie de Pato (B1), Pie de Pepe (B2); río San Juan: Itsmina (S1), Andagoya (S2), Noanamá (S3), Malaguita (S4); río Patía: Remolino Grande (P1), Pisanda (P2) y Caney El Mojarras (P3)

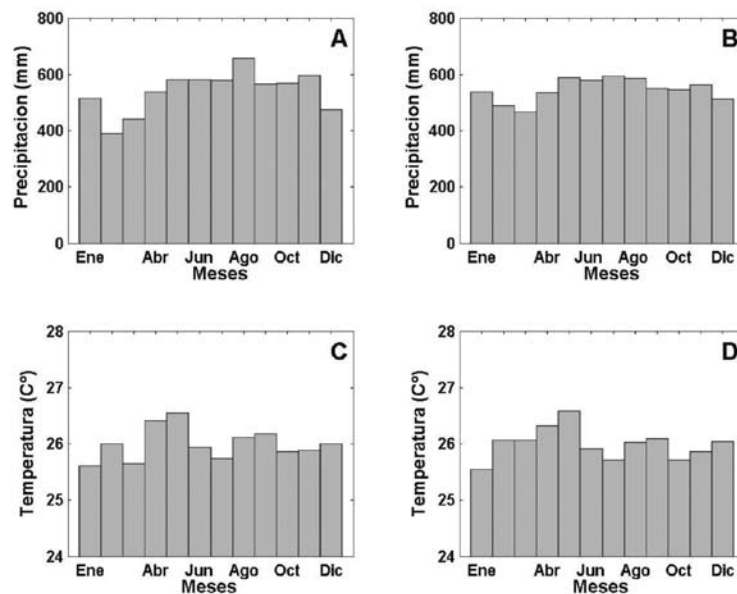


Figura 2. Distribución estacional de la precipitación y la temperatura en la cuenca del río Baudó. Estaciones representativas: (A, C) Pie de Pato; (B, D) Pie de Pepe.

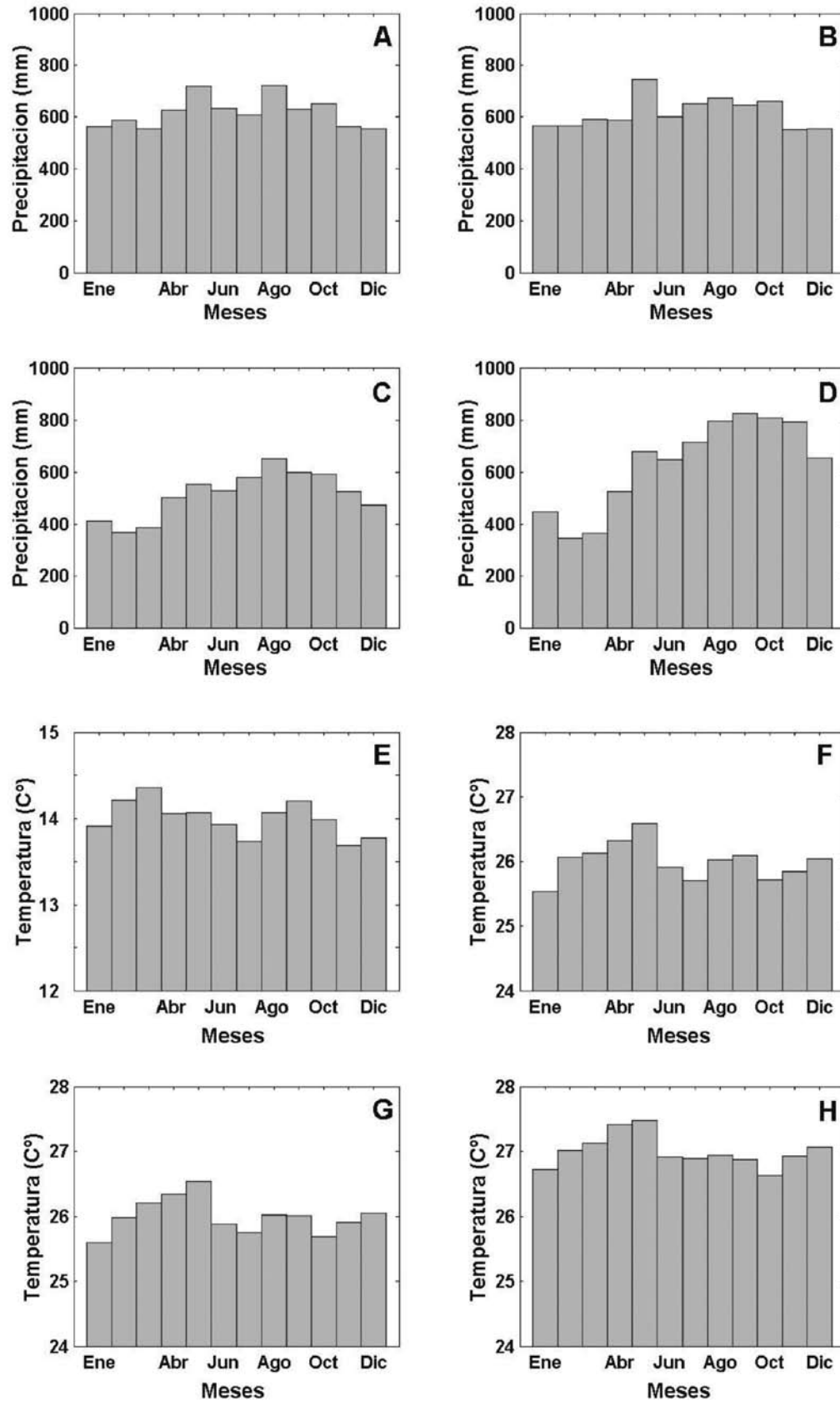


Figura 3. Distribución estacional de la precipitación y la temperatura en la cuenca del río San Juan. Estaciones representativas: (A, E) Itsmina; (B, F) Andagoya; (C, G) Noanamá; (D, H) Malaguita.

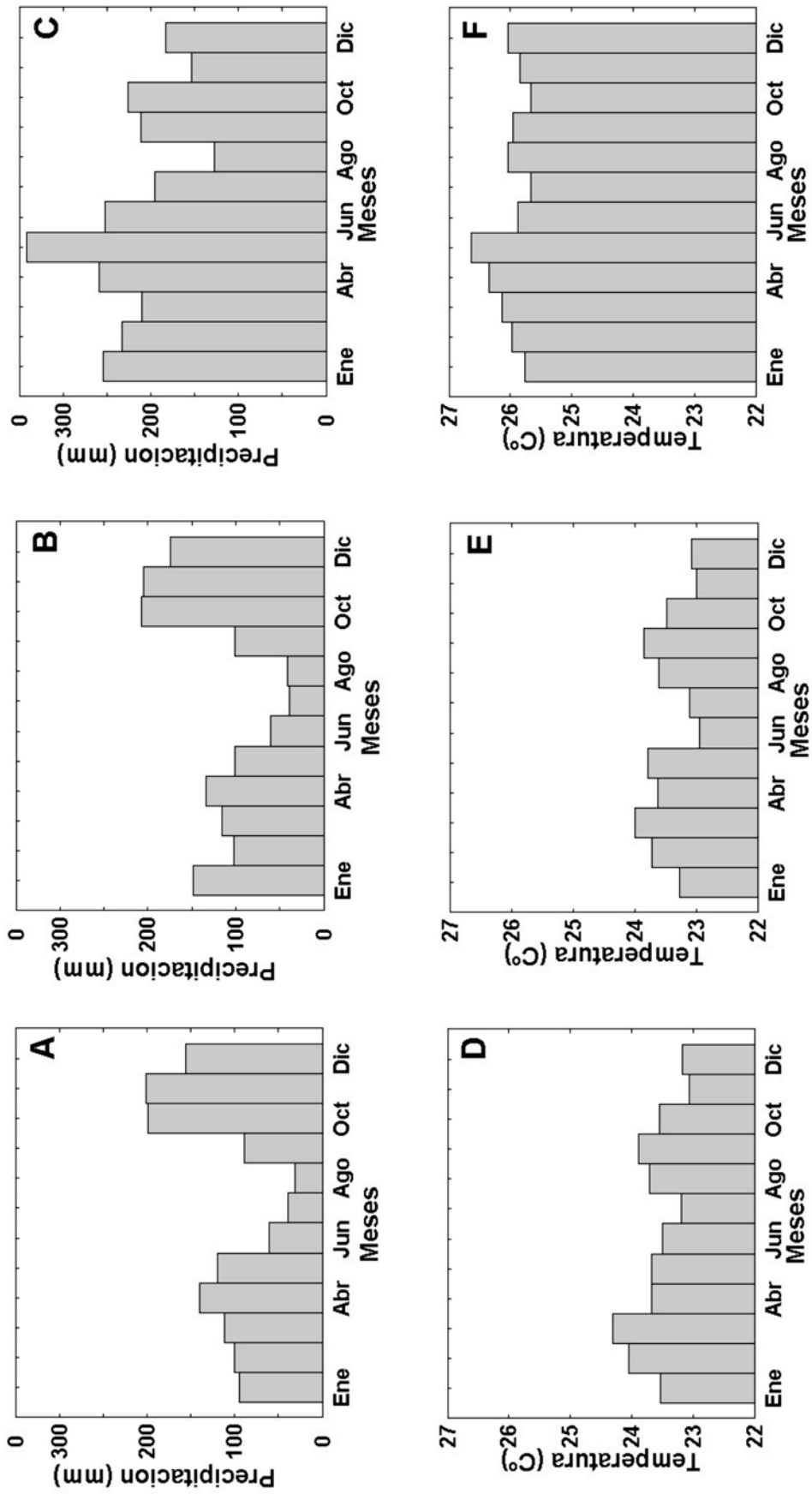


Figura 4. Distribución estacional de la precipitación y la temperatura en la cuenca del río Patía. Estaciones representativas: (A, D) Caney El Mojarras; (B, E) Pisanda; (C, F) Remolino Grande.

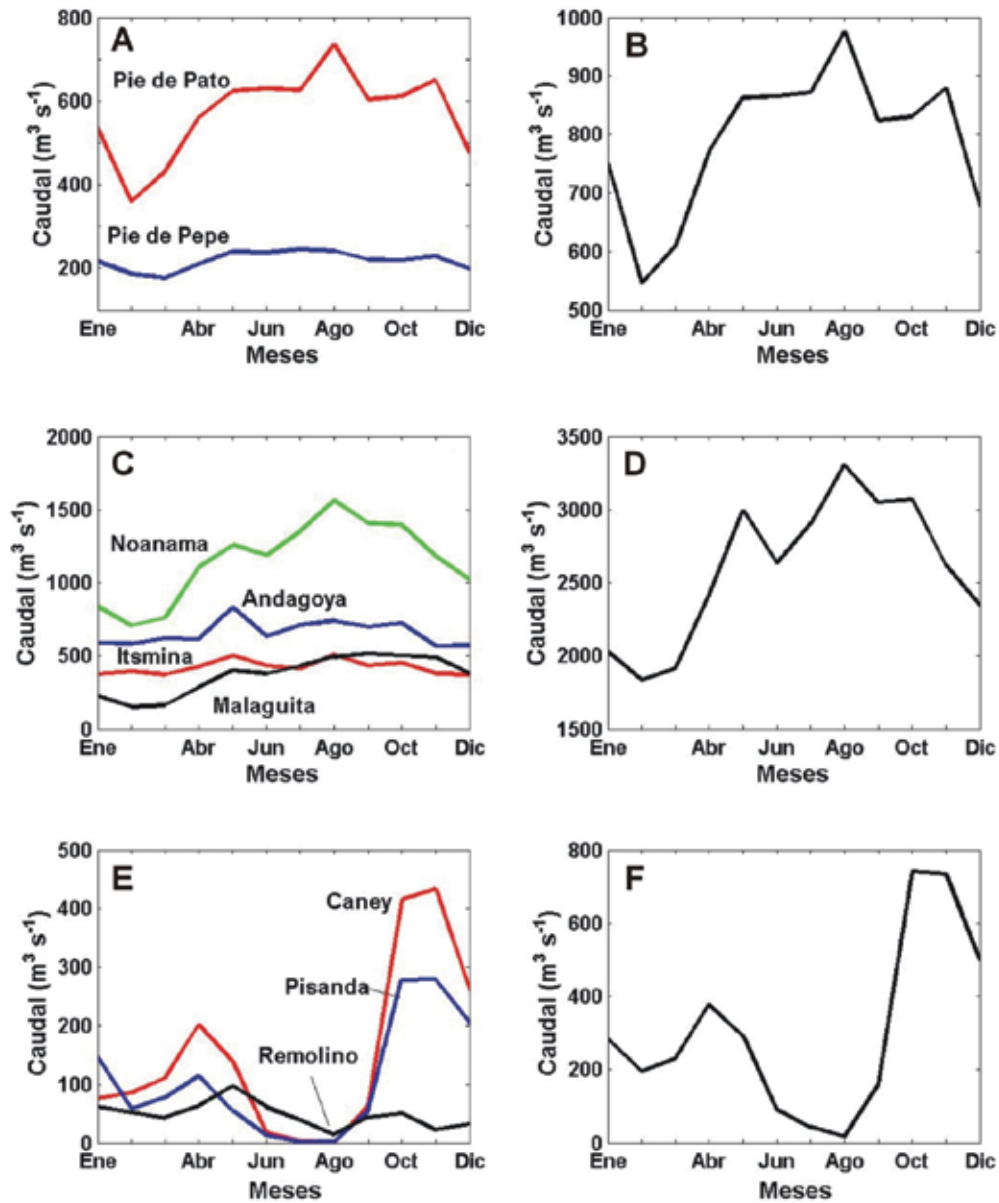


Figura 5. Caudales simulados para los ríos Baudó, San Juan y Patía. (A) Estaciones representativas río Baudó; (B) Caudal total río Baudó; (C) Estaciones representativas río San Juan; (D) Caudal total río San Juan; (E) Estaciones representativas río Patía; (F) Caudal total río Patía.

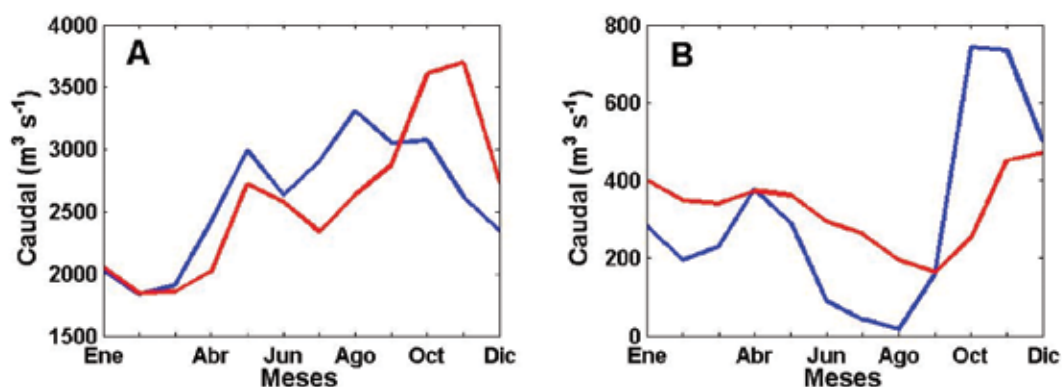


Figura 6. Comparación entre los caudales reales (línea roja) y caudales estimados (línea azul) para los ríos San Juan (A) y Patía (B).

Tabla I. Área, elevación, precipitación y temperatura para las estaciones climatológicas representativas de cada una de las subzonas (polígonos) en que fueron divididas las cuencas de los ríos Baudó, San Juan y Patía. La ubicación de las estaciones se aprecia en la Figura 1.

Río/Subzona	Área (km²)	Elevación (msnm)	Precipitación (mm a⁻¹)	Temperatura (°C)	Años de registro
Río Baudó					
Pie de Pato	3918.8	30	6483.6	25.9	1969-2004
Pie de Pepe	1481.1	100	6544.4	25.9	1974-2004
Río San Juan					
Itsmina	2145.0	90	7405.9	16.9	1967-2004
Andagoya	3785.2	96	7394.9	26.0	1961-2004
Noanamá	8496.0	40	6159.1	25.9	1974-2003
Malaguita	2078.8	4	7588.5	26.9	1961-2004
Río Patía					
Mojarras	12771.3	350	1342.7	23.6	1961-2004
Pisanda	7940.8	350	1429.2	23.4	1967-2004
Remolino	1334.6	40	2646.7	25.9	1983-2004

Tabla III. Área, precipitación, coeficiente de escorrentía y caudal simulado para los ríos Baudó, San Juan y Patía -cuadro resumen-.

Río/Subzona	Área (km ²)	Precipitación (mm a ⁻¹)	$\Delta f/r$ (-)	Caudal simulado (m ³ s ⁻¹)
Río Baudó				
1. Pie de Pato	3918.8	6483.6	0.69	570.4
2. Pie de Pepe	1481.1	6544.4	0.70	218.1
Total río Baudó	5400.0			788.5 ± 119
Río San Juan				
1. Itsmina	2145.0	7405.9	0.82	420.5
2. Andagoya	3785.2	7394.9	0.72	656.3
3. Noanamá	8496.0	6159.1	0.67	1148.3
4. Malaguita	2078.8	7588.5	0.70	368.4
Total río San Juan	16465.0			2593.7±470
Río Patía				
1. Caney El Mojarras	12771.3	1342.7	0.20	150.3
2. Pisanda	7940.8	1429.2	0.22	106.9
3. Remolino Grande	1334.6	2646.7	0.40	48.0
Total río Patía	22046.8			305.3±244

Tabla II. Evapotranspiración potencial (E_o), coeficiente de escorrentía ($\Delta f/r$) y caudal (Q) estimados en cada una de las subzonas representativas de los ríos Baudó, San Juan y Patía.

Río/ estación/ parámetro	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Río Baudó												
Pie de Pato												
E_o (mm)	190.87	194.76	191.26	199.03	200.36	194.06	192.16	195.97	196.58	193.35	193.55	194.76
$\Delta f/r$ (-)	0.69	0.61	0.65	0.69	0.71	0.72	0.72	0.74	0.71	0.71	0.72	0.66
Q ($m^3 s^{-1}$)	535.64	358.55	432.13	560.88	624.22	629.43	626.57	734.67	603.79	610.99	650.79	476.88
Pie de Pepe												
E_o (mm)	190.28	195.36	195.46	198.00	200.67	193.85	191.86	194.96	195.67	191.96	193.35	195.16
$\Delta f/r$ (-)	0.70	0.67	0.66	0.69	0.71	0.72	0.72	0.72	0.70	0.70	0.71	0.68
Q ($m^3 s^{-1}$)	215.84	186.86	176.44	210.49	239.01	236.17	245.52	240.63	220.42	219.13	228.14	198.92
Río San Juan												
Itsmína												
E_o (mm)	119.91	121.90	121.90	121.23	121.23	120.57	119.91	119.91	117.95	117.95	117.95	119.25
$\Delta f/r$ (-)	0.81	0.81	0.80	0.82	0.84	0.83	0.82	0.85	0.83	0.83	0.81	0.81
Q ($m^3 s^{-1}$)	374.18	394.51	369.93	426.83	502.27	432.33	411.38	506.22	430.96	450.44	376.47	371.29
Andagoya												
E_o (mm)	190.08	195.46	196.07	198.00	200.67	193.85	191.76	194.96	195.67	191.96	193.15	195.16
$\Delta f/r$ (-)	0.71	0.71	0.72	0.71	0.76	0.72	0.74	0.75	0.74	0.75	0.70	0.70
Q ($m^3 s^{-1}$)	587.57	584.76	618.69	613.04	834.31	633.31	708.69	738.73	698.12	721.85	566.85	570.34
Noanamá												
E_o (mm)	190.67	194.56	196.78	198.21	200.16	193.55	192.26	194.96	194.86	191.66	193.75	195.16
$\Delta f/r$ (-)	0.63	0.59	0.60	0.67	0.70	0.69	0.72	0.74	0.72	0.72	0.69	0.66
Q ($m^3 s^{-1}$)	839.23	705.52	758.41	1104.39	1257.45	1190.79	1352.39	1566.31	1404.62	1395.61	1183.23	1022.32
Malaguíta												
E_o (mm)	202.02	205.16	206.42	209.41	210.16	204.11	203.79	204.42	203.69	201.19	204.21	205.79
$\Delta f/r$ (-)	0.64	0.55	0.57	0.67	0.73	0.73	0.75	0.77	0.78	0.78	0.77	0.73
Q ($m^3 s^{-1}$)	226.96	150.55	164.50	281.88	400.06	377.43	430.14	493.81	516.74	504.72	491.60	383.53

Río/ estación/ parámetro	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Río Patía												
Caney	171.24	175.88	178.29	172.59	172.59	170.97	168.20	172.77	174.50	171.33	167.05	168.11
El Mojarras	0.16	0.17	0.20	0.29	0.24	0.06	0.01	0.00	0.14	0.42	0.44	0.34
E_o (mm)	76.05	85.34	110.77	202.03	138.34	17.55	2.72	0.66	61.73	415.30	432.94	260.94
$\Delta f/r$ (-)	168.91	172.86	175.51	172.05	173.59	166.09	167.50	171.96	174.14	170.79	166.53	167.14
Q ($m^3 s^{-1}$)	0.32	0.19	0.22	0.28	0.18	0.07	0.01	0.02	0.18	0.44	0.44	0.38
Pisanda	146.08	58.15	76.92	114.08	54.88	12.20	1.50	1.99	54.58	277.90	279.48	205.37
E_o (mm)	192.46	194.46	196.17	198.21	201.19	193.45	191.36	195.16	194.36	191.36	193.25	195.16
$\Delta f/r$ (-)	0.47	0.43	0.39	0.47	0.55	0.46	0.38	0.22	0.40	0.43	0.28	0.34
Q ($m^3 s^{-1}$)	61.48	52.03	42.49	62.00	97.51	60.39	37.86	14.15	43.37	49.70	22.57	32.47
Remolino Grande												

Tabla IV. Caudales medios mensuales simulados para los ríos Baudó, San Juan y Patía por medio de la Ecuación (1); caudal medio mensual del río Mira registrado en la estación San Juan (1980-2003) (IDEAM, 2005)

Río	Caudal ($m^3 s^{-1}$)											
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Baudó	751.48	545.41	608.57	771.38	863.23	865.60	872.09	975.30	824.21	830.13	878.94	675.80
San Juan	2027.94	1835.34	1911.53	2426.14	2994.10	2633.87	2902.59	3305.07	3050.44	3072.61	2618.15	2347.49
Patía	283.60	195.52	230.17	378.10	290.73	90.14	42.08	16.80	159.68	742.89	734.99	498.79
Mira	1050.00	920.90	917.10	1095.00	1105.00	821.00	626.70	533.70	629.70	890.50	861.40	965.80