

**XXII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
CIUDAD GUAYANA, VENEZUELA, OCTUBRE 2006**

**BALANCE HÍDRICO PROMEDIO ANUAL Y MENSUAL PARA LA
CUENCA DEL RÍO CARONÍ, VENEZUELA**

Gustavo A. Silva León

*Profesor Asociado. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales,
Escuela de Geografía. Mérida, Venezuela. E-mail: gsilval@ula.ve*

RESUMEN: Se analiza el balance hídrico promedio de la cuenca del río Caroní entre 1986 y 2001. Las estaciones hidrométricas consideradas son río Caroní en Aripichí, Capaura y Arekuna y río Paragua en Karún y Auraima. Como punto de inicio se toman resultados previos del balance promedio anual para las cuencas de esas estaciones, donde la suma de las láminas de escurrimiento y evapotranspiración es igual a lluvia media anual. Para el balance mensual se usan los polígonos de Thiessen obtenidos con estaciones pluviométricas escogidas, a fin de calcular las precipitaciones medias mensuales de cada cuenca. La evapotranspiración mensual se determina como una función lineal de la precipitación mensual. La humedad del suelo a capacidad de campo es estimada para las cuencas del Caroní y Paragua considerando los principales tipos de suelos, mientras la capacidad de almacenamiento del subsuelo se halla con las variaciones mensuales del almacenamiento. Como resultado, los balances mensuales para las cuencas en cuestión se presentan en un cuadro con las láminas de agua expresadas en milímetros, y se comentan y comparan los comportamientos hidrológicos de esas cuencas. Se concluye lo novedoso y satisfactorio del análisis y se recomienda probar los balances mensuales para el seguimiento y pronóstico de caudales.

ABSTRACT: The average water balance of the Caroní River basin is analyzed in between 1986 and 2001. The considered fluviometric stations are Caroní River at Aripichí, Capaura and Arekuna, and Paragua River at Karún and Auraima. As starting point, there are taken some previous results from an annual water balance referred to the watershed of the aforementioned stations, where the evapotranspiration plus the runoff depth is equal to the precipitation. For the monthly balance, Thiessen polygons made with selected rain gages are used to calculate the average precipitation in the watersheds. Monthly evapotranspiration is determined like a linear function of the monthly precipitation. The soil humidity at field capacity is estimated for the Caroní and Paragua River basin considering the majors kind of soils, while the subsoil water storage capacity is calculated with the monthly storage variations. As results, monthly water balances for the river basins are displayed in a chart with the water depths expressed as millimeters, and the hydrologic behaviors of those river basins are commented and compared. It is concluded how novel and satisfactory the methodology is and it is suggested to try monthly water balances to follow and forecast stream flows.

PALABRAS CLAVE: balance hídrico de cuencas, cuenca del río Caroní, Venezuela

INTRODUCCIÓN

El río Caroní es el más caudaloso de los afluentes venezolanos del río Orinoco y éste a su vez es el tercer río más caudaloso del mundo. Además, el Caroní es un río de primer orden mundial por su aprovechamiento hidroeléctrico, ya que para 2006 tiene instalados 13.976 MW de potencia nominal y 16.280 MW de potencia máxima en los sitios de Guri, Caruachi y Macagua de su curso bajo, capacidad energética que permite suplir el 70 % de la demanda nacional y exportar electricidad a Brasil y Colombia, sin contar aún con la represa Tocoma, que se construye entre Guri y Caruachi.

Para ocuparse del desarrollo hidroeléctrico del río Caroní fue creada en 1963 la empresa estatal Electrificación del Caroní C.A., EDELCA, filial de la Corporación Venezolana de Guayana, CVG, que ya había sido creada en 1960. A través de su Gerencia de Gestión Ambiental, EDELCA opera una extensa red hidroclimática compuesta de numerosas estaciones climatológicas, hidrométricas y limnológicas, cuyos registros se remontan hasta 1949.

Este trabajo es la continuación de un estudio sobre el balance hídrico promedio anual de la cuenca por sectores y subcuencas de la cuenca del río Caroní, acordado con la Gerencia de Gestión Ambiental de EDELCA en febrero de 2005, el cual sirvió de base para un artículo concluido en enero de 2006 y en trámite de publicación. Ahora se retoman algunos resultados de ese artículo para abordar el balance promedio mensual, utilizando estaciones hidrométricas operativas en los ríos Caroní y Paragua.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO CARONÍ

Ubicación. La cuenca del río Caroní se encuentra en la Guayana venezolana y pertenece íntegramente al estado Bolívar. La misma se halla entre los 60° 35' y 64° 07' de longitud oeste y entre los 3° 37' y 8° 21' de latitud norte. La ubicación se ilustra en la Figura 1.



Figura 1.- Situación relativa de la cuenca del río Caroní.

Extensión. La cuenca del río Caroní tiene una superficie de 92.225 Km², que abarca 39 % del estado Bolívar, 10 % de la superficie nacional y 9 % de la cuenca orinoquense.

Ciudades y centros poblados. La moderna e industrial Ciudad Guayana, con 700.000 habitantes, es la capital del municipio Caroní, la sexta ciudad más poblada de Venezuela y la mayor del país al sur del eje Orinoco – Apure. Ella se yergue a orillas del río Caroní en su desembocadura y se divide en dos urbes: Puerto Ordaz a la margen izquierda y San Félix a la margen derecha. Ciudad Guayana es la sede de la CVG y de EDELCA.

En segundo lugar destacan dos ciudades pequeñas: Santa Elena de Uairén, cerca de la frontera con Brasil; y La Paragua, en el curso bajo del río homónimo. Además existen pequeños centros poblados, algunos turísticos como Canaima y otros mineros como San Salvador de Paúl e Ikabarú; y también comunidades indígenas de la etnia pemón, entre ellas Kavanayén, S. Francisco de Yuruaní, Wonkén, Urimán, Kamarata y Karún.

Hidrografía. El río Caroní toma su nombre en la unión de los ríos Kukenán y Yuruaní y su longitud total supera los 900 Km. Los cerros o tepuyes de donde surgen las fuentes del Caroní son el Kukenán y el Roraima, que es el más alto de la cuenca con 2.800 msnm.

Los mayores afluentes del Caroní son los ríos Aponwao, Karuay, Ikabarú, Tirika, Apakarú, Urimán, Carrao y Paragua. En realidad este último tiene la misma jerarquía hidrográfica del Caroní en el sitio de la confluencia de ambos, tanto por el área de drenaje y su red de cauces como por la escorrentía. El río Paragua nace en el cerro Marutani y sus principales afluentes son los ríos Ichún, Kurutú, Marik, Karún, Carapo, Tonoro, Oris, Aza y Chiguao.

Adaptando el criterio de CVG EDELCA (2004), la cuenca del río Caroní se divide en cinco sectores hidrográficos: Alto Caroní, desde las nacientes del río hasta Aripichí; Caroní Medio, desde Aripichí hasta salto Tayucay; Alto Paragua, desde sus fuentes hasta Karún; Bajo Paragua, desde Karún hasta Chiguao; y Bajo Caroní, toda el área restante hasta la desembocadura en el Orinoco. Los afluentes y sectores se muestran en la Figura 2.

Clima. En la cuenca del Caroní predomina un clima tropical lluvioso y en promedio tiene 2.900 mm/año de lluvia y una temperatura anual en el orden de los 24 °C (CVG EDELCA, 2005). La macrotermia es atenuada por el relieve de tepuyes dispersos, a veces extensos, y por la altiplanicie de la Gran Sabana, la sierra de Lema y la sierra meridional de Parima.

La estación de lluvias va de mayo a noviembre y la de sequía de diciembre a abril, pero diciembre y abril son más húmedos en las localidades más lluviosas y meridionales. En promedio y con alguna excepción, la precipitación está más concentrada en el trimestre junio – agosto, lo cual es indicativo de la mayor actividad de la convergencia intertropical en ese lapso. En el extremo norte precipitan sólo 1.200 mm/año pero hacia el sur existen centros pluviométricos que superan los 4.000 mm/año en los tepuyes Auyán, Waiquinima, Kukenán, Roraima y el del macizo Chimantá que se prolonga al oeste hasta Guanacoco. La precipitación del Alto y Medio Caroní es más variablemente distribuida en el espacio y la del Alto Paragua lo es más uniformemente. Más adelante se presentan las isoyetas medias anuales según Silva (2006).

Escorrentía. En correspondencia con el patrón de precipitación mensual, el régimen de escorrentía es unimodal, siendo más caudalosos los ríos en el trimestre junio – agosto y lo son menos en el trimestre febrero – abril. El mes de más escorrentía suele ser julio y el de menos marzo. Por otra parte, es común la tendencia de que el mayor aumento del caudal en valores absolutos ocurre de mayo a junio y la mayor disminución de diciembre a enero.

donde las I_i son las entradas de agua, las O_j son las salidas de agua, S es el agua almacenada, S_1 es el agua almacenada al final del período y S_0 es la almacenada al principio del mismo. Las unidades del balance son de volúmenes de agua o de lámina de agua sobre una superficie, ambas expresadas por la unidad de tiempo correspondiente.

La ecuación general de balance hídrico para el sistema cuenca se puede expresar como:

$$(P + C) - (Q + Et) + M = \Delta S = \Delta S_s + \Delta H + \Delta G, \quad [2]$$

donde P es la precipitación, C es el agua atmosférica condensada que es interceptada por la vegetación, llamada también precipitación horizontal u oculta; Q es la escorrentía generada por la cuenca, Et es la evapotranspiración, M se refiere a los aprovechamientos hidráulicos con trasvase, siendo positivo si la cuenca importa agua y negativo cuando la exporta; S_s es el almacenamiento del agua en la superficie, H es la humedad del suelo y G es el almacenamiento subterráneo de los acuíferos. Si el balance hídrico se aplica al promedio de n años la variación de almacenamiento ΔS se hace cero y la ecuación [2] se simplifica a:

$$P + C + M = Q + Et, \quad [3]$$

o comúnmente a:

$$P = Q + Et \quad [4]$$

BALANCE HÍDRICO PROMEDIO ANUAL POR ESTACIONES HIDROMÉTRICAS

Antecedentes directos. Silva (2004) presenta el balance promedio anual para la cuenca internacional del río Orinoco hasta Puerto Ayacucho. Luego, Silva (2005) amplía dicho balance a la cuenca completa del Orinoco. Finalmente, Silva (2006) realiza un balance detallado por sectores hidrográficos y subcuencas de la cuenca del río Caroní.

Metodología. Dichos análisis se basan en aproximaciones sucesivas de precipitaciones y caudales, verificando con hoja de cálculo el cumplimiento de las ecuaciones siguientes:

$$\sum Q_i = Q_t, \quad [5]$$

$$\sum A_i = A_t, \quad [6]$$

$$\sum (A_i * P_i) = A_t * P_t, \quad [7]$$

$$Et_i = P_i - Q_{Li}, \quad [8]$$

donde Q_t es el caudal medio para la cuenca total, los Q_i son los caudales medios de cada subcuenca y área complementaria A_i , A_t es el área total de la cuenca, P_t es la precipitación media en el área A_t , las P_i son las precipitaciones medias en cada área A_i y las Et_i son las evapotranspiraciones medias de las áreas A_i . En cada aproximación se calculan también el volumen escurrido anual, la lámina respectiva e indicadores de rendimiento hídrico. Las aproximaciones terminan al cabo de varios y numerosos ensayos, cuando los resultados satisfagan al analista.

Resultados. Se toman de Silva (2006), en primer lugar, las isoyetas medias 1986 – 2001 para la cuenca del río Caroní, dibujadas en el mapa de la Figura 3, que fueron obtenidas con datos de 38 estaciones pluviométricas y requirieron ser ajustadas por balance hídrico para el Caroní Alto y Medio; y en segundo lugar, el balance medio anual para el mismo período de sendas cuencas de cinco estaciones hidrométricas: río Caroní en Aripichí, Capaura y Arekuna y río Paragua en Karún y Auraima, según se aprecia en la Tabla 1. Con los datos tabulados de láminas de lluvia, escorrentía y evapotranspiración se verifica fácilmente la ecuación [4] en éste promedio de 16 años.

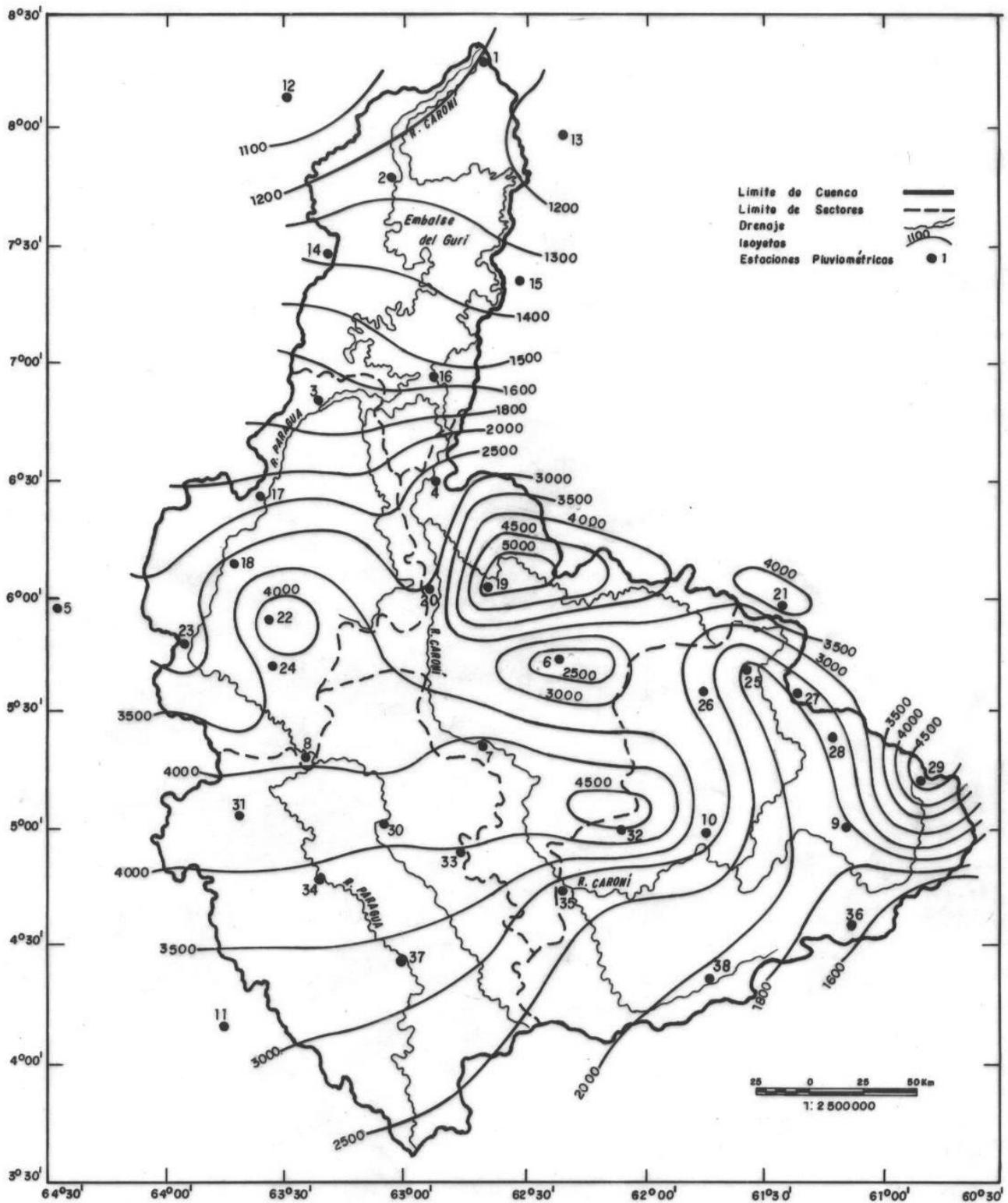


Figura 3.- Isoyetas medias anuales del período 1986 – 2001.

Tabla 1.- Balance promedio anual 1986 – 2001 por estaciones hidrométricas.

Estaciones	Cuenca	Precip.	Caudal	Product.	Vol. escurr.	Escorrentía	Eficiencia	Evapotr.
Río Caroní en:	(Km ²)	(cm/año)	(m ³ /s)	(l/s/Km ²)	(Km ³ /año)	(cm/año)	(%)	(cm/año)
1. Aripichí	24.025	256	1.036	43,1	32,69	136	53,1	120
2. Capaura	30.900	282	1.568	50,7	49,48	160	56,8	122
3. Arekuna	41.750	303	2.384	57,1	75,23	180	59,6	123
Río Paragua en:								
1. Karún	22.225	354	1.598	71,9	50,43	227	64,1	127
2. Auraima	29.125	353	2.095	71,9	66,11	227	64,2	126

Las cinco estaciones hidrométricas están señaladas en la Figura 2. Por el método de las aproximaciones sucesivas, Silva (2006) obtiene las isoyetas definitivas y ajusta los gastos medios con una diferencia menor del 2,5 % respecto a la media histórica.

BALANCE HÍDRICO PROMEDIO MENSUAL POR ESTACIONES HIDROMÉTRICAS

Metodología. Se utilizan las mismas estaciones hidrométricas del análisis anterior. Los caudales medios mensuales del período 1986 – 2001 se corrigen proporcionalmente de acuerdo al caudal medio anual ya ajustado, que está tabulado en la Tabla 1. Estos resultados se expresan en la Tabla 2 en unidades de caudal y de lámina escurrida.

Tabla 2.- Promedios de escorrentía 1986 – 2001 ajustados con el balance anual.

Río Caroní en Aripichí													
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
(m ³ /s)	593	434	395	526	1.037	1.732	1.806	1.693	1.339	1.044	964	829	1.036
(cm)	6,6	4,4	4,4	5,7	11,6	18,7	20,1	18,9	14,5	11,6	10,4	9,2	136
Río Caroní en Capaura													
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
(m ³ /s)	806	636	566	747	1.516	2.669	2.859	2.634	2.041	1.595	1.464	1.221	1.568
(cm)	7,0	5,0	4,9	6,3	13,1	22,4	24,8	22,8	17,1	13,8	12,3	10,6	160
Río Caroní en Arekuna													
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
(m ³ /s)	1.151	925	765	981	2.087	3.932	4.343	4.185	3.312	2.636	2.398	1.807	2.384
(cm)	7,4	5,4	4,9	6,1	13,4	24,4	27,9	26,8	20,6	16,9	14,9	11,6	180
Río Paragua en Karún													
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
(m ³ /s)	885	724	583	805	1.855	2.783	2.905	2.391	1.959	1.454	1.418	1.350	1.598
(cm)	10,7	7,9	7,0	9,4	22,4	32,5	35,0	28,8	22,8	17,5	16,5	16,3	227
Río Paragua en Auraima													
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
(m ³ /s)	1.020	790	625	849	2.101	3.590	4.095	3.575	2.833	2.062	1.834	1.680	2.095
(cm)	9,4	6,6	5,7	7,6	19,3	32,0	37,7	32,9	25,2	19,0	16,3	15,5	227

Para obtener la precipitación media mensual por área de drenaje, se seleccionan del mapa de la Figura 3 las nueve estaciones pluviométricas de registros más completos, que con su número de identificación son La Paragua 3, Arekuna 4, Entre Ríos 5, Kamarata 6, Urimán 7, Karún 8, San Ignacio de Yuruaní 9, Wonkén 10 y Amenadiña o Guaña 11. El porcentaje de cada precipitación mensual para cada estación se indica en la Tabla 3.

Tabla 3.- Porcentajes de precipitación mensual media 1986 – 2001.

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
La Paragua	2,1	1,5	1,2	1,5	9,7	17,0	19,8	18,3	12,7	8,1	5,3	2,8	100,0
Arekuna	1,7	1,3	0,9	1,9	9,6	17,8	18,9	18,7	12,8	8,3	5,7	2,4	100,0
Entre Ríos	1,7	1,8	1,8	3,5	10,7	14,9	19,4	16,6	11,5	7,2	6,0	4,9	100,0
Kamarata	1,7	2,2	2,2	4,1	10,7	13,8	14,1	13,8	14,0	10,9	8,7	3,8	100,0
Urimán	1,4	2,0	2,4	5,1	11,2	16,0	17,4	14,0	11,6	7,8	6,5	4,6	100,0
Karún	1,8	1,7	2,3	4,7	11,9	15,1	16,2	13,3	11,6	8,3	7,9	5,2	100,0
San Ignacio	3,3	2,8	3,9	7,0	12,0	14,2	14,0	12,2	8,4	9,6	7,6	5,0	100,0
Wonkén	2,9	3,6	4,2	5,9	10,2	13,0	14,6	13,6	9,7	8,7	7,7	5,9	100,0
Guaña	6,1	6,7	6,7	9,0	14,8	12,5	11,1	7,8	6,0	5,4	7,0	6,9	100,0

Con dichas estaciones pluviométricas se elaboran los polígonos de Thiessen mediante las mediatrices y los circuncentros de los triángulos conformados por los tríos de estaciones adyacentes, de manera que las áreas de drenaje de las estaciones hidrométricas quedan repartidas según las áreas de influencia de las estaciones pluviométricas limitadas por los polígonos respectivos. En la Tabla 4 se indican los porcentajes redondos de cómo se reparten las áreas de drenaje según los polígonos de Thiessen.

Tabla 4.- Porcentajes de influencia de las estaciones pluviométricas sobre cada cuenca.

Estación Pluviométrica	Río Caroní en:			Río Paragua en:	
	Aripichí	Capaura	Arekuna	Karún	Auraima
La Paragua					3
Arekuna			7		2
Entre Ríos					3
Kamarata	7	9	22		
Urimán		17	15	24	18
Karún			1	37	44
San Ignacio	36	28	21		
Wonkén	57	46	34		
Guaña				39	30
Total	100	100	100	100	100

Luego se estima para cada área de drenaje la lluvia media de cada mes, por ejemplo, el promedio de enero para la cuenca del Caroní que drena hasta Aripichí, se calcula como:

$$256 \text{ cm} * [(0,07 * 0,017) + (0,36 * 0,033) + (0,57 * 0,029)] = 256 \text{ cm} * 0,0296 = 7,6 \text{ cm},$$

donde el primer valor en cm es la lluvia media anual sobre el área que drena hasta Aripichí, que se obtiene de la Tabla 1; la primera cifra de los paréntesis representa el valor absoluto de los porcentajes de influencia de las estaciones Kamarata, San Ignacio y Wonkén, que se obtienen de la Tabla 4; y la segunda cifra de los paréntesis representa el valor absoluto de los porcentajes de la precipitación media anual correspondiente al mes de enero de las mismas estaciones pluviométricas, que se obtienen de la Tabla 3. Las precipitaciones medias mensuales así determinadas para las cuencas de las estaciones hidrométricas, se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5.- Precipitación media mensual de cuenca en cm, período 1986 – 2001.

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1. Aripichí	7,6	8,2	10,1	15,8	27,9	34,5	36,7	33,6	24,4	23,5	19,8	13,9	256
2. Capaura	7,5	8,4	10,2	16,7	30,8	39,2	41,9	37,5	28,3	25,4	21,3	14,8	282
3. Arekuna	7,3	8,2	9,6	16,1	32,8	43,1	45,8	41,7	33,0	27,9	23,0	14,6	303
4. Karún	12,0	13,2	14,3	22,9	45,5	50,6	51,3	40,1	33,3	25,0	25,5	20,2	354
5. Auraima	10,7	11,4	12,6	20,7	44,1	51,5	53,5	42,8	35,2	25,8	25,4	19,3	353

Para realizar el balance hídrico mensual promedio acorde con la ecuación [2], se requiere además de las láminas mensuales de escorrentía y precipitación, las láminas mensuales de evapotranspiración, de almacenamiento en la superficie, en el suelo y en el subsuelo. El almacenamiento superficial del agua se desprecia porque no hay áreas inundables ni otros cuerpos de agua superficiales, de manera que el agua presente sobre el suelo entra en el cómputo de la evapotranspiración.

En la cuenca del río Caroní existen varios tipos de coberturas vegetales, predominando el bosque medio, el bosque bajo, la sabana y el arbustal (CVG EDELCA, 2004). Existen diversos métodos para estimar la evapotranspiración mensual pero están más concebidos para suelos cultivados y climas no tropicales. Acá se plantea que la evapotranspiración mensual es una función lineal de la precipitación mensual, con la premisa de que a mayor precipitación mayor es el agua disponible para la evaporación y que además se preserve el valor promedio de evapotranspiración anual. Para las cinco cuencas de trabajo se logró obtener una solución única, lo que afirma su validez, a saber:

$$E_t \text{ (cm)} = 8,6 + 0,066P_i, \quad [9]$$

La humedad del suelo disminuye si la evapotranspiración supera a la precipitación. Los suelos más comunes en la cuenca son los ultisoles y los entisoles y les siguen los afloramientos rocosos (CVG EDELCA, 2004). Un ultisol típico en la cuenca puede tener 100 cm de profundidad, textura franco arcillosa y 19 cm de agua almacenable; y un entisol típico 40 cm de profundidad, textura franco arenosa y 5 cm de agua almacenable. Para hallar esta capacidad de almacenamiento o de humedad útil en el suelo se puede consultar a Grassi (1988). Estimando para las cuencas del Caroní 50 % de ultisoles, 30 % de entisoles y 20 % de rocas, resulta un promedio de 11 cm de humedad del suelo disponible para las plantas; mientras que para las cuencas del Paragua se estiman 75 % de ultisoles, 15 % de entisoles y 10 % de rocas, lo que promedia 15 cm de agua aprovechable por las plantas.

Por otra parte, la capacidad de almacenamiento de agua del subsuelo, G, se calcula utilizando las variaciones del almacenamiento mensual, ΔS_i , cumpliéndose que:

$$\Delta S_i = P_i - Q_i - E_t, \quad [10]$$

$$\sum \Delta S_i = 0, \quad [11]$$

$$G \geq \sum \Delta S_i \text{ (positivas)} = | \sum \Delta S_i \text{ (negativas)} |, \quad [12]$$

Resultados. Los balances hídricos mensuales promedio de las cuencas correspondientes a las estaciones hidrométricas consideradas, se reúnen en la Tabla 6. Para ejemplo de cálculos sirva la cuenca del río Caroní en Aripichí. Acorde con la ecuación [12], la capacidad de almacenamiento del subsuelo, G, vale por lo menos:

$$0,5 + 5,9 + 4,9 + 5,6 + 3,9 + 1,7 = | -8,1 - 5,3 - 3,6 - 0,2 - 0,5 - 4,8 | = 22,5$$

El balance se inicia en octubre pues tiene el último incremento positivo de almacenamiento, por lo que ese mes ha de concluir con el máximo almacenamiento total de 33,5 cm, que resulta de sumar los 11,0 cm del suelo y 22,5 cm del subsuelo, ya previamente calculados. En noviembre y diciembre la precipitación sigue superando a la evapotranspiración por lo que la humedad del suelo continúa a capacidad de campo, por tanto, la disminución en el almacenamiento es exclusiva del subsuelo y en consecuencia el agua allí almacenada disminuye primero a 22,0 cm y luego a 17,2 cm. En enero la evapotranspiración supera a la precipitación en 1,5 cm, que se le deducen al suelo que queda con 9,5 cm al final del mes. Como hay una disminución de 8,1 cm en el almacenamiento y 1,5 cm corresponden al suelo, los otros 6,6 cm se le deducen al subsuelo, quedando éste con 10,6 cm al final del mes. En febrero la situación es parecida pero en marzo la precipitación supera en 0,8 cm a la evapotranspiración, por lo que el suelo aumenta su humedad de 8,6 cm a principios del mes hasta 9,4 cm al final del mismo. Luego, si el suelo ganó 0,8 cm y el almacenamiento total disminuyó 3,6 cm, el subsuelo tuvo que perder 4,4 cm y quedar con 1,8 cm de agua a fin de mes. En abril el suelo ganó los 1,6 centímetros que le faltaban para alcanzar la capacidad de campo y el subsuelo tuvo que perder 1,1 cm de agua para que el almacenamiento total aumentara 0,5 cm. Desde mayo continúa el análisis con el suelo a capacidad de campo hasta llegar de nuevo a los valores iniciales de octubre.

Tabla 6.- Balance hídrico promedio de cuencas en cm de lámina de agua para el período 1986 - 2001.

Caroní en Aripichí	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Precipitación	7,6	8,2	10,1	15,8	27,9	34,5	36,7	33,6	24,4	23,5	19,8	13,9	256,0
Escorrentía	6,6	4,4	4,4	5,7	11,6	18,7	20,1	18,9	14,4	11,6	10,4	9,2	136,0
Evapotranspiración	9,1	9,1	9,3	9,6	10,4	10,9	11,0	10,8	10,2	10,2	9,9	9,5	120,0
Δ almacenamiento	-8,1	-5,3	-3,6	0,5	5,9	4,9	5,6	3,9	-0,2	1,7	-0,5	-4,8	0,0
Agua a fin de mes:													Media
en el suelo	9,5	8,6	9,4	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	10,6
en el subsuelo \geq	10,6	6,2	1,8	0,7	6,6	11,5	17,1	21,0	20,8	22,5	22,0	17,2	13,2
Total almacenada \geq	20,1	14,8	11,2	11,7	17,6	22,5	28,1	32,0	31,8	33,5	33,0	28,2	23,8
Caroní en Capaura	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Precipitación	7,5	8,4	10,2	16,7	30,8	39,2	41,9	37,5	28,3	25,4	21,3	14,8	282,0
Escorrentía	7,0	5,0	4,9	6,2	13,1	22,4	24,8	22,8	17,1	13,8	12,3	10,6	160,0
Evapotranspiración	9,1	9,2	9,3	9,7	10,6	11,2	11,4	11,1	10,5	10,3	10,0	9,6	122,0
Δ almacenamiento	-8,6	-5,8	-4,0	0,8	7,1	5,6	5,7	3,6	0,7	1,3	-1,0	-5,4	0,0
Agua a fin de mes:													Media
en el suelo	9,4	8,6	9,5	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	10,6
en el subsuelo \geq	11,4	6,4	1,5	0,8	7,9	13,5	19,2	22,8	23,5	24,8	23,8	18,4	14,6
Total almacenada \geq	20,8	15	11	11,8	18,9	24,5	30,2	33,8	34,5	35,8	34,8	29,4	25,1
Caroní en Arekuna	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Precipitación	7,3	8,2	9,6	16,1	32,8	43,1	45,8	41,7	33,0	27,9	23,0	14,6	303,1
Escorrentía	7,4	5,4	4,9	6,1	13,4	24,4	27,8	26,8	20,5	16,9	14,9	11,6	180,1
Evapotranspiración	9,1	9,1	9,2	9,7	10,8	11,4	11,6	11,3	10,8	10,4	10,1	9,5	123,0
Δ almacenamiento	-9,2	-6,3	-4,5	0,3	8,6	7,3	6,4	3,6	1,7	0,6	-2,0	-6,5	0,0
Agua a fin de mes:													Media
en el suelo	9,2	8,3	8,7	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	10,4
en el subsuelo \geq	12,6	7,2	2,3	0,3	8,9	16,2	22,6	26,2	27,9	28,5	26,5	20,0	16,7
Total almacenada \geq	21,8	15,5	11	11,3	19,9	27,2	33,6	37,2	38,9	39,5	37,5	31	27,1
Paragua en Karún	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Precipitación	12,0	13,2	14,3	22,9	45,5	50,6	51,3	40,1	33,3	24,9	25,5	20,2	353,8
Escorrentía	10,7	7,9	7,0	9,4	22,4	32,5	35,0	28,8	22,9	17,5	16,6	16,3	227,0
Evapotranspiración	9,4	9,5	9,6	10,1	11,6	12,0	12,0	11,3	10,8	10,3	10,3	9,9	126,8
Δ almacenamiento	-8,1	-4,2	-2,3	3,4	11,5	6,1	4,3	0,0	-0,4	-2,9	-1,4	-6,0	0,0
Agua a fin de mes:													Media
en el suelo	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
en el subsuelo \geq	6,5	2,3	0,0	3,4	14,9	21,0	25,3	25,3	24,9	22,0	20,6	14,6	15,1
Total almacenada \geq	21,5	17,3	15,0	18,4	29,9	36,0	40,3	40,3	39,9	37,0	35,6	29,6	30,1
Paragua en Auraima	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Precipitación	10,7	11,5	12,6	20,7	44,1	51,5	53,5	42,8	35,2	25,8	25,4	19,3	353,1
Escorrentía	9,4	6,6	5,7	7,5	19,3	31,9	37,7	32,9	25,2	19,0	16,3	15,4	226,9
Evapotranspiración	9,3	9,3	9,4	9,9	11,5	11,9	12,1	11,4	10,9	10,3	10,3	9,9	126,2
Δ almacenamiento	-8,0	-4,4	-2,5	3,3	13,3	7,7	3,7	-1,5	-0,9	-3,5	-1,2	-6,0	0,0
Agua a fin de mes:													Media
en el suelo	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
en el subsuelo \geq	6,9	2,5	0,0	3,3	16,6	24,3	28,0	26,5	25,6	22,1	20,9	14,9	16,0
Total almacenada \geq	21,9	17,5	15,0	18,3	31,6	39,3	43,0	41,5	40,6	37,1	35,9	29,9	31,0

En los cinco balances presentados se aprecia que el mes de mayor disminución del almacenamiento hídrico es enero, mientras que el mes de mayor incremento del mismo es mayo. Para la cuenca del Caroní la humedad del suelo disminuye de enero a marzo. Además la capacidad de almacenamiento del subsuelo es de por lo menos 22,5 cm de agua en Aripichí, 24,8 cm en Capaura y 28,5 cm en Arekuna, aumento sucesivo que se debe al incremento de la precipitación anual. Para las tres estaciones el mes de almacenamiento máximo es octubre y ocurre tres meses después del mes de mayor precipitación que es julio. Para la cuenca del Paragua las diferencias entre las cuencas hasta Karún y Auraima son poco sustanciales, pero en comparación al Caroní, estas cuencas son más lluviosas, almacenan más agua en julio y agosto y el suelo no pierde humedad en todo el año.

CONCLUSIONES

Los balances hídricos promedios presentados para la cuenca del río Caroní, tanto anual como mensual, son novedosos por su metodología y sus resultados tienen una precisión de mm de altura de agua. Sin duda, estos balances mejoran la comprensión del comportamiento hidrológico de la cuenca. El balance hídrico anual, ya desarrollado en un trabajo anterior, es el punto de partida para el balance mensual, que viene siendo el tema central de este estudio. Es necesario consultar ese trabajo previo si se quieren conocer todos los aspectos tratados y los resultados que contiene.

Este esquema desarrollado para el balance hídrico mensual está al alcance de cualquier profesional vinculado a la hidrología y la hidráulica, de hecho, tiene parecido con la ficha para el balance hídrico del suelo con la que están familiarizados los climatólogos, geógrafos y agrónomos.

El haber probado satisfactoriamente el balance hídrico mensual de cuencas hidrográficas, utilizando tres estaciones hidrométricas en serie en el río Caroní y dos en el río Paragua habla de la bondad del método y su viabilidad, que no tiene mayor limitación que la inherente a la disponibilidad de los datos pluviométricos e hidrométricos, al suficiente conocimiento del suelo y de la vegetación y a la estimación de la evapotranspiración. En el último caso, la ecuación [9] es una contribución notable.

RECOMENDACIONES

El balance mensual de agua se podría realizar para un período suficiente de años anteriores al presente, con la idea de detectar y evaluar distintas situaciones hidrológicas asociadas a eventos ENSO o de otro tipo. Comprobada la utilidad del balance mensual, sería factible continuarlo para hacer un seguimiento de la hidrología de la cuenca del Caroní, u otras que lo ameriten, y formular modelos alternativos de pronóstico de caudal.

En Venezuela y demás países latinoamericanos hay que insistir en la necesidad de contar con cuencas hidrográficas bien instrumentadas para la medición hidroclimática, sobretodo de aquéllas con aprovechamientos hidráulicos de gran incidencia en el desarrollo regional y nacional. Un buen ejemplo es la cuenca venezolana del río Caroní, gran productora de energía hidroeléctrica, que tiene una compleja red de medición manejada por EDELCA.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CVG EDELCA (2004) *La cuenca del río Caroní, una visión en cifras*. Caracas. 243 p.

CVG EDELCA (2005) *Cifras 2004*. Caracas. 48 p.

Grassi, C. (1988) *Fundamentos del riego*. Serie Riego y Drenaje, 38. Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras, CIDIAT. Mérida. 409 p.

Silva, G.A. (2004) “Balance hídrico promedio de la cuenca del río Orinoco hasta Puerto Ayacucho”. *Memorias del V Congreso Venezolano de Geografía*. Mérida, 29 de noviembre al 3 de diciembre.

Silva, G.A. (2005) “La cuenca del río Orinoco: visión hidrográfica y su balance hídrico”. *Revista Geográfica Venezolana*, 46 (2): 75 – 108.

Silva, G.A. (2006) “Balance hídrico promedio anual por sectores y subcuencas de la cuenca del río Caroní, Venezuela”. En trámite de publicación.