

La cuenta física del agua mediante modelación hidrológica distribuida

Recibido para evaluación: 09 de Septiembre de 2004

Aceptación: 09 de Junio de 2005

Recibido versión final: 30 de Junio de 2005

Felipe Quintero D.¹
Jaime Ignacio Vélez U.²
Luis Alberto Blandón M.³

RESUMEN

Se presentan una comparación entre los modelos hidrológicos de agregación, tradicionalmente utilizados en el estudio de la cuenta física del agua en la cuenca y los modelos hidrológicos distribuidos. Se proponen estos últimos como instrumento de gestión apropiado para la planificación del recurso hídrico.

PALABRAS CLAVE: Cuentas Ambientales, Modelos Hidrológicos Distribuidos, Modelos de Tanque, Sistemas de Información Geográfica, HidroSIG.

ABSTRACT

A comparison between aggregation models used in traditional physical count of water and distributed hydrological models is presented. The use of distributed hydrological models as a better water management tool is purposed.

KEY WORDS: Physical Count of Water, Distributed Hydrological Models, Tank Models, Geographical Information Systems, HidroSIG.

1. Ing. Civil. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.
fquinte@unalmed.edu.co

2. Ph.D. Profesor Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.
jivelezu@unalmed.edu.co

3. Msc. en Ciencias Forestales, Departamento de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.
lablando@unalmed.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Las cuentas ambientales de los recursos naturales permiten tener un estimativo de la cantidad y la calidad de los distintos recursos naturales presentes en un área de interés. Estas cuentas son utilizadas como herramientas de gestión para el aprovechamiento sostenible de los recursos en un territorio.

Según Sejenovich *et al.*, (1991), las cuentas ambientales se conciben como un sistema de representación de información valorizable de los recursos naturales, cuyo objetivo central es contribuir a una mejor planificación y evaluación del desarrollo.

Recalde, 1993, reporta que en particular, los sistemas de cuentas ambientales pueden:

- Proveer un instrumento de política económico-ambiental
- Proveer un instrumento de planificación del desarrollo sostenible
- Ordenar y sistematizar la información existente sobre recursos naturales, amenazas naturales y ecosistemas
- Permitir la construcción de modelos cuantitativos para analizar la evolución, en cantidad y calidad, de las reservas de activos naturales del país en diferentes escenarios.



La cuenta física del agua, consiste en la identificación y la cuantificación de la oferta de las distintas fuentes de agua en territorio y de la demanda por todos agentes consumidores existentes en el mismo. Un balance entre oferta y demanda indica si existe o no déficit en la cuenca y además permite identificar los mayores consumidores de agua en la misma para analizar la calidad de sus descargas. (Blandón, 2001).

Se parte del hecho de que se cuenta con registros de las variables hidrológicas que permiten realizar la estimación de la oferta hídrica en la cuenca generalmente con la ayuda de un modelo de balance hidrológico. Se cuantifica cualquier otro tipo de aportes del recurso hídrico debidos a causas no necesariamente naturales, como transvasos de cuencas vecinas, o vertimientos. Mediante un censo o encuestas, se logra obtener una cuantificación aproximada de la demanda del recurso hídrico.

La cuenta física permite determinar estados deficitarios en la cuenca y analizar las causas que los producen, como lo son por ejemplo la ausencia de coberturas vegetales, la construcción no regulada de obras de captación y otras. La cuenta física es un instrumento para detectar las causas que conllevan a un mal manejo de los recursos en la cuenca.

Se establecen los valores ideales en los elementos que componen la valoración económica, estableciendo cuales deben ser los recursos mínimos disponibles en la cuenca para alcanzar estados de satisfacción. Esto se logra tomando las medidas de manejo adecuadas en la cuenca, resolviendo los problemas que la cuenta física del agua desenmascara.

La cuenta física es una unidad integradora de las componentes físicas, ecológicas, económicas y sociales, entendidas estas últimas como las demandas del recurso por parte de sus habitantes, al interior de la cuenca hidrográfica.

2. ESTIMACION DE LA OFERTA

Así una primera aproximación en la estimación de la oferta de agua se hace mediante el balance hidrológico de largo plazo donde a partir de la información disponible de precipitación media anual y evapotranspiración real media anual en la cuenca, es posible obtener el volumen medio anual de escorrentía que corresponde al agua disponible en la cuenca.

Desde 1674 en que Perrault publicó su monografía sobre el balance hídrico en el Río Sena se han propuesto distintos métodos para estimar las componentes del balance hidrológico de largo

plazo, así para estimar la evapotranspiración real a partir de las características climáticas de la zona se encuentran varios métodos desde los trabajos clásicos de Schreiber (1904), Budyko (1948), Coutagne (1954), Turc (1956), hasta modelos más recientes. En Mesa y otros (2000), Vélez y otros (2000), y Vélez y otros (2002) se presentan los detalles de varios de éstos métodos

Para considerar la variación temporal de la oferta y la demanda en el análisis de la cuenta física del agua, tradicionalmente se han realizado los balances con una resolución temporal mensual. En algunos casos sólo se hace el análisis de los balances para las condiciones medias de cada uno de los doce meses.

En sistemas con grandes volúmenes de almacenamiento donde se puede concentrar la escorrentía de toda la cuenca para atender todas las demandas y en climas donde la variabilidad interanual no es muy grande, estas metodologías pueden resultar adecuadas. En otras condiciones se requiere un refinamiento metodológico para considerar adecuadamente la variabilidad espacial y temporal tanto de la oferta como de la demanda.

En Colombia durante algunos años críticos (relacionados con El Niño) la oferta natural de agua puede ser sensiblemente menor a la que se tiene como promedio para todos los años (Mesa y otros, 1994), (Poveda y otros, 2001).

Por lo tanto, es importante emplear modelos de estimación de oferta que muestren con mas detalle el comportamiento de los caudales en la cuenca ante la ocurrencia de eventos críticos, en los que la agregación de los resultados a una escala temporal mas gruesa no enmascare las situaciones de déficit provocadas por cambios en las condiciones climáticas durante periodos secos, como es el caso de El Niño en Colombia.

3. MODELOS DE TANQUES

Para la estimación de la oferta en la gestión del agua en la cuenca hidrográfica se han utilizado modelos de balance hidrológico que conceptualizan la cuenca como un tanque o una serie de tanques interconectados (que representan el almacenamiento de agua en el suelo). Mediante este esquema y a partir de series de datos mensuales de precipitación, unos parámetros relacionados de la capacidad de almacenamiento de la cuenca y de un estimado de la evapotranspiración en cada mes permiten estimar la escorrentía en la cuenca para cada uno de los meses. Es el caso del modelo "T" (Thornwaite y Mather, 1955), el modelo "P" (Palmer, 1965), el modelo de Témez, (Andreu 1993), el modelo GR3 (Edijatno et Michel, 1989), etc.

El volumen de agua que se considera disponible para cada mes es el resultado de la integración de caudales variables durante el período, algo similar ocurre con la demanda (aunque por lo general las variaciones temporales son menores). Esta integración en el período de análisis genera una regulación que no es real y a menos que se tenga una capacidad de almacenamiento comparable a los volúmenes involucrados produce resultados en los que se sobrevaloran los caudales disponibles y se subvaloran las demandas, induciendo a errores en el análisis de la disponibilidad real de agua en la cuenca.

Para producir resultados con una resolución temporal mayor, se han desarrollado modelos hidrológicos agregados en toda la cuenca y que también están basados en esquemas de tanques interconectados, aunque el nivel de complejidad generalmente es mayor al igual que el número de parámetros requeridos para su calibración. Entre ellos se tiene el modelo clásico propuesto por Crawford y Linsley en 1966 y conocido como el modelo Stanford, el modelo Sacramento, desarrollado por el NWS (National Weather Service) de los Estados Unidos y, un buen número de modelos, conocidos por sus siglas en ingles, como el modelo HSPF Johanson y Kittle, el RORB de Laurenson, el HBV de Bergström. En Singh (1995) se encuentra información detallada de estos modelos y otros de naturaleza similar, utilizados para la gestión del agua.

En la realidad los caudales además de que varían temporalmente, se distribuyen de forma variable en el territorio. Generalmente la oferta natural crece aguas abajo en la red de drenaje y

casi linealmente con el área de la cuenca aportante. Así aguas abajo en la red de drenaje en los elementos que drenan áreas mayores se tienen caudales mayores. De otro lado las demandas no necesariamente están concentradas en el sitio que define la cuenca, ni todas están distribuidas de una forma uniforme sobre todo el territorio, si no que se tienen unas demandas concentradas y otras distribuidas que hacen que el balance que se hace en el sitio de salida de la cuenca no represente adecuadamente la relación entre la oferta y demanda en los sitios donde se pretende hacer el aprovechamiento del recurso.

Para un análisis más acertado de la disponibilidad real del recurso en los sitios donde se tiene la demanda y de su variabilidad en el tiempo, se hace necesario reconstruir las series de caudales en todos los sitios de interés en el territorio. Para el análisis se debe considerar un período suficientemente largo en el que se incluyan condiciones climáticas críticas y se puedan evaluar para todos los sitios de interés, las condiciones de déficit, cuando las haya, en términos de indicadores como el número de veces en que no se tiene suficiente recurso suficientes para atender la demanda (fallas), la magnitud media del déficit, la magnitud máxima del déficit o el número de días consecutivos en falla.

Es conveniente tener herramientas para explorar mediante simulación distintos escenarios de modificaciones en la oferta o en la demanda causadas por cambio climático, cambios en el uso del suelo, dinámicas demográficas, etc.

4. MODELOS HIDROLOGICOS DISTRIBUIDOS

Un modelo hidrológico distribuido permite obtener mejores resultados en la estimación de la cuenta física del agua al interior de la cuenca, pues por un lado permite considerar la distribución espacial de la lluvia y por otro, considerar aspectos que afectan la distribución espacial de la producción de escorrentía y su propagación.

Considerando la cuenca hidrográfica como un grupo de subcuencas que aporta sus flujos a una red de canales y utilizando cualquiera de los modelos agregados ya descritos para estimar los caudales que produce cada una de las subcuencas e integrando aguas abajo en la red de drenaje los resultados obtenidos para todas las subcuencas se puede tener un modelo que se puede considerar como distribuido. Este tipo de modelos tiene importantes limitaciones conceptuales y operativas, ya que la subcuenca es un elemento complejo y al considerarla como un área homogénea no es fácil la determinación de los valores representativos para los parámetros del modelo.



La distribución espacial de las características topográficas de la cuenca y la forma en que se conectan los elementos que componen la red de drenaje tienen importancia en la respuesta hidrológica de la cuenca. Un modelo distribuido considera un gran número de elementos correspondientes a pequeñas unidades de área que se puedan considerar como homogéneas desde el punto de vista hidrológico, geomorfológico o hidrogeológico con el fin de definir los valores de los parámetros del modelo.

En la modelación en cada uno de estos elementos, se puede tener en cuenta la influencia de los rasgos topográficos y morfológicos dominantes en la producción o transferencia de escorrentía.

Las características de las laderas, de la cobertura, del suelo, del subsuelo y de los cauces son variables a lo ancho y a lo largo de la cuenca. Un modelo distribuido permite considerar unos rasgos dominantes en las propiedades de cada una de las unidades de área en que se divide la cuenca. Estos rasgos pueden ser distintos para las diferentes unidades de área en las que se divide la cuenca, además, se obtienen distintas combinaciones cuando se tienen varias características de diferente tipo.

Un modelo completamente distribuido permite obtener simultáneamente los caudales en diferentes puntos de la cuenca. En estos casos el modelo puede servir para una mejor evaluación del riesgo en los distintos sitios de la cuenca, lo cual sería de gran ayuda para la definición de usos del suelo o para la definición de especificaciones de diseño de diversos tipos de obras de infraestructura.

Salazar y otros (2003), realizaron una implementación de un modelo hidrológico semi-distribuido de interacción suelo-atmósfera para las cuencas físicas del agua en algunas cuencas del Urabá Antioqueño (Blandón y otros, 2003).

El esquema general del modelo se presenta en la Figura 1. Se observan tres tanques que representan en orden descendente: la dinámica del agua en la vegetación, en el suelo y en la cuenca.

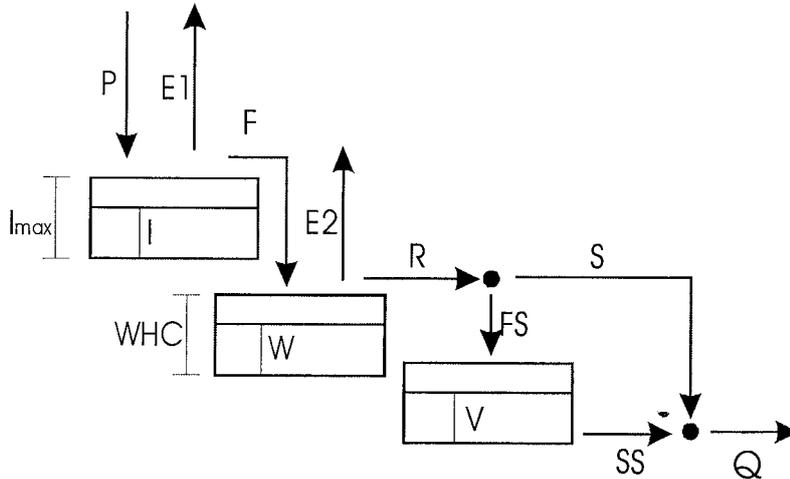


Figura 1
Esquema del modelo semi-distribuido de interacción suelo - atmósfera

El cambio del nivel de almacenamiento de cada compartimento depende, como en toda ecuación de balance, de las entradas y salidas de masa (agua). En el primer tanque, la entrada de agua se debe a la precipitación P y la salida esta determinada por la evaporación ($E1$) a tasa potencial, de la lámina de agua sobre la hoja. Es necesario definir un umbral de lámina que la hoja es capaz de almacenar (I_{max}). La definición de dicho umbral se puede realizar mediante una función sencilla para la cantidad máxima que almacena la hoja, que depende únicamente del índice de área foliar que representa la magnitud (adimensional) del área total de hojas contenidas en un metro cuadrado (se supone que por cada metro cuadrado de hojas se adhiere una lámina de agua determinada).

En el segundo tanque, la entrada de agua corresponde a la fracción de la precipitación que atraviesa el follaje F , y la salida es la evaporación $E2$ desde el suelo mas la transpiración de la vegetación. Este tanque es tal vez el más importante, puesto que controla en gran medida la evapotranspiración y la cantidad de agua de escorrentía.

El parámetro fundamental en este compartimento es la máxima lámina de agua que puede almacenar el suelo, como agua capilar en la zona de raíces, (WHC , de su sigla en ingles Water Holding Capacity). La cantidad de agua que no entra en el suelo R se convierte en agua de escorrentía superficial S y subsuperficial, FS . El modelo supone que, una fracción predeterminada del agua de escorrentía sale del volumen de control de manera inmediata como escorrentía superficial (aprox. un 10%). El tercer tanque controla la cantidad de agua que sale sub-superficialmente en cada instante de tiempo SS , mediante el producto del contenido de agua V en la porción subsuperficial del volumen de control y un parámetro de calibración del modelo, conocido como constante de recesión (K). Finalmente, el caudal a la salida del volumen de control es la suma entre el caudal subsuperficial (SS) y el caudal superficial (S)

Sin embargo, el modelo al ser semi-distribuido, no considera la conectividad de los elementos que conforman la red de drenaje en la cuenca lo cual lo hace ineficiente computacionalmente cuando se quieren hacer simulaciones de períodos largos o en cuencas de gran tamaño. No permite ubicar puntos de control al interior de la cuenca para registrar los caudales en cada intervalo de tiempo pues no considera la transmisión del flujo entre las unidades de área, y hacerlo de forma agregada tiene un costo computacional alto.

En 2001, Vélez presenta SHIA (simulación hidrológica distribuida abierta), un modelo hidrológico completamente distribuido conceptual del tipo de esquema vertical de tanques que se apoya en la física de los procesos, teniendo en cuenta las características morfológicas de la cuenca. El modelo tiene una estructura general para la producción de la escorrentía en la que, para cada componente de la escorrentía, se pueden considerar diferentes esquemas conceptuales con distinto nivel de complejidad. Esto permite adaptar el modelo a la escala espacio temporal de la simulación y a una representación adecuada de los procesos físicos determinantes de la producción de escorrentía en la cuenca.

A diferencia de los esquemas de modelación tradicional agregados, se representa el territorio mediante una malla formada por celdas cuadradas regulares. Cada celda se considera como unidad de respuesta hidrológica en la cual ocurren todos los procesos de formación de escorrentía.

Una discretización espacial de este tipo resulta más realista para la obtención de información de interés que cuando se realiza el mismo análisis por subcuencas, pues le permite la obtención de la serie de caudales en tantos sitios como se requiera para analizar en cada uno de ellos la disponibilidad real del recurso. Por otro lado, el costo computacional de una discretización en subcuencas de tamaño reducido es más alto que el de una discretización por celdas de forma acoplada.

Tal como se ilustra en la Figura 2, en cada celda se evalúan las entradas al sistema debidas a la precipitación y las salidas por evapotranspiración en el almacenamiento capilar, representados todos dentro del primer tanque en el esquema vertical. Los excedentes del almacenamiento capilar son conducidos a través de un conducto distribuidor a las capas más inferiores del suelo a unas tasas que dependen de la permeabilidad del suelo en la unidad de área que se está analizando. Se supone que para los diferentes estratos del suelo, se cuenta con distintos niveles de capacidad de retención de humedad. Así entonces, se plantean otros tres almacenamientos más, que representan la capa del suelo más superficial, una capa inferior y finalmente los almacenamientos subterráneos en la zona acuífera (ver Figura 2). Cada uno de estos tres últimos almacenamientos tiene una capacidad de aporte de flujo, que depende del tiempo de residencia del flujo en cada estrato de suelo. De esta manera, en función de los almacenamientos en cada nivel, se obtienen el flujo superficial, subsuperficial y subterráneo, representados en la Figura 2 por Y1, Y2, y Y3 respectivamente. De la hidrología tradicional se conoce que las salidas por flujo subterráneo son las responsables de los caudales base en los ríos, mientras que los flujos más superficiales representan los picos de la hidrógrafa debidos a la ocurrencia de eventos de alta intensidad y corta duración.

Los parámetros de calibración del modelo de producción de escorrentía son aquellos concernientes a las características hidráulicas del suelo, como capacidades de retención de agua, conductividad hidráulica en los diferentes estratos permeables, y los tiempos de residencia del flujo en cada almacenamiento.

Como siempre, en este tipo de modelos precipitación-escorrentía, la calidad de los resultados de la calibración del modelo, dependerá en un alto porcentaje de la calidad de la información de registros de precipitación que se tengan de la zona, y de que estos realmente sean representativos de la precipitación en la cuenca.



Tal vez la característica más importante del modelo es su capacidad de simular el flujo de la escorrentía. Se simula sobre los elementos de la red de drenaje virtual con un modelo hidráulico simplificado, que permite considerar algunos aspectos no lineales del flujo en los cauces. La suma de la escorrentía producida en cada uno de los almacenamientos de la celda, es entregada a un quinto tanque que representa el tramo de la red de drenaje que conecta la celda con la red de drenaje de la cuenca.

La red de drenaje de la cuenca está representada por un tanque en cada una de las celdas que se conecta con el de la celda que está aguas abajo en la dirección del flujo, de acuerdo con la estructura de la red de drenaje real y con la topografía de la cuenca. La transferencia del flujo en

forma ordenada en dirección aguas abajo, garantiza que en cualquier punto de la cuenca, el flujo es el resultado de los aportes de las celdas inmediatamente aguas arriba procedente de toda la cuenca drenante. El modelo por tanto permite reconstruir el régimen de caudales en cualquier sitio de la cuenca que sea de interés para el analista.

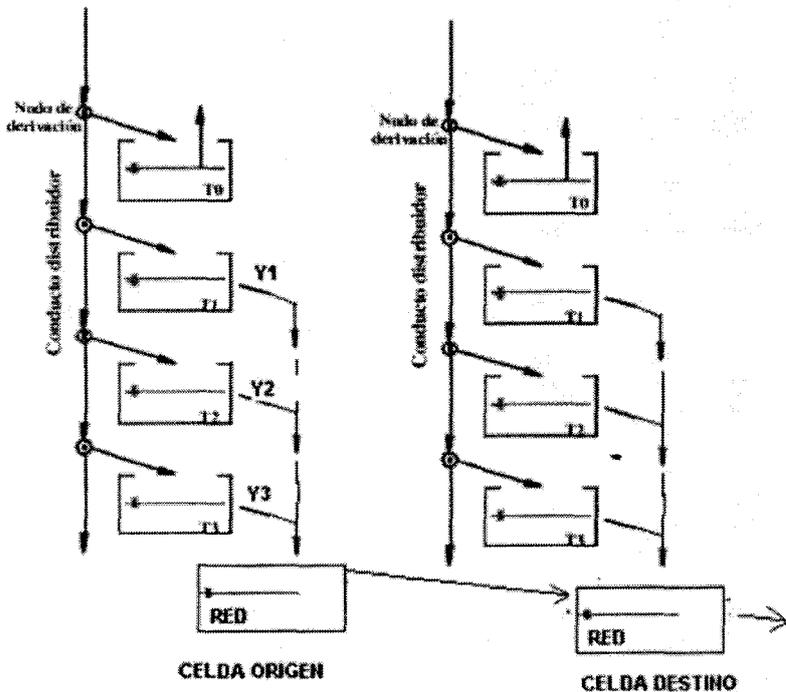


Figura 2.
Esquema de tanques representando la producción y transferencia del flujo en la red de drenaje

Para el modelo de transporte del flujo a través de la red de drenaje, dependiendo de la complejidad con la cual se desee modelar el flujo, la calibración dependerá de la velocidad de tránsito del flujo por los canales de la red de drenaje o de las características hidráulicas de los cauces que forman la red.

Con un planteamiento en forma distribuida se permite entonces, desde el punto de vista de la hidrología, identificar la cuenca drenante en una corriente de interés, y en ese punto, obtener la oferta natural así como la demanda del recurso hídrico.

De esta forma, los encargados de la gestión del recurso hídrico en la cuenca están en capacidad de identificar las zonas de déficit o superávit del recurso. Algunos sitios en la red de drenaje pueden requerir de atención particular por tratarse de sitios de captación de las concesiones de agua, sitios de transvase, sitios de descarga de aguas residuales o son simplemente son sitios de control y en todos ellos se requiere información del régimen de caudales

Mediante la simulación con el modelo distribuido se puede reconstruir la información "histórica" en sitios sin registros. También es posible explorar el comportamiento del régimen de caudales para distintos escenarios de condiciones climáticas, de uso del suelo y de uso del agua. El modelo distribuido se perfila como una poderosa herramienta para el análisis prospectivo que requiere los planes integrales de ordenamiento y manejo de las cuencas hidrográficas.

El analista podría determinar gracias al modelo, zonas que pueden resultar siendo mejores alternativas para la concesión del agua y así garantizar la satisfacción plena de la demanda del recurso en toda la cuenca.

Quintero (2004) realizó una implementación del modelo de simulación hidrológica distribuida abierta SHIA propuesta por Vélez (2001). Se registran las condiciones de entrada de agua al sistema, representadas por la precipitación, transvasos de cuencas vecinas y retornos de aguas residuales. Se cuantifican las transferencias internas entre las componentes de almacenamiento, permitiendo establecer el volumen disponible almacenado en los diferentes estratos del suelo, incluyendo por ende un estimativo de la recarga del acuífero. Al contar con la información de demanda clasificada en doméstica, agrícola, industrial y otros, es posible establecer las salidas de agua en el sistema que finalmente, al compararla con la oferta obtenida mediante el modelo hidrológico, permite determinar si la cuenca analizada se encuentra en condiciones de déficit o superávit.



5. CONCLUSIONES

Aunque los modelos hidrológicos de tanques no son recientes, si lo son las formulaciones conceptuales y distribuidas en las que los elementos están conectados de acuerdo a la estructura de la red de drenaje y los caudales que se obtienen en la simulación tienen coherencia espacial y temporal.

Son aun más recientes y podría decirse que pocas, las herramientas computacionales que integran estos modelos con un sistema de información geográfica para almacenamiento, preprocesamiento de la información con la que se configura el modelo, los datos y los parámetros para su calibración y validación.

Uno modelo hidrológico distribuido de estas características acoplado a un sistema de información geográfica, es un instrumento útil para realizar la cuenta física de agua de una cuenca, y permite disponer de información actualizada de los recursos disponibles en la cuenca, así como de su distribución espacial a lo largo de la misma. Permite de igual manera, formular diferentes escenarios de planificación del recurso, a mediano y largo plazo.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Andreu, J., 1993. Conceptos y métodos para la planificación hidrológica. Universidad Politécnica de Valencia.
- Budyko, M.I., 1948. Evaporation under natural conditions, Gidrometeorizdat, Leningrad, English translation by IPST, Jerusalem.
- Blandón, L.A., 2001. Cuentas físicas de agua. Estudio de caso: Quebrada Piedras Blancas. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional Sede Medellín.
- Blandón, L.A. y otros, 2003. Cuentas ambientales para las cuencas de Turbo, Carepa, Apartado y Chigorodó. Universidad Nacional Sede Medellín, CorpoUrabá.
- Coutagne, A., 1954. Quelques considérations sur le pouvoir évaporant de l'atmosphère, le déficit d'écoulement effectif et le déficit d'écoulement maximum. La Houille Blanche: 360-374.
- Edijatno et C. Michel., 1989. Un modèle pluie-débit à trois paramètres. La Houille Blanche 2: 113-121.
- Mesa, O. J., Poveda, G., Carvajal, L.F. y Salazar, J.E., 1994. Efecto del fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur en la hidrología Colombiana, Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología, Vol. 3, IAHR, Santiago de Chile, 373-384.
- Mesa O. J., Poveda G., Vélez J. I., Barco O. J., Cuartas L. A., Mantilla R. I., Hoyos C. D., Mejía J. F., Botero B. A., y Montoya M. I., 2000. Estimación de la Evaporación en Colombia. En: Avances en Recursos Hidráulicos (ISSN 0121-5701).. N° 7. 2000. pp 43-51.
- Poveda G., Vélez J. I., Mesa O., Hoyos C. D., Salazar L. F., Mejía J. F., Barco, O. J., Correa, P. L., 2002. Influencia de Fenómenos Macroclimáticos Sobre el Ciclo Anual de la Hidrología Colombiana: Cuantificación Lineal, No Lineal y Percentiles Probabilísticos. En: Meteorología Colombiana, Nro 6 Octubre 2002, pp121-130. Bogotá D.C. Colombia, ISSN-0124-6984.
- Quintero F., 2004. Evaluación de la cuenta física de agua mediante un modelo hidrológico distribuido.

- Trabajo de Grado. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.
- Recalde, R., 1993. Environmental management: an economic proposal for Uruguay. En: Mohan Munashinghe, ed.: Environmental economics and natural resource.
- Salazar L. J. Vélez, F. Quintero, L. Blandón., 2003. Implementación de un modelo para las cuentas ambientales del agua. Encuentro de Investigación sobre Tecnologías de Información Aplicadas a la Solución de Problemas EITI.
- Sejenovich, H., y otros., 1991. Las Cuentas del Patrimonio Natural de un Ecosistema Andino-Patagónico de la Provincia de Rio Negro, Argentina. En Inventarios y Cuentas del Patrimonio Natural en América Latina y el Caribe. Santiago, Chile: United Nations Economic Commission for Latin America and the Caribbean.
- Singh, V.P., 1995. Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications. Colorado, USA.
- Schreiber, P., 1904. U ber die Beziehungen zwischen dem Niederschlag und der Wasserfu"hrung der Flu"Ùe in Mitteleuropa. Z. Meteorol. 21 (10), 441-452.
- Thornthwaite, C. W. y J. R. Mather., 1955. The water balance. Publ. Climatol. Lab. Drexel. Inst. Technol. 8(1): 1-104.
- Turc, L., 1956. Calcul du bilan d'eau. Evaluation en fonction des précipitations et des températures. Assemblée générale de l'Association Internationale d'Hydrologie. Rome, Publication N° 38 de l'Association Internationale d'Hydrologie: 189 - 202.
- Vélez J.I., Poveda G. y O. Mesa, 2000. Balances Hidrológicos de Colombia, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, Diciembre, 150 pp.
- Vélez J.I., 2001. Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la simulación de las crecidas. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia , España.
- Vélez J. I., Poveda G., Mesa O., Agudelo P. A., Arias P. A., Cardona Y. M., Moreno H. A. y L. F., Salazar., 2002. Balance hidrológico de largo plazo en el departamento de Antioquia, Colombia. Memorias XV Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, Medellín 29 - 31 de agosto.

