Sistema de Información Geográfica para Apoyar la Gestión del Recurso Hídrico en Cuencas Rurales

Recibido para evaluación: 25 de Septiembre de 2002
Aceptación: 22 de Noviembre de 2002
Recibido versión final: 4 de Diciembre de 2002

Paula Lizet Correa V. [1.]
Jaime Ignacio Vélez U.[2.]

RESUMEN

Se presenta la implementación de un Sistema de Información Geográfica para apoyar la gestión del recurso hídrico a nivel de cuenca, utilizando como base el Software HidroSIG Java desarrollado en el Atlas Hidrológico de Colombia. En la formulación del sistema se incluye la información requerida por las entidades encargadas de manejar los recursos hídricos, ofreciendo la posibilidad de visualizar, consultar y evaluar diferentes escenarios que ayudan a tomar decisiones en cuanto a la asignación y uso del recurso. Se seleccionó para una primera aplicación del sistema, una cuenca de 35 km² localizada en el Altiplano de Rionegro. La metodología aplicada se desarrolló en varias etapas: recopilación de información; procesamiento de la topografía de la cuenca; estudio de la dinámica del clima en la zona; evaluación de la oferta de agua; evaluación de la demanda y balance hídrico. Los resultados obtenidos muestran la importancia de tener la información continua espacialmente y articulada en un SIG que permita la actualización permanente de la información. De esta manera el sistema implementado constituye una valiosa herramienta para la planificación y la gestión del recurso hídrico dentro de una cuenca hidrográfica.

PALABRAS CLAVE: HidroSIG Java, Clima, Oferta de Agua, Demanda, Balance Hídrico, SIG, Planificación y Gestión del Recurso Hídrico

ABTRACT

The implementation of a GIS support system for the management of water resources at a catchment scale is presented. This system is based upon the HidroSIG Java software, which was developed within the Atlas Hidrológico de Colombia project. In the GIS database was included all the information required by the environmental authorities in charge of the water resources management, offering the possibility of displaying, consulting and evaluating different scenarios that could help to make decisions upon the assignation and use of the resource. As a first application of the GIS, a 35-km² river basin located in Rionegro Plateau was used. The applied methodology was developed in the following stages: gathering of the available information, processing of the digital topography, study of the dynamics of the climate in the zone, evaluation of the water availability, and evaluation of the demand and water balance. The results obtained show the importance of having continuous and articulated spatial information in a GIS, so permanent update of the information is allowed. It is concluded that the implemented GIS constitutes a valuable tool for planning and management of the hydric resource within a hydrographic river basin.

KEY WORDS: HidroSIG Java, Climate, Water Availability, Demand, Water Balance, GIS, Planning and Management of Water Resource

1. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos
Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín
2. Profesor Asistente
Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos
Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín
paulalizet@yahoo.com

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen desequilibrios entre la oferta y la demanda del recurso agua y/o entre sus diversos usos, generados por el aumento de la población. Esto hace necesario mejorar nuestro conocimiento acerca del ciclo del agua; además de construir sistemas que permitan un manejo adecuado de las variables implicadas, el cual posibilite evaluar los recursos hídricos en las cuencas hidrográficas y ayude en la toma de decisiones y en la gestión de los mismos.

En este estudio se presenta la aplicación de una metodología orientada a la planificación y la gestión del recurso hídrico en cuencas rurales, en la cual se articulan los elementos necesarios para la evaluación del recurso hídrico en torno a un Sistema de Información Geográfica que ofrece la posibilidad de visualizar, consultar y evaluar diferentes escenarios que ayudan a tomar decisiones en cuanto a la asignación del recurso hídrico; además, contribuye de manera significativa en el manejo y la planificación de cuencas, orientada en este caso especial a la administración del agua. En la literatura los temas de planificación y manejo de cuencas hidrográficas han sido ampliamente tratados, enfocados al control de procesos erosivos. En Botero (1994), Rodríguez (1999), Zuluaga (2002) se describen algunas metodologías propuestas en este contexto.

Para la aplicación preliminar de la metodología se seleccionó la cuenca de la quebrada Chachafruto, localizada en parte centro-oriental del valle de San Nicolás, en la zona sur del departamento de Antioquia como se muestra en la Figura 1. La implementación del sistema se realizó empleando como base el software desarrollado en el Atlas Hidrológico de Colombia "HidroSIG Java", en el cual se puede desplegar la información gráfica y alfanumérica disponible para la cuenca

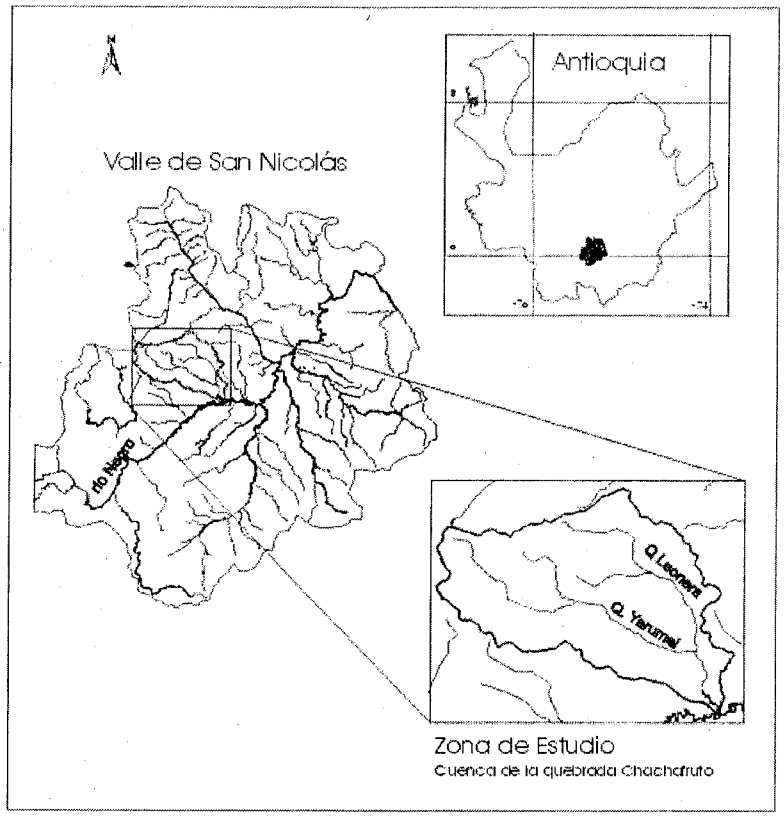


Figura 1. Localización de la zona de estudio. Cuenca de la quebrada Chachafruto.

2. INFORMACIÓN

Se contó con información cartográfica de curvas de nivel, red de drenaje, usos del suelo, tipo de suelo y perfiles de meteorización a escala 1:10 000. El plan de Ordenamiento Territorial del municipio de Rionegro y la información de las concesiones otorgadas en el municipio. Esta información fue suministrada por la Corporación Autónoma Regional Rionegro-Nare (CORNARE).

Además se contó con puntual de precipitación, caudal y temperatura suministrada por CORNARE y el proyecto Atlas Hidrológico de Colombia.

3. METODOLOGÍA APLICADA Y RESULTADOS

La implementación del sistema se desarrolló en las siguientes etapas:

3.1. Recopilación de información disponible

En esta etapa se trasladó información de los sistemas actuales (Arcviewâ, AutoCADâ) a las bases de datos propias del HidroSIG Java. La información incluyó las variables que describen las características generales de la cuenca, las condiciones del suelo, la geología, la geomorfología, y el uso del suelo, entre otras.

3.2. Procesamiento de la topografía digital

Se implementó la información topográfica para automatizar mediante el procesamiento del Modelo Digital de Terreno (MDT) el proceso de delineación de cauces y cuencas y posibilitar la extracción automática de variables morfométricas asociadas al terreno y a la red de drenaje correspondiente.

La topografía fue rasterizada e interpolada en Ilwis 3.0â, el mapa resultante se corrigió para que no presentara zonas planas ni sumideros y la red de drenaje fuera continua usando algoritmos que vienen incorporados en el módulo de procesamiento de MDT's en el HidroSIG Java (Garbrecht y Martz, 1997 y UNAL-UPME-COLCIENCIAS, 2000). Posteriormente se utilizaron los algoritmos de extracción de direcciones de drenaje y se obtuvieron mapas de variables geomorfológicas inherentes a la red de drenaje y a la topografía resultante, como, pendientes máximas del terreno; áreas de drenaje acumuladas; longitud canales; entre otros. A partir de estos mapas se calcularon las variables morfométricas en distintos punto de la cuenca.

3.3. Estudio de las condiciones climáticas de la zona

Con el objetivo de caracterizar la variabilidad espacial del clima y evaluar la disponibilidad de agua atmosférica en la cuenca, se elaboraron mapas de temperatura, precipitación, evapotranspiración.

La temperatura, anual se estimó de acuerdo con el método de regionalización propuesto por CENICAFE, (Chaves, 1996) para la región Andina de Colombia, en la cual se asume una relación lineal entre la temperatura y la altura sobre el nivel del mar.

Para obtener la precipitación en la cuenca, se empleó la técnica de interpolación del Vecino Natural, usando las rutinas del software Golden Surferâ.

Los campos de evapotranspiración real y potencial anual se estimaron por diferentes metodologías, utilizando la ecuación de Cenicafé; la ecuación de Turc; la ecuación de Coutagne; El método del factor regional; la ecuación de Thornwaite y la ecuación de Budyko (*UNAL- Convenio Interinstitucional Cátedra del Agua,* 2002; Vélez et al, 2000). En la Figura 2 se ilustran los campos de precipitación y el de evapotranspiración real obtenidos para la cuenca, empleando el método del vecino natural y la ecuación de Cenicafé y Budyko. La línea continua representa la divisoria de aguas de la cuenca.

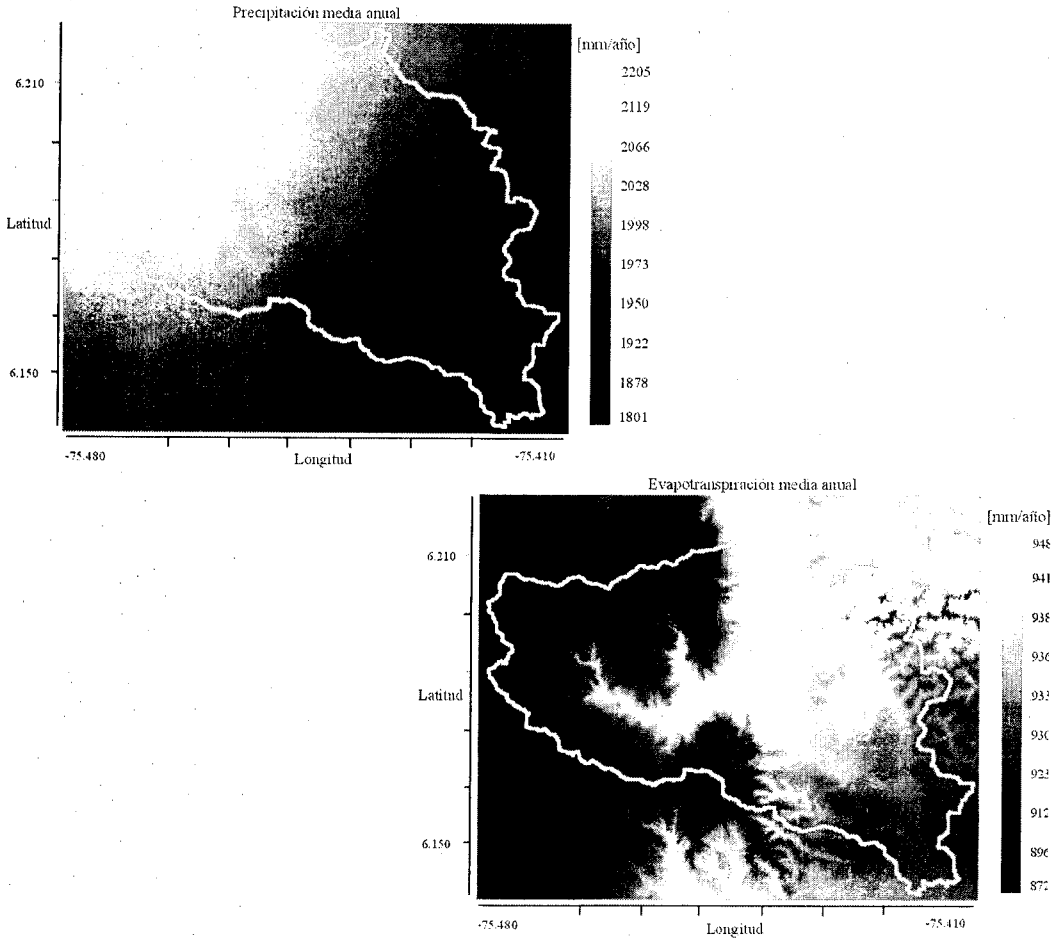


Figura 2.
Mapa de precipitación y evapotranspiración media anual obtenidos para la cuenca de la quebrada Chachafruto.

En general, los métodos de evapotranspiración evaluados presentan tendencias muy similares, en cuanto a su distribución espacial dentro de la cuenca, todos ellos dan cuenta de las condiciones topográficas, esto, porque los métodos dependen de la temperatura media anual y mensual, y está a su vez, de la altura sobre el nivel del mar, excepto, en el método del factor regional, donde se incluye la radiación neta y su variación espacial está condicionada por la precipitación.

3.4. Evaluación de la oferta natural de agua

Para evaluar la oferta natural de agua en la cuenca y estudiar su variabilidad espacio- temporal se implementaron mapas de caudales medios, mínimos y máximos para diferentes periodos de retorno. Adicionalmente se elaboraron curvas de duración y de distribución mensual de caudales en algunos puntos de la cuenca en los cuales se está captando agua con el fin de evaluar la probabilidad de ocurrencia del caudal concedido y determinar los períodos en los que se presenta déficit.

Para estimar los caudales medios anuales en la cuenca, se empleó el método del balance hidrológico de largo plazo, en el cual se considera que los cambios en las cantidades almacenadas de agua en el suelo son despreciables en comparación con la magnitud de los flujos totales debidos a la precipitación, la evaporación y el caudal superficial o escorrentía. Comparando los caudales estimados con el balance con los datos de caudal registrados en las dos estaciones que existen en la cuenca, se obtienen errores pequeños que varían entre 0 y 27%. En general el método de los balances hídricos es una buena herramienta para conocer estimaciones de caudal a largo plazo, principalmente en las cuencas donde se tiene poca o ninguna información de esta variable.

Los caudales mínimos y máximos se obtuvieron empleando la metodología de regionalización de características medias propuesta por la Universidad Nacional (UNAL-UPME-COLCIENCIAS, 2000), en el cual la media y la desviación estándar del caudal mínimo y máximo dependen únicamente de parámetros morfométricos representados por el área y parámetros climáticos representados por la precipitación y la evaporación media sobre la cuenca. Con la media y la desviación estándar se estimó el caudal para diferentes períodos de retorno, a partir de la siguiente ecuación, Chow (1994)

(1) $$Q_{Tr} = \hat{\mu} + k\hat{\sigma}$$

En la cual, Q_{Tr} es el caudal para un período de retorno T_r, $\hat{\mu}$ y $\hat{\sigma}$ son la media y la desviación estándar muestral de la variable analizada respectivamente, y k es un factor de frecuencia que depende de la función de distribución que se elija y del período de retorno. En este trabajo se utilizaron las distribuciones Gumbel y LogNormal de dos parámetros para la determinación del factor de frecuencia k .

Los mapas de las características medias (media y desviación estándar) del caudal mínimo y máximo se construyeron utilizando el mapa de precipitación obtenido con la técnica de interpolación del Vecino Natural y el de evaporación real obtenido con la ecuación de Budyko y la ecuación de Cenicafé.

Para reproducir las series de caudal en los puntos donde se capta agua se utilizó el modelo denominado Simulación Hidrológica Distribuida y Abierta (SHIA) desarrollado por Vélez (2001), el cual representa por medio de un sistema de tanques interconectados entre sí los procesos determinantes de la producción de la escorrentía (interceptación; detención; infiltración; evaporación y evapotranspiración; recarga del acuífero; y escorrentía superficial y subsuperficial; retorno del flujo base y flujo en los canales de la red de drenaje).

El modelo SHIA desarrolla un esquema de tanques dispuestos jerárquicamente en cuatro niveles de arriba hacia abajo, así en cada celda se tienen 4 tanques que componen el submodelo de producción de la escorrentía, y el quinto tanque constituye el submodelo de transferencia (Ver Figura 3) .

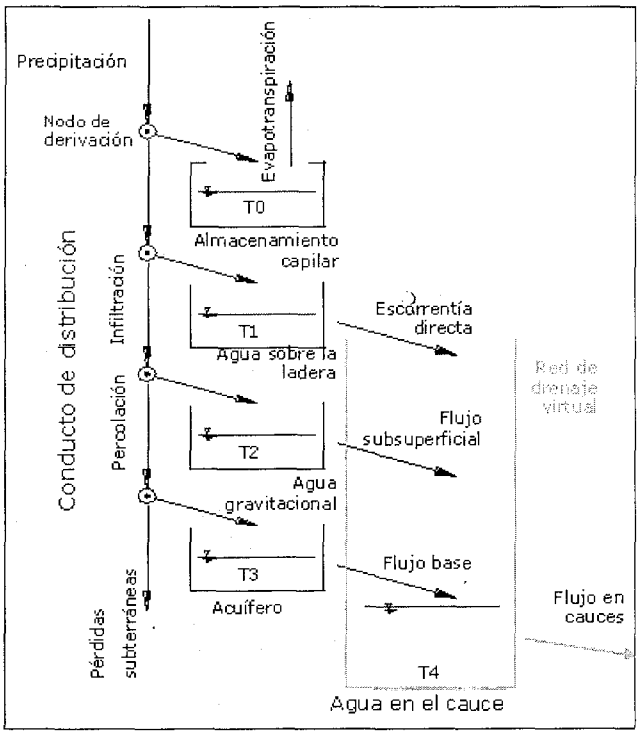


Figura 3.
Representación esquemática del modelo SHIA

En cada intervalo de tiempo, en cada celda se distribuye la precipitación a los distintos almacenamientos, donde en función del volumen almacenado en cada uno de ellos, se determina su contribución a la escorrentía. La función que relaciona el flujo entre los tanques con los volúmenes almacenados en ellos (variables de estado) depende del esquema conceptual adoptado, de las características morfológicas del terreno que representan la celda y de las características hidrológicas del suelo. La escorrentía que se produce en cada nivel pasa a las celdas aguas abajo en la dirección de la pendiente o si es el caso a la red de drenaje superficial. En el tanque que representa los cauces se integran las distintas componentes de la escorrentía con el flujo procedente de los cauces en las celdas aguas arriba. El modelo realiza el balance de agua en cada tanque y actualiza el volumen almacenado en cada uno de ellos. El mismo proceso se repite en cada una de las celdas de aguas abajo, hasta cubrir toda la cuenca. Luego se repite toda la operación para otro intervalo de tiempo. (Vélez, 2001)

Para la calibración del modelo en la cuenca se le prestó mayor importancia al ajuste de las curvaturas de los hidrogramas. La similitud entre la rama descendente de los hidrogramas simulados con la curvatura de los observados, indica que las distintas componentes de la escorrentía consideradas en la simulación son coherentes con la realidad, y además que las relaciones funcionales asumidas para cada una de estas componentes son acertadas para su representación. En la Figura 4 se ilustran los resultados obtenidos en la calibración para una de las estaciones de la cuenca.

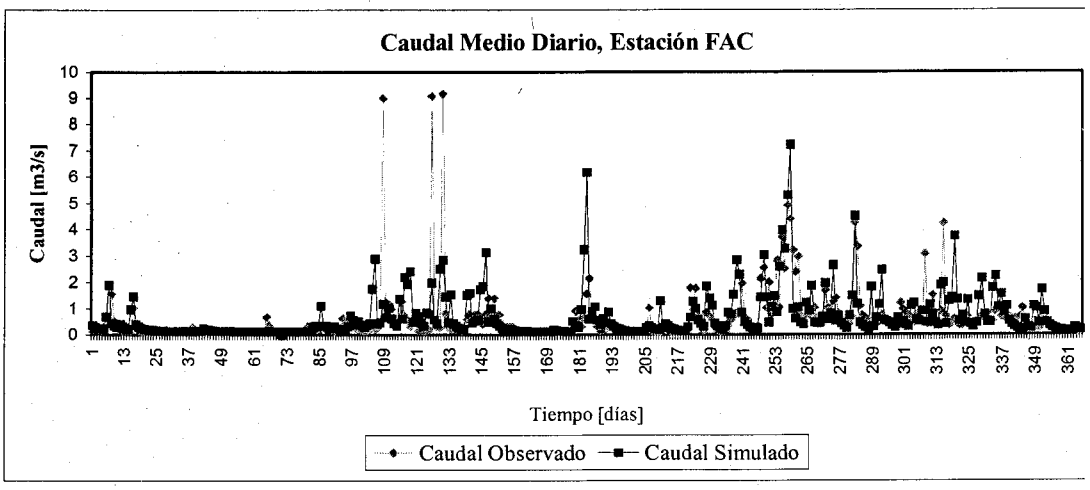
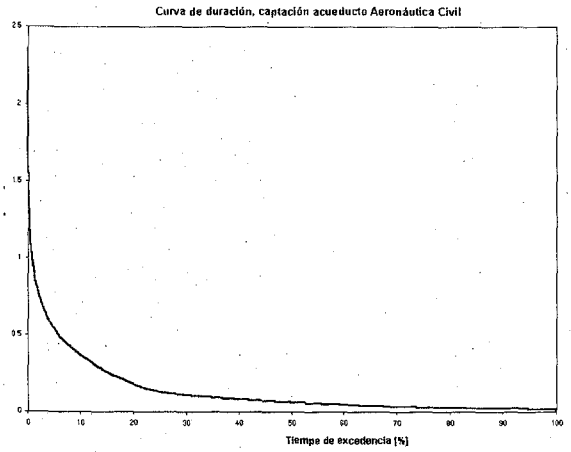


Figura 4. Resultados obtenidos para la calibración del modelo en la estación FAC.

En la estación FAC se presentan diferencias importantes entre los 100 y 130 días correspondientes al mes de abril, en los cuales la serie observada presenta valores muy altos. Sin embargo, en general se encuentran rasgos muy similares en ambas series, los ajustes en las curvas de recesión son bastante buenos, la coincidencia en los tiempos de caudales pico en la mayoría de los casos es aceptable. Esto indica que el modelo bajo estas consideraciones presenta coherencia temporal.

A partir de las series simuladas se construyó la curva de duración de caudales y de distribución mensual de caudales en los puntos de captación de agua. En la Figura 5 se presentan estas curvas obtenidas para la captación de un acueducto dentro de la cuenca.



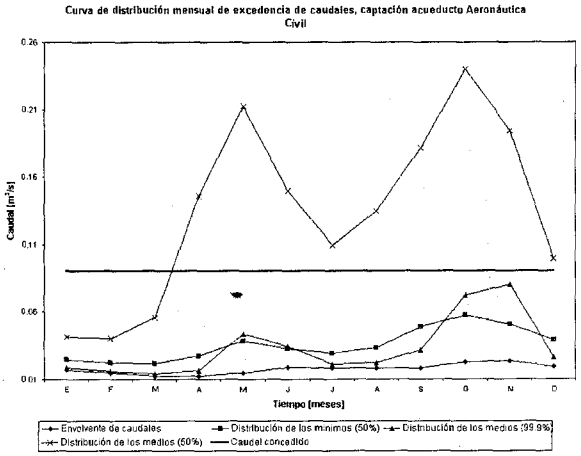


Figura 5.
Curva de duración de caudales y curva de distribución de caudales mensuales para la captación del acueducto Aeronáutica Civil, cuenca de la quebrada Chachafruto.

Analizando la curva de duración construida en la captación para el acueducto Aeronáutica Civil el caudal es excedido el 35.9 % del tiempo. En la captación la mayor parte del tiempo la fuente no tiene el caudal suficiente para atender la solicitud de agua. Esto quiere decir que se está otorgando más agua de la disponible realmente. En la curva de distribución de caudales mensuales se tiene que en la captación existe un alto riesgo de déficit de agua en todos los meses porque se presentan caudales menores que el caudal concedido por la corporación para la captación. Mas aún, en condiciones normales (caudales medios) se tiene un 50 % de probabilidad de no tener agua suficiente para abastecer las demandas de las captaciones en los meses de enero, febrero y marzo. Lo anterior muestra que el caudal concedido es mayor que el caudal disponible.

3.5. Evaluación de la demanda en la cuenca

Para evaluar la demanda de agua, se identificaron las concesiones de agua otorgadas en la cuenca, los sitios de retornos y vertimientos domésticos e industriales, a partir de los cuales se elaboró una base de datos con información alfanumérica y gráfica, la cual incluye fotografías de la captación; una tabla resumen con los valores en ese punto de las variables ingresadas en el sistema; la curva de duración y la curva de distribución de caudales mensuales. En la Figura 6 se presenta un ejemplo de la información incorporada y la forma como HidroSIG Java permite visualizarla.

La información de las concesiones concedidas se integró con la información de la demanda de agua según el uso del suelo. La demanda actual del recurso se calculó asignando una dotación de agua para cada uso del suelo. En este mapa se incluyó la información de las concesiones de agua otorgadas por la corporación, buscando ser coherentes con la información, se revisaron en el mapa de demanda de agua las zonas en las cuales las mercedes de agua cubren la demanda y se reemplazó la demanda en estos sectores por la concesión otorgada. En el análisis realizado además se consideraron los vertimientos y retornos de agua a la red de drenaje. Como en la cuenca no se tiene información al respecto, se consideró el caudal retornado como un porcentaje del caudal concedido o captado, se estableció como porcentaje de retorno el 80% en los puntos donde la descarga se realiza directamente sobre la fuente y 60% para los puntos o zonas donde el retorno se realiza en forma indirecta y se presentan pérdidas por infiltración.

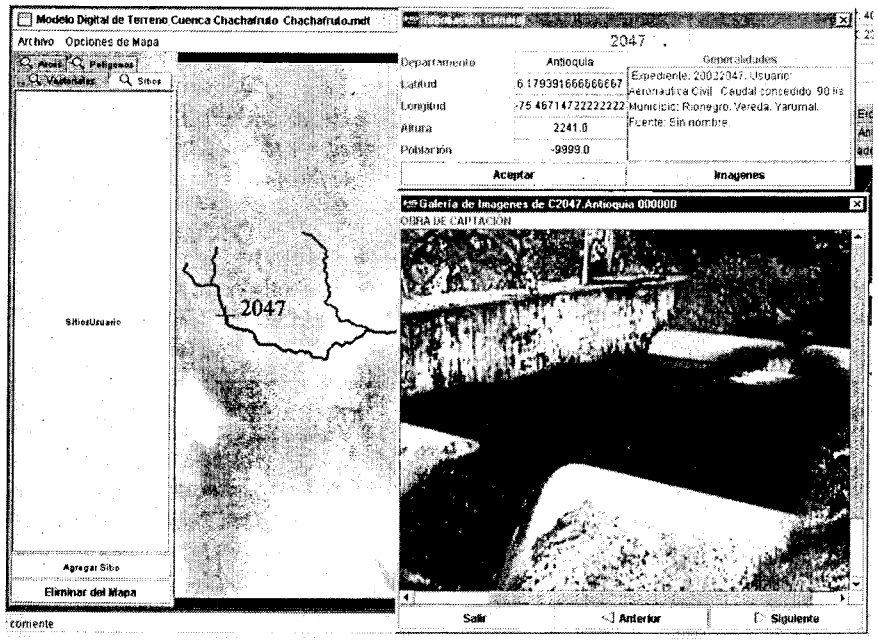


Figura 6. Ubicación del punto de captación 20022047 y visualización de la estructura de captación, mediante HidroSIG Java en el MDT de la cuenca.

La información de oferta, demanda y retornos de agua implementada en el sistema se agregó utilizando la matriz de direcciones siguiendo la trayectoria que la variable sigue por la red de drenaje y acumulando en su trayectoria los valores aguas arriba de la celda en la que esté. Así, el valor en cada punto de la matriz agregada es la suma de los valores de las celdas que hacen parte de la cuenca formada por ese punto.

3.6. Balance Hídrico

Con los mapas construidos y mediante operaciones sencillas se infirió la disponibilidad real de agua en la cuenca y se identificaron zonas de déficit y superávit para diferentes probabilidades de ocurrencia. En la Figura 7 se presenta un esquema general de las operaciones realizadas entre los mapas para la evaluación de zonas con posibles déficit de agua.

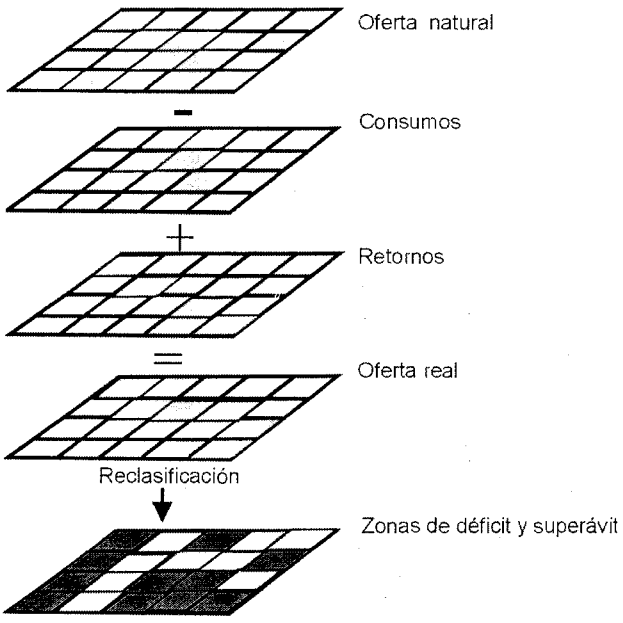


Figura 6. Esquema del Balance Hídrico, a partir de capas de información.

El análisis de oferta y demanda se realizó jerarquizando las demandas de acuerdo a su prioridad, estableciendo la demanda por consumo humano o doméstico como la más importante, seguida en su orden, por la demanda pecuaria, agrícola e industrial. Restando al mapa de oferta disponible, la demanda para un uso determinado y sumando los retornos respectivos, se obtiene el mapa con la oferta disponible para el otro uso de jerarquía inferior.

Los balances hídricos se realizaron con el caudal medio, mínimo medio y mínimo para períodos de retorno de 2.33, 5, 10 y 25 años. En la Figura 8 se presentan los mapas empleados en uno de los balances realizados y el resultado obtenido.

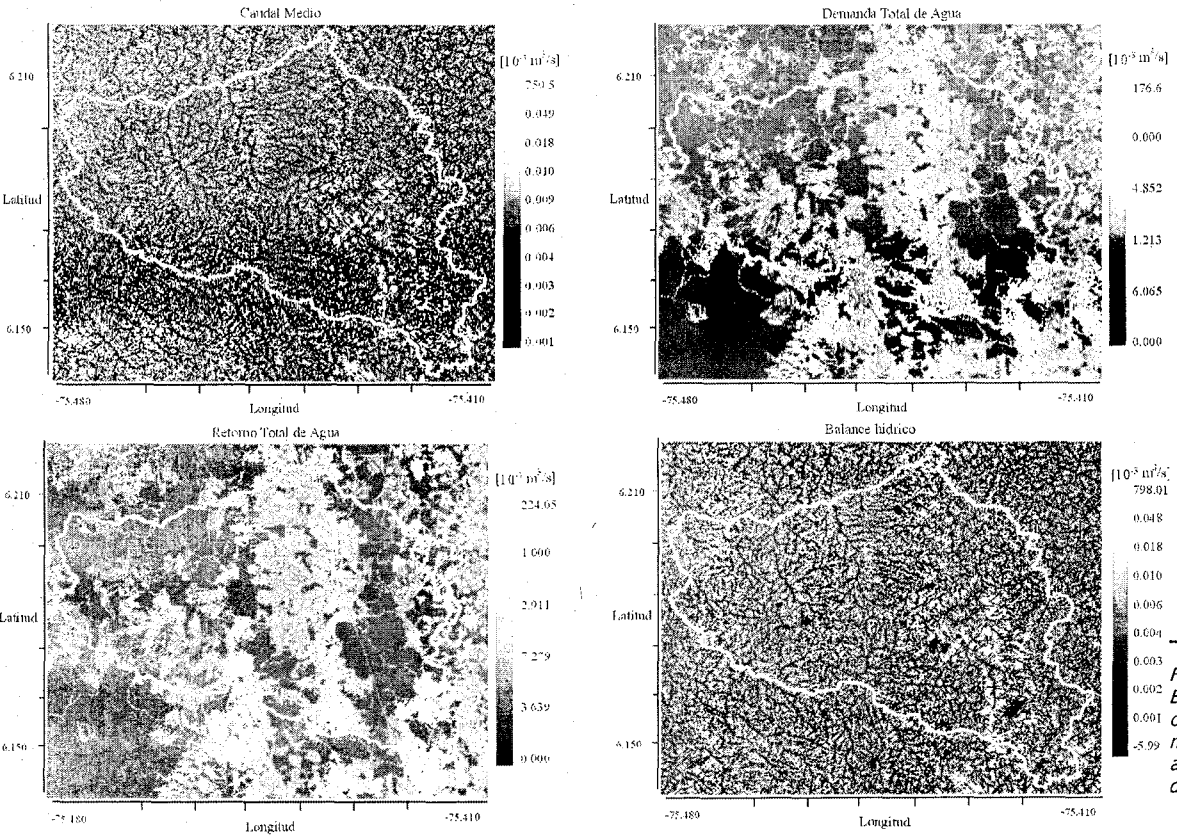


Figura 8.
Balance hídrico realizado en la cuenca, usando el mapa de caudal mínimo medio, demanda total de agua en la cuenca y un porcentaje de retorno.

Según los resultados obtenidos en los balances realizados para cada uso con los diferentes caudales, la cuenca no tiene una disponibilidad real suficiente para atender la demanda total. En general, las zonas de déficit se presentan en áreas con construcciones rurales en las cuales el agua se destina para atender la demanda de pequeñas industrias (gasolineras, restaurantes, fincas de recreo), las cuales requieren una dotación muy alta para suplir sus necesidades. Este déficit puede ser controlado atendiendo estas demandas con acueductos veredales o municipales que capten sus aguas donde la cuenca se encuentra en superávit.

4. CONCLUSIONES

La metodología aplicada en este trabajo constituye una valiosa herramienta para la planificación y la gestión del recurso hídrico dentro del territorio de una cuenca hidrográfica, en la cual se articulan los elementos necesarios para la evaluación del recurso hídrico en torno a un Sistema de Información Geográfica que ofrece la posibilidad de visualizar, consultar y evaluar diferentes escenarios que ayudan a tomar decisiones adecuadas y oportunas en cuanto a la asignación del recurso hídrico.

Este sistema trata de aprovechar las funcionalidades que un Sistema de Información Geográfica puede ofrecer, demostrando que se trata de un instrumento de gran utilidad para desarrollar una gestión eficaz. Un SIG permite no sólo estudiar los datos disponibles sino también, mejorar considerablemente la visualización e interpretación de los mismos así como la presentación de resultados. Posibilita además, el empleo simultáneo de información. Lo más importante es que permite la simulación de diversos escenarios y el análisis de otras variables como erosión y producción de sedimentos en la cuenca, utilizando la calculadora de mapas y con información implementada.

La mayor fortaleza de este sistema es la continuidad espacial que se le da a la información. En el ejercicio de la planificación tener la información distribuida en toda la cuenca es de gran utilidad para realizar análisis en cualquier punto de la cuenca.

En términos de gestión de los recursos hídricos, es de gran importancia entender y conocer el ciclo hidrológico como un sistema en el cual intervienen procesos de precipitación, evaporación, escorrentía, entre otros. Para la gestión se está mejorando el conocimiento de estos elementos apoyándose en la actualización continua de la información.

La base de datos debe ser lo mas completa posible y tener una actualización permanentemente. Es necesario que este sistema sea abierto a todos los usuarios, y es importante que la persona encargada de su manejo sea la misma que realice las visitas de campo, porque él es quien tiene la mayor información y puede retroalimentar el sistema.

Para la gestión efectiva es importante que cada vez que haya una incidencia administrativa en torno a una captación se actualice la información; además, que cada vez que un funcionario visite la captación y el vertimiento obtenga información que permita actualizar el sistema, incluyendo esquemas gráficos y material fotográfico.

6. BIBLIOGRAFÍA

Botero, E. A., 1994. Planificación de Cuencas Usando Análisis Multiobjetivo y Sistemas de Información Geográfico, Trabajo Dirigido de Grado, Posgrado en Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Chaves, B., A. Jaramillo, 1996. Regionalización de la distribución del brillo solar en Colombia por métodos de conglomeración estadística. Atmósfera 25.

Chow, V. T., D.R. Maidment y L.W. Mays. 1994. Hidrología Aplicada. Mc Graw Hill.

Garbrecht., J., Martz., L. W., 1997. The Assignment of Drainage Direction over Flat Surfaces in Raster Digital Elevation Models. Journal of Hydrology, 193, 204-213.

UNAL-UPME-COLCIENCIAS, 2000. Atlas Hidrológico de Colombia, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Facultad de Minas, Sede Medellín.

UNAL- Convenio Interinstitucional Cátedra del Agua, 2001. Balances Hidrológicos y Atlas Digital de Antioquia, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Facultad de Minas, Sede Medellín.

Rodríguez, G., E., 1999. Procesos Geomórficos y Cambio Ambiental, Trabajo Dirigido de Grado, Posgrado en Gestión Ambiental, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Vélez, J. I., G. Poveda y O. Mesa, 2000. Balances Hidrológicos de Colombia, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Primera Edición.

Vélez, J. I., 2001 .Desarrollo de un Modelo Hidrológico Conceptual y Distribuido Orientado a la Simulacion de Crecidas.Tesis Doctoral, Universidad Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.

Zuluaga, D., L., 2002. Análisis Morfodinámico de Cuencas Fuertemente Antropizadas Aplicación a las Cuencas de las Quebradas Las Brujas y la Ahuyamera del Municipio de Envigado, Trabajo Dirigido de Grado, Ingeniería Civil, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.