

Aproximación de la recarga de agua subterránea en el norte del Departamento del Cauca, Colombia¹

Estimating groundwater recharge in the geographical valley of the Cauca River, north of the Cauca Department

Ing. Cristo Facundo Pérez, M.Sc. Andrés Echeverri-Sánchez, PhD. Norberto Urrutia-Cobo

Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Escuela EIDENAR-Grupo de Investigación REGAR, Cali, Colombia.

RESUMEN. Las aguas subterráneas representan una importante alternativa para el desarrollo de actividades socioeconómicas en regiones donde la oferta de agua superficial no satisface las necesidades o su calidad es deficiente. Sin embargo, su aprovechamiento debe estar en función del conocimiento de su oferta. El norte de Departamento del Cauca es una zona con un importante desarrollo agrícola e industrial, donde se viene presentando extracciones de aguas subterráneas sin conocimiento del volumen ofertado. El objetivo del presente estudio fue estimar la recarga del acuífero como herramienta para su gestión en las actividades desarrolladas en la región. En este sentido, la recarga anual del acuífero fue estimada mediante balance hídrico, partiendo de la definición de un volumen de control delimitado con la hidrogeología del acuífero, e identificando los componentes de recarga (precipitación, agua de riego, y caudal superficial de entrada) y descarga (Evapotranspiración real, caudal de extracción por bombeo, y caudal superficial de salida). El volumen de recarga anual calculado fue de $56 \times 10^6 \text{ m}^3$, indicando la disponibilidad del recurso hídrico subterráneo para potencializar las actividades socioeconómicas en la zona, bajo una planeación óptima del recurso.

Palabras clave: balance hídrico, gestión de las aguas subterráneas, Valle Geográfico río Cauca.

ABSTRACT. Groundwater represents an important alternative toward development of socioeconomic activities in regions where freshwater either does not meet the needs or quality is poor. Nonetheless, its use must be based on its availability. Northern Cauca Department is a flat area with continue agricultural and industrial growth, especially due to groundwater development, which withdrawal is being without any knowledge of the volume offered by the local aquifer. This study aimed to estimate the groundwater recharge as a management and planning tool in both productive activities and human supply. Therefore, the annual aquifer recharge was estimated by water balance. Firstly, a control volume was defined through delineating the hydrogeological boundaries. Then, recharge (rainfall, irrigation water, and surface inflow) and discharge (real evapotranspiration, pumped water, and surface outflow) components were quantified. In conclusion, the annual recharge was about $56 \times 10^6 \text{ m}^3$, showing the availability of groundwater resources in order to potentiate socioeconomic activities in the region.

Keywords: Geographical Valley of Cauca River, groundwater management, water balance

INTRODUCCIÓN

Un acuífero se define como aquella formación geológica ubicada debajo de la superficie del suelo, capaz de almacenar suficiente agua y transmitirla a una velocidad tal, que pudiera ser aprovechada (Kasenow, 2001). Por este motivo, las aguas subterráneas han sido tradicionalmente consideradas como fuentes hídricas para propósitos domésticos, industriales o agrícolas. Su calidad, generalmente buena, y su accesibilidad en muchas regiones del mundo, donde el agua superficial es escasa o extremadamente costosa para usarse, han sido los principales

factores para estimular el aprovechamiento de esta relativamente económica y confiable fuente hídrica (Karamouz *et al.*, 2011). En su estado natural, sin ningún tipo de intervención, un estado de cuasi-equilibrio se mantiene con flujos de entrada igual a los flujos de salida en el acuífero. Parte de la recarga puede ser interceptada por el bombeo, reduciendo de este modo el flujo de salida y estableciendo un nuevo cuasi-equilibrio (Bear & Cheng, 2010). Sin embargo, en algunas regiones, especialmente donde la lluvia es escasa y los suelos son útiles para desarrollar acti-

¹ Contiene apartes de los informes elaborados por el Grupo REGAR en el marco de los Convenios Interadministrativo 0330-2013, 0233-2015 celebrado entre CRC/UNIVALLE

vidades socioeconómicas, el aprovechamiento de los acuíferos puede ser tan intensivo que -sobre todo el sector privado- supera las capacidades de control ejercidas por la autoridad reguladora del agua, al mismo tiempo que lleva al acuífero a un estado de sobreexplotación (Custodio, 2002).

La sobreexplotación a menudo se manifiesta en el descenso del nivel freático, deterioro de la calidad del agua, encarecimiento del agua extraída, o daños ecológicos (Bear & Cheng, 2010; Custodio, 2002). No obstante, estos efectos no necesariamente están relacionados con el hecho de que la extracción sea mayor que la recarga, sino simplemente pueden ser el resultado de interferencias transitorias en el balance de agua, cuya duración dependerá de las características del acuífero (tamaño, permeabilidad y coeficiente de almacenamiento). Por tanto, se necesitan observaciones de control, buen conocimiento del acuífero y cálculos o modelación del comportamiento, y todo ello en el marco de un conjunto de objetivos y políticas establecidas por una institución de gestión, con la implicación de aquellos que tienen un interés en el desarrollo del agua subterránea (Custodio, 2002).

En este sentido, el balance hídrico general y de aguas subterráneas es una herramienta útil; luego que permite situar el orden de magnitud e importancia relativa de los diferentes términos de entrada y salida, además de obligar a un análisis detallado del sistema o región en estudio, lo cual siempre es provechoso (Custodio G. y Llamas, 1996; He *et al.*, 2008).

Por lo anteriormente expuesto, el objetivo del estudio fue proponer un modelo de balance hídrico regional que permita estimar una aproximación de la recarga anual en el acuífero

aluvial localizado al norte del departamento del Cauca, como herramienta base para su gestión y aprovechamiento.

MÉTODOS

Localización

El área de estudio comprende una extensa zona plana-en donde se identifica el mayor potencial de aprovechamiento de aguas subterráneas del Departamento del Cauca- perteneciente a los municipios de Caloto, Corinto, Guachené, Miranda, Padilla, Puerto Tejada, Santander de Quilichao y Villa Rica (suroeste de Colombia). Este valle aluvial está conformado por la parte baja de las subcuencas de los ríos Palo, Zanjón Oscuro, La Quebrada, Desbaratado, Quinamayó, Sopera, La Tabla, La Teta, Cañaveralejo, y algunas áreas menores que drenan directo al río Cauca (elevaciones entre 950 y 1100 m.s.n.m.).

La zona de estudio se delimitó partiendo de la geomorfología de las subcuencas mencionadas anteriormente. Luego, se definieron los límites hidrogeológicos (contornos) del acuífero, lo cual determinó un área total aproximada de 61 661 hectáreas (616,6 km²). Como límites naturales fueron: norte, el río Desbaratado; este, los depósitos aluvio-coluviales (Q_c) en el piedemonte de la cordillera central; sur, rocas sedimentarias de edad terciaria de la Formación Popayán; y oeste, el río Cauca. Finalmente, se afinó el contorno a través de los relieves geomorfológicos planos de inundación y abanicos recientes (Figura 1).

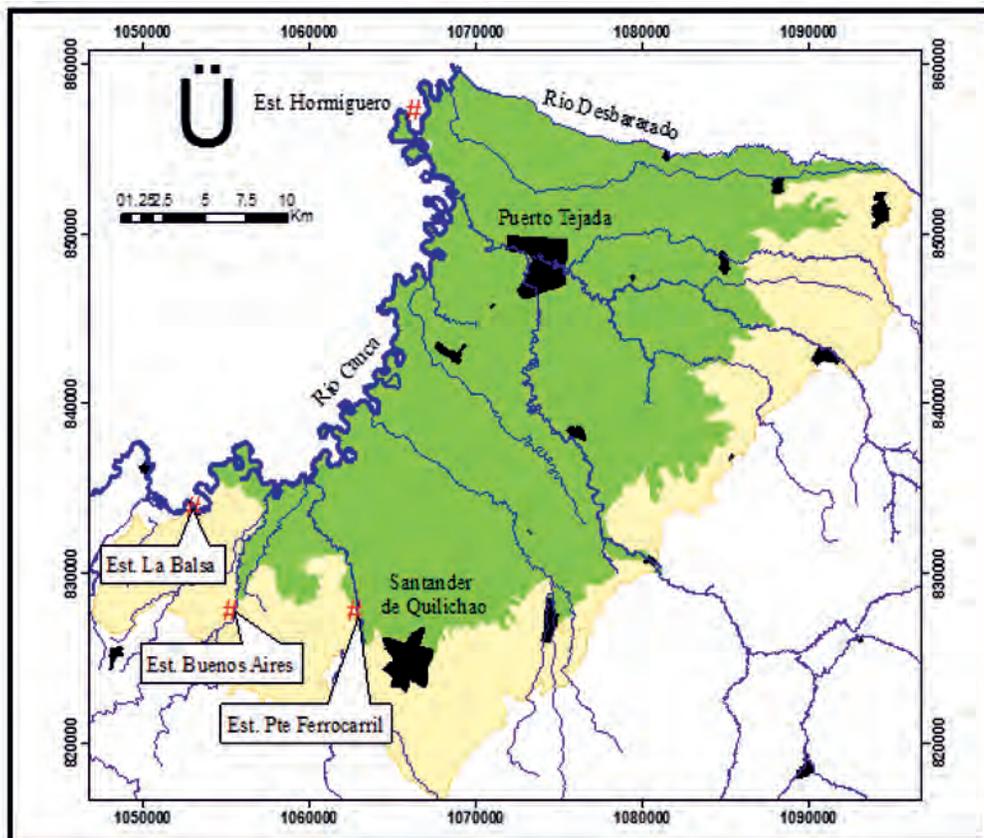


FIGURA 1. Localización zona de estudio (Color verde).

Modelo Regional de Balance Hídrico de Acuífero

Todo el acuífero puede ser considerado como una sola cuenca; y en el largo plazo, todos los usuarios juntos no deben extraer más de lo que se pone a disposición en el balance hídrico, el cual tiene en cuenta todas las entradas y salidas naturales y artificiales (Bear & Cheng, 2010). En este sentido, la ecuación de balance de aguas subterráneas puede ser expresada de una manera simple como se indica en la Ec. 1 (Xu *et al.*, 2010; Mohammadi *et al.*, 2014):

$$(\sum in - \sum out)\Delta t = \Delta s \quad (1)$$

donde: $\sum in$ y $\sum out$ suman los componentes de entradas y salidas que influyen en la dinámica de las aguas subterráneas durante un periodo Δt , respectivamente; y Δs representa la variación en el almacenamiento de agua en el acuífero. Si la Ec. 1 se desarrolla en sus componentes se obtendrían las Ecs. 2 y 3 (Karamouz *et al.*, 2011; Mohammadi *et al.*, 2014; Custodio G. y Llamas, 1996):

$$\sum in = R_{pr} + R_{cn} + R_{Ir} + R_{ta} + Q_{se} + Q_i \quad (2)$$

$$\sum out = ET_o + Q_{ex} + Q_{ss} + Q_o \quad (3)$$

donde: R_{pr} , R_{cn} , R_{Ir} , R_{ta} y Q_{se} se consideran recargas procedente de la precipitación, infiltraciones de canales, del riego agrícola, de tanques o reservorios, del caudal superficial entrante, respectivamente. Por su parte ET_o , Q_{ex} , y Q_{ss} es el agua que deja de ingresar al acuífero debido a la evapotranspiración del agua subterránea, a la extracción de agua subterránea (bombeo), y al caudal superficial saliente, respectivamente. Q_i y Q_o son los caudales subterráneo entrantes y salientes, respectivamente.

En este caso, se propuso un modelo regional de balance hídrico de la zona no saturada del acuífero –representado en la Figura 2-, por lo que se descartaron Q_i y Q_o . Adicionalmente se descartaron R_{cn} , R_{ta} debido a que no se cuentan con registros de las dos variables.

Por otro lado, Δs equivale a la Recarga (R) –compuesta por $Inf-\Delta h$ -. Por lo tanto, R ($m^3 \cdot año^{-1}$ o mm) puede ser cuantificada a través de la Ec. 4, obtenida al sustituir las Ecs. 2 y 3 en la Ec. 1:

$$[R_{pr} + R_{Ir} + Q_{se}] - (ET_o + Q_{ex} + Q_{ss})\Delta t = R \quad (4)$$

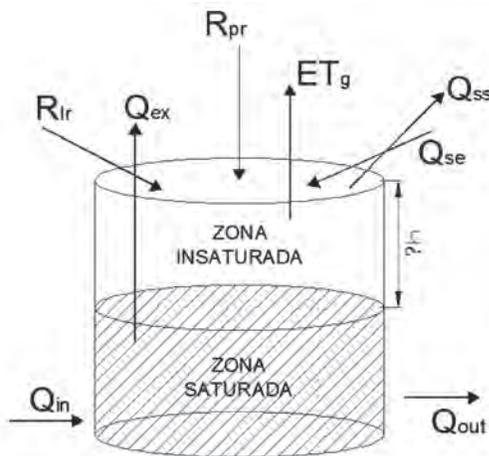


FIGURA 2. Esquema de la dinámica del agua subterránea en la zona de estudio.

Evaluación de parámetros del balance

Precipitación

Para el análisis de la precipitación se conformó una base de datos –con un periodo hidrológico de 31 años (1982-2013)- con registros históricos mensuales de 28 estaciones entre climatológicas, pluviográficas y pluviométricas ubicadas en la zona plana de las subcuencas de interés.

En la base climatológica: (i) se estimaron datos faltantes –vía método de proporción normal, y (ii) con el método de Weibull (Singh, 1987), se calcularon las precipitaciones de excedencia de ocurrencia del 50% (Pr50%) y 75% (Pr75%) en cada estación. Consecutivamente, prosiguió un análisis espacial mensual mediante el interpolador *ordinary kriging*, permitiendo analizar la distribución temporal de ambas precipitaciones (Pr50% y Pr75%). La Pr50% se empleó para estimar la Rpr (Figura 3). La Pr75%, por su lado, para calcular la precipitación efectiva (Pe), empleada en la estimación de las necesidades hídricas de cultivo (NRn).

Evapotranspiración

El agua que retorna hacia la atmósfera a menudo se estima mediante la evapotranspiración de referencia y/o de cultivo. Por lo tanto, el volumen anual de agua que deja de ingresar al acuífero debido a la evapotranspiración se estimó mediante la ET_o. Este parámetro en cada estación hidroclimatológica (12 en total), se obtuvo a partir de afectar los registros mensuales multianuales del tanque evaporímetro clase A con un coeficiente de tanque de 0.75, método FAO (Allen *et al.*, 1998). Luego, la ET_o en la zona de estudio se determinó interpolando-método IDW en el software ArcGis 10.3- la probabilidad de excedencia de 50% de los 12 valores de ET_o.

Por otro lado, se estimaron valores de ET_c con probabilidades de excedencia del 50% para los dos principales grupos de cultivos que reciben riego en la zona de estudio (caña de azúcar y pequeños cultivos). En el caso de la caña, la ET_c se estimó siguiendo la metodología de CENICANA (Torres A *et al.*, 2004). En el caso de pequeños cultivos la ET_o se afectó por un K_c de 1.15, el cual se obtuvo ponderando el K_c (Allen *et al.*, 1998) de los principales cultivos comerciales en la zona, y sus áreas sembradas en cada uno de los siete (7) municipios (Colombia, 2013).

Caudal para Riego Agrícola

El requerimiento total de riego (NRt) está en función de las necesidades hídricas de cultivo (NRn) y las eficiencias de los sistemas de irrigación (conducción, distribución, y aplicación) para un área de riego determinada (NRt= NRn*eficiencias⁻¹). El NRn se calculó siguiendo lineamientos de FAO (Brouwer y Heibloem, 1986), por lo que se precisó la precipitación efectiva (Pe75%), y la ET_c50% y el área de influencia de cada cultivo.

Empleando la cartografía temática digital suministrada por la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC), en el área de estudio se identificaron tres grandes grupos

de cultivos: 60% de Caña de azúcar (31 847,2 ha), 30% en Pastos (16 776,0 ha), y 10% en Otros (5 503,9 ha), este último compuesto de variedad amplia de productos. Para el cálculo de la RNt se utilizó solamente el área de los grupos Caña y Otros, debido a que son los cultivos comúnmente regados en la región. Lo anterior permitió obtener un gráfico mensual de NRt (Figura 4), cuya sumatoria permitió determinar el aporte anual de la Rir.

Caudal de Demanda Actual

La CRC suministró expedientes de la mayoría de los pozos activos en la región (Tabla 1), información que sirvió por un lado para discriminar el uso del recurso en el norte del Cauca, identificar la capacidad instalada y los caudales aprovechados por cada sector socioeconómico; y por otro lado, el caudal de demanda actual de sectores agrupados (Tabla 3).

TABLA 1. Resumen capacidad instalada

Municipio	#	Uso				
		Agrícola	Industrial	Doméstico	Pecuario	Recreativo
Caloto	14	4	9	0	1	0
Corinto	6	6	0	0	0	0
Guachené	18	16	0	2	0	0
Miranda	35	27	7	0	1	0
Padilla	22	22	0	0	0	0
Puerto Tejada	66	60	4	2	0	0
Sder de Quilichao	28	18	7	1	1	1
Villarica	5	5	0	0	0	0
Total	194	158	27	5	3	1
Caudal (lps)	14,135,11	11,820,73	2,066,51	215,82	26,05	5,99

Caudal Superficial Entrante (Q_{se}) y Caudal Superficial Saliente (Q_{ss})

Se identificaron y analizaron cuatro estaciones hidrométricas para analizar el flujo de escorrentía (Tabla 3). Como caudal de salida se tomó el reportado para la estación El Hormiguero, situada en jurisdicción del municipio de Cali antes de la desembocadura del Zanjón Oscuro –punto de cierre del sistema. Mientras que como flujo superficial de entrada se incluyeron los caudales de las estaciones La Balsa, Buenos Aires y Puente Ferrocarril. La estación La Balsa es la más importante ya que afora el río Cauca, y está ubicada a la entrada del sistema de aguas subterráneas evaluado. El periodo hidrológico establecido fue de 30 años (1982–2012). Al registro mensual multianual de la estación Hormiguero se le restó el caudal aportado por dos corrientes de las cuencas Claro y Jamundí –cuya suma es de $238,31 \text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$, ubicadas del lado del departamento del Valle del Cauca (fuera del sistema analizado). El caudal de escorrentía ($Q_{es} = Q_{ss} - Q_{se}$) estableció el caudal drenado por las subcuencas al río Cauca.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Recarga por Precipitación (R_{pr})

En la zona de estudio se presenta un régimen de lluvias bimodal bien definido (Figura 3). La primera temporada de lluvias comprende los meses marzo, abril y mayo; seguida de una temporada seca severa que se manifiesta al inicio del mes de junio y se extiende hasta finales del mes de septiembre. En abril se reportan los mayores registros de precipitación; mientras agosto es el mes con la más baja precipitación durante todo el año. La segunda temporada de lluvias es menos intensa, y se presenta en los meses de octubre y noviembre. Finalmente

se presenta la segunda temporada de verano, menos intensa, a partir del mes de diciembre hasta finales del mes de febrero.

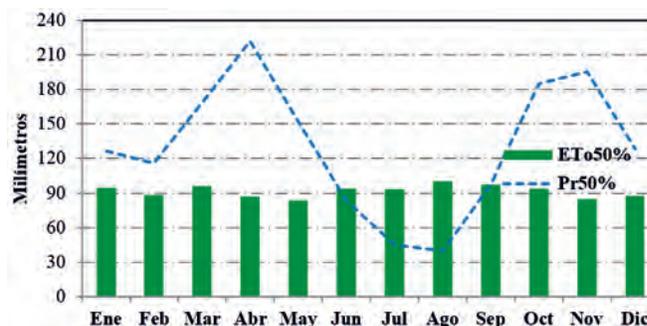


FIGURA 3. Distribución temporal de la precipitación y evapotranspiración.

La Recarga por precipitación es de $1\,559,2 \text{ mm}$ (suma de valores mensuales) o de $961,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ (afectando la Pr50% anual por $616,6 \text{ km}^2$).

Evapotranspiración de referencia (ET_0)

La evapotranspiración a diferencia de la precipitación, es menos variable, y por tanto, más constante a través del año (Figura 3). En agosto se presenta el mayor valor de evapotranspiración, coincidiendo con el mes de menos precipitación.

En la zona de estudio la evapotranspiración es de $1103,3 \text{ mm}$ o $680 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ (si se tiene en cuenta la extensión de la zona de estudio, $616,6 \text{ km}^2$).

Recarga por Riego Agrícola (R_{ir})

El requerimiento de agua anual calculado para la caña fue de 1000 mm . Este valor es cercano al valor de uso consuntivo anual ($1050\text{-}1300 \text{ mm}$) reportado para la caña de azúcar en el

valle geográfico del río Cauca (Torres *et al.*, 2004). Teniendo en cuenta el aporte de la precipitación efectiva, las necesidades brutas de riego anual se estimaron en 435,5 mm (eficiencias de proyecto de 55%), aplicados en cinco de los 12 meses del año (Tabla 2). Por su parte, el valor anual del uso consuntivo para el grupo de otros cultivos fue de 1 232 mm. El NRt calculado fue de 517,2 mm (eficiencias de proyecto de 75%), aplicados en ocho de los 12 meses del año (Tabla 2).

TABLA 2. Requerimiento total de riego (mm/mes)

	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Obs.
Pr75% (mm)	65,2	74,3	122,4	160,3	113,2	49,5	27,6	20,9	65,7	147,7	156,6	99,5	Ordinary Kriging Interpolation - ArcGIS 10.3
Pe	58,4	65,5	98,4	119,2	92,7	45,6	26,3	20,2	58,8	112,8	117,3	83,6	USDA SC METHOD
ETo50%	92,6	86,3	93,7	84,0	80,8	84,2	92,0	99,8	95,1	91,1	81,3	90,5	IDW interpolation - ArcGIS 10.3
EV50%	123,5	115,1	124,9	111,9	107,8	112,2	122,7	133,1	126,8	121,5	108,3	120,7	
Kcaña	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	
ETc	86,5	80,6	87,4	78,4	75,4	78,5	85,9	93,2	88,8	85,1	75,8	84,5	Caña de Azúcar
NRn - Caña (mm)	28,1	15,1	0,0	0,0	0,0	32,9	59,6	73,0	30,0	0,0	0,0	0,9	
Kotros	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	
ETc	106,5	99,3	107,7	96,5	93,0	96,8	105,8	114,8	109,4	104,8	93,4	104,1	Otros
NRn - Otros (mm)	48,1	33,8	9,3	0,0	0,3	51,2	79,5	94,6	50,6	0,0	0,0	20,5	
NRt - Caña	51,0	27,4	0,0	0,0	0,0	59,9	108,4	132,7	54,5	0,0	0,0	1,6	435,5
NRt - Otros	64,2	45,0	12,4	0,0	0,3	68,2	106,1	126,1	67,4	0,0	0,0	27,4	517,2

Teniendo en cuenta que el área de siembra de la caña y otros cultivos es de 329,33 km², y 58,16 km², respectivamente; la RIr estimada es alrededor de 281,4 mm·año⁻¹ (Caña=232,6 mm and otros cultivos = 48,8 mm). Esto es equivalente a 173 ·10⁶ m³·año⁻¹ (RIr-caña= 143 ·10⁶·m³·año⁻¹ y RIr-otros= 30 ·10⁶ m³·año⁻¹).

Caudal de Extracción (Q_{ex})

Se encontró que principalmente el agua subterránea es empleada en agricultura (Tabla 1); y el municipio con mayor cantidad de pozos destinados a esta actividad es Puerto Tejada. Mientras que en los municipios de Miranda y Santander de Quilichao se concentran los pozos para uso industrial (segundo sector con mayor uso de pozos).

TABLA 3. Caudal extraído por bombeo (Q_{ex})

Uso	Demanda (lps)	Reg. Oper.		Caudal	
		hr·d ^{-1*}	m·año ^{-1*}	m ³ ·año ⁻¹ ·10 ⁶	mm·año ⁻¹
Agrop.	11 847	12	6	92,1	149,40
Ind.	2 067	18	12	48,2	78,18
Urb.	222	24	12	6,9	11,19
Total				147	238,77

*hora-día-1, **mes-año-1

Por otro lado, aunque pareciera que la lámina de Q_{ex} para la actividad agropecuaria (Tabla 3) dista de la lámina estimada para riego de caña y otros cultivos (281,4 mm·año⁻¹). Al afectar el caudal de extracción de este sector (92,1·10⁶ m³·año⁻¹) por la superficie regada en la zona de estudio (38 749 ha) se obtiene una lámina de 237,7 mm año⁻¹. Valor muy cercano al encontrado en la Tabla 3. Es importante resaltar que algunos pozos activos –que riegan cultivos de cañas y otros- no fueron tenidos en cuenta en la capacidad instalada, y que el agua superficial concesionado para riego tampoco fue tenido en cuenta. En este sentido, el modelo propuesto puede

ser progresivamente refinado para alcanzar algunos objetivos, especialmente aquellos relacionados con la sostenibilidad del acuífero, y marcos normativos para su aprovechamiento (Custodio, 2002).

Caudal Superficial Entrante (Q_{se}) y Caudal Superficial Saliente (Q_{ss})

Los caudales de entrada y salidas indican que Q_{ss}>Q_{se} (Tabla 4), por lo que hay un caudal de escorrentía que se genera en toda la cuenca de norte del Cauca (3524,7 km²), el cual

no ingresa a recargar el acuífero, y sale a través de las fuentes hídricas superficiales hacia el río Cauca. De este modo, el valor estimado de escorrentía en la zona de estudio es de 406,5 mm·año⁻¹ (25·10⁶ m³·año⁻¹).

TABLA 4. Caudal de escorrentía

Estaciones	Este	Norte	Altitud (m)	Anual
Caudales salida (m ³ ·año ⁻¹)				
Q _{ss} -Est. El Hormiguero	1 066 486	857 152	956	2 850,53
Caudales entrada (m ³ ·año ⁻¹)				
Q _{se} - Est. La Balsa	1 053 164	833 745	987	2 200,43
Q _{se} - Est. Buenos Aires	1 055 457	827 598	1 040	52,21
Q _{se} - Est. Pte. Ferrocarril	1 062 899	827 638	1 023	51,38
Diferencia				546,51 m ³
406,5 mm				

Recarga (R)

Remplazando los componentes del balance hídrico en la Ec. 2, en el norte del Departamento del Cauca se tendría una Recarga (R) anual en el acuífero de 92,0 mm (Tabla 4), equivalente a una recarga aproximada de 911 m³ por hectárea. Las variables más importantes de recarga y descarga del sistema serían la precipitación y la evapotranspiración, respectivamente. Sin embargo, son los parámetros sobre los cuales se tienen menos control. En ese sentido el caudal de escorrentía adquiere importancia. Acciones tales como evitar quemas, pérdida de cobertura vegetal y buenas prácticas en los principales ríos pueden servir para regular la subcuenca y mantener el volumen que recarga el acuífero.

TABLA 5. Resumen componentes del balance

Recarga	Componentes				
	+R _{Pr}	+R _{Ir}	-ET _R	-Q _{ex}	-Q _{es}
56,2 millones de m ³	961	173	680	147	251
92,0 mm	1,559,2	281,4	1 103,3	238,8	406,5

Esta aproximación de la recarga del recurso hídrico subterráneo en el norte del Departamento del Cauca será más útil en

la medida que los valores computados en cada componente sean más fieles a la realidad. Es por esto que se recomienda recopilar información de los componentes al menos trimestralmente.

CONCLUSIONES

- Si bien la propuesta del balance hídrico de aguas subterráneas es un aproximación del proceso de recarga en el acuífero localizado al norte del Departamento del Cauca, permite identificar que existe un volumen de recurso hídrico que podría potencializar las actividades socioeconómicas que se vienen desarrollando en la región. Cabe anotar, que ese futuro aprovechamiento requiere una convergencia en los intereses de los diversos actores. En este sentido, la reglamentación de su uso llevará a una verdadera sostenibilidad del acuífero.

AGRADECIMIENTOS

A la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC) por el apoyo financiero a través de los convenios 0330 de 2013 y 0233 de 2015; y a la Universidad del Valle por facilitar otros recursos indispensables para la realización de este proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M.: *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56, ser. FAO - Food and Agriculture Organization of the United, Ed. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, vol. 300, ISBN-9251042195, Rome, [en línea] 1998, Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm> [Consulta: 9 de diciembre de 2014].*

BEAR, J.; CHENG, A.: *Modeling groundwater flow and contaminant transport*, Ed. Springer Netherlands, pp. 834, ISBN-978-1-4020-6681-8, [en línea] 2010, Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4020-6682-5> http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=cbFCAAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=Modeling+Groundwater+Flow+and+Contaminant+Transport&ots=6jiJzuiC6P&sig=gZUeArEL54F_MSC-bZjJwrs9IKQ [Consulta: 9 de diciembre de 2014].

BROUWER, C.; HEIBLOEM, M.: *Irrigation Water Management: Irrigation Water Needs*, Ed. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, pp. Chapter 2, Rome, [en línea] 1986, Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/S2022E/S2022E00.htm> [Consulta: 9 de diciembre de 2014].

COLOMBIA, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural - MADR: *Anuario Estadístico del Sector Agropecuario y Pesquero 2012*, Agronet, [en línea] 2013, Disponible en: http://www.agronet.gov.co/www/htm3b/popup2uniNuke_2011.asp?cod=843 [Consulta: 24 de noviembre de 2014].

CUSTODIO, E.: "Aquifer overexploitation: what does it mean?", *Hydrogeology Journal*, ISSN-1431-2174, DOI-10.1007/s10040-002-0188-6, 10(2): 254-277, 2002, [en línea] 1 de abril de 2002, Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/s10040-002-0188-6> [Consulta: 24 de noviembre de 2014].

- CUSTODIO G., E.; LLAMAS, M.R.: *Hidrología Subterránea*, Ed. Omega S.A., II Edición ed. ISBN-8428204462, Barcelona, 1996.
- HE, B.; WANG, Y.; TAKASE, K.; MOURI, G.; RAZAFINDRABE, B.H.N.: "Estimating Land Use Impacts on Regional Scale Urban Water Balance and Groundwater Recharge", *Water Resources Management*, ISSN-0920-4741, DOI-10.1007/s11269-008-9357-2, 23(9): 1863-1873, 2008, [en línea] 22 de octubre de 2008. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/s11269-008-9357-2> [Consulta: 9 de diciembre de 2014].
- KARAMOUZ, M.; AHMADI, A.; AKHBARI, M.: *Groundwater Hydrology: Engineering, Planning, and Management*, 676pp., Ed. Taylor & Francis Group, ISBN-9781439837566, Boca Raton, FL, USA, 2011.
- KASENOW, M.: *Applied Ground-water Hydrology and Well Hydraulics*, Ed. Water Resources Publication, pp. 835, ISBN-1887201289, [en línea] 2001, Disponible en: <http://books.google.com/books?id=k2LoLuiY5mQC&pgis=1> [Consulta: 19 de noviembre de 2014].
- MOHAMMADI, Z.; SALIMI, M.; FAGHIH, A.: "Assessment of groundwater recharge in a semi-arid groundwater system using water balance equation, southern Iran", *Journal of African Earth Sciences*, ISSN-1464343X, DOI-10.1016/j.jafrearsci.2014.02.006, 95: 1-8, julio de 2014. [en línea] 2014, Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1464343X14000326> [Consulta: 22 de noviembre de 2014].
- SINGH, V.P.: "On application of the Weibull distribution in hydrology", *Water Resources Management*, ISSN-0920-4741, DOI-10.1007/BF00421796, 1(1): 33-43, 1987. [en línea] 1987, Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/BF00421796> [Consulta: 17 de diciembre de 2014].
- TORRES A, J.; CRUZ V, J.; VILLEGAS, F.: "Avances técnicos para la programación y manejo del riego en caña de azúcar", *Serie Técnica-Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia*, (33), 2004. [en línea] 2004, Disponible en: <http://agris.fao.org/agris-search/search/display.do?f=2000/CO/CO00003.xml;CO1999002947> [Consulta: 30 de noviembre de 2011].
- XU, X.; HUANG, G.; QU, Z.; PEREIRA, L.S.: "Assessing the groundwater dynamics and impacts of water saving in the Hetao Irrigation District, Yellow River basin", *Agricultural Water Management*, ISSN-03783774, DOI-10.1016/j.agwat.2010.08.025, 98(2): 301-313, diciembre de 2010. [en línea], 2010, Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378377410002921> [Consulta: 24 de noviembre de 2014].

Recibido: 14/02/2015.

Aprobado: 14/03/2016.

Publicado: 19/04/2016.

Cristo Facundo Pérez, Ing. Agrícola, Universidad Surcolombiana, Neiva, Colombia. Correo electrónico: crifep@gmail.com

Andrés Fernando Echeverri-Sánchez, Correo electrónico: andres.echeverri@correounivalle.edu.co

Norberto Urrutia-Cobo, Correo electrónico: norberto.urrutia@correounivalle.edu.co

*Todos nuestros servicios
a su disposición*

BIBLIOTECA ANTONIO MACHADO RUIZ

UNIVERSIDAD DE GRANMA (UGR)