

**XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
PUNTA DEL ESTE, URUGUAY, NOVIEMBRE 2010**

**BALANCE HÍDRICO EN LOS MUNICIPIOS DE PEREIRA,
DOSQUEBRADAS, LA VIRGINIA, SANTA ROSA DE CABAL Y CARTAGO
- COLOMBIA**

*Carolina Ortiz P., Gabriel A. Betancur, Maria Victoria Vélez O. y Jaime Ignacio Vélez U.
Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos – Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín,
Colombia, cortizp@unal.edu.co, gabrielbetancurp@gmail.com, mvvelez@unal.edu.co, jivelezu@unal.edu.co*

RESUMEN:

La empresa prestadora de servicios Aguas y Aguas de Pereira, se ha preocupado constantemente por la oferta de agua de sus cuencas abastecedoras, las cuales nacen en el Parque Nacional de los Nevados en el departamento de Risaralda, Colombia. Desde 1997 la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín ha desarrollado proyectos para el cálculo del balance hídrico en la zona, con metodologías innovadoras para la estimación de variables hidrológicas. Además, se han diseñado metodologías para la estimación de la demandas hídricas, residencial e industrial, considerando las dinámicas poblacionales de los municipios.

Se presenta en este trabajo la estimación de la oferta de agua en la región de estudio, considerando el caudal ecológico y la restricciones por calidad, considerando escenarios de dinámica poblacional y económica.

ABSTRACT:

The service provider, Aguas y Aguas de Pereira, has constantly worried about the supply of the watershed supplying water, which are born in the Nevados National Park in the department of Risaralda, Colombia. Since 1997 the National University of Colombia at Medellín has developed projects for the calculation of water balance in the area, with innovative methodologies for the estimation of hydrological variables. In addition, methodologies are designed to estimate the water demands, residential and industrial, considering the population dynamics of the municipalities.

Is presented in this paper the estimation of water supply in the region of study, considering the ecological flow and quality restrictions, considering scenarios of population dynamics and economic.

PALABRAS CLAVES:

Balance hídrico, oferta hídrica, demanda hídrica.

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presenta la metodología para la definición y estimación de la demanda hídrica de cada uno de los 3 municipios del departamento de Caldas y 2 del departamento del Valle del Cauca en Colombia; se realiza balances hídrico y se propone una metodología para la definición y estimación de la demanda hídrica de cada uno de los sectores socioeconómicos de la región.

Este trabajo hace parte de los estudios sobre abastecimiento de agua de la zona realizados por la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín desde 1997 para la empresa Aguas y Aguas de Pereira, empresa de servicios públicos del municipio. Entre 2008 y 2009 se realizó la última actualización de los resultados, considerando las dinámicas poblacionales en la zona, el cambio en los recursos naturales reflejado por los diferentes usos del suelo y además las variaciones en la calidad fisicoquímica del agua en la zona.

Toda la información procesada y generada se almacenó en una base de datos en HydroSIG 4.0, desarrollado en la plataforma MapWindow.

ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se ubica en la vertiente oriental del río Cauca, zona centro de Colombia. En la zona la actividad agrícola es base de la economía, siendo el café uno de los productos de mayor producción, por lo que el análisis de la distribución espacial y temporal del agua para la conservación de los cultivos, hace que el balance hídrico sea una herramienta de gestión y decisión en los planes de expansión en la zona.

OFERTA HÍDRICA

El análisis hidrológico realizado, por metodologías de estimación con información escasa, comprendió el cálculo de los caudales medios y además los caudales máximos y mínimos para diferentes periodos de retorno. Se tenían registros de precipitación de 130 estaciones, 6 de las cuales con datos horarios, 51 diarios, 71 con datos mensuales y 2 con registros anuales. Se dispuso de 27 estaciones de caudal, de las cuales 20 a resolución diaria y 7 a nivel mensual, distribuidas a lo largo de la zona de estudio (Figura 1.-). Las estaciones obtenidas y procesadas contaban con longitudes de registro entre 3 y 50 años para la precipitación y entre 3 y 45 años para el caudal.

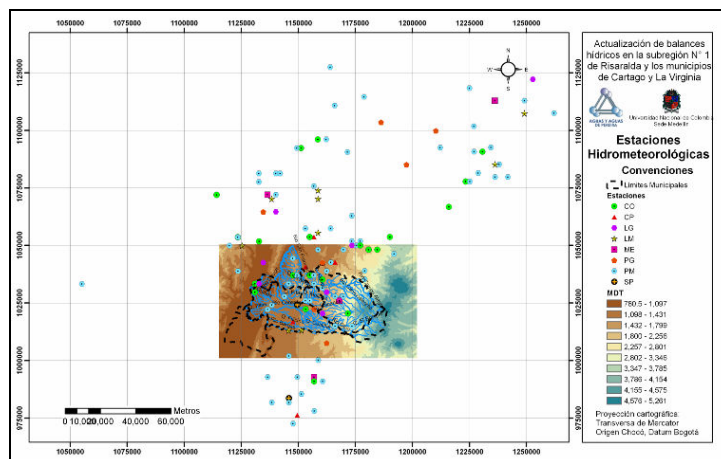


Figura 1.- Ubicación estaciones hidrometeorológicas de la zona de estudio.

El Modelo de elevación digital para la zona de estudio se procesó con 30 m de píxel y la base del mismo corresponde a información de 3 segundos de arco (aproximadamente 90 metros) de la misión GTOPO30 de la base de datos del grupo de la U. S Geological Survey's Eros Data Center

(EDC) e información de curvas de nivel cada 50 m (Figura 3.-).

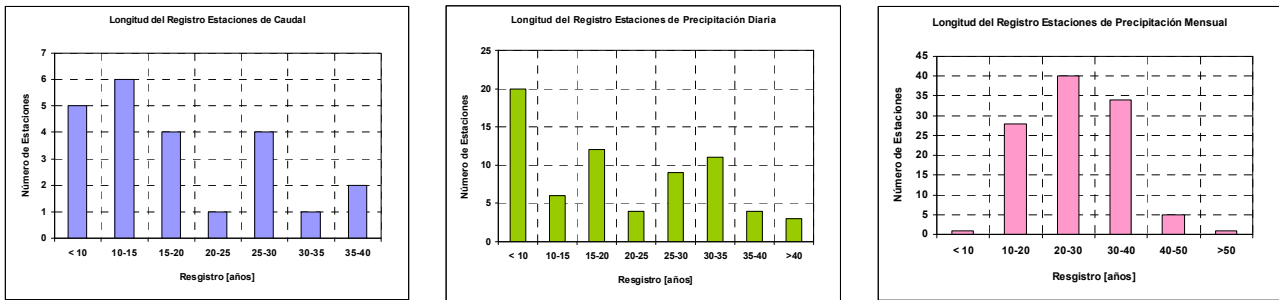


Figura 2.- Longitud de las series de registro procesadas.

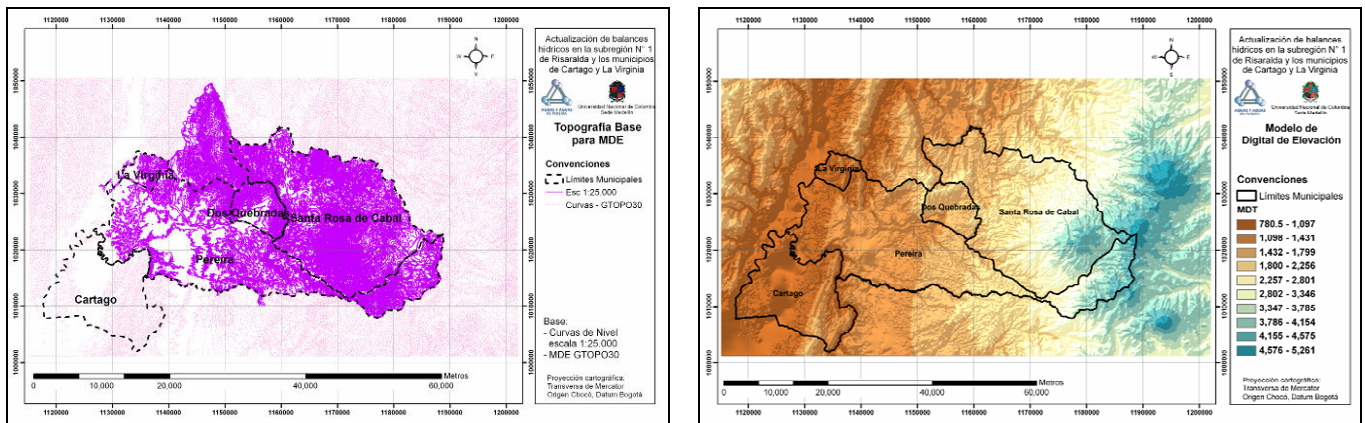


Figura 3.- Información base para la construcción del modelo de elevación digital.

Campos de variables hidrometeorológicas

Para la estimación de los caudales medios, mínimos y máximos en la zona de estudio es necesario construir los campos de precipitación y evaporación de la zona de estudio.

Para el cálculo del mapa de precipitación (Figura 5.-) se utilizó una metodología definida por Álvarez, 2007 y programada en HydroSIG Java 3.1. El método de interpolación se basa en el uso de un variograma omnidireccional generado a partir del análisis estructural de 87 estaciones ajustado mediante un modelo esférico con modelo pepita y un mapa de deriva para definir la tendencia de la variable a interpolar (Figura 4.-).

El mapa de precipitación obtenido se presenta en la Figura 5.-.

El mapa de evaporación potencial se estimó a partir de la ecuación de Cenicafé [1] en la cual se estima esta variable a partir de la elevación sobre el nivel del mar; esta relación fue obtenida realizando una regresión a los valores obtenidos de aplicar el método de Penman a los datos de sus estaciones climáticas en Colombia.

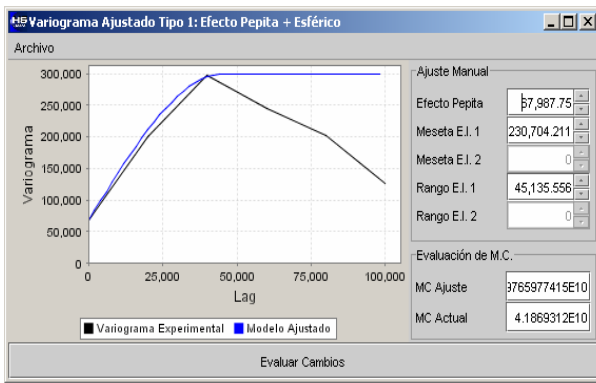
$$ETP = 1700,17 \exp(-0,0002 h) \quad [1]$$

Donde, ETP es la evapotranspiración potencial (mm/año) y h es la elevación (m).

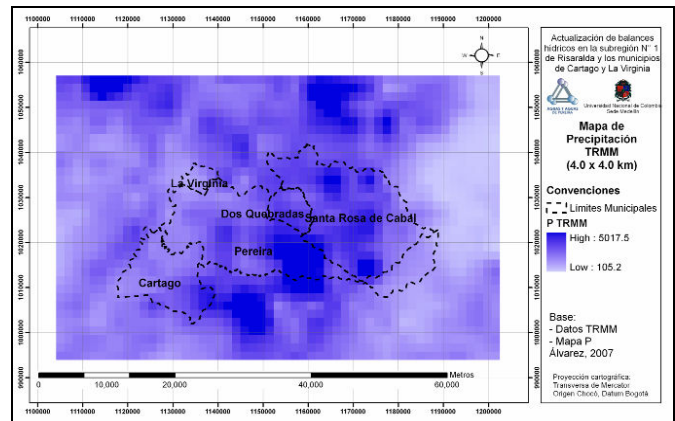
La evapotranspiración potencial se transforma a evapotranspiración real (Figura 6.-) mediante la expresión de Budyko, la cual se presenta en la ecuación [2].

$$ETR = \left(\left(ETP \cdot P \cdot \tanh\left(\frac{P}{ETP}\right) \right) * \left(1 - \cosh\left(\frac{ETP}{P}\right) \right) + \left(\sinh\left(\frac{ETP}{P}\right) \right) \right)^{0,5} \quad [2]$$

Donde, ETR es la evapotranspiración real [mm/año], ETP es la evapotranspiración potencial (mm/año) P es la precipitación media en la cuenca (mm/año).



a. Variograma ajustado con modelo tipo Efecto pepita + Esférico



b. Mapa de precipitación media anual satélite TRMM, Pixel 4.0 Km (Álvarez, 2007)

Figura 4.- Información base para la construcción del campo de precipitación.

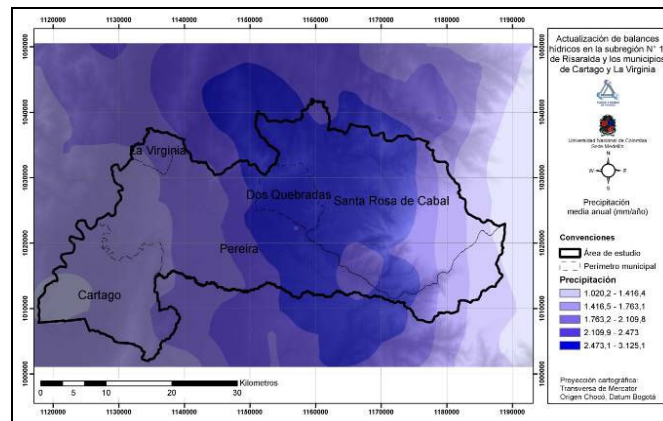


Figura 5.- Mapa de precipitación media anual.

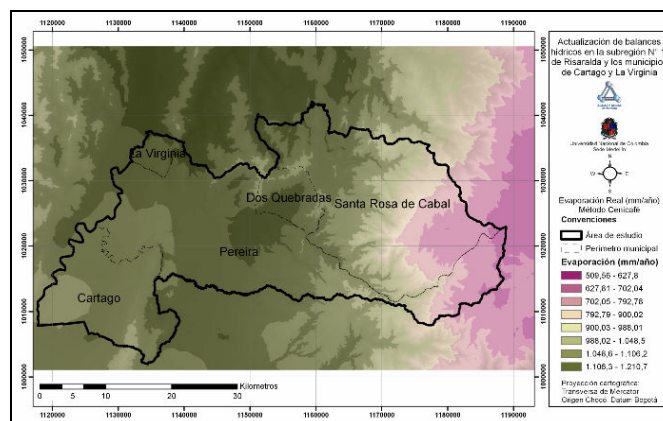


Figura 6.- Mapa de evaporación real de la zona de estudio.

Caudal medio a largo plazo

Para la estimación de caudales medios se usa la metodología del Balance Hidrológico a largo plazo, la cual se encuentra automatizada en el sistema de información geográfica HydroSIG 4.0. Para el balance hidrológico, se utilizan las ecuaciones de conservación de masa de agua en un sistema o volumen de control.

Para una cuenca dada, el cálculo del balance hidrológico se hace aplicando la ecuación [3] en cada punto interior (x, y) . La ecuación entonces se puede escribir como:

$$Q(x, y) = \iint_A [P(x, y) - E(x, y)] dx dy \quad [3]$$

Donde $Q(x, y)$ representa el flujo por unidad de área que el punto (x, y) le aporta a la escorrentía de la cuenca en el período considerado; $P(x, y)$ la precipitación por unidad de área que recibe el mismo punto, en el mismo período y $E(x, y)$, la lámina por unidad de agua de agua que se pierde por evaporación en el punto (x, y) en el mismo período. La aproximación numérica de la ecuación [4] en mapas raster es:

$$Q \cong \sum_{i, j \in A} (P_{i, j} - E_{i, j}) \Lambda_{i, j} \quad [4]$$

Finalmente el caudal medio se obtiene aplicando la ecuación [4] mediante diferenciales de área cuyo tamaño corresponde al de los píxeles del MDE (30m x 30m). Así, para cada píxel en el interior de la cuenca, se estima EVP y P de los mapas descritos anteriormente, se evalúa la ecuación [4] y su resultado se multiplica por el área del píxel, obteniendo así el volumen de agua que el píxel aporta durante el intervalo de tiempo dado (un año en este caso). La integración sobre toda la cuenca estima el volumen total de agua que sale del sistema durante el mismo período de tiempo, éste valor se convierte finalmente a m^3/s para obtener el caudal medio (Tabla 1.-).

Tabla 1.- Caudal medio histórico vs. Caudal medio estimado.

CODIGO	TIPO	NOMBRE	CORRIENTE	Q med Histórico [m ³ /s]	Qmed estimado [m ³ /s]
2613703	LM	Insula_La_6.906	Campoalegre	11.54	17.03
2613715	LM	Pte_La Estrella (6.905)	Q_La Estrella	1.20	0.43
2613722	LG	Reten_El	Otún	8.83	9.96
2615706	LM	Rio Claro	Claro	6.34	7.26
2612710	LM	Arabia	Barbas	2.63	2.06
2613711	LG	Bananera_La_6.909	Río Otún	11.90	11.84
2613712	LG	Reina_La	San Eugenio	4.93	4.36
2613718	LM	Playa Rica	San Juan	1.54	0.98
		Bocatoma_6.904	San Francisco	3.05	2.80

Finalmente se obtuvo el mapa de caudales medios, el cual presentó errores de estimación menores al 10% en 8 estaciones de caudal en las cuales se contaba con registros históricos de esta variable.

Caudales mínimos

Para la estimación de caudales mínimos en la zona de estudio, se utilizó análisis de frecuencia de series históricas, ecuaciones de regionalización de características medias de caudales mínimos para la zona de estudio y modelos lluvia-escorrentía para la simulación de caudales diarios, a partir de los cuales se estiman caudales mínimos asociados a diferentes períodos de retorno.

Uno de los métodos que se han venido implementando en los últimos años para la estimación de caudales mínimos en cuencas con información escasa, es el modelo de tanques estudiado por Vélez (2001), el cual reproduce valores de escorrentía superficial directa a una resolución temporal diaria en un lapso de tiempo dado por los periodos de precipitación que se tengan en la cuenca; a partir de

esta metodología se calibraron 5 modelos en la zona de estudio, para 5 cuencas que contaban con registros de precipitación y caudal en periodos comunes de tiempo.

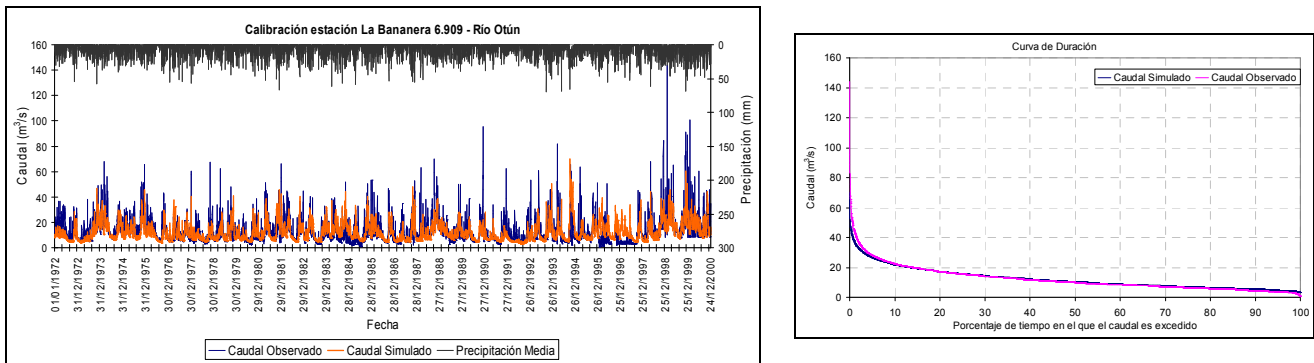


Figura 7.- Series y curva de duración de los datos históricos y simulados - Estación La Bananera..

Caudales ecológicos

Para la estimación de los caudales ecológicos se empleó la metodología propuesta en la Resolución 0865 del 22 de Julio de 2004 publicada por el Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia, la cual cita el estudio Nacional de Aguas (IDEAM, 2000). La metodología permite estimar el caudal ecológico de una corriente, como el 25% del caudal mensual multianual más bajo de la misma. Este tipo de metodología es netamente hidrológica y no contiene los aspectos ecológicos propios de cada cauce.

Con el fin de estimar de forma general el caudal ecológico en una cuenca determinada, para considerarlo en los balances hidrológicos, se verificaron las relaciones existentes entre $Q_{ecológico}$ vs A_{cuenca} y $Q_{ecológico}$ vs Q_{medio} , como se muestra:

$$Q_{ecológico} = \alpha \cdot A^{\beta} \quad [5]$$

$$Q_{ecológico} = \lambda \cdot Q_{medio}^{\theta} \quad [6]$$

Los caudales ecológicos utilizados para estas regresiones se calcularon a partir de los caudales mínimos mensuales multianuales de las estaciones que poseían un registro superior a 10 años. Dado que se conocen el área de la cuenca y el caudal medio en la estación, se realiza una regresión lineal simple en cada caso, para estimar los parámetros de las ecuaciones [7] y [8]. Los resultados obtenidos son los siguientes:

$$Q_{ecológico} = 0.055 \cdot A^{0.580} \quad R^2 = 0.72 \quad [6]$$

$$Q_{ecológico} = 0.163 \cdot Q_{med}^{0.947} \quad R^2 = 0.99 \quad [6]$$

Donde el área está dada en $[km^2]$ y los caudales en $[m^3/s]$.

DEMANDA HÍDRICA

Se cuantificó y caracterizó la demanda hídrica superficial y subterránea, actual y futura, en la zona de estudio, a partir de información secundaria existente. El análisis de la demanda hídrica es fundamental para el cálculo de los balances hídricos, para identificar y ubicar la población que demanda el agua, evaluar sus posibilidades de abastecimiento desde la misma cuenca y establecer las posibles áreas de conflicto por su escasez.

La metodología desarrollada considera las variables de tipo demográfico y de consumo, Se realizó revisión de la información de los planes de ordenamiento territorial de los municipios de la zona de estudios, información de registros históricos de las Empresas prestadoras de servicios públicos de la zona, planes de saneamiento y manejo de vertimientos –PSMV- municipales, planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas y datos censales nacionales publicados por el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas de Colombia – DANE.

Se realizaron cálculos de la demanda de agua del sector residencial e industrial de cada municipio con sus proyecciones al año 2050.

Se generaron escenarios de proyección residencial considerando la variabilidad de los crecimientos en la población y en la economía y además proyecciones de expansión y mejora de los sistemas de distribución de agua reflejados en el Índice de Agua no Contabilizada –IANC. En cuanto a la demanda industrial se proyectaron consumos en función de los índices del Producto Interno Bruto – PIB histórico de los municipios y las proyecciones económicas de los departamentos según sus apuestas a futuro.

Proyección de población

Para la proyección del crecimiento de la población se exploró la aplicación de un método demográfico. Este método considera variables propias de la dinámica natural de una población, las cuales limitan su crecimiento a largo plazo. Como soporte a la decisión del mejor estimativo en las proyecciones, se hizo un esfuerzo para aplicar la metodología que a continuación se describe para la zona urbana del Área metropolitana.

Es necesario conocer la población base a proyectar (en este caso corresponde a la agregación de la población de Pereira, Dosquebradas, La Virginia y Santa Rosa de Cabal), las tasas de nacimientos, defunciones y migraciones de tal población y la población potencial de migración a la población Base. En la ecuación [7] se presenta el modelo de dinámica poblacional a implementar (Figura 8.-).

$$P(t+i) = P(t) + Nac(t) - Def(t) + Inm(t) - Emi(t) \quad [7]$$

Donde:

P(t+i): Población proyectada para el período “t+i”

P(t): Población en el período “t”

Y “Nac(t)”, “Def(t)”, “Inm(t)”, “Emi(t)” representan los nacimientos, defunciones, inmigrantes y emigrantes del período “t” respectivamente.

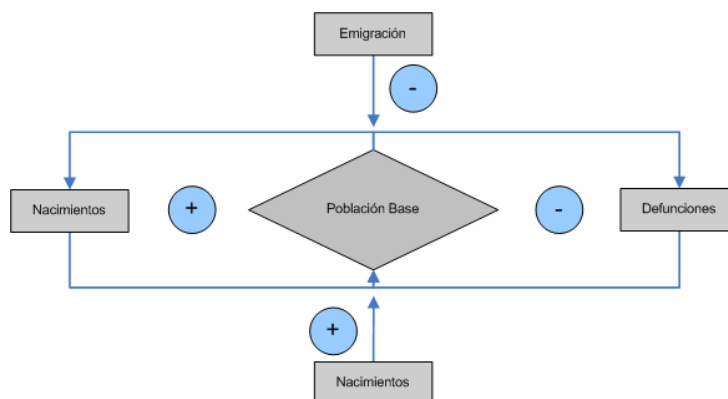


Figura 8.- Esquema de Balance de Población.

Demanda residencial

Las proyecciones futuras de demanda de agua potable de cualquier población tienen gran incertidumbre, la cual se debe estimar de alguna manera, de forma tal, que la organización que va a usar estos resultados sea consciente de que se encuentra en un problema de toma de decisiones bajo

incertidumbre. En el caso específico de la demanda de agua la incertidumbre se debe, entre otros, a factores como:

- Crecimiento futuro de la población.
- Métodos de proyección de la población.
- Tasas de crecimiento de la población.
- Crecimiento económico.
- Pérdidas en el sistema de acueducto.
- Eficiencia del consumo.
- Clima.
- Situación socio-económica de la población.
- Educación.

A continuación se presentan los escenarios de proyección planteados.

ESCENARIO 1: Este escenario se considera como pesimista desde el punto de vista de la demanda de agua y tiene las siguientes premisas.

- No se realizan mejoras al sistema para la disminución del IANC, pero se busca mantener los valores actuales.
- Las dotaciones se conservan estables: no se realizan campañas para la disminución de las mismas.

La demanda en este caso crece con la población en cada municipio. Las hipótesis expuestas solo tiene sentido en el caso de que las ESP no cumplan con las políticas gubernamentales de uso eficiente.

ESCENARIO 2: Se plantea como el más optimista desde el punto de vista de disminución del consumo de agua, con las siguientes hipótesis.

- Se proyecta un uso eficiente y racional del recurso, es decir las empresas de servicios públicos adelantarían campañas para promover la reducción de las dotaciones netas en los municipios conforme lo plantea Ley 373 de 1997. Se propone un escenario donde las dotaciones netas disminuyan 1.5 litros/habitante/día por año. La reducción de las dotaciones se hace hasta que la dotación neta sea cercana al mínimo vital (ver sitio Web: www.diplomadospd.com/txt/ArtDebates_aguaminimovital.pdf) ($10 \text{ m}^3/\text{viv.}/\text{mes} = 83.4 \text{ l}/\text{hab.}/\text{día}$) para este caso se estableció como dotación asintótica la de $15 \text{ m}^3/\text{viv.}/\text{mes} \approx 125 \text{ l}/\text{hab.}/\text{día}$, excepto para la población de Dosquebradas, cuyas dotaciones netas actuales son inferiores al valor de referencia definido.
- Se considera un cambio en el IANC que decrece linealmente para todas las empresas desde el último valor registrado hasta un 20% para el 2030. Posterior a este año se conserva dicho IANC hasta el año 2050. es de aclarar que esto se aplica para todos los municipios incluso aquellos que a la fecha tienen IANC superiores al 50%.

ESCENARIO 3: Este escenario corresponde a uno de tipo tendencial, donde la demanda de agua se calcula con valores promedio, así las expectativas son promedio en cuanto a la demanda de agua.

- Se plantea la reducción de pérdidas al 20 %, para el año 2050. Cada empresa prestadora de servicio de acueducto esta comprometida con la reducción de su IANC a tal punto que no refleje pérdidas económicas, es decir que en los siguientes 50 años de operación cada empresa logre alcanzar un IANC del 20 %.
- Las dotaciones netas de cada estrato socioeconómico no decrece en el tiempo, es decir no se

realizan esfuerzos en campañas de ahorro de agua para la comunidad.

Demanda industrial

A partir de la información socioeconómica encontrada de los municipios de la zona de estudio se construyó una metodología para proyectar el crecimiento industrial en el Área Metropolitana de Risaralda, es decir en los municipios de Pereira, Dosquebradas, La Virginia y Santa Rosa de Cabal, con base en el crecimiento del producto interno bruto (PIB) del país. Para aplicar esta metodología fue necesario conocer el porcentaje que aporta el departamento de Risaralda al PIB Nacional, y cuanto de este porcentaje, es aportado por la Industria local.

Teniendo en cuenta lo anterior, estimar la demanda de los usuarios industriales en el Área Metropolitana de Pereira, Dosquebradas, La Virginia y Santa Rosa de Cabal, se planteó la siguiente metodología: Inicialmente se valora el aporte de la industria tanto el PIB del departamento como el comportamiento de los consumos industriales de agua potable a lo largo de la historia. Como el comportamiento del PIB depende de múltiples factores (contabiliza sólo los bienes y servicios producidos, sin considerar el trabajo informal), resulta más acertado basarse en los resultados históricos más recientes en cuanto aportan mayor información del ambiente económico que se tiene en el país.

Posteriormente se hace, una clasificación de las industrias consumidoras de agua potable, con el fin de identificar las grandes consumidoras y diferenciarlas de industrias pequeñas usando casi exclusivamente agua del acueducto básicamente, para atender la demanda de sus empleados. Estas pequeñas y medianas industrias no pueden reducir sus consumos de forma significativa, caso contrario a los grandes consumidores quienes destinan gran cantidad de esfuerzos a la reducción de consumos mediante recirculación, reuso y tratamiento de agua residuales.

Para proyectar la demanda de este sector se realizará una proyección de los consumos a una tasa de crecimiento del 3.0%, tal y como lo estima el Ministerio de Hacienda (<http://www.minhacienda.gov.co/MinHacienda>). Este sería un escenario pesimista en cuanto a la presión sobre el recurso hídrico, tasa del 2.5% anual para un escenario menos pesimista, tal y como lo plantea Fedesarrollo al afirmar que el 3% es demasiado optimista. Los escenarios planteados no consideran el decrecimiento en el sector industrial, dado que desde el punto de vista de demanda de agua lo más crítico es el aumento de la misma.

CALIDAD DEL AGUA SUPERFICIAL

El análisis de calidad de las aguas superficiales se realizó en 5 subcuencas de la zona de estudio (Figura 9.-), en donde se tienen un total de 36 estaciones. Los registros corresponden a mínimo 3 caracterizaciones al año de cada estación entre 1997 y 2008 con reporte de datos fisicoquímicos y bacteriológicos.

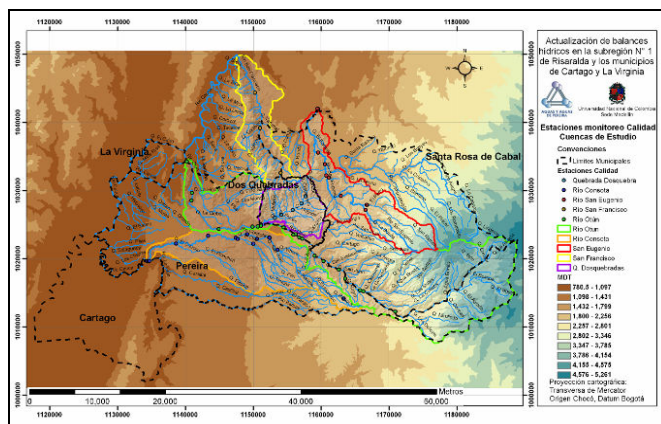


Figura 9.- Cuencas de la zona de estudio con muestreos de calidad.

La información fue procesada y comparada con los estándares de calidad de la normatividad colombiana (Decreto 1549 de 1984); se realizaron análisis espaciales de cada una de las variable fisicoquímicas a lo largo de los cauces, generando mapas de valores medios para invierno y verano en cada cuneca (Figura 10.-). Se construyeron perfiles de calidad a lo largo de las corrientes considerando los periodos de invierno y verano según el ciclo anual de la precipitación en la zona. Finalmente se definieron índices de calidad –ICA y de contaminación –ICO, para cada una de las cuencas (Figura 11.-).

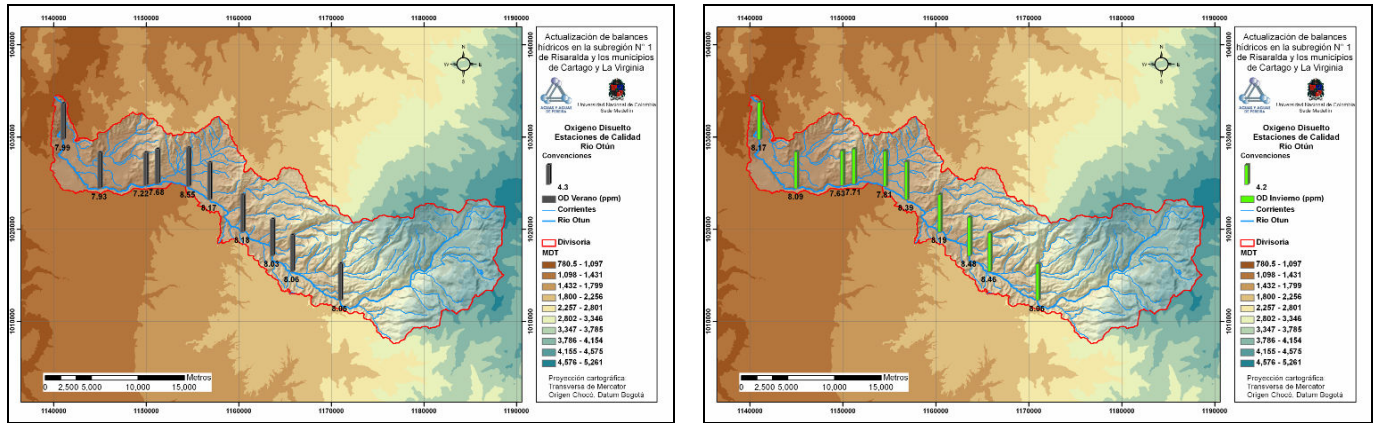


Figura 10.- Variabilidad espacial oxígeno disuelto en la cuenca del río Otún.

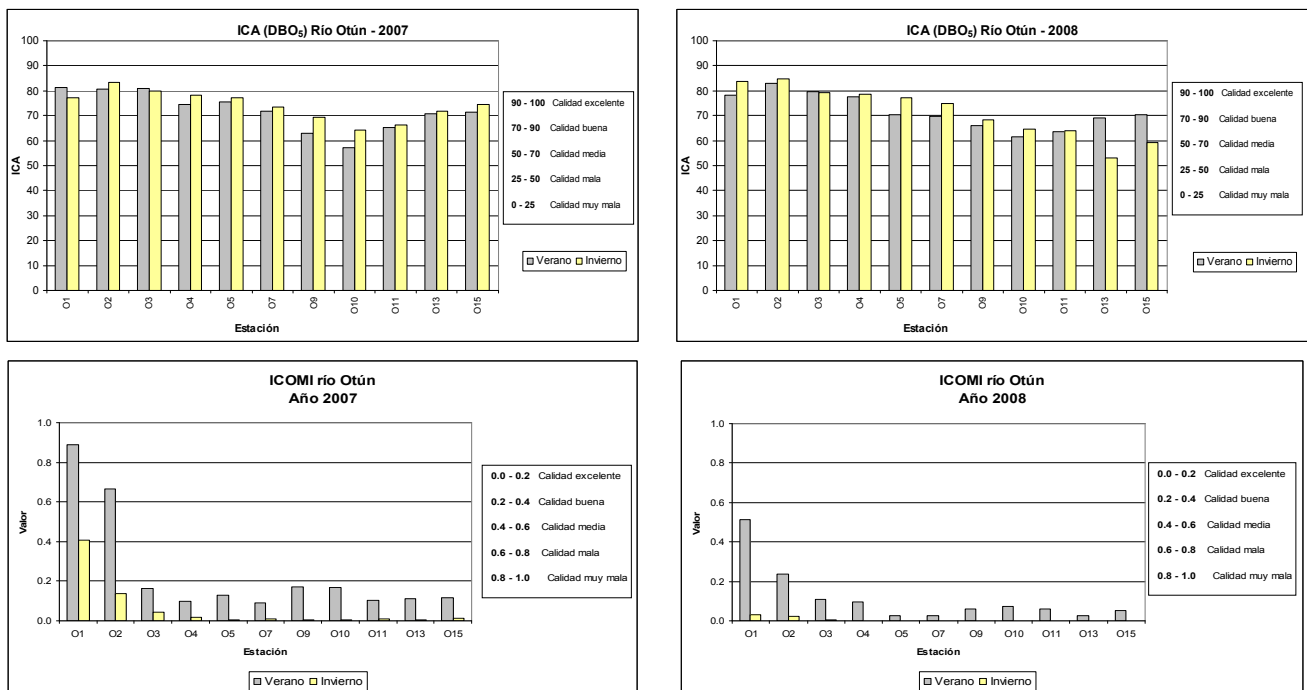


Figura 11.- ICA e ICO año 2007 y 2008, cuenca del río Otún - Pereira.

BALANCE HÍDRICO

Conocidas las posibles fuentes de abastecimiento para cada uno de los municipios de la zona de estudio y considerando el caudal natural disponible como el caudal mínimo de periodo de retorno de 10 años y estimado el caudal ecológico de cada cuenca a partir de la metodología definida por la Resolución 0865 del 22 de Julio de 2004 publicada por el Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia, se procedió a realizar los balances de agua para cada municipio considerando las combinaciones de fuentes abastecedoras y las demandas de las mismas desde uno o varios municipios.

Para cada una de las cuencas abastecedoras consideradas se realizó simulación de caudales usando los modelos de tanques calibrados para la zona de estudio (Demanda hídrica). Los modelos de tanques usados en cada punto se seleccionaron a partir de criterios de similitud hidrológica entre las cuencas.

En la Tabla 2.- se presentan la oferta para cada una de las cuencas abastecedoras seleccionadas, la cual corresponde al caudal mínimo de periodo de retorno de 10 años calculado con los coeficientes de la función de distribución de probabilidad Lognormal. Además se presenta el caudal ecológico para cada punto.

Tabla 2.- Oferta Natural de las cuencas abastecedoras para la zona de estudio.

Fuente	Oferta [m ³ /s]	Q _{95%} [m ³ /s]	Q ecol [m ³ /s]	% de tiempo que excede el Q ecol	Q disponible [m ³ /s]	Q disponible [m ³ /año]
Quebrada Cestillal	0.029	0.055	0.035	99.58	Déficit de: 0.006	-
Río Barbas – Parte Alta	0.040	0.068	0.036	99.98	0.004	126,144.00
Río Barbas – Parte Baja	0.070	0.124	0.067	99.94	0.003	94,608.00
Río Consota	1.790	2.223	0.906	100.00	0.884	27,877,824.00
Río Otún (Actual)	4.070	5.164	1.803	100.00	2.24	70,640,640.00
Quebrada Tinajas	0.026	0.032	0.018	100.00	0.008	252,288.00
Quebrada San José	0.330	0.412	0.214	100.00	0.116	3,658,176.00
Quebrada Combia	0.483	0.602	0.254	100.00	0.229	7,221,744.00
San Eugenio	0.290	0.475	0.220	100.00	0.070	2,207,520.00
Río Campoalegrito	0.120	0.155	0.129	99.00	Déficit de: 0.009	-
Río Campoalegre	0.883	1.132	0.776	99.59	0.107	3,371,132.46
Río San Ramón	0.310	0.516	0.242	100.00	0.068	2,144,448.00
Cuenca del Totuí	0.991	-	0.205	-	0.786	24,787,296.00
Río La Vieja	11.164	-	1.850	-	9.314	293,726,304.00

Puede observarse que hay disponibilidad de caudal, considerando el caudal ecológico, en todas las cuencas abastecedoras propuestas menos en la quebrada Cestillal y el río Campoalegrito, dado que el caudal ecológico es mayor que el caudal mínimo definido como oferta natural de agua, razón por la cual estas fuentes no se considerarán en el balance de agua. Sin embargo, el caudal ecológico puede ser calculado usando otras metodologías (Bedoya, 2005) cuyo requerimiento de información excede las posibilidades de este estudio, además, la legislación colombiana tiene como norma, el método planteado aquí.

Realizado el balance se encuentra que para el municipio de Dosquebradas se tienen problemas de abastecimiento en los escenarios de demanda pesimista y optimista, considerando como fuentes potenciales el agua subterránea, el río San Eugenio, el río Campoalegre y el Río San Ramón, es decir, no es posible abastecer al municipio desde Santa Rosa de Cabal. Abasteciendo desde el municipio de Pereira se presenta déficit para la proyección al año 2030 solo aprovechando la captación del río Otún y agua subterránea. En el caso del escenario optimista no hay escasez de agua aprovechando solo el río Otún y el agua subterránea.

El caso más crítico en abastecimiento se presenta para el municipio de Santa Rosa de para el cual es necesario el uso de agua de los ríos San Eugenio, Campoalegre y San Ramón para cumplir con las proyecciones de demanda de agua. Con las fuentes de abastecimiento de agua propuestas solo se tiene disponibilidad para el año 2020 en el caso del escenario pesimista de demanda y en el optimista se tiene oferta suficiente hasta el 2050. En este municipio se resalta nuevamente que el río Campoalegrito no puede ser aprovechado, dado que el caudal ecológico es mayor que la oferta (caudal mínimo de 10 años de periodo de retorno y teniendo en cuenta la metodología legal, actual, para el cálculo de los caudales ecológicos).

Para el municipio de La Virginia y Cartago no se presenta escasez de agua en ninguno de los escenarios de demanda proyectados, conservándose la situación diagnosticada en el estudio del 2004.

CONCLUSIONES

Sin lugar a dudas el mapa construido para la distribución espacial de la precipitación es uno de los elementos que añade mayor incertidumbre a los cálculos, dados los factores macro y microclimáticos que intervienen en la formación de la lluvia. Concientes de este problema, se realizó un gran esfuerzo en disminuir la incertidumbre considerando dos elementos fundamentales para la construcción del mapa: el primero de ellos es la información puntual dada por las estaciones de medición consideradas en este estudio y el segundo el mapa de precipitación construido a través de imágenes de radar para toda Colombia (Álvarez, 2007) y aplicado a la zona de análisis. Usualmente estas dos metodologías no son aplicadas para la construcción de mapas de precipitación, sin embargo, los resultados obtenidos al combinar estas herramientas de análisis fueron muy satisfactorios, y se ven reflejados en el cálculo de los caudales del balance a largo plazo, que ciertamente presentan menos incertidumbre comparados con los obtenidos en el proyecto pasado.

Para establecer cuál es la metodología de estimación de caudales mínimos más apropiada, se debe tener en cuenta el grado de instrumentación de la cuenca y la longitud de los registros que se poseen. De este modo, se recomienda el uso del *modelo de tanques* calibrado para las cuencas de la zona de estudio, que posean poca instrumentación o que los registros son muy cortos y de mala calidad para ser sometidos a un análisis estadístico. Así pues, en el caso de las cuencas que poseen de datos confiables y sus registros son apropiados para un análisis estadístico, es razonable el uso del *análisis de frecuencias* para la estimación de caudales mínimos utilizando principalmente las funciones de distribución de probabilidad Lognormal y Gumbel, ya que fueron las que mejor se ajustaron a los datos aquí analizados.

Se estima que para el año 2010 la demanda residencial en Pereira este entre los 36,385,162 m³/año y los 37,745,534 m³/año. Para Dosquebradas el próximo año se espera que la demanda residencial está entre 18,292,917 m³/año y los 20,271,240 m³/año. En La Virginia las expectativas para 2010 de la demanda residencial oscilan entre los 3,483,752 m³/año y los 4,064,590 m³/año. El municipio de Santa Rosa de Cabal tendría una demanda residencial para el 2010 entre los 6,316,706 m³/año y 6,471,038 m³/año. Y finalmente en 2010 para Cartago se calcula que la demanda residencial estaría entre los 10,396,368 m³/año y los 10,934,973 m³/año.

La demanda industrial estimada para el Área Metropolitana de los municipios de Pereira, Dosquebradas, La Virginia, Santa Rosa de Cabal y Cartago para el año 2010 se encuentra entre los 743,940 m³/año y los 751,215.39 m³/año.

En ninguna de las cuencas analizadas se presentan valores del pH menores a 7, lo que caracteriza las aguas de la zona como no ácidas, cumpliendo con los umbrales establecidos por el Decreto 1594 de 1984 para destinación de las mismas a consumo humano con un proceso de desinfección.

Del análisis de las concentraciones de Nitritos y Nitratos se obtienen valores menores a los del decreto, 1.0 y 10.0 ppm, respectivamente, por lo que el agua no tiene problemas de contaminación por estos componentes.

La demanda residencial e industrial del municipio de Pereira: para ninguno de los escenarios de demanda analizados hasta el año 2050 se presentan problemas de disponibilidad.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo y La Universidad Nacional de Colombia agradecen Aguas y Aguas de Pereira por el apoyo para la realización de este estudio.

REFERENCIAS

Álvarez, O. (2007). Cuantificación de la incertidumbre en la estimación de campos hidrológicos: aplicación al balance hídrico de largo plazo. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. 219 p.

Bedoya, J. M. (2005). Estudio de Metodologías para Establecer Caudales Ecológicos y su Aplicación en la Cuenca Doña María. Monografía. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. 46p.

Decreto 1594 de 1984. Por el cual se reglamenta parcialmente el título I de la Ley 9 de 1979, así como el capítulo II del título VI - parte III - libro II y el título III de la parte III - libro I - del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos.

Fedesarrollo. Sitio Web: www.fedesarrollo.org, Fecha de Visita: Diciembre de 2008.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2004). Resolución Número 0865 de Julio 22 de 2004. Bogotá. 32p.

Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín - UNALMED y Aguas y Aguas de Pereira, (2009). Actualización del balance hídrico en los municipios de Pereira, Dosquebradas, La Virgini, santa Rosa de Cabal y Cartago. Medellín.

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. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos y Puertos. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Valencia.