

Análisis de la alternativa de abastecimiento de agua para la ciudad de Tunja, embalse La Copa

José Julián Villate

Ingeniero Civil, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
Especialista en geomática, Mg. en Ingeniería Civil. Docente Facultad de ingeniería civil Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
juvillate@gmail.com

Recibido: 19 de septiembre de 2013 Aprobado: 10 de diciembre de 2013

Artículo de investigación, como producto final del proyecto elaborado en la UPTC del programa de Ingeniería Civil.

Resumen

El presente estudio consiste en un análisis que permita establecer la posibilidad de implementar el volumen almacenado en el embalse de La Copa, como una alternativa de abastecimiento futuro de agua potable para la ciudad de Tunja, a partir de la realización del balance hidrológico del embalse, identificando y caracterizando las diferentes entradas y salidas definidas principalmente por cuencas afe-rentes (entradas) y caudales concesionados para el Distrito de Riego del Alto Chicamocha.

Palabras clave: Embalse La Copa, balance hídrico, abas-tecimiento futuro de agua, método de Thomas.

Abstract

This study presents the analysis to establish the feasibility of using the water stored in "La Copa" reservoir as a future alternative of a water supply to the city of Tunja. This was achieved by the hydrological balance, identifying and describing the different inputs and outputs, which are defined by the watersheds (inputs) and the irrigations district of "Alto Chicamocha".

Key words: La Copa Dam, hydrological balance, future supply, Thomas method.

I. INTRODUCCIÓN

A

ctualmente las cuencas hidrográficas del mundo, se han visto sometidas a una serie de procesos, en su mayoría antrópicos, que han generado la disminución considerable de fuentes de agua, esta situación sumada al creciente aumento de la población puede traer como consecuencia problemas de desabastecimiento de agua potable o un aumento significativo en los procesos de tratamiento de agua. La ciudad de Tunja no es ajena a estos problemas, teniendo que recurrir a nuevas fuentes de agua potable para satisfacer la demanda de los habitantes, lo cual se evidencia en la necesidad de explotar el acuífero de Tunja como una fuente alterna a la represa de Teatinos. Sin embargo, de continuar el aumento significativo de la población de la ciudad (residentes y población flotante), será necesario recurrir a nuevas fuentes de agua.

Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó un estudio hidrológico del embalse La Copa, ubicado en el municipio de Toca (Boyacá), que permita identificar la totalidad de variables que intervienen en la operación del embalse, estableciendo de esta manera la posibilidad de ser considerado como una alternativa de abastecimiento futuro de agua para la ciudad de Tunja.

La metodología implementada para el desarrollo del proyecto se basó en la determinación de la demanda futura de la ciudad de Tunja, para establecer el caudal futuro requerido para la ciudad, con lo que se procedió a realizar el estudio hidrológico del embalse, en el cual se tuvieron en cuenta tanto las entradas (aporte de subcuencas y precipitación sobre el embalse) como las salidas o usos (consumo distrito de riego Usochicamocha, caudal ecológico, consumo acueducto de Tunja, evaporación directa), determinando de esta manera la disponibilidad hídrica del mismo para diferentes escenarios tanto de consumos como de comportamiento hidrológico de las cuencas aportantes al embalse.

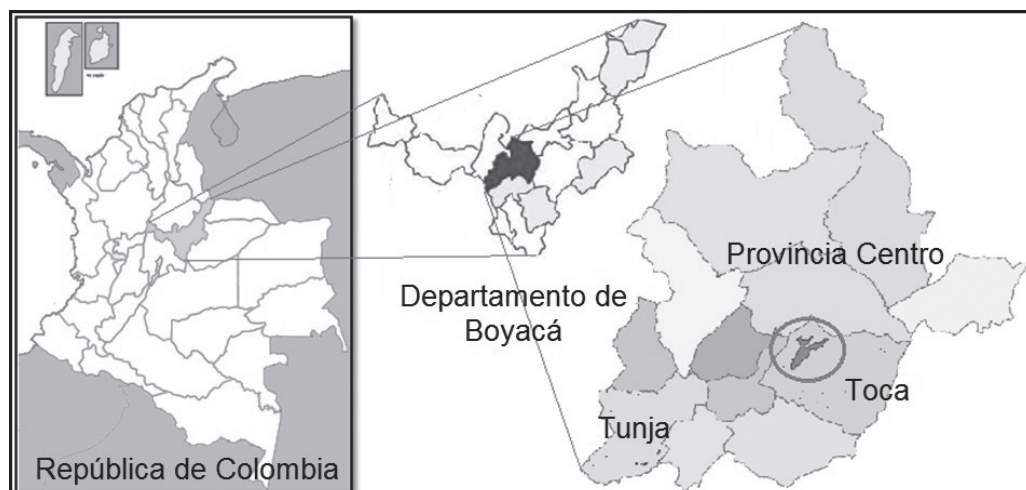
El método seleccionado para el análisis hidrológico de las cuencas fue el de Thomas o método a,b,c,d, cuya calibración se desarrolló empleando el algoritmo de la colonia de hormigas (ACH). El proceso de calibración se realizó para las cuencas instrumentadas, y los parámetros encontrados se emplearon para la modelación de cuencas sin instrumentación, previo análisis de semejanza de comportamiento hidrológico.

Finalmente se determinó la disponibilidad hídrica del embalse para diferentes escenarios (en función de clima y del uso del agua para el distrito de riego), información definitiva para establecer la posibilidad de implementarlo como una fuente alterna de abastecimiento futuro de agua para la ciudad de Tunja.

II. GENERALIDADES

Este proyecto se desarrolló en conjunto con la empresa Proactiva Aguas de Tunja S.A. E.S.P., la cual proporcionó, entre otros recursos, la información hidroclimática proveniente del instituto de hidrología meteorología y estudios ambientales Ideam, valores históricos de población con sus respectivos registros históricos de consumo en la ciudad, así como los caudales extraídos de sus actuales fuentes de abastecimiento (embalse de Teatinos y Pozos profundos), información básica para el análisis de la oferta hídrica del embalse. Sin embargo, en virtud del funcionamiento actual del sistema de acueducto los análisis se realizaron sin tener en cuenta el caudal extraído de los pozos profundos, debido a que éstos se consideran como una fuente de abastecimiento de emergencia.

FIGURA 1. LOCALIZACIÓN EMBALSE LA COPA. Fuente: Autores.



Como se aprecia en la figura 1 la zona de interés se localiza en el Centro Oriente de Colombia, sobre la Cordillera Oriental, departamento de Boyacá, en la provincia Centro, está ubicado en las coordenadas $5^{\circ}20'24''\text{N}$ y $73^{\circ}7'12''\text{O}$ /5.34, -73.12. Cubre aproximadamente un área inundable de 860 hectáreas, todas ellas correspondientes al territorio del municipio de Toca y tiene un perímetro de aproximadamente 19.5 Km. Con respecto a Tunja, el embalse se encuentra ubicado al Noreste, aproximadamente a 19 km. de la cabecera municipal.

Tiene una capacidad proyectada de almacenamiento de 70 millones de metros cúbicos, de los cuales se considera que el embalse útil es de 55 millones. Su máxima altura o cota de diseño del vertedero de excesos es 2672 m. de altura sobre el nivel del mar. Su mayor profundidad es de 33.5 metros.

III. METODOLOGÍA

A. Proyección de población y cálculo de la demanda futura.

Se realizó el cálculo de la demanda futura de agua para el período de diseño, utilizando los registros censales de la ciudad de Tunja, y los métodos de proyección de población recomendados por el RAS 2000.

B. Análisis hidrológico

Para análisis hidrológico del embalse se tuvo disponible información hidrometeorológica de siete estaciones que se encuentran dentro de la zona de estudio, tal como se puede observar en la figura 2. Una vez realizada la revisión y el análisis de la información disponible se decidió el empleo del método Thomas, como lo plantean Fragala y otros (2000), para el análisis hidrológico de las cuencas aferentes al embalse. Lo anterior, debido a que las principales cuencas cuentan con información limnigráfica, permitiendo la posibilidad de calibrar los parámetros del modelo hidrológico a partir de la comparación de los caudales simulados y observados.

El proceso de calibración de las cuencas instrumentadas se realizó por medio del algoritmo de la colonia de hormigas, como lo plan-

tea Coy (2005), desarrollado para el software Matlab, mediante el cual se calcularon los valores de los coeficientes a,b,c,d, característicos del modelo hidrológico seleccionado. En la figura 2 se puede apreciar la distribución espacial de las estaciones empleadas en el estudio hidrológico.

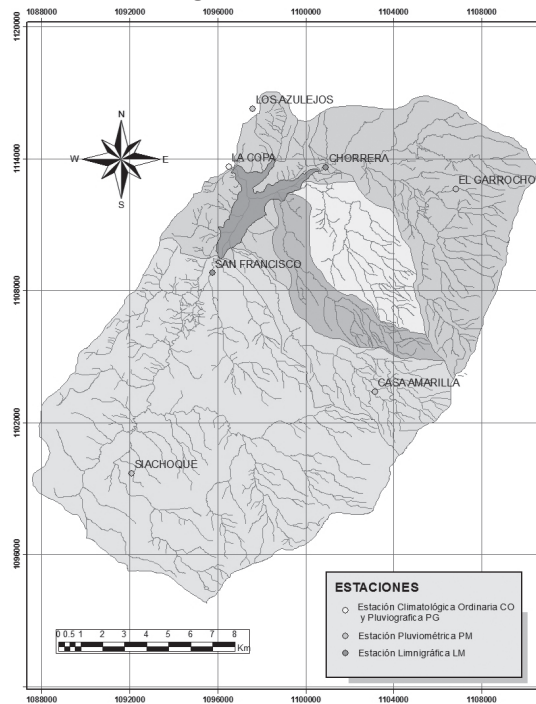


FIGURA 2. ESTACIONES HIDROCLIMÁTICAS. Fuente: Autores.

Teniendo en cuenta que en el área de estudio se encuentran algunas cuencas sin instrumentación, fue necesario asignarles los parámetros calibrados a partir de la similitud de comportamientos así como del análisis de las características generales de las mismas. Una vez definidos los parámetros a trabajar se establecieron los caudales generados por cada una de las cuencas, así como la precipitación directa sobre el embalse.

Definidas las entradas al embalse, se procedió a cuantificar las salidas del sistema, caracterizadas principalmente por el caudal concesionado al distrito de riego Usochicamocho, la evapotranspiración, las pérdidas por infiltración y el caudal ecológico, aspectos necesarios para realizar la simulación de la operación del embalse a nivel mensual.

Una vez que se estableció el comportamiento del embalse se realizó la propuesta de regulación para el caudal del embalse de manera que se pueda aprovechar de manera

sostenible y sin riesgo a sufrir una disminución en el nivel por debajo del mínimo establecido. Esta regulación determina el caudal a extraer del embalse a nivel mensual, de manera que se satisfagan las diferentes demandas de consumo antes mencionadas y sin comprometer la disponibilidad del embalse.

IV. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Para el período de diseño se obtuvo una población de 306,298 habitantes y teniendo en cuenta que para el cálculo de la dotación bruta se tomó como dotación neta la máxima registrada en los datos de consumo histórico de la ciudad (resolución 2320 de 2009), se obtuvo un caudal máximo diario de 664.5 l/s, para un caudal de diseño de 394 l/s (teniendo en cuenta que actualmente el promedio de caudal ofertado por el embalse de teatinos es de 280 l/s).

A. Calibración subcuencas La Chorrera y San Francisco

Para realizar la calibración son necesarios registros de precipitación media multianual, caudales medidos a la salida de la cuenca y la determinación de la evapotranspiración potencial. Los dos primeros se definen a partir de la información histórica recopilada y analizada, mientras que en función de la disponibilidad de información climática disponible, la evapotranspiración se definió por medio del método de Thornthwaite.

1) Subcuenca La Chorrera

La calibración de esta subcuenca se realizó con la información de la estación limnigráfica La Chorrera, la estación pluviométrica El Garrocho y datos de temperatura de la estación La Copa, como se muestra en la figura 3. En el cuadro I se pueden observar los resultados para algunas de las simulaciones realizadas en función de la variación de los parámetros de entrada al modelo (número de hormigas y de iteraciones).

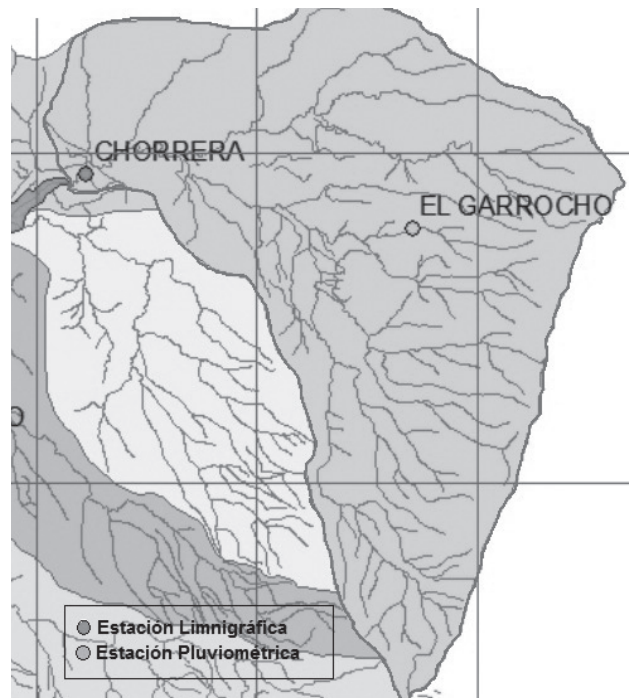


FIGURA 3. ESTACIONES HIDROCLIMÁTICAS. Fuente: Autores.

CUADRO I RESULTADOS SIMULACIONES MÉTODO DE THOMAS - CHORRERA.

Fuente: Autores.

N	N° Hormigas	N° iteraciones	a	b	c	d	Swo	Sgo	Coefficiente Correlación	Tiempo ejecución (min)
1	250	5	0.841	302	0.743	0.015	49	246	0.91	0.37
2	300	5	0.949	238	0.221	0.061	86	52	0.97	0.50
3	500	10	0.833	207	0.679	0.051	39	72	0.85	1.30
4	550	10	0.860	293	0.680	0.121	58	33	0.91	1.45

Se logró obtener un valor de correlación entre el valor de caudal observado y el caudal simulado con la metodología de Thomas de 0.97 y 0.91. En las figuras 4 y 5 se puede observar el comportamiento de los caudales, el real y el simulado, para cada uno de los valores de correlación antes mencionados.

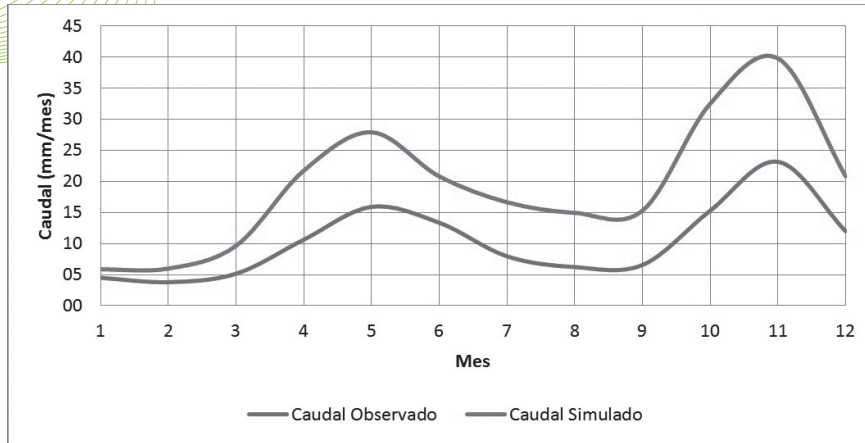


FIGURA 4. CAUDAL SIMULADO C=0.97. Fuente: Autores.

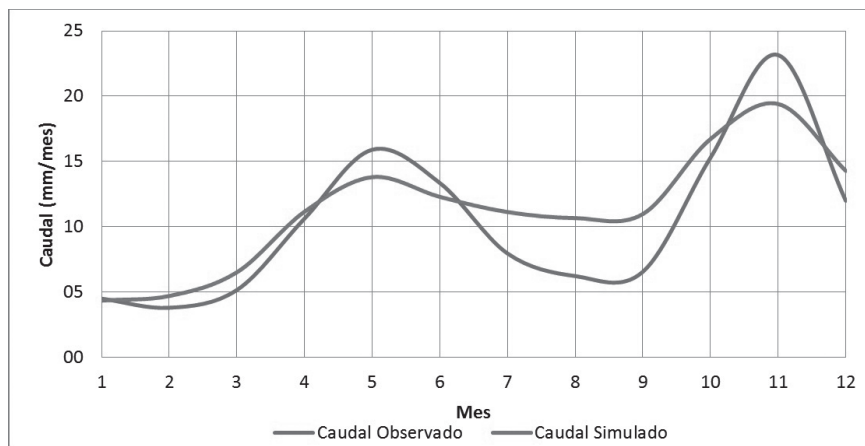


FIGURA 5. CAUDAL SIMULADO C= 0.91. Fuente: Autores.

Aunque en los resultados se puede notar una diferencia marcada en los rangos de caudal para algunos meses, se observa un ajuste del comportamiento entre el caudal simulado y observado, lo cual garantiza la validez de los valores obtenidos para los coeficientes que utiliza el método.

2) Subcuenca San Francisco

La calibración de este río se realizó con la Información de la estación limnigráfica San Francisco, la estación pluviométrica Siachoque y datos de temperatura de la estación La Copa, como se muestra en la figura 6. En este caso el coeficiente de correlación más cercano a uno fue 0.85, en la figura 7 se pueden observar los comportamientos de los caudales el real y el simulado. Los resultados de la simulación se muestran en el cuadro II.

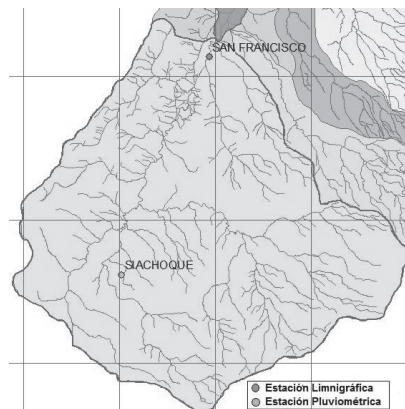


FIGURA 6. SUBCUENCA S. FRANCISCO. Fuente: Autores.

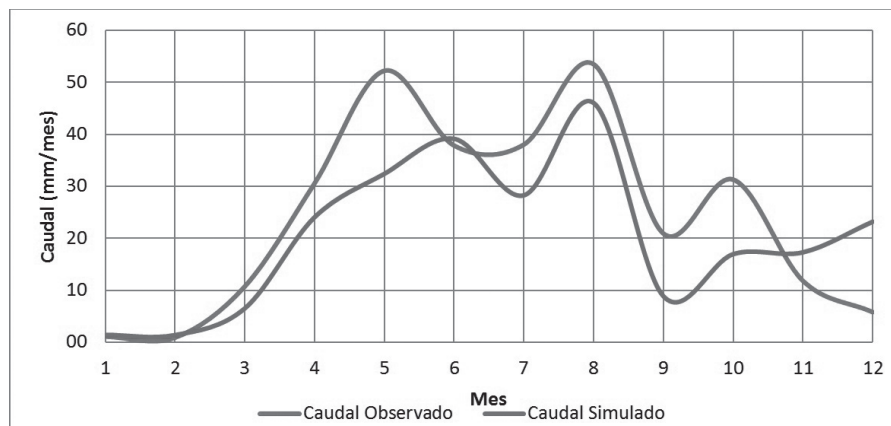


FIGURA 7. CAUDAL SIMULADO C=0.85. Fuente: Autores.

CUADRO II VARIABLES MÉTODO DE THOMAS DE DIFERENTES SIMULACIONES. SAN FRANCISCO

Fuente: Autores.

Nº	Nº Hormigas	Nº iteraciones	a	b	c	d	Swo	Sgo	Coefficiente Correlación	Tiempo ejecución (min)
1	300	5	0.867	72	0.179	0.014	10	85	0.85	0.36
2	500	10	0.834	317	0.531	0.024	35	42	0.62	1.25
3	550	10	0.863	310	0.137	0.017	10	68	0.63	1.39

B. Estimación de caudales de entrada al embalse

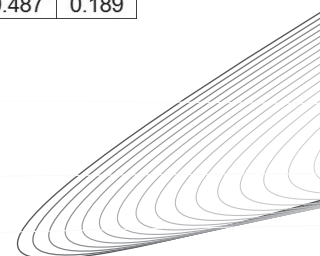
Para realizar el estimativo de los caudales de cada una de las microcuencas que aportan al embalse, se tuvo en cuenta dos escenarios uno crítico y otro medio. El escenario crítico corresponde a los años medio registrados por las estaciones y un consumo máximo de las concesiones que tiene el embalse y el escenario medio contempla un consumo promedio con un año seco de precipitación. Los caudales de entrada de las subcuencas Chorrera y San Francisco, son los medidos a la entrada del embalse en cada caso.

Los caudales de las demás cuencas se simularon con los valores de los coeficientes obtenidos para los coeficientes a,b,c,d, calibrados. En los cuadros III y IV se muestra un resumen de los caudales aportados por cada una de las cuencas para cada escenario planteado.

CUADRO III CAUDALES APORTADOS AÑO MEDIO.

Fuente: Autores.

S. cuenca	Caudales aportados año medio (m³/s)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Chorrera	0.109	0.092	0.125	0.258	0.386	0.324	0.193	0.151	0.159	0.371	0.562	0.290
S. Francisco	0.591	0.624	0.597	1.134	2.388	3.924	4.215	3.517	2.139	1.820	1.778	0.778
Toca	0.022	0.057	0.175	0.505	0.594	0.441	0.441	0.249	0.288	0.564	0.542	0.162
Raiba	0.036	0.040	0.058	0.142	0.251	0.241	0.241	0.164	0.164	0.264	0.292	0.149
Colorada	0.051	0.052	0.083	0.188	0.241	0.180	0.180	0.129	0.132	0.281	0.344	0.180
Leonera	0.009	0.010	0.019	0.049	0.067	0.047	0.047	0.031	0.039	0.076	0.072	0.040
Tuta	0.028	0.069	0.252	0.566	0.535	0.279	0.279	0.177	0.303	0.639	0.487	0.189



CUADRO IV CAUDALES APORTADOS AÑO SECO

Fuente: Autores.

S. cuenca	Caudales aportados año seco (m ³ /s)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Chorrera	0.236	0.065	0.022	0.066	0.029	0.040	0.013	0.004	0.004	0.006	0.017	0.096
S. Francisco	0.663	0.682	0.863	1.042	1.941	2.543	2.502	2.383	1.354	0.888	0.948	0.420
Toca	0.014	0.063	0.064	0.064	0.253	0.299	0.299	0.092	0.406	0.574	0.404	0.233
Raiba	0.031	0.039	0.039	0.039	0.069	0.102	0.102	0.071	0.144	0.249	0.226	0.158
Colorada	0.058	0.047	0.058	0.120	0.118	0.092	0.092	0.067	0.067	0.090	0.190	0.087
Leonera	0.007	0.009	0.012	0.008	0.013	0.015	0.015	0.009	0.015	0.015	0.017	0.017
Tuta	0.012	0.051	0.115	0.021	0.157	0.136	0.136	0.025	0.163	0.113	0.143	0.126

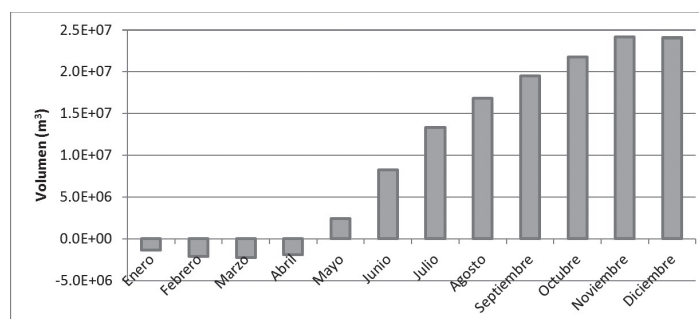
C. Balance hídrico

Para el desarrollo del balance hídrico, se tuvieron en cuenta las entradas: los caudales que aporta cada una de las subcuencas y la precipitación sobre el embalse. También, las salidas: el consumo del distrito Usochicamocha, el caudal ecológico, y evaporación sobre el embalse.

1) Disponibilidad hídrica

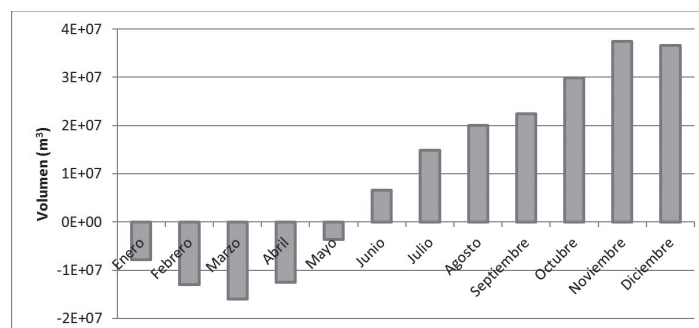
Un primer escenario analizado consiste en establecer unas condiciones para un año seco y un consumo promedio de la concesión usochicamocha. Éste demostró una disponibilidad de 24'054.164 de m³ al final del año, como se muestra en la figura 8. El volumen disponible se calcula suponiendo condiciones de embalse vacío, por esta razón se presentan valores negativos al inicio del año.

FIGURA 8. DISPONIBILIDAD MENSUAL ESCENARIO 1.
Fuente: Autores.



Para el segundo escenario analizado se trabaja con el máximo consumo concesionado por parte del distrito de riego y un año medio de precipitación. Este análisis demostró una disponibilidad de 36'541.289 de m³ al final del año. En la siguiente figura se puede observar el comportamiento de los volúmenes almacenados a nivel mensual. En este escenario también se inicia de un volumen de almacenamiento igual a cero.

FIGURA 9. DISPONIBILIDAD MENSUAL ESCENARIO 2.
Fuente: Autores.



Como se puede observar, para los escenarios planteados existe un déficit durante los primeros meses del año, sin embargo, teniendo en cuenta que el análisis se realiza a partir de embalse vacío, el déficit se compensa por el almacenamiento presentado a partir del mes de mayo o junio (en función del escenario analizado).

2) Operación del embalse

El caudal entregado por parte del embalse al río TUTA, comprende las demandas del caudal ecológico, el consumo del distrito de riego y la demanda estimada para el acueducto de la ciudad de Tunja.

En las figuras 10 y 11 se muestran los volúmenes y caudales de operación del embalse teniendo en cuenta los tres consumos mencionados. Se analizan dos escenarios, uno con un consumo promedio del distrito y el segundo con un consumo máximo del mismo.

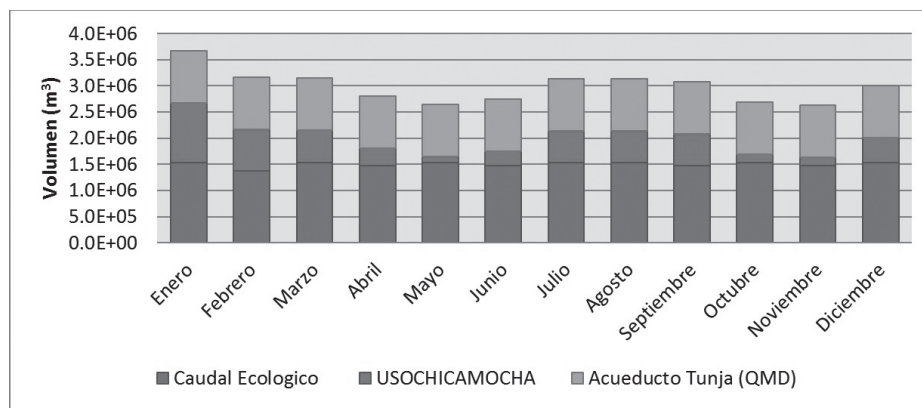


FIGURA 10. OPERACIÓN DEL EMBALSE CON CONSUMO PROMEDIO DEL DISTRITO DE RIEGO. Fuente: Autores

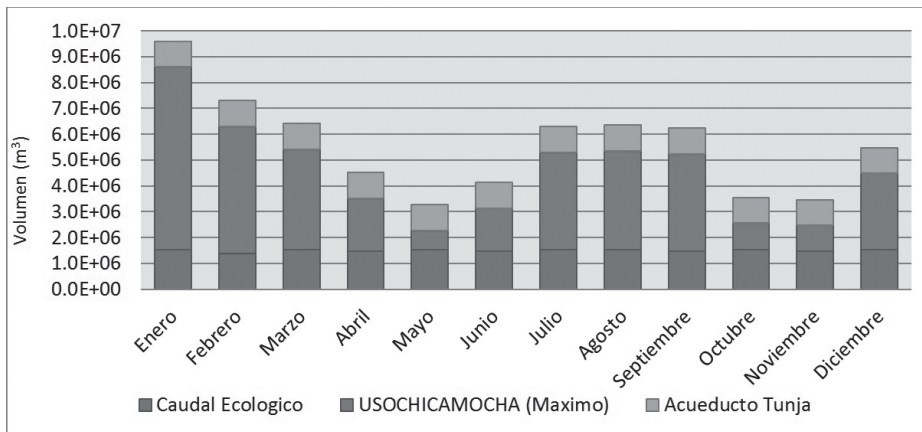
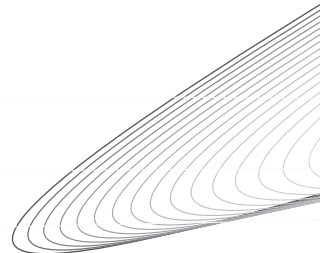


FIGURA 11. OPERACIÓN DEL EMBALSE CON CONSUMO MÁXIMO DEL DISTRITO DE RIEGO. Fuente: Autores.

Teniendo en cuenta que la disponibilidad de agua no es constante para todos los meses, no es posible realizar una operación como la que se plantea. Por lo anterior, se propone realizar una regulación del caudal de salida del embalse de manera que se pueda cumplir con las demandas de caudal necesario, acueducto de Tunja, distrito de riego y caudal ecológico.



3) Regulación

Para realizar este procedimiento, es necesario definir el comportamiento del embalse a partir del primer año de funcionamiento, estableciendo la ecuación de balance hídrico para el embalse a nivel mensual y así definir el almacenamiento al final del período de análisis. Este procedimiento fue realizado para los escenarios planteados en el numeral 4.3.1 y los resultados pueden ser observados en las figuras 12 y 13.

FIGURA 12. DÉFICIT Y EXCESOS ESCENARIO 1.
Fuente: Autores.

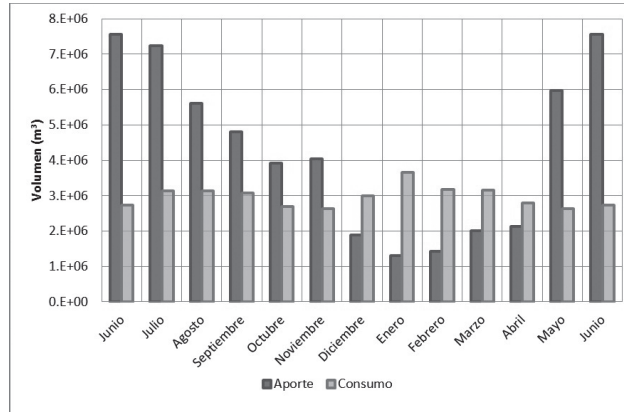
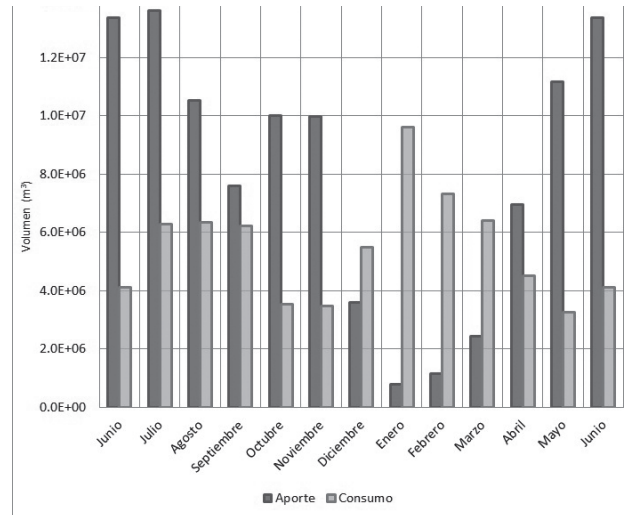


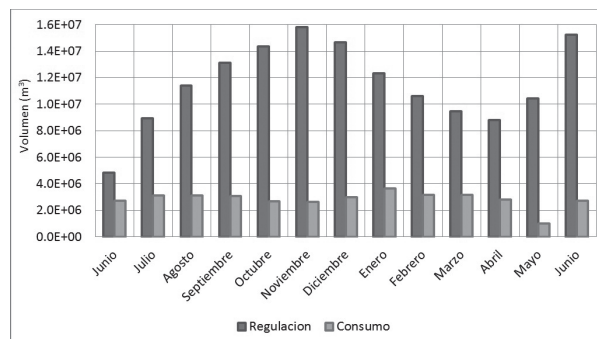
FIGURA 13. DÉFICIT Y EXCESOS ESCENARIO 2.
Fuente: Autores.



Como se puede observar en las anteriores gráficas, existen meses en los cuales las entradas al embalse (aportes) son menores a las salidas (consumo), por lo cual se requiere verificar la variación a nivel mensual del volumen almacenado en el embalse, con el fin de establecer la posibilidad de considerarlo como una alternativa de fuente de abastecimiento para la ciudad.

Para el análisis de regulación se simula el comportamiento del embalse a nivel mensual teniendo en cuenta la totalidad de las variables especificadas con anterioridad. La figura 14 presenta los resultados obtenidos para el escenario uno, el cual presenta un año hidrológico iniciado en el mes de junio.

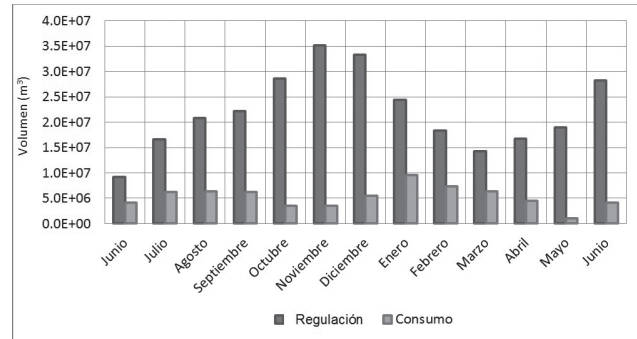
FIGURA 14. REGULACIÓN DEL VOLUMEN ALMACENADO ESCENARIO 1.
Fuente: Autores.



Al realizar el análisis con un volumen inicial de almacenamiento de 7.5 Mm^3 , correspondiente al almacenamiento del mes de junio, se presenta una tendencia creciente, lo que indica que para este escenario no se tendrán dificultades de disponibilidad de agua para la ciudad.

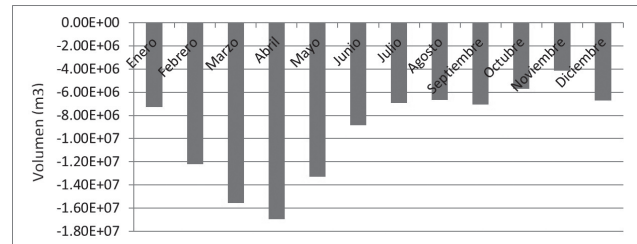
El comportamiento encontrado para el escenario 2 presenta la misma tendencia descrita anteriormente. Sin embargo, los caudales de excedencia a nivel mensual son mayores, lo anterior debido a que la diferencia entre las precipitaciones medias y mínimas es mayor a la encontrada entre caudales máximos y medio del distrito de riego. La gráfica 15, presenta los resultados encontrados para un año hidrológico comenzando en el mes de junio, con un volumen medio de almacenamiento de 9.25 Mm^3 .

FIGURA 15. REGULACIÓN DEL VOLUMEN ALMACENADO ESCENARIO 2.
Fuente: Autores.



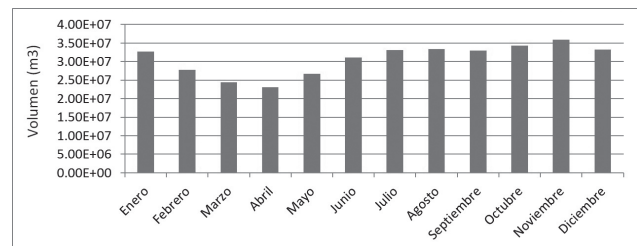
Teniendo en cuenta los datos históricos analizados se decidió analizar la regulación para un escenario crítico, caracterizado por mínimas precipitaciones y máximos consumos en el distrito de riego. Los resultados encontrados indican que para la totalidad de los meses la demanda es mayor a la oferta, por lo cual en ninguno de los meses se cuenta con disponibilidad instantánea de agua, tal como se presenta en la figura 16.

FIGURA 16. DISPONIBILIDAD HÍDRICA CONDICIONES CRÍTICAS.
Fuente Autores.

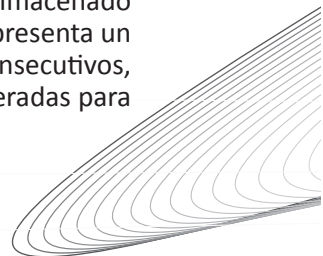


Teniendo en cuenta el resultado anterior, se verifica el comportamiento a nivel mensual teniendo en cuenta el almacenamiento mensual, iniciando con un valor de 40 Mm^3 . Este valor se definió teniendo en cuenta el comportamiento presentado para el período 2000 – 2001 (período de máxima sequía en la zona de estudio). Los resultados encontrados pueden ser observados en la figura 17.

FIGURA 17. REGULACIÓN CONDICIONES CRÍTICAS.
Fuente Autores.



Como se puede observar, se presenta una tendencia decreciente del volumen almacenado en el embalse, llegando a valores de 23 Mm^3 (mes de abril). Al finalizar el año se presenta un volumen de almacenamiento de 33 Mm^3 . Realizando simulaciones para años consecutivos, se pudo verificar que estas condiciones de funcionamiento no pueden ser consideradas para más de 4 años consecutivos.



V. CONCLUSIONES

El presente informe se realizó para establecer la posibilidad de tener en cuenta el volumen de almacenamiento del embalse La Copa como fuente alterna para la ciudad de Tunja, definido únicamente en términos de cantidad de agua. Una fase posterior consiste en realizar los estudios de calidad que permitan establecer la necesidad de tratamiento para ser considerada apta para el consumo humano. Así mismo, es necesario analizar las implicaciones legales a tener en cuenta en términos de concesiones.

La disponibilidad hídrica del embalse es favorable para su implementación como una fuente alterna de abastecimiento futuro de agua para la ciudad de Tunja, pues se pudo determinar que si se garantiza una regulación de la válvula de salida con los caudales mensuales establecidos, no habrá déficit en un escenario promedio de consumo y condiciones hidrológicas normales.

Los caudales de todas las fuentes de entrada al embalse La Copa mediante la calibración del modelo de Thomas fueron calculados teniendo en cuenta dos escenarios: condiciones secas y medias. Para un escenario de año seco de precipitación y un consumo promedio del distrito de riego se estimó una disponibilidad aproximada de 24 millones de metros cúbicos al final del año, con lo cual se pudo establecer la correspondiente regulación del caudal de salida que permita una explotación sostenible del embalse. Para el escenario crítico de máximo consumo del distrito de riego con unas condiciones medias de precipitación se pudo estimar una disponibilidad aproximada de 36 millones de metros cúbicos al final del año. Ese comportamiento se debe fundamentalmente a los consumos tenidos en cuenta para el distrito de riego.

Se determinaron los caudales de salida mensuales que debe regular la válvula a la salida del embalse. En un escenario seco de condiciones climáticas y un promedio de consumo por parte del distrito de riego tiene como máximo caudal $1.413 \text{ m}^3/\text{s}$ en el mes de enero y un caudal mínimo de $1.016 \text{ m}^3/\text{s}$ en el mes de noviembre, definidos principalmente a partir de los resultados hidrológicos obtenidos.

Aunque en los resultados de la calibración de las cuencas La Chorrera y San Francisco se puede notar una diferencia marcada entre las curvas representativas de caudal simulado y caudal observado, no es muy relevante, debido a que los rangos de los caudales son pequeños y el valor objetivo adquiere una mayor sensibilidad.

La optimización de colonia de hormigas demuestra ser una muy buena metodología para la solución de problemas que involucren una gran cantidad de variables relacionadas entre sí, pues permite de alguna manera obtener resultados confiables de manera rápida y sencilla.

REFERENCIAS

Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2000). Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico. Bogotá.

Coy, C. (2005). Implementación en hidroinformática de un método de optimización matemática basado en la colonia de hormigas. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.

Chow Ven T., Maidment, D., Mays L.,. (1994). Hidrología Aplicada. Mc. Graw Hill.

Fragala, F., Obregón, N., Caro, C., Flechas, F. y García, O. (2000). Aproximación a la estimación de la recarga en los acuíferos mediante optimización matemática multidimensional de un modelo de balance hídrico. Bogotá. Pontificia Universidad Javeriana.

IDEAM. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (2004). Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) para Tunja.

Monsalve. G. (1995). Hidrología en la Ingeniería. Escuela Colombiana de Ingeniería.

