

**OPTIMIZACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DEL  
MANEJO DEL RECURSO HÍDRICO EN LA SABANA  
DE BOGOTÁ.**

**IVÁN ALFREDO ALEÁN RUIZ**

**TESIS**

**Para optar por el título de**

**Magíster en Ingeniería Civil**



**Universidad  
de los Andes**

**Magíster en Ingeniería Civil.  
Universidad de los Andes.  
2004.**

## **TABLA DE CONTENIDO.**

<b><u>1</u></b>	<b><u>INTRODUCCIÓN.</u></b>	<b><u>4</u></b>
<b><u>2</u></b>	<b><u>MARCO GENERAL DEL MANEJO DE RECURSOS HÍDRICOS.</u></b>	<b><u>7</u></b>
<b><u>3</u></b>	<b><u>ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN ADOPTADA.</u></b>	<b><u>11</u></b>
3.1	DESCRIPCIÓN GENERAL DE MODIFIED SIMYLD (MODSIM). _____	15
<b><u>4</u></b>	<b><u>ENFOQUE Y DESCRIPCIÓN DEL CASO ESTUDIO.</u></b>	<b><u>20</u></b>
<b><u>5</u></b>	<b><u>DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES A LO LARGO DE LA CUENCA DEL RÍO BOGOTÁ.</u></b>	<b><u>22</u></b>
5.1	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA Y COMPONENTES DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE. _____	27
5.1.1	SISTEMA TUNJUELO. _____	28
5.1.2	SISTEMA CHINGAZA. _____	33
5.1.3	SISTEMA NORTE. _____	37
5.2	DESCRIPCIÓN DEL DISTRITO DE RIEGO LA RAMADA. _____	42
5.3	DESCRIPCIÓN DE CADENAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA. _____	43
5.3.1	CADENA CASALACO. _____	44
5.3.2	CADENA PAGUA. _____	45
<b><u>6</u></b>	<b><u>DATOS UTILIZADOS Y GENERALIDADES EN LA APLICACIÓN DEL CASO ESTUDIO.</u></b>	<b><u>48</u></b>
6.1	NODOS DE DEMANDA URBANA. _____	51
6.2	NODOS DE DEMANDA AGRÍCOLA. _____	52
6.3	NODOS DE DEMANDA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA. _____	53

<b>7</b>	<b>RESULTADOS.</b>	<b>54</b>
<b>7.1</b>	<b>ESCENARIO BASE.</b>	<b>54</b>
7.1.1	USO PARA AGUA POTABLE.	57
7.1.2	USO DE AGUA PARA RIEGO.	63
7.1.3	USO DE AGUA PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA.	65
<b>7.2</b>	<b>ESCENARIO EXPANSION RAMADA</b>	<b>67</b>
<b>7.3</b>	<b>ESCENARIO CRECIMIENTO DEMANDA AGUA POTABLE.</b>	<b>72</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.</b>	<b>76</b>
<b>9</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>79</b>

## 1 INTRODUCCIÓN.

Desde su nacimiento a lo largo de la cuenca del río de Bogotá se desarrolla un sistema hídrico/hidráulico complejo que genera necesidades de agua para generación de energía (EMGESA y EEB<sup>1</sup>), suministro de agua potable (EAAB<sup>2</sup>), distritos de riego (La Ramada y Tocaima-Girardot) y control ambiental (CAR<sup>3</sup>). Los “dueños” de estas necesidades son diversos, cada uno con diferentes intereses, políticas de manejo, fuentes, derechos de uso, rentabilidades, restricciones ambientales para su operación e impactos y desde una óptica global y legal con diferentes prioridades para la asignación y uso del recurso. Por otra parte se tienen varios embalses de varias capacidades, diferentes propietarios, políticas de operación, regulando sus descargas y cooperando en el cumplimiento de las demandas de los grupos actuantes, con la ayuda de toma decisiones concertadas entre los representantes de cada uno de los actores en la asignación del recurso. En todo el sistema para su funcionamiento a expensas de la hidrología presentada a lo largo de la cuenca.

El presente documento de investigación presenta la modelación integrada en la cuenca del río Bogotá de los hidrosistemas importantes y sus interrelaciones. El modelo está basado en un procedimiento de optimización que busca minimizar los costos totales del sistema de la operación en los componentes para el periodo de evaluación comprendido entre 1997 al 2002. La finalidad de esta modelación es contrastar la operación actual de los

---

<sup>1</sup> EEB, Empresa de Energía de Bogotá.

<sup>2</sup> EAAB, Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

<sup>3</sup> CAR, Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.

hidrosistemas con lo estimado y sugerido con la aplicación del modelo, y analizar las alternativas propuestas en la modelación y la factibilidad de su aplicación.

El modelo matemático es de programación lineal y su función objetivo minimiza los costos de transporte del agua entre componentes, tiene como algoritmo de solución la Relajación Lagrangiana y el montaje se realizó en MODSIM<sup>1</sup>, aplicación desarrollada por John Labadie en Colorado State University (1984).

El modelo tiene involucrado tres aspectos dentro de su estructura: la parte técnica, pues la operación de los componentes del sistema obedece a leyes físicas y están incluidos valores límites y formas de operación de los componentes; la parte económica, porque a través de registros y entrevistas con las entidades involucradas se encontraron costos de operación de cada uno de los componentes por unidad de volumen a lo largo del periodo de evaluación, y la parte ambiental que de manera somera se aborda con la inclusión de límites mínimos de caudal en algunos tramos de corrientes, estos suministrados por las entidades involucradas.

Este documento esta organizado de la siguiente manera: Descripción, óptica general y alternativas del manejo de los recursos hídricos en el Capítulo 2. Descripción de solución planteada y herramienta computacional adoptada para la solución en el Capítulo 3. Descripción y dimensionamiento de la problemática en el Capítulo 4. Funcionamiento, componentes, infraestructura, operación e influencia de los cuerpos de agua en la cuenca del río Bogotá en el Capítulo 5. Datos requeridos, inconvenientes y todas las partes involucradas en el desarrollo del modelo y su aplicación en el Capítulo 6. Presentación de resultados obtenidos de la modelación, análisis de resultados y comparación de la

---

<sup>1</sup> *Modified Symild*

modelación con el funcionamiento real en el Capítulo 7. Conclusiones, recomendaciones y futuro de la investigación en el Capítulo 8.

## **2 MARCO GENERAL DEL MANEJO DE RECURSOS HÍDRICOS.**

Desde los inicios de la humanidad civilizada el hombre ha dedicado grandes esfuerzos físicos y mentales hacia el manejo y control del agua, probablemente incentivada por algún evento extremo. Civilizaciones ubicadas en India, Pakistán, Mesopotamia y Egipto, presentan vestigios de la construcción de obras de gran impacto en la época para la utilización y control del recurso hídrico (Hall W. y Dracup J, 1974)

Los sistemas de recursos hídricos están compuestos por elementos y componentes que espacial y temporalmente se encuentran asociados con el agua; estos sistemas no poseen la influencia directa del hombre y su comportamiento es marcado por variables naturales.

La necesidad de la sociedad para satisfacer labores y usos básicos en el tiempo, desarrollar y mantener el sector industrial, los sistemas productivos, el sector agropecuario, las actividades de recreación y la conservación misma de la naturaleza (en ocasiones no tenido en cuenta) como actividades generales importantes en el tiempo, han llevado al uso del recurso hídrico con una connotación de un insumo finito variable en el tiempo y en el espacio en términos de calidad y cantidad, y de motor y actor importante de muchos de los procesos involucrados en las actividades mencionadas (Jenkins et al, 2004).

Sin distar en esencia de los inicios de la civilización, el uso y manejo del recurso hídrico trae consigo la construcción de estructuras de almacenamiento, regulación del flujo de agua en las corrientes, redireccionamiento de los cauces naturales y construcción de conducciones para el transporte del agua, construcción de estructuras que regulen y/o mejoren la calidad del agua, y políticas de manejo, entre otras cosas (Jenkins et al, 2004).

Cada actividad en la sociedad con requerimientos de agua posee diferentes intereses en los campos político, social, ambiental<sup>1</sup> y económico (Cai et al, 2003; Draper et al, 2003; Belaineh et al, 1999) que pretenden ser defendidos en ocasiones de manera conflictiva<sup>2</sup> (Hall W. & Dracup J, 1974); sin embargo, situaciones como la presencia limitada del recurso y múltiples fuentes para diversos propósitos, generan “disputas” por el uso del agua entre los demandantes pues cada uno busca obtener el máximo beneficio, tratando de conseguir la cantidad de agua necesaria para su fin buscando obtener su mayor rendimiento social, productivo y/o financiero. Estas diferencias dan una relevante importancia a las organizaciones, metodologías y personas involucradas en la toma de decisiones para el manejo de agua.

Las políticas de manejo del recurso hídrico buscan asignar espacial y temporalmente la cantidad del recurso teniendo en cuenta la cantidad y calidad del recurso, requerimientos según la actividad, participación en las inversiones de infraestructura, normatividad ambiental, complejidad y funcionamiento del sistema. Las decisiones que dan pie a las políticas de manejo pueden ser tomadas de diversas maneras, basadas por ejemplo en la experiencia y conocimiento del sistema, en las prioridades en la asignación del recurso hídrico, en los intereses políticos, en intereses particulares, en el uso de sistemas de apoyo de decisiones DSS (del inglés, Decision Support Systems), (Labadie y Sullivan, 1986; Pingry et al, 1991) y en modelos de simulación – optimización (Belaineh et al, 1999; Hearn y Hatfield, 2002; Draper et al, 2003) . Todas éstas en esencia buscan reducir las

---

<sup>1</sup> Grupos ambientales han librado enfrentamientos a diferentes escalas en contra de la realización de grandes proyectos, p.e :construcción de la presa de Hetch Henry, en el parque nacional de Yosemite, Construcción de la presa Bridge Canyon en el Central Arizona Project

<sup>2</sup> La “Guerra del Valle Owens” entre los estados California y Arizona, que demoró aproximadamente 10 años. El conflicto por las aguas del río Colorado entre 1920 y 1968 ocasiono disputas de toda índole que solo culminó con la realización del Central Arizona Project, que lograba satisfacer a las partes.



alternativas de decisión eliminando opciones o decisiones menos viables económica, social y política.

Llegar a un conjunto de alternativas de decisión factibles en todos los aspectos, en un sistema tan complejo como el concerniente a los recursos hídricos debería ser producto de la aplicación de una metodología racional y lógica de selección y filtro. Dichas metodologías deberían contener la incidencia de los aspectos políticos, sociales, ambientales, técnicos, operativos y económicos, todos al tiempo.

La modelación matemática es una alternativa que puede utilizarse y sugerirse como metodología racional de solución, y la incidencia de los aspectos mencionados anteriormente es función del tiempo de desarrollo, información disponible, voluntad de implicados, complejidad del sistema y capacidades técnicas del modelador.

EL uso de modelos matemáticos bien elaborados permite contemplar y conocer la respuesta del sistema bajo diferentes escenarios, acción que sería muy complicada si no imposible con otro tipo de metodología (Labadie y Sullivan, 1986; Labadie, 2004). Así, el área de la modelación aumenta su valor agregado a medida que el sistema sea mas complejo.

Las finalidades de la modelación de este tipo de sistemas de recursos hídricos tienen dos líneas principales: en primer lugar la que buscan la comprensión del funcionamiento del sistema mediante modelos de simulación (Belaineh et al, 1999) y en segundo lugar la de investigaciones y estudios que permitan mediante modelos de optimización maximizar los beneficios o minimizar la variable de interés del sistema (Draper et al, 2003; Jenkins et al, 2004; Randall, 2001).

La complejidad en los sistemas de recursos hídricos sugiere la utilización de metodologías válidas para la toma de decisiones sobre el sistema de recursos hídricos, que logren acoplar,

reunir y modelar con algún criterio dichos sistemas. Dentro de los criterios que ayuden a la toma de decisiones se encuentra el componente económico, que por medio de un modelo matemático de optimización podría llegar a ser el máximo si se habla de beneficios (Draper et al, 2003; Jenkins et al, 2004) y el mínimo si es de costos (Hearn y Hatfield, 2002; Randall, 2001).

### **3 ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN ADOPTADA.**

En concordancia con lo pasmado en el capítulo anterior, se reafirma que la complejidad, tipo y funcionamiento del sistema, la gran cantidad y múltiples fuentes de información, requieren la generación de una opción de solución robusta que permita representar el comportamiento del sistema, restringir el funcionamiento, tener en cuenta el factor económico relacionado con la operación de sus componentes, manejar grandes volúmenes de información y generar soluciones que puedan ser contrastadas con la operación actual.

La Investigación de Operaciones permite la búsqueda de soluciones óptimas a problemas complejos, que pueden estar física y matemáticamente soportados, con múltiples alternativas de solución y cuantiosos volúmenes de datos, aspectos que a través de otra manera sería muy poco probable manejarlo. Por tal motivo se adoptó como alternativa metodológica para encontrar la solución la problemática en este documento planteada la utilización de un modelo matemático de optimización de tipo lineal que tenga como objeto final la minimización de los costos asociados al funcionamiento del sistema sujeto a la conservación de masa en todos los nodos del sistema y límites en la cantidad de flujo en los tramos del sistema, matemáticamente representado por la siguiente estructura:

***FUNCIÓN OBJETIVO:***

$$\text{Min } Z = \sum \sum C_{ij} \cdot X_{ij}.$$

***SUJETO A:***

- $\sum X_{ji} = \sum a_{ij} X_{ij} + b_j$ ; Para todos los nodos  $j$ .

- $X_{ij} \leq u_{ij}$  ; Para todos los tramos.
- $X_{ij} \geq l_{ij}$  ; Para todos los tramos.

Donde:

$X_{ij}$  = Flujo del nodo i al nodo j

$C_{ij}$  = Costos asociados al flujo del nodo i al j.

$b_j$  = Flujos que llegan al nodo j.

$a_{ij}$  = Pérdidas/Ganancias en el tramo.

$u_{ij}$  = Límite máximo de flujo en el tramo.

$l_{ij}$  = Límite mínimo de flujo en el tramo.

Dicho modelo si bien es muy importante en su concepción, validez y alcance, solo tiene en cuenta los aspectos técnicos, económicos y ambientales, dejando por fuera varios aspectos que incidirían en un valor hasta ahora incierto en la toma de decisiones encaminadas a elaborar políticas de manejo robustas, esto por las limitantes de un grupo interdisciplinario de trabajo<sup>1</sup>, tiempo y recursos para su elaboración y, apoyo y acompañamiento incondicional de entidades involucradas.

Debido al alcance inicialmente planteado para el presente trabajo de investigación y el tiempo estimado de trabajo se consideró como opción la búsqueda de alternativas en el

---

<sup>1</sup> California Department of Water Resources en California University, Davis desarrolló un modelo, teniendo en cuenta la gran mayoría de los aspectos incidentes en la toma de decisiones para el manejo de recursos hídricos, con un equipo de 16 personas en donde se encontraban estudiantes de Maestría, PhD de las áreas de Economía, Sistemas, Ingeniería Civil, Ingeniería Ambiental, Ingeniería Industrial y Economía.

mercado de herramientas computacionales a través de la web que permitieran la solución del planteamiento sugerido. La elección de la herramienta computacional que lograría representar el modelo sugerido se dió luego de tener en cuenta un grupo de aspectos que se consideraron realmente incidentes en la elección final, estos aspectos fueron: 1. Base matemática y estructura del modelo de optimización, 2. Tipo de herramienta (libre o comercial), 3. Evidencia de aplicaciones realizadas con éxito, 4. Facilidad de comunicación con desarrolladores, 5. Eficiencia en el algoritmo de solución y 6. Complejidad computacional.

Base matemática y estructura del modelo de optimización: se buscó encontrar un modelo con la opción de optimizar el funcionamiento de una red compleja con componentes de almacenamiento, zonas de demanda y nodos de no almacenamiento, en donde la estructura matemática fuera similar a la planteada, o pudiera llegar a ser la misma a través de personalización del código.

Tipo de herramienta computacional: se manejó como una variable lógica pues solamente eran factibles licencias gratuitas (freeware, factible en el presente trabajo). Licencias comerciales estuvieron fuera del alcance de este trabajo.

Las evidencias de aplicaciones realizadas con éxito: a cada alternativa computacional evaluada se le efectuó una búsqueda de aplicaciones con evidencia de éxito, esto buscando minimizar el riesgo de utilizar una herramienta con errores en su codificación o solución. Lógicamente la herramienta con mayor número de evidencias se le asignaba un mayor puntaje.

Eficiencia en el algoritmo de solución: en este aspecto se buscó tener en cuenta las bondades de un algoritmo de solución cuyo método de búsqueda de la solución óptima permitiera encontrar un óptimo global, y que además presentara tiempos de ejecución cortos.

Se buscó además que los desarrolladores de la herramienta computacional tuvieran la disponibilidad y voluntad de cooperación en las dudas que surgieran el proceso de montaje del modelo.

En lo relacionado con la complejidad computacional, se tuvo en cuenta la instalación, manejo y salidas de la herramienta.

Con excepción del tipo de herramienta computacional, el resto de aspectos fueron calificados de 1 a 5, siendo 5 el de mayor valor. Además de esto, a cada aspecto le fue asignado un peso dentro del conjunto, cuya suma es 1 (ver Tabla N° 1).

**Tabla N° 1: Conjunto de aspectos determinantes para la elección de la herramienta computacional adoptada.**

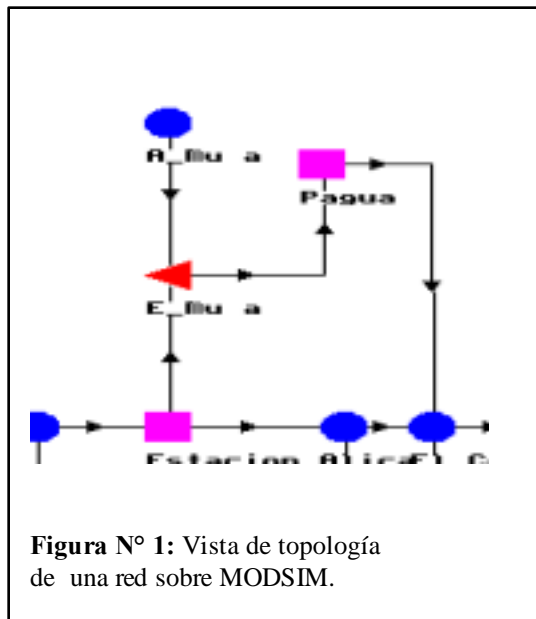
ASPECTO	PONDERACION
Base matemática	0.3
Evidencia de aplicaciones de éxito	0.3
Eficiencia de algoritmo de solución	0.15
Facilidad de comunicación con desarrolladores	0.15
Complejidad computacional	0.1

Luego del tamizado inicial, finalmente llegaron hasta la última instancia tres herramientas computacionales: MODSIM (Labadie,1984), desarrollado en el Water Center en Colorado State University ,CALSIM (2000), desarrollado en California Department of Water Resources , CALVIN (Lund, Howwit and Jenkins,2002), desarrollado en el grupo de investigaciones de Recursos Hídricos en California University, Davis.

Finalmente se decidió por MODSIM (ver Anexo N° 1) por ser el de mayor número de casos reportados de aplicación, excelente respuesta y apoyo de parte de los desarrolladores, documentación adecuada y eficiente algoritmo de solución.

### 3.1 Descripción general de Modified Simyld (MODSIM).

Herramienta computacional desarrollada por Jhon labadie en 1994, en Colorado State University, tipo GUI ( Graphical User Interface) ver Figura N° 1, que emplea técnicas de optimización para la modelación de flujo en redes que representan sistemas de recursos



hídricos de manera eficiente. MODSIM está basado en un modelo de optimización coincidente con el formulado para esta investigación, es decir, tiene como función objetivo la minimización de los costos totales del sistema sujeto a continuidad en los nodos y a capacidades mínimas y máximas en todos los tramos de la red.

MODSIM utiliza un algoritmo eficiente de solución basado en la Teoría de Relajación Lagrangiana, que converge más rápido en la

búsqueda de la solución óptima que los cálculos con números reales y operaciones basadas en matrices (Labadie, 1994).

MODSIM tiene la opción de personalización a través de cualquier lenguaje .net (p.e: PERL) y posee dos opciones de aplicación: la opción de simulación en la cual variando las prioridades o los costos de operación de los componentes se intenta representar los registros históricos de almacenamiento en los embalses, y la opción de planeación, en la cual dado un escenario hidrológico y unas restricciones de demanda encuentra las asignaciones de agua entre los componentes que minimizan los costos del sistema. MODSIM además permite enlazarse en tiempo de ejecución con la herramienta MODFLOW, software de modelación de flujo en acuíferos.

MODSIM ha sido utilizado en múltiples aplicaciones reales de sistemas de recursos hídricos, con buenos y confiables resultados. En el modo de simulación como por ejemplo los casos del río Boise en Idaho, USA ( Bacca, 1999; Frever et al, 1994), la cuenca del río Piracicaba, Sao Paulo, Brazil (Azevedo et al, 1998) donde se incluyó paralelamente la modelación de parámetros de calidad del agua, y la cuenca de río Snake, Idaho ,USA (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation Pacific Northwest Region,2000). En el modo de planeación se ha aplicado con éxito por Labadie (1986) y Randall y Luna (2001).

### ***3.1.1 Tipos de nodos manejados por MODSIM.***

MODSIM maneja tres tipos de nodos dentro de su estructura: 1. Nodos de no-almacenamiento, 2. Nodos de demanda, 3. Nodos de almacenamiento. Los datos introducidos en los nodos se realizan desplegando una ventana haciendo clic derecho sobre el nodo de interés.

Los nodos de no almacenamiento (ver círculos azules en Fig. N° 1) son usados para representar dentro del sistema puntos de confluencia de tributarios, compuertas sobre ríos, puntos de retorno de aguas residuales y puntos de nacimientos de ríos.

Los datos de entrada requeridos en los nodos de no almacenamiento son mostrados en la Fig N° 2, existen tres grupos de datos que introducir: Nombres/capacidades y flujos de entrada, estos últimos son decididos por el modelador pues depende de la agregación temporal y periodo de evaluación del modelo.



Node Properties (19)

Node Name: A\_Chuzza

Name/Capacities | Import Node Data | Inflow

	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Jan	11117.95	1762.56	13954.46	14034.82	5951.23	6213.89
Feb	23357.38	1238.98	19910.02	13008.38	8128.51	3389.47
Mar	10740.38	6048.00	17940.10	14305.25	11018.59	27775.01
Apr	30357.50	24546.24	26669.09	27656.64	30528.58	40360.03
May	52328.16	60395.33	31904.93	71925.41	51305.18	60783.26
Jun	36806.40	75038.40	50217.41	54351.65	57267.65	44473.54
Jul	64215.07	70894.66	26912.74	41040.86	47739.46	84776.54
Aug	35786.02	32494.18	24229.15	36667.30	52119.07	83700.00
Sep	17967.74	16518.82	28924.13	22063.60	50650.27	87098.98
Oct	15215.90	14262.91	35737.63	24164.35	15604.70	63285.41
Nov	9810.72	17612.64	15303.17	25868.16	26663.90	19600.70
Dec	3974.40	21909.31	10761.98	17533.15	9829.73	7555.68

OK Apply Copy Cancel

Figura N° 2: Ventana desplegada para inclusión de datos requeridos para la modelación para los nodos de no almacenamiento.

Los nodos de demanda (ver Fig. N° 1, cuadros rosas) son utilizados para representar usos del recurso hídrico y estaciones de bombeo.

En los nodos de demanda los usos de agua pueden ser introducidos como una serie histórica o con un valor anual afectado por un patrón de distribución mensual. A través de los nodos de demanda se tienen en cuenta los caudales de retorno hacia otros nodos generados por el uso del agua y como datos de entrada importante se encuentran los costos del sistema (ver Fig N° 3).

Demand Properties (64)

Demand Name: Dem\_Bog

Name/Capacities | Groundwater | Demand Node Data | Demand Seasonal Distributions | Time Series | Watch Links

	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Jan	38880.00	40176.00	41472.00	42768.00	44064.00	45360.00
Feb	38880.00	40176.00	41472.00	42768.00	44064.00	45360.00
Mar	38880.00	40176.00	41472.00	42768.00	44064.00	45360.00
Apr	38880.00	40176.00	41472.00	42768.00	44064.00	45360.00
May	38880.00	40176.00	41472.00	42768.00	44064.00	45360.00
Jun	38880.00	40176.00	41472.00	42768.00	44064.00	45360.00
Jul	38880.00	40176.00	41472.00	42768.00	44064.00	45360.00
Aug	38880.00	40176.00	41472.00	42768.00	44064.00	45360.00
Sep	38880.00	40176.00	41472.00	42768.00	44064.00	45360.00
Oct	38880.00	40176.00	41472.00	42768.00	44064.00	45360.00
Nov	38880.00	40176.00	41472.00	42768.00	44064.00	45360.00
Dec	38880.00	40176.00	41472.00	42768.00	44064.00	45360.00

OK Apply Copy Cancel

Figura N° 3: Ventana desplegada para inclusión de datos requeridos para la modelación para los nodos de demanda.

Los nodos de almacenamiento (ver triángulos rojos en Fig. N° 1) están definidos por la representación de datos físicos, operacionales de embalses. Los datos de entrada de estos nodos son volúmenes máximos y mínimos, condiciones iniciales, relaciones cota-área-volumen-capacidad hidráulica y curva guía (ver Fig N° 4).

Reservoir Properties (4)

Reservoir Name: **E\_San\_Rafael**

Area/Cap./Elev./Hydraulic Cap.	Power Efficiency Table	Evaporation	Groundwater	Inflow
Name/Capacities	Reservoir Data	Reservoir Data Cont.	Generating Hours	

Priority

Dry	1	2	3	4	Wet
1	1	1	1	1	1

Target Storage

	Dry	1	2	3	4	Wet
Jan	54011.00	57832.00	69291.00	69444.00	64040.00	67901.00
Feb	46008.00	68378.00	58043.00	69139.00	41581.00	68657.00
Mar	29994.00	70072.00	40994.00	68440.00	20250.00	67525.00
Apr	14000.00	69899.00	28518.00	68391.00	3616.00	67961.00
May	6329.00	69219.00	30311.00	68321.00	10046.00	67528.00
Jun	8429.00	66559.00	55960.00	67797.00	35693.00	68681.00
Jul	18621.00	69926.00	69525.00	67750.00	60358.00	65800.00
Aug	25648.00	68059.00	69338.00	68013.00	67844.00	66705.00
Sep	23010.00	51682.00	68080.00	68025.00	67992.00	64223.00
Oct	14229.00	31282.00	69169.00	68728.00	69057.00	64534.00
Nov	13251.00	44553.00	68234.00	69050.00	66729.00	63869.00
Dec	38336.00	68327.00	68965.00	69046.00	67487.00	67550.00

OK Apply Copy Cancel

Figura N° 4: Ventana desplegada para inclusión de datos requeridos para la modelación para los nodos de almacenamiento.

#### **4 ENFOQUE Y DESCRIPCIÓN DEL CASO ESTUDIO.**

Luego del análisis y comprensión del sistema hídrico del río Bogotá, se lograron identificar cuatro tipos de usos principales del agua los cuales, con base en entrevistas y documentación en las diferentes entidades encargadas del manejo del recurso hídrico tienen las siguientes prioridades: 1. suministro de agua potable, 2. riego, 3. generación de energía y 4. “mitigación” ambiental.

Los aspectos mas importantes que hacen parte del escenario bajo el cual se deben tomar decisiones sobre el uso y asignación del recurso hídrico en los subsistemas a lo largo de la cuenca del río Bogotá son los siguientes: diferentes actores para cada uno de los usos, subjetiva y no formal integración de políticas de uso comunes, complejidad en el funcionamiento e interacción de los componentes del sistema, gran cantidad y dificultad en la consecución y compilación de la información hidrológica, poca o nula integración de funcionamiento físico del sistema con los costos relacionados con su funcionamiento, intereses públicos y privados, modelos aislados y poco robustos manejados por separado por cada uno de los actores del sistema y por último, importancia e incidencia regional y nacional del sistema.

Además de lo anterior también habría que agregarle las proyecciones a mediano y largo plazo del crecimiento y la incertidumbre de la demanda para todo los usos generada por éste, por las políticas económicas de globalización (p.e: Tratado de Libre Comercio) que traen consigo la necesidad de mejora y optimización de los recursos, y el cada día mas importante escrutinio público y conciencia ambiental alrededor de la conservación de los recursos naturales (Draper et al, 2003). Esto hace aun más importante y difícil el direccionamiento en el manejo del sistema.

Dicho panorama en la actualidad es tratado por separado por los actores y decisores con modelos simples de simulación del subsistema en particular que a cada entidad le interesa con una posterior concertación en el llamado “Comité Hidrológico de la Sabana” que componen los representantes de cada actividad del sistema y que deciden la operación de éste para el siguiente periodo de tiempo. En dichos comités, como es de suponerse, cada parte intenta que la operación final adoptada sea la que más convenga a los intereses y políticas de la entidad que representa, los cuales en muchas ocasiones están basados en modelos de simulación que internamente manejan y que solo tienen en cuenta el comportamiento físico del sistema (Herrán y Mayorga, comunicaciones personales 2004).

## **5 DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES A LO LARGO DE LA CUENCA DEL RÍO BOGOTÁ.**

El río Bogotá es la fuente hídrica principal de drenaje de la sabana de Bogotá. Nace en el páramo de Guacheneque, sobre la cordillera Oriental de Colombia y ubicado en el municipio de Villapinzón, en el nororiente del departamento de Cundinamarca, a una altitud aproximada de 3.300 m.s.n.m, con una longitud de cauce de 380 Kilómetros y un área de cuenca de 6.000 Km<sup>2</sup> aproximadamente (DAMA, 2004). En su área de cuenca se ubican 41 municipios y su desembocadura es en el río Magdalena en un sector llamado Boca El Girardot en el sureste del departamento de Cundinamarca a una altitud de 280 m.s.n.m aproximadamente.

A lo largo de su recorrido el río Bogotá es dividido en tres zonas (ver Figura N° 5): la cuenca alta que va desde su nacimiento hasta el puente El Común y recorre una longitud de 170 Km, la cuenca media que va desde el puente El Común hasta el embalse del Muña y que recorre una longitud de 90 Km, y la cuenca baja que parte del embalse del Muña hasta la desembocadura en el río Magdalena y con una longitud de 120 Km.



la parte baja del río Teusacá, y que también envía parte de sus aguas hacia el río Bogotá ayudando a regular las aguas provenientes del sistema Chingaza. De este punto hasta la desembocadura del río Chicú, aportan al caudal varias corrientes como Pan de Azúcar y Frío. El río Chicú es una importante fuente para el distrito de riego La Ramada, cuyos caudales y una porción del caudal del río Bogotá son llevadas al distrito mediante bombeo. Aguas abajo se encuentra el río Salitre que además de drenar la escorrentía propia de su cuenca evacua las aguas servidas de un sector importante de la ciudad de Bogotá provenientes de las PTAP de Tibitoc y Wiesner. Esta última planta es alimentada por el sistema Chingaza el cual lo componen los embalses de Chuza y San Rafael y las captaciones del río Blanco.

El sistema de embalses del sur (Chisacá y Regadera, ubicados en la cuenca del río Tunjuelo), y el río San Cristóbal alimentan las PTAPS de Vitelma, La Laguna y El Dorado (a partir de Marzo del 2003). Del río San Cristóbal lo que no es desviado a la PTAP de Vitelma llega al río Bogotá, al igual que lo que no es desviado hacia las PTAPS La Laguna, El Dorado y Vitelma y el caudal de retorno de zonas abastecidas por Chingaza aguas arriba de la desembocadura del río Tunjuelo llega el río Fucha el cual aparte del caudal generado en su cuenca drena el caudal de retorno del agua potable suministrada por las PTAPS de Vitelma, La Laguna y El Dorado y de sectores abastecidos por Chingaza. Aguas abajo del sistema de embalses del sur se encuentran las cadenas de generación de energía (CASALACO<sup>1</sup> y PAGUA<sup>2</sup>) las cuales se suplen totalmente de las aguas del río Bogotá y sus afluentes, con captaciones en dos puntos: en la cadena PAGUA antes de la compuerta de Alicachín en donde se bombea el agua al embalse del Muña, donde a través de la torre de Granada es turbinada en las estaciones de generación, y en CASALACO mediante una

---

<sup>1</sup> CASALACO o “Cadena antigua” es el acrónimo de la cadena de energía de las estaciones Canoas, Salto I y II, Laguneta y El Colegio.

<sup>2</sup> PAGUA o “Cadena nueva” es el acrónimo de la cadena de energía de las estaciones Paraíso y Guaca.



bocatoma que desvía las aguas del río Bogotá a estaciones que funcionan en serie y que al igual que la cadena PAGUA aprovechan la caída del Salto de Tequendama. En la Figura N° 6 se presenta un esquema general de la configuración del sistema.

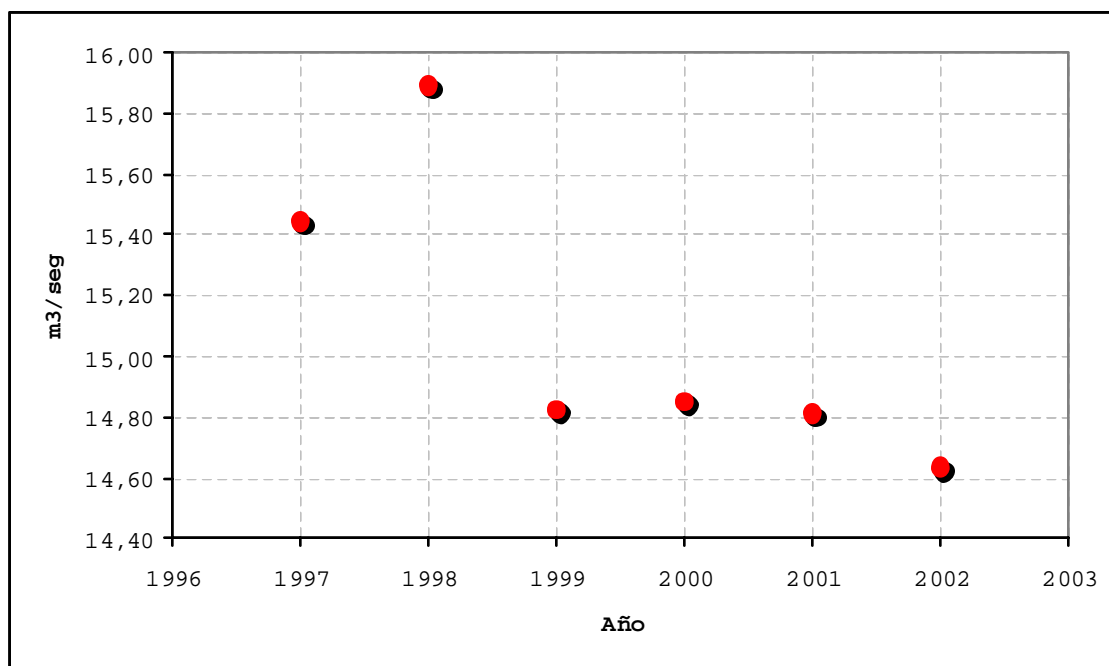


## **5.1 Descripción del sistema y componentes del sistema de agua potable.**

El abastecimiento de agua potable para la ciudad de Bogotá y los municipios de La Calera, Sopó, Gachancipá, Tocancipá, Chía, Cajicá, Soacha, Funza, Madrid y Mosquera, se encuentra a cargo la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) y es realizado por la labor conjunta de tres sistemas de abastecimiento: sistema Tunjuelo, sistema Chingaza y sistema Tibitóc. A éstos se le suma la operación de la PTAP San Diego, pero su aporte no es importante comparado con la participación de los sistemas mencionados. La operación conjunta de estos sistemas atiende 1'386,932 usuarios (EAAB, 2003), que corresponden aproximadamente 6'635,959 habitantes en Bogotá (Alcaldía de Bogotá, 2004). En su totalidad las fuentes de aguas utilizadas para el suministro de agua potable de parte de la EAAB son de origen superficial.

En la ciudad de Bogotá el consumo de agua principalmente se da en tres sectores, residencial y mixto, consumo industrial y especial, e institucional y oficial, con participaciones en el consumo del 83 %, 6 % y 11 %, respectivamente (Ingetec, 1995).

La demanda de agua potable abastecida agregada entre los años 1997 y 2002 para la población atendida por la EAAB presentó la tendencia que muestra la Gráfica N° 1 en donde se observa la disminución en la demanda de agua del año de 1998 al 2002, producto en gran parte en el cambio de costumbre de la utilización del agua potable de parte de la ciudadanía como consecuencia de campañas educativas impulsadas por la administración municipal y la empresa de acueducto (Herrán, comunicación personal 2004).



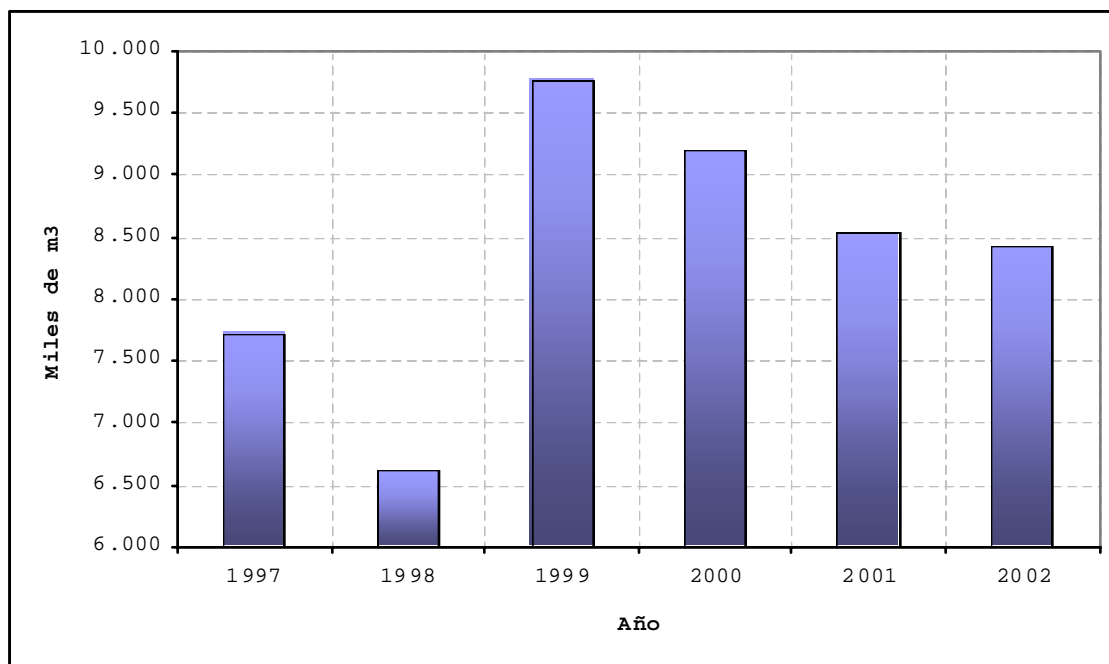
Gráfica N° 1: Variación de la demanda de agua potable suministrada por la EAAB entre los años 1997 y 2002.

### 5.1.1 Sistema Tunjuelo.

Se encuentra conformado los embalses de Chisacá y Regadera, y las PTAPS de La Laguna, Vitelma, y El Dorado. El sistema tiene como fuentes de agua los ríos Tunjuelo, San Cristóbal, Mugroso y Chisacá.

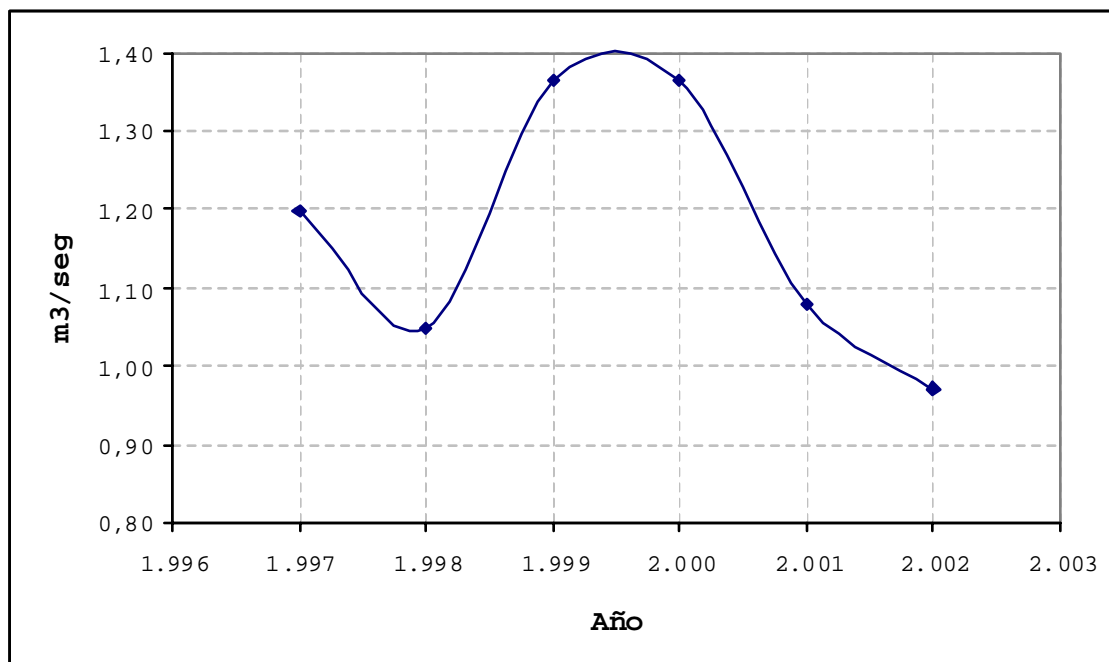
El sistema funciona almacenando las aguas provenientes del río Chisacá en el Embalse del mismo nombre; la descarga de éste más el caudal aportado por el río Mugroso alimentan el embalse La Regadera, el cual descarga a las plantas de tratamiento del sistema. Adicionalmente la PTAP Vitelma recibe aguas directamente del río San Cristóbal para aprovechar la capacidad de la planta. Este sistema es el responsable del suministro de agua potable de un sector alto del sur oriente de la ciudad.

El sistema de embalses del sistema Tunjuelo de forma agregada presentó un volumen anual almacenado promedio de  $8.3 \text{ Mm}^3$  entre los años 1997 y 2002, que representó un 1.29 % del volumen almacenado en los embalses a lo largo de la cuenca del río Bogotá, y el comportamiento mostrado en la Gráfica N° 2.



**Gráfica N° 2: Variación del volumen almacenado promedio en los embalses del sistema Tunjuelo entre los años 1997 y 2002.**

Las PTAPS del sistema Tunjuelo aportaron un 7.13 % del agua total suministrada por la empresa de acueducto entre los años 1997 y 2002 y presentaron un comportamiento en el suministro como se muestra en la Gráfica N° 3.



**Gráfica N° 3: Variación entre los años 1997 y 2002 del agua potable suministrada por las PTAP'S de Vitelma y La laguna.**

A pesar de no ser importante aparentemente el sistema Tunjuelo, éste suministra agua a un sector importante de la parte alta del suroriente de la ciudad.

### **PTAP Vitelma.**

Fue la primera PTAP construida en la ciudad de Bogotá y su operación inició en 1938. Se encuentra a 2787 m.s.n.m y recibe las aguas provenientes del embalse de La Regadera, a través de una tubería de concreto con capacidad máxima de transporte de 93,000 m<sup>3</sup>/día y del río San Cristóbal, a través de una tubería en concreto de capacidad máxima de 38,000 m<sup>3</sup>/día. Posee un tratamiento del agua cruda convencional y tiene como componentes principales un aireador, dos cámaras de mezcla rápida, tres tanques de sedimentación, tres floculadores, 16 filtros, tanque de lavado y tanque de distribución. La capacidad máxima de tratamiento de la planta es de 1.5 m<sup>3</sup>/seg. La PTAP Vitelma es autosuficiente en el

consumo de energía debido a su autogeneración a través de una turbina tipo Pelton (Lopez, 2002).

La PTAP Vitelma en promedio trató entre 1997 y 2002 el 68 % del sistema Tunjuelo lo que representó un caudal de  $0.8 \text{ m}^3/\text{seg}$ .

### **PTAP La Laguna.**

Se encuentra ubicada al oriente de la población de Usme y su operación inició a finales del año 1984. Ubicada a 2890 m.s.n.m, recibe las aguas del embalse La Regadera. Es de relativamente simple en su operación y su tratamiento es de tipo convencional. Su capacidad máxima de tratamiento es de  $0.450 \text{ m}^3/\text{seg}$  (EAAB, 2004).

La PTAP La Laguna en promedio trató entre 1997 y 2002 el 22.83 % del sistema Tunjuelo lo que representó un caudal de  $0.27 \text{ m}^3/\text{seg}$ .

### **PTAP El Dorado.**

Entró en funcionamiento en Abril del 2001 y complementa el suministro para el sector sur de la ciudad. Recibe aguas del embalse de La Regadera y su capacidad máxima de tratamiento es de  $1.6 \text{ m}^3/\text{seg}$ .

### **PTAP San Diego.**

Su operación empezó en 1943. Está ubicada en el barrio La Macarena a una cota de 2700 m.s.n.m, trata aguas captadas del río San Francisco, abastece de agua potable a sectores del centro de la ciudad y su capacidad máxima es de  $0.173 \text{ m}^3/\text{seg}$ .

### **Embalse de Chisacá.**

Es un embalse operado por la EAAB. Construido en el año 1951, debido a la incapacidad del embalse de La Regadera de suplir la demanda requerida de la PTAP Vitelma, es alimentado por los ríos Chisacá y Mugroso. Posee un área superficial de 56 Hectáreas, tiene una capacidad de almacenamiento de  $6.8 \text{ Mm}^3$  y un volumen muerto de  $0.185 \text{ Mm}^3$ , con un nivel de aguas mínimas en la cota 3128 m.s.n.m y máximas a 3146 m.s.n.m.

Sobre el río Chisacá la presa del embalse tiene una altura máxima de 33 m, una longitud de cresta de 370 m y 7 m de ancho, posee un vertedero rectangular de 28 m de ancho con rápida en canal abierto.

El embalse de Chisacá almacenó el 68.4 % del volumen del sistema Tunjuelo entre 1997 y 2002 y tuvo un volumen anual promedio de  $5.7 \text{ Mm}^3$ .

### **Embalse La Regadera.**

Ubicado a 8 Km al sur de Usme es un embalse operado por la EAAB, construido sobre el río Tunjuelo. Sus afluencias provienen de la correspondiente cuenca tributaria del río Tunjuelo y de las descargas del embalse Chisacá, que se caracterizan por poseer buena calidad. Tiene un área superficial de 41 Hectáreas y una capacidad y nivel de almacenamiento de  $3.32 \text{ Mm}^3$  y 3002 m.s.n.m, respectivamente y un volumen muerto de  $0.4 \text{ Mm}^3$  a 2995 m.s.n.m.

La altura de la presa es de 31 m, con una longitud de cresta de 364 m y 7 m de ancho. Su rebosadero Morning Glory.

El embalse de La Regadera almacenó el 31.5 % del volumen del sistema Tunjuelo y tuvo un volumen anual promedio de  $2.6 \text{ Mm}^3$  entre 1997 y 2002.

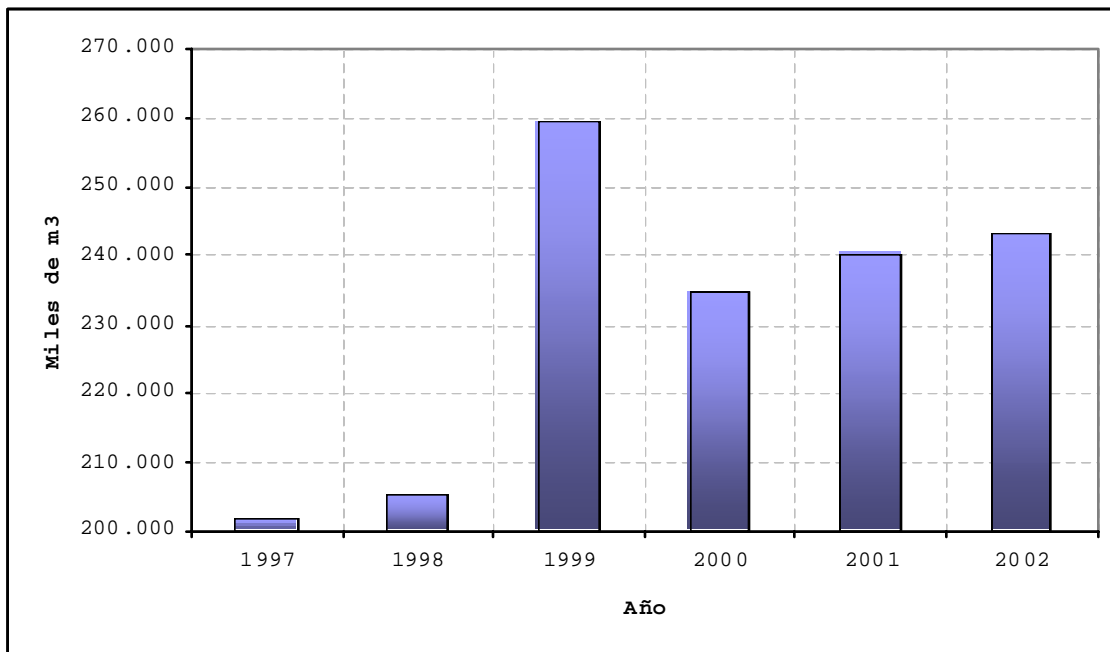


### ***5.1.2 Sistema Chingaza.***

El sistema Chingaza ubicado en la zona oriental de la ciudad de Bogotá, se encuentra conformado por los embalses de San Rafael y Chuza, y la PTAP de Wiesner. El sistema tiene como fuentes principales de agua los ríos Teusacá, Chuza, Guaitiquía, Blanco y las quebradas Babilonia y Leticia.

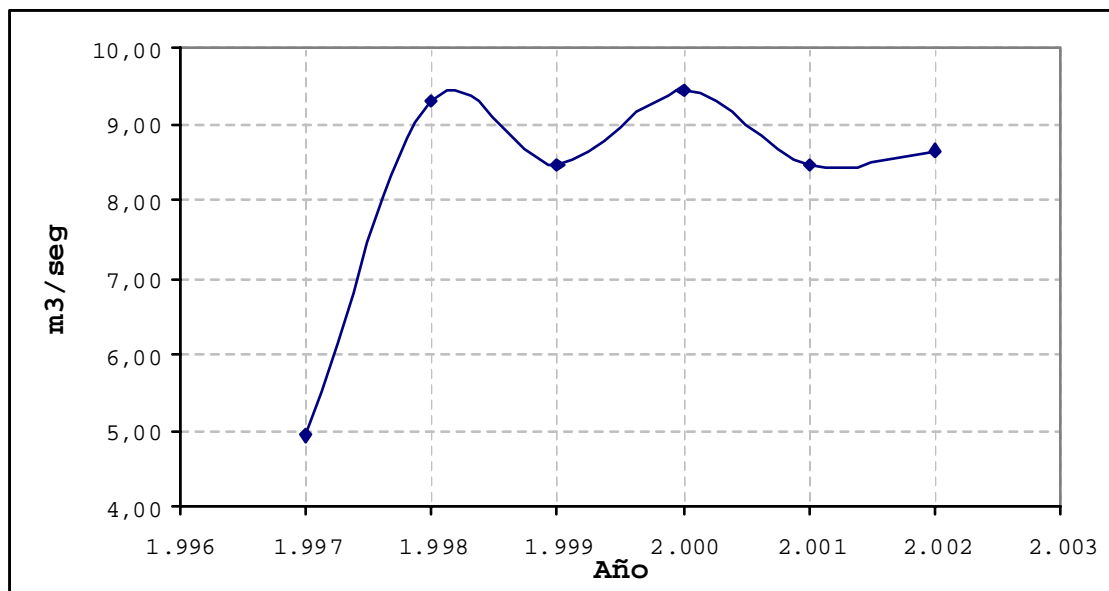
Las aguas del río Chuza y de la quebrada Leticia son almacenadas en el embalse Chuza; las descargas de este embalse y los aportes provenientes del sistema de pozos del río Blanco son conducidas a la PTAP Wiesner y/o al embalse San Rafael, el cual además almacena las aguas provenientes del río Teusacá. De esta manera el embalse de San Rafael permite almacenar suficiente agua en caso de emergencias en el sistema Chingaza o de actividades de mantenimiento en éste. Adicionalmente, el embalse de San Rafael descarga agua al embalse de Aposentos que ayuda a regular y complementar las afluencias a la PTAP Tibitóc.

Los embalses de Chuza y San Rafael presentaron un valor de volumen promedio de 230.8 Mm<sup>3</sup> entre los años de 1997 y 2002, con un comportamiento de manera agregada como se muestra en la Gráfica N°4. Los embalses del sistema Chingaza almacenaron el 35.6 % del agua en embalses a lo largo del río Bogotá.



**Gráfica N° 4: Variación del volumen almacenado promedio en los embalses del sistema Chingaza entre los años 1997 y 2002.**

Como se mencionó anteriormente la única PTAP del sistema Chingaza es la Wiesner, que contribuyó al suministro del 55.1 % del agua requerida por la EAAB para abastecer su demanda en los años entre 1997 y 2002, cuyo comportamiento se muestra en la Gráfica N° 5.



**Gráfica N° 5: Variación entre los años 1997 y 2002 del agua potable suministrada por la PTAP Wiesner.**

### **PTAP Wiesner.**

Ubicada cerca del municipio de La Calera, entró en operación en 1985. Sus afluencias provienen de las descargas del embalse de Chuza, de los caudales captados en los pozos del río Blanco, y del bombeo desde el embalse San Rafael. La Planta tiene una capacidad de tratamiento de 18 m<sup>3</sup>/seg, con posibilidades de expansión proyectada a 30 m<sup>3</sup>/seg (PTAP Wiesner, 2004). La planta consta de filtros con lechos de arena y antracita y el tipo de tratamiento es de filtración directa, posee una estructura hidráulica de mezcla rápida, un sistema de filtros, un tanque de agua tratada y un vertedero de excesos.

La PTAP Wiesner en promedio trató un caudal promedio entre los años de 1997 y 2002 de 8.22 m<sup>3</sup>/seg.

### **Embalse de Chuza**

Ubicado en la vertiente Orinoquia , tiene como afluentes los ríos Chuza y Guaitiquía y las quebradas Leticia y Babilonia. Descarga sus aguas al sistema de túneles Palacio-Río Blanco (28.5 Km), que también recibe las aguas de los pozos verticales del río Blanco, Simaya (4.5 Km), Siberia (3.1 Km) y el sifón del Teusacá (0.68 Km). Este sistema de túneles termina en la PTAP Wiesner.

El embalse posee una capacidad de almacenamiento de  $250 \text{ Mm}^3$  y un área superficial de 537 ha. Su volumen muerto es de  $29 \text{ Mm}^3$  aproximadamente. El nivel máximo está en la cota 2999 m.s.n.m y el mínimo en la 2964 m.s.n.m.

El embalse de Chuza almacenó el 76.41 % del volumen del sistema Chingaza y tuvo un volumen anual promedio de  $176.4 \text{ Mm}^3$  entre los años de 1997 y 2002.

### **Embalse de San Rafael.**

Ubicado a 10 Km del oriente de la ciudad de Bogotá D.C, represa las aguas del río Teusacá en la presa llamada El Tambor y es utilizado principalmente para suplir la demanda del sistema Chingaza en los momentos de inspecciones y mantenimientos del sistema de túneles del embalse de Chuza. Descarga a la PTAP Wiesner mediante un sistema de bombas con 4 unidades de bombeo cada una de  $5 \text{ m}^3/\text{seg}$ . El embalse además capta las aguas del rebose de la PTAP de Wiesner.

El embalse San Rafael posee un volumen útil de  $70 \text{ Mm}^3$  y un volumen muerto de  $5 \text{ Mm}^3$ . En la cota 2772 m.s.n.m se encuentra el nivel máximo de rebose y el nivel de aguas mínimas se encuentra a 2744. La presa del embalse tiene una altura sobre el lecho del río de 59 m y una cresta con 7 m de ancho y de 670 m de longitud.

El embalse tiene además dos sistemas de descarga al río Teusacá, consistentes en un túnel de desviación de 493 m de longitud y 4 m de diámetro y un canal abierto de 408 m de longitud.

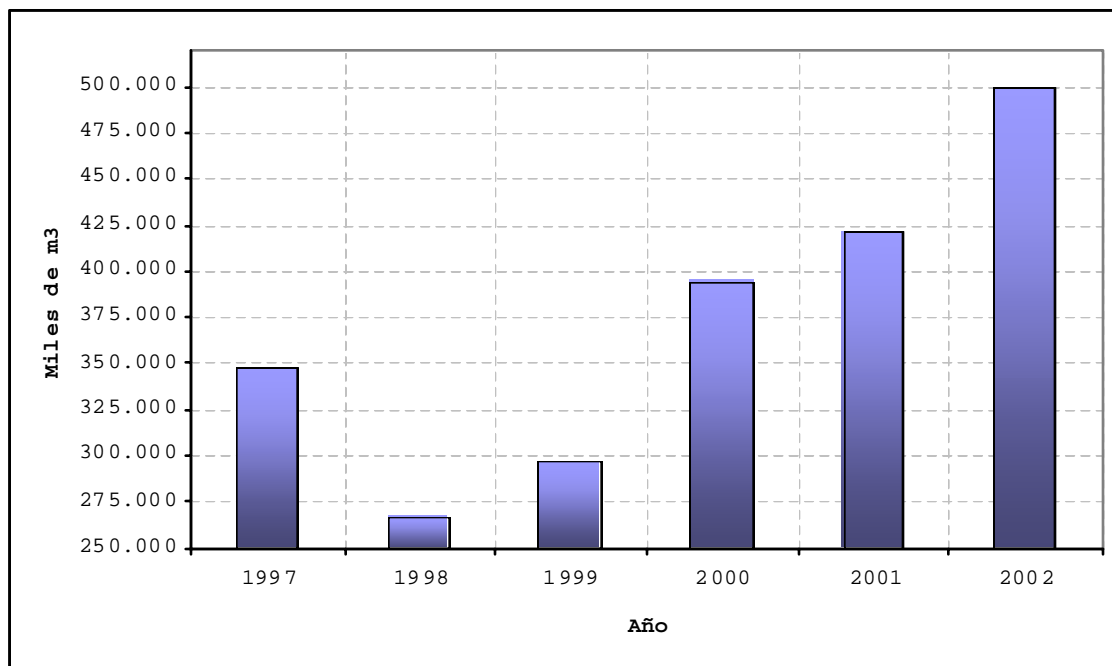
El embalse de San Rafael almacenó el 23.59 % del volumen del sistema Chingaza y tuvo un volumen anual promedio de 54.4 M m<sup>3</sup> entre los años de 1997 y 2002.

### ***5.1.3 Sistema Norte.***

El sistema Norte lo componen los embalses de Sisga, Tominé, Neusa y Aposentos, y la PTAP de Tibitóc. Los afluentes a los embalses son los ríos San Francisco, Cubillos, Cuevas, Chipatá, Siecha, Aves y la parte alta del río Bogotá.

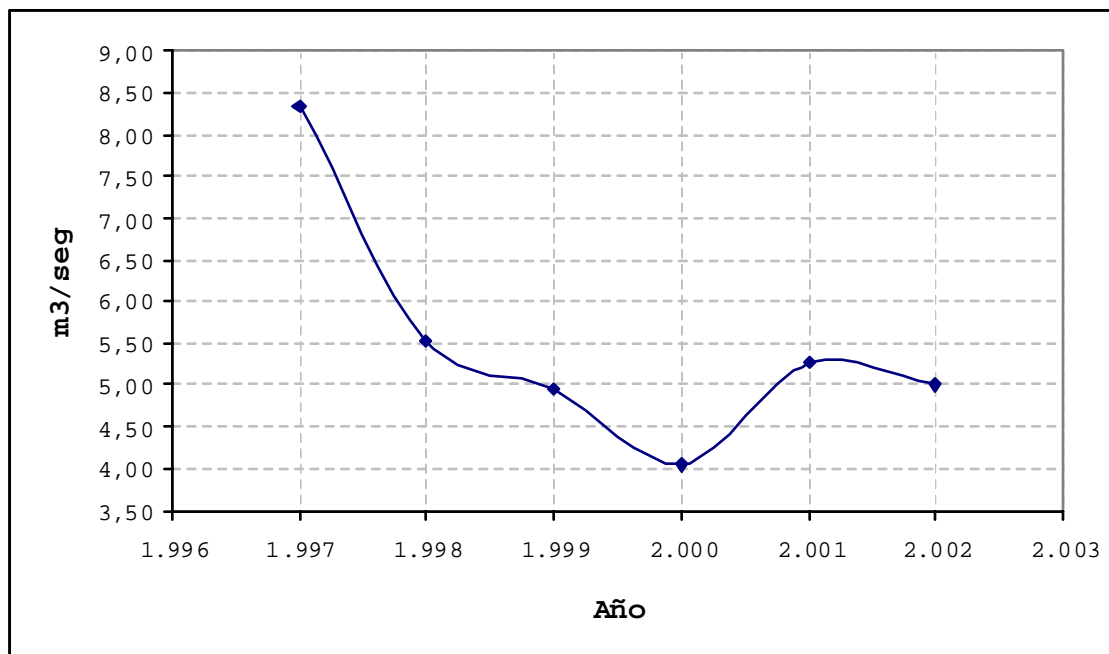
Las descargas del sistema de embalses del Norte (Sisga, Neusa y Tominé) llegan al río Bogotá y en el embalse Aposentos por bombeo se suministra el agua cruda a la PTAP Tibitóc.

Los embalses del sistema Norte presentaron un valor de volumen promedio de 371.3 Mm<sup>3</sup> entre los años de 1997 y 2002, con un comportamiento de manera agregada como se muestra en la Gráfica N° 5. Éstos almacenaron el 57.35 % del agua de los embalses a lo largo del río Bogotá.



**Gráfica N° 6: Variación del volumen almacenado promedio en los embalses del sistema de embalses del Norte entre los años 1997 y 2002.**

La PTAP Tibitoc que entró en concesión a partir de Marzo de 1998, suministró alrededor del 37% de la demanda representando un caudal promedio de  $5.52 \text{ m}^3/\text{seg}$ . Entre los años de 1997 y 2002, presentó un comportamiento de demanda suministrada promedio anual como lo muestra la Gráfica N° 7.



Gráfica N° 7: Variación entre los años 1997 y 2002 del agua potable suministrada por la PTAP Tibitoc.

Se observa como a partir del año de concesión los valores de suministro de agua bajaron considerablemente en relación al suministro en el año de 1997, en el cual la PTAP era manejada directamente por la EAAB.

### PTAP Tibitoc.

Entró en operación en 1959. Capta sus aguas por medio de dos bocatomas y estas se hacen circular por una dársena presedimentadora, para luego bombearlas un desnivel de 105 m hasta el punto de aplicación de coagulantes, donde mecánicamente se realiza la mezcla rápida (Ingetec,1995). Entre los años 1968 y 1973 se aumentó la capacidad de la planta (Gutierrez,2002) a 12 m<sup>3</sup>/seg nominal (Ingetec,1995). A partir de 1974 buscando aumentar las afluencias hacia la planta, se construyó el embalse de Aposentos (Gutierrez, 2002), que embalsa el remanente de las aguas del río Teusacá, luego de que éste pasa por el embalse de San Rafael y posteriormente se bombea a la dársena de presedimentación de Tibitoc. Los

procesos existentes en la planta son presedimentación, coagulación, filtrado (antracita, arena y grava) y suministro.

### **Embalse de Sisga.**

Embalse manejado por la CAR. Se encuentra localizado cerca de los municipios de Sesquilé, Guatavita, Suesca y Chocontá. Las afluencias al embalse provienen del río San Francisco y de la quebrada Granadillo, y las descargas son llevadas a través del río Sisga al río Bogotá. La capacidad de almacenamiento del embalse es de  $101 \text{ Mm}^3$  con un volumen muerto de  $5.5 \text{ Mm}^3$ . El nivel de aguas máximas está en la cota de 2670 m.s.n.m y el de aguas mínimas en 2644 m.s.n.m.

La presa tiene una altura de 44 m, una longitud de 85 m y 8 m de ancho. La capacidad máxima de descarga del embalse es de  $160 \text{ m}^3/\text{seg}$ .

El embalse de Sisga almacenó el 18 % del volumen del sistema de embalses del Norte y tuvo un volumen anual promedio de  $67.1 \text{ M m}^3$  entre los años de 1997 y 2002.

### **Embalse Neusa.**

Manejado por la CAR y ubicado entre los municipios de Tausa y Cogua. Las afluencias al embalse proviene del río Cubillos y sus descargas son conducidas al río Bogotá junto los aportes del río Checúa. Neusa tiene una capacidad de almacenamiento de  $103 \text{ Mm}^3$  y un volumen muerto de  $0.7 \text{ Mm}^3$ , con nivel de agua máxima a 2977 m.s.n.m y nivel de aguas mínimas a 2950 m.s.n.m.

La presa tiene una altura de 45 m, con 350 m de longitud y 7 m de ancho. La capacidad máxima de descarga del embalse es de  $132 \text{ m}^3/\text{seg}$ .



El embalse de Neusa almacenó el 18.3 % del volumen del sistema de embalses del Norte y tuvo un volumen anual promedio de 67.9 M m<sup>3</sup> entre los años de 1997 y 2002.

La CAR maneja los embalses de Sisga y Neusa para abastecer las necesidades de agua para fines agrícolas en el distrito de riego La Ramada y para mantener los niveles adecuados a lo largo del río Bogotá, “*aun no existiendo una política formal para su manejo*” (Niño, 2004). Sin embargo, dado el uso de sus descargas por parte de la EAAB en la PTAP Tibitoc y considerando el servicio de agua potable como prioritario la EAAB tiene derecho al uso de máximo el 30 % del volumen de estos embalses (López, 2002).

### **Embalse de Aposentos.**

Embalse construido en la parte baja de río Teusacá en 1974. Tiene una capacidad de 1 millón de m<sup>3</sup>, sus afluencias provienen del remanente del río Teusacá del sistema Chingaza y mediante bombeo abastece agua para Tibitóc. Su capacidad y su operación por bombeo no lo hacen de gran importancia en los aportes al sistema.

### **Embalse de Tominé.**

Es el embalse de mayor capacidad del sistema de aprovechamiento de la cuenca de río Bogotá. Tiene una capacidad de 690 Mm<sup>3</sup>, es manejado por EEB<sup>1</sup>, y posee la infraestructura para generar energía. Sin embargo, “*en los últimos años ha sido poca o nula su utilización con esos fines*” (Mayorga, 2004). Las afluencias al embalse provienen de los ríos Chipatá y Aves, y en ocasiones del río Bogotá desde la estación de bombeo de Sesquilé. La descarga se hace a través del canal Achury hacia el río Bogotá.

---

<sup>1</sup> EEB: Empresa de Energía de Bogotá.

El embalse de Tominé posee un volumen muerto de  $15 \text{ Mm}^3$ , con el nivel de aguas mínimas a 2571 m.s.n.m y de aguas máximas a 2603 m.s.n.m.

El embalse de Tominé almacenó el 63.6 % del volumen del sistema de embalses del Norte y tuvo un volumen anual promedio de  $236.3 \text{ M m}^3$  entre los años de 1997 y 2002.

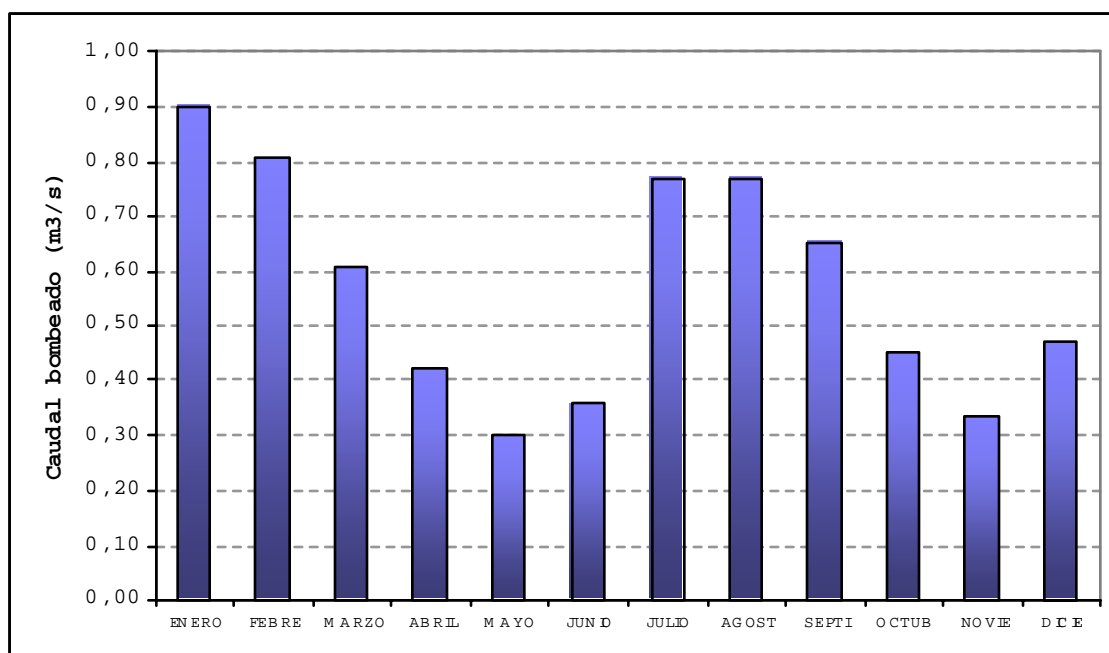
## **5.2 Descripción del distrito de riego La Ramada.**

El distrito de riego La Ramada fue concebido en 1926 mediante un esfuerzo conjunto entre la Caja Agraria y el entonces Ministerio de Minas y Energía de la nación buscando aprovechar una de las regiones con mejores suelos agrícolas del país. En la actualidad es manejado por la CAR.

El área actual irrigada está delimitada al norte con la vía La Mesa- Funza y las ciénagas de Tres Esquinas y Gualí, al occidente con el río Subachoque y al oriente y sur con el río Bogotá. Se encuentra a una altura promedio de 2550 m.s.n.m en una zona de planicie. En la actualidad el área regada es de 5500 ha donde se cultivan hortalizas, flores y pastos para ganadería de leche, principalmente. Esta área corresponde a 463 predios rurales y 252 urbanos (CAR,2000).

El agua suministrada al distrito es captada del río Bogotá justo luego de la desembocadura del río Chicú y 500 mts aguas arriba de la desembocadura del río Juan Amarillo (también llamado río Salitre), en el sitio denominado “Vuelta Grande” donde se encuentra la estación de bombeo El Chicú, con cuatro bombas tipo tornillo cada una con una capacidad de  $1.4 \text{ m}^3/\text{seg}$ , para un caudal agregado de  $5.6 \text{ m}^3/\text{seg}$ . Las bombas impulsan el agua sobre un canal abierto de 8.6 Km hasta llegar a la ciénaga de Gualí y Tres Esquinas, a partir de donde se distribuyen en la zona de riego por gravedad.

El sistema presenta un bombeo promedio de  $0.57 \text{ m}^3/\text{seg}$  y tiene un comportamiento como se muestra en la Gráfica N° 8, donde se aprecia cómo el segundo y cuarto trimestre corresponden a las épocas con menos requerimientos de agua y cómo en los meses de Enero y Febrero las necesidades de riego son las mayores.



Gráfica N° 8: Variación del caudal promedio bombeado a nivel mensual desde la estación El Chicú al distrito de riego La Ramada.

### 5.3 Descripción de cadenas de generación de energía.

En la parte baja del río Bogotá se encuentran ubicadas dos cadenas de generación de energía hidroeléctrica manejadas por EMGESA y EEB: CASALACO Y PAGUA. Ambas aprovechan las aguas en la parte media del río Bogotá para generación eléctrica luego de las descargas de los sistemas de embalses del Norte, sistema Chingaza y embalses del sur, y el aporte mayoritario del caudal de retorno del agua potable de la ciudad de Bogotá D.C y

conducida por los ríos Tunjuelo, Fucha y Salitre, los cuales traen consigo niveles preocupantes en los parámetros de calidad del agua.

La cadena de generación de energía CASALACO comienza a unos 16 Km de la ciudad de Bogotá, en donde se encuentra ubicada una serie de cinco estaciones de generación de energía que aprovechan la caída topográficamente entre la Sabana d Bogotá y el municipio El Colegio.

La cadena de generación PAGUA ubicada en el suroriente de Bogota D.C, se encuentra más al sur de la cadena CASALACO y comprende un sistema que comienza en las compuertas de Alicachín cuya finalidad es la generación de un remanso que logre aprovechar las aguas del río Bogotá y ser impulsadas al embalse del Muña mediante bombeo para la posterior generación de energía hidroeléctrica a través de varias estaciones.

Las cadenas de generación de energía referidas alcanzaron una producción de energía hidroeléctrica del orden de 18.3 millones de MW-Hr entre los años de 1997 y 2002.

### ***5.3.1 Cadena CASALACO.***

También conocida como “Cadena Antigua” consta de la estaciones de Canoas, Saltos I, Salto II, Laguneta y El Colegio. Estas estaciones están en serie y aprovechan las diferencias de alturas entre ellas y el caudal utilizado turbinado por la estación inmediatamente anterior.

La estación Canoas tiene una turbina tipo Francis de eje vertical y una capacidad nominal de generación de energía hidroeléctrica de 50 MW para una cabeza de 132 m y 40 m<sup>3</sup>/seg de caudal. Las estaciones Salto I y Salto II aprovechan una caída de agua de 420 m altura con una capacidad de generación nominal de energía de 70 MW cada una, con turbinas tipo Peltón. En la estación Laguneta se aprovecha el caudal turbinado en las estaciones Salto I y

Salto II y la caída de agua de 286 m, con capacidad nominal de generación de 72 MW mediante cuatro unidades de 18 MW cada una. La última estación es El Colegio, que aprovecha la caída de 970 m y el agua utilizada en la estación Laguneta. Tiene 6 unidades cada una con una capacidad de generación de energía de 50 MW que de forma agregada significa una capacidad nominal de 300 MW.

La cadena CASALACO posee una capacidad nominal agregada de generación de energía de 512 MW divididas en las cinco estaciones de generación mencionadas. Durante 1997 y 2002 generó en promedio mensual 69 mil Mw-Hr siendo la estación El Colegio la de mayor aporte en la generación.

### **5.3.2 Cadena PAGUA.**

Conocida como la “Cadena Nueva” funciona con las descargas desde el embalse del Muña a través de la torre de Granada. Las afluencias a este embalse provienen del bombeo desde la estación de Alicachín, ubicada sobre el río Bogotá y los aportes de su cuenca tributaria (principalmente ríos Muña y Aguas Claras). El sistema lo componen las estaciones Paraíso, Guaca, La Tinta, Limonar, Charquito y San Antonio.

Las estaciones de mayor relevancia en este sistema, por ser las de mayor capacidad de generación, son Paraíso y La Guaca. La estación Paraíso se encuentra ubicada a 68 Km al sur de la ciudad de Bogotá D.C y posee tres turbinas tipo Pelton de eje vertical cada una con capacidad de generación nominal de 92 MW, para un caudal de 30 m<sup>3</sup>/seg. La estación La Guaca ubicada a 50 Km de la ciudad de Bogotá D.C tiene una capacidad de generación de 324 MW, mientras que las estaciones La Tinta, Limonar, Charquito y San Antonio tienen individualmente una capacidad nominal de 19.4 MW que de forma agregada representa una capacidad de 77.6 MW.

La cadena PAGUA tiene una capacidad nominal agregada de generación de energía de 677.6 MW divididas en las estaciones de generación mencionadas.

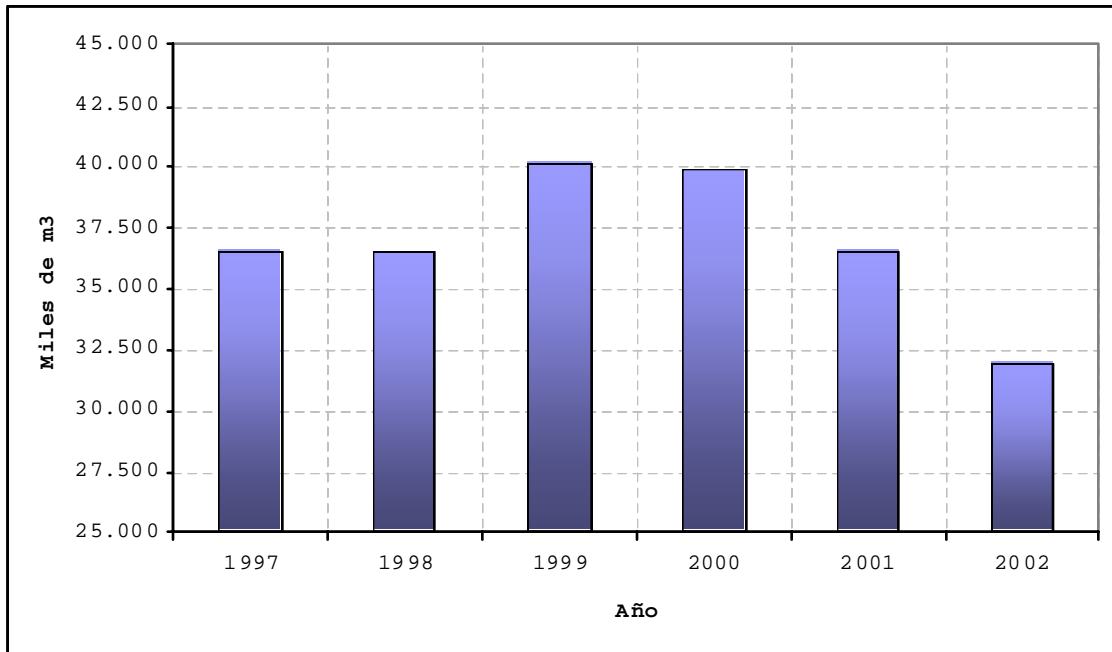
La cadena PAGUA generó en promedio mensualmente 185 mil Mw-Hr entre los años de 1997 y 2002, siendo ambas estaciones, El Paraíso y La Guaca igual de aportantes en la generación.

### **Embalse de Muña.**

Su afluente principal es el río Bogotá a través de la estación de bombeo de Alicachín o Muña con una capacidad máxima de bombeo de  $52.5 \text{ m}^3/\text{seg}$ . Este bombeo se realiza mediante tres subsistemas: Muña I, Muña II y Muña III. Muña I posee dos bombas de  $2 \text{ m}^3/\text{seg}$  cada una, Muña II tiene una turbobomba de  $8 \text{ m}^3/\text{seg}$  y Muña III tres bombas cada una con capacidad máxima de  $17.5 \text{ m}^3/\text{seg}$ .

El embalse de Muña tiene una capacidad de almacenamiento de  $42 \text{ Mm}^3$ , con un volumen muerto de  $1 \text{ Mm}^3$ . En la cota 2970 m.s.n.m se encuentra el nivel de aguas máximas y en la cota 2555 m.s.n.m se encuentra el nivel de aguas mínimas. La capacidad máxima de descarga en la torre de Granada es de  $100 \text{ m}^3/\text{seg}$ .

El embalse del Muña almacenó el 5.71 % del volumen entre los años de 1997 y 2002 del sistema de embalses a lo largo del río Bogotá, tuvo un volumen anual promedio de  $36.9 \text{ Mm}^3$  y presentó un comportamiento del volumen promedio anual almacenado como lo presenta la Gráfica N° 9.



Gráfica N° 9: Variación del volumen almacenado promedio en el embalse del Muña entre los años 1997 y 2002.

## **6 DATOS UTILIZADOS Y GENERALIDADES EN LA APLICACIÓN DEL CASO ESTUDIO.**

La complejidad y dimensión del sistema modelado en el presente trabajo significó una maratónica y desgastante labor en tiempo y esfuerzo personal en lo relacionado a la consecución de la información, registros y datos necesarios para la aplicación del modelo. La causa de este inconveniente fue producto de factores de diversa índole como la multiplicidad de fuentes (EAAB, PTAP'S, EEB, EMGESA, CONCESION TIBITOC S.A, CAR, DAMA, contactos académicos, entre otros), ramificación y desagregación dentro de cada organización, lentitud en la entrega de información de parte de algunos organismos, tipo de formatos y desorganización de la información suministrada (p.e: en ocasiones la información fue suministrada en medios físicos), recelo en los organismos de carácter privado en el suministro de la información, inexistencia de información solicitada en algunos casos, como factores importantes. Finalmente fue posible obtener la gran mayoría de la información requerida.

Analizando la información suministrada por las diferentes entidades se decidió optar por un periodo de modelación comprendido entre los años de 1997 y 2002 a una escala de tiempo mensual, agregación temporal que considera adecuada para los propósitos y objetivos de la investigación.

La presente investigación consideró tres escenarios de modelación diferentes, a saber:

**ESCENARIO BASE:** Representa la situación histórica que se presentó en el periodo de evaluación, en lo referente a las demandas abastecidas para cada uno de los usos. Este caso



se optó como principal por permitir el contraste de la operación real del sistema con el histórico.

**ESCENARIO EXPANSION RAMADA:** Considera la expansión hipotética del distrito de riego La Ramada en aproximadamente 10,845 Has (CAR, 2000), aproximadamente un 197 % por encima de las áreas irrigadas en el periodo histórico, este escenario con el fin de observar el comportamiento del sistema para el mismo escenario hidrológico histórico con un incremento importante en las demandas agrícolas del sistema.

**ESCENARIO CRECIMIENTO DEMANDA AGUA POTABLE:** Consideró una demanda de agua potable hipotética, mayor a la real, que se proyectó en el Plan Maestro de Acueducto (Ingetec, 1994) para el periodo comprendido entre 1997 y 2002 (ver Tabla N° 2).

**Tabla N° 2: Demanda media proyectada para el periodo comprendido entre los años 1997 y 2002 en el Plan Maestro de Acueducto de Bogotá**

AÑO	DEMANDA PROYECTADA (m <sup>3</sup> /seg)
1997	19.5
1998	20
1999	20.5
2000	21
2001	21.5
2002	22

**Fuente: Informe Final Contrato 434/93, Ingetec 1994**

La topología del sistema (ver Figura N° 3) fue construida con la ayuda de entrevistas a funcionarios e informes de las entidades, contactos académicos y documentación relacionada con el funcionamiento del sistema.

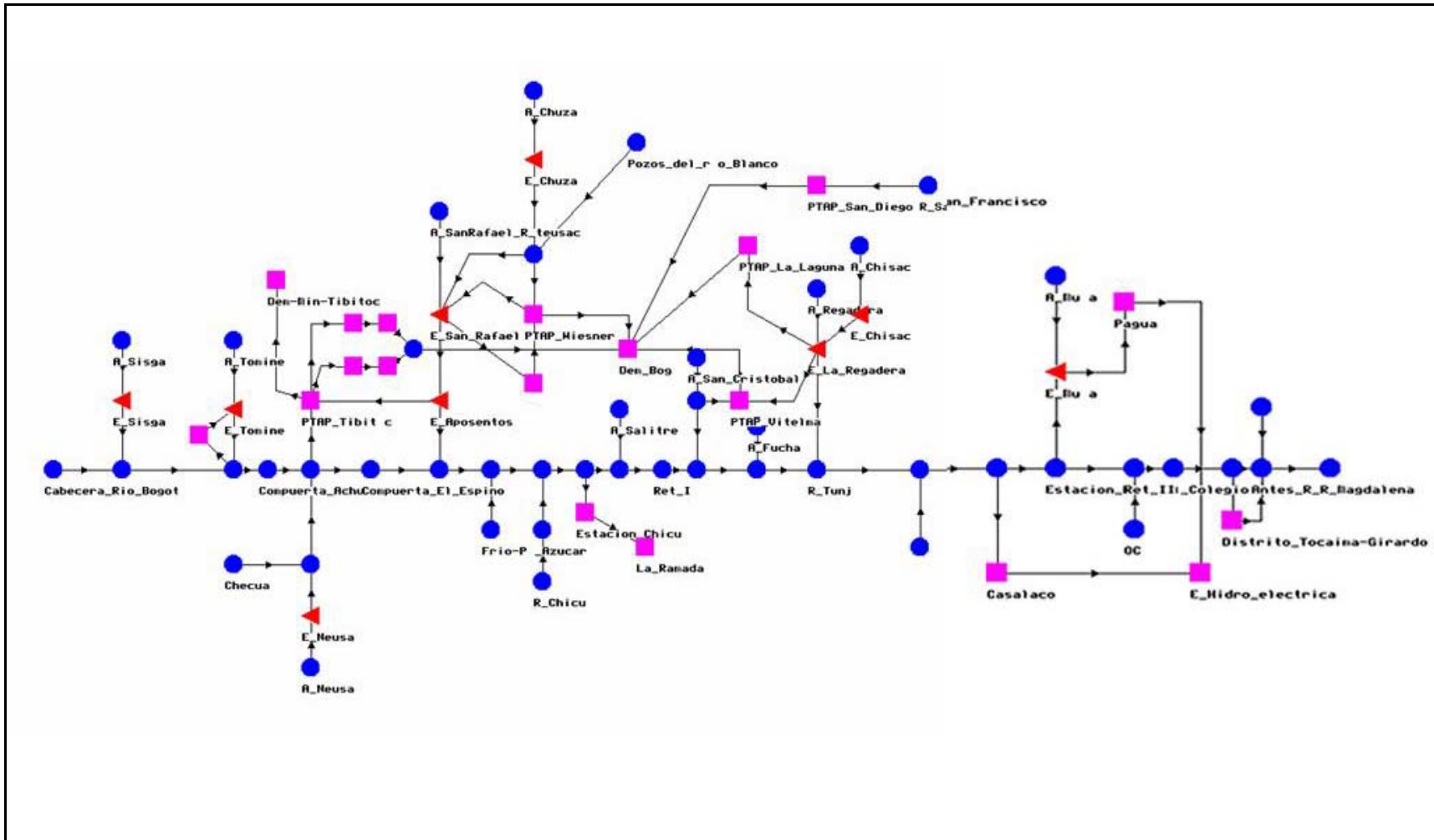


Figura N° 7: Esquema y topología del sistema modelado en MODSIM.

## 6.1 Nodos de demanda urbana.

Las zonas de demanda urbana corresponde a las áreas de abastecimiento de agua potable a la población atendidas por la EAAB, y que se representan por las PTAPS del sistema. Para efectos de la modelación se requirieron características como la demanda abastecida, sus capacidades máxima y mínima de tratamiento, % caudal de retorno, costos de operación. De manera resumida los datos utilizados en la modelación para las PTAPS consideradas se presentan en la Tabla N° 3.

Tabla N° 3: Características y restricciones de la PTAP'S utilizadas por la EAAB<sup>1</sup>.

PTAP	CAPACIDAD MÁXIMA (m <sup>3</sup> /seg)	COSTOS OPERACIÓN (\$/m <sup>3</sup> )	DEMANDA SUMINISTRADA (m <sup>3</sup> /seg)
TIBITOC	10.5	108 <sup>2</sup>	5.52
WIESNER	18	31	8.22
SAN DIEGO	0.17	35	0.11
LA LAGUNA	0.45	28	0.27
VITELMA	1.5	39	0.8

Los valores de los costos de operación y demanda fueron tomados a nivel mensual entre los años de 1997 y 2002 (ver Anexo N° 2).

Para estas PTAPS se aplicó un tratamiento especial para dos situaciones, las cuales se describen a continuación. En primer lugar, en la PTAP Tibitoc, debido a la concesión, existe una demanda mínima que contractualmente debe ser suministrada de parte del concesionario (ver Anexo N° 3). A su vez el pago del agua suministrada por parte de la EAAB es función de la cantidad así: entre 0 y 4.5 m<sup>3</sup>/seg se cancela con la tarifa plena,

<sup>1</sup> Los costos de operación y demanda son promedios de los registros históricos en el periodo de evaluación, 1997-2002.

<sup>2</sup> Costo correspondiente al costo base sobre el cual se le paga a la empresa Concesionaria Tibitóc S.A, según contrato de concesión vigente desde Febrero de 1998

entre 4.5 y 7.5 con un 78% de descuento sobre la tarifa plena y entre 7.5 y 10.5 con un 85% de descuento sobre la tarifa plena. La tarifa plena se adoptó en el contrato de concesión en \$108/ m<sup>3</sup>, a precios de 1997, y presenta un factor de ajuste calculados con la Ecuación N° 1.

$$K_{i,1} = 0,52 \frac{TRM_i \times CPI_i}{TRM_{i-1} \times CPI_{i-1}} + 0,48 \frac{IPC_i}{IPC_{i-1}}$$

### Ecuación N° 1.

En donde TRM<sub>i</sub> es la tasa representativa del dólar americano del último día i, IPC<sub>i</sub> es el índice de precios al consumidor del último día del año i y CPI<sub>i</sub> es el Índice de Precios al consumidor en los Estados Unidos el último día del año i.

Por lo anterior se modeló una restricción de demanda y una modificación en la configuración de la red para efectos de tener en cuenta estos aspectos.

La segunda situación es el tratamiento dado a la demanda total requerida por la EAAB. Se adoptó como demanda objetivo la sumatoria de la demanda real suministrada por las PTAP'S (ver Anexo N° 4) en el periodo evaluado y ésta se maneja como una restricción en un nodo de demanda el cual es alimentado por todas las plantas de tratamiento del sistema.

## 6.2 Nodos de demanda Agrícola.

Para el caso de estudio se incluyeron los distritos de riego de La Ramada y Tocaima Girardot, sin embargo solo tuvo incidencia en la modelación La Ramada pues era el único habilitado en el periodo de evaluación. Se consideró como demanda agrícola del distrito La

Ramada el caudal bombeado desde la estación Chicú (ver Anexo N° 5). Se consideraron costos de bombeo y de mantenimiento del distrito, por separado.

### **6.3 Nodos de demanda de generación de Energía Eléctrica.**

La demanda para la generación de energía eléctrica es la relacionada con el funcionamiento de las cadenas de energía incluidas en el modelo (CASALACO y PAGUA y el sistema de estaciones dentro de cada una de ellas se trabajó de manera agregada.

La demanda restrictiva para fines de generación eléctrica se consideró como el caudal utilizado de forma agregada por las dos cadenas en el periodo de tiempo de evaluación con el cual se generó energía y se maneja como un solo de demanda el cual era alimentado por los nodos de las cadenas de energía.

La red en MODSIM presenta la forma que muestra la Figura N° 2, ella incluye las consideraciones anteriores y el restante que lograron el desarrollo y solución final del trabajo presentado.

## **7 RESULTADOS.**

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos luego del proceso de modelación. Dichos resultados se dividen en dos grupos los obtenidos directamente de MODSIM y los obtenidos indirectamente luego del análisis de series arrojadas por el modelo.

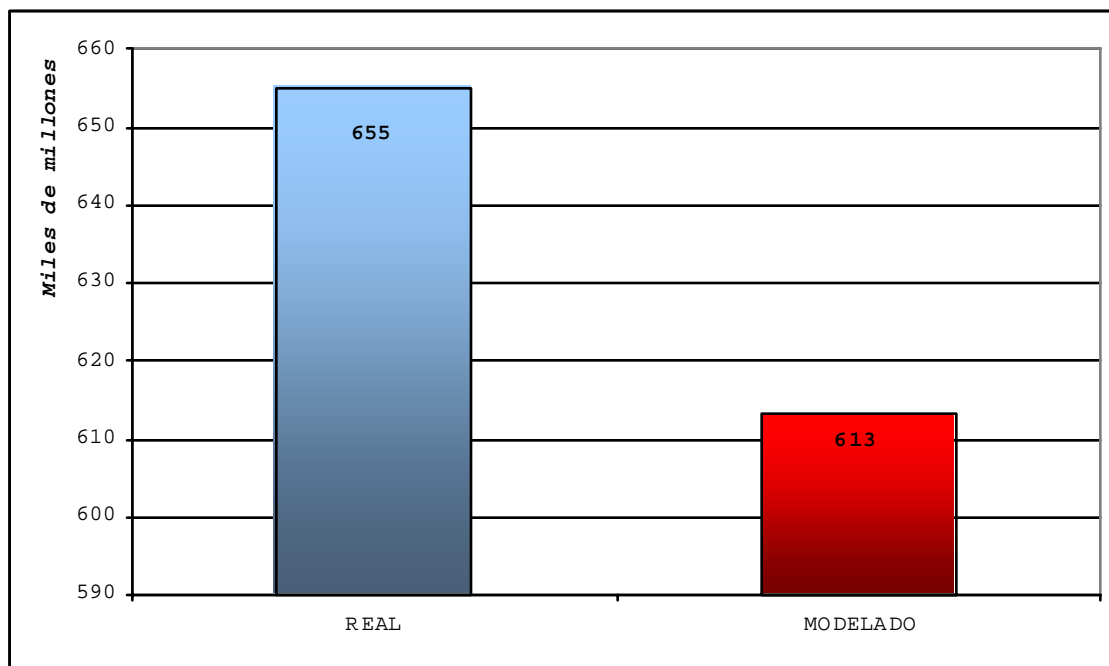
Los precios manejados y mencionados a continuación son cifras llevadas al año 2002, esto con el fin de evitar diferencias que pudieran generarse por no tener en cuenta la variación del valor del dinero en el tiempo.

Es importante resaltar que los resultados aquí presentados son producto de un ejercicio académico, y que los datos deben ser manejados con cautela, debido a la incertidumbre en algunos parámetros incluidos en el modelo.

### **7.1 Escenario Base.**

Con este escenario se pretende contrastar el comportamiento real de los subsistemas y sus componentes durante el periodo de evaluación con el que a través del modelo de optimización se obtuvo.

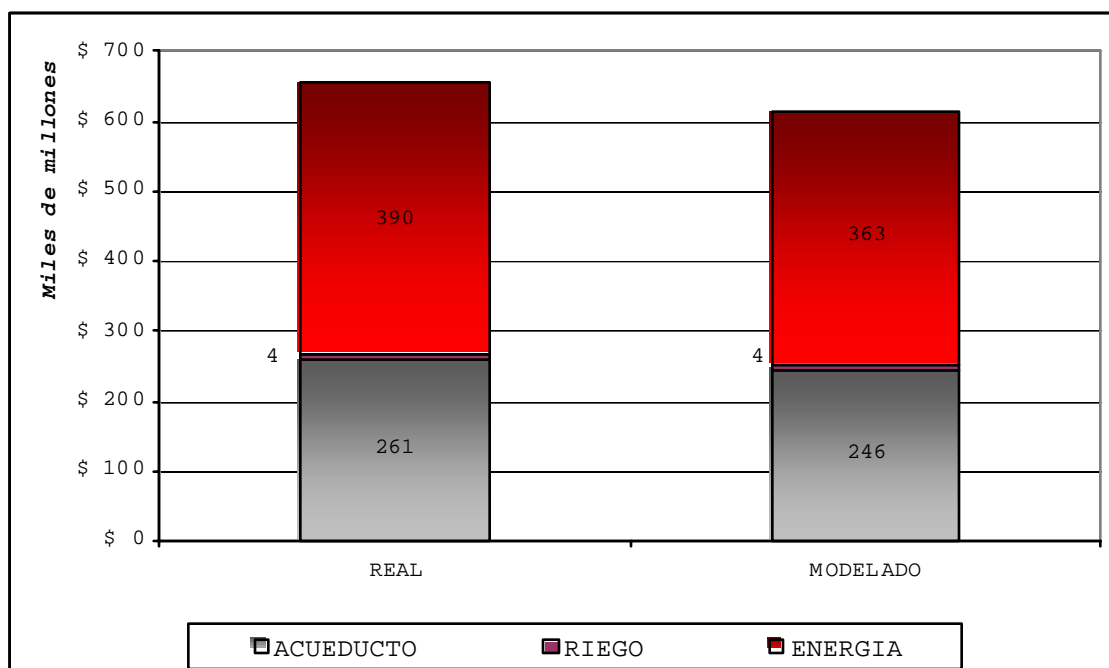
Como se ha mencionando a lo largo del documento el modelo matemático de optimización busca minimizar los costos totales de operación del sistema. La Gráfica N° 10 muestra la comparación entre los valores reales de operación presentados y los valores obtenidos luego de la modelación.



**Gráfica N° 10: Costo total de operación del sistema a lo largo de la cuenca del río Bogota, para el escenario real y escenario modelado.**

La Gráfica N° 10 sintetiza los costos reales y modelados de forma agregada para el periodo comprendido entre los años 1997 y 2002. Con la aplicación del modelo se encontró un ahorro del 6.1 % en los costos totales de operación del sistema, que corresponde a un valor de \$ 39.996.679.079 a precios del 2002, y que llega a ser el 7.9 % si se descuenta del precio base de los costos de operación el costo fijo por el pago de la demanda mínima a la concesión de la PTAP Tibitoc.

Los costos por los diferentes usos de agua se presentan en la Gráfica N° 11, para el escenario real y el escenario modelado.



**Gráfica N° 11: Comparación de costos a 2002 de situación real y datos arrojados del modelo de optimización.**

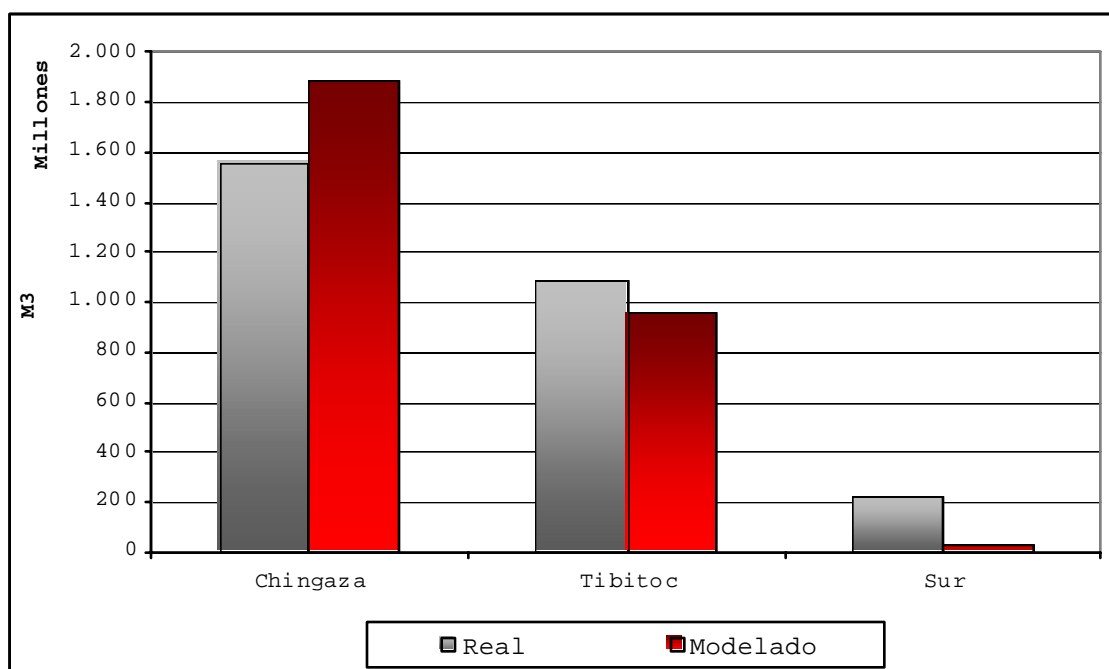
La Gráfica N° 11 muestra una disminución en los costos agregados totales en el uso de agua para acueducto en un 4.97 % y generación de energía en un 6.96 %; sin embargo, en lo relacionado con el agua para riego el costo de operación se mantuvo constante.

La factibilidad técnica de operación sugerida por el modelo de los componentes del sistema hubiese estado sujeta a la voluntad de parte de los operadores de permitir este tipo de operaciones, pues estas aunque sean factibles de alcanzar técnicamente, por políticas al interior de las organizaciones no podrían resultar viables.



### 7.1.1 Uso para agua potable.

La disminución en los costos de operación del sistema de agua potable es producto del aumento en el agua tratada en el sistema Chingaza y la disminución en Tibitoc y en el sistema del Sur (ver Gráfica N° 12).



**Gráfica N° 12: Distribución por sistema, para suministro de agua potable, para la situación real y modelada, para el periodo entre 1997 y 2002.**

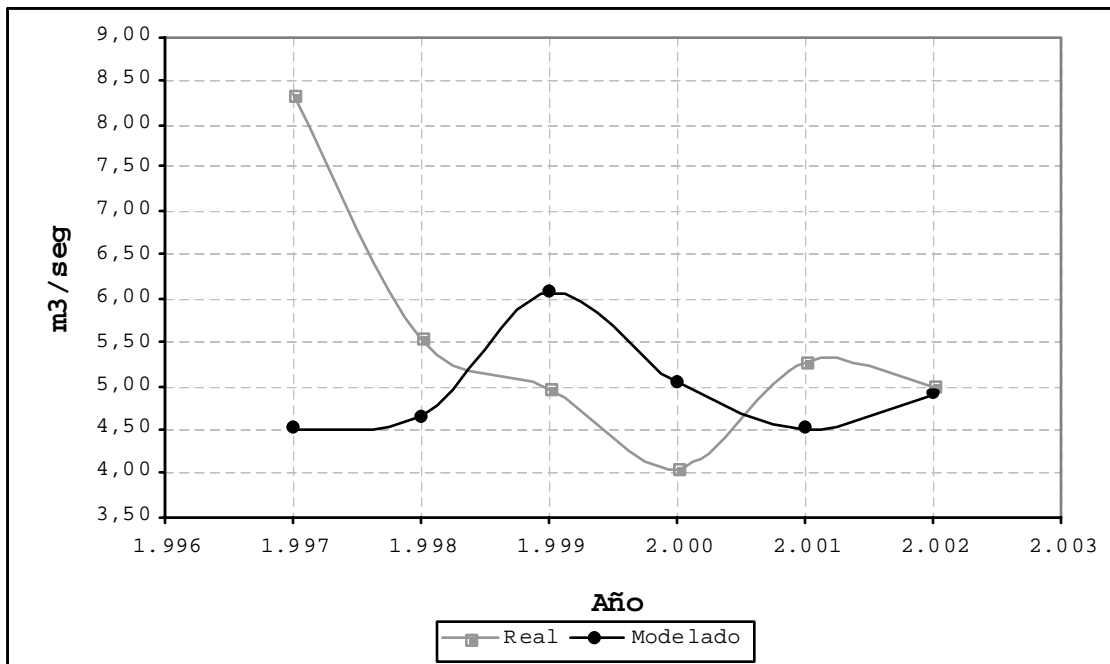
En concordancia con la Gráfica N° 12, se presenta la Gráfica N° 13 que muestra como en la PTAP Wiesner varió su operación principalmente en los años 1997, 1998 y 2001.



**Gráfica N° 13: Comparación de agua suministrada promedio real y modelado en la PTAP Wiesner.**

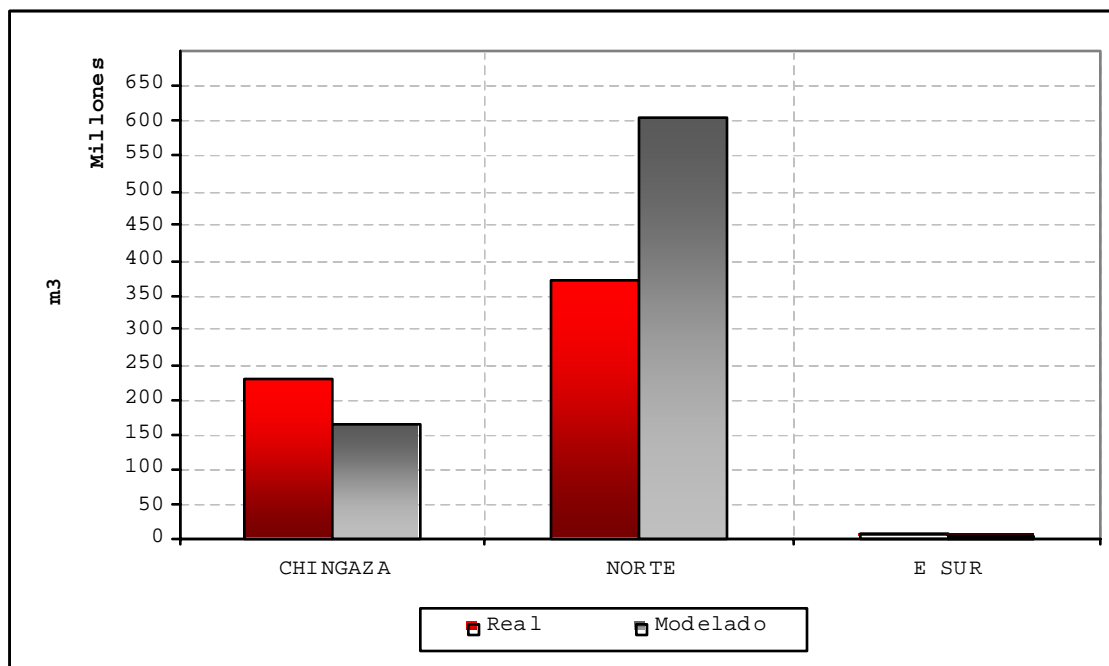
La Gráfica N° 14 ayuda a confirmar los resultados y la lógica del modelo pues se esperaba una disminución de agua tratada en los años 1997, 1998 y 2001 en la PTAP Tibitoc, como consecuencia del aumento en el tratamiento en los mismos años en Wiesner.

Como era de esperarse y como pasa en la situación real el sistema Tunjuelo suplió los remanentes de demanda no suministrada por los sistemas Chingaza y Tibitoc. El sistema Chingaza de manera general para el escenario óptimo disminuyó notablemente la demanda suministrada en un orden del 74 %, en este sistema el componente con mayor diferencia fue la PTAP Vitelma pues represento una disminución del 88 % en el agua tratada, coincidentalmente Vitelma en la actualidad esta dejando de ser utilizada por la ineficiencia en el tratamiento respecto a las otras PTAPS.



**Gráfica N° 14: Comparación de agua suministrada promedio real y modelado en la PTAP Tibitoc.**

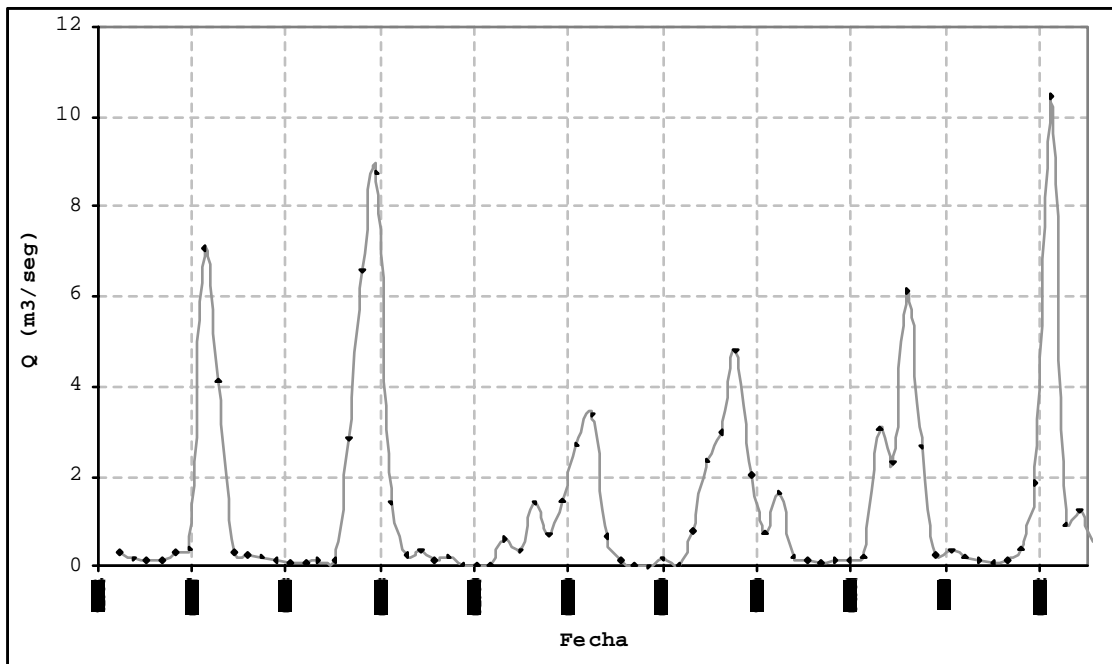
De los niveles promedios de los embalses de los tres sistemas (ver Gráfica N° 15) se puede observar cómo en el sistema Chingaza se presentó una disminución en el volumen anual promedio almacenado. Esto es acorde con la mayor cantidad de agua tratada por la PTAP Wiesner, en contraposición la disminución de agua tratada en Tibitoc coincide con el aumento del volumen promedio de agua almacenada en el sistema de embalses del Norte.



**Gráfica N° 15: Niveles promedio de volumen almacenado real y modelado de los sistemas Chingaza, Norte y Sur, para el periodo comprendido entre 1997 y 2002.**

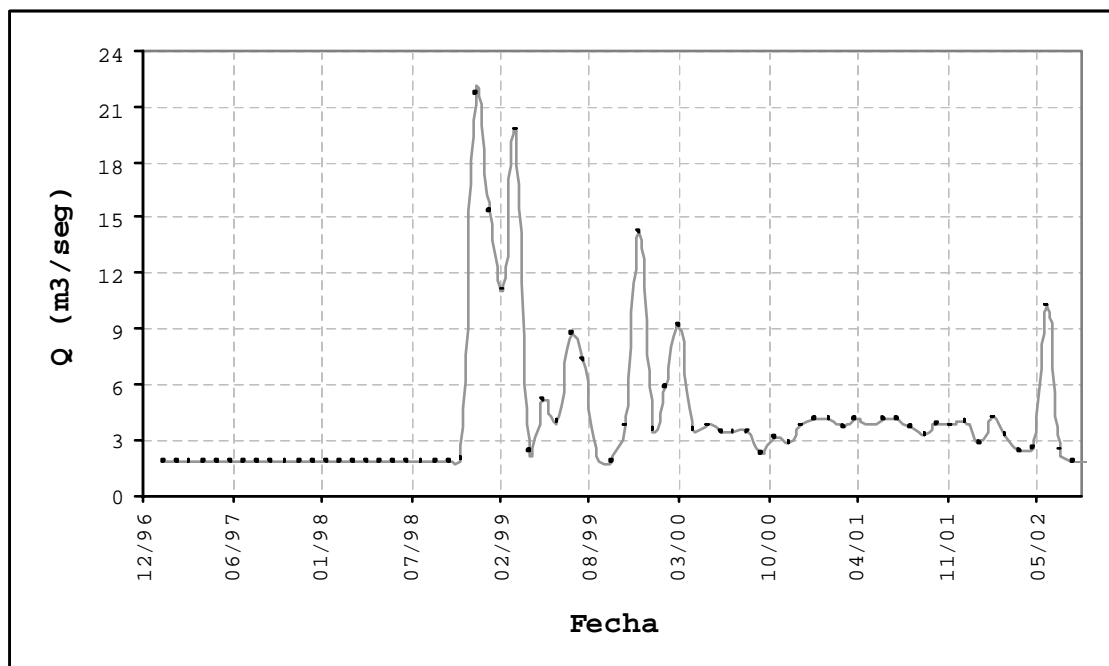
Los resultados y operación sugerida por el modelo para el sistema de embalses de Chingaza, Norte y del Sur, logró aumentar el volumen promedio anual de forma agregada pues en el periodo de evaluación el sistema de embalses almacenó 21 % menos de lo que finalmente se logró almacenar con el modelo de optimización.

Las Gráficas N° 16 y 17 presentan el comportamiento de caudal en el río Bogotá, en dos tramos importantes antes de llegar al distrito de riego la Ramada.



Gráfica N° 16: Caudal sobre el río Bogotá, aguas abajo de la descarga del embalse de Sisga.

Los valores de caudal presentados aguas abajo de la descarga del embalse de Sisga y antes de la estación de bombeo de Chicú hacia el distrito de riego de La Ramada, presentan valores y comportamientos físicamente posibles.



**Gráfica N° 17: Caudal sobre el río Bogotá, aguas debajo de la descarga del embalse Neusa y Aposentos.**

De forma general este primer conjunto de resultados hipotéticamente beneficiarían a la EAAB pues disminuirían los costos de operación del sistema sin castigar la demanda; sin embargo, tal operación no sería favorable para la concesión pues disminuiría la facturación para la misma época de tiempo en un 12 % con respecto a lo realmente facturado.

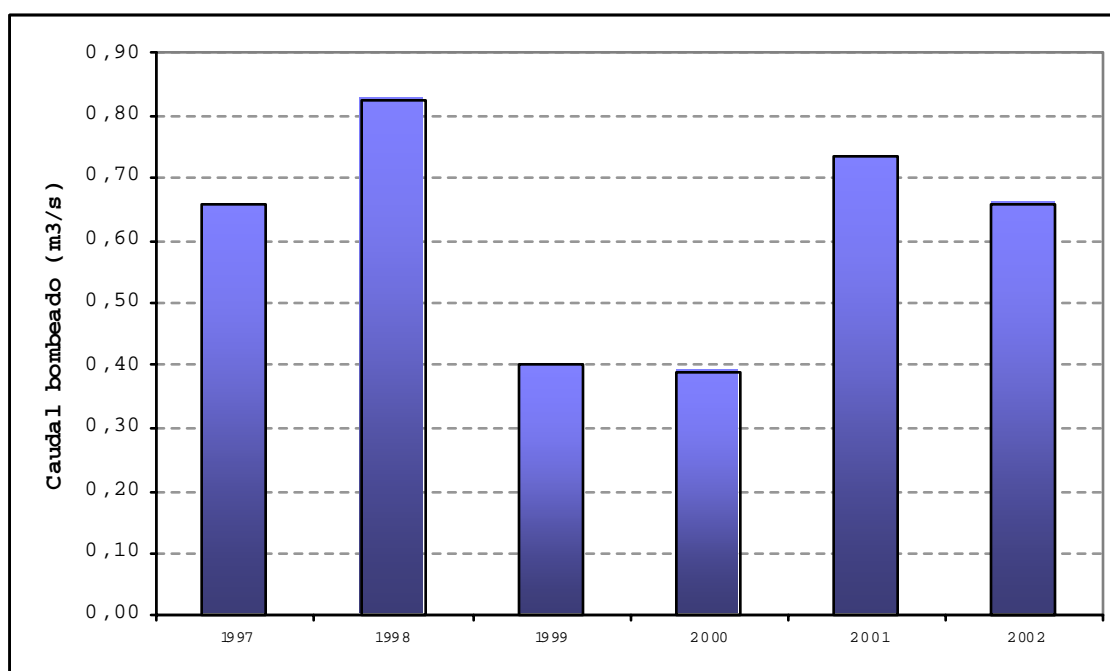
Un aspecto importante producto de la modelación fue el cumplimiento de la demanda requerida por todos los tres subsistemas (Acueducto, Riego y Energía) con un aumento en el volumen de agua almacenable en los embalses de la sabana (ver Gráfica N° 15), mostrando la potencialidad de uso de este tipo de modelos como herramientas cooperantes para decisores y asesores de los usuarios de agua.

Físicamente el comportamiento sugerido por el modelo de los componentes del subsistema de acueducto es razonable y aplicable, para las condiciones dadas en el periodo

comprendido entre los años 1997 y 2002; sin embargo, es de aclarar que el modelo no tiene en cuenta periodos de mantenimiento y/o reparaciones imprevistas de componentes, por lo que eventualmente la operación de embalses, conducciones y PTAPS no fueran factibles técnicamente en periodos de tiempos de mantenimiento y/o reparaciones.

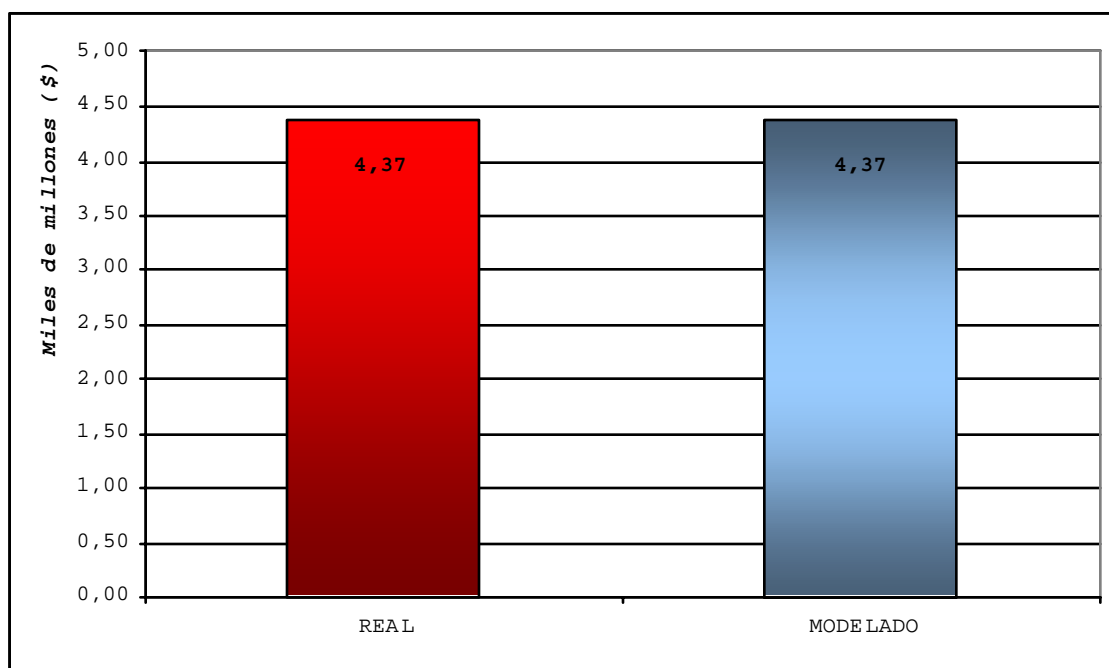
### 7.1.2 *Uso de agua para riego.*

El uso para riego en el sistema corresponde al agua requerida para la operación del distrito de riego La Ramada. La demanda del sistema fue satisfecha a cabalidad (ver Gráfica N° 18) y los costos de operación del distrito no presentaron variación alguna con la aplicación del modelo (ver Gráfica N° 19).



**Gráfica N° 18: Demanda suministrada modelada al distrito de riego La Ramada.**

Se observa que el valor de los caudales bombeados promedios a nivel anual hacia el distrito de riego no superan los  $0.83 \text{ m}^3/\text{seg}$ , lo que muestra la sub-utilización de la estación de bombeo, que en la actualidad posee una capacidad máxima de  $5.6 \text{ m}^3/\text{seg}$ .



**Gráfica N° 19: Costos de operación del distrito de riego La Ramada para el escenario Real y Modelado, de manera agregada del periodo entre 1997 y 2002.**

Para el uso del agua en el distrito de riego La Ramada los únicos costos de operación en los que se incurren son los asociados con el bombeo y mantenimiento del distrito, para los escenarios real y modelado, pues no se consideraron costos de operación de embalses. Entonces, el modelo al satisfacer la demanda del distrito incurre de forma igual en los mismos costos globales que se presentaron en la situación real.

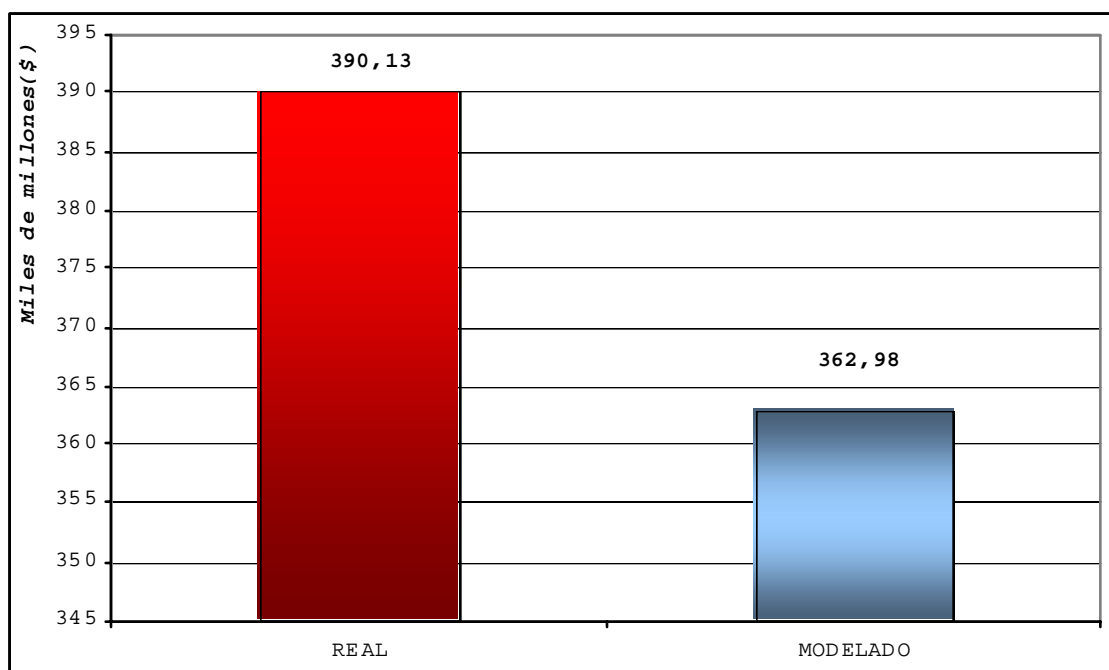
El aumento en el volumen promedio almacenado en los embalses del sistema (ver Gráfica N° 15) con la aplicación del modelo y la capacidad potencialmente utilizable en la estación de bombeo, son buenos indicadores para los usuarios del distrito de riego, pues aumentaría



las probabilidades de solicitar una mayor cantidad de agua para aumentar el rendimiento de los cultivos, desarrollar cultivos con más exigencia de agua o aumentar el área total irrigada.

### ***7.1.3 Uso de agua para generación de energía.***

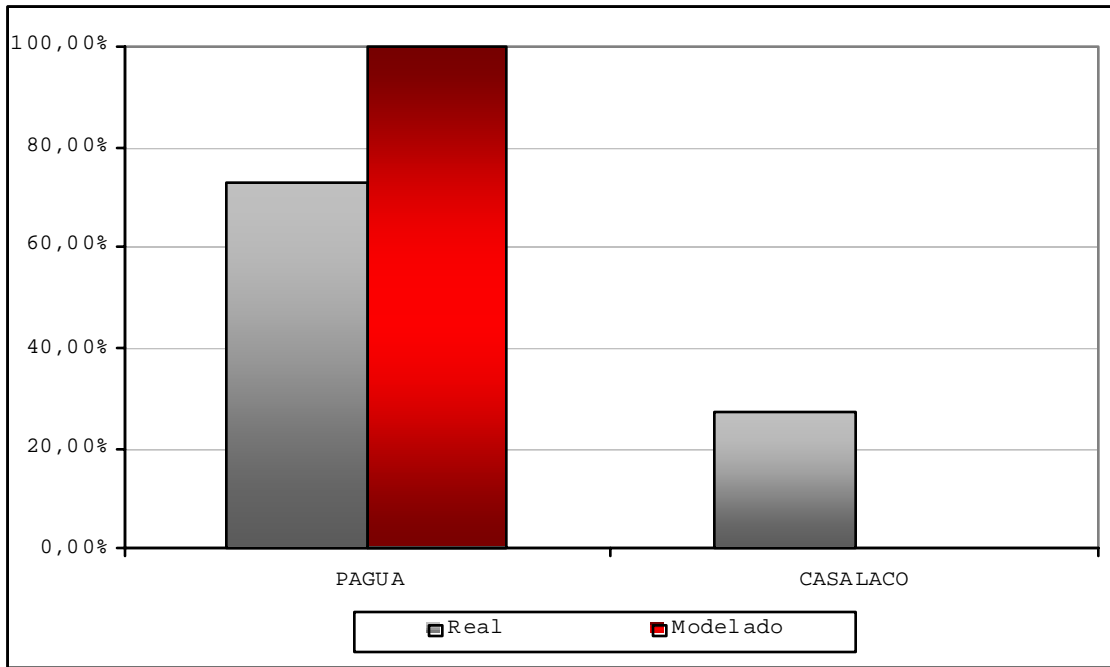
La participación en los costos del sistema, en lo concerniente generación de energía, es la de mayor valor por lo que el comportamiento de este nodo de demanda es muy influyente en el resultado final de los costos. El modelo presentó disminución en los costos de operación del sistema (ver Gráfica N° 20).



**Gráfica N° 20: Contrastes de costos de generación de energía a través de las cadenas de energía PAGUA y CASALACO.**

La distribución porcentual por cadena de generación de energía sugerida por el modelo (ver Gráfica N° 21) muestra una disminución total de generación de energía por la cadena

CASALACO (también conocida como “cadena vieja”), dejando en manos de la cadena PAGUA (también conocida como “cadena nueva”) la generación de energía que se requirió en el periodo de tiempo comprendido entre 1997 y 2002.



**Gráfica N° 21: Comparación en la participación de generación de energía entre las cadenas PAGUA y CASALACO, para el escenario real y modelado.**

El comportamiento sugerido por el modelo es riesgoso pues no podrían existir inconvenientes (mantenimientos, imprevistos o accidentes) de ningún tipo en la operación de la cadena de energía PAGUA, incluyendo las estaciones de bombeo y embalse de Muña. Sin embargo, con una política definida de mantenimiento en el tiempo, de parte de los operadores del sistema de energía, el modelo tendría en cuenta el inconveniente potencial, esperando luego de esto una distribución en donde seguramente el porcentaje de participación de parte de la cadena PAGUA sería mucho mayor que el de la cadena CASALACO.

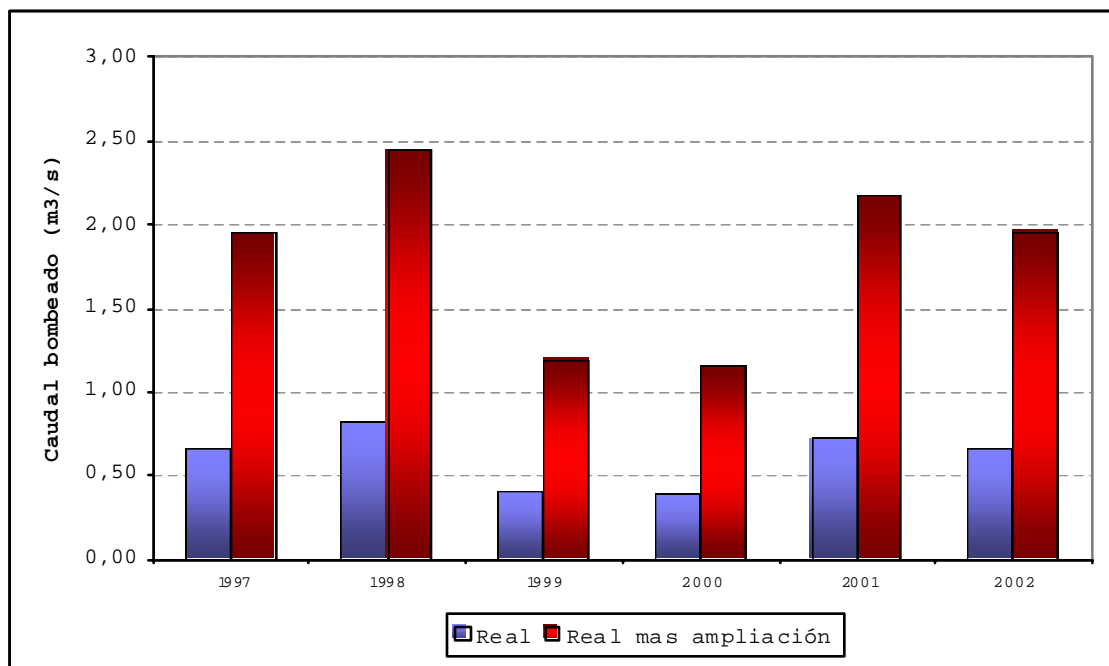
El nivel promedio del embalse del Muña presentó un valor de 9.9 Millones de m<sup>3</sup>, mostrando una disminución del 73 % del volumen promedio alcanzado en el mismo periodo de evaluación. Esto era de esperarse como consecuencia de la utilización exclusiva de la cadena PAGUA para la generación total de la demanda de energía.

La modelación de este subsistema fue la que mayor talanqueras presentó a lo largo del tiempo de la elaboración de la investigación, debido a los inconvenientes en el suministro de la información e interacción con las entidades involucradas y relacionadas con la generación de energía, sumado a esto se encuentra la incertidumbre de los datos suministrados, por lo que los resultados de este subsistema poseen incertidumbre y para extensiones de esta línea de investigación debe ser prioritaria su dedicación y principalmente la búsqueda de mecanismos eficientes de cooperación con las organizaciones involucradas.

## **7.2 ESCENARIO EXPANSION RAMADA**

El presente escenario solo modifica la demanda de agua para riego en el distrito de riego de La Ramada, el cual en la actualidad posee unas 5,500 Has netas beneficiadas de riego y que se encuentra en la etapa de expansión en un área aproximada de 10,550 Has, lo que implicaría unos mayores requerimientos de agua. Con el escenario sugerido se pretendió conocer la incidencia y factibilidad que hubiese tenido la ampliación del distrito de riego La Ramada en el periodo de tiempo de evaluación y la respuesta del sistema ante tal situación.

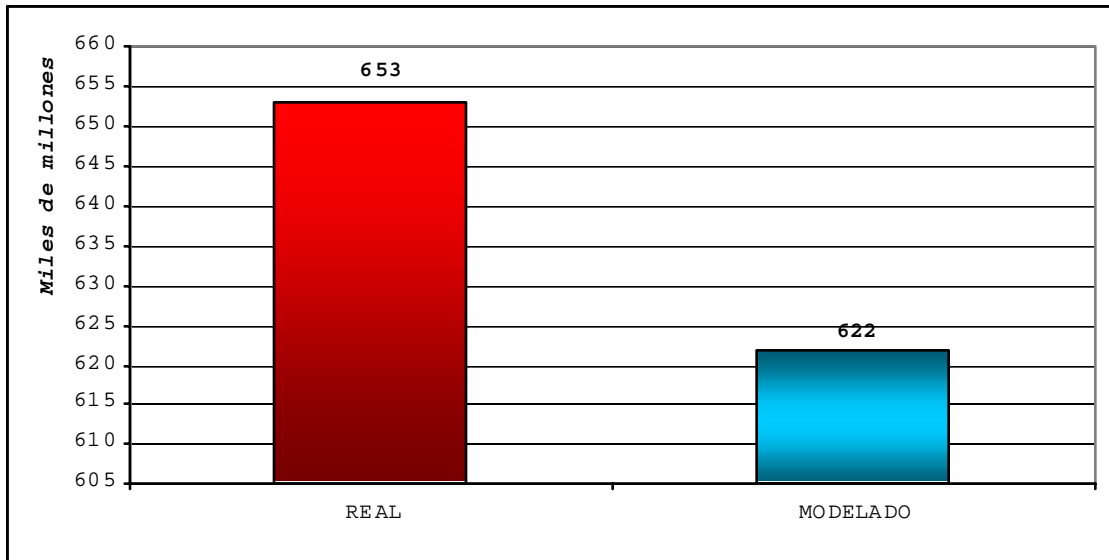
Para efectos de generar la demanda hipotética de la etapa actual sumada a la demanda hipotética de la expansión del distrito, se asumió que el área de expansión requeriría la misma cantidad de agua por unidad de área que presentó en el periodo evaluado el área actual irrigada (ver Gráfica N° 22).



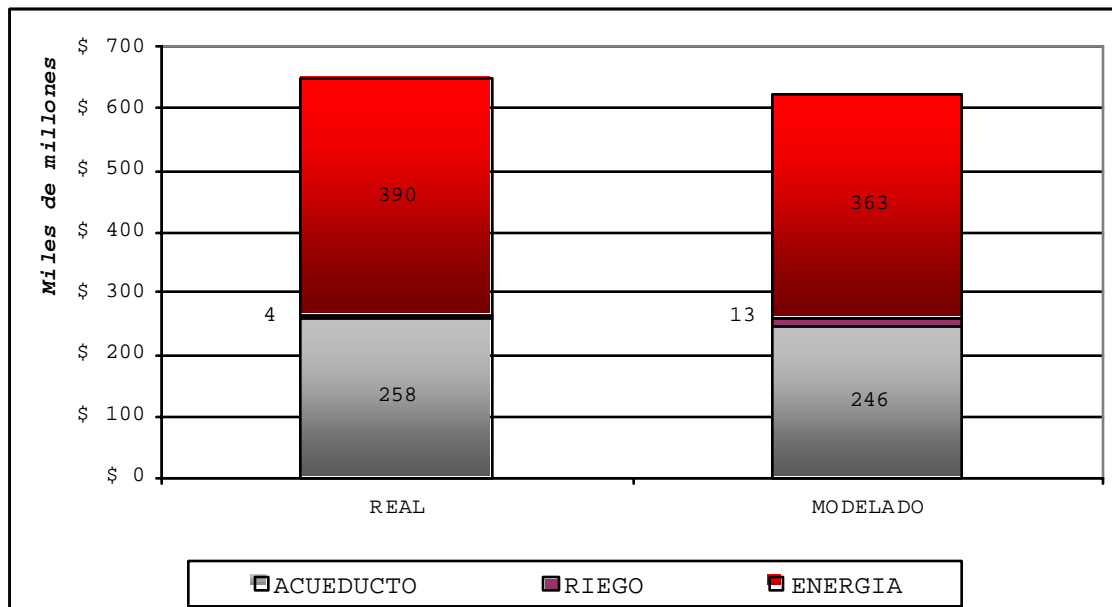
**Gráfica N° 22: Demanda promedio a nivel anual requerida por el distrito de riego La Ramada, en su etapa actual y ante una eventual expansión.**

En la Gráfica N° 23, se muestra la comparación de los costos totales de la operación real y los costos de operación con la expansión del distrito de riego La Ramada, y se observa que con un menor costo se podría satisfacer las demandas de agua potable, riego y generación de energía, inclusive los costos de operación de acueducto y generación de energía son menores que la situación real (ver Gráfica N° 24).

Se recalca como hecho relevante que el sistema sería capaz ante el nuevo escenario de satisfacer las demandas existentes y la ampliación hipotética.

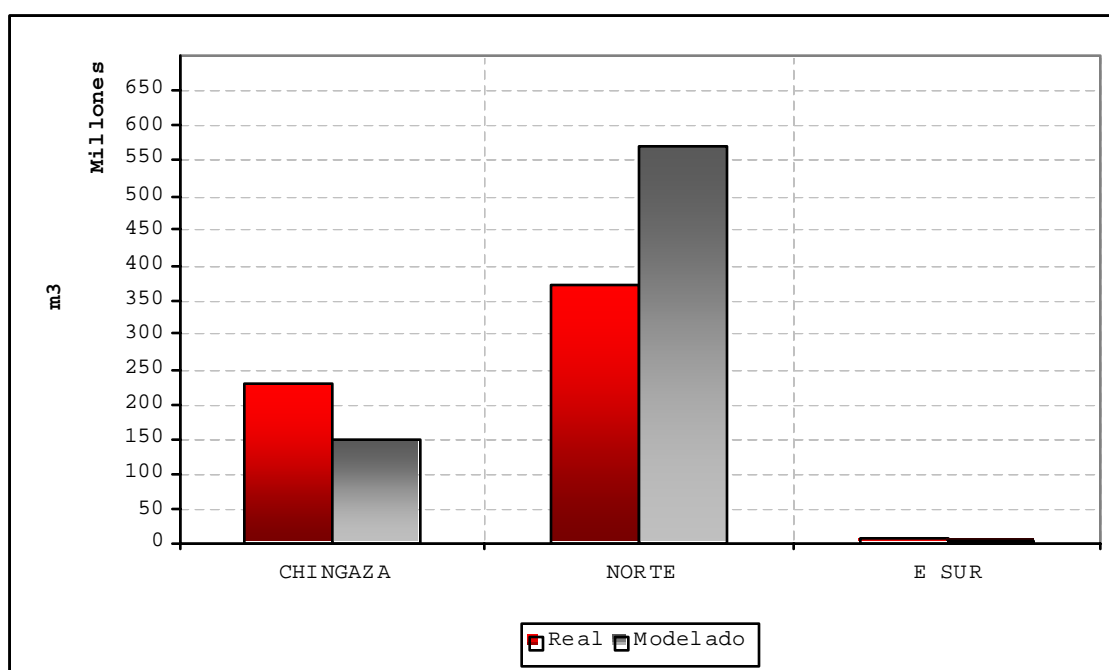


Gráfica N° 23: Costo total de operación del sistema a lo largo de la cuenca del río Bogota, para el escenario real y escenario modelado.



Gráfica N° 24: Comparación de costos a 2002 de situación real y datos arrojados del modelo de optimización.

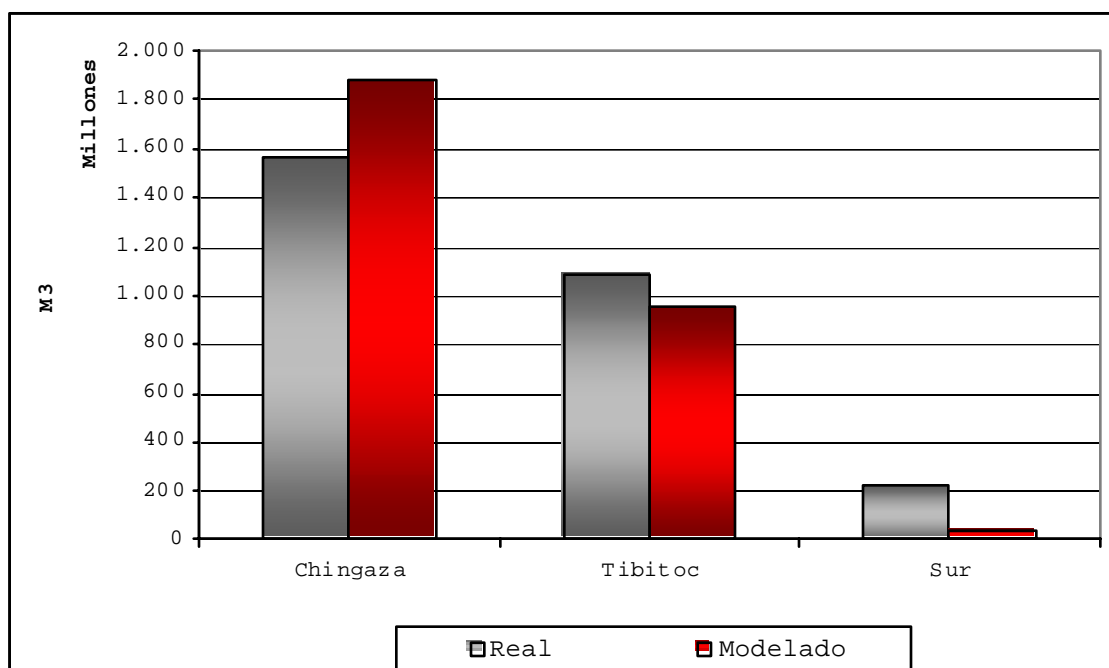
Se esperaba antes de la modelación de este escenario que fuera satisfecha la demanda extra en el distrito de riego, pues la disponibilidad de agua en los embalses en el periodo de tiempo en la situación histórica era indicador de ello (ver Gráfica N° 25). A pesar de ello los niveles promedios alcanzados luego de la modelación para los embalses del Norte fueron mayores a los presentados en la situación real (ver Gráfica N° 25), esto gracias a la optimización del sistema.



**Gráfica N° 25: Comparación de volúmenes promedio de los embalses a lo largo de la cuenca del río Bogotá.**

En lo referente al uso del recurso hídrico para la generación de energía éste no presentó variación respecto al resultado arrojado por el escenario base (ver Gráficas N° 20 y 21), las razones son las mismas expuestas en el escenario mencionado.

En lo relacionado al uso del recurso para agua potable, presenta la misma tendencia que en la situación real y escenario base, esta es la participación en primer lugar del sistema Chingaza, en segundo lugar Tibitoc y por último los embalses del sur (ver Gráfica N° 26).



**Gráfica N° 26: Distribución por sistema, para suministro de agua potable, para la situación real y modelada, para el periodo entre 1997 y 2002.**

Igual que los resultados arrojados en le escenario base, el escenario con la expansión sugiere una mayor utilización del sistema Chingaza y una disminución en la utilización del sistema Tibitoc.

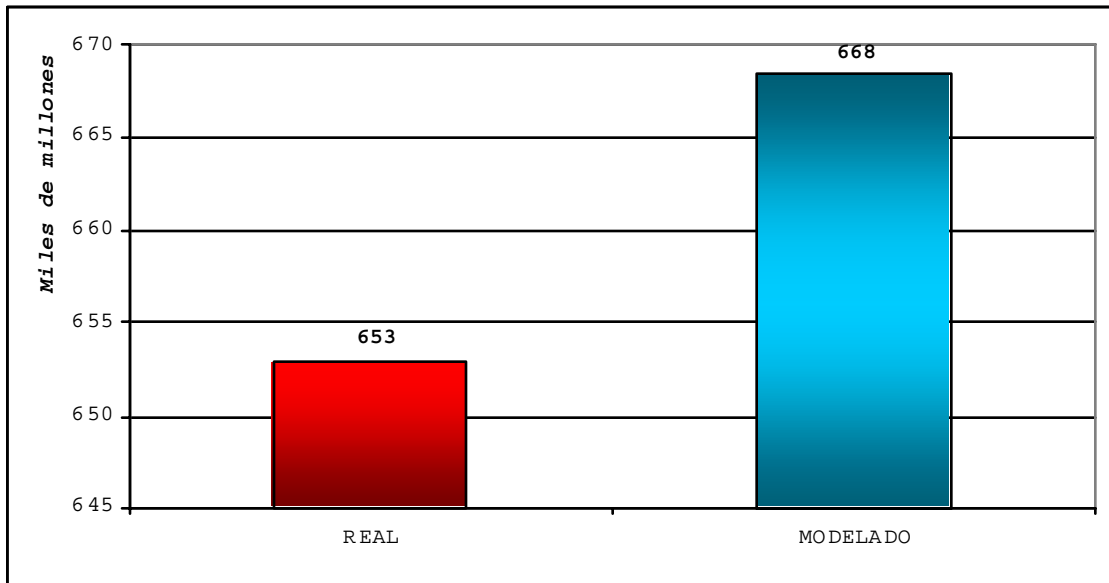
### **7.3 ESCENARIO CRECIMIENTO DEMANDA AGUA POTABLE.**

En el momento de la realización del informe final del Plan Maestro de Abastecimiento de Agua para Santa Fe de Bogotá en 1994, las proyecciones de demanda realizadas en ese entonces para el periodo entre los años 1997 y 2002 (ver Tabla N° 2) difieren en 27 % de los valores realmente presentados (ver Gráfica N° 1). Sin embargo, se consideró un ejercicio interesante la creación de un escenario de demanda de agua potable que se ajustara a los valores proyectados para el periodo entre 1997 y 2002, buscando con esto identificar lo que hubiese pasado si los valores proyectados se hubiesen presentado en la realidad, esto enmarcado en un modelo de optimización que además de buscar satisfacer las demandas requeridas, lo realiza al mínimo costo.

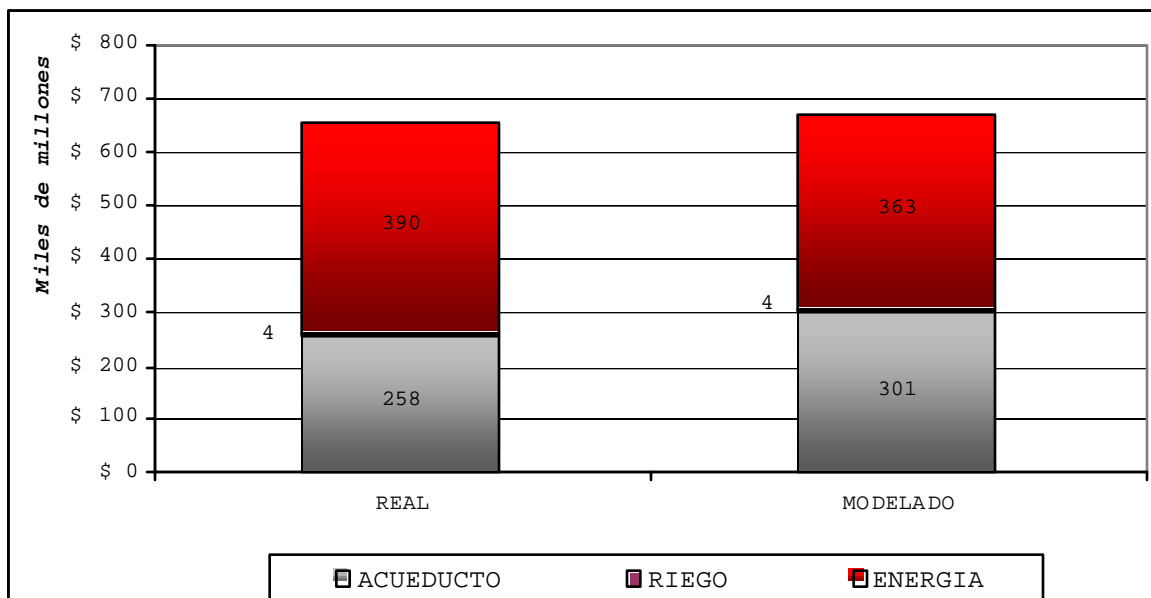
Los valores de demanda de agua para riego y generación de energía permanecieron invariables, así como la hidrología y demanda mínima de la PTAP en concesión Tibitoc.

Luego de la ejecución del modelo para el escenario planteado se encontró que el sistema era capaz de suplir las demandas existentes de riego y energía, y la demanda proyectada de agua potable, con un comportamiento en los costos como lo muestran la Gráficas N° 27 y 28.





Gráfica N° 27: Costo total de operación del sistema a lo largo de la cuenca del río Bogota, para el escenario real y escenario modelado.

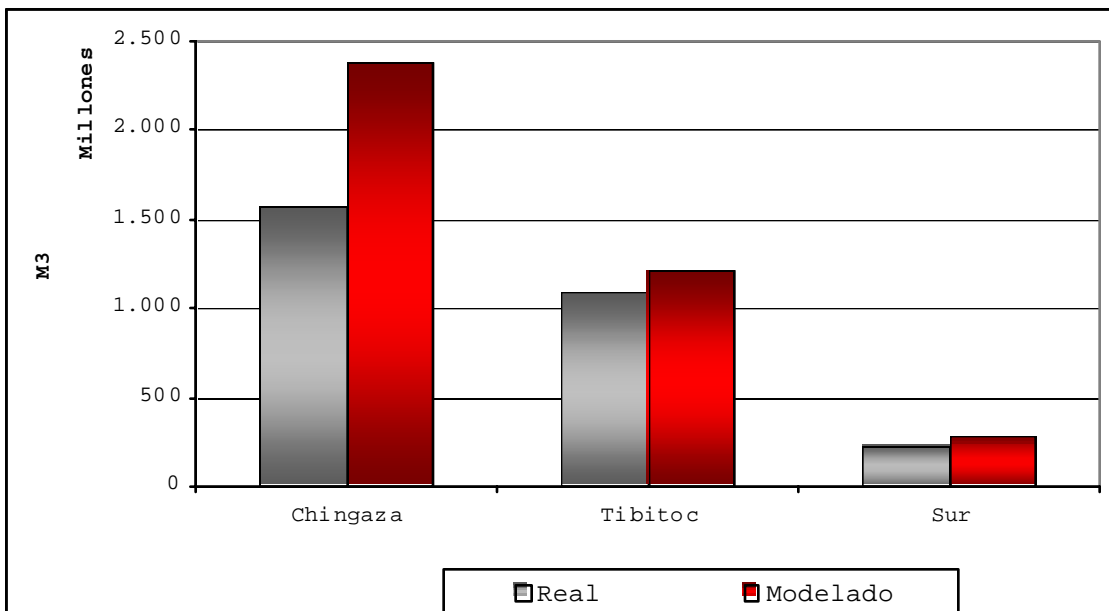


Gráfica N° 28 : Comparación de costos a 2002 de situación real y datos arrojados del modelo de optimización.

En las Gráficas anteriores se observa que resulta más costoso la operación del sistema con la utilización del modelo matemático, tanto de manera general como solo en lo relacionado a la operación del sistema de agua potable, hecho razonable si se tiene en cuenta que existió un incremento del 27 % en el requerimiento de del fluido para el abastecimiento de agua potable.

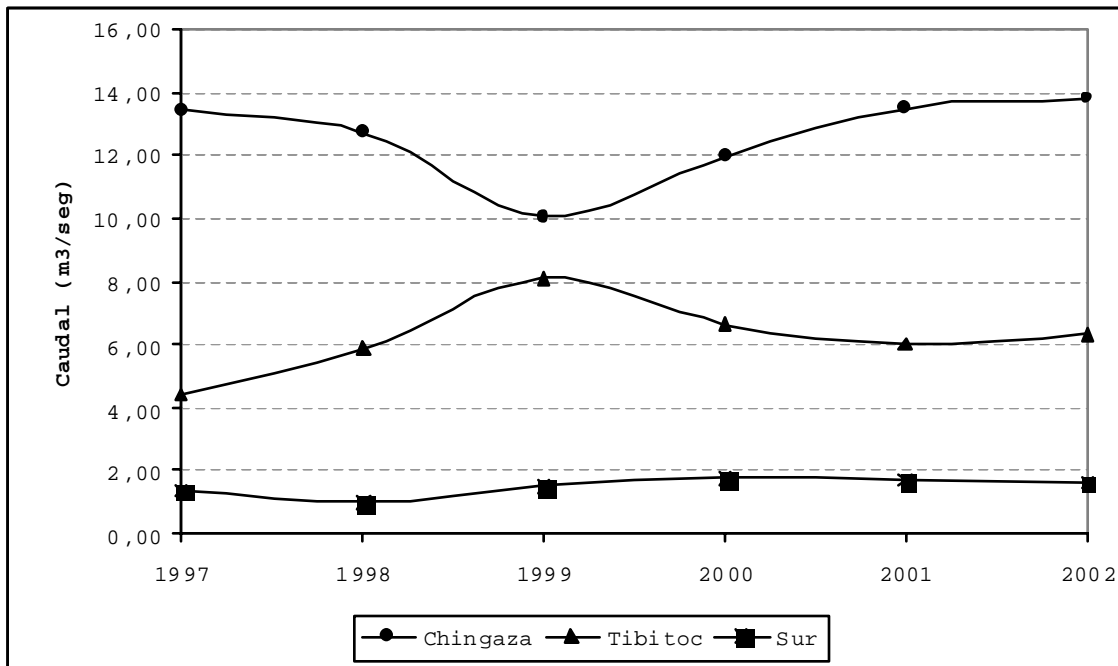
De manera general la operación del sistema para el escenario simulado tuvo un 2.3 % de aumento en los costos generales en relación ala situación real.

El comportamiento e incidencia de los subsistemas del sistema de acueducto se muestra en las Gráfica N° 29, en donde se observa que todos aumentan la cantidad de agua tratada en relación a la operación real y que además se mantiene la tendencia de mayor aportante, para suplir la demanda de agua potable, el sistema Chingaza, seguido por Tibitoc y Sistema del Sur.



Gráfica N° 29: Distribución por sistema, para suministro de agua potable, para la situación real y modelada, para el periodo entre 1997 y 2002.

La Gráfica N° 30, presenta el comportamiento para cada uno de los sistemas del caudal suministrado para suplir la demanda.



**Gráfica N° 30: Variación por sistema del caudal suministrado para el escenario con proyección de demanda de agua potable.**

En relación al comportamiento en los sistemas de riego y energía, éstos permanecieron invariantes en costos, por las razones expuestas en el escenario base.

## **8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

La interacción y cooperación con las organizaciones involucradas, en sistemas de recursos hídricos, es de vital importancia para aplicaciones de modelos como el utilizado en esta investigación.

El análisis y manipulación de la información suministrada debe realizarse con sumo cuidado dado el volumen de información que se maneja y la incidencia en el resultado final de los parámetros y entradas del modelo.

La realización de este tipo de proyectos debe intentar efectuarse de manera interdisciplinaria, buscando robustez, con la cooperación de profesionales en las áreas de Economía, Ingeniería Industrial, Ingeniería Agrícola, Ingeniería Ambientales e Ingeniería de Sistemas.

La elaboración de funciones que relacionen costos de la utilización del agua y el agua suministrada es un tema que podría mejorar los resultados de las modelaciones y acercarlas aun más a la realidad.

La definición de políticas claras en el área ambiental y en la planeación del mantenimiento de los componentes de un sistema de recurso hídrico es influyente en la factibilidad técnica de los resultados arrojados por los modelos de optimización.

Los resultados mostraron como los modelos matemáticos de optimización son una excelente alternativa como soporte a las decisiones del manejo de sistemas de recursos hídricos.

El modelo permite presentar alternativas óptimas de operación en el tiempo con resultados coherentes que lograrían ser viables en la medida que se encuentren involucrados la mayor parte de los aspectos influyentes en la toma de decisiones.

La adecuada definición de la topología de la red y del funcionamiento de los componentes del sistema, así como su cabal descripción e inclusión dentro de este tipo de modelo es de los eslabones importantes en el desarrollo de proyectos de este tipo.

MODSIM es una herramienta recomendable para el trabajo de modelos para el manejo de recursos hídricos de tipo lineal, con un potente algoritmo de solución y con la posibilidad de personalizar la aplicación.

Para el escenario base se encontró con la aplicación del modelo que en aras de tener un menor costo en la red se debe aumentar el agua tratada por el sistema Chingaza y disminuir el agua tratar en el sistema Tibitoc y del Sur.

El porcentaje de disminución en los costos de operación del sistema para el escenario base (6.96%), es un valor alentador hacia el uso de este tipo de modelos para la toma de decisiones, sumando a esto además la coherencia del comportamiento de los componentes del sistema.

Los escenarios de ampliación del distrito de riego y aumento de la demanda de agua potable, pudiesen haberse dado (por separado) sin castigar la demanda en ningún instante del tiempo, para el periodo de evaluado.

La utilización de la probabilidad asociada a los parámetros y variables del modelo es un punto que se debería abordar para próximas extensiones de la investigación, así como el desarrollo de una herramienta propia de solución que pueda tener en cuenta modelos no lineales.

Se debe procurar realizar estudios que arrojen relaciones beneficio (\$) con la cantidad de agua suministrada, para cada uno de los componentes del sistema, para de una posterior elaboración de una función objetivo de maximice los beneficios netos.

Otra posible extensión de la investigación es la interacción de este tipo de modelos de asignación de cantidad del agua con modelos de calidad del agua, que eventualmente podría generar un modelo multi-objetivo.

## 9 BIBLIOGRAFÍA

Belaineh,G., Peralta, R., Hughes, T. (1999) “*Simulation/Optimization Modeling for Water Resources Management*” JOURNAL OF WATER RESOURCES PLANNING AND MANAGEMENT, 154-161.

Cai, X., McKinney, D., Lasdon, L. (2003) “*Integrated Hydrologic-agronomic-Economic Model for River Basin Model*” JOURNAL OF WATER RESOURCES PLANNING AND MANAGEMENT, 4-17.

Clyde, C.,King, A. (1973) . “*Optimal Allocation of Water Resources in Utah*.” JOURNAL OF THE HYDRAULIC DIVISION, 1777-1794.

Draper, A.,Jenkins, M., Kirby,W.,Lund,J.,Howitt, R.. (2003) “*Economic-Engineering Optimization for California Water Management*” JOURNAL OF WATER RESOURCES PLANNING AND MANAGEMENT, 155-164.

Hall, W.,Dracup, J. “*Ingeniería de sistemas en los recursos hidráulicos*” McGraw-Hill Inc, 1974.

Hearn, Hatfield “*Decision Modelling for Alternative Water Supply Strategies*” Center of Applied Optimization, University of Florida. <http://www.ise.ufl.edu/cao/water>

Ingetec Consultores (1994). “*Plan Maestro de abastecimiento de agua para Santa Fe de Bogotá*” Informe Final Contrato N° 434/93.

Jenkins,M., Lund, J., Howitt,R. “*Economic Losses for Urban Water Scarcity in California*”  
Department of Civil and Environmental Engineering & Department of Agricultural and  
Resource Economics ,University of California, Davis.  
<http://cee.engr.ucdavis.edu/faculty/lund/CALVIN/>

Jenkins,M., Lund, J., Howitt,R , Draper, A., Msangi, S., Tanaka, S., Ritzema., R.,  
Marques., G. (2004) “*Optimization of California’s Water Supply System: Results and  
Insights*” JOURNAL OF WATER RESOURCES PLANNING AND MANAGEMENT,  
271-280

Johnson, L. (1986) “*Water Resources Management Decision Support Systems*” JOURNAL  
OF WATER RESOURCES PLANNING AND MANAGEMENT, 308-325.

Labadie,J., Sullivan, Ch. (1986) “*Computerized Decision Support Systems for Water  
Managers*” JOURNAL OF WATER RESOURCES PLANNING AND MANAGEMENT,  
299-307.

Labadie,J.(1995) “ MODSIM: RIVER BASIN NETWORK FLOW MODEL FOR  
CONJUNCTIVE STREAM-AQUIFER MANAGEMENT ”, Department of civil  
engineering of Colorado State University.

Larse, H., Mark, O., Jha, M., Gupta, D “ *The Application of Models in Integrated River  
Basin Management*” ASIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY.

Lopez, M. “Modelo de despacho óptimo de flujo de agua en una red de distribución”,Tesis  
Magíster Ingeniería Industrial, Universidad de los Andes, 2002.

Mays, L., Tung, Y. “*Hydrosystems Engineering and Management*”, McGraw-Hill Inc,  
1992.



Pingry, D., Shaftel, L, Boles, K. (1991) “*Role for Decision-Support Systems in Water-Delivery Design*” JOURNAL OF WATER RESOURCES PLANNING AND MANAGEMENT, 629-644.

Randall, M. (2001) “ Economics-Driven Simulation of the Friant Divison of the Central Valley Project, California” Thesis of M.Sc in Civil Engineering , University of California, Davis.

Valencia, A. “*Modelos de despacho óptimo de agua potable urbana, caso Acueducto de Bogotá*”, Tesis Magíster Ingeniería Civil, Universidad de los Andes, 2000.

## ANEXO N° 1.

## EVALUACIÓN DE HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES FACTIBLES.

ASPECTO	CALVIN	CALSIM	MODSIM
Base matemática	1,5	1,5	1,5
Evidencia de aplicaciones de éxito	0,9	1,2	1,5
Eficiencia de algoritmo de solución	0,6	0,75	0,75
Facilidad de comunicación con desarrolladores	0,75	0,45	0,75
Complejidad computacional	0,4	0,5	0,5
<b>TOTAL</b>	4,15	4,4	5

## ANEXO N° 2.

**COSTOS DE OPERACIÓN (PRECIOS A 2002) POR UNIDAD DE  
VOLUMEN (M3) DE LAS PTAPS A CARGO DE LA EAAB, PARA EL  
PERIODO COMPRENDIDO ENTRE 1997 A 2002.**

PTAP		1997	1998	1999	2000	2001	2002
TIBITOC	Tarifa plena	56,42	184,02	200,50	216,28	233,37	231,09
	%78 de descuento	56,42	40,48	44,11	47,58	51,34	50,84
	%85 de descuento	56,42	27,60	30,07	32,44	35,00	34,66
WIESNER		35,89	21,13	21,65	22,29	23,73	30,45
VITELMA		57,38	98,57	60,44	59,83	78,59	122,01
LA LAGUNA		46,28	80,26	60,66	47,18	43,47	62,71
SAN DIEGO		56,46	90,00	60,09	58,54	67,36	91,93

FUENTE: Dirección de Abastecimiento EAAB.

## ANEXO N° 3.

**DEMANDA MÍNIMA EN M<sup>3</sup>/SEG CON OBLIGACIÓN CONTRACTUAL  
EN LA CONSECIÓN DE LA PTAP TIBITOC S.A.**

MESES	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Enero	4,50	4,60	4,84	6,21	4,50	4,67
Febrero	4,50	4,63	4,89	6,10	4,50	4,72
Marzo	4,50	4,66	4,94	5,98	4,50	4,77
Abril	4,50	4,69	4,99	5,87	4,50	4,82
Mayo	4,50	4,72	5,04	5,75	4,50	4,87
Junio	4,50	4,75	5,09	5,64	4,50	4,92
Julio	4,50	4,75	5,09	5,64	4,50	4,92
Agosto	4,50	4,78	5,14	5,53	4,50	4,97
Septiembre	4,50	4,81	5,19	5,41	4,50	5,02
Octubre	4,50	4,84	5,24	5,30	4,53	5,07
Noviembre	4,50	4,87	5,29	5,18	4,58	5,12
Diciembre	4,50	4,90	5,34	5,07	4,63	5,17

**FUENTE: Dirección de abastecimiento EAAB.**

## ANEXO N° 4.

**DEMANDA SUMINISTRADA EN M<sup>3</sup>/SEG POR LA EAAB EN EL PERIODO  
COMPENDIDO ENTRE 1997 A 2002.**

MESES	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Enero	17,23	16,86	15,28	14,73	14,77	14,58
Febrero	15,10	15,19	14,26	14,38	14,07	15,18
Marzo	15,71	16,64	15,86	15,36	15,61	11,45
Abril	15,60	15,41	14,90	14,72	14,83	15,06
Mayo	15,40	16,89	15,40	15,39	15,36	15,15
Junio	14,69	15,60	14,70	15,13	14,75	15,05
Julio	15,11	16,69	15,19	15,05	15,18	15,32
Agosto	15,09	16,20	15,11	15,28	15,19	15,18
Septiembre	15,28	15,76	14,46	15,36	14,84	15,43
Octubre	15,75	16,87	14,84	15,25	15,16	15,31
Noviembre	15,93	15,44	14,74	14,76	15,00	14,98
Diciembre	16,99	15,80	15,58	15,25	15,38	15,29

**FUENTE: Dirección de Hidrología EAAB.**

## ANEXO N° 5.

**DEMANDA SUMINISTRADA EN M<sup>3</sup>/SEG AL DISTRITO DE RIEGO LA  
RAMADA EN EL PERIODO COMPRENDIDO ENTRE 1997 A 2002.**

ANO	ENERO	FEBRE	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOST	SEPTI	OCTUB	NOVIE	DICIE
1997	0,36	0,41	0,51	0,50	0,20	0,24	0,42	0,94	1,14	1,23	0,77	1,16
1998	2,01	1,60	1,85	0,70	0,30	0,31	0,55	0,71	0,78	0,48	0,23	0,40
1999	0,80	0,48	0,24	0,41	0,27	0,10	0,86	0,81	0,50	0,00	0,09	0,25
2000	0,91	0,96	0,11	0,20	0,00	0,00	0,58	0,54	0,10	0,16	0,44	0,67
2001	1,12	0,96	0,45	0,78	0,29	0,03	1,51	1,06	0,90	0,83	0,50	0,37
2002	1,49	1,53	0,27	0,25	0,24	0,12	0,56	0,93	0,80	0,65	0,20	0,85

**FUENTE: Dirección de Hidrología EAAB.**