

# Validación de la metodología para el cálculo del índice de escasez de aguas subterráneas, propuesto por el Ideam en Bogotá

Hollman Esteban Ayala Angulo\* / Elkin Fabian Arias Pérez\*\*  
Luis Efrén Ayala Rojas\*\*\* / Nelson Omar Vargas\*\*\*\*

## RESUMEN

El Índice de escasez (*Ie*) es uno de los componentes de la ecuación para la determinación de la TASA POR USO DE AGUA (TUA). Esta tasa se aplica en las aguas superficiales y en las aguas subterráneas con el fin de reconocer un recaudo por la explotación del recurso. El propósito de esta investigación es determinar, de manera práctica, la validez de la aplicación de este valor de Índice de escasez de aguas subterráneas. En las aguas superficiales el Índice de escasez está determinado y aplicado de manera experimental y de manera teórica. El fin general en este artículo es analizar la validez de la metodología para el cálculo del valor de *Ie*, y a su vez saber que tan representativo puede ser en la TUA. Con el cobro de la TUA el estado busca adquirir recursos económicos que puedan brindar una renovación del recurso hídrico subterráneo; garantizar que este recurso no se vea explotado de manera excesiva provocando un agota-

miento a largo plazo, y garantizar programas de reinversión en el mismo. Dentro de la metodología del *Ie* se plantean dos grandes factores determinantes: el Caudal Captado y el Caudal Explotable, en donde el primero está determinado por el consumo del recurso hídrico en la zona de estudio y el segundo lo determina la recarga existente en la misma zona. De estos antecedentes preliminares es necesario llevar a cabo un estudio detallado de la metodología del *Ie* en campo y de esta manera determinar la validez de dicha metodología propuesta por el *Ie*.

**Palabras clave:** acuífero, caudal captado, caudal explotable, recarga, Índice de escasez, tasa por uso de aguas subterránea.

\* Ingeniero Civil. Universidad de La Salle. Correo electrónico: ingestebansky@hotmail.com

\*\* Ingeniero Civil. Universidad de La Salle. Correo electrónico: kicolento@gmail.com

\*\*\* Profesor de la Facultad de Ingeniería Civil. Universidad de La Salle. Correo electrónico: layalar@lasalle.edu.co

\*\*\*\* Geólogo IDEAM. Correo electrónico: nelovar@hotmail.com

Fecha de envío: febrero 3 de 2007

Fecha de aceptación: agosto 5 de 2007

## **VALIDATION OF THE METHODOLOGY FOR THE CALCULATE OF THE INDEX OF UNDERGROUND WATER SHORTAGE, PROPOSED BY THE IDEAM IN BOGOTA D.C.**

### **ABSTRACT**

The Scarcity Index (*Ie*) is one of the components of the equation to determine the WATER USE RATE (TUA). This rate is applied in superficial waters and in underground waters in order to recognize a tax for the exploitation of the resource. The purpose of this investigation is to determine, in practical way, the validity of the application of the underground waters *Ie*. In the superficial waters the *Ie* is determined and applied in an experimental and theoretical way. The main purpose of this article is to analyze the validity of the methodology to calculate the value of *Ie*, and also to know how representative it might be in the TUA. With the collection of the TUA tax, the State intends to have economic resources to renew the underground water resource; to guaran-

tee that this resource is not exploited in an excessive way causing long term exhaustion, and at the same time, to guarantee reinvestment programs. Inside the *Ie* methodology, there are two determining factors: the Captured Flow and the Exploitable Flow, where the first one is determined by the consumption of the resource in the studied area, and the second one determines the existent recharge in the same area. Of these preliminary antecedents it is necessary to carry out a detailed study of the methodology of the *Ie* and so to determine the validity of this methodology proposed by the *Ie*.

**Key words:** aquiferous, captured flow, exploitable flow, recharges, Scarcity Index, water use rate.

## INTRODUCCIÓN

De la necesidad de avanzar en la búsqueda de nuevas y más prácticas tecnologías para el aprovechamiento del recurso hídrico disponible, el Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia (MAVDT) se ha puesto en la tarea de darle un ahorro y correcto aprovechamiento de las Aguas Subterráneas existentes en la Sabana de Bogotá para efectos de uso en la ciudad.

Buscando darle un mejor manejo al recaudo de dicho recurso, se dispuso el cobro de la llamada Tasa de Cobro por Uso de Aguas Subterráneas (TUA), la cual pretende asegurar el correcto ahorro y uso eficiente del agua. Dentro de la TUA se encuentra un valor conocido como Índice de escasez de Aguas Subterráneas (Ie), éste se obtiene mediante una operación sencilla que involucra los Caudales Captados para consumo y los Caudales Explotables para el acuífero existente.

En este artículo se analizan diferentes escenarios en los cuales se varían factores claves para el cálculo del Índice de escasez, con el fin de verificar su aplicabilidad y su relevancia. Estos escenarios de variación van desde el aumento de la Recarga del acuífero mediante recarga artificial, hasta la disminución del Caudal Captado por restricciones ambientales o políticas de ahorro propuestas por la entidad competente.

## CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio hace parte de una serie de altiplanos que se encuentran en la parte central de la Cordillera Oriental, constituidos por valles de origen fluvio-lacustre desarrollados a una altura cercana a los 2.600 m.s.n.m. El trabajo se desarrollo en la Sabana de Bogotá en la parte correspondiente a la jurisdicción del Departamento Administrativo del Medio Ambiente (DAMA).

**Formaciones geológicas del área de estudio:** la Sabana de Bogotá presenta una tectónica compleja, donde se pueden diferenciar tres estilos estructurales superpuestos: el primero asociado a una tectónica de bloques, con un sistema principal de fallas normales de dirección noreste a norte-sur; el segundo asociado a una tectónica de bloques donde el patrón de fallamiento principal es de fallas inversas o de cabalgamientos (thrust) con rumbo NE-SW. Existe un tercer patrón de fallamiento que corresponde a fallas transversales con rumbo NW-SE, que cortan las estructuras preexistentes, y que son consecuencia de los últimos pulsos del levantamiento de la Cordillera Oriental (DAMA, 2000).

**Estratigrafía del área:** la Sabana de Bogotá está compuesta por sedimentos y roca, sedimentos que corresponden a: Depósitos Coluviales (Qc), Depósitos Cuaternarios (Qti, QI, Qta), Formación Sabana (Qs), Formación Subachoque, Formación Tilatá (QTt), Formación Usme (Tsu), Formación arenisca la Regadera (Tpr), Formación Bogotá (Tpb), Formación Cacho (Tpc), Formación Guaduas (Tkgu), Grupo Guadalupe (Ksg), Formación Chipaque (Ksch) y Formación Une (Kiu).

Para realizar esta caracterización de las formaciones geológicas el DAMA realizó pruebas geoeléctricas, sísmicas y gravimétricas, y a su vez se hicieron algunas reinterpretaciones de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) existentes y la revisión de la información sísmica disponible en la zona.

Estos análisis incluyeron 115 Sondeos Eléctricos Verticales SEV (80 SEV dentro de las zonas de estudio planteadas para también se realizaron 3.300 m de pruebas geoeléctricas y 3.400 m de pruebas electromagnetismo que complementaron los resultados esto con el fin de definir la forma de la cuenca, espesores y tipos de acuíferos presentes, estos para el fin del DAMA tener claras todas las características de la zona.

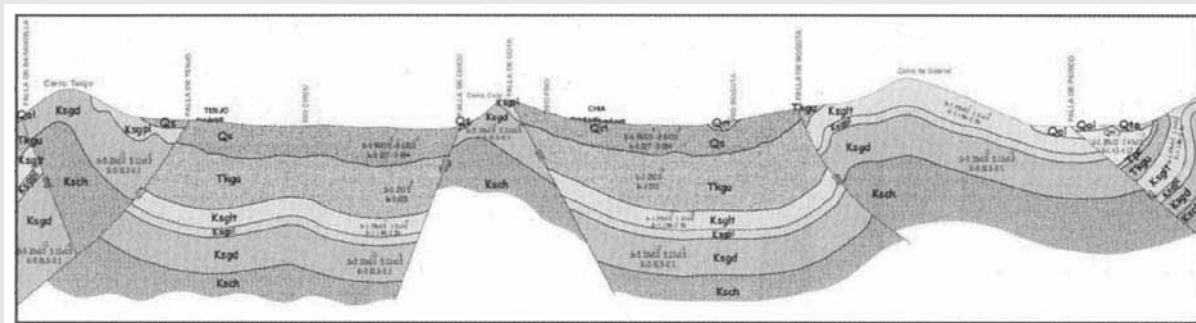
**Formaciones hidroestratigráficas:** con base en el mapa geológico actualizado se agruparon de acuerdo a sus características geohidráulicas, las diferentes formaciones, obteniéndose así unidades hidroestratigráficas que conforman el mapa hidrogeológico. Las unidades obtenidas son:

- Acuífero Cuaternario: es un acuífero de extensión regional, que se correlaciona con sedimentos Cuaternarios.
- Acuífero Tiltatá: acuífero de extensión local de alto rendimiento, que se correlaciona con la Formación Tiltatá (QTt).
- Acuífero Cacho: acuífero de extensión local, de bajo a mediano rendimiento, que se correlaciona con la Formación Cacho (Tpc).
- Capa semiconfinante Bogotá-Regadera: es un acuitardo discontinuo de extensión regional, aso-

ciado a rocas arcillosas con algunas intercalaciones de arenas.

- Capa semiconfinante Guaduas: es un acuitardo continuo de extensión regional de bajo rendimiento, asociado principalmente a rocas arcillosas.
- Acuífero Labor-Tierna: acuífero de extensión regional de alto rendimiento, siendo el más importante para el aporte de agua subterránea en el área de estudio. Se correlaciona con la Formación Labor-Tierna (Kslt) del Grupo Guadalupe.
- Acuífero Plaeners y Arenisca Dura: acuífero de extensión regional, cuya producción está ligada al grado de fracturamiento que puedan tener las formaciones asociadas.
- Basamento: unidad impermeable que se correlaciona con la Formación Chipaque (Ksch) corresponde al límite inferior del acuífero.

**FIGURA 1.** SECCIONES GEOHIDRÁULICAS TRANSVERSALES DE LA SABANA DE BOGOTÁ, SENTIDO ESTE-OESTE (SECCIÓN A-A)<sup>1</sup>



### ANÁLISIS CLIMÁTICO

**Precipitación:** uno de los datos más importantes es el de la precipitación media multianual, la cual varía espacialmente con valores aproximadamente de 600 mm/año en el costado oriental, la distribución espacial de la precipitación es un condicionante de la disponibilidad de agua para la infiltración y recarga de formaciones acuíferas, en este caso subterráneos, en general, se puede decir que la precipitación en la mayor parte del área de estudio tiene un comporta-

miento bimodal, con períodos húmedos en los meses de abril, mayo, octubre y noviembre, y períodos secos en los meses restantes.

**Infiltración y recarga:** de acuerdo a los resultados de infiltración real, se toma para esta área valores en la parte plana sobre la ciudad a un valor medio de 5 mm/año. Los valores medios finales de recarga considerados son de 583 l/s para el grupo Guadalupe y 271 l/s para el Cuaternario, para un total de 854 l/s.

1 DAMA, Modelo hidrogeológico para los acuíferos de Bogotá D.C. p. 10.

La infiltración a partir de los cauces superficiales, aunque son valores muy bajos, son calculadas por el modelo a partir de la información de niveles y resistencias hidráulicas (y conductancias hidráulicas) del lecho. Los valores medios totales para el DAMA son del orden de 15 l/s.

**Campo de pozos:** de acuerdo con la investigación general y con base en los resultados del modelo del DAMA, se determinaron dos zonas con buenas condiciones hidrogeológicas en las cuales la perforación de pozos podría brindar un caudal (mayor a 20 l/s por pozo) para usarse como fuente adicional de agua y/o fuente alterna de abastecimiento para la población de Bogotá D.C.

## MODELO HIDRÁULICO

**Modelo de Flujo.** el DAMA calculó balances de agua por capas del modelo, en sectores de ríos, áreas de recarga y zonas de sobre bombeo. En resumen, se puede concluir que en la actualidad, la recarga total es de 869l/s (854 l/s de infiltración directa, 15 l/s de ríos). Este almacenamiento está siendo utilizado casi en su totalidad en el Acuífero Guadalupe en la zona sur de la ciudad, y otra parte en el Cuaternario en la zona norte.

## ÍNDICE DE ESCASEZ DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Para llevar a cabo la obtención del  $I_e$  se deben tener en cuenta factores preponderantes que hacen referencia a la capacidad del acuífero y a la explotación del mismo, estos factores son: el Caudal Captado y el Caudal Explotable, con lo cual el  $I_e$  se define como (DAMA, 2004):

$$I_{EG} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_c}{Q_e}$$

donde:

$I_{EG}$ : corresponde al índice de escasez para aguas subterráneas.

$\sum_{i=1}^n Q_c$ : es la sumatoria de los caudales captados en el acuífero.

$Q_e$ : es el caudal del recurso hídrico que es explotable del acuífero.

**Caudales captados en los acuíferos:** estos caudales corresponden al caudal extraído por captaciones de pozos, aljibes y manantiales en cada una de las zonas hidrogeológicas delimitadas por las autoridades ambientales competentes para recaudar las tasas de utilización del agua, de acuerdo con lo dispuesto con el artículo 3 del decreto 155 de 2004 del MAVDT.

Existe por tal motivo las captaciones que cuentan con medidores volumétricos de caudal, los cuales deben ser registradores continuos o contadores que permitan cuantificar el volumen extraído del acuífero entre visitas del personal designado por las autoridades ambientales competentes. El Programa de Contadores debe formar parte de la gestión realizada por las autoridades ambientales para el seguimiento y monitoreo del uso y manejo del recurso.

Además de lo anteriormente mencionado la precisión y exactitud en la estimación de caudales captados del acuífero dependerá de varios factores:

*Un inventario actualizado de puntos de agua:* dicho inventario requiere de actualizaciones periódicas de acuerdo con las dinámicas de la región de estudio. En todos los casos, este inventario alimenta tanto los modelos hidrogeológicos conceptuales como los modelos numéricos o matemáticos para la toma de decisiones.

*Legalización de los puntos de agua inventariados que deben ser sujeto de cobro de tasa por uso del agua:* en este aspecto se debe hacer mucho énfasis en el uso ilegal del recurso a demás existen pozos en tramite de legalización y otros con permisos de explotación temporales.

*Implementación de medidores de caudal en pozos de concesión de aguas subterráneas:* un inventario de puntos de agua con información sistematizada, jerarquizada y procesada alimenta el modelo hidrogeológico conceptual de manera adecuada para futuras aplicaciones y toma de decisiones.

En este caso, y basado en lo mencionado anteriormente, se obtuvo datos más recientes recopilados por el DAMA, de los volúmenes de agua captada para uso en el año 2005. Los cuales se ilustran a continuación.

**Volumen de agua subterránea otorgado:** el volumen actualmente concesionado depende de las condiciones de disponibilidad del recurso y de la interferencia de los pozos existentes, situaciones que son evaluadas por los profesionales de Subdirección Ambiental Sectorial en el momento de otorgar una Concesión.

**TABLA 1. VOLUMEN DE AGUA SUBTERRÁNEA OTORGADO**

Caudal litros/seg	Volumen diario en metros	Volumen anual en metros
288.32	24,910.80	9,092,442.00

Fuente: DAMA, 2006a.

El mayor volumen otorgado proviene del Acuífero Cuaternario y en menor porcentaje del Acuífero Cretácico, lo que implica que la demanda del recurso se está enfocando hacia en los acuíferos más superficiales, situación que ha obligado al DAMA a restringir los aprovechamiento en los primeros 100 metros de profundidad limitando la instalación de filtros a partir de esa profundidad.

**TABLA 2. VOLUMEN DE AGUA SUBTERRÁNEA OTORGADO POR ACUÍFERO**

Acuífero	Caudal litros/seg	Volumen diario en metros	Volumen anual en metros
Cuaternario	236.44	20,428.81	7,456,515.65
Cretácico	11.40	985.39	359,667.35
Cretácico-cuaternario	40.47	3,496.60	1,276,259.00
<b>Total</b>	<b>288.32</b>	<b>24,910.80</b>	<b>9,092,442.00</b>

Fuente: DAMA, 2006a.

En la actualidad sólo se está aprovechando el 37% del volumen concesionado por el DAMA, con lo cual se demuestra los resultados que ha tenido el DAMA en relación con el uso eficiente del recurso a través de su política de estimular la elaboración y ejecución de los programas de ahorro y uso eficiente del agua a los concesionarios.

### CANTIDAD DE POZOS CON CONCESIÓN POR ACUÍFERO EXPLOTADO

Al igual que la demanda del recurso el mayor número de pozos se encuentran perforados en el acuífero cuaternario y un muy pequeño porcentaje en el cretácico.

**TABLA 3. CANTIDAD DE POZOS POR ACUÍFERO**

Acuífero	Cantidad de pozos
Cuaternario	82
Cretácico	3
Cretácico - Cuaternario	14
No identificado	2
<b>Total</b>	<b>101</b>

Fuente: DAMA, 2006.

**TABLA 4. USO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

Usos para el año 2006	Volumen en metros cúbicos/año
Industrial -Humano	106.24
Doméstico-Pecuario	1,460.00
Lavado-de-Vehículos-Doméstico	8,019.34
Riego	8,550.63
Humano-Doméstico-Pecuario	16,130.00
Doméstico-Riego	16,593.92
Humano-Doméstico-Institucional-Recreacional	18,064.00
Doméstico-Recreacional	20,943.00
Humano-Doméstico-Recreacional-Riego	30,007.00
Industrial-Doméstico-Humano	31,295.00
Doméstico-Institucional	32,284.99
Lavado de Autos	38,728.61
Doméstico-Agrícola-Pecuario	47,869.42
Humano-y-Doméstico-Agrícola-Pecuario	87,604.43
Riego-Pecuario	90,797.00
Recreativo-Riego	103,409.00
Recreativo	107,498.00
Industrial-Doméstico	128,769.75
Doméstico	184,250.77
Industrial	2,447,482.16
<b>TOTAL</b>	<b>3,419,730.22</b>

Fuente: DAMA, 2006.

$$\text{Volumen Diario Captado} = \frac{\text{Volumen Anual Captado}}{365} = \frac{3419730022}{365} = 9369.49\text{m}^3$$

Teniendo en cuenta dichos valores y mediante un análisis simple en el que se tienen en cuenta varia-

bles como el promedio de dichos volúmenes y los segundos que hay en un día se obtiene el valor del Caudal Captado:

$$Q_c = \frac{\text{Vol.diario.capt.}}{\text{tiempo(seg / dia)}} = \frac{9369.49\text{m}^3}{86400.\text{seg}} = 0.10844.\text{m}^3 / \text{seg} * 1000 = 108.44.\text{lt} / \text{seg}.$$

Este valor está sujeto a un análisis posterior debido a que en la actualidad se trabaja con 101 pozos debidamente reglamentados, pero se encuentran en trámite para ser concesionados 59 pozos, lo cual significaría un aumento del 58% del volumen total captado en la zona de estudio.

### CAUDALES EXPLOTABLES EN LOS ACUÍFEROS

La evaluación de la cantidad de agua subterránea disponible para explotación en un acuífero es uno de los problemas que mayor polémica suscitan a la hora de operacionalizar instrumentos que legitimen el dominio jurídico establecido para la gestión del recurso hídrico.

Sin embargo, es claro que esta oferta está relacionada con los recursos y reservas, y aquí es donde se busca una aproximación conceptual y una forma práctica de cuantificar esa cantidad de agua disponible para efectos de la tasa por uso del agua subterránea.

En este sentido, se parte del reconocimiento que la capacidad de un acuífero es una función de su volumen útil y, por lo tanto, su estimación atiende los determinantes que condicionan ese volumen. En otras palabras, la oferta está relacionada con las condiciones geológicas del acuífero, sus propiedades hidráulicas y las condiciones de recarga del almacenamiento.

Así pues, es fácil entender que puede estimarse un volumen de almacenamiento estático que tiene en cuenta las características intrínsecas del embalse subterráneo y un volumen dinámico que considera la distribución espacio temporal de la alimentación o recarga.

Los recursos explotables  $Q_E$  representan el volumen de agua, expresado en forma de caudal que se puede captar de un acuífero a largo plazo, sin causar alteraciones indeseables en el régimen de aguas subterráneas, teniendo en cuenta condiciones técnicas y económicas. En general, los recursos explotables no deben exceder la recarga asegurada del acuífero, o sea los recursos disponibles.

Por tal motivo se propuso en la metodología:

$$Q_E = \alpha * Q_N$$

En donde:

$\alpha$  = Representa un coeficiente de utilización de las reservas naturales, que toma valores entre 0.5 a 1, es definido, por las autoridades ambientales y legitima la definición expresada en el Art. 2 del decreto 155 de 2004, cuando se refiere al caudal que se puede extraer de los recursos disponibles de un acuífero, sin alterar el régimen de explotación establecido por la autoridad ambiental competente.

$Q_N$  = Representa los recursos naturales que corresponden a la recarga del acuífero en condiciones naturales.

Los valores de recarga del acuífero en los estudios del DAMA fueron estimados mediante el método del balance hídrico. Este se establece para un lugar y un período dados, por comparación entre los aportes y las pérdidas de agua en ese lugar y para ese período. Se tienen también en cuenta la constitución de reservas y las extracciones anteriores sobre esas reservas. Las aportaciones de agua se efectúan gracias a las precipitaciones. Las pérdidas se deben esencialmente a la combinación de la evaporación y la transpiración de las plantas, lo cual se designa bajo el término evapotranspiración. Las dos magnitudes se evalúan en cantidad de agua por unidad de superficie, pero se traducen generalmente en alturas de agua; la unidad más utilizada es el milímetro.

Al ser estas dos magnitudes físicamente homogéneas, se las puede comparar calculando, ya sea su diferencia (precipitaciones menos evaporación), o su relación (precipitaciones sobre evaporación). El balance es evidentemente positivo cuando la diferencia es positiva o cuando la relación es superior a uno. Se elige una u otra expresión en función de comodidades o de obstáculos diversos. El escurrimiento a partir de una unidad de superficie se contará en las pérdidas. La infiltración se considera como una puesta en reserva bajo forma de agua capilar en el suelo. El estudio de los balances hídricos es complejo por el hecho de que las dos variables consideradas no son independientes.

La cantidad evaporada depende evidentemente de la cantidad de agua disponible: cesa cuando el volumen de agua aportada por las precipitaciones está agotado. Esto condujo a introducir la noción de evapotranspiración potencial que consiste en la cantidad de agua que puede pasar en la atmósfera únicamente en función del estado de ésta, suponiendo

que la cantidad de agua disponible no sea un factor limitante. Es común, en el estudio de los balances hídricos, comparar las precipitaciones  $P$  y la evapotranspiración potencial  $ETP$ , lo cual permite distinguir situaciones diferentes en función de umbrales que son directamente significativos para un lugar o un período dado: Si  $P < ETP$ , la evaporación real será igual a  $P$ ; habrá deducción sobre las reservas, ausencia de escurrimiento; el período se denominará deficitario. Si  $P > ETP$ , la evaporación real será igual al  $ETP$ , habrá escurrimiento y constitución de reservas; el período se llamará excedente. Los problemas en cuanto a las mediciones y a los órdenes de magnitud que se consideran imponen variaciones en los métodos de estudio y de presentación de los balances hídricos.

Una ecuación general del valor de recarga por medio del balance hídrico puede estar dado por:

$$\text{Recarga} = \text{Estado} + \sum_{ij=1} \text{Entradas} - \sum_{j=1} \text{Salidas}$$

Las entradas de agua a la cuenca hidrográfica pueden darse por precipitaciones como lluvia, nieve, granizo y condensaciones. Las salidas de agua pueden darse por:

- Evotranspiración: de bosques y áreas cultivadas con o sin riego. Evaporación desde superficies líquidas, como lagos, estanques, pantanos, etc.
- Infiltraciones profundas que van a alimentar acuíferos.
- Derivaciones hacia otras cuencas hidrográficas.
- Derivaciones para consumo humano y en la industria.
- Salida de la cuenca hacia un receptor o hacia el mar.

El establecimiento del balance hídrico completo de una cuenca hidrográfica es un problema muy complejo, que involucra muchas mediciones de campo. Con frecuencia, para fines prácticos, se suelen separar el balance de las aguas superficiales y el de las aguas subterráneas.



En el caso de estudio de la Sabana de Bogotá, la empresa encargada del modelo hidrogeológico realizó un estudio de la recarga en base al programa MACRA, éste basa sus variables en un balance hídrico, con las pérdidas y entradas de agua a la zona, este realiza el análisis con los valores de precipitación, evapotranspiración, escorrentía, evaporación, etc., de la zona, durante un tiempo de 10 años, con este análisis el programa calcula los valores de recarga de los acuíferos, valor esencial para el DAMA para el cálculo del caudal explotable de un acuífero.

Basándose en lo anteriormente mencionado y teniendo en cuenta los valores de;

- Precipitación: 600 mm /Año Zona Sur-Occidental  
– Centro Occidental 1400 mm/año

- Evapotranspiración Potencial: 800-1000 mm/Año.
- Evapotranspiración Real: 500 mm/Año Zona Sur  
850 mm/Año Zona Oriental-Norte.
- Infiltración Potencial 200 mm/Año
- Infiltración Real 854 Litros/Segundo

Se obtienen el valor estimado de la recarga por medio del programa MACRA, el cual es de:

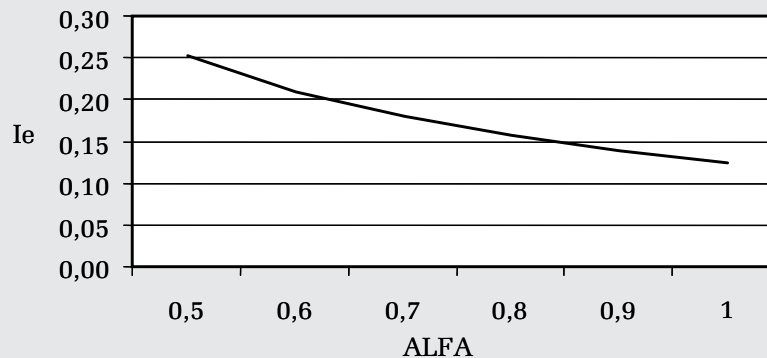
$$R = 854 \text{ litros/segundo.}$$

Los cálculos de la recarga de los acuíferos de la Sabana de Bogotá, fueron calculados con dicho programa con datos de varias estaciones hidrológicas y medidores de diferentes partes de la ciudad.

**TABLA 5.** COMPORTAMIENTO DEL ÍNDICE DE ESCASEZ EN FUNCIÓN DEL ALFA  
CON LOS VALORES REALES DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO.

Caudal captado (l/seg)	Caudal explotable (l/seg)	Alfa ( $\alpha$ )	Recarga (l/seg)	Índice de escasez
108,443153	427	0,5	854	0,25
	512,4	0,6		0,21
	597,8	0,7		0,18
	683,2	0,8		0,16
	768,6	0,9		0,14
	854	1		0,13

**FIGURA 2.** COMPORTAMIENTO DEL ÍNDICE DE ESCASEZ EN FUNCIÓN DEL ALFA  
CON LOS VALORES REALES DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO



## ESCENARIOS DE VARIACIÓN DEL Ie

### CASO REAL CON VALORES DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO DE LA SABANA DE BOGOTÁ

#### ESCENARIO 1: AUMENTO DE LOS VALORES DE CAUDAL EXPLOTABLE POR AUMENTO DE VALORES DE RECARGA POR MEDIO DE UNA RECARGA ARTIFICIAL

La recarga artificial es factible en la zona del Distrito Capital a través de pozos de inyección, e infiltración directa en las zonas de recarga, esto teniendo en cuenta el tratamiento de aguas residuales que el Distrito Capital tiene planeado para entrar en operación en los próximos años, se recomienda explorar el uso de esta agua residual tratada. Antes de efectuar a nivel operacional cualquier labor de recarga por pozos se debe hacer un proyecto piloto que, eventualmente, se puede convertir en operacional, controlando los caudales, taponamiento, aumento de presiones, entre otros.

Tomando en cuenta los conocimientos adquiridos por parte del grupo a lo largo de la elaboración del proyecto se pueden manejar valores graduales de aumento de la recarga de 5 y 10% al valor real y actual de la recarga, esto debido a la recuperación de las aguas servidas del propio acuífero.

CASO I = Aumento del 5%.

#### ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Si se presenta un aumento en términos reales del 5 % del valor de recarga que es de 854 l/s . El cual será de 0.854 m<sup>3</sup> /s), se diría que el volumen de agua que se le inyectaría al acuífero sería de 42,7 l/s lo cual significa que el valor de la recarga total que será inyectado al acuífero será igual a:

$$854 \text{ L/seg} + (854 \text{ L/seg} * 0.005) = 896.7 \text{ L/seg}$$

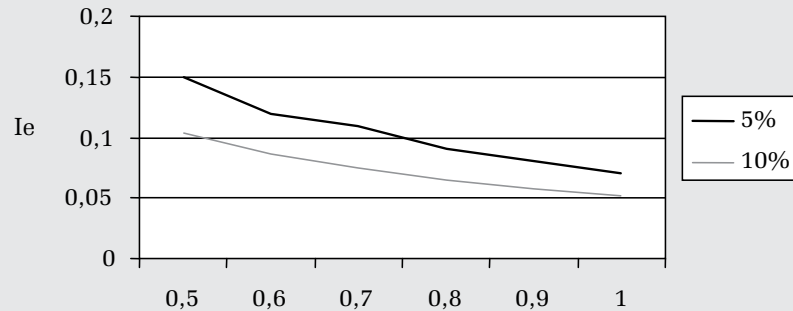
CASO II = Aumento del 10%.

#### ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Si se presenta un aumento en términos reales del 10% del valor de recarga real que es de 854 l/s (se debe tener en cuenta que este valor debe ser expresado en términos de volumen (m<sup>3</sup> /s). El cual será de 0,854 m<sup>3</sup> /s), se diría que el volumen de agua que se le inyectaría al acuífero sería de 85,4 l/s lo cual significa que el valor de la recarga total que será inyectado al acuífero será igual a:

$$854 \text{ L/seg} + (854 \text{ L/seg} * 0.1) = 2083.76 \text{ L/seg}$$

**FIGURA 3.** COMPORTAMIENTO DEL ÍNDICE DE ESCASEZ EN FUNCIÓN DEL ALFA EN UN ESCENARIO CON RECARGA ARTIFICIAL CON UN CASO DE AUMENTO EN LA RECARGA DEL 5 Y 10 %.



**OBSERVACIÓN**

**AUMENTO DE LA DEMANDA DEL RECURSO**

Al llevar a cabo un aumento de los valores de recarga en este caso de 5 y 10 %, se puede notar que hay una disminución considerable en los valores de  $I_e$ , teniendo en cuenta que la relación matemática que define el  $I_e$ , es una división en la cual el dividendo crece por aumento de la recarga, provocando una disminución en la relación dando valores menores de  $I_e$ .

**ESCENARIO 2: CASO HIPOTÉTICO DE AUMENTO DEL VALOR DE CAUDAL CAPTADO**

Este aumento podría llegar a darse esencialmente debido a tres factores: el primero provocado por un aumento de la demanda del recurso en la zona, el segundo por un aumento del número de pozos y, por último, se podría dar el caso de que el caudal captado sea aprovechado un 100%.

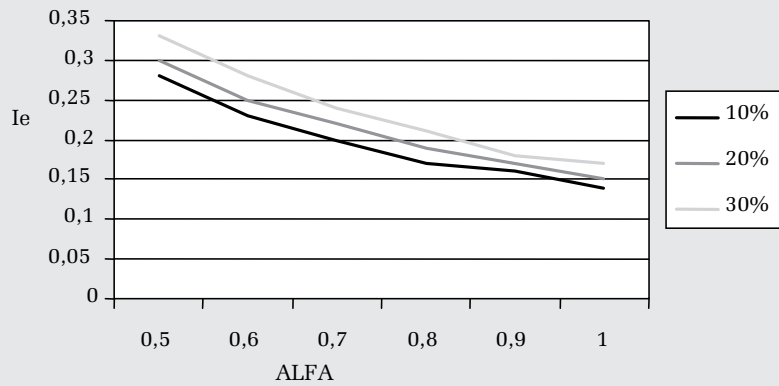
Este caso podría llegar a darse debido a un aumento considerable de la demanda del recurso provocado por un aumento socioeconómico de la zona de estudio. Las variaciones se pueden dar de un promedio en la explotación del caudal captado en los últimos años de 10% que representaría un aumento de 10 pozos de captación lo cual equivale a un aumento de 10,84 l/s. del consumo total, 20% que representaría un aumento de 20 pozos de captación lo cual equivale a un aumento de 21,68 l/s del consumo total, y 30% que representaría un aumento de 30 pozos de captación lo cual equivale a un aumento de 32,52 l/s del consumo total.

CASO I = AUMENTO DEL CAUDAL CAPTADO EN UN 10%.

CASO II = AUMENTO DEL CAUDAL CAPTADO EN UN 20%.

CASO III= AUMENTO DEL CAUDAL CAPTADO EN UN 30%.

**FIGURA 4.** COMPORTAMIENTO DEL ÍNDICE DE ESCASEZ EN FUNCIÓN DEL ALFA EN UN ESCENARIO CON AUMENTO EN LOS VALORES DEL CAUDAL CAPTADO EN SERIES DE 10%, 20% Y 30%



**OBSERVACIONES**

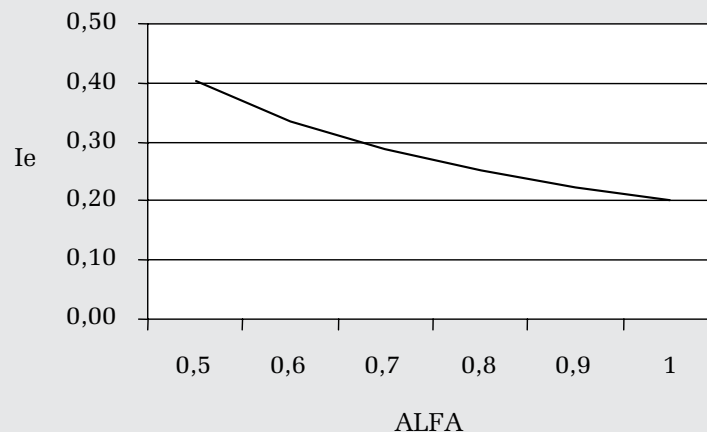
En este caso hay un aumento de los valores de caudal captado explicado anteriormente de 10, 20 y 30%, se puede notar que hay un aumento de los valores de  $I_e$  y a su vez si los valores de alfa son cada vez más pequeños se presentará un aumento cada vez mayor del valor de  $I_e$ .

**AUMENTO DEL NÚMERO DE POZOS CONCESIONADOS**

Este caso podría llegar a darse debido a un aumento del número de pozos con concesión vigente pasando de 101 pozos a 160, esto a raíz de que en la actualidad hay 59 pozos en trámite para ser formalizados y entrar a ser parte de los pozos legalmente constituidos.

Si este fenómeno se llegara a dar y se formalizaran un total de 160 pozos el caudal captado pasaría de 108 l/s a 171 l/s.

**FIGURA 5.** COMPORTAMIENTO DEL ÍNDICE DE ESCASEZ EN FUNCIÓN DEL ALFA EN UN ESCENARIO CON AUMENTO EN LOS VALORES DEL CAUDAL CAPTADO POR AUMENTO DEL NÚMERO DE POZOS CONCESIONADOS



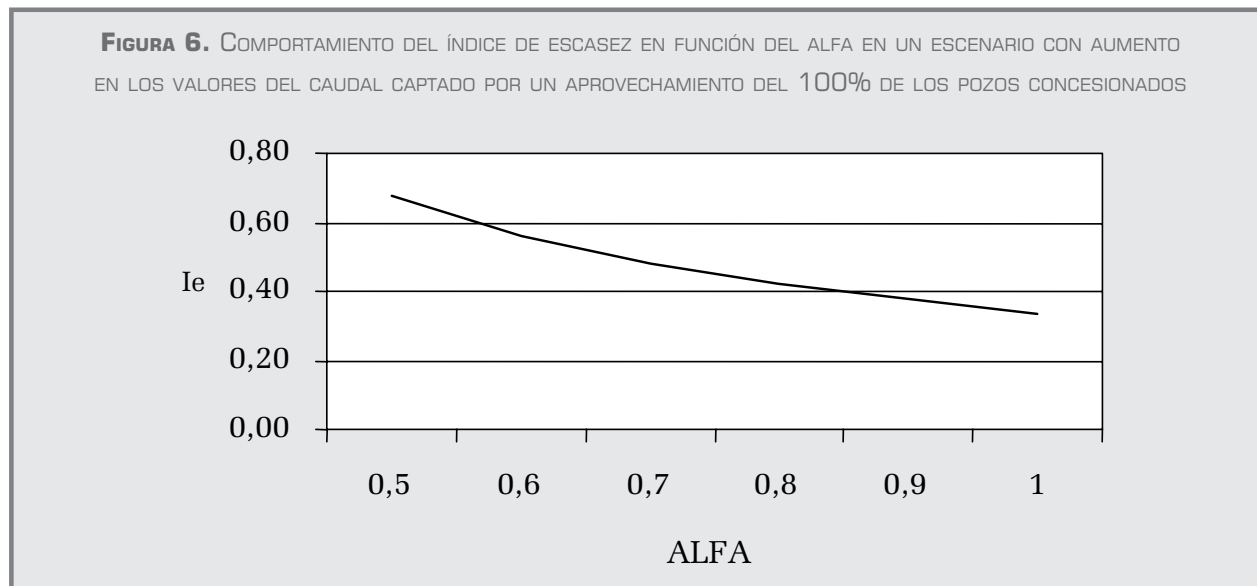
Fuente: Ayala y Arias, 2007.

**OBSERVACIONES**

En este caso en el que hay un aumento del valor del caudal captado explicado anteriormente de 55%, se puede notar que hay un aumento de los valores de  $I_e$  y a su vez si los valores de alfa son cada vez más pequeños se presentara un aumento cada vez mayor del valor de  $I_e$ .

**AUMENTO DEL CAUDAL CAPTADO PROVOCADO POR UN APROVECHAMIENTO DEL 100% DE LOS POZOS CONCESIONADOS**

Este caso podría llegar a darse si se aprovechara el 100% del volumen de agua que producen los pozos y no el 37% de esta, que es lo que en la actualidad se está captando en la zona de estudio. Con lo cual al caudal captado pasaría de 108l/s a 288l/s.



Fuente: Ayala y Arias, 2007.

**OBSERVACIONES**

En este caso en el que hay un aumento del valor del caudal captado explicado anteriormente de 38%, se puede notar que existe un aumento de los valores de  $I_e$  y a su vez si los valores de alfa son cada vez más pequeños se presentara un aumento cada vez mayor del valor de  $I_e$ .

**ESCENARIO 3: CASO HIPOTÉTICO DE DISMINUCIÓN DEL VALOR DE CAUDAL CAPTADO**

Este caso podría darse por varios sucesos de disminución considerable de la demanda del recurso en la zona de explotación, estos pueden ser:

- Abandono de pozos: esto puede suceder por una calamidad socioeconómico como reubicación de una zona industrial por improductividad de una zona.
- Restricciones ambientales: este caso puede darse por políticas de restricción ambientales impuestas por las entidades gubernamentales encargadas.
- Políticas de ahorro: estas pueden ser propuestas por las empresas consumidoras para darle un mejor manejo, ahorro y uso eficiente del recurso con el fin de mejorar su economía.

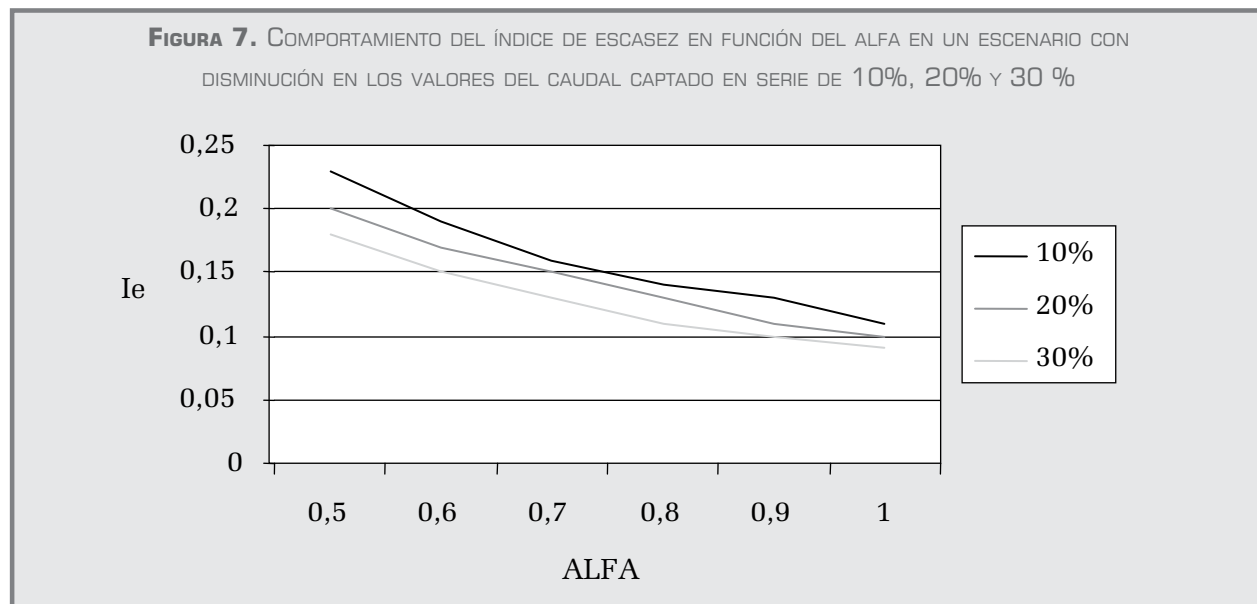
Las variaciones se pueden dar de un promedio en la explotación del caudal captado en los últimos años

de 10% que representaría una disminución de 10 pozos de captación lo cual equivale a una disminución de 10,84 l/s del consumo total, 20% que representaría una disminución de 20 pozos de captación lo cual equivale a una disminución de 21,68 l/s del consumo total, y 30% que representaría una disminución de 30 pozos de captación lo cual equivale a una disminución de 32,52 l/s del consumo total.

CASO I = DISMINUCIÓN DEL CAUDAL CAPTADO EN UN 10%.

CASO II= DISMINUCIÓN DEL CAUDAL CAPTADO EN UN 20%.

CASO III= DISMINUCIÓN DEL CAUDAL CAPTADO EN UN 30%.



Fuente: Ayala y Arias, 2007.

### OBSERVACIONES

En este caso hay una disminución de los valores de caudal captado explicado anteriormente de 10, 20 y 30%, se puede notar en las gráficas hay una disminución de los valores de Ie pero a su vez si los valores de alfa son cada vez más pequeños se presentara un aumento cada vez mayor del valor de Ie.

### TASA DE COBRO POR USO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La tarifa de la tasa por utilización del agua (TUA) expresada en pesos/ m<sup>3</sup> tiene como objetivo garantizar la renovabilidad del recurso la cual será establecida por cada autoridad ambiental competente para cada

cuenca hidrográfica, acuífero o unidad hidrológica de análisis y está compuesta por el producto de dos componentes: la tarifa mínima (TM) y el factor regional (FR):

$$TUA = TM * FR$$

Por el cual reglamenta el artículo 43 de la Ley 99 de 1993 sobre tasas por utilización de aguas y se adoptan otras disposiciones.

Donde:

- TUA= es la tarifa de la tasa por utilización del agua, expresada en pesos por metro cúbico (\$/m<sup>3</sup>).
- TM= Es la tarifa mínima nacional, expresada en pesos por metro cúbico (\$/m<sup>3</sup>), en la actualidad para la zona de trabajo es 0.56 \$/m<sup>3</sup>

- FR= corresponde la factor regional, adimensional.

Tarifa mínima (TM)= el ministerio de ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial.

$$FR = 1 + (Ck + Ce) * Cs$$

El factor regional tendrá un rango de variación así:

$$1 \leq FR \leq 7 \text{ Para agua superficial}$$

$$1 \leq FR \leq 12 \text{ Para agua subterránea}$$

Los componentes del factor regional son:

Cs = coeficiente de condiciones socioeconómicas que tomará los siguientes valores de acuerdo con el Índice de Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI) determinado por el Departamento Nacional de Planeación del municipio donde se ubique el usuario que utilice el agua para abastecimiento doméstico, de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$C_s = \frac{100 - NBI}{100} \begin{cases} \text{Para consumos de agua asociados con el abastecimiento doméstico.} \\ C_s = 1 \end{cases} \text{ Para los demás casos}$$

En la zona de estudio se tiene que el NBI es 9,1, por ende el valor de Cs ser igual 0,9.

**Coefficiente de Inversión (Ck).** Fracción de los costos totales del plan de ordenamiento y manejo de la cuenca de que trata el decreto 1729 de 2002 no cubiertos por la tarifa mínima, de acuerdo con la siguiente fórmula.

$$C_K = \frac{C_{PMC} - C_{TM}}{C_{PMC}}; \quad 0 \leq C_K \leq 1$$

Donde:

Ck= Coeficiente de inversión de la cuenca hidrográfica.

CMPC= Costos totales anuales del plan de ordenación y manejo de la cuenca del año inmediatamente anterior.

CTM= Facturación anual estimada de la tasa por utilización de aguas, aplicando la tarifa mínima al los usuario de la cuenca.

En ausencia del plan de ordenación y manejo de la cuenca, el valor del coeficiente de inversión será igual a 0, que e al caso que se presenta para la cuenca del río Bogotá.

**Coefficiente de Escasez (CE).** Este coeficiente varía de acuerdo con la escasez del recurso hídrico considerando si la captación se realiza sobre agua superficial o subterránea según las siguientes fórmulas:

**Coefficiente de escasez para aguas subterráneas**

$$C_E = \begin{cases} 0 & \text{sí } I_{EG} < 0.1 \\ \frac{40}{49 - 90I_{EG}} & \text{sí } 0.1 \leq I_{EG} \leq 0.5 \\ 10 & \text{sí } I_{EG} > 0.5 \end{cases}$$

Donde:

Ce= Coeficiente de escasez para aguas subterráneas.

IEG=Corresponde al Índice de escasez para aguas subterráneas estimadas para el acuífero o unidad hidrológica de análisis.

**Factor de costo de oportunidad (Fop).** El factor de costo de oportunidad toma en cuenta si el usuario del agua se encuentra haciendo un uso consuntivo o no consuntivo, generando costos de oportunidad para los demás usuarios de aguas abajo. El valor del factor de costo de oportunidad se calculara de conformidad con la siguiente fórmula:

$$F_{OP} = \frac{V_c - V_v}{V_c} \begin{cases} \text{Para usuarios que retornen el recurso hídrico a la misma cuenca ó unidad hidrológica de análisis.} \\ F_{OP} = 1 \end{cases} \text{ Para los demás casos}$$

Donde:

Fop= Factor de costo de oportunidad.

Vc= Volumen del agua concesionada o captada durante el período de cobro.

Vv= Volumen de agua vertido a la misma cuenca o unidad hidrológica de análisis durante el período de cobro.

## ESCENARIOS DE VARIACIÓN DE LA TUA

### CASO REAL CON VALORES DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO DE LA SABANA DE BOGOTÁ

**TABLA 6.** ESCENARIO DE VARIACIÓN DE LA TUA TOMANDO LOS VALORES REALES DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO DE LA SABANA DE BOGOTÁ

Ie	FR	Ck	Ce	Cs	TM	TUA
Qc/Qe	$1+(Ck+Ce)*Cs$	$(Cp_{mc}-C_{tm})/Cp_{mc}$	$(40/(49-90Ie)) SI$ $0,1 < Ie < 0,5$	$(100-NBI)/100$	0,56 \$/m <sup>3</sup>	TM*FR
0,25	2,36	0	1,51	0,9	0,56	1,32
0,21	2,20	0	1,33	0,9	0,56	1,23
0,18	2,10	0	1,22	0,9	0,56	1,17
0,16	2,04	0	1,16	0,9	0,56	1,14
0,14	1,99	0	1,10	0,9	0,56	1,11
0,13	1,97	0	1,07	0,9	0,56	1,10

#### OBSERVACIONES

Consumo total en la ciudad = 0.108 m<sup>3</sup>/seg.

En este escenario la variación de los valores de recaudo de acuerdo a los valores de alfa que van de 0.5 – 1.0 tienen un rango del valor mínimo al máximo de 16.6 %, siendo el valor de recaudo mayor para un alfa de 0.5.

#### ESCENARIO 1: AUMENTO DE LOS VALORES DE

CAUDAL EXPLOTABLE POR AUMENTO DE VALORES DE RECARGA POR MEDIO DE UNA RECARGA ARTIFICIAL

CASO I = Aumento del 5%.

**TABLA 7.** ESCENARIO DE VARIACIÓN DE LA TUA TOMANDO LOS VALORES DE AUMENTO HIPOTÉTICO DEL CAUDAL EXPLOTABLE EN UN 5%

Ie	FR	Ck	Ce	Cs	TM	TUA
Qc/Qe	$1+(Ck+Ce)*Cs$	$(Cp_{mc}-C_{tm})/Cp_{mc}$	$(40/(49-90Ie)) SI$ $0,1 < Ie < 0,5$	$(100-NBI)/100$	0,56 \$/m <sup>3</sup>	TM*FR
0,24	2,31	0	1,46	0,9	0,56	1,30
0,20	2,16	0	1,29	0,9	0,56	1,21
0,17	2,07	0	1,19	0,9	0,56	1,16
0,15	2,01	0	1,13	0,9	0,56	1,13
0,13	1,97	0	1,07	0,9	0,56	1,10
0,12	1,94	0	1,05	0,9	0,56	1,09



**OBSERVACIONES**

Consumo total en la ciudad = 0,108 m<sup>3</sup>/seg.

En este escenario la variación de los valores de recaudo de acuerdo a los valores de alfa que van de 0,5

– 1,0 tienen un rango del valor mínimo al máximo de 16,1%, siendo el valor de recaudo mayor para un alfa de 0,5.

CASO II = Aumento del 10%.

**TABLA 8. ESCENARIO DE VARIACIÓN DE LA TUA TOMANDO LOS VALORES DE AUMENTO HIPOTÉTICO DEL CAUDAL EXPLOTABLE EN UN 10%.**

Ie	FR	Ck	Ce	Cs	TM	TUA
Qc/Qe	1+(Ck+Ce)*Cs	(Cp <sub>mc</sub> -C <sub>tm</sub> )/C <sub>p<sub>mc</sub></sub>	(40/(49-90Ie)) SI 0,1<Ie<0,5	(100-NBI)/100	0,56 \$/m <sup>3</sup>	TM*FR
0,1	1,90	0	1,00	0,9	0,56	1,06
0,09	1,88	0	0,98	0,9	0,56	1,05
0,07	1,84	0	0,94	0,9	0,56	1,03
0,07	1,84	0	0,94	0,9	0,56	1,03
0,06	1,83	0	0,92	0,9	0,56	1,02
0,05	1,81	0	0,90	0,9	0,56	1,01

**OBSERVACIONES**

Consumo total en la ciudad = 0,108 m<sup>3</sup>/seg.

En este escenario la variación de los valores de recaudo de acuerdo a los valores de alfa que van de 0,5 – 1,0 tienen un rango del valor mínimo al máximo de 4,71%, siendo el valor de recaudo mayor para un alfa de 0,5.

**ESCENARIO 2: CASO HIPOTÉTICO DE AUMENTO DEL VALOR DE CAUDAL CAPTADO. AUMENTO DE LA DEMANDA DEL RECURSO**

CASO I = Aumento del caudal captado en un 10%.

**TABLA 9. ESCENARIO DE VARIACIÓN DE LA TUA TOMANDO LOS VALORES DE AUMENTO HIPOTÉTICO DEL CAUDAL CAPTADO EN UN 10%**

Ie	FR	Ck	Ce	Cs	TM	TUA
Qc/Qe	1+(Ck+Ce)*Cs	(Cp <sub>mc</sub> -C <sub>tm</sub> )/C <sub>p<sub>mc</sub></sub>	(40/(49-90Ie)) SI 0,1<Ie<0,5	(100-NBI)/100	0,56 \$/m <sup>3</sup>	TM*FR
0,28	2,51	0	1,68	0,9	0,56	1,41
0,23	2,27	0	1,41	0,9	0,56	1,27
0,2	2,16	0	1,29	0,9	0,56	1,21
0,17	2,07	0	1,19	0,9	0,56	1,16
0,16	2,04	0	1,16	0,9	0,56	1,14
0,14	1,99	0	1,10	0,9	0,56	1,11

**OBSERVACIONES**

Consumo total en la ciudad = 0,119 m<sup>3</sup>/seg.

En este escenario la variación de los valores de recaudo de acuerdo a los valores de alfa que van de 0,5

– 1,0 tienen un rango del valor mínimo al máximo de 21,2%, siendo el valor de recaudo mayor para un alfa de 0,5.

CASO II = Aumento del caudal captado en un 20%

**TABLA 10.** ESCENARIO DE VARIACIÓN DE LA TUA TOMANDO LOS VALORES DE AUMENTO HIPOTÉTICO DEL CAUDAL CAPTADO EN UN 20%

Ie	FR	Ck	Ce	Cs	TM	TUA
Qc/Qe	1+(Ck+Ce)*Cs	(Cp <sub>mc</sub> -C <sub>tm</sub> )/C <sub>p<sub>mc</sub></sub>	(40/(49-90Ie)) SI 0,1<Ie<0,5	(100-NBI)/100	0,56 \$/m <sup>3</sup>	TM*FR
0,3	2,64	0	1,82	0,9	0,56	1,48
0,25	2,36	0	1,51	0,9	0,56	1,32
0,22	2,23	0	1,37	0,9	0,56	1,25
0,19	2,13	0	1,25	0,9	0,56	1,19
0,17	2,07	0	1,19	0,9	0,56	1,16
0,15	2,01	0	1,13	0,9	0,56	1,13

**OBSERVACIONES**

Consumo total en la ciudad = 0,130 m<sup>3</sup>/seg.

En este escenario la variación de los valores de recaudo de acuerdo a los valores de alfa que van de 0,5

– 1,0 tienen un rango del valor mínimo al máximo de 23,64%, siendo el valor de recaudo mayor para un alfa de 0,5.

CASO III= Aumento del caudal captado en un 30%

**TABLA 11.** ESCENARIO DE VARIACIÓN DE LA TUA TOMANDO LOS VALORES DE AUMENTO HIPOTÉTICO DEL CAUDAL CAPTADO EN UN 30%

Ie	FR	Ck	Ce	Cs	TM	TUA
Qc/Qe	1+(Ck+Ce)*Cs	(Cp <sub>mc</sub> -C <sub>tm</sub> )/C <sub>p<sub>mc</sub></sub>	(40/(49-90Ie)) SI 0,1<Ie<0,5	(100-NBI)/100	0,56 \$/m <sup>3</sup>	TM*FR
0,33	2,87	0	2,07	0,9	0,56	1,60
0,28	2,51	0	1,68	0,9	0,56	1,41
0,24	2,31	0	1,46	0,9	0,56	1,30
0,21	2,20	0	1,33	0,9	0,56	1,23
0,18	2,10	0	1,22	0,9	0,56	1,17
0,17	2,07	0	1,19	0,9	0,56	1,16

**OBSERVACIONES**

– 1,0 tienen un rango del valor mínimo al máximo de 27,5%, siendo el valor de recaudo mayor para un alfa de 0,5.

Consumo total en la ciudad = 0,140 m<sup>3</sup>/seg.

En este escenario la variación de los valores de recaudo de acuerdo a los valores de alfa que van de 0,5

**AUMENTO DEL NÚMERO DE POZOS CONCESIONADOS**

**TABLA 12.** ESCENARIO DE VARIACIÓN DE LA TUA TOMANDO LOS VALORES DE AUMENTO HIPOTÉTICO DEL CAUDAL CAPTADO POR AUMENTO DEL NÚMERO DE POZOS CONCESIONADOS

Ie	FR	Ck	Ce	Cs	TM	TUA
Qc/Qe	1+(Ck+Ce)*Cs	(Cp <sub>mc</sub> -C <sub>tm</sub> )/C <sub>p<sub>mc</sub></sub>	(40/(49-90Ie)) SI 0,1<Ie<0,5	(100-NBI)/100	0,56 \$/m <sup>3</sup>	TM*FR
0,40	3,77	0	3,08	0,9	0,56	2,11
0,34	2,96	0	2,17	0,9	0,56	1,66
0,29	2,57	0	1,75	0,9	0,56	1,44
0,25	2,36	0	1,51	0,9	0,56	1,32
0,22	2,23	0	1,37	0,9	0,56	1,25
0,20	2,16	0	1,29	0,9	0,56	1,21

**OBSERVACIONES**

– 1,0 tienen un rango del valor mínimo al máximo de 42,65%, siendo el valor de recaudo mayor para un alfa de 0,5.

Consumo total en la ciudad = 0,171 m<sup>3</sup>/seg.

En este escenario la variación de los valores de recaudo de acuerdo a los valores de alfa que van de 0,5

**AUMENTO DEL CAUDAL CAPTADO PROVOCADO POR UN APROVECHAMIENTO DEL 100% DE LOS POZOS CONCESIONADOS**

**TABLA 13.** ESCENARIO DE VARIACIÓN DE LA TUA TOMANDO LOS VALORES DE AUMENTO DEL CAUDAL CAPTADO POR UN APROVECHAMIENTO DEL 100% DE LOS POZOS CONCESIONADOS

Ie	FR	Ck	Ce	Cs	TM	TUA
Qc/Qe	1+(Ck+Ce)*Cs	(Cp <sub>mc</sub> -C <sub>tm</sub> )/C <sub>p<sub>mc</sub></sub>	(40/(49-90Ie)) SI 0,1<Ie<0,5	(100-NBI)/100	0,56 \$/m <sup>3</sup>	TM*FR
0,68	10,00	0	10,00	0,9	0,56	5,60
0,56	10,00	0	10,00	0,9	0,56	5,60
0,48	7,21	0	6,90	0,9	0,56	4,04
0,42	4,21	0	3,57	0,9	0,56	2,36
0,38	3,43	0	2,70	0,9	0,56	1,92
0,34	2,96	0	2,17	0,9	0,56	1,66

**OBSERVACIONES**

Consumo total en la ciudad = 0,288 m<sup>3</sup>/seg.

En este escenario la variación de los valores de recaudo de acuerdo a los valores de alfa que van de 0,5 – 1,0 tienen un rango del valor mínimo al máximo

de 70,35%, siendo el valor de recaudo mayor para un alfa de 0,5.

**ESCENARIO 3: CASO HIPOTÉTICO DE DISMINUCIÓN DEL VALOR DE CAUDAL CAPTADO**

CASO I = Disminución del caudal captado en un 10%

**TABLA 14.** ESCENARIO DE VARIACIÓN DE LA TUA TOMANDO LOS VALORES DE DISMINUCIÓN HIPOTÉTICA DEL CAUDAL CAPTADO EN UN 10%

Ie	FR	Ck	Ce	Cs	TM	TUA
Qc/Qe	1+(Ck+Ce)*Cs	(Cpmc-Ctm)/Cpmc	(40/(49-90Ie)) SI 0,1<Ie<0,5	(100-NBI)/100	0,56 \$/m <sup>3</sup>	TM*FR
0,23	2,27	0	1,41	0,9	0,56	1,27
0,19	2,13	0	1,25	0,9	0,56	1,19
0,16	2,04	0	1,16	0,9	0,56	1,14
0,14	1,99	0	1,10	0,9	0,56	1,11
0,13	1,97	0	1,07	0,9	0,56	1,10
0,11	1,92	0	1,02	0,9	0,56	1,08

**OBSERVACIONES**

Consumo total en la ciudad = 0,097 m<sup>3</sup>/seg.

En este escenario la variación de los valores de recaudo de acuerdo a los valores de alfa que van de 0,5

– 1,0 tienen un rango del valor mínimo al máximo de 14,96%, siendo el valor de recaudo mayor para un alfa de 0,5.

CASO II = Disminución del caudal captado en un 20%

**TABLA 15.** ESCENARIO DE VARIACIÓN DE LA TUA TOMANDO LOS VALORES DE DISMINUCIÓN HIPOTÉTICA DEL CAUDAL CAPTADO EN UN 20%.

Ie	FR	Ck	Ce	Cs	TM	TUA
Qc/Qe	1+(Ck+Ce)*Cs	(Cpmc-Ctm)/Cpmc	(40/(49-90Ie)) SI 0,1<Ie<0,5	(100-NBI)/100	0,56 \$/m <sup>3</sup>	TM*FR
0,20	2,16	0	1,29	0,9	0,56	1,21
0,17	2,07	0	1,19	0,9	0,56	1,16
0,15	2,01	0	1,13	0,9	0,56	1,13
0,13	1,97	0	1,07	0,9	0,56	1,10
0,11	1,92	0	1,02	0,9	0,56	1,08
0,10	1,90	0	1,00	0,9	0,56	1,06

**OBSERVACIONES**

Consumo total en la ciudad = 0,086 m<sup>3</sup>/seg.

En este escenario la variación de los valores de recaudo de acuerdo a los valores de alfa que van de 0,5

– 1,0 tienen un rango del valor mínimo al máximo de 12,39%, siendo el valor de recaudo mayor para un alfa de 0,5.

CASO III =Disminución del caudal captado en un 30%.

**TABLA 16.** ESCENARIO DE VARIACIÓN DE LA TUA TOMANDO LOS VALORES DE DISMINUCIÓN HIPOTÉTICA DEL CAUDAL CAPTADO EN UN 30%

Ie	FR	Ck	Ce	Cs	TM	TUA
Qc/Qe	1+(Ck+Ce)*Cs	(Cpmc-Ctm)/Cpmc	(40/(49-90Ie)) SI 0,1 < Ie < 0,5	(100-NBI)/100	0,56 \$/m <sup>3</sup>	TM*FR
0,18	2,10	0	1,22	0,9	0,56	1,17
0,15	2,01	0	1,13	0,9	0,56	1,13
0,13	1,97	0	1,07	0,9	0,56	1,10
0,11	1,92	0	1,02	0,9	0,56	1,08
0,10	1,90	0	1,00	0,9	0,56	1,06
0,09	1,88	0	0,98	0,9	0,56	1,05

**OBSERVACIONES**

Consumo total en la ciudad = 0,075 m<sup>3</sup>/seg.

En este escenario la variación de los valores de recaudo de acuerdo a los valores de alfa que van de 0,5 – 1,0 tienen un rango del valor mínimo al máximo de 10,25%, siendo el valor de recaudo mayor para un alfa de 0,5.

Además se puede asegurar que cuando se hace una corrección con el valor de alfa se debe tener presente que en el acuífero se disminuye el caudal disponible y, por ende, los precios tienen que subir y el recaudo será mayor; además que este valor debe contemplarse en la realidad como 0,5, ya que se debe asegurar renovabilidad del recurso y con un recaudo tan bajo esto será improbable.

En los análisis de Ie Vs. TUA se mostró que existe una relación directa entre ambos, esto quiere decir que el valor de Ie en TUA es de gran importancia y es relevante, e influye de manera directa para un mayor valor que es uno de los parámetros para el cobro por el uso de aguas subterráneas.

**ANÁLISIS COMPARATIVO**

En los escenarios en los cuales se confrontaron los valores de alfa Vs. Recaudo año se dio un comportamiento similar en todos los casos, el cual fue que entre mayor sea el valor de alfa, menor será el recaudo; esto quiere decir que el valor de recaudo será directamente proporcional al de alfa, y como en todos los escenarios presentó este comportamiento se puede decir con certeza que este valor de alfa es de relevante para el recaudo que haga la entidad encargada.

**CONCLUSIONES**

Se delimitó el área de estudio que fue la ciudad de Bogotá y se encontró que la Tasa de Cobro por uso del Agua aplica solamente a la región de la ciudad que es jurisdicción del DAMA y no a todo el Acuífero de la Sabana de Bogotá como debería ser en realidad.

Se observó también que los dos usos más frecuentes que se le dan a las aguas subterráneas son la industria y el lavado de autos, donde por otra parte la localidad con mayor número de pozos es Suba con un total de 26 pozos de explotación de aguas subterránea con concesión vigente seguida por la localidad de Fontibón con 16 pozos.

Tomando en cuenta todos los resultados obtenidos a lo largo del proyecto se puede decir que la variación de alfa ( $\alpha$ ) de 0,5 a 1 para la obtención del caudal explotable no es significativa porque esta variación en términos de recaudo anual no varía en más del 10% del total recaudado en la ciudad y que, por consiguiente, no afecta el valor del Índice de escasez.

Se validó la metodología propuesta por el IDEAM para la obtención del Índice de escasez y se observó que físicamente funciona correctamente y que este valor que se obtiene es significativamente útil en la obtención de la Tasa de Cobro por Uso del Agua en la zona de estudio.

Por último, se puede asegurar que el recaudo que se obtiene anualmente por efecto de explotación de Aguas Subterráneas es demasiado bajo y que por tal motivo este dinero no garantiza el ahorro y uso eficiente del agua.

Se observó que el mayor recaudo se presenta en todos los casos en los que el valor de alfa corresponde a 0,5 en todos los escenarios, esto quiere decir que al hacer una corrección al valor de la recarga a la mitad y en sí al caudal explotable, al recurso estar enfocado a una disminución se garantiza un manejo más conciente y mesurado por parte de las empresas ya que esto se reflejará directamente en los costos por uso del recurso.

## RECOMENDACIONES

Se debe poner en tela de juicio si con un cobro tan insignificante de dinero se puede asegurar para el futuro un correcto ahorro y uso eficiente del agua; con lo cual se propone que sea reevaluada la tarifa mínima (0,56\$/m<sup>3</sup>) que se utiliza en la actualidad para el cobro por metro cúbico de aguas subterráneas, ya que este valor es el que en realidad puede variar el total del recaudo y es el que en verdad logrará que se produzca un aumento en el mismo.

Es muy importante analizar las condiciones socioeconómicas en las que se desarrolla la extracción y utilización del recurso hídrico subterráneo, ya que de esa manera se puede garantizar una renovabilidad y recuperación de las aguas servidas.

Es de gran importancia implementar una normatividad en el consumo de las aguas subterráneas de manera tal que las empresas que tomen el recurso implementen procesos de descontaminación a escala de las aguas utilizadas, de manera que estas no lleguen a la fuente en las condiciones primarias de uso de este recurso.

## AGRADECIMIENTOS

Este documento se realizó con la colaboración de las entidades estatales DAMA e Ideam, que gracias a su información e investigaciones brindaron datos de vital importancia para el desarrollo de esta investigación y a la Universidad de La Salle, su Facultad de Ingeniería Civil en el área de Hidráulica.

## ANEXO 1

### TÉRMINOS USADOS EN ESTE DOCUMENTO

**Acuífero:** unidad de roca o sedimento, capaz de almacenar y transmitir agua en cantidades significativas.

**Acuífero confinado:** acuífero limitado superior e inferiormente por formaciones impermeables o casi impermeables.

**Acuífero libre:** acuífero que contiene agua con una superficie piezométrica libre y presenta una zona no saturada.

**Aguas subterráneas:** el agua subterránea es aquella que se filtra a través de grietas y poros de las rocas y sedimentos que yacen debajo de la superficie de la tierra, acumulándose en las capas arenosas o rocas porosas del subsuelo las cuales se saturan como una esponja determinando la lamina de agua que es el nivel agua en el suelo donde todos los espacios están llenos de agua.

**Balance hídrico:** balance de agua basado en el principio de que durante un cierto intervalo de tiempo el aporte total a una cuenca o masa de agua debe ser igual a la salida total de agua más la variación neta en el almacenamiento de dicha cuenca o masa de agua.

**Caudal disponible de un acuífero:** caudal que se podría extraer continuamente de un acuífero, sin que se reduzcan sus reservas.

**Caudal explotable de un acuífero:** caudal que se puede extraer de los recursos disponibles de un acuífero, sin alterar el régimen de explotación establecido por la autoridad ambiental competente.

**Ciclo hidrológico:** sucesión de fases por las que pasa el agua en su movimiento de la atmósfera a la tierra y en su retorno a la misma.

**Contaminación del agua subterránea:** el agua subterránea tiende a ser dulce (muy baja salinidad) y potable con un tratamiento no muy intenso. Sin embargo, en ocasiones las capas freáticas son demasiado ricas en sales disueltas como para ser consumida, y eso mismo puede resultar inconveniente también para otros usos determinados.

**Descarga:** el agua subterránea mana de forma natural en distintas clases de lugares en las laderas y a veces en fondos del relieve, siempre allí donde el nivel freático intercepta la superficie.

**Índice de escasez de aguas subterráneas:** relación entre la sumatoria de los caudales captados en el acuífero y los caudales explotables del mismo (Vargas, 2006).

**Recarga de un acuífero:** la recarga es el caudal promedio de agua que entra al acuífero por infiltración en un tiempo determinado. La recarga refleja el volumen de agua teóricamente disponible para consumo desde los acuíferos, así mismo refleja indirectamente las características hidrogeológicas del acuífero como la conductividad hidráulica y los coeficientes de almacenamiento.

**Reserva de un acuífero:** cantidad de agua subterránea almacenada en el acuífero.

**Sobreexplotación:** los pozos se pueden secar si el nivel freático cae por debajo de su profundidad inicial, lo que ocurre ocasionalmente en años de sequía, y por las mismas razones pueden dejar de manar las fuentes.

## BIBLIOGRAFÍA

- Ayala, H. y Arias, E. *Validación de la metodología para el calculo del índice de escasez de agua subterránea propuesta por el IDEAM*. Objeto de estudio Bogotá D.C., Bogotá: Universidad de La Salle, 2007.
- DAMA, Modelo hidrogeológico para los acuíferos de Bogotá D.C. 2000.
- Departamento técnico del medio ambiente. Decreto 1541 de 1978.
- Departamento técnico del medio ambiente. Resolución 815 de 1987.
- Departamento técnico del medio ambiente. Resolución 1148 del 2005.
- Departamento técnico del medio ambiente. Decreto 373 de 1997.
- Departamento técnico del medio ambiente. Modelo hidrogeológico para los acuíferos de Bogotá D.C. 2000.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Protección Social. Decreto 155 del 2004.
- Suárez, S. [consultada el 11 de Junio de 2006]. [En línea] <[http://www.fedepalma.org/document/2005/decreto\\_155\\_2004.doc](http://www.fedepalma.org/document/2005/decreto_155_2004.doc)> [Citado el 2006-04-08].
- Vargas, N. *Metodología para el Calculo del Índice de Escasez de Aguas Subterráneas*. 2006.