

ELABORACION DEL MODELO HIDROGEOLOGICO PARA LOS ACUIFEROS DE SANTA FE DE
BOGOTA, D.C.

INFORME FINAL

1. INTRODUCCION.....	1-1
1.1 OBJETIVO ESPECIFICO DEL ESTUDIO.....	1-1
1.2 OBJETIVO FINAL.....	1-1
1.3 ACTIVIDADES.....	1-2
1.3.1. RECOPIACION Y ANALISIS DE LA INFORMACION.....	1-2
1.3.2. ESTUDIOS HIDROGEOLOGICOS.....	1-2
1.3.3. MODELO HIDROGEOLOGICO MATEMATICO.....	1-3
1.3.4. SIMULACIONES Y PREDICCIONES.....	1-3
1.3.5. CAPACITACION.....	1-4
1.4 AREA DE ESTUDIO.....	1-4
2. RECOPIACION Y ANALISIS DE LA INFORMACION. INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA.....	2-1
3. PROSPECCION GEOFISICA.....	3-1
4. MODELO GEOLOGICO Y SECCIONES TRANSVERSALES.....	4-1
5. HIDROGEOQUIMICA.....	5-1
6. HIDROLOGIA.....	6-1
6.1 PRECIPITACION.....	6-1
6.2 EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL.....	6-2
6.3 EVAPOTRANSPIRACION REAL.....	6-2
6.4 INFILTRACION POTENCIAL.....	6-2
6.5 INFILTRACION REAL.....	6-2
7. MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL.....	7-1
7.1 MAPA HIDROGEOLOGICO.....	7-1
7.2 FRONTERAS Y FACTORES EXTERNOS.....	7-2
7.3 SISTEMAS ACUIFEROS.....	7-2
7.4 CAUDALES DE BOMBEO Y NIVELES ESTATICOS.....	7-3
7.5 DEFINICION DE PARAMETROS GEOHIDRAULICOS.....	7-3

7.5.1. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA.....	7-3
7.5.2. COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO ESPECIFICO Y POROSIDAD EFICAZ.....	7-4
7.5.3. RIOS.....	7-5
7.5.4. RECARGA.....	7-5
8. MODELO MATEMATICO.....	8-1
8.1 DISCRETIZACION DEL MODELO.....	8-1
8.2 CALIBRACION DEL MODELO Y DEFINICION DE AREAS SENSIBLES.....	8-1
8.3 SIMULACION HISTORICA.....	8-2
9. SIMULACIONES Y PREDICCIONES.....	9-1
10. EVALUACION DE IMPACTOS AMBIENTALES.....	10-1
10.1 CONTAMINACION Y VULNERABILIDAD EN LAS AGUAS SUBTERRANEAS.....	10-1
10.2 ANALISIS DE VULNERABILIDAD.....	10-2
11. MITIGACION DE IMPACTOS, MONITOREO Y SEGUIMIENTO.....	11-1
11.1 POZOS DE MONITOREO.....	11-1
11.2 LOCALIZACION.....	11-2
11.3 DIAMETRO.....	11-2
11.4 PROFUNDIDAD.....	11-3
11.5 FRECUENCIA DE REGISTRO DE NIVELES, CAUDALES Y ANALISIS QUIMICOS.....	11-3
11.5.1. CAUDALES DE BOMBEO.....	11-3
11.5.2. NIVELES DE AGUA SUBTERRANEA.....	11-4
11.5.3. CALIDAD FISICOQUIMICA Y BACTERIOLOGICA DEL AGUA SUBTERRANEA.....	11-5
12. TRANSPORTE ADVECTIVO DE PARTICULAS.....	12-1
13. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	13-1
13.1 RECOMENDACIONES.....	13-3
14. REFERENCIAS.....	14-1

LISTA DE TABLAS

Tabla No. 7.1 Valores de conductividad hidráulica asignados

Tabla No. 7.2 Valores de almacenamiento específico y porosidad eficaz asignados

Tabla No. 7.3 Parámetros geohidráulicos de cauces

Tabla No. 7.4 Análisis de vulnerabilidad por formación geológica

LISTA DE FIGURAS

Figura No. 3.1 Línea continua 1-1

Figura No. 3.2 Línea continua 2-2

Figura No. 3.3 Línea continua 3-3

Figura No. 3.4 Línea continua 4-4

Figura No. 4.1 Corte Geohidráulico A-A

Figura No. 4.2 Corte Geohidráulico B-B

Figura No. 4.3 Corte Geohidráulico C-C

Figura No. 4.4 Corte Geohidráulico D-D

Figura No. 4.5 Corte Geohidráulico E-E

Figura No. 5.1 Curva de resultados isotópicos

Figura No. 6.1 Distribución de isoyetas multianuales

Figura No. 6.2 Distribución de evapotranspiración potencial y real

Figura No. 6.3 Distribución infiltración potencial

Figura No. 7.1	Caudales de explotación
Figura No. 7.2	Niveles estáticos para el año de 1999
Figura No. 7.3	Corte hidrogeológico A-A
Figura No. 7.4	Corte hidrogeológico B-B
Figura No. 7.5	Corte hidrogeológico C-C
Figura No. 7.6	Corte hidrogeológico D-D
Figura No. 7.7	Corte hidrogeológico E-E
Figura No.8.1.	Sección transversal 1-1 del modelo simulado
Figura No.8.2.	Sección transversal 2-2 del modelo simulado

LISTA DE MAPAS

Mapa No. 1.1.	Area de estudio
Mapa No. 2.1.	Inventario de puntos de agua
Mapa No. 3.1.	Localización de exploración geofísica
Mapa No. 4.1.	Geología del área
Mapa No. 5.1.	Localización de puntos para muestreo hidrogeoquímico e isotópico
Mapa No. 5.2	Clasificación final del agua subterránea
Mapa No. 6.1.	Localización de estaciones climatológicas y distribución areal de infiltración real
Mapa No. 7.1.	Hidrogeología del área

- Mapa No. 8.1. Discretización del modelo conceptual
- Mapa No. 8.2. Distribución de equipotenciales y dirección de flujo en estado estacionario (capa 1)
- Mapa No. 8.3. Distribución de equipotenciales y dirección de flujo en estado transitorio (capa 1)
- Mapa No. 10.1. Vulnerabilidad de los acuíferos
- Mapa No. 10.2. Fuentes potenciales de contaminación
- Mapa No. 10.3. Proyección de trayectorias de partículas
- Mapa No. 11.1. Red de pozos de monitoreo propuesta

ELABORACION DEL MODELO HIDROGEOLOGICO PARA LOS ACUIFEROS DE SANTA FE DE BOGOTA, D.C.

INFORME FINAL

1. INTRODUCCION

Se presenta este informe final del proyecto PNUD/COL/96/023 "Elaboración del Modelo Hidrogeológico de los Acuíferos de Santa Fe de Bogotá", el cual contiene en forma resumida las actividades y resultados presentados en los informes I, II, III y IV del proyecto que corresponden a "Recopilación y Análisis de la Información", "Estudios Hidrogeológicos", "Modelo Hidrogeológico Matemático" y "Simulaciones y Predicciones", los cuales hacen parte integral como volúmenes en separado del estudio.

1.1 OBJETIVO ESPECIFICO DEL ESTUDIO

El objetivo específico del Estudio es la Elaboración del Modelo Hidrogeológico Conceptual y Numérico de los Acuíferos de Santa fe de Bogotá.

1.2 OBJETIVO FINAL

El objetivo final para el DAMA es contar con una herramienta operacional de análisis para los acuíferos de Santa Fe de Bogotá, que permita dar un manejo eficiente a los recursos hídricos subterráneos.

Dentro del contexto anterior, el modelo hidrogeológico tiene dos aplicaciones fundamentales: (i) ayuda a entender y cuantificar la ocurrencia y distribución del agua subterránea, (ii) utilizar el modelo como una herramienta de manejo.

El manejo del sistema de acuíferos implica tomar decisiones que modifican el estado del sistema. Por ejemplo la localización de nuevos pozos (nuevas concesiones), sus caudales, restringir el bombeo de otros, desarrollar zonas de recarga, etc.

El modelo desarrollado permite modificar el sistema de un estado a otro mediante la elaboración de escenarios simulados resultado de las decisiones tomadas; es decir, alguna decisión por absurda que sea (por ejemplo aumentar en forma desmesurada el caudal de explotación), puede modelarse obteniendo como resultado un escenario simulado que puede resultar factible o no. Finalmente el análisis de los escenarios simulados ayudan a la

toma de decisiones (por ejemplo autorizar o negar una concesión, implementar o abandonar alguna política específica de uso de agua subterránea).

1.3 ACTIVIDADES

Para llevar a cabo los objetivos del proyecto se realizaron las siguientes actividades dentro de las etapas del proyecto:

1.3.1. RECOPIACION Y ANALISIS DE LA INFORMACION

- Definición del área de estudio
- Recopilación y Análisis de la Información
- Identificación de posibles fuentes de contaminación
- Elaboración del modelo geológico
- Elaboración de Secciones Transversales
- Realización de Sondeos Geoeléctricos Verticales (SEV's)
- Ejecución de Prospección Geoeléctrica Continua
- Ejecución de Electromagnetismo
- Registros eléctricos de Pozos
- Correlación de la Información
- Calidad de Agua y evaluación de los elementos o compuestos indicadores de las anomalías hidrogeoquímica

1.3.2. ESTUDIOS HIDROGEOLOGICOS

- Hidrología
- Identificación de Parámetros Hidrogeológicos
- Elaboración del Mapa Hidrogeológico
- Formulación del Modelo Hidrogeológico Conceptual

1.3.3. MODELO HIDROGEOLOGICO MATEMATICO

- Descripción de ecuaciones de flujo y transporte
- Evaluación de métodos numéricos de solución
- Selección y descripción de códigos de computador
- Verificación del programa utilizando casos especiales
- Traslado del modelo conceptual a la red del modelo
- Calibración y análisis de sensibilidad

1.3.4. SIMULACIONES Y PREDICCIONES

- Planeación de Escenarios
- Simulaciones
- Evaluación de Resultados
- Determinación de zonas Sensibles
- Escenarios de Aprovechamiento de Aguas Subterráneas
- Determinación de las Reservas Disponibles y Aprovechables de Agua Subterránea
- Determinación de los sectores con las mejores posibilidades para el aprovechamiento del agua subterránea
- Uso del modelo para pronosticar los impactos del uso a gran escala del agua subterránea
- Evaluación de posibles medidas de remediación por recarga artificial
- Plan de Alternativas de Mitigación y Monitoreo

1.3.5. CAPACITACION

- Taller sobre las bases teóricas de Modelación
- Taller sobre el uso del Modelo
- Manual de Uso del Modelo

1.4 AREA DE ESTUDIO

El área de estudio según el contrato, comprende los siguientes límites geográficos: al Occidente El Río Bogotá, al Oriente el Río Teusacá, al Norte la confluencia de los Ríos Teusacá y Bogotá, y al Sur los Cerros de Quiba y Cazuca. Sin embargo, dada la necesidad de tener un marco regional más amplio que permitiera obtener una visualización completa de los principales aspectos de la cuenca, se consideró una zona mucho más grande que la definida en el contrato (aproximadamente cuatro veces, véase Mapa No.1.1).

Así mismo es importante mencionar que dentro de este informe se incluye la información de las cinco (5) zonas que la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) se encuentra estudiando.

2. RECOPIACION Y ANALISIS DE LA INFORMACION. INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA

La recopilación y análisis de información presentada en este numeral se refieren fundamentalmente al inventario existente de puntos de agua; la información geológica, hidrológica, geofísica e hidroquímica recopilada y analizada se presentan en este informe conjuntamente con la nueva información generada en el presente estudio

La recopilación de la información de puntos de agua, se tomo de las bases de datos existentes y disponibles para la zona de estudio. Se consultaron principalmente las bases de datos del INGEOMINAS, y el DAMA. Adicionalmente se consultó información fragmentaria existente en otras entidades oficiales y en compañías particulares que estuvieron disponibles.

De los inventarios recopilados el inventario del INGEOMINAS es el más completo hidrogeológicamente, seguido por el inventario de Arturo Lizarazo y Cía. El DAMA, carece de una base hidrogeológica de datos; ya que la base existente es un registro de aspectos legales únicamente. El DAMA cuenta con una serie de informes técnicos de muchos de los pozos que conforman la base de datos; sin embargo estos informes técnicos se encuentran impresos y no en base de datos digitales, lo cual dificulta la búsqueda y extracción de información hidrogeológica.

Con base en la información recopilada se realizó un filtro de la información en el cual se eliminó información doble, se corrigieron problemas de nomenclatura y ubicación, concluyendo que en la zona estudiada existen 1075 pozos, 44 manantiales, 31 aljibes. Sin embargo es de aclarar que se considera que este inventario no refleja la realidad del uso de agua subterránea dado que no fue posible adquirir toda la información hidrogeológica existente. Es igualmente importante señalar que estos pozos inventariados no contienen toda la información hidrogeológica requerida y en algunos casos sólo existe el registro de la ubicación del pozo y del propietario.

Cabe destacar que a pesar de la filtración realizada, aún persisten problemas de numeración, coordenadas, falta de información físico química; los cuales sólo se podrán resolver elaborando un inventario detallado de pozos en una base de datos de fácil manejo.

3. PROSPECCION GEOFISICA

La información de estudios geofísicos existentes analizada corresponde principalmente a la derivada de investigaciones adelantadas por y/o para entidades del sector oficial.

El análisis de la información recopilada (geoeléctrica, sísmica, gravimétrica) permitió elaborar una serie de mapas para los diferentes tipos de depósitos existentes; con base en los cuales se pudo definir la forma de la cuenca, espesores y tipos de acuíferos presentes, lo que permitió elaborar un modelo geológico-geofísico de toda el área.

Como parte del proyecto y con el fin de complementar la información geofísica en aquellos sectores del área donde fuera deficiente, se llevó a cabo una campaña de prospección la cual incluyó:

- 35 sondeos geoeléctricos puntuales, siguiendo configuraciones electródicas tipo Schlumberger, con profundidad de investigación de hasta 600 metros.
- 3274 metros de prospección geoeléctrica continua con arreglos electródicos tipo Wenner, los cuales se distribuyeron en 4 líneas.
- 5490 m de inducción electromagnética, distribuidos en 4 líneas
- 2 Registros de pozo

La ubicación de los puntos y las líneas de esta prospección geofísica está en el Mapa 3.1

De acuerdo a los resultados de la interpretación de los sondeos geoeléctricos, en general en toda el área investigada se presentan horizontes con valores de resistividad eléctrica que se correlacionan con sedimentos cuaternarios conformados por horizontes granulares saturados, y que constituyen los niveles acuíferos, dado que presentan características hidrogeológicas para el almacenamiento y flujo de agua subterránea; estos horizontes se encuentran intercalados con niveles cuyos valores de resistividad son bajos, los cuales se asocian con horizontes de material fino de características hidrogeológicas pobres y en general de mayor espesor que los sedimentos arcillosos.

En general hacia el centro de la zona de estudio, y hasta la profundidad prospectada, no es posible determinar con claridad la presencia del basamento terciario o cretácico, pero hacia los límites Este y Sur de la zona de estudio, los sondeos geoeléctricos presentan, en profundidad, cambios muy marcados en el comportamiento de las curvas, los cuales se

correlacionan con la presencia de rocas consolidadas, pertenecientes a formaciones terciarias y cretácicas.

La ejecución de las líneas de geoelectrónica continua brindó información nueva importante para el desarrollo del modelo geológico de la zona. Por ejemplo, la línea de geoelectrónica continua 1-1 (Figura 3.1), permite apreciar el plano de la Falla de Bogotá, el cual pone en contacto sedimentitas del Grupo Guadalupe (resistividades entre 1500 ohm.m y 5570 ohm.m) con depósitos cuaternarios (resistividades entre 63.5 ohm.m y 819 ohm.m). Según los resultados obtenidos la vergencia de la falla es occidental con un plano de buzamiento mayor a 40° hacia el oriente. Esta información es muy importante ya que permite establecer el estilo de deformación en esta zona, la cual hasta la fecha no se había podido determinar y que no puede determinarse mediante geología de superficie.

La línea de geoelectrónica continua 2-2' (Figura 3.2) permitió observar la disposición geométrica de las rocas consolidadas, cubiertas por el depósito cuaternario, las cuales afloran al oriente de la línea (Cerro de la Conejera) y penetran hacia el centro del valle definido por el cauce del río Bogotá.

La línea de geoelectrónica continua LC 3-3' (Figura 3.3) se ejecutó con el fin de observar si en el depósito cuaternario se manifestaba la influencia de la Falla del Mochuelo que pasa por el sector. La interpretación de la misma concluye que hasta la profundidad de prospección alcanzada no se observa, en el depósito cuaternario, discontinuidades que se puedan asociar a dicha falla.

La línea de geoelectrónica continua LC 4-4' (Figura 3.4), permite observar el plano de la Falla de Bogotá, el cual presenta una inclinación mucho menor (alrededor de 25°) que la observada al sur del área de estudio. Esta línea es muy importante ya que corrobora la existencia de la prolongación de esta falla al norte de la megafalla de Usaquén Sasaima, hecho, que no había sido reportado antes en la literatura geológica.

En resumen como puede apreciarse, la prospección geofísica adelantada durante el proyecto, en especial las líneas de geoelectrónica continua permitieron determinar y comprobar aspectos geológico-geofísicos importantes para el desarrollo de los modelos conceptuales en la zona de estudio.

Así mismo se utilizó la información de resistividad eléctrica recopilada y la generada en este estudio para la elaboración de mapas de resistividad real y aparente a varias profundidades, y cortes geoelectrónicos. Estos mapas junto con la correlación geológica, geomorfológica y los controles estructurales, permiten diferenciar en profundidad, zonas

hidrogeológicas que presentan un comportamiento diferente desde el punto de vista del
flujo de agua subterránea.

4. MODELO GEOLOGICO Y SECCIONES TRANSVERSALES

Los resultados de la información geológica y geofísica sirvieron para la elaboración del Mapa geológico (Mapa 4.1) y secciones transversales (Figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5), los cuales permitieron visualizar, tanto la continuidad de las estructuras en el subsuelo, como sus fallas.

El área jurisdiccional del DAMA, dentro de la Sabana de Bogotá hace parte de una serie de altiplanos que se encuentran en la parte central de la Cordillera Oriental, entre Santa Fe de Bogotá y Sogamoso, constituidos por valles de origen fluvio-lacustre, desarrollados a una altura cercana a los 2.500 m.s.n.m.

Este potente espesor de sedimentos se depositó sobre un paleo-relieve muy irregular que condicionó su morfología actual, la cual presenta una zona semiplana, principal, de aproximadamente 750 Km² flanqueada por seis ramales montañosos conocidos de oriente a occidente como: Cerros Orientales de Bogotá con dirección noreste, Cerros de Suba, Cota y Tenjo ubicados en la parte norcentral también con dirección noreste, Cerros Occidentales con dirección norte-sur a noreste y los Cerros de Quiba situados en la parte meridional con dirección predominante al noroccidente.

La Sabana de Bogotá presenta por consiguiente una tectónica compleja, donde se pueden diferenciar tres estilos estructurales superpuestos: el primero asociado a una tectónica de thick skin de bloques con un sistema principal de fallamiento normal fallas, el segundo asociado a una tectónica de thin skin donde el patrón de fallamiento principal es de fallas inversas o de cabalgamientos (thrust), que cortan las fallas normales en unos casos, mientras que en otros utilizan su mismo plano de falla para reactivarse como inversas (inversión tectónica). El tercer estilo afecta a los dos anteriores y corresponde a los últimos movimientos tectónicos del levantamiento de la Cordillera Oriental que han dado origen a un sistema de fallamiento de tipo transversal que corta las estructuras preexistentes.

La estratigrafía del área la componen: Depósitos coluviales (Qc), Depósitos Cuaternarios (Qti, Qal, Qta), Formación Sabana (Qs), Formación Subachoque (Qsu), Formación Tilata (QTt), Formación Usme (Tsu), Formación Arenisca la Regadera (Tpr), Formación Bogotá (Tb), Formación Cacho (Tpc), Formación Guaduas (TKgu), Grupo Guadalupe (Ksg), y Formación Chipaque (Ksch).

La información geológica disponible se analizó y complementó con base en información nueva adquirida del análisis de imágenes de satélite y de los resultados de la prospección

geofísica desarrollada durante el proyecto.

Partiendo de mapas geológicos suministrados por INGEOMINAS a escala 1:25000, y del mapa del Cuaternario elaborado por Van Der Hammen en 1995, se elaboró un mapa geológico a escala 1:50000. Este mapa se complementó con una revisión rápida de campo en aquellos sitios de interés hidrogeológico, especialmente para el área de los Cerros de Quiba y Cazuca. El estilo estructural se definió con base en la interpretación de una imagen de satélite en falso color a escala 1:250000 de toda la Sabana de Bogotá; con base en la cual se estableció, de forma clara, un patrón de fallamiento NW-SE, y se identificó nuevas fallas antes no reportadas, así como la continuación a nivel regional tanto al norte como al sur de varias de las fallas definidas por INGEOMINAS.

El mapa geológico resultante es un mapa que presenta el fallamiento transversal que no se ha tenido en cuenta en los proyectos adelantados para Santa Fe de Bogotá, y que sin duda alguna es un componente estructural importante en el entendimiento de la evolución de la cuenca.

5. HIDROGEOQUIMICA

El estudio hidrogeoquímico adelantado se basó en los resultados del inventario de puntos de agua desarrollado como parte integral del estudio para la “Elaboración del Modelo Hidrogeológico para los Acuíferos de Santa Fe de Bogotá, D.C.”, el inventario de puntos de agua se llevó a cabo con base en información secundaria recopilada en diferentes entidades gubernamentales entre las cuales se encuentran INGEOMINAS, y el DAMA; así como también en información recopilada con empresas particulares, específicamente con la firma Arturo Lizarazo y Cía.

Desde el punto de vista hidrogeoquímico la información recopilada presentaba problemas de inconsistencias en la información y de la falta total o parcial de análisis de los principales iones o en algunos casos, existía un reporte fisicoquímico, pero no existía localización geográfica del pozo.

Un primer análisis de la información, permitió filtrar del total de 1075 pozos unificados en el inventario de Hidrogeocol Ltda, 257 pozos con información fisicoquímica completa. La calidad de la información fisicoquímica de estos 257 pozos es muy variable, presentando la mayoría de ellos altos porcentajes de error en el balance de iones y cationes.

Es de aclarar que la información hidrogeoquímica recopilada, presentaba una mezcla de muestreos para diferentes fechas, que aunque podría ser de importancia para determinar cambios en la calidad del agua subterránea a través del tiempo, fue imposible de utilizar, dada que no existía consistencia en las épocas de muestreo o en los pozos muestreados durante las diferentes campañas.

El análisis de la información disponible para estos 257 pozos, y con base en los resultados mencionados anteriormente fue necesario realizar un segundo filtro de la información. En esta etapa se seleccionaron los pozos (de los 257 preseleccionados) en los cuales los porcentajes de error en los balances iónicos eran bajos; esta selección arrojó un total de 80 pozos en los cuales la información disponible se podría considerar en un alto grado confiable y se encuentran distribuidos en toda el área de estudio.

Los 80 pozos seleccionados se agruparon en trece zonas distribuidas espacialmente de sur a norte (véase Mapa 5.2) con el objeto de comparar la información hidrogeoquímica mediante diagramas de Scholler, Piper y Stiff, entre los diferentes pozos que componen una zona y comparar además la información con zonas adyacentes. De esta forma se buscó identificar posibles anomalías que presenten distribuciones areales en parámetros

físico químicos o determinar si el agua captada por estos ochenta pozos es del mismo origen. Así mismo se agruparon los pozos que están más allá del área de jurisdicción del DAMA como áreas de referencia y espejo que pueden servir como forma de calibración de las áreas adyacentes.

Con base en la información recopilada de los 80 pozos, se determinaron los rangos de variación de las concentraciones de diferentes parámetros fisicoquímicos y se realizó una evaluación de los elementos o compuestos indicadores de anomalías geoquímicas como son: Conductividad Específica (uS/cm), Sólidos Disueltos (mg/L), Dureza total (mg CaCO₃/L), Hierro, Balance de aniones y cationes, Porcentaje de Error del Balance iónico, Miliequivalentes por litro (meq/L), Relaciones Mg/Ca, K/Na, Cl/HCO₃, SO₄/Cl y el índice de cambio de bases ICB(+).

Además con la información secundaria obtenida se encontró que la clasificación hidrogeoquímica de las aguas subterráneas es de bicarbonatadas sódicas a bicarbonatadas cálcicas, algunas excepciones se presentan con algunos pozos muy localizados con características cloruradas sódicas y sulfatadas sódicas. Con el objeto de corroborar dichos resultados se programó un muestreo de tipo puntual y aleatorio, tomando 33 muestras, tres de las cuales provienen de fuentes superficiales (Ver Mapa 5.1) .

Los resultados obtenidos de las muestras no fueron muy diferentes a los analizados a partir de la información secundaria en cuanto a clasificación hidrogeoquímica (Ver Mapa 5.2). La clasificación final en las zonas I y II corresponden a Aguas Bicarbonatadas Sódicas y Cálcicas; en la zona III a Aguas Bicarbonatadas Sódicas, en la zona IV a aguas Bicarbonatadas Sódicas y Calcico-Sódicas, la zona V a Bicarbonatadas Sódicas y Cloruradas Sódicas, zona VI a Bicarbonatadas Sódicas y Bicarbonatadas Cálcicas, zonas VII-VIII-IX y X a aguas Bicarbonatadas Sódicas, zona XI aguas Bicarbonatadas Sódicas, Bicarbonatadas Cálcico-Sódicas y Sulfatadas-Sódicas, la zona XII presenta aguas Bicarbonatadas Cálcicas-Sódicas, Bicarbonatadas Cálcicas, Bicarbonatadas sódicas, Sulfatadas Sódicas, y la zona XIII presenta aguas Bicarbonatadas Sódicas y Bicarbonatadas Cálcicas-Sódicas.

En general en todos los sectores analizados las aguas subterráneas son principalmente de tipo Bicarbonatadas Sódicas; teniendo en cuenta que el ion Sodio se encuentra en abundancia en la mayoría de silicatos y que este es retenido por adsorción en superficies de alta capacidad de intercambio mineral como es el caso de los sedimentos arcilloso del Cuaternario y las sedimentitas del Cretáceo. De igual forma teniendo en cuenta que el ion Carbonato proviene de la disolución de calizas y dolomitas, lo más probable es que la mayoría de las concentraciones existentes provengan de las rocas carbonatadas de edad

Cretácica. Su alta concentración reportada en el Cuaternario podría estar indicando un alto nivel de degradación de materia orgánica bajo condiciones anóxicas, lo cual generaría CO₂ que al reaccionar con el agua y bajo condiciones favorables de pH puede generar carbonatos.

Estos procesos de degradación anaerobia también son notorios cuando se observan las bajas concentraciones de sulfatos, contrario a lo que se esperaba obtener debido al origen marino de la zona de estudio. Estas bajas concentraciones están relacionadas con procesos de reducción biológicos de los sulfatos hasta ácido sulfídrico

Otros tipos de aguas reportados son Bicarbonatadas Cálcicas, Sódicas, Sulfatadas Sódicas, Cloruradas y Bicarbonatadas Sódicas.

Las aguas Bicarbonatadas Cálcicas se encuentran localizadas hacia el sector norte del área de estudio en cercanías al Municipio de Cajicá, sur del aeropuerto de Guaymaral, al sur del Municipio de Soacha y al sur en cercanías al Río Bogotá. El origen de este tipo de aguas es como consecuencia de un incremento en las concentraciones de Calcio a instancias del Sodio, debido a procesos de endurecimiento.

Las aguas Bicarbonatadas Cálcico Sódicas se localizan hacia el sur del área de estudio en cercanías al Municipio de Soacha, y al norte en cercanías al Municipio de Cota y Río Bogotá. Las aguas Sulfatadas Sódicas se encuentran localizadas al sur del sector de Timiza y costado occidental del Municipio de Soacha y las aguas Cloruradas Sódicas al norte del Parque de la Florida. Estos tipos de aguas no son predominantes y en la mayoría de los casos son el resultado de anomalías hidrogeoquímicas de tipo local.

Por otra parte, de los 33 puntos de muestreo seleccionados para análisis fisicoquímicos 16 muestras fueron analizadas para Deuterio y oxígeno 18. Los resultados obtenidos fueron comparados con la media meteórica global, encontrando que la pendiente de los resultados obtenidos es de 8.33, variando muy poco en relación con la típica de la media meteórica global que es de 8. Los resultados obtenidos indican entonces, que el agua subterránea tiene un aporte directo de las aguas superficiales sin efectos salinos debido a que el valor de la pendiente no es alto y esta muy cercano al de la media meteórica global.

La ecuación encontrada para estas muestras es (ver Figura 5.1):

$$dD=8.33dO_{18}+12.33$$

Este análisis confirma las conclusiones de estudios anteriores del INEA (1978, 1985) e INGEOMINAS (1998) sobre el origen meteórico de la mayoría de las aguas subterráneas.

6. HIDROLOGIA

El estudio hidrológico se orientó a la interacción de la hidrología superficial con la hidrología subterránea, de manera que se hace énfasis en los parámetros de infiltración que inciden en la recarga hacia los acuíferos.

La forma directa de medir infiltración profunda (o percolación profunda) hacia los acuíferos (no infiltración superficial en la zona no saturada), es mediante piezómetros o pozos de observación cerca de las zonas de recarga de tal manera que se puedan medir gradientes, y calculando la infiltración real. La hidrología en nuestro caso es un método indirecto, en donde las estimaciones de infiltración se hicieron mediante balances hídricos, utilizando la zonificación de zonas de recarga con el almacenamiento de agua de acuerdo al uso del suelo.

La caracterización hidrológica de la cuenca se hizo con base en la información existente y principalmente por la suministrada por el IDEAM, CAR, y EAAB de 33 estaciones pluviométricas y pluviográficas y 12 estaciones climatológicas (véase mapa 6.1).

Los resultados de los balances hídricos realizados mediante modelos a nivel mensual, y mediante modelos a nivel decadal, no difieren significativamente, lo cual permitió adoptar los valores arrojados por los balances mensuales, que son aplicables a todas las estaciones climatológicas disponibles.

6.1 PRECIPITACION

Con base en la información existente y en los estudios anteriores se procedió a elaborar las curvas isoyetas medias multianuales para la zona de estudio (Figura 6.1), se determinó la evapotranspiración potencial y real (Figura 6.2.), la infiltración potencial (Figura 6.3) y real (Mapa 6.1), y las zonas de recarga para el área de estudio. También se realizaron los respectivos balances hídricos.

Los resultados de estos análisis determinan que la precipitación media multianual, varía espacialmente, con valores de aproximadamente 600 mm/año en las zonas suroccidental y centrooccidental de la zona de estudio y valores de más de 1400 mm/año en el costado oriental. Esta distribución espacial de la precipitación es un condicionante importante de la disponibilidad de agua para la infiltración y recarga de formaciones acuíferas. En términos generales se puede decir que la precipitación en la mayor parte del área de estudio tiene un comportamiento bimodal, con los períodos húmedos en los meses de abril y mayo, y

octubre y noviembre y los periodos secos en los restantes. En el costado sur oriental del área, en la parte alta de la cuenca del río Tunjuelo se aprecia un régimen de transición a monomodal con meses de invierno de abril a agosto.

6.2 EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL

La distribución de la evapotranspiración potencial (Figura 6.2), oscila entre 800 a 1000 mm/año, con valores que tienden a disminuir hacia las áreas montañosas y con altos valores en el costado sur de la ciudad de Santa Fe de Bogotá (zona de Quiba Soacha). Obsérvese que en buena parte del área de estudio la precipitación es del mismo orden que la evapotranspiración potencial o en algunas partes menor, lo cual indica la posible deficiencia de agua en el suelo

6.3 EVAPOTRANSPIRACION REAL

Los cálculos de evapotranspiración real se efectuaron mediante el balance de agua en el suelo en cada estación climatológica; sus resultados se presentan en la Figura 6.2, en donde se puede apreciar su variación espacial entre valores que oscilan entre 500 mm/año, hacia la zona sur del área de estudio, hasta valores de 850 mm hacia la zona oriental y norte.

6.4 INFILTRACION POTENCIAL

El estimativo realizado para la infiltración potencial (valor máximo de la infiltración, considerando escorrentía nula), muestra las zonas potencialmente más propensas a recargar formaciones subyacentes. De acuerdo a los resultados obtenidos, se observa que tanto los cerros de Monserrate, Guadalupe y Cota como sus zonas vecinas, son las áreas de mayor potencial de infiltración (hasta entre 200 a 300 mm/año); mientras que al sur del área de estudio presenta menores posibilidades de infiltración (20 mm/año).

6.5 INFILTRACION REAL

Aunque el valor de infiltración potencial es muy importante para sectorizar las zonas de recarga, y para planes de protección de las mismas, se debe considerar la infiltración real, descontando la escorrentía superficial que pueda producirse; sin embargo su cálculo no es tan directo, ya que existen metodologías ampliamente estudiadas para eventos extremos, pero no para eventos medios.

Finalmente, se pudo estimar la infiltración real como un porcentaje de la infiltración potencial utilizando un modelo que involucra la pendiente del terreno, la permeabilidad del terreno y el tipo de cobertura. De esta forma se tienen valores (aproximados) de la infiltración real media anual entre valores cercanos a cero para la zona plana arcillosa hasta valores de 200 a 250 mm en las zonas permeable montañosas.

Los resultados de los balances muestran que la evapotranspiración real representa entre el 0.6 a 0.98 de la evapotranspiración potencial. El valor menor representa una notoria reducción de la evapotranspiración potencial por falta de disponibilidad de agua en la zona radicular como consecuencia de la poca precipitación en el área (zona sur del área de estudio).

7. MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL

7.1 MAPA HIDROGEOLOGICO

Con base en el mapa geológico actualizado se agruparon las diferentes formaciones de acuerdo a sus características geohidráulicas, obteniéndose así unidades hidroestratigráficas que conforman el mapa hidrogeológico (Ver Mapa 7.1). Las unidades obtenidas son:

- **Acuífero Cuaternario:** Es un acuífero de extensión regional, que se correlaciona con sedimentos cuaternarios. Puede aportar caudales entre 1 l/s a 5 l/s dependiendo de los niveles arenosos que se atraviesen.
- **Acuífero Tilatá:** Acuífero de extensión local de alto rendimiento, que se correlaciona con la Formación Tilatá (QTt). Puede aportar caudales entre 10 l/s a 40 l/s.
- **Acuífero Cacho:** Acuífero de extensión local, de bajo a mediano rendimiento, que se correlaciona con la Formación Cacho (Tpc). Puede aportar caudales entre 3 l/s a 9 l/s.
- **Acuitardo Bogotá Regadera:** Es un acuitardo discontinuo de extensión regional, asociado a rocas arcillosas con algunas intercalaciones de arenas. Puede aportar caudales del orden de 2 l/s
- **Acuitardo Guaduas:** Es un acuitardo continuo de extensión regional de bajo rendimiento, asociado a rocas arcillosas principalmente. En el área de estudio se estima que puede aportar un caudal entre 1 l/s a 3 l/s
- **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, y puede producir caudales entre 10 l/s a 60 l/s.
- **Acuífero Plaeners Arenisca Dura:** Acuífero de extensión regional, cuya producción está ligada al grado de fracturamiento que puedan tener las formaciones asociadas. Puede aportar caudales hasta de 12 l/s.
- **Basamento:** Unidad impermeable que se correlaciona con la Formación Chipaque (Ksch). Corresponde al límite inferior del acuífero

7.2 FRONTERAS Y FACTORES EXTERNOS

El modelo hidrogeológico conceptual se hizo con base en el mapa hidrogeológico, en el modelo geológico y en el mapa de recarga potencial. Se definieron las siguientes variables que son la entrada al modelo matemático:

- **Fronteras de No flujo:** Son aquellas donde no existe flujo de agua subterránea (zonas impermeables) y que corresponden a las divisorias de aguas de los cerros circundantes a la zona de estudio.
- **Frontera de Flujo Específico:** Corresponde a las principales áreas de recarga que existen en la zona de estudio.
- **Fuentes y Sumideros:** Corresponden a factores externos al sistema representada por pozos, tanto de bombeo como de recarga.
- **Propiedades Geohidráulicas:** Corresponde a los parámetros de conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento y porosidad eficaz de cada una de las formaciones existentes.
- **Espesores:** Corresponde a cada uno de los espesores calculados para las unidades hidroestratigráficas definidas.
- **Ríos:** son fronteras internas; dentro de estas se definieron los principales ríos que pueden afectar el flujo de agua subterránea (Río Bogotá y Río Tunjuelito).

7.3 SISTEMAS ACUIFEROS

Con base en el análisis de la información existente se determinó que en el área de estudio existen dos sistemas acuíferos principales de extensión regional

- **Acuífero Sabana:** Corresponde a sedimentos Cuaternarios con un espesor de hasta 400 m que pueden producir caudales de hasta 5 lps. Este acuífero es el de mayor explotación en el área de estudio.
- **Acuífero Guadalupe (Arenisca Labor Tierna):** Corresponde a areniscas cretácicas con un espesor promedio de 120 m que puede producir caudales del orden de 20 lps. A pesar de ser el acuífero más importante en el área, debido a la profundidad a la que se encuentra (entre 800 m a 1300 m en la mayoría del área) su explotación es limitada y localizada en aquellos lugares cerca a los afloramientos.

7.4 CAUDALES DE BOMBEO Y NIVELES ESTATICOS

Del análisis de los caudales de bombeo de los pozos inventariados se determinó que existen dos centros de bombeo principales: el primero ubicado al sur del área cerca al río Tunjuelito y otro ubicado al norte cerca al río Bogotá frente al municipio de Cajicá. El caudal total explotado de acuerdo a los datos reportados es de 1041 l/s; desafortunadamente no existen registros históricos que indiquen el grado de exactitud de estos caudales, por lo que se estima de acuerdo al conocimiento del área que estos valores pueden tener un grado de confiabilidad del 70%. En la Figura 7.1 se muestra la distribución de caudales obtenida. Así mismo y con el fin de visualizar los sectores donde se ha presentado los mayores abatimientos, se graficó la distribución de niveles piezométricos de acuerdo a los datos del inventario obtenidos en el área. Los resultados se muestran en la Figura 7.2.

7.5 DEFINICION DE PARAMETROS GEOHIDRAULICOS

El inventario de pruebas de bombeo realizados en la zona de estudio determinó que de los 1075 pozos inventariados sólo 60 cuentan con pruebas de bombeo y datos geohidráulicos confiables.

La definición de los parámetros geohidráulicos como: Conductividad Hidráulica, Coeficiente de Almacenamiento, y Transmisividad, se hizo con base en la información compilada la cual en algunos casos fue reevaluada mediante la reinterpretación de pruebas de bombeo. Estos parámetros hidrogeológicos se ubicaron arealmente y se proyectaron en el subsuelo sobre las secciones geológicas elaboradas previamente, con el fin de calcular valores equivalentes (de acuerdo a los espesores de cada formación) que sirvieran como variables de entrada al modelo matemático..

Dado que el modelo es tridimensional, los parámetros geohidráulicos básicos de entrada son la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento específico para condiciones confinadas y la producción eficaz para condiciones libres. La transmisividad y el coeficiente de almacenamiento son calculados por el modelo con base en estos parámetros geohidráulicos y el espesor saturado en cada capa

7.5.1. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

Los valores medios definitivos calibrados de la conductividad hidráulica se presentan en la tabla 7.1

Tabla No. 7.1. Valores de Conductividad Hidráulica asignados al modelo

UNIDAD	Kx=Ky (m/día)	Kz (m/día)
Fm Sabana (Qs)	0.05	0.005
Fm. Tilatá (QTt)	2	0.02
Fm. Cacho (Tpc)	0.06	0.006
Fm Regadera (Tpr), Bogotá (Tpb), Guaduas (TKg)	0.01	0.0001
Fm. Labor Tierna (Ksglt)	1.5	0.0015
Fm. Arenisca dura (Ksgd)	0.2	0.02
Fm Chipaque (Ksch)	0.0001	0.00001
Fallas	0.025	0.0025

7.5.2. COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO ESPECIFICO Y POROSIDAD EFICAZ

Los valores medios definitivos calibrados del coeficiente de almacenamiento específico y la porosidad eficaz, se presenta en la tabla 7.2

Tabla No. 7.2. Coeficientes de almacenamiento específico Ss y Porosidad eficaz

CAPA	Ss (1/m)	Sy
1	0.000002	0.1
2	$1 \cdot 10^{-9}$	0.05
3	0.000002	0.1
4	$1 \cdot 10^{-7}$	0.05
5	$1 \cdot 10^{-6}$	0.2

7.5.3. RIOS

Las características medias definitivas de los ríos se presentan en la tabla 7.3

Tabla No. 7.3 Parámetros Geohidráulicos de Cauces

Cauce	Espesor (m) b'	Cond Hdr. K'	Resist. Hdr (día) c	H media (m)	Ancho medio (m)
Río Bogotá	10	0.01	1000	2	20
Río Tunjuelo	10	0.1	100	1	10

7.5.4. RECARGA

La recarga proveniente de la precipitación se definió con base en los resultados de infiltración real (véase Mapa 6.1), discretizando cinco zonas, cuyos valores se presentan en la tabla 7.3.

Tabla No. 7.4. Zonas de recarga definidas

ZONA	INFILTRACION (mm/año)
1	5
2	50
3	100
4	200
5	250

8. MODELO MATEMATICO

8.1 DISCRETIZACION DEL MODELO

La discretización matemática del modelo hidrogeológico conceptual (véase Mapa 8.1, y figuras 8.1 y 8.2) se realizó de la siguiente manera:

- Definición de 5 capas a las cuales se les incorporó la topografía y morfología obtenidas de las secciones transversales realizadas previamente.
- La geología, de superficie como de subsuelo, se definió a través de diferentes valores de conductividad hidráulica asignados previamente para cada una de las formaciones caracterizadas.
- Se incorporó una base topográfica digital, la cual fue elaborada a partir de las bases cartográficas existentes en el IGAC y la EAAB.
- Se escogieron los ríos más importantes, que pueden interactuar de manera directa sobre el comportamiento de la cuenca hidrogeológica tales como: el Río Bogotá y el Río Tunjuelito; para efectuar esta labor se utilizaron levantamientos topográficos detallados suministrados por la EAAB, los cuales sirvieron para definir la forma del lecho de los cauces.
- Se incorporaron los mapas de Infiltración Real y Evapotranspiración Potencial, elaborados en la primera fase, como variables hidrológicas
- La malla de cálculo numérico se definió de tal forma que fuera más densa en aquellos sectores de mayor interés como son los centros existentes de bombeo.
- Se escogieron como límites del modelo las divisorias de agua existentes, en los cerros circundantes
- Se definieron los parámetros geohidráulicos (conductividad hidráulica, coeficientes de almacenamiento, porosidad etc.) tomándolos inicialmente de los datos existentes.

8.2 CALIBRACION DEL MODELO Y DEFINICION DE AREAS SENSIBLES

Una vez definidas todas las variables requeridas, se “corrió” el modelo obteniéndose una distribución de cabezas piezométricas para estado natural (estado estacionario) que refleja

las condiciones iniciales antes de la intervención del hombre. Así mismo se pudo observar que la dirección de flujo hidrogeológico y la magnitud de los vectores de velocidad obtenidos concuerdan con la información disponible para la cuenca.

En el mapa 8.2 se muestra la distribución de líneas equipotenciales obtenidas así como la dirección y magnitud de la velocidad de flujo de agua subterránea.

El análisis de sensibilidad se hizo variando los valores de conductividad hidráulica y evapotranspiración con el fin de observar la influencia de estos parámetros sobre los resultados del modelo. Adicionalmente, y debido a que no existe información sobre la permeabilidad de las principales fallas y su influencia sobre la continuidad, en profundidad, en relación con los acuíferos, se realizaron simulaciones en donde se varió, únicamente este parámetro. Los resultados obtenidos indican que las fallas tienen cierto grado de permeabilidad.

Del balance de agua para la cuenca en estado estacionario, se obtuvo que la recarga media a partir de la precipitación en los acuíferos de Santa Fe de Bogotá es de 924 l/s, la evapotranspiración de 905 l/s y el flujo base neto hacia ríos es de 15 l/s.

8.3 SIMULACION HISTORICA

Una vez calibrado el modelo, en estado estacionario, se procedió a calibrarlo en estado transitorio, hasta obtener una simulación en régimen no permanente desde el estado transitorio hasta el año 1999. Los resultados de esta simulación se presentan en el Mapa 8.3. Como forma de calibración se tuvo en cuenta los datos de niveles estáticos reportados de los pozos de PAVCO (Cretácico) y CARBOQUIMICA (Cuaternario), los cuales tienen un registro detallado de los mismos.

9. SIMULACIONES Y PREDICCIONES

Además de las simulaciones en estado estacionario y transitorio histórico, se efectuaron varias simulaciones con el fin de predecir posibles comportamientos del agua subterránea en la cuenca. Estas incluyeron las simulaciones para el análisis de sensibilidad, optimización en los regímenes de explotación de agua de la cuenca, transporte advectivo de partículas y transporte de contaminantes (Ver Informe No. IV)}

10. EVALUACION DE IMPACTOS AMBIENTALES

10.1 CONTAMINACION Y VULNERABILIDAD EN LAS AGUAS SUBTERRANEAS

Las actividades potencialmente generadoras de carga contaminante al subsuelo, están asociadas a actividades tanto urbanas, tales como el almacenamiento de combustibles en tanques subterráneos, redes de alcantarillado, vertimientos de industrias de la transformación, rellenos sanitarios, botaderos de basuras, fuentes de aguas superficiales contaminadas, zonas de cementerios, zonas de subestaciones eléctricas, etc. infortunadamente en el país no existe una base de datos donde se reporten niveles de contaminación medidos, por industria o actividad; por lo que el criterio utilizado en la actualidad es el de definir posibles áreas de la industria o actividades que puedan contaminar el agua subterránea

Una vez definida la lista de fuentes potenciales de contaminación para los acuíferos, se procedió a realizar un inventario detallado para cada una de estas fuentes, teniendo en cuenta el tipo de contaminante que pudiera generar la fuente. Se consultaron varias entidades que de una u otra forma manejan algunos de las fuentes señaladas anteriormente, sin embargo, la respuesta de las mismas, en la mayoría de los casos, fue negativa, y se hizo necesario realizar inventarios manuales a partir de directorios telefónicos, mapas catastrales, informes de vertimientos en entidades gubernamentales entre otros. Cabe destacar sin embargo, que ILAM LTDA suministró datos de los dos últimos monitoreos realizados a 103 industrias del área urbana dentro del programa de seguimiento que viene realizando el DAMA, con el fin de verificar si estas industrias están cumpliendo con la normatividad ambiental vigente.

Los datos recopilados se almacenaron en una base de datos en donde se indica en el mejor de los casos, la ubicación de la fuente (coordenadas IGAC), la dirección del predio, el tipo de posible contaminante y de existir, parámetros de análisis físico químicos y/o bacteriológicos.

En el Mapa 10.2 se presenta la localización de las fuentes potenciales de contaminación identificadas.

Como se puede observar las principales actividades encontradas en su mayoría, son de tipo industrial con presencia posible de contaminantes del tipo h, o y s con distribución de carga contaminante del tipo (p-d) puntual a dispersa, localización (u) urbana (Foster, 1991). Este es un análisis muy sencillo, en realidad la carga contaminante debe ser evaluada con

mayor detalle y precisión debido a que interactúa directamente con la zona no saturada dependiendo de su clase, intensidad, disposición y duración. Infortunadamente no existe un inventario consolidado de actividades potenciales que generen carga contaminante a los acuíferos y mucho menos mediciones de diferentes contaminantes por profundidad en dicha zona lo que permitiría investigar el comportamiento químico de estos componentes y su concentración hasta la zona saturada, permitiendo definir así niveles tóxicos, capacidad y mecanismos de amortiguación de contaminantes en la zona no saturada.

10.2 ANALISIS DE VULNERABILIDAD

El término vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero es usado para presentar las características intrínsecas que determinan la sensibilidad de un acuífero a ser adversamente afectado por una carga contaminante (Foster, 1991).

La vulnerabilidad es función de:

- La capacidad de la zona saturada de recibir y almacenar contaminantes.
- La capacidad de atenuación de los estratos que suprayacen a la saturada del acuífero, la cual depende de la capacidad de retención física del medio y de la posible reacción química que pueda tener este con los contaminantes.

Las características del medio mencionados anteriormente interactúan con las características de la carga contaminante que pueda llegar al subsuelo.

- La clase de contaminante en términos de su movilidad y características de dilución
- La concentración y la forma (líquido, gaseoso, sólido) como llega la carga contaminante al subsuelo

La interacción de estos factores va a determinar el tiempo de residencia del contaminante, en la zona no saturada, así como también el tiempo de llegada del mismo a la zona saturada y el grado de atenuación y retención que esta zona puede tener.

Por lo tanto la evaluación a la vulnerabilidad de los acuíferos debe realizarse para cada contaminante o grupo de actividades contaminantes. El resultado de estas evaluaciones es un mapa de vulnerabilidad del acuífero.

Con base en la información disponible y con el objeto de realizar un análisis regional, se decidió aplicar la metodología empírica propuesta para la evaluación de la vulnerabilidad

por Foster en 1987, CEPIS. La selección de los parámetros se basa en aquellos datos disponibles y de fácil compilación como son:

- Profundidad de la tabla de agua o tipo de acuífero
- Las características en términos de la litología y grado de consolidación de los estratos encima de la zona saturada.

Entonces, el índice de vulnerabilidad del acuífero es el producto de los componentes indicados. El índice obtenido permite determinar si la vulnerabilidad del acuífero es baja o alta.

El índice de vulnerabilidad, aplicando el método DIOS (Distancia al agua, Ocurrencia de agua subterránea, Substrato litológico, Foster, 1991) para el área de estudio, fluctúa entre 0.2 y 0.38 (Ver Tabla 10.1, Mapa 10.1) es decir la vulnerabilidad del acuífero es de baja a moderada.

Un acuífero, cuyo índice de vulnerabilidad DIOS, está entre bajo y moderado y sobre el cual se desarrollan actividades potencialmente contaminantes, presenta un peligro potencial de contaminación moderado. Se recomienda, hacer un estudio cuantitativo con base en el inventario completo de las sustancias potencialmente contaminantes generadas por diversas actividades, información que no ha sido generada por el momento, por parte de ninguna entidad ambiental local.

Tabla 10.1 Análisis de vulnerabilidad por formación geológica

Formación geológica	Índice de vulnerabilidad (0 a 1)	Grado
Ksgd-Ksgpl	0.32	Moderado
Qc-Qta-Qs	0.38	Moderado
Ksglt	0.37	Moderado
Qri	0.21	Bajo
Tkgu, -Tpb-Tpc	0.35	Moderado
Ksch	0.25	Bajo

11. MITIGACION DE IMPACTOS, MONITOREO Y SEGUIMIENTO

11.1 POZOS DE MONITOREO

Dado que el agua subterránea está oculta debajo de la superficie del terreno, solamente se puede conocer en forma directa su estado (cabeza piezométrica, concentración química), mediante la observación y medición directa a través pozos. Desafortunadamente la complejidad de los sistemas acuíferos en especial los de Santa Fe de Bogotá, y los “ruidos” intrínsecos que tienen los pozos de bombeo, hace que aún su medición directa no sea tan sencilla.

Los pozos de bombeo desde el punto de vista de registro de niveles de agua o cabeza piezométrica, dan por naturaleza datos erróneos por las siguientes razones:

- El radio efectivo de un pozo de bombeo no se puede conocer (solamente usando pozos de observación o monitoreo cercanos). Utilizar el radio medio de construcción de pozo puede dar datos anómalos en el coeficiente de almacenamiento hasta dos órdenes de magnitud. Es decir, el coeficiente de almacenamiento solamente se puede calcular con pozos de observación cercanos a un pozo de bombeo.
- Los pozos de bombeo por naturaleza tienen pérdidas intrínsecas de cabeza por la fricción del agua a través del empaque de grava, a través de las rejillas y por el flujo desde éstas hasta la succión de la bomba. Adicionalmente la presencia de elementos utilizados durante la perforación (lodos, químicos, etc.), que no han sido removidos de los poros del acuífero en las cercanías del pozo también afecta la medición de niveles y de calidad química en los mismos pozos de bombeo.
- Generalmente los pozos de bombeo captan varios niveles acuíferos que pueden estar a diferente presión, registrando algún tipo de promedio de los niveles (ó calidades químicas) individuales de cada sector captado.
- Finalmente no siempre es fácil registrar con exactitud los niveles (y muestreo hidroquímico) en pozos con bombas, cables. Con frecuencia es imposible efectuar estas mediciones en pozos de bombeo.

Por las razones anteriores se hace necesario la construcción de una red de pozos de monitoreo, que sirva conjuntamente con el modelo como herramienta de control de

verificación y seguimiento. Mediante la red de monitoreo se debe verificar la operación del modelo, o modificar las condiciones, de acuerdo a lo observado a nivel espacial y temporal.

11.2 LOCALIZACION

El número y localización de los pozos de monitoreo se hace de acuerdo a la respuesta del acuífero y por lo tanto del modelo. Del análisis de sensibilidad efectuado, se recomienda como una fase inicial mínima y deseable la construcción de pozos de monitoreo que se indican en el mapa 11.1. Esta distribución de pozos de monitoreo es la mínima deseable bajo la operación actual del acuífero.

Naturalmente que eventos que ocurran no contemplados en este modelo, por ejemplo algún derrame accidental, o alguna política de explotación de aguas subterráneas en algún sitio específico exige la ubicación de otros pozos de monitoreo.

11.3 DIAMETRO

El diámetro de perforación y revestimiento de los pozos de monitoreo debe ser lo suficientemente grande para permitir un equipo de muestreo, bien sea un baldeador o una bomba, o algún otro dispositivo que se pueda introducir hasta la profundidad deseada. Generalmente se pueden utilizar pozos de monitoreo de 2 pulgada de diámetro.

Revestimientos o perforaciones más grandes pueden tener efectos no deseables en los datos; por ejemplo, en formaciones de baja permeabilidad el almacenamiento en las cercanías del pozo puede dar datos erróneos. También, con frecuencia la estabilización dura entre unos cuantos días y a veces aún semanas; este efecto también complica la purga del pozo para muestreos.

En otras ocasiones cuando hay velocidades de aguas subterráneas relativamente altas, mayores a un centímetro por segundo, generalmente el mismo pozo de monitoreo es una barrera que deforma las condiciones propias del acuífero.

Pozos de monitoreo profundos (en general mayores a 40 m), se pueden efectuar como multipiezómetros, colocando dos a máximo tres revestimientos en el orificio de perforación en intervalos discretos.

11.4 PROFUNDIDAD

La profundidad de los pozos de monitoreo y fundamentalmente la rejilla debe estar localizada en un intervalo discreto. La entrada de agua y el muestreo tanto de niveles como de calidades deben estar en un rango específico; este rango define un nivel puntual en pozos de monitoreo.

En el mapa 11.1 se dan las profundidades recomendadas en forma inicial, ya que la profundidad definitiva depende de las condiciones reales encontradas durante la perforación.

11.5 FRECUENCIA DE REGISTRO DE NIVELES, CAUDALES Y ANALISIS QUIMICOS

La frecuencia del registro y muestreo en pozos de monitoreo o piezómetros depende de varios factores como las condiciones de conductividad hidráulica de la formación de interés, que incidirá en la velocidad con la cual migra el agua y los iones disueltos naturales o compuestos químicos por actividades del hombre, de los caudales de bombeo, si hay contaminación, depende también de la peligrosidad de la contaminación, la evolución de niveles de agua, de la evolución de la pluma contaminante. También es importante efectuar ensayos de acuífero o pruebas de bombeo con pozos de monitoreo o de observación.

11.5.1. CAUDALES DE BOMBEO

Generalmente el caudal de bombeo de un pozo puede variar hasta un 50% durante el primer año de operación, después se mantiene aproximadamente constante, a no ser que cambie los requerimientos de agua o que haya alguna variación importante de niveles de agua en la zona en donde se ubique el pozo, o que cambie las características del bombeo, por ejemplo, cambio del régimen de bombeo a más horas diarias, lo que se traduce en más bombeo del acuífero, o variación de los caudales por cambio de la bomba, o profundidad de ubicación de la misma.

Es importante que se exija a los usuarios del recurso dar la información del bombeo, para actualizar la información que va a alimentar el modelo.

La información y periodicidad que se debe suministrar y actualizar en cuanto a caudal es:

- Actualizar la información con una frecuencia de 6 meses.
- Caudal de bombeo en unidades de uso corriente: litros por segundo (l/s), metros

cúbicos por día (m³/d), o galones por minuto (gpm)

- Método de medida del caudal (volumétrico, estimado, por medidor, tipo de medidor)
- Régimen diario de bombeo: en número de horas de bombeo por día
- Número de días que opera el sistema por semana: por ejemplo 5 días (sino opera sábados ni domingos)
- Número de días que por alguna razón (mantenimiento, daños, etc.) el sistema no operó durante los seis meses.

Al final se podrá tener el caudal efectivo promedio del pozo durante los seis meses.

Es importante que el DAMA, verifique la información anterior al azar, o cuando haya datos anómalos, por ejemplo caudales extremadamente grandes o pequeños.

11.5.2. NIVELES DE AGUA SUBTERRANEA

La medida del nivel el agua subterránea es la forma de registrar el estado del agua subterránea a nivel del flujo, y de transporte por advección, no directamente de contaminación. Como se presentó en el capítulo anterior se deben medir los niveles en los pozos de monitoreo o piezómetros, ya que los pozos de bombeo presentan sesgos inherentes a los mismos pozos; sin embargo también es importante registrar esta información y los usuarios deben suministrar esta información adicional a la información de caudal.

También pozos abandonados, en donde se puedan medir niveles confiables son puntos importantes de registro, generalmente mejor que los pozos de bombeo.

El registro de la red de pozos de monitoreo, piezómetros y pozos abandonados debe estar a cargo directo del DAMA. Eventualmente los pozos abandonados o pozos de observación de propiedad de particulares, cómo en los pozos de bombeo, el monitoreo puede estar a cargo del usuario.

La información y periodicidad de registro de niveles tanto para pozos de monitoreo como de bombeo debe ser la siguiente:

- Actualizar la información con una frecuencia de 6 meses
- Nivel del agua desde la superficie

- Punto de medida de la superficie: a boca de pozo, desde la base, etc.
- Método de medida: sonda eléctrica, acústica, transductor de presión, cinta métrica, etc.
- Si son pozos de bombeo, registrar si el pozo está operando o no y el número de horas o días en que comenzó a operar o dejó de operar antes de registrar el nivel.
- Es importante dar o conocer a los usuarios la importancia de medir los niveles cuando un pozo esté fuera de servicio por razones de mantenimiento.

11.5.3. CALIDAD FISICOQUIMICA Y BACTERIOLOGICA DEL AGUA SUBTERRANEA

La frecuencia de muestreo, el tipo de análisis fisicoquímicos y bacteriológicos a realizar depende del objetivo del monitoreo, del tipo y cantidad de compuestos naturales, o artificiales (contaminantes o no, peligrosos o no) presentes en el agua subterránea, las velocidades de transporte, y las reacciones con el medio poroso. Mediciones específicas en contaminaciones puntuales (accidentes, goteo de tanques enterrados) dependen del sitio afectado, en donde hay que efectuar una evaluación local. Sin embargo hay una serie de iones comunes presentes en formaciones acuíferas naturales, como en la mayoría de aguas contaminadas.

Una frecuencia de muestreo recomendada es de seis meses para sitios no contaminados; los iones dominantes en términos de concentración, en aguas subterráneas, en ambientes naturales, o contaminados son potasio K, sodio Na, Calcio Ca, Magnesio Mg, Cloro Cl, Sulfatos SO₄, Bicarbonatos HCO₃ y Carbonatos CO₃, los cuales se deben medir. También se deben medir el pH, conductividad específica y los sólidos disueltos. Hay otra serie de iones que pueden tener menos importancia, pero que dan información adicional a costos relativamente bajos como son el Hierro Total y en solución, y los Nitratos; eventualmente también los Sulfitos y Fluoruros. Desde el punto de vista bacteriológico se deben registrar los coliformes totales y fecales.

12. TRANSPORTE ADVECTIVO DE PARTICULAS

Con el fin de visualizar los tiempos aproximados que tardaría una partícula en viajar desde los Cerros aledaños hasta el centro de la cuenca, se decidió realizar una simulación de transporte advectivo de una serie de partículas en estado estacionario sobre el acuífero cuaternario.

Para esta simulación se colocaron líneas de partículas en diferentes sitios, y apartir de allí, se calcularon los tiempos de viaje y trayectoria hasta los cerros circundantes; así mismo, todas las partículas se liberaron al mismo tiempo y en forma reversa, con lo que se pudo obtener la zona de donde podrían provenir. En el Mapa 10.3 se muestra la distribución de trayectorias obtenida con intervalos de tiempo cada 2000 años.

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

Se observa que la mayoría de partículas tienen componentes verticales, lo que indica que el flujo viaja primero hacia los estratos más permeables (Grupo Guadalupe), para volver a subir nuevamente al Cuaternario.

La mayoría del flujo de la cuenca proviene de los Cerros Orientales.

El tiempo promedio de viaje obtenido para las partículas que provienen del área Occidental (Tenjo, Facatativá) es de 18250 años, mucho mayor que el obtenido en la zona oriental. Lo anterior sugiere, que la edad del agua subterránea de la zona occidental es mucho más antigua que la de la zona oriental de la cuenca.

Los tiempos obtenidos en promedio para la zona sur del área es de 27000 años. Lo anterior sugiere una conexión directa entre los cerros adyacentes con el acuífero.

13. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. La zona simulada, incluye el área del DAMA y alrededores con una extensión de 2184 Km².
2. En condiciones estacionarias iniciales (antes de extraer agua del acuífero), el balance regional de agua en el área de Estudio da como resultado una recarga media anual de 924 l/s, una evapotranspiración de 905 l/s y el flujo base neto hacia ríos de 15 l/s.
3. Al año 1999 el balance de agua da como resultado: una recarga media anual de 924 l/s, una disminución de agua en almacenamiento de 820 l/s, una infiltración de ríos de 20 l/s, una evapotranspiración de 600 l/s y un caudal de bombeo de 1164 l/s.
4. El volumen de agua almacenado en el Grupo Guadalupe en las Areniscas Tierna y Labor es de aproximadamente 10.320 millones de m³. Un valor similar se obtiene para la zona de los Plaenners y Arenisca Dura. Este valor del volumen almacenado en el acuífero de las areniscas Labor y Tierna se obtiene considerando:

$$\text{Area}=516 \cdot 10^6 \text{ m}^2$$

Esta área corresponde únicamente al área establecido en los términos del contrato del presente estudio y no al área realmente estudiada, la cual se extendió a 2184 Km².

Considerando el espesor medio de la Formación areniscas Labor y Tierna en 200 m y una porosidad eficaz de la misma de 10% se obtiene un volumen de agua de:

$$\text{Vol}=10.320 \text{ millones de m}^3$$

Un valor del mismo orden de magnitud se obtiene para los Plaeners y arenisca Dura ya que su espesor medio es mayor al de las areniscas de Labor y Tierna y su porosidad eficaz menor a la establecida para las areniscas de Labor y Tierna.

De esta forma se obtiene que existen, aproximadamente, 20.000 millones de m³ de agua almacenada en el Grupo Guadalupe en un área de 516 Km².

Sin embargo, estos recursos son, técnica y económicamente, difíciles de aprovechar hoy en día ya que se requeriría drenar el acuífero Guadalupe, cuyo tope se encuentra en términos generales, por debajo de los 300 m de profundidad y en algunos sectores

a más de 1000 m.

Se puede aprovechar, como se esta haciendo hoy en día, el volumen de agua almacenado por efectos de compresibilidad del mismo líquido y de la elasticidad del medio poroso, los cuales están representados por el coeficiente de almacenamiento elástico del acuífero.

Para la misma área de 516 Km² teniendo una cabeza media de 50 m a partir de la superficie del terreno, bajando la cabeza hasta los 200 m de profundidad y considerando un coeficiente de almacenamiento medio de $5 \cdot 10^{-5}$ para el Grupo Guadalupe se tiene un volumen de agua de 3'870.000 m³.

5. El estado del agua subterránea en la Sabana de Bogotá, es que en general se tiene un buen almacenamiento de Agua Subterránea del orden de los 40.000 millones de m³. hasta una profundidad media de los 1000 m. Sin embargo la recarga es muy reducida, la conductividad hidráulica en general media a baja, y coeficientes de almacenamiento también bajos, lo que se traduce en descensos pronunciados haciendo uso del agua almacenada.
6. Los tiempos de viaje medios desde las zonas de recarga hasta la zona media del área de la ciudad son del orden de 10.000 años, siendo también concordantes con los descensos pronunciados y el consecuente uso del agua en almacenamiento.
7. Aunque hay gran cantidad de agua subterránea almacenada en los Acuíferos de Santa Fe de Bogotá, la recarga es únicamente del orden de 1 m³/seg. Los inventarios actuales dan un caudal de bombeo del orden de 1 m³/s. Es decir, a nivel de la ciudad y alrededores, se está utilizando, aproximadamente, la recarga natural de los acuíferos. Sin embargo, su uso está concentrado en zonas muy delimitadas, específicamente, en sectores en donde los niveles acuíferos se encuentran a profundidades no mayores a los 500 m lo cual facilita la captación de los mismos. En los sectores en donde los horizontes acuíferos se encuentran a profundidades mayores a los 500 m es la captación de los mismos disminuye debido a la dificultad técnica para realizar las perforaciones y al incremento de los costos de las mismas.
8. De acuerdo al estudio y los resultados de simulaciones y predicciones del modelo, se considera que en zonas de acuíferos profundos, mayores a los 600 m, aún se podría extraer un caudal adicional de 500 l/s para un total de 1.5 m³/s.
9. La recarga potencial (con escorrentía nula) es del orden de 2 m³/s, y la real de 1 m³/s. Se podría aumentar la recarga potencial con recarga artificial e inducida, mediante la

protección de las zonas de recarga, con una vegetación no muy alta, preferiblemente bosque nativo, y “rastrojo”, lo que hace que haya más retención superficial; también otras medidas de retención de agua superficial con pequeños embalses o “trinchos”. Asumiendo un 50% de efectividad de las medidas, se podría contar con 0.5 m³/s adicionales de recarga. Estas medidas de recarga tienen efecto a largo plazo, ya que los tiempos de viaje son muy lentos; sin embargo la respuesta a la presión es más rápida que al transporte advectivo de la masa de agua que se está infiltrando, teniendo recuperaciones de niveles en menores tiempos.

10. Las líneas de geoelectrica continua permitieron determinar y comprobar estructuras geológicas que no habían sido reportadas antes en la literatura.
11. Se logró obtener una base única de datos de inventarios con información hidrogeológica. Esta base por la escasez de datos en la información existente es incompleta. Sin embargo, es uno de los puntos de apoyo para la calibración del modelo matemático.
12. Se elaboró un nuevo mapa geológico donde se muestra un nuevo esquema estructural que afecta directamente el comportamiento hidrogeológico de la cuenca.
13. Se elaboraron varias secciones transversales que permitieron definir las estructuras en profundidad.
14. Se realizó una primera clasificación de la génesis de agua existente en el área.
15. De acuerdo a los resultados obtenidos el área de estudio es muy compleja geológicamente, lo que se traduce en que el modelo matemático sea igualmente complejo.
16. La calibración en estado estacionario del modelo final se realizó teniendo en cuenta la topografía natural del terreno, tal que la tabla de agua estuviera muy cerca de la superficie, y los acuíferos profundos con presiones iniciales artesianas entre 10 y 40 m por encima de la superficie. También se tuvo en cuenta datos fragmentarios de las primeras perforaciones realizadas en la Sabana de Bogotá. Para estado transitorio, también se calibró el modelo con datos muy locales y esporádicos, debido a la falta de una red de pozos de monitoreo en el área.

13.1 RECOMENDACIONES

Se recomienda, con base en la información compilada, llevar a cabo inicialmente un

inventario Hidrogeológico en la zona norte donde existe una alta densidad de pozos con los problemas mencionados anteriormente.

Es recomendable llevar acabo el inventario en una base de datos tipo SITEGIS donde se pueda almacenar toda la información físico química, hidrogeológica y de construcción de cada pozo inventariado, pudiendo realizar posteriormente secciones transversales de calidad de agua, caudales, ver regionalmente concentración de los principales iones etc. Es indispensable que todo inventario que se lleve a cabo a partir de la fecha adopte la nomenclatura establecida para el Banco Nacional de Datos Hidrogeológicos.

Se recomienda efectuar un inventario detallado del estado y el uso del agua subterránea, utilizando la metodología propuesta por el Banco Nacional de Datos

Es recomendable a pesar de los costos implícitos realizar una red de pozos de monitoreo que alcance al acuífero Guadalupe, lo que permitiría determinar la calidad de agua, y parámetros hidrogeológicos de este acuífero que hasta la fecha no se conocen con exactitud.

Por último se recomienda construir una red de pozos de monitoreo cerca a los principales centros de bombeo donde se puedan realizar pruebas hidráulicas que permitan determinar con mejor precisión los parámetros geohidráulicos de los principales acuíferos existentes.

14. REFERENCIAS

Anderson, M.P. and W.W. Woessner, 1992. Applied Ground Water Modeling; Simulation of Flow and Advective Transport, Academic Press, San Diego, 381 p.

ASTM D 5447-93, 1993. Guide for Application for Ground Water Flow Model to a Site Specific Problem. ASTM, Philadelphia.

ASTM D 5609-94, 1994. Guide for Defining Boundary Conditions in Ground Water Flow Modeling. ASTM, Philadelphia.

ASTM D 5610-94, 1994. Guide for Defining Initial Conditions in Ground Water Flow Modeling. ASTM, Philadelphia.

ASTM D 5718-95, 1995. Guide for Documenting a Ground Water Flow Model Application. ASTM, Philadelphia.

Barcelona, M.J., J.P. Guibb, J.A. Helfrich y E.E. Garske, 1985. Practical Guide for Ground-water Sampling. III State. Water Survey, Champaign.

Barcelona, M.J., J.P. Guibb, R.A. Miller 1985. A Guide to the Selection of Materials for Monitoring Well Construction and Ground Water Sampling. III State. Illinois State Water Survey, Champaign, Illinois, 1983.

Bear, J., 1972 Dynamics of fluids in Porous Media, Elsevier, New York.

Bear, J., 1978 Hydraulics of Ground Water, McGraw Hill, Jerusalem.

CAR, Tahal, 1973. Estudios de Recursos de Agua Subterránea en la Sabana de Bogotá (Primera Etapa), CAR, Bogotá

CAR, TNO, 1975. Estudios de Agua Subterránea en la Sabana de Bogotá (Segunda Etapa), CAR, Bogotá.

Domenico, P.A. and F.W. Schwartz, 1998. Physical and Chemical Hydrogeology. John Wiley & Sons, New York, 824 p.

Fetter, C.W., 1994. Applied Hydrogeology. Macmillan, New York, 691p

Foster, S. y R. Hirata, 1991. *Determinación del Riesgo de Contaminación de Aguas Subterráneas*, CEPIS, Lima, Perú.

HIDROGEOCOL LTDA. 1999. *Investigaciones Hidrogeológicas en Santa Fe de Bogotá D. C. Informe Técnico Interno*.

Kresic, N., 1997. *Hydrogeology and Groundwater Modeling*. Lewis Publ., Boca Raton

McDonald, M.G. and A.W. Harbaugh, B.R. Orr, and D.J. Ackerman, 1988. *A modular three-dimensional finite-difference ground water flow model*. Techniques of Water Resources Investigations 06 –A1. U.S. Geological Survey Open. Reston, VA.

Molano, C.E., 1977. *Aprovechamiento de Aguas subterráneas en la Sabana de Bogotá*. Tesis de Grado IC-77-II-08. Universidad de Los Andes. Bogotá.

Nelson, J. D., and R.C. Ward., 1981. *Statistical Considerations and Sampling Techniques for GroundWater Quality Monitoring*. Journal of Ground Water, 19 (6).

Nielsen, D.M., 1991. *Practical Handbook of Ground-Water Monitoring*. Lewis Publ., Chelsea, MI.

NWWA, 1994. *Suggested Practices for Instalation of Ground-Water Monitoring Wells*. Ohio. U.S.A.

Remson, I., G.M. Hornberger, and F.J. Molz, 1971, *Numerical Methods in Subsurface Hydrology*, Wiley - Interscience, 389p.

Ritchey, J.D. y J.O.Rumbaugh, 1996. *Subsurface Fluid Flow Modeling*. ASTM, Philadelphia.

Scalf. M. R., J. F. McNabb, W.J.Dunlap, R.L Cosby y J.S. Fryberg, 1981. *Manual of Ground Water Sampling procedures*. U.S. Environmental Protection Agency, ADA, Oklahoma.

Strack, O.D.L., 1988. *Groundwater Mechanics*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 732 p.

Van der Heijde, P.K.M., A.I. El - Kadi, S.A. Williams, 1988, *Groundwater modeling: An overview and status report*. U.S. EPA. EPA/600/2-89/028, 242 p.

Wang, H.F., and M.P.Anderson, 1982, *Introduction to Groundwater Modeling: Finite Difference and Finite Element Methods*, W.H. Freeman, 256 p.