

# Modelo hidrogeológico conceptual y análisis de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero de Duitama Boyacá - Colombia

conceptual hydrogeological model and analysis of vulnerability to pollution of the aquifer in duitama boyacá – colombia

Le modele hydrogeologique conceptuel et l'analyse de vulnerabilite a la contamination de l'aquifere de duitama boyaca - la colombie

Recepción: 8-06-2010  
Evaluación: 06-08-2010  
Aceptación: 23-08-2010  
Artículo de Investigación Científica

\* Monroy V. Ricardo;  
\*González G. Juan Pablo

## Resumen

El objetivo de este paper es el de incorporar una serie de estudios en donde se involucran aspectos geológicos, hidrológicos, hidrogeológicos, geotécnicos, sociales, económicos y culturales, apoyados por la cartografía del SIG; con la finalidad de dar a conocer un diagnóstico general, y aproximado del estado actual del acuífero de la ciudad de Duitama, Boyacá - Colombia, que permita a su vez, proponer las técnicas necesarias para su correcto manejo, conservación en el tiempo y prevenir su contaminación. Hace parte del alcance de este estudio, el desarrollo de un modelo hidrológico conceptual, evaluación de volúmenes de extracción anual, evaluación de reservas y de recarga del acuífero en explotación, determinación del rendimiento del acuífero en explotación, priorización del uso de las aguas subterráneas, elaboración de un plan de manejo ambiental, que permitan la implementación de medidas de protección de las aguas subterráneas.

**Palabras clave:** Acuífero, recursos hídricos, modelo hidrogeológico, recarga y descarga.

## Abstract

The aim of this paper is to incorporate a number of studies which involved geological, hydrological, hydrogeological, geotechnical, social, economic and cultural aspects, supported by GIS mapping, in order to show a general and approximated diagnosis of the current state of the aquifer in Duitama, Boyacá Colombia and propose the necessary techniques for its proper management, conservation in time and prevent pollution. The development of a conceptual hydrological model, evaluation of annual extraction volumes, reserves evaluation and exploitation of the aquifer recharge, aquifer yield determination in operation, and prioritization of the use of groundwater development of an environmental management plan are also parts of the scope of this project, which allows the implementation of measures to protect groundwater.

**Key words:** Aquifer, water resources, hydrogeological model, recharge and discharge.

## Résumé

L'objectif de ce papier est d'incorporer une série d'études où sont impliqués des aspects (apparences) géologiques, hydrologiques, hydrogéologiques, géotechniques, sociaux, économiques et culturels, appuyés par la cartographie du SIG; dans le but de permettre de connaître un diagnostic général et approximatif de l'actuel état de l'aquifère d'elle prenez soin de Duitama, Boyacá Colombia, qui permet à son tour, proposer les techniques nécessaires pour son maniement correct, conservation dans le temps et prévenir sa contamination. Il(elle) fait une dépêche (partie) de la portée de cette étude, le développement d'un modèle hydrologique conceptuel, l'évaluation de volumes d'extraction annuelle, une évaluation de réserves et de rechargement de l'aquifère dans une exploitation, une détermination du rendement de l'aquifère dans une exploitation, une priorisation de l'usage des eaux souterraines, l'élaboration d'un plan de maniement environnemental, qui permet l'implémentation de mesures de protection des eaux souterraines.

**Mots-clés:** Aquifère, des recours (ressources) hydriques, le modèle hydrogéologique, rechargement et décharge.

## Introducción

La calidad del agua subterránea se puede ver afectada por las diferentes actividades antrópicas que se desarrollan en su superficie, las cuales representan fuentes potenciales de contaminación o alteración de las características naturales de las aguas subterráneas. (Kiely,

1999). Cuando un contaminante se disuelve en el agua subterránea se esparce de forma natural desde la fuente o punto de origen y fluye a lo largo del flujo conjuntamente con el agua

\* Decano Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja. Grupo ACI. emonroy@ustatunja.edu.co

\*\* Magíster en Ingeniería Civil. Coordinador de Investigaciones Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja. jgonzalezg@ustatunja.edu.co



**Fuente Fotográfica:**  
[http://notiduitama.files.wordpress.com/2009/04/obrascentro\\_0631.jpg](http://notiduitama.files.wordpress.com/2009/04/obrascentro_0631.jpg)

subterránea. La forma que toma la masa del contaminante en el agua subterránea se llama pluma de contaminación. (Álvarez & Guevara, 2003). En la actualidad el municipio de Duitama no conoce la extensión del acuífero, zonas de recarga, volúmenes de agua, volúmenes de extracción, volúmenes de recarga, fuentes superficiales que apoyan su recarga y posibles fuentes y puntos de vulnerabilidad a la contaminación; con base en esto este estudio pretende diagnosticar el estado actual del acuífero que permita a su vez, proyectar las estrategias necesarias para su manejo y conservación futura. Hacen parte del alcance de este estudio, el planteamiento de un modelo hidrogeológico conceptual, evaluación de volúmenes de extracción anual; evaluación de reservas y de recarga del acuífero, hallando estas variables desconocidas se puede establecer el modelo hidrogeológico conceptual.

Ingeniero Civil, (C) PhD, Universidad Nacional de Rosario Argentina, <sup>2</sup> Especialista en Ingeniería Ambiental U.P.T.C, Magíster en Ingeniería Civil Universidad de Los Andes.

## II. Metodología

### Localización área de estudio

La ciudad de Duitama se localiza en Colombia, departamento de Boyacá, en la región andina ubicada en el altiplano Cundiboyacense, esta ciudad se localiza en el plano geográfico delimitado al norte por la cadena montañosa en el Alto Lamadero en la coordenada norte 1°149.000, al sur por el municipio de Tibasosa en la coordenada norte 1°130.000, al oriente por el municipio de Santa Rosa de Viterbo en la coordenada este 1°125.000, y al occidente por el

municipio de Paipa en la coordenada este 1°103.800, esta descripción se puede observar mejor en la figura No. 1.

La ciudad de Duitama limita: por el Norte con el departamento de Santander, y los municipios de Charalá y Encino; por el Sur con los municipios de Tibasosa y Paipa; por el Oriente con los municipios de Santa Rosa de Viterbo y Belén; y por el Occidente con el municipio de Paipa.



Figura No 1. Localización del Municipio de Duitama en Boyacá

### Geología Municipal

Para este estudio se recopiló información en campo y en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi sobre Geología histórica del municipio, Estratigrafía general (urbana y rural), Estratigrafía local, Geología estructural y Tectónica.

### Hidrología área de estudio

Diversos análisis fueron conducidos hacia la caracterización estadísticas del agua superficial en la cuenca, con el ánimo de entender las fuentes de admisión o de recarga del acuífero que subyace sobre el municipio de Duitama. La escala de análisis parte desde niveles medios mensuales y se resumen a la escala media anual multianual. El estudio hidrogeológico general, parte

desde la identificación de los componentes geomorfológicos de la cuenca, la caracterización de variables físicas (e.g., precipitación, temperatura, escorrentía superficial) y la construcción del modelo de balance hídrico, Partiendo de la información de las precipitaciones totales mensuales, de la evapotranspiración mensual estimada y la escorrentía media mensual, se construyó el balance de agua en el suelo a lo largo del período de estudio. Dos de los métodos de balance, fueron empleados en el presente estudio para los propósitos que anteriormente se describieron, estos son: el método directo y el modelo de Thomas. Con estos modelos se describe el comportamiento hidrológico de las cuencas del río Chiticuy y Surba, así mismo se establecen las bases para el análisis hidrogeológico.

### Vulnerabilidad a la contaminación

La determinación de la vulnerabilidad se basó en el método GOD, esta metodología considera la evaluación de un valor asociado a las propiedades intrínsecas del acuífero y de la zona no saturada como; distancia al agua (profundidad de la napa freática), ocurrencia de agua subterránea (condición del acuífero) y sustrato litológico, carácter del acuífero o acuitardo.

### III. Resultados y Discusión

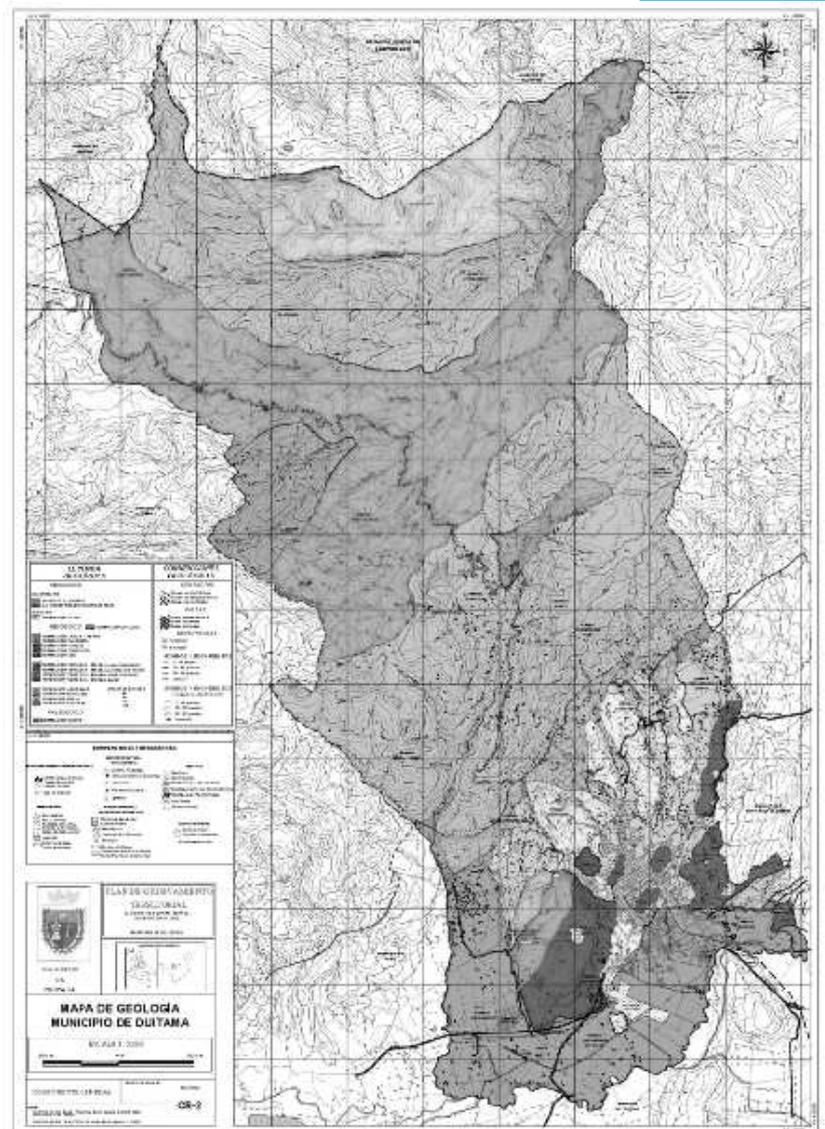
Para la realización del modelo conceptual hidrogeológico se tuvo en cuenta la caracterización hidrogeológica de las formaciones geológicas que afloran en el área de influencia, se hizo una recopilación de la información disponible de pozos profundos de producción de agua subterránea que tienen concesión, analizando los datos de niveles estáticos, caudales, y características hidráulicas de los acuíferos.

### Geología estructural

Las rocas aflorantes en la zona de estudio pertenecen a la cordillera Oriental, la cual fue depositada en un miogeosinclinal con sedimentos que van desde el Paleozoico hasta depósitos recientes, a lo largo del cual se desarrollaron cuencas y subcuencas, cada una de las cuales tiene características definidas. Durante el Paleozoico, el mar ingresó dando

origen a la Formación Cuiche, la cual fue interrumpida por la orogénesis Paleoandina que al final del Pérmico e inicios del Triásico dio lugar a depósitos continentales de la Formación Montebel y la Rusía, que fueron posteriormente levantadas y plegadas junto a los sedimentos del Cretáceo. En el Cretáceo hasta el Plioceno se sucedieron varias fases orogénicas que dieron origen a la Falla de Boyacá, que pone en contacto las formaciones de las cuencas Arcabuco - Villa de Leyva y Duitama – Tunja. En el Cretáceo, los sedimentos depositados después de un gran período de erosión, dan lugar a las Formaciones Tibasosa y Belencito. Durante el Albiano Cenomaniano se depósito la Formación Une. Luego de transgresiones y regresiones, se

Figura 2. Mapa geológico de la región





**Fuente Fotográfica:**  
[http://lh6.ggpht.com/JqoZDRCom3w/TEM9m8FXG\\_I/AAAAAAAAA7E/D15oVY6C\\_jQ/s800/IMG\\_0001.JPG](http://lh6.ggpht.com/JqoZDRCom3w/TEM9m8FXG_I/AAAAAAAAA7E/D15oVY6C_jQ/s800/IMG_0001.JPG)

depositaron las formaciones Churuvida y Conejo. En el Santoniano se dio la sedimentación de la Formación Plaeners. Posterior a ésta, se depositaron las areniscas de la Formación Labor y Tierna indicando el retiro del mar, debido al continuo levantamiento del territorio, creando condiciones para la depositación de la Formación Guaduas. En el Terciario, la sedimentación tiene lugar en cuencas heredadas del miogeosinclinal, que están en subsidencia. En el Oligoceno superior se inició la formación de la Cordillera Oriental, que duró probablemente hasta el Plioceno. Los materiales levantados se erosionaron rápidamente, y se acumularon en las depresiones de la región, en cuencas sedimentarias. Estos depósitos postandinos dieron lugar a cuaternarios mixtos tales como abanicos aluviales y depósitos fluviolacustres. Estas formaciones se pueden ver a continuación:

## Evolución tectónica

Con base en estudios realizados por Reyes (1984) y Escobar (1979), la secuencia estratigráfica en la región del Alto Chicamocha se divide en cinco conjuntos principales: Basamento Cristalino, Serie del Paleozoico Superior, Serie Molásica Mesozoica, Serie Cretácico Terciaria y Depósitos Post Andinos.

## Geomorfología

En el área afloran rocas desde el Paleozoico hasta depósitos cuaternarios recientes. Reyes Ítalo 1982, las clasificó en: Serie Paleozoica, Serie

Mesozoica (Jurásica-Cretácea), Terciario y depósitos Post-orogénicos. En el plano geológico, se presenta la geología de la zona de estudio y el perfil litológico corte A-A', en el cual se observa la distribución de las formaciones en profundidad. Formación Tíbet (Dt): Constituye la parte basal arenosa de la Formación Floresta, que está constituida por una sucesión de areniscas, localmente conglomeráticas. Formación Cucho (Cc): Nombre estratigráfico. Botero R. (1946), dio este nombre a una secuencia de limolitas rojas-violetas, compactas, fracturadas; arcillolitas rojas, areniscas amarillo crema, limolitas rojas, fisibles y areniscas amarillo rojizo. Formación Palermo (TrJp): La parte baja está constituida por un conglomerado con guijos de areniscas rojas de pocos metros de espesor y por un nivel de 50 metros de shales negros. Posteriormente, se encuentra una sucesión de areniscas de grano fino a medio con tintes rojizos, verdosos y violáceos hasta el techo. Formación Montebel (Jim): Nombre estratigráfico. Nombre dado por Hubach (1957), pero la referencia original aparece en Trumpy (1943), refiriéndose a afloramientos de esta formación sobre la carretera Duitama – Charalá. Formación Girón (Jg): Está constituida por una sucesión de areniscas, limolitas rojas y conglomerados. La Formación Girón en el área está constituida, en su parte basal, por una sucesión de conglomerados formados por bloques, guijos y guijarros de cuarcitas, arenitas, limolitas moradas y cuarzo, principalmente; localmente, se observan guijarros de granito, una matriz arenosa limolítica; la parte media está compuesta por arenitas y conglomerados, y la superior, por una alternancia de arenitas, conglomerados y limolitas de colores morados, a verde morados.

## Estudio hidrológico

### *Climatología general*

La cuenca del río Chiticuy se localiza a una altura media sobre el nivel del mar de 2844 m y la cuenca del río Surba a una altura de 3371 m. La clasificación climática se realizó aplicando el criterio de Thornthwaite, el cual establece dos índices para la precipitación y la temperatura efectiva, De acuerdo con lo anterior y a partir de la información climatológica disponible de registros históricos de precipitación y

temperatura media anual multianual, se establece en la zona de estudio un clima húmedo (PE = 92,1) con una temperatura media anual de 15°C y una precipitación media anual de 1218 mm en la parte alta de las subcuenca Chiticuy y Surba, y de 879 mm hacia la parte baja de estas subcuencas (e.g. ver Figura 3)

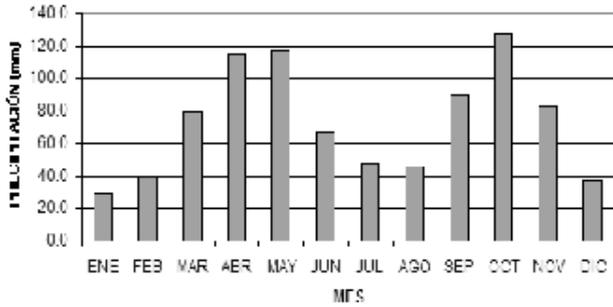
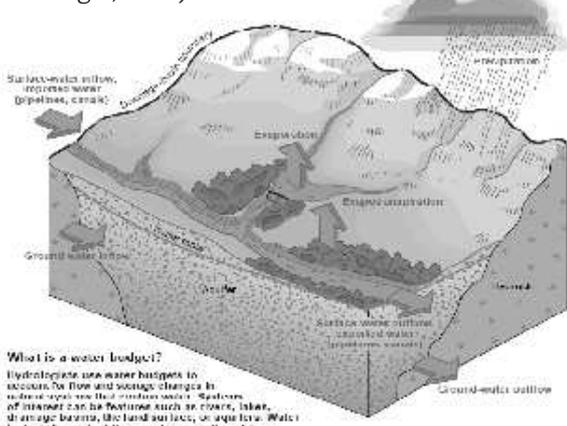


Figura 3. Precipitación media mensual multianual de la estación surbata.

Entre otras variables climáticas, la humedad relativa adopta un valor medio mensual de 78,3 por ciento, el número de total de horas de brillo solar anual es de 1802 horas con un promedio mensual de 152 horas. La presión de vapor del aire húmedo es de 12,8 Mb. La velocidad media del viento es de 1,9 m/s para un recorrido del viento en 24 horas de 160 Km.

Modelo hidrológico

Los modelos hidroclimatológicos describen la interacción entre la superficie terrestre y los procesos atmosféricos a diferentes escalas espaciales y temporales (e.g. ver Figura 4). El modelo hidroclimatológico más simple el cual ha sido validado en diferentes escalas temporales y espaciales, es la forma agregada de la ecuación de continuidad aplicada a una cuenca hidrográfica. (Sankarasubramanian y Vogel, 2002).



Método directo de balance hídrico

Los resultados que se presentan, dan a conocer una fuerte disparidad climática entre los sectores, infiriéndose que la parte baja de las cuencas de estudio se ve afectada por mayores temperaturas que traen como efecto, mayor evapotranspiración, superando los niveles observados en la parte alta de las subcuencas, en más de 100 mm. Para efectos de aplicación de los modelos de balance, se adopta los valores producidos por la estación Andalucía (2403535), por su cercanía a las estaciones hidrométricas empleadas en el estudio. De los resultados que se derivan de la aplicación del método directo del modelo de balance, se puede distinguir que la cuenca del río Chiticuy posee potencialmente gran capacidad de almacenamiento o retención de flujo por detenciones temporales (i.e. por almacenamiento en depresiones y por infiltración efectiva), tal condición puede evidenciarse por la mayor magnitud de área de cuenca (respecto a la cuenca del río Surba) y sus bajos caudales que drenan hacia la estación hidrométrica Chiticuy (2403727). Estos valores preliminares estimados, son cuantías puntuales para la estación climatológica Andalucía (2403535), la cual se ha valorado como representativa del sector de estudio, dado su cercanía a los centroides de cada una de las subcuencas de análisis; una ilustración de la cuenca en estudio se puede observar en la figura No. 5.

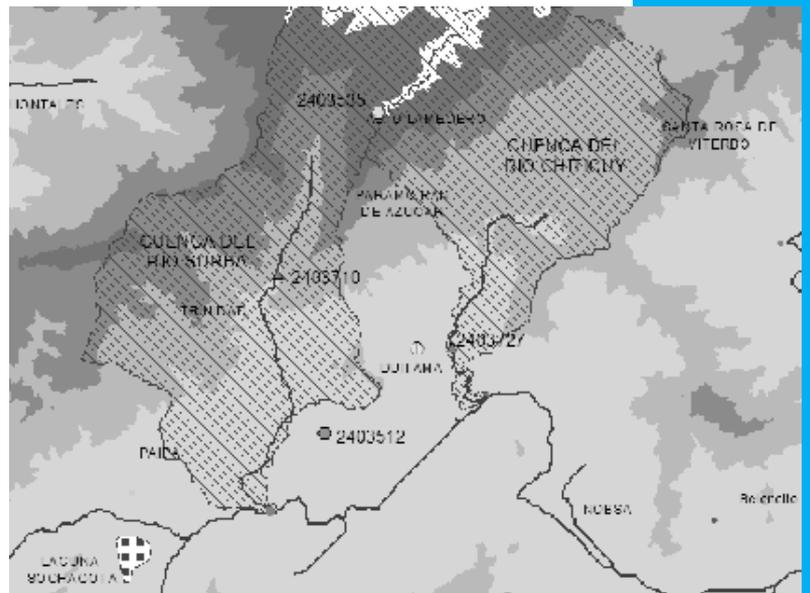


Figura 4. Componentes del balance hidrológico simplificado

Figura 5. Cuencas del área de estudio

*Modelo de balance de Thomas*

El modelo “abcd” es un modelo de cuenca no lineal el cual acepta la precipitación y la evapotranspiración potencial como entradas de modelo, produciendo la magnitud del flujo en la corriente hídrica de estudio. Internamente el modelo también representa la humedad almacenada en el suelo, el almacenamiento subterráneo, la escorrentía superficial, las descargas de flujo procedente de acuíferos a las corrientes y la evapotranspiración actual. Este modelo originalmente introducido por Thomas (1981) y Thomas et al. (1983), es una adecuada estructura matemática que permite evaluar el rendimiento regional del recurso hídrico empleando una escala temporal mensual. Este modelo ha sido sometido a diversas comparaciones con modelos mensuales de balance hídrico, llevando los resultados a distinguirse por su estructura no lineal de respuesta hidrológica. Dada la discontinuidad en los registros hidrométricos en el período de estudio, el procedimiento de calibración se ha realizado con dos series de datos definidos por diferentes intervalos de tiempo. Para la cuenca del río Chiticuy el primer escenario de calibración se define en el horizonte temporal que parte desde enero de 1999 a diciembre de 2001, y el segundo escenario desde enero de 2003 a diciembre de 2005. Para la cuenca del río Surba el primer escenario de calibración se define en el horizonte temporal que parte desde enero de 1997 a diciembre de 2001, y el segundo escenario desde enero de 2003 a diciembre de 2005. Los resultados de la modelación son moderadamente aceptables en su generalidad. El parámetro “a” del modelo de Thomas indica

la alta susceptibilidad de la cuenca a procesos de escorrentía, que deberá entenderse en función de las características geomorfológicas de la cuenca y la cobertura vegetal del mismo que impide el desarrollo de procesos de infiltración. Como anterior se expreso, la cuenca del río Chiticuy guarda un alto grado de detención temporal del agua superficial, que evidentemente se indica en el parámetro “b” de Thomas, valor representativo de la capacidad de la cuenca para mantener agua dentro del horizonte superior del suelo (i.e. en la zona no saturada). Para la cuenca del río Chiticuy el parámetro “b” adopta un valor de 800 mm, mientras que para la cuenca del río Surba, un valor de 400 mm. El parámetro “c” identifica la proporción de los aportes de agua subterránea hacia la escorrentía superficial el cual se establece en 0,56 para la cuenca del río Chiticuy y en 0,36 para la cuenca del río Surba. El parámetro “d” muestra que los tiempos de residencia del agua subterránea en la cuenca son muy altos, lo que conduce a un pensar que existe un aporte de flujo muy lento de agua subterránea hacia la corriente principal.

**Modelo hidrogeológico conceptual**

Para desarrollar el modelo hidrogeológico conceptual se hizo una caracterización hidrogeológica de las formaciones geológicas presentes en el área, se estableció su distribución lateral y en profundidad, se identificó su interrelación con los principales cuerpos de agua superficial, se evaluó la información hidrológica e hidrogeológica disponible.

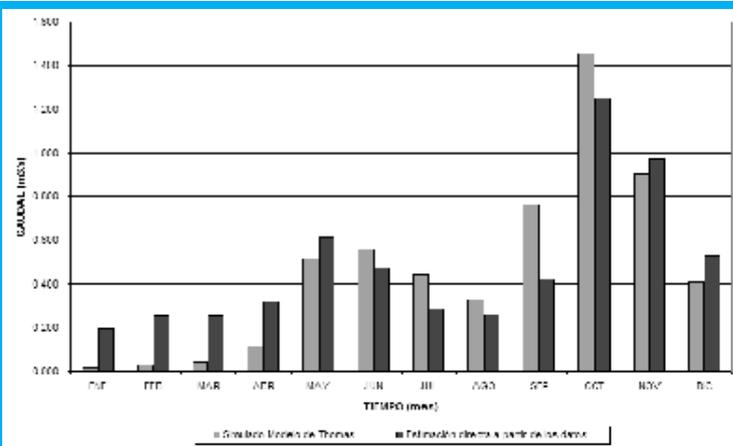


Figura 6. Comparación de resultados entre los valores simulados por el método directo y por modelo de Thomas (cuenca río Chiticuy).

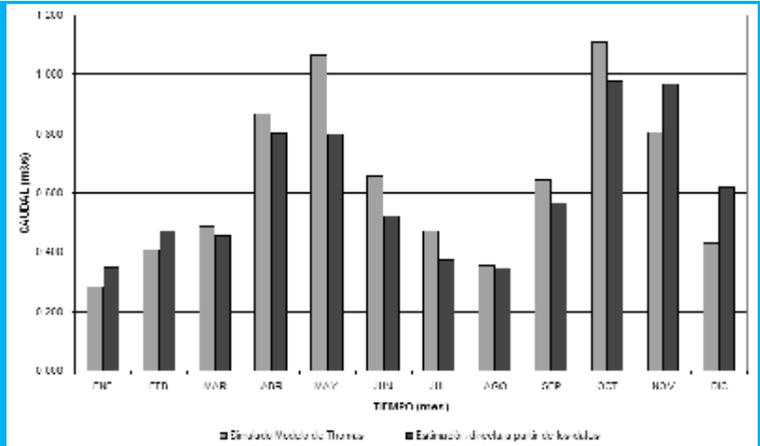


Figura 7. Comparación de resultados entre los valores simulados por el método directo y por modelo de Thomas (cuenca río surba).



Fuente:  
<http://www.ecologismo.com/wp-content/uploads/2011/06/Importancia-del-agua1.jpg>

### Caracterización hidrogeológica de las rocas

A partir de la información geológica, presentada en el estudio (Geología), se hizo una caracterización de las formaciones geológicas existentes en la zona de estudio (desde el punto de vista de su capacidad para almacenar y permitir el flujo de agua subterránea), con el fin de identificar la presencia de acuíferos y diferenciarlos de las rocas impermeables.

### Principales acuíferos

Los principales acuíferos presentes en el área de estudios están representados por las siguientes formaciones; formación Cucho (Cc), formación Montebel (Jim), formación La Rusia (Jru), formación Tibasosa (Kit), formación Une (Kv2), formación Conejo (Kscn), formación Plaeners (Kg2), formación Labor y Tierra (Kg1), formación Guaduas (Ktg), Depósitos aluviales (Qa), Depósito fluvio lacustre (Qpl).

### Acuitardos

Las formaciones que almacenan agua pero no permiten flujo de ella en cantidades significativas, identificadas en la cuenca como acuitardos, son las siguientes: formación Conejo (Kscn), Formación Plaeners (Kg2), Formación Guaduas (Ktg).

### Acuífugas

Son rocas que, por no poseer espacios intergranulares, no almacenan ni permiten el flujo de agua; no se identificaron formaciones que en su totalidad puedan clasificarse como acuífugas ya que aunque existen las rocas compactas y bien cementadas, en algunos sectores se hallan fracturadas y pueden constituir acuíferos de porosidad secundaria.

### Infiltración y recarga

Con el fin de caracterizar la infiltración y recarga del acuífero actualmente bajo explotación, se aprovechó la información, relacionada con los siguientes aspectos: Características geológicas y balance hídrico.

### Características geológicas

Las zonas de recarga coinciden con las zonas de afloramiento de los acuíferos identificadas y delimitadas, gran parte de la cuenca está

cubierta por acuíferos de porosidad secundaria por lo cual la infiltración no es homogénea y está limitada por la presencia de niveles arcillosos impermeables (acuitardos.) lo cual impide la infiltración y recarga hacia los acuíferos que se hallan en profundidad. El área de afloramiento del acuífero principal, actualmente bajo explotación (depósitos fluvio lacustres Qpl), no es muy favorable para la infiltración y recarga directa del acuífero, dado que en la mayor parte de la región se encuentra integrada por arcillas que tienen un espesor del orden de 20 m, por lo cual el acuífero subyacente se halla confinado por materiales impermeables. La recarga de este acuífero se debe producir lateralmente a partir del río Chiticuy o de otros cauces superficiales que se hallan en continuidad hidráulica con las gravas y arenas del acuífero principal (Qpl).

### Balance hídrico

La infiltración y recarga para la cuenca del río Chiticuy, en la cual se halla casi en la totalidad de los pozos profundos que poseen concesión, es del orden de  $33,84 \text{ m}^3/\text{año}$ .

### Cuantificación de la recarga actual

El cálculo de la infiltración efectiva obtenido del balance hídrico, permite calcular que el volumen anual de recarga hacia el principal acuífero captado en la actualidad, por los pozos que extraen agua de los depósitos cuaternarios fluvio lacustres (Qpl), en la cuenca del río Chiticuy, es del orden de  $33,8 \times 10^6 \text{ m}^3$  anuales.

### Espesor y profundidad del acuífero

El espesor del acuífero principal varía ampliamente pero se considera que tiene un promedio de 100 m. De este espesor promedio que está integrado por un sello superior impermeable (de arcillas), de 20 m de espesor, gravas y arenas con intercalaciones arcillosas; se puede promediar un espesor neto del acuífero (gravas y arenas), del orden de 50 m.

### Reservas

El cálculo de reservas de agua subterránea para el municipio de Duitama, se hizo teniendo en cuenta el espesor, el área y la porosidad efectiva del acuífero. Los valores obtenidos se resumen a continuación: Volumen de reservas del Cacho =  $R_s = \text{Área} \times \text{espesor} \times \text{porosidad}$

Fuente: [http://www.villarcayo.org/archivos/imagenes/servicio\\_aguas/estudios/Grifo-Agua.jpeg](http://www.villarcayo.org/archivos/imagenes/servicio_aguas/estudios/Grifo-Agua.jpeg)

efectiva. No se tienen valores de porosidad efectiva medidas en campo, en la cuenca. Para el cálculo se toman valores mínimos, dados en la literatura para gravas y arenas (material no consolidado), del orden del 10%, el volumen de reservas del acuífero principal (Qpl) =  $90 \times 10^6 \text{ m}^3$

#### Descarga del acuífero

La principal descarga del acuífero ocurre a través de los pozos profundos que actualmente extraen agua subterránea de la cuenca. La posible salida de agua subterránea a través de las formaciones en profundidad hacia zonas adyacentes, se considera despreciable debido a la estructura geológica de la cuenca, según la cual los acuíferos se profundizan en dirección occidental, por lo cual no tienen zona de afluencia; la descarga actual del acuífero es de  $9,59 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ .

#### Rendimiento seguro de los acuíferos en explotación

A partir de los análisis realizados con base en los balances hídricos (de explotación y de recarga) se puede inferir que el volumen de explotación anual es menor que la recarga, de acuerdo con los valores presentados, es del orden de 33,84

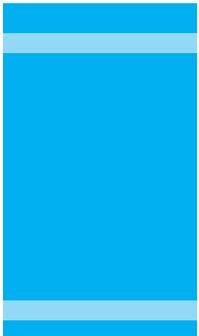
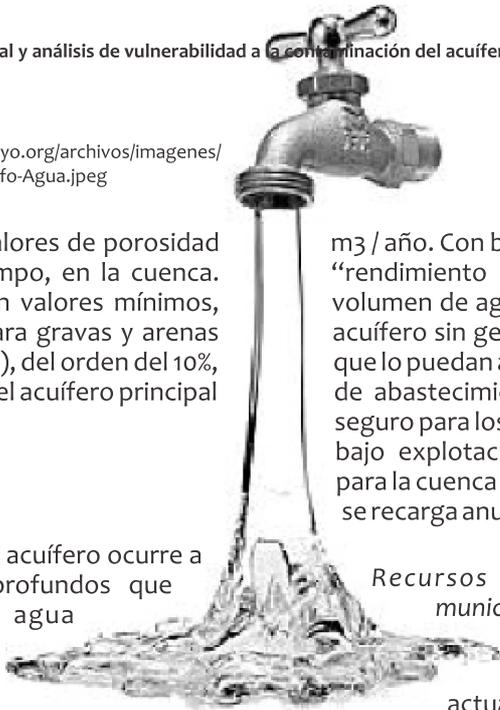
$\text{m}^3/\text{año}$ . Con base en estas cifras se calcula el “rendimiento seguro”, entendido como el volumen de agua que puede ser extraído del acuífero sin generar condiciones indeseables que lo puedan afectar como fuente sostenible de abastecimiento de agua, el rendimiento seguro para los niveles acuíferos actualmente bajo explotación correspondería entonces, para la cuenca del río Chiticuy, al volumen que se recarga anualmente  $33,84 \text{ m}^3/\text{año}$ .

#### Recursos de agua subterránea del municipio de Duitama

El acuífero más importante, actualmente bajo explotación, en la cuenca del río Chiticuy corresponde a los depósitos fluvio lacustres (Qpl.), a mayor profundidad se encuentran las formaciones identificadas como acuíferos de porosidad secundaria, que poseen importantes reservas y las áreas de recarga son más grandes que las del acuífero que se capta en la actualidad. Sin embargo su porosidad efectiva es desconocida, así como sus parámetros hidráulicos (conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento). Los estudios realizados en los acuíferos de porosidad secundaria son muy escasos y por lo tanto, se hace necesario realizar una evaluación hidrogeológica detallada, que permita establecer las posibilidades de los acuíferos de porosidad secundaria, como fuente de agua potable para la ciudad de Duitama.

#### Cálculo del índice de escasez para agua subterránea (les).

Para calcular el índice de escasez para el agua subterránea se aplicó la metodología establecida por el MAVDT, en la Resolución No. 872 del 12 de Mayo del 2006,  $les = \text{Caudal captado} / \text{caudal explotable}$ ,  $les = 0,28$ , que expresado en porcentaje sería el 28 %; de acuerdo con la escala de valoración dada por el IDEAM (1988), para las diferentes categorías del índice de escasez, la presión sobre el recurso de aguas subterráneas es media. Ello indica que es urgente reordenar la demanda y la oferta para prevenir futuras crisis en el suministro de agua potable para la ciudad de Duitama. Ello se puede hacer con una gestión integral del recurso, aplicando estrategias de protección de la oferta o de expansión de la misma, aprovechando otros acuíferos que se hallen en el área.



Fuente: [http://4.bp.blogspot.com/\\_RKVxSTS-uwA/Rt9NBZchboI/AAAAAAAAABO/rIslvhhyFzY/S692/1016101281\\_0898c4db5a%5B1%5D.jpg](http://4.bp.blogspot.com/_RKVxSTS-uwA/Rt9NBZchboI/AAAAAAAAABO/rIslvhhyFzY/S692/1016101281_0898c4db5a%5B1%5D.jpg)

### Plan de monitoreo y seguimiento

El monitoreo y seguimiento del acuífero debe iniciarse de inmediato y debe cumplir con los siguientes parámetros mínimos, niveles estáticos y dinámicos, mínimo una vez al mes, en todos y cada uno de los pozos existentes, caudales de explotación. Debe obtenerse un registro continuo de caudales en todos y cada uno de los pozos; muestreo para análisis físico químico, mínimo una vez al año; muestreo para análisis isotópico; deben tomarse muestras mensuales en todos y cada uno de los pozos y de agua lluvia de la cuenca del río Chiticuy y de cuencas aledañas (río Surba), durante un año; el muestreo debe hacerse con criterio técnico y científico y deben ordenarse análisis de Oxígeno 18 y de Hidrógeno -2.

### Diseño de pozos de monitoreo

Debe haber disponible un mínimo de tres pozos de monitoreo que pueden ser los pozos construidos como pozos de observación (para realizar las pruebas de bombeo mencionadas en el perfil de proyecto). En la figura 8 se muestra el diseño típico de un pozo de monitoreo; en el pozo de monitoreo se deben instalar filtros al

frente de los principales acuíferos captados; debe tener un diámetro mínimo de revestimiento de 4 pulgadas y una profundidad del orden de 200 m; debe tener un sello protector impermeable.

### Identificación, vulnerabilidad a la contaminación del acuífero de Duitama

Colombia posee abundancia del recurso hídrico debido a su situación geográfica que propicia una precipitación promedio de más de 2500 mm/año, como es sabido parte de esa agua se convierte en escorrentía superficial (ríos, quebradas, etc.) y otra parte percola pasando a formar la escorrentía subterránea. En los inicios del desarrollo económico y social se han venido aprovechando los recursos naturales de una forma racional y por otro lado irracional por parte de personas e industrias; actualmente las regiones y en especial en el corredor industrial del cual hace parte Duitama muestran en mayor o menor grado el descuido al que han sido sometidos; tal es el caso de la contaminación de acuíferos por sustancias químicas peligrosas.

### Vulnerabilidad a la contaminación

La sensibilidad en la calidad del agua subterránea a la contaminación se establece por la facilidad con la cual ingresa una carga contaminante impuesta mediante la infiltración a través del suelo y la zona no saturada y la cual se determina por las características intrínsecas del acuífero. Para Foster (1987) "La vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos", debe ser la medida de: El grado de inaccesibilidad de los contaminantes a través de la zona no saturada de un acuífero. El grado de atenuación que poseen los estratos de la zona no saturada (Retención o reacción fisicoquímica). Por lo anterior se deduce que la vulnerabilidad de los acuíferos a ser contaminados está estrechamente relacionada con las características intrínsecas de los suelos y del estrato litológico de la zona no saturada.

### Validación de la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación

La determinación de la vulnerabilidad se basa en el método GOD, la metodología propuesta considera la evaluación de un valor asociado a las propiedades intrínsecas del acuífero y de la zona no saturada.



Fuente: [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4b/Grifo\\_m%C3%A1gico.JPG](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4b/Grifo_m%C3%A1gico.JPG)

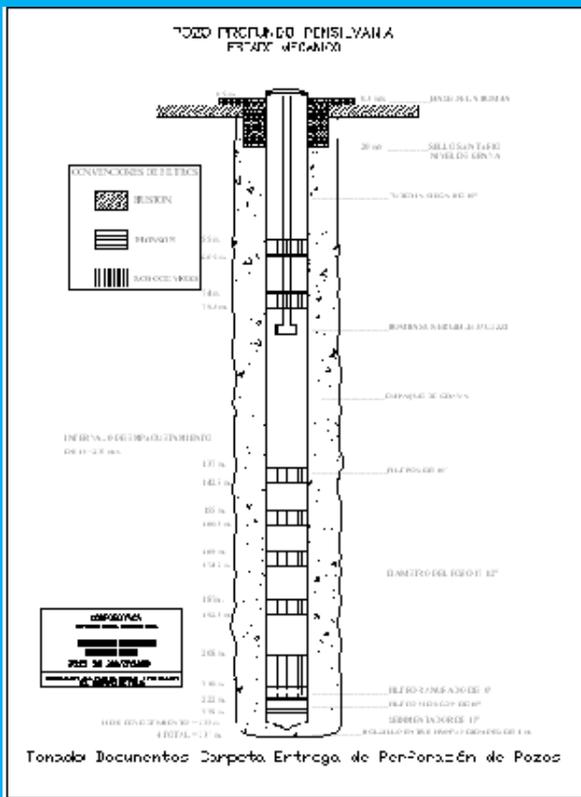


Figura 8. Pozo de monitoreo

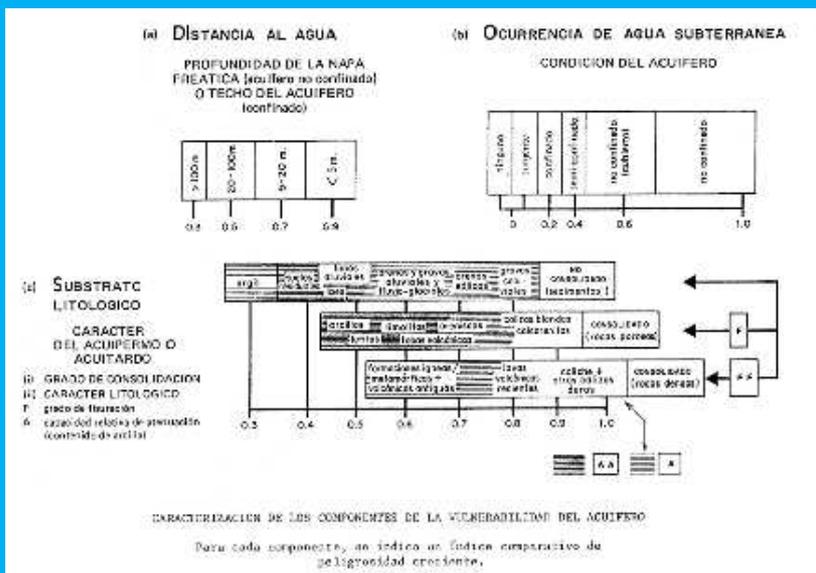


Figura 9. Sistema GOD para la evaluación de la vulnerabilidad del acuífero. Fuente: CEPIS 1991.

Evaluación de las actividades que pueden ser causa potencial de contaminación del acuífero de Duitama.

Actividades Agrícolas

Para evaluar el índice de contaminación al acuífero generado por los cultivos existentes en la zona de influencia se tuvo en cuenta factores como cobertura, topografía, (plano, quebrado o inclinado) lo que condiciona la infiltración de sustancia tóxicas que puedan llegar al acuífero. El manejo de plagas y enfermedades, uso de fertilizantes, se realiza evaluando las características de adsorción y absorción de los productos así como la persistencia de los productos a través del tiempo en el suelo.

Actividad manufacturera

La actividad manufacturera se encuentra localizada en el casco urbano y en la Cooperativa Industrial de Boyacá (Ciudadela Industrial). La actividad es esencialmente de pequeña y mediana empresa. El 49% de las empresas destinan sus productos al mercado regional, el 26% al mercado municipal, el 22.6% al mercado departamental y solo el 2.4% al mercado nacional. Ninguna de las empresas es exportadora.

Celda Provisional (Vereda la Parroquia), para disposición de residuos sólidos.

Para determinar los valores de índice de contaminación para el manejo de los residuos sólidos en Duitama se contemplan cinco (5) factores, a los cuales se les asigna un grado de



Figura 10. Celda para la disposición final de residuos sólidos. Autor

relevancia con respecto a los demás, dando un mayor valor a aquellos que impactan más el proceso mismo de la contaminación; Estos factores interactúan de manera directa con el suelo y por ende determinan en algún grado el nivel de contaminación de las aguas subterráneas. A cada factor se le asigna un grado de relevancia con respecto a los demás, dando mayor importancia a aquellos que representan un índice potencial de contaminación más alto y un menor valor de importancia para aquellos que representan un índice potencial de contaminación más bajo. La Impermeabilización, se relaciona directamente con el grado de infiltración de lixiviados producidos por los residuos Sólidos y pueden impactar el acuífero. La precipitación promedio actual, determina la cantidad de agua lluvia que puede caer en la zona de manejo, aumentando los volúmenes de lixiviados. La existencia o no de canales perimetrales para la recolección de aguas lluvias. El manejo que se haga de los lixiviados en cuanto a la recolección, almacenamiento y tratamiento de los mismos.

Lixiviados Generados en la celda provisional

Se encuentra dentro del diagnóstico realizado a la celda provisional una generación de lixiviados importantes los cuales pueden generar un aporte significativo de contaminación al acuífero por sus altos contenidos de contaminantes especialmente materia orgánica, patógenos, sólidos disueltos y sólidos en suspensión.

Para el caso de la celda provisional para la disposición de residuos sólidos y la generación

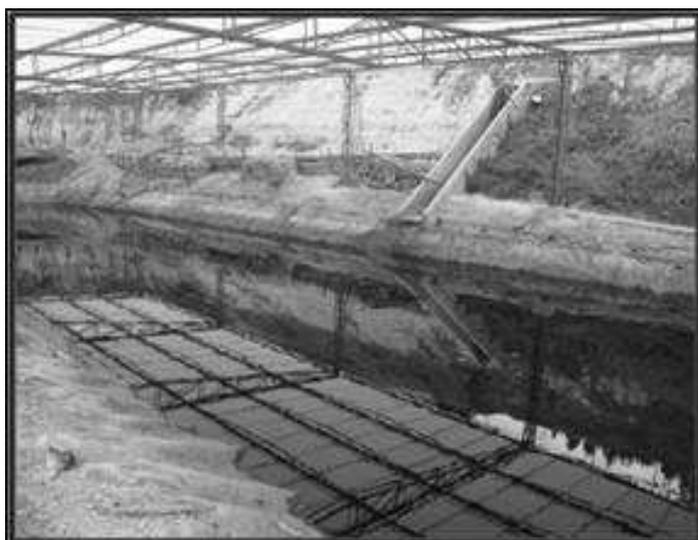


Figura 11. Lixiviados generados en celda para la disposición final de residuos sólidos. Autor

de lixiviados se le asigna un valor de índice de Amenaza Potencial de 0.72 que equivale a extremo.

#### Caracterización talleres mecánicos de carros y motos

Para el área ocupada por Talleres mecánicos y motos se valorarán los riesgos a la contaminación teniendo en cuenta los contaminantes generados en estos procesos como lo son las grasas y aceites y los denominados BTEX, que son compuestos de Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno, de los cuales se ha dicho por diferentes autores pueden ser cancerígenos para el ser humano en concentraciones moderadas y a altos tiempos de exposición.

Figura 12. Talleres mecánicos de carros y motos. - Autor



Para el área ocupada por Talleres mecánicos, lavaderos de carros y motos se le asigna un valor de índice de Amenaza Potencial de 0.85 que equivale a extremo.

#### Identificación de Vertimientos de aguas residuales casco urbano

Las fuentes receptoras en el municipio de Duitama son el canal Vargas, Río Chiticuy y Quebrada la Aroma. En total se cuentan diez (10) puntos de descarga, sin contar las provenientes de casas no conectadas a la red de alcantarillado y vertimientos puntuales que entregan de manera independiente, correspondiendo esto al porcentaje de rezago del servicio de alcantarillado.

El sistema de alcantarillado de Duitama es de tipo combinado, tiene una Cobertura del 93,02%, Los materiales de la red de tubería corresponden a Asbesto-cemento, concreto reforzado, CCP, Gres y PVC, siendo el de mayor uso el Gres. Existe tratamiento en un 40% del total de aguas residuales, por lo cual su índice de amenaza potencial es alto.

## IV. Conclusiones y Recomendaciones

Se espera un progresivo crecimiento de los niveles de almacenamiento de agua superficial, si persisten los efectos de variabilidad climática tipo ENSO en su fase húmeda.

El principal acuífero que se halla bajo explotación en la actualidad corresponde a los niveles de arenas y gravas de los depósitos fluvio lacustres (Qpl) aprovechados por la mayoría de los pozos profundos, que actualmente extraen

Figura 13. Descarga de aguas residuales domésticas. Autor



Descarga Camellon de Narváez

agua subterránea en el municipio de Duitama. Existen otros acuíferos susceptibles de aprovechamiento, en varias de las formaciones que poseen porosidad secundaria, destacándose por su gran extensión y zona de recarga el acuífero de la formación la Rusia.

El balance hídrico lleva a la conclusión de que la recarga es del orden de  $33,8 \times 10^6 \text{ m}^3$  anuales.

El índice de escasez, calculado indica que existe una presión media sobre los recursos de agua subterránea. Por lo tanto es necesario reordenar la demanda y la oferta para prevenir futuras crisis en el suministro de agua potable para la ciudad de Duitama.

La Formación La Rusia constituye un acuífero de importancia hidrogeológica. En la actualidad no se está aprovechando dado que, hasta el momento no se ha considerado como tal. Este acuífero debe ser materia de evaluación, ya que puede constituir una fuente importante de aguas subterráneas para cubrir las futuras necesidades de la ciudad.

El plan de manejo permitió evaluar las principales fuentes que causan una vulnerabilidad alta y extrema a la contaminación de las aguas subterráneas con lo cual la autoridad ambiental cuenta con información para tomar decisiones tendientes a la minimización de estos impactos.

La celda de residuos sólidos ubicada en la vereda la parroquia, generó durante muchos años un grado extremo de vulnerabilidad de contaminación de suelos, aguas superficiales y subterráneas ya que por largo período de tiempo ésta derramó lixiviados a terrenos contiguos sin ningún control.

El plan de abandono y cierre de la celda de residuos sólidos que se está implementando en este momento es muy positivo para el propósito de proteger las aguas subterráneas ya que según la evaluación de vulnerabilidad realizada baja el riesgo de extremo a bajo, con lo cual en los próximos años esta fuente de contaminación no provocará más daños ambientales.



Fuente:  
<http://cchscostarica08.pbworks.com/f/1205343793/Paramo-de-Frontino.jpg>



Fuente:  
<http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=407688>

## Referencias

- Álvarez Pedro, Guevara Pérez E. (2003) Biorremediación y Atenuación Natural de Acuíferos Contaminados por Sustancias Químicas Peligrosas. Concejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad de Carabobo. Venezuela, Páginas 120-173.
- Botero R. (1946). Yacimiento de plomo de coromoro.
- Chow, Ven T., Maidment, David R., y MAYS. (1994). Larry W. Hidrología Aplicada. Editorial McGraw Hill. Santafé de Bogotá (Colombia). 584 p.
- Escobar. (1979). Estudio de amenaza y microzonificación sísmica, vulnerabilidad estructural y evaluación de escenarios de daño.
- Foster and Hirata. (1990). Determinación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas. Revista del centro panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) Organización Mundial de la Salud, Organización Panamericana de la Salud. Lima, Perú.
- Gerard Kiely. (1999). Ingeniería ambiental fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Atlas Climatológico Nacional – Distribución espacio – temporal de las variables del clima.
- Reyes. (1984). Generalidades históricas, localización, extensión y división política, dimensión ambiental; Tomo I.
- Reyes Ítalo. (1982). Características Petrográficas y Geoquímicas de las Rocas.
- Sankarasubramanian y Vogel. (2002). Climate elasticity of stream flow in the United States.
- Thomas, H. A. (1982). Improved Methods for National Water Assessment. Report, Contract WR 15249270, US Water Resources Council, Washington D.C. USA.
- Thomas, H. A., Marin, C. M., Brown, M. J. y Fiering, M. B. (1983). Methodology for Water Resources Assessment. Report NTIS 84-124163, US Geological Survey, National. Springfield, Virginia, USA.
- Trumpy. (1943). Pre-cretaceous of Colombia, Vol 54.
- Vogel, R. M. & Kroll, C.N. ((2002). Regional Geohydrologic-geomorphic relationships for estimation of low-flow statistics. Water Resources Res. 28(9), 1992, 2451–2458.