
MODELO HIDROGEOLÓGICO DE UNA ZONA DE MONTAÑA EN MEDIOS FRACTURADOS. ENVIGADO, ANTIOQUIA (COLOMBIA)

Andrés Botero, Juan Pablo Vélez, María V. Vélez, Humberto Caballero y Juan Fernando Berrío
Escuela de Geociencias y Medio Ambiente - Facultad de Minas
Universidad Nacional de Colombia, Sede de Medellín
Amboter0@unalmed.edu.co, mvvelez@unalmed.edu.co

Recibido para evaluación: 29 de Agosto de 2005 / Aceptación: 26 de Octubre de 2005 / Recibida versión final: 10 de Noviembre de 2005

RESUMEN

Desde un punto de vista geohidrológico los sistemas naturales montañosos son frágiles, dinámicos y complejos, pues la mayoría de ellos se encuentran en rocas fracturadas y entre los problemas actuales que enfrentan los hidrogeólogos, quizás no hay uno tan desafiante como la caracterización de rocas fracturadas (Faybishenko y Benso, 2000). El agua que tiene origen en las zonas montañosas, es en gran parte, la que sirve de abastecimiento en muchos lugares del mundo. En zonas húmedas se considera que el agua generada en las montañas es alrededor del 60% del total del agua en la cuenca (Haupt, 1998).

En este trabajo se plantea un modelo conceptual que permite entender el comportamiento hidrogeológico en la zona de montaña correspondiente al municipio de Envigado (Antioquia – Colombia), a partir del análisis estructural y estadístico del macizo montañoso donde se correlacionaron las principales familias de fracturas presentes en la roca, la red superficial de drenaje, las principales características asociadas a los materiales superficiales presentes en el área de estudio, como son las cenizas volcánicas y los perfiles de meteorización asociados a las diferentes unidades litológicas y el análisis geomorfológico. Con la información obtenida se delimitaron cuatro unidades hidrogeológicas que ayudaron a explicar la manera como se infiltra el agua en los distintos materiales que conforman el altiplano de Santa Elena_ Las Palmas alimentando el flujo subterráneo de las zonas vecinas.

PALABRAS CLAVES: Modelo Conceptual, Infiltración, Fracturas, Cenizas Volcánicas, Unidades Hidrogeológicas

ABSTRACT

In this work a conceptual model is presented that allows to understand the hidrogeological behavior of a mountain area of Envigado municipality (Antioquia Colombia). From structural and statistical analysis of the mountainous bulk it was possible to correlate: the main families of rock fractures, the drainage network, the main characteristics related to the surface materials present in the study area (volcanic ashes for example), the meteorization profiles associated with the different lithological units and the geomorphological analysis. With the obtained information four hidrogeological units were defined that helped to explain the water infiltration in this area

KEY WORDS: Conceptual Model, Fractures, Infiltration, Volcanic Ashes, Hydrogeological Units

1. INTRODUCCIÓN

El municipio de Envigado está ubicado al sureste de Medellín (Antioquia – Colombia), en la vertiente oriental del Valle de Aburrá, ubicada en la parte norte de la cordillera Central Sus coordenadas geográficas aproximadas son 6° 10' 19" Norte y 75° 35' 09" Oeste. Presenta un crecimiento de su parte urbana hacia la zona rural (zona montañosa). El cambio en el uso del suelo asociado al urbanismo ha traído como consecuencia la disminución de los caudales de fuentes hídricas que tienen origen en dicha zona. Se estudió en este trabajo la influencia que podrían tener sobre los rendimientos hídricos la secuencia de factores: geológicos (grado de fracturamiento, espesores de la ceniza volcánica), hidrológicos (dirección de los drenajes, recarga), topográficos (pendientes) y geomorfológicos.

El modelo conceptual que explica la circulación del agua en la zona montañosa se planteó a partir de cinco factores fundamentales, geología, caracterización detallada del comportamiento estructural en las diferentes unidades litológicas que conforman la zona de estudio, descripción de cada una de las unidades geomorfológicas, el estudio hidrológico y la influencia de las cenizas volcánicas.

2. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

La geología de la zona de estudio es muy variada, esta representada por dunitas parcialmente meteorizadas, dunita serpentinizadas (Restrepo y Toussaint, 1979), rocas metamórficas (anfíbolitas, esquistos, migmatitas, serpentinitas y neiss) (Montes, 2003), depósitos recientes y varios niveles de cenizas volcánicas que cubren gran parte de la zona rural del Municipio de Envigado, en capas de espesor variable entre 0.5 m a 2.0 m. También se encuentra mezclada en los flujos localizados en las laderas (Figura 1).

Para el análisis geomorfológico se realizaron divisiones a nivel de unidad geomorfológica y en el altiplano al detalle de geoforma, esto fue necesario para la identificación de zonas con características aptas para la recarga y la acumulación de agua. Para su descripción se tomaron diferentes características tales como: extensión ubicación espacial, longitud de las laderas, forma de las pendientes y litología sobre la cual se desarrollan.

Las principales unidades geomorfológicas son, la zona del altiplano, ambos flancos de la quebrada Ayurá, los depósitos de vertiente y los depósitos del río Medellín. Como se mencionó anteriormente se hizo un especial detalle en la unidad geomorfológica del altiplano, donde se llevo a cabo una subdivisión en geoforma, de acuerdo a su importancia como zona de recarga.

3. MÉTODOS DE ANÁLISIS

La caracterización del flujo subterráneo en rocas fracturadas puede llevarse a cabo usando aproximaciones discretas y utilizando diferentes herramientas que se basan en conocer como ocurre el flujo de forma individual en cada fractura. Es importante para este estudio asumir que la roca se aproxime a un medio poroso de igual escala. A esa escala, el flujo en las fracturas es laminar y de baja velocidad, (Brabbury et al, 1991, en Abbey, 2003). Los diagramas de frecuencia estadística de fracturamiento y y diagramas (polares de rosas) "hidráulicos" constituyen una buena herramienta para analizar el flujo.

Los primeros permiten identificar las principales familias de diaclasas para la zona de estudio y para las diferentes unidades litológicas, mientras que los segundos permiten conocer la conductividad hidráulica relativa de las discontinuidades estructurales. Se hizo además la correlación entre las principales familias de fracturamiento y la red superficial de drenaje, con el fin de comprender la influencia que tienen estas estructuras, sobre la dirección de los diferentes drenajes de la zona.

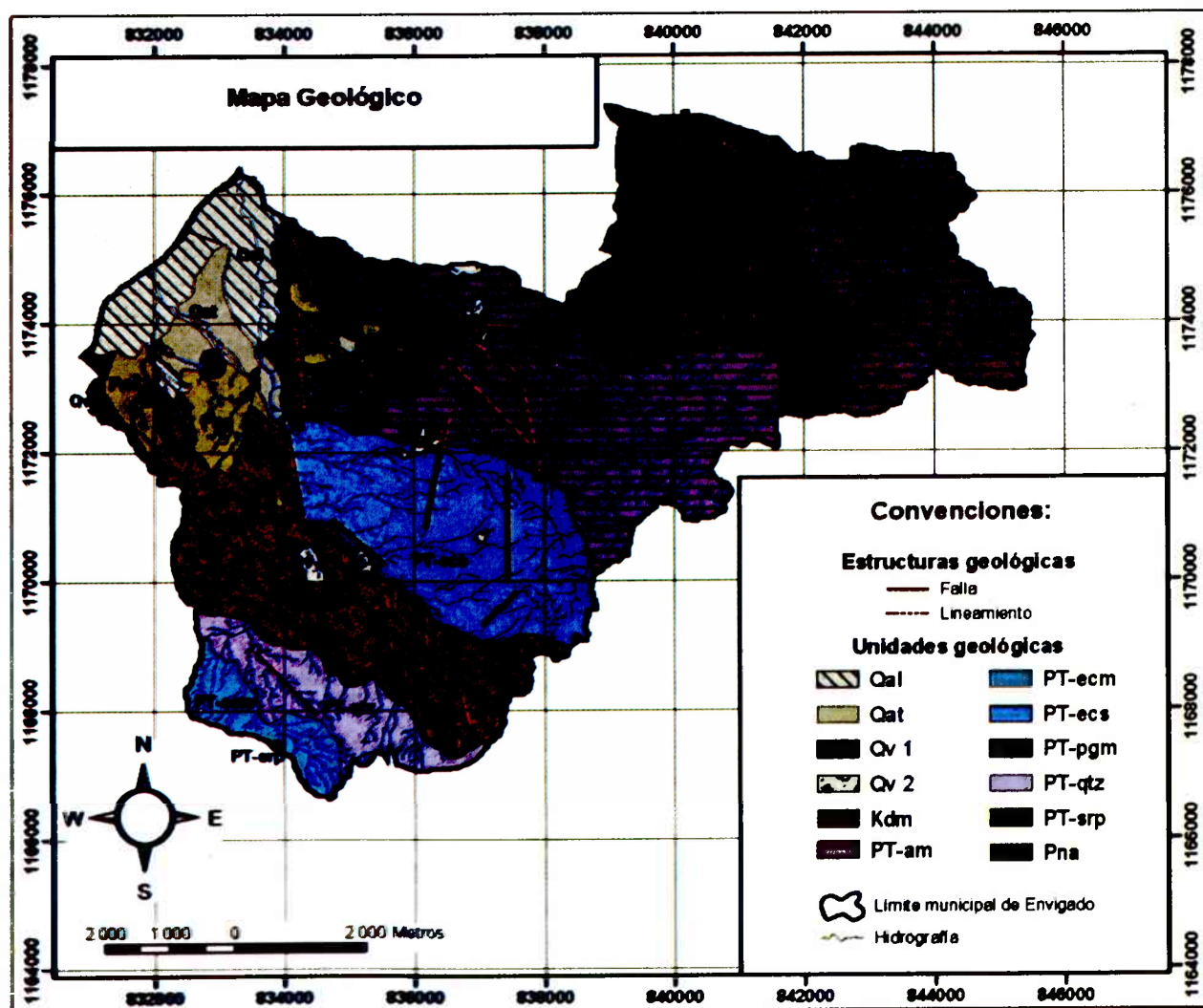


FIGURA 1. Mapa geológico del Municipio de Envigado (modificado de Montes 2003; POT,2000)

3.1. Análisis Estructural de Drenajes

Con los datos estructurales recopilados en campo, diagramas y el análisis de la direcciones preferenciales de los drenajes en la zona, se trató de identificar posibles zonas con comportamientos estructurales particulares dentro del área.

Los drenajes se colorearon según la tendencia mostrada por cada uno de ellos. Esto permitió observar que las direcciones de los drenajes concordaban con las direcciones preferenciales de las diaclasas. Con base en esto se dividió el área de estudio en 4 zonas (Figura 2)

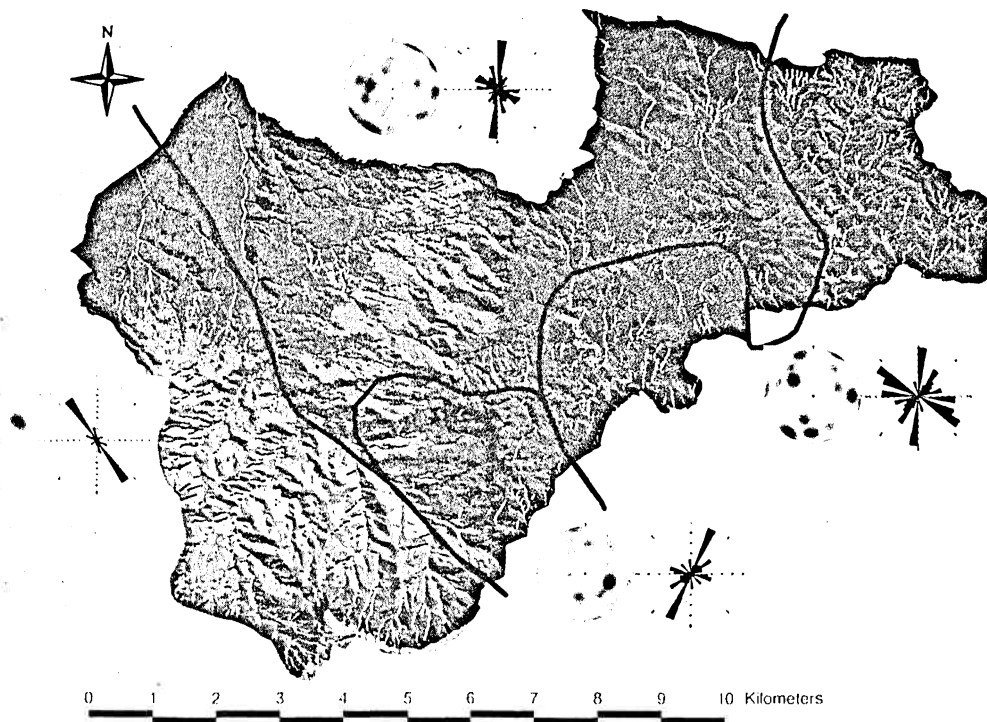


FIGURA 2.

Mapa de zonas estructurales con sus respectivos diagramas polares y de rosetas. Para los datos de la conductividad hidráulica de las diaclasas.

Se encontró que existían marcadas diferencias en los patrones de drenajes y los cambios en los límites de las zonas eran muy bruscos.

Otro aspecto importante de resaltar es el fenómeno que ocurre sobre el cuerpo de dunita en el altiplano (zona estructural # 1). Allí la densidad de drenajes es muy baja, lo cual indica que la infiltración de agua es mayor que en el resto del área de estudio. Esto puede estar indicando una alta circulación de agua a través de la roca, lo cual ha sido reportado por (Herrera, 2003), al indicar que la dunita ha formado un sistema pseudocársico en esta región.

3.2. Análisis hidroestructural por zonas

El área del municipio se divide en las siguientes zonas, Figura 2.

Zona estructural 1: En esta región la conductividad hidráulica tiene dos direcciones predominantes, una con rumbo N-S y NW-SE; ambas tendencias ubicadas en estructuras con alto buzamiento. Por lo tanto el agua subterránea circulará predominantemente en dirección N-S o NW-SE según el gradiente hidráulico regional se lo imponga. De acuerdo a la topografía del terreno, la zona de recarga se ubica sobre el altiplano (al Este) mientras la zona de descarga sería el gran escarpe (al Oeste), por lo que el agua subterránea debe viajar predominantemente en sentido NW-SE, con algunos pequeños desplazamientos locales en sentidos N-S o S-N.

Zona estructural 2: La conductividad hidráulica está distribuida en tres tendencias predominantes con rumbos N-S, NW-SE y NE-SW. La red de fracturas conformada por el conjunto de estas tres familias de diaclasas genera una conductividad hidráulica isotrópica en el terreno, lo cual significa que el sentido del agua estará gobernado principalmente por el gradiente hidráulico regional.

Zona estructural 3: La conductividad hidráulica está fuertemente concentrada en sentido NE-SW. Haciendo un razonamiento semejante al de la zona estructural 1, la región de descarga se ubica en el gran escarpe que se sitúa al Oeste de esta zona, por lo que el agua subterránea debe viajar en sentido NE-SW.

Zona estructural 4: La conductividad hidráulica está fuertemente concentrada en un rumbo NW-SE (paralelo al rumbo de la cara del escarpe) buzando hacia el SW (enterrándose contra el escarpe), de manera que las diaclasas no tienen manera de hacer que el agua desemboque en ningún lugar. Por lo tanto se considera improbable que el agua subterránea pueda recorrer grandes distancias a través de las fracturas en esta zona estructural. Los únicos recorridos posibles serían locales, en cortas distancias hasta encontrar una quebrada cercana, o en el límite Norte del escarpe (al sur del casco urbano), donde existe una pequeña porción de él cuya cara tiene rumbo aproximadamente W-E y estaría interceptando algunas de estas diaclasas, lo cual puede generar afloramientos menores de agua subterránea.

El altiplano centro-oriental del Municipio de Envigado posee en su perfil de suelo, un horizonte superior de cenizas volcánicas suprayaciendo el perfil de meteorización de la roca. Por lo tanto, es generalmente a partir de dicho horizonte de ceniza que se genera la capa superficial de suelo orgánico, con un espesor promedio de 20 cm. Al estar compuestos los primeros metros de suelo por esta capa de cenizas volcánicas, incluido el suelo orgánico, es esta la directamente responsable de la infiltración del agua lluvia. Es pues, en estos primeros metros de suelo donde el agua circula muy lentamente, y donde las zonas geomorfológicamente aptas para la acumulación de aguas, puede contribuir en gran parte a delimitar posibles zonas de recarga. La alta capacidad almacenadora de agua de estos materiales combinada con su baja permeabilidad hacen que el nivel freático se mantenga cercano a la superficie del suelo, lo cual facilita que en pequeñas vaguadas u hondonadas se formen las zonas de acumulación de aguas que llamamos “humedales”.

Además, el horizonte de ceniza volcánica actúa como un agente de control frente a la erosión del suelo, no solo por la gran cantidad de vegetación que es capaz de albergar sino también por sus características mecánicas. Una de las más importantes es su alta capacidad de almacenamiento de agua y su papel como barrera contra la erosión. Sin embargo, una vez el material es movilizado, ambas características disminuyen notablemente, impidiendo una infiltración efectiva del agua y permitiendo una rápida erosión del suelo. El suelo residual y el saprolito cumplen una labor fundamental en la regulación del paso del agua entre las cenizas y las fracturas de la roca, permitiéndole un paso muy lento pero constante, actuando como reservorios de agua, y permitiendo así mantener los niveles base en temporadas de sequía.

3.3. Distribución de las cenizas

Conocida la gran importancia de las cenizas en el ciclo del agua subterránea, fundamentalmente por su capacidad de almacenamiento, se deduce la importancia de conocer como se hallan distribuidas espacialmente a lo largo de la zona del altiplano del Municipio de Envigado teniendo en cuenta las zonas geomorfológicas aptas para su depositación, pendientes, altura relativa que permitieron modelar un patrón general de depositación. (Figura 3).

La mayor acumulación de dicho material se da en zonas de valles amplios y zonas de ladera con pendiente baja.

En el mapa de espesores de cenizas se puede observar, en general, el patrón de depositación que siguen las capas de cenizas, donde se observa la influencia tan marcada que tiene el factor geomorfológico, este patrón se puede ver afectado en el campo debido a las variaciones locales que presenta la zona de estudio.

Las cenizas volcánicas, con una estructura columnar, fueron consideradas como la unidad superficial más importante dentro de la estratigrafía del área de estudio.

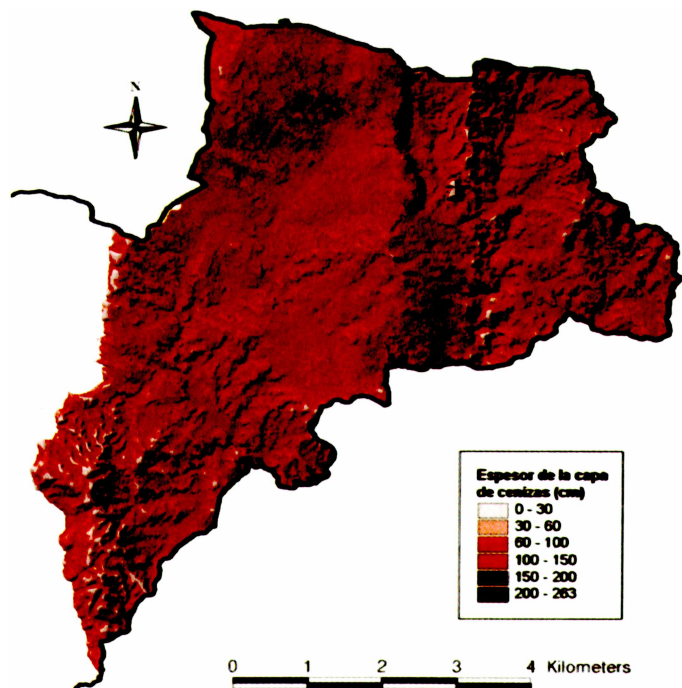


FIGURA 3.
Mapa de espesores de ceniza. Zona del altiplano del municipio de Envigado

A partir de todo el análisis anterior se definieron las siguientes unidades hidrogeológicas, en las que sus características geomorfológicas explican sus condiciones de acumuladores o no del agua subterránea. Figura 4

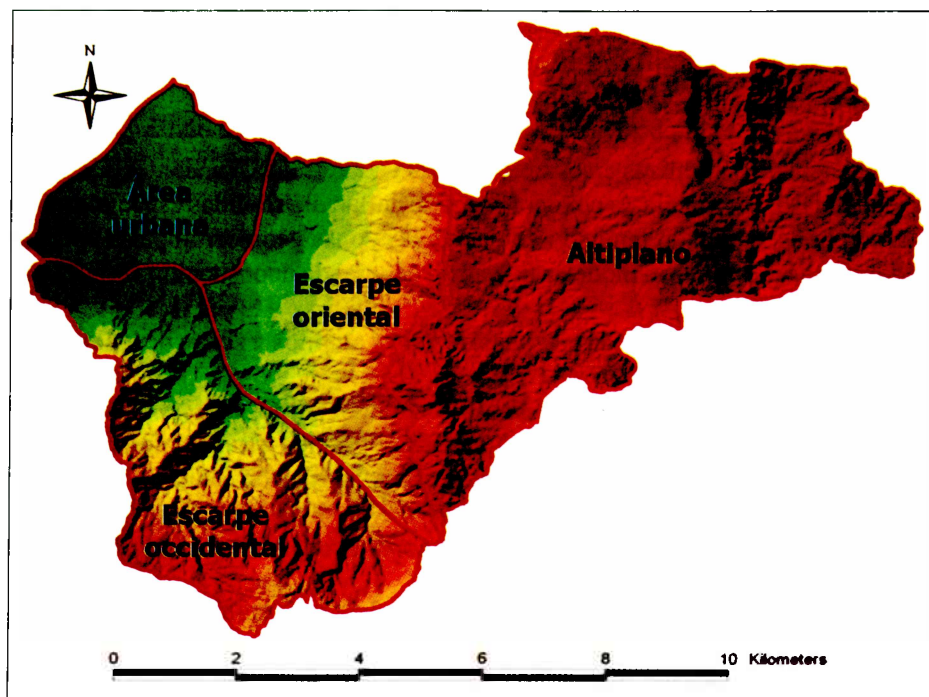


FIGURA 4.
Unidades hidrogeológicas del Municipio de Envigado.

Unidad Hidrogeológica Area Urbana: Esta unidad corresponde al área ocupada por el casco urbano del municipio, que se encuentra ubicado sobre los depósitos aluviales del río Medellín y depósitos aluvio torrenciales de la Quebrada Ayurá. La unidad se encuentra en la cota más baja de la zona de estudio, y junto con el resto del Valle de Aburrá del cual hace parte, es la zona más baja del terreno que lo rodea. Desde el punto de vista de aprovechamiento del agua subterránea esta es una zona importante, ya que por encontrarse en medio de un valle aluvial y tener un aporte de agua constante por parte del terreno que lo rodea y del mismo río, conforma un acuífero que puede ser explotado. El alto desarrollo urbanístico ha impermeabilizado la gran mayoría del terreno y ha disminuido la recarga.

Unidad Hidrogeológica Escarpe Occidental: Esta unidad está conformada por todo el escarpe ubicado sobre la margen izquierda de la quebrada La Ayurá. En esta unidad la geología corresponde a rocas metamórficas que presentan un comportamiento hidráulico muy similar, por lo que para efectos hidrogeológicos la geología se puede considerar homogénea. Además, según el análisis, las características estructurales también pueden considerarse homogéneas dentro del área. La geomorfología del área corresponde en general a colinas con laderas de alta pendiente y topes agudos que favorecen el escurrimiento del agua al contrario de su infiltración. El perfil de suelo no exhibe un desarrollo amplio, y no existen en él horizontes donde se puedan albergar cantidades importantes de agua. Además, las fracturas presentes en la roca presentan una tendencia completamente desfavorable para su circulación, impidiendo la existencia de un acuífero en roca fracturada de importancia considerable y limitándolo a algunas fracturas que pueden transportar agua a cortas distancias, por lo tanto esta unidad no tiene mayor relevancia en cuanto a su hidrogeología.

Unidad Hidrogeológica Oriental: Esta unidad está conformada por todo el escarpe ubicado sobre la margen derecha de la quebrada La Ayurá. La geología corresponde a esquistos al sur y anfíbolitas al norte, cubiertos parcialmente por algunos depósitos coluviales de materiales derivados de estas mismas rocas principalmente, la mayoría de ellos ubicados en la parte baja del escarpe pero también en pequeñas “islas” en medio de éste. Las características estructurales del área están bien relacionadas con la geología, mostrando tendencias diferentes al norte y al sur. Al norte existen dos familias de diaclasas con alta capacidad de transporte de agua subterránea, con disposiciones N 7° E / 41° SE y N 63° W / 84° NE; y al sur existe una tendencia predominante con tendencia N 20° E / 47° NW y otra secundaria con tendencia N 75° W / 42° NE. Este escarpe por su ubicación geográfica se constituye como una cara libre que permite la evacuación de aguas subterráneas infiltradas en cotas superiores, es decir en el altiplano, Además las familias de fracturas permiten que en este escarpe sea evacuada el agua subterránea, aflorando como pequeños hilos de agua transportada por el acuífero fracturado al interior de las rocas del altiplano y el escarpe. Por este motivo, esta unidad está íntimamente relacionada con el altiplano, creando un sistema altiplano-escarpe que actúan como zonas de recarga y descarga de aguas subterráneas respectivamente. De acuerdo con lo dicho, la importancia hidrogeológica del escarpe radica en que es en él donde aflora el agua subterránea hacia las corrientes de agua superficial, y dicha agua mantiene un caudal base en los drenajes, de manera que en caso de que se suspendiera el suministro de agua subterránea, en temporadas de verano los drenajes se secarían privando del suministro de agua a las viviendas del área.

Unidad Hidrogeológica Altiplano: Esta unidad está conformada por el altiplano ubicado al centro-este del área del municipio. Aquí la geología corresponde a una unidad de ortoanfíbolita separada en dos cuerpos a este y oeste, con una unidad de dunita que los separa ubicada en medio de ellos. El área de esta unidad alcanza también a abarcar una pequeña porción de esquistos en su extremo suroeste. Las características estructurales del área están íntimamente relacionadas con la geología, encontrándose diferentes patrones de fracturamiento de acuerdo al tipo de roca: mientras la anfíbolita presenta fracturas en todas las direcciones, la dunita tiene dos direcciones predominantes, N 7° E / 41° SE y N 63° W / 84° NE. Ésta última atraviesa gran parte del escarpe y además de que se comunica con el resto de zonas estructurales, corta la cara libre del escarpe, permitiendo en él la descarga del agua subterránea que se recoge en el altiplano. Conjuntamente con sus características estructurales, el altiplano presenta un importante desarrollo de suelo residual, cuyos perfiles tienen un espesor promedio de 2 m. sobre saprolito con espesores de entre 10 y 20 m en promedio. Pero sumado al buen desarrollo de suelo residual, sobre éste se ha depositado una importante capa de cenizas volcánicas, con espesores promedio de 1 a 2 m., cubriendo toda el área de este altiplano. Esta capa de ceniza es de extrema importancia hidrogeológica, ya que permite la infiltración y acumulación del agua, actuando como una

‘esponja’, y permite luego su liberación lenta a los drenajes del altiplano, así como su paso lento hacia el suelo que la subyace para posteriormente ser liberada hacia las fracturas presentes en la roca. Por su alta capacidad de retención de agua, esta capa de ceniza es capaz de inducir la formación de sistemas de humedales, que aparecen en zonas geomorfológicamente estratégicas para la acumulación de aguas.

Sumado a las características de la roca y el suelo, el altiplano posee importantes características geomorfológicas desde el punto de vista hidrogeológico. La geomorfología prevaleciente en la zona del altiplano tiende a ser de bajas pendientes, con algunas colinas bajas y muy suaves, junto con amplias planicies. Estas geoformas son propicias para impedir que el agua lluvia se escurra en demasía y ayuda a que ésta se infiltre en el terreno. De esta manera el altiplano conforma un importante sistema hidrogeológico que va desde los fenómenos de microescala hasta los de macroescala. En primer lugar, la lluvia cae sobre el terreno, y por las bajas pendientes el agua se escurre muy lentamente y gran parte de ella se infiltra en el terreno. El suelo es, además, un medio propicio para que esto ocurra, ya que su capa superior corresponde a un horizonte de cenizas de muy alta porosidad, además de que en él se han formado grietas que le han dado una estructura columnar, dejando amplios espacios vacíos donde el agua puede alojarse (ver Figura 5).

La conductividad hidráulica de esta capa de cenizas es media-baja, por lo que una vez el agua se halle alojada en este horizonte empezará a desplazarse lentamente por las diferentes vías posibles que encuentre. La conductividad hidráulica del suelo residual que la subyace es mucho menor, por lo que el agua tiene tendencia a viajar más fácil a través de la ceniza. Uno de los caminos a seguir por este agua es el dejarse llevar por la suave pendiente del terreno para ir a aflorar a los pequeños drenajes de la zona o a los humedales, que la mayoría de veces se hallan interconectados unos con los otros ya sea superficial o subterráneamente y muchas veces terminan por formar drenajes. De esta manera las cenizas constituyen un elemento importantísimo en el balance hidrológico de la zona para la conservación de las quebradas y los humedales en el altiplano.

El otro camino que puede tomar el agua es pasar a través de las cenizas e infiltrarse muy lentamente por el suelo residual y el saprolito hasta llegar a las fracturas de la roca. Una vez el agua ha dejado el perfil de meteorización de la roca, que es un medio de muy baja conductividad, encuentra en las fracturas un medio de muy buena conductividad hidráulica y puede viajar grandes distancias a través de ellas. De acuerdo a la revisión del comportamiento hidrogeológico en toda el área del municipio, se concluye que las unidades de mayor importancia hidrogeológica corresponden al sistema conformado por el altiplano y el escarpe, que conforman un acuífero en roca fracturada. Y no son solo importantes desde el punto de vista hidrogeológico, sino también por la gran cantidad de drenajes que allí nacen y surten de agua a la población del área que cursan, de manera que se hace muy importante su conservación.

La Figura 6 muestra un esquema de circulación de las aguas subterráneas del altiplano hacia las unidades vecinas.

4. CONCLUSIONES

En el caso de las rocas cristalinas fracturadas presentes en el área de estudio, la capacidad de almacenar y transmitir agua está ligada a esas estructuras secundarias y no a la propia roca. Sus propiedades hidráulicas, dimensiones, límites, son aleatorios y los parámetros hidráulicos, se caracterizan por una notable variabilidad debido a la discontinuidad del medio. La conductividad hidráulica por ejemplo, puede presentar diferencias de varios órdenes de magnitud entre puntos situados a distancias relativamente pequeñas. La zona del Altiplano, es una de las unidades geomorfológicas de gran interés, las unidades geomorfológicas tales como bateas y zonas de pendientes bajas, son muy aptas para la acumulación de aguas.

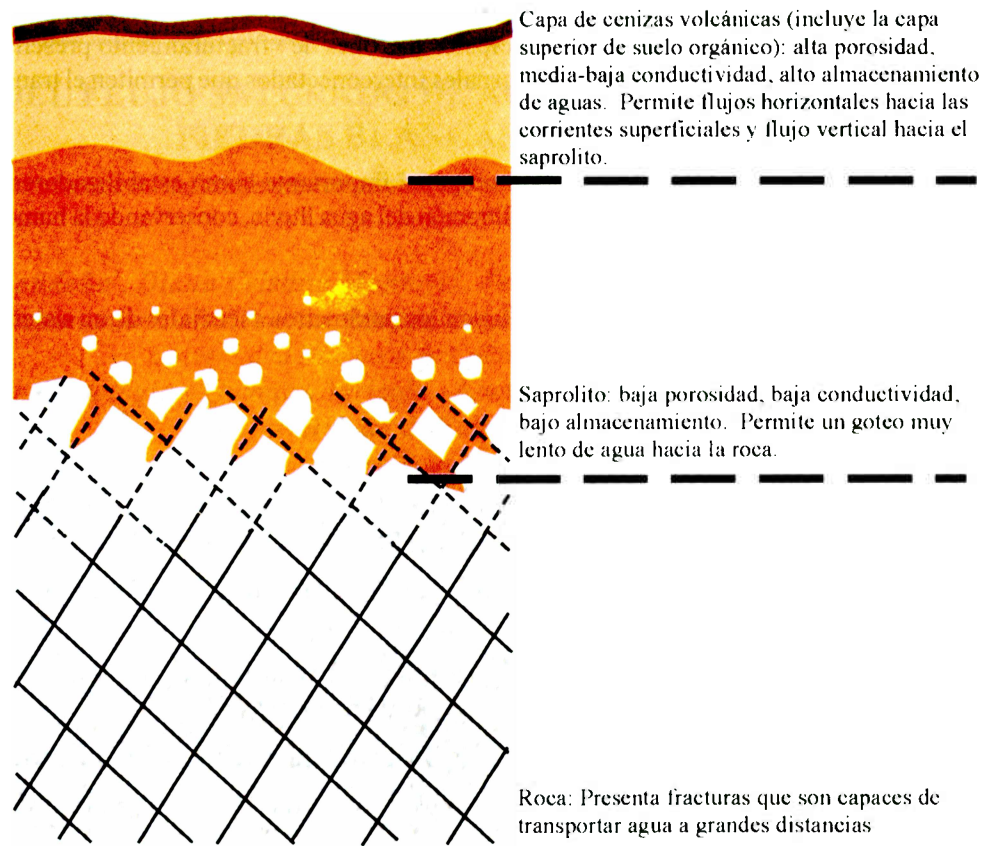


FIGURA 5.
Ilustración de la infiltración del agua a través del perfil de suelo.

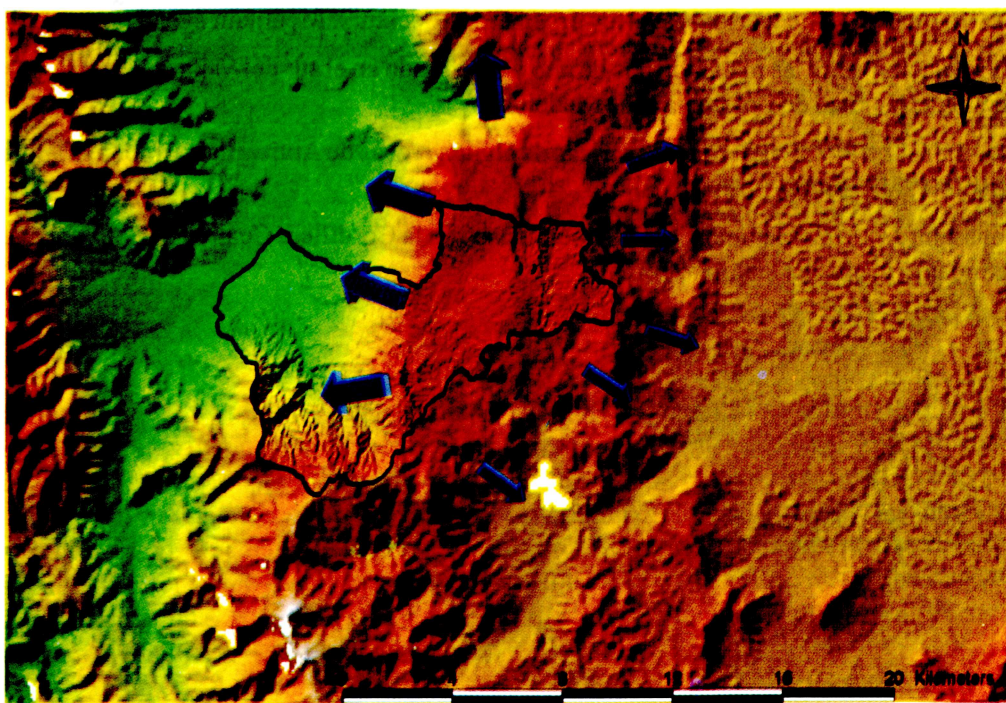


FIGURA 6.
Circulación del agua subterránea desde el Altiplano

El análisis estructural arrojó como resultado, los principales patrones de fracturamiento presentes en las diferentes unidades geológicas, que actúan como unos pequeños canales interconectados que permiten el transporte de agua hacia los niveles más profundos.

Los suelos derivados de cenizas volcánicas, cumplen un papel importante como estabilizadores de las condiciones naturales del Municipio de Envigado, permitiendo la infiltración del agua lluvia, conservando la humedad y la vegetación, además de evitar la erosión superficial.

La relación de las cenizas, el saprolito y la roca, constituyen los parámetros esenciales de un sistema de recarga que se da en el altiplano del municipio de Envigado

5. BIBLIOGRAFÍA

- Abbey, D. G., 2003. Fracture Zones, Aquifer Testing, And Scale Effects: Considerations In Fractured Bedrock Aquifers Of Southwester British Columbia. Simon Fraser University, Burnaby, Canada.
- Echeverría, L., 1973. Zonificación de las rocas metamórficas del Valle de Aburrá y sus alrededores. Geología de campo II, proyecto de grado I, Tesis Universidad Nacional, Medellín.
- Faybishenko, B y Benson, S.M., 2000. Preface ix in faybishenko, B; Witherspoon, p.A; Benson, S.M. Dynamics of Fluids in Fractured Rock. Geophys Monogr 122, Am Geophys Union, Washinton, D.C.
- Gutiérrez, A. y Moreno, M., 1992. Estudio Hidrológico de la Quebrada La Ayurá. Tesis Universidad Nacional, Medellín
- Herrera, J. 2003. Carso de alta montaña en Santa Elena: implicaciones hidrológicas e hidrogeológicas en el valle de aburra. Tesis Universidad Nacional, Medellín.
- Hermelin, M., 1980. Cenizas volcánicas cuaternarias en el oriente Antioqueño. Guía excursión Río Negro-Santa Fe de Antioquia. Primer seminario sobre el cuaternario de Colombia, Bogota; pp.15-16.
- Haupt, P., 1998. Mountains of the world: Water towers of the 21st century. Mountain agenda. Switzerland.
- Montes, L. 2003. Relación entre las metamorfitas de alto y bajo grado en el sur del Valle de Aburrá, Antioquia. Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.
- Restrepo J. y Toussaint J., 1978. Edades radiométricas de algunas rocas de Antioquia – Colombia. Boletín de Ciencias de la Tierra. No.5-6, (1978); pp. 1-18. Medellín.
- Restrepo J. y Toussaint J., 1982. Metamorfismos superpuestos en la Cordillera Central de Colombia. Actas del Quinto Congreso Latinoamericano de Geología. Tomo 3.

