

**CONVENIO DE COOPERACION  
EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA  
CORNARE UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
44599**

**INVESTIGACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS  
REGIÓN VALLES DE SAN NICOLÁS.**

**FASE II**



**Fabián Hoyos Patiño, I.G. MSc**  
Director del Proyecto  
**María Victoria Vélez, I.C. DEA**  
**Juan Camilo Múnera, I.C.**  
**Daniel Eduardo Arias, E.I.C.**

**FACULTAD DE MINAS**  
**Medellín noviembre, 2000**

**CONVENIO DE COOPERACION  
EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA  
CORNARE UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
44599**

**INVESTIGACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS  
REGIÓN VALLES DE SAN NICOLÁS.  
FASE II**

**INFORME FINAL**

**INTRODUCCIÓN**

CORNARE ha encomendado a la Universidad Nacional de Colombia, Sede de Medellín la investigación de las aguas subterráneas en la región de los Valles de San Nicolás y de La Unión. En una primera etapa se hizo una evaluación general de la oferta y demanda hídricas y se caracterizó el sistema hidrogeológico regional en los municipios de El Retiro, La Ceja, Rionegro, El Carmen de Viboral, Guarne y Marinilla con base en la cartografía geológica, el inventario de manantiales, aljibes y pozos, y la información hidrológica disponible. En esta fase fueron identificadas y delimitadas tres unidades hidrogeológicas que fueron calificadas con potencial hidrogeológico alto, medio y bajo. En la categoría I fueron incluidas las vegas y terrazas aluviales; en la categoría II se incluyeron las colinas saprolíticas del Altiplano de Rionegro y los depósitos de ladera en la parte inferior de los escarpes rocosos, y en la categoría III se encuentran los escarpes rocosos que limitan las dos unidades geomorfológicas principales en esta zona.

La segunda fase del proyecto tiene por objeto la localización, cuantificación y caracterización de las fuentes de aguas subterráneas y de las áreas de recarga mediante métodos de prospección geoelectrica con base en las cuales se definirá una propuesta de reglamentación de su uso, aprovechamiento y conservación en los municipios de Guarne, San Vicente, Rionegro, El Carmen de Viboral, Marinilla, La Ceja, El Retiro, y La Unión.

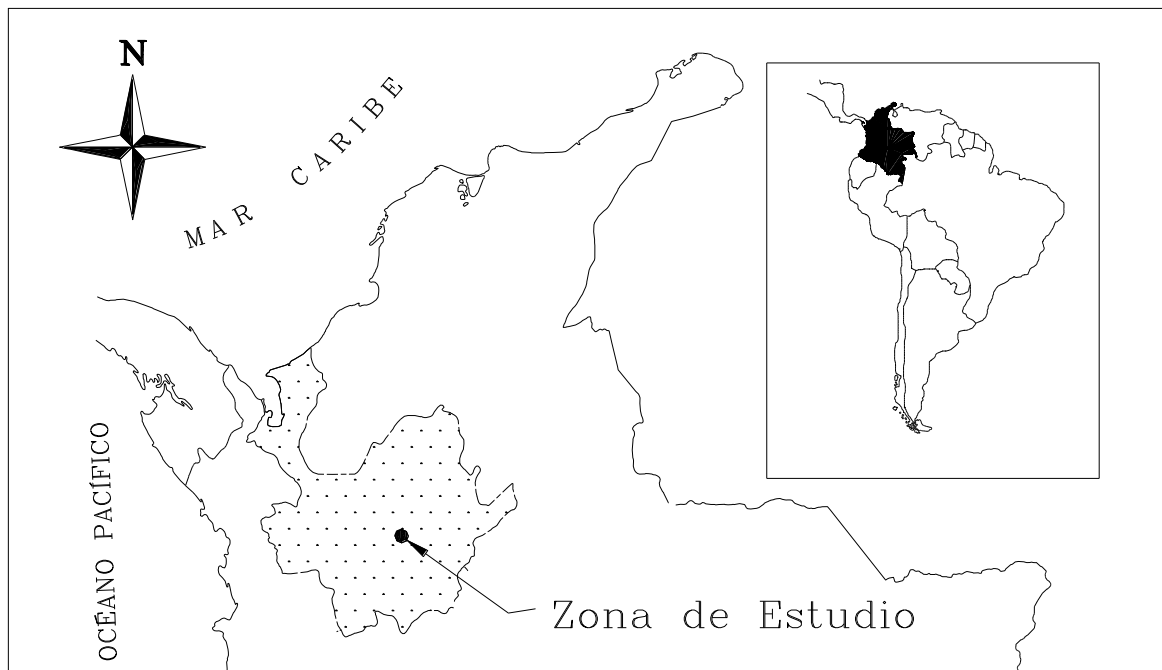
El carácter regional del trabajo ha condicionado la definición de los alcances y de la metodología de esta investigación. La exploración geoelectrica y el modelamiento hidrogeológico han sido hechos con miras a definir un cuadro general de la ocurrencia y circulación del agua subterránea en una extensión cercana a los 1000 km<sup>2</sup>, y no pretenden en modo alguno definir condiciones particulares de sitios específicos. La interpretación que se presenta es eso: una interpretación de la información disponible que debe entenderse en la escala regional del estudio y que no puede remplazar los estudios detallados que deben hacerse para los proyectos específicos. En estos casos la utilidad de este estudio radica en los elementos de orientación que brinda para adelantar la planeación de los trabajos de exploración y no compromete más allá a CORNARE, a la Universidad Nacional de Colombia y a los profesionales que contribuyeron en este trabajo.

## METODOLOGÍA

El área investigada comprende los valles de San Nicolás y de La Unión, en las áreas definidas como de potencial hidrogeológico alto y medio en la primera fase de este proyecto (Universidad Nacional, 1997). En este trabajo se ha definido la cota 2200 como límite del área de los sondeos eléctricos verticales en el Altiplano de Rionegro, en una extensión aproximada de 425 km<sup>2</sup>, y la cota 2500 como límite del área de los sondeos eléctricos verticales en el Altiplano de La Unión, en una extensión aproximada de 75 km<sup>2</sup>. Las zonas aledañas en el sector de Las Palmas – Santa Elena – Piedras Blancas, y el escarpe entre los valles de San Nicolás y La Unión, fueron investigadas en función de los objetivos y alcances del proyecto sin pretender definir allí los acuíferos con el mismo rigor que se hizo en la zona seleccionada como área de interés en el contrato. En la Figura 1 se encuentra un mapa generalizado del área en estudio en el que se destaca la extensión del los Altiplano de Rionegro y del Valle de La Unión.

La metodología de trabajo comprendió la revisión sistemática de la literatura geológica, hidrológica e hidrogeológica disponible sobre la región, el reconocimiento geomorfológico y el sondeo geoelectrico en las zonas calificadas como de potencial hidrogeológico alto y medio en el informe de la Universidad Nacional (1997). La información básica utilizada comprende 276 sondeos eléctricos verticales con configuración Schlumberger, 19 registros de pozos, la localización de 155 afloramientos rocosos y 390 puntos de agua. En la Figura 2 se encuentra la ubicación de la información básica utilizada en esta investigación que incluye los sondeos eléctricos verticales, las perforaciones cuyos registros han sido utilizados en este estudio, los afloramientos rocosos y los sitios donde

pudo ser determinado el nivel del agua subterránea. La información generada en los sondeos eléctricos verticales fue modelada e interpretada con ayuda del Software WINSEV5. Toda la información utilizada fue georeferenciada y almacenada en archivos magnéticos. En el Anexo I se ha compilado la totalidad de la información geoelectrica disponible en los sondeos eléctricos verticales, y en los registros de pozos con su respectiva interpretación hidrogeológica, clasificada en términos de las unidades geomorfológicas en las que se ejecutó cada sondeo. Los archivos digitales de la información geoelectrica se han registrado tanto en papel, en el Anexo II, como en una base de datos digital que acompaña este informe. En el Anexo III se encuentra la información georeferenciada sobre los manantiales y aljibes que, combinada con la información de los sondeos eléctricos verticales, sirvió de base para la preparación del mapa de isopiezas.



**Figura 1.** Localización del área investigada.

## **FIGURA 2**

El carácter regional de la investigación fue definido en los términos de referencia entregados a la Universidad Nacional en el mes de enero de 1999, con base en los cuales propusimos como criterio de densidad de sondeos eléctricos verticales, para ser utilizada en el estudio, 1 sondeo por kilómetro cuadrado en las vegas y terrazas aluviales, y 1 sondeo por cada cuatro kilómetros cuadrados en las colinas saprolíticas del altiplano y del Valle de La Unión, cuyos resultados pueden ser representados adecuadamente a escala 1:50 000 a 1:100 000.

Los sondeos por fuera de la zona de vegas aluviales, terrazas y colinas, por encima de la cota 2200 en el Altiplano de Rionegro y por encima de 2500 en el Valle de La Unión, no fueron considerados en los términos de referencia de CORNARE ni en la propuesta de la Universidad Nacional. Su distribución y ejecución estuvieron orientadas a complementar y acotar la información geoelectrica obtenida en el área de mayor interés para esta investigación. Adicionalmente, como complemento de los sondeos geoelectricos fueron localizados y georeferenciados cerca de 150 afloramientos rocosos que permitieron acotar de manera más precisa el mapa del basamento rocoso y, con él, el mapa de isopacas del regolito. Estos afloramientos rocosos son más comunes en el escarpe que separa el Altiplano de Rionegro del Valle de La Unión, en el planalto de Las Palmas - Santa Elena - Piedras Blancas y en las cuchillas que separan los valles de El Retiro y La Ceja. En la parte baja del altiplano, al nivel de las vegas aluviales del Río Negro y de la Quebrada La Mosca se encuentran también algunos afloramientos rocosos aislados que fueron localizados e introducidos en la cartografía del basamento.

Los sondeos eléctricos verticales fueron confrontados con los registros de perforación de los pozos a que tuvimos acceso y con la mejor información geológica disponible y la revisión sistemática de la geomorfología y de los afloramientos en los taludes de las carreteras y en los cauces de las corrientes de agua. En ocasiones la interpretación adoptada de los sondeos eléctricos verticales difirió sustancialmente de la propuesta en los registros de pozos; en estos casos nos orientamos por el conjunto de la información generada en este y en otros estudios para ofrecer la que, en nuestra opinión, es la interpretación más plausible. La información recopilada y la generada en desarrollo de este proyecto ha sido evaluada en su conjunto para preparar un modelo hidrogeológico regional que sirva de fundamento a la propuesta de reglamentación de CORNARE.

La regionalización de la información recopilada o generada en esta investigación ha permitido elaborar un conjunto de mapas temáticos, que sirvieron de base a

las generalizaciones que presentamos como modelo hidrogeológico regional de los valles de San Nicolás y de la Unión, que enumeramos a continuación:

- Fisiografía y red de drenaje del área objeto del estudio
- Topografía del basamento geoelectrico que, para efectos de este estudio, se asimila al basamento rocoso.
- Geología regional
- Superficie freática.
- Isopacas del regolito.
- Isopacas del manto de ceniza volcánica.
- Resistividad en superficie.
- Resistividad real en las cotas 2050, 2100, 2450.
- Isopacas de acuíferos libres en aluviones y terrazas bajas.
- Acuíferos confinados de agua dulce y acuíferos confinados salobres en las cotas 1900, 2000, 2300.
- Zonificación en términos de potencial hidrogeológico

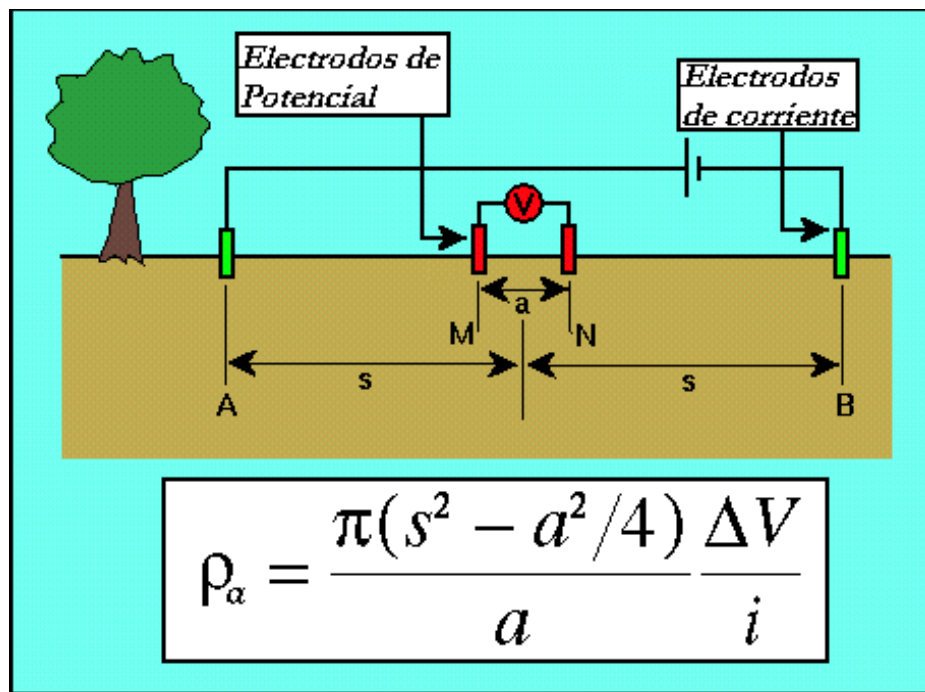
Dado que los sondeos geoelectricos constituyen una parte importante de la información que sirve de base a este estudio, conviene hacer algunas consideraciones sobre el potencial y las limitaciones de los métodos geofísicos en general y de los sondeos eléctricos verticales en particular.

Los métodos geofísicos se basan en mediciones de propiedades de los materiales de la corteza terrestre cuya interpretación permite preparar modelos de las características del subsuelo, que se encuentra por fuera de la observación directa, y de la distribución espacial de ellas. En el caso de los sondeos geoelectricos es necesario recurrir a dos niveles de interpretación: el modelamiento matemático que presenta combinaciones de resistividad real y de espesor de estratos o capas con un contraste de resistividad significativo, y la interpretación de los modelos en términos geológicos e hidrogeológicos.

De las posibles configuraciones de electrodos en los sondeos geoelectricos escogimos la configuración Schlumberguer, ilustrada esquemáticamente en la Figura 3, que, en general, da resultados más confiables, sobre todo en sondeos profundos debido a que los electrodos de potencial permanecen fijos y los cambios laterales de resistividad en la superficie permanecen iguales en toda la curva.

En los sondeos eléctricos verticales, la medición directa de la diferencia de potencial entre dos electrodos, llamados electrodos de potencial, permite calcular la resistividad media aparente del terreno hasta una cierta profundidad que es función de la distribución en superficie de los electrodos de corriente; con base en esta información básica se preparan los modelos matemáticos mencionados en el párrafo anterior. En la interpretación geológica e hidrogeológica se combina estos modelos con la información geológica para producir un modelo hidrogeológico del sondeo eléctrico vertical. En este punto debe destacarse que ni los modelos geoelectricos ni su interpretación hidrogeológica son unívocos y que ellos dependen en gran medida del criterio del profesional a cargo del estudio y de su conocimiento de la geología del área investigada.

En los modelos geoelectricos deben ser considerados los llamados principios de equivalencia y de supresión. Según el principio de equivalencia dos estratos cuyos productos de resistividad y espesor sean iguales no pueden ser diferenciados en una curva de resistividad aparente. Según el principio de supresión un estrato relativamente delgado, cuya resistividad sea intermedia entre los estratos que lo limitan, puede desaparecer en el modelo geoelectrico dando lugar a un aumento de los estratos adyacentes.



**Figura 3.** Esquema de la configuración Schlumberguer para un sondeo eléctrico vertical.



En la interpretación hidrogeológica debe a su vez considerarse que el valor de la resistividad real puede variar en un intervalo muy amplio para el mismo material dependiendo de sus características particulares y de sus condiciones de saturación. Finalmente, el modelo hidrogeológico regional resulta de la combinación de los modelos físicos con la información geológica e hidrológica existente.

Los valores de resistividad real utilizados en la interpretación de los sondeos eléctricos verticales fueron definidos a partir de un conjunto de sondeos someros de verificación ejecutados en condiciones controladas sobre materiales y combinaciones de materiales característicos de los que se encuentran en la zona de estudio. El basamento fue definido en términos de resistividad con un valor de 1500  $\Omega\text{m}$ , para la roca fracturada y saturada, y mayor o igual de 10000  $\Omega\text{m}$  como valor típico de la roca sana. Es preciso anotar que los modelos geoeléctricos no son muy sensibles a las variaciones de los valores de resistividad en el basamento y las curvas de resistividad aparente varían muy poco cuando en el modelo se utilizan valores de resistividad real dentro de intervalos muy amplios. En la preparación de los modelos y en su interpretación juega un papel más importante el gradiente resistividad aparente/profundidad que permite definir los niveles en los que se presentan contrastes de resistividad que pueden ser correlacionados con cambios litológicos y geohidrológicos.

Para la interpretación de los modelos geoeléctricos en términos de la litología y de la ocurrencia y características del agua subterránea se combinó la información geológica convencional, los registros de perforación de pozos, los resultados de la fase I de este proyecto, la toponimia cartográfica e información oral de residentes en la zona sobre la ocurrencia de fuentes saladas con los resultados de la exploración geoeléctrica. Los valores característicos de resistividad de los diferentes materiales y condiciones de los depósitos que se encuentran por encima del basamento se consignan en la tabla 1.

En la utilización de los criterios de resistividad definidos en esta tabla debe tenerse en cuenta que la ocurrencia de arcillas en este medio es poco probable dado el ambiente de meteorización tropical y en particular los ambientes de sedimentación en los que la velocidad del agua hace prácticamente imposible la sedimentación de partículas de tamaño arcilla; los conocidos depósitos de caolín presentan una señal correspondiente a limos más acorde con su textura y mineralogía. Con base en estas consideraciones las señales de resistividad con valores inferiores a 10  $\Omega\text{m}$  frecuentemente fueron interpretadas como indicadoras de acuíferos salobres. La resistividad de las cenizas volcánicas presenta variaciones en un amplio intervalo de valores según sea el grado de

saturación de éstas. Para efectos de este informe calificaremos como secas las cenizas volcánicas cuyo contenido de humedad es aproximadamente igual a la humedad higroscópica o punto de marchitez; las cenizas volcánicas húmedas corresponden a aquellas cuyo grado de saturación estimado se encuentra entre 30% y 80%, y las saturadas corresponden a aquellas cuya posición en el terreno y su contenido de humedad permiten estimar un grado de saturación superior a 80%. Esta clasificación ha sido propuesta a partir de los ensayos de calibración previos a la ejecución de los SEV y de su interpretación. Las señales de resistividad con valores entre 20 - 80  $\Omega\text{m}$  que pueden ser interpretadas como limos saturados pueden corresponder a limos aluviales o saprolíticos y, con frecuencia, su diferenciación es problemática en la parte inferior de los depósitos aluviales. Consideramos como un criterio adecuado considerar que en las vegas aluviales el material que se encuentra por encima del basamento geoelectrico corresponde normalmente al saprolito más bien que al depósito aluvial.

**Tabla 1.** Valores típicos de resistividad

|                                                        |                            |
|--------------------------------------------------------|----------------------------|
| Basamento. Roca sana con diaclasas espaciadas          | >10000 $\Omega\text{m}$    |
| Basamento. Roca fracturada                             | 1500-5000 $\Omega\text{m}$ |
| Basamento. Roca fracturada saturada con agua corriente | 100-2000 $\Omega\text{m}$  |
| Basamento. Roca fracturada saturada con agua salada    | 50-100 $\Omega\text{m}$    |
| Gruss parcialmente saturado                            | 500-1000 $\Omega\text{m}$  |
| Gruss saturado                                         | 40-60 $\Omega\text{m}$     |
| Saprolito parcialmente saturado                        | 200-500 $\Omega\text{m}$   |
| Saprolito saturado                                     | 40-100 $\Omega\text{m}$    |
| Gravas parcialmente saturadas                          | 500-2000 $\Omega\text{m}$  |
| Gravas saturadas                                       | 300-500 $\Omega\text{m}$   |
| Arenas parcialmente saturadas                          | 400-700 $\Omega\text{m}$   |
| Arenas saturadas                                       | 100-200 $\Omega\text{m}$   |
| Limos parcialmente saturados                           | 100-200 $\Omega\text{m}$   |
| Limos saturados                                        | 20-100 $\Omega\text{m}$    |
| Limos saturados con agua salada                        | 5-15 $\Omega\text{m}$      |
| Arcillas parcialmente saturadas                        | 20-40 $\Omega\text{m}$     |
| Arcillas saturadas                                     | 5-20 $\Omega\text{m}$      |
| Arcillas saturadas con agua salada                     | 1-10 $\Omega\text{m}$      |
| Ceniza volcánica seca                                  | 1000-2000 $\Omega\text{m}$ |
| Ceniza volcánica húmeda                                | 300-1000 $\Omega\text{m}$  |
| Ceniza volcánica saturada                              | 100-300 $\Omega\text{m}$   |

## GEOLOGÍA REGIONAL

La información geológica e hidrogeológica relevante examinada comprende las siguientes referencias: Botero (1963); Carrillo (1973), Durango (1975), Feininger & Botero (1982), González (1978), Hermelin (1978, 1980, 1992), Hoyos et al (1984), Hoyos & Arnason (1998a), Hoyos et al (1998b), López (1973), Page (1980), Page & James (1981), Universidad Nacional (1997), Villegas (1981).

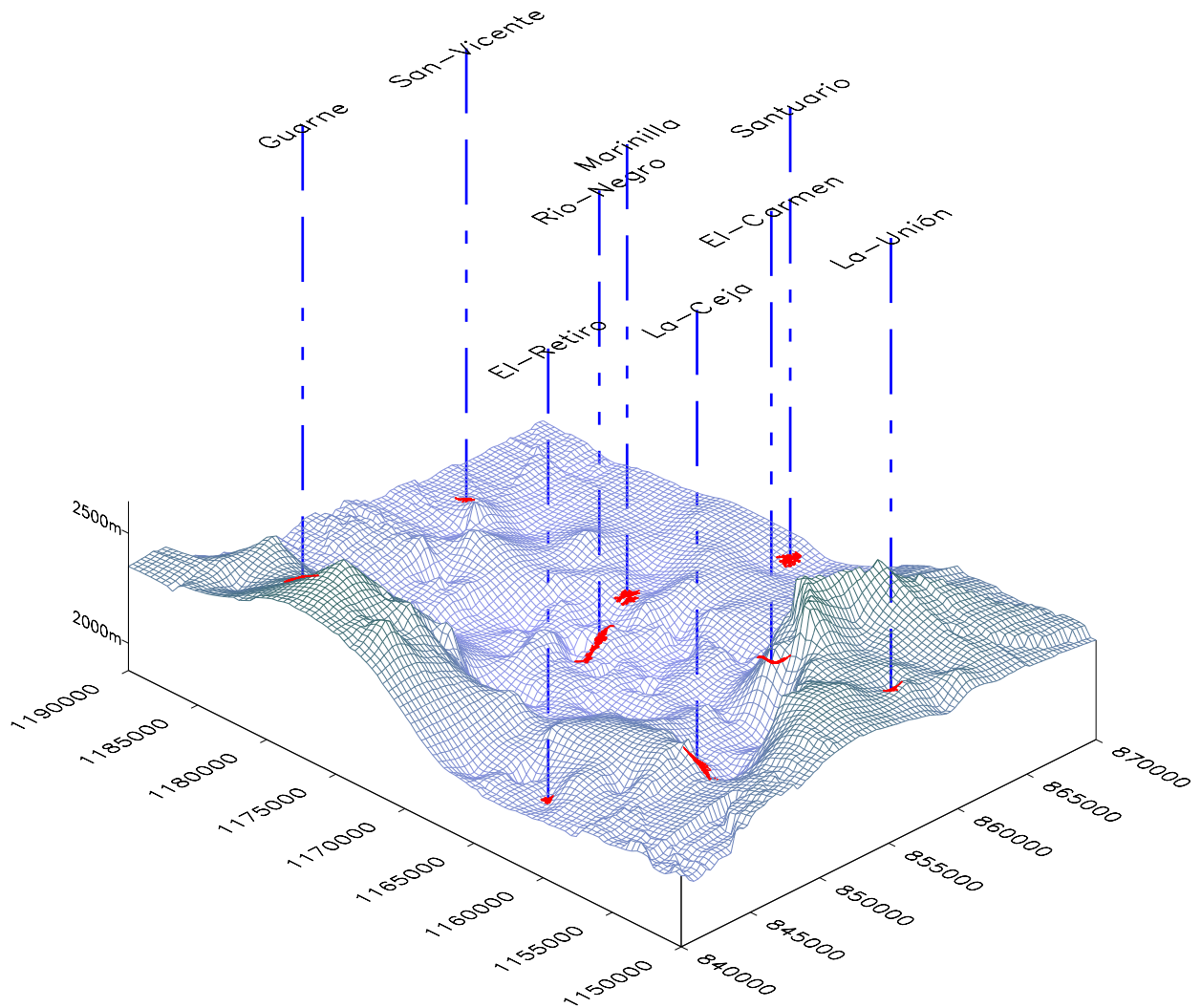
No existen discrepancias fundamentales en los aportes de los autores citados en cuanto a la geología y geomorfología de la zona. El basamento rocoso está formado por rocas cristalinas fracturadas: granitoides del Batolito Antioqueño, serpentinitas, metasedimentos y anfibolitas del Grupo Ayurá – Montebello, de acuerdo con la terminología propuesta por Botero (1963), a partir de las cuales se ha desarrollado un grueso regolito, cuyo espesor medio es 80 m y en algunos sitios supera los 200 m. En la Figura 4 se encuentra la información geológica general compilada de Botero (1963) e Ingeominas (1989), y modificada para introducir los resultados de este estudio, particularmente en lo que se refiere a las formaciones cuaternarias.

La meteorización de las rocas del Batolito Antioqueño ha dado lugar a un perfil de meteorización descrito por Carrillo (1973), Hoyos et al (1984) y Villegas (1981). En el perfil de meteorización típico se distinguen tres niveles u horizontes: un suelo residual maduro de limos de baja permeabilidad que normalmente tiene varios metros de espesor; una zona saprolítica de espesor variable que puede alcanzar varias decenas de metros de limos arenosos y arenas limosas oxidadas con permeabilidad del orden de  $10^{-5}$  a  $10^{-6}$  ms<sup>-1</sup>, y una zona de gruss que puede tener hasta varias decenas de metros de espesor y una permeabilidad del orden de  $10^{-5}$  ms<sup>-1</sup>. La meteorización de las anfibolitas produce perfiles de meteorización similares en cuanto a su composición y características de permeabilidad, pero los espesores de los horizontes de saprolito y de gruss normalmente son menores en esta formación. Las estructuras heredadas pueden modificar sustancialmente la permeabilidad de la masa del suelo residual que localmente puede ser uno o dos órdenes de magnitud mayor que la permeabilidad del material en sí. En la Figura 5 se encuentra un mapa del basamento geoelectrico de 10000  $\Omega$ m combinado con los datos disponibles de afloramientos rocosos y perforaciones para pozos profundos que corresponde al basamento rocoso, salvo mejor información a partir de sondeos con otras técnicas geofísicas, o a partir de perforaciones con fines geotécnicos. En la Figura 6 se encuentra la representación tridimensional del basamento rocoso.

## **FIGURA 4**

## **FIGURA 5**

Sobre los suelos residuales se han acumulado depósitos de vertiente y depósitos aluviales. Estos últimos alcanzan su mayor espesor e interés hidrogeológico en las vegas. Los depósitos de terraza ocupan una amplia extensión en la parte central del Altiplano de Rionegro, con espesor muy variable que puede ser de unos pocos decímetros hasta varias decenas de metros.



**Figura 6.** Modelo isométrico de la superficie del basamento rocoso.

En toda la extensión del área estudiada se encuentra un manto de ceniza volcánica, cuya densidad en estado seco se encuentra en el intervalo de 450 a 900 kg/m<sup>3</sup>, con un espesor medio de 1.3 m que, en algunos sitios, llega a los 3 m. En la figura 7 se encuentra el mapa de isopacas del manto de ceniza volcánica preparado con base en los resultados de los sondeos eléctricos.

## **FIGURA 7**

La capacidad de infiltración de este material varía entre unos cuantos centímetros por hora hasta 0.5 m/h (Toro, 2000, comunicación verbal), su capacidad de campo es del orden de 75% y el punto de marchitamiento del orden de 20% (Zapata, 2000, comunicación verbal). La porosidad de este material, con valores típicos en el intervalo 64% a 87%, su elevada permeabilidad secundaria, su posición en superficie y su espesor hacen de él un elemento clave en el proceso de infiltración.

El manto de cenizas volcánicas en sí mismo no constituye estrictamente un reservorio de agua. Es sólo un elemento que permite el paso de agua y facilita la infiltración debido a su elevada porosidad y capacidad de campo. En las cenizas volcánicas el almacenamiento posible es el que permite la capacidad de campo, definida como el contenido gravimétrico de humedad en el suelo que puede mantenerse en él en contra de la atracción de la gravedad. El agua almacenada en el suelo puede ser extraída sólo por evapotranspiración y constituye una reserva para uso agrícola, cuyo límite inferior es el punto de marchitez que puede ser descrito como el contenido de humedad de un suelo que no puede ser extraído por las plantas.

A pesar de no constituir un reservorio permanente de agua, el manto de cenizas volcánicas actúa como un reservorio de humedad utilizable por la vegetación; la humedad disponible para la vegetación esta dada por la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez. Si se acepta como valores típicos de estas magnitudes 75% y 20%, la humedad disponible en el manto de cenizas volcánicas tiene un valor de 55%. Si se toma 700 kg/m<sup>3</sup> como valor medio de la densidad en estado seco de las cenizas volcánicas, y 1.3 m de espesor, el volumen de agua disponible para la vegetación puede estimarse en 5\*10<sup>3</sup> m<sup>3</sup> en el extremo sur del área investigada ha, con valores extremos entre 2.5\*10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>/ha y 1.1\*10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/ha, en los sectores sur y norte del área investigada respectivamente.

Desde el punto de vista hidrogeológico el manto de cenizas volcánicas cumple un importante papel en razón de su elevada velocidad de infiltración y su porosidad que lo convierten en un reservorio temporal que facilita la infiltración hacia los niveles inferiores del regolito y regula la velocidad de la escorrentía directa. La capacidad de retención temporal de agua lluvia en este manto, adicional a su capacidad de campo es de 6.7\* 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>.



## TECTONICA

La posición actual de los altiplanos de Rionegro y de La Unión resultó de la elevación de la Cordillera Central durante la Orogenia Andina, movimiento que tuvo lugar a lo largo de unas cuantas fallas maestras en los bordes del Valle de Aburrá y del valle de Rionegro. Estas fallas y sus satélites y el fracturamiento de las rocas, a consecuencia de los movimientos tectónicos, tienen interés en este proyecto como conexiones hidráulicas y como elementos que definen la permeabilidad secundaria de las rocas y de los suelos residuales derivados de ellas.

En la literatura geológica se han reportado sólo unas pocas fallas en esta región, la mayoría de ellas como contactos fallados entre las rocas metamórficas y el Batolito Antioqueño, pero los alineamientos identificables en la cartografía y en las imágenes de sensores remotos permiten postular la existencia de algunas fallas de interés desde el punto de vista de este trabajo. El patrón de alineamiento presenta una tendencia marcada en dirección NW que aparentemente continua el mismo patrón de fallamiento en el borde oriental del Batolito Antioqueño, combinado con un conjunto de alineamientos en dirección SN. En un futuro conviene evaluar de manera sistemática las características de estos alineamientos y otros rasgos estructurales de interés hidrogeológico. Los alineamientos mencionados en este trabajo han sido incluidos sobreimpuestos en los mapas geológico, de basamento y de isopacas del regolito.

Los alineamientos más destacados en la zona del proyecto son:

*Río Chico - La Mosca – La Cimarrona:* este alineamiento regional con dirección NNW puede seguirse desde el Páramo de Belmira hasta el escarpe que separa los altiplanos de la Unión y de Rionegro al sur del casco urbano de El Carmen de Viboral en una extensión mayor de 80 km. La intersección de este alineamiento con el Río Negro coincide con una discontinuidad en la pendiente de su cauce que pasa de 0.002 entre la zona de Tablacito y el área urbana de Rionegro a 0.02 aguas abajo de esta población.

*Canoas:* alineamiento SN en una longitud aproximada de 15 km que marca en forma nítida la cota 2200 al W de la quebrada La Mosca hasta el norte de la población de La Ceja y controla el cauce de la quebrada La Ferrería en el Valle de Aburrá.

## **FIGURA 8**

*La Honda:* alineamiento con dirección general NNE, en una longitud de 15 km, que controla el cauce de la quebrada La Honda al sur la población de Guarne y se une a la falla de Canoas al norte de esta población.

*Cerro Verde:* falla con dirección EW y 7 km de longitud, identificada a partir del alineamiento de un conjunto de pequeñas corrientes de agua y de hombreras o contrafuertes desde el sector de Paisandú hasta la Cuchilla Alto de las Luces que marca el límite occidental del valle de la Quebrada La Mosca en la vereda Los Salados. En el afloramiento que se encuentran en la parte inferior del lado norte del Cerro Verde se puede observar la traza de la falla con roca triturada y espejos de falla en la superficie de las discontinuidades. La zona de falla aparentemente tiene en este punto menos de 5 m de ancho.

*La Compañía:* alineamiento de 5 km de longitud con dirección NWE que controla el cauce de la quebrada La Compañía al occidente de la cabecera municipal de San Vicente.

*La Enea:* alineamiento de 3 km de longitud con dirección NWE que controla el cauce de la quebrada La Enea al occidente de la cabecera municipal de San Vicente.

*La Pedregosa:* alineamiento de 15 km de longitud con dirección NW que controla el cauce de las quebradas La Pedregosa y El Pozo y del Río Negro aguas arriba del embalse de Guatapé.

*Chuscalito:* alineamiento con dirección NW que controla el cauce de las quebradas Chuscalito y El Tablazo en una longitud aproximada de 5 km

*El Retiro:* alineamiento NEN con 10 km de longitud a lo largo de la quebrada La Danta y del curso superior del Río Negro que define una serie de hombreras o contrafuertes bien alineados hasta la Quebrada Espíritu Santo en su margen Izquierda.

*Don Diego:* alineamiento con dirección NW a lo largo de la parte inferior de la Quebrada Don Diego que cruza el Río Negro y define la cota 2200 hasta la Quebrada Las Palmas.

*La Duenda:* alineamiento de 5 km de longitud con dirección NW a lo largo de la quebrada La Duenda en el municipio de La Ceja.

*El Guaico.* Alineamiento de 3 km de longitud con dirección NE al norte de la cabecera municipal de la Ceja. En su exposición en el talud de la carretera La Ceja - Don Diego se observan estrías de la zona de falla.

*El Carmen.* Alineamiento de 14 km con dirección general NE definido por el quiebre de pendiente en la vertiente entre los altiplanos de Rionegro y de La Unión; la separación entre estos altiplanos aparentemente es fallado a lo largo de un conjunto de fallas en escalón que no han sido cartografiadas aún.

## GEOMORFOLOGÍA

La larga historia tectónica y morfogenética de la región ha dado lugar a la formación de dos niveles de superficies de erosión que en esta zona corresponden al *Altiplano de Rionegro*, que coincide con la superficie de erosión SII, y al *Valle de la Unión* que corresponde a la superficie de erosión SI de Page & James (1981), y constituyen las mayores unidades geomorfológicas conjuntamente con el escarpe que las separa. La figura 9 ilustra la relación entre los niveles SI y SII.

La superficie de erosión SI forma en esta área una penillanura caracterizada por un conjunto de colinas bajas cuyo relieve local, del orden de 50 m, ha sido suavizada por los depósitos de terraza en extensiones relativamente amplias. La superficie plana de las terrazas, y los depósitos coluviales (sensu stricto) en las vaguadas de las colinas, cuyas cimas se encuentran alrededor de la cota 2180, llegan a dominar la morfología local. Sobre el nivel del altiplano se destacan el cerro El Capiro y unas cuantas cuchillas que separan los valles menores de El Retiro, La Ceja, El Carmen de Viboral y Marinilla en la parte sur del Altiplano de Rionegro. El basamento rocoso de este altiplano está formado por rocas granitoides del Batolito Antioqueño. La profundidad media del basamento geoelectrico llega a 70 m con una desviación estándar de 45 m y valores extremos de 0 y 280 m. En los bordes del área definida por la cota 2200 son comunes los depósitos de ladera y ocasionalmente depósitos coluviales que cubren las terrazas y las colinas bajas o se interdigitan con ellas. El drenaje de esta zona está dominado por el Río Negro, de la cuenca del Magdalena. Al Río Negro tributan los ríos Pantanillo y Pereira, y las quebradas Cimarrona, Marinilla, y la Mosca, amén de otras menores.

## **FIGURA 9**

*El Altiplano de la Unión* forma una especie de artesa con 75 km de extensión aproximada, que se encuentra en su mayor parte por debajo de la cota 2500. Los bordes de la artesa están formados por cuchillas que en algunas partes superan la cota 2600 hasta la 2800. En el basamento rocoso de la artesa predominan los granitoides del Batolito Antioqueño, en tanto que en los bordes de ambos altiplanos el basamento está formado por las anfibolitas y los metasedimentos del Grupo Ayurá Montebello, en la nomenclatura de Botero, equivalente al complejo polimetamórfico de la Cordillera Central de Restrepo & Toussaint (1987). La profundidad media del basamento geoelectrico en esta zona llega a 80 m con una desviación estándar de 30 m con valores extremos de 0 y 130 m. La corriente principal de esta zona, el Río Piedras, pertenece a la cuenca del Río Cauca.

Además de las unidades geomorfológicas mayores deben considerarse otras unidades menores o facetas geomorfológicas de interés para esta investigación: Las vegas aluviales, terrazas aluviales y los campos de dolinas.

*Terrazas.* En el altiplano de Rionegro se han formado un conjunto de terrazas, en las que Durango (1975) reconoció cinco niveles y Page & James (1981) identificaron ocho niveles. En este estudio hemos identificado un nivel adicional por encima del nivel superior propuesto anteriormente. En la Figura 11 queda ilustrada la relación entre las terrazas del Altiplano de Rionegro.

Terraza 9. La terraza más alta identificada hasta ahora es un depósito profundamente meteorizado, de 20 m de espesor, en la cuenca de la quebrada La Cimarrona al sur de la población del Carmen de Viboral. El depósito consiste en arcillas ricas en caolinita, en el que se distinguen aún los cantos de roca primitivos profundamente meteorizados. La superficie de la terraza, esencialmente horizontal, se encuentra en la cota 2177, y está cortada por una carretera veredal. La terraza está limitada por la vega aluvial, en la cota 2160 m, que en algunas partes es apenas un depósito somero de gravas y arenas sobre el suelo residual derivado de las rocas del batolito Antioqueño. La fotografía de la Figura 10 ilustra el aspecto del depósito de terraza a este nivel.



**Figura 10.** Aspecto del depósito de terraza del nivel 9 al sur de El Carmen de Viboral.

En la figura 10 las manchas negras corresponden a cantos de anfibolita completamente meteorizados. La parte oscura corresponde a la pátina de líquenes que se desarrolla en la superficie de los taludes.

Terraza 8. La terraza 8 se presenta como contrafuertes y cimas planas un poco por debajo de la superficie de erosión SII a una cota aproximada de 2150 m en toda la cuenca del Río Negro. Los depósitos de la terraza tienen más de 20 m en algunos lugares y están formados por arcilla limosa de colores variados entre gris y rojizo, y arcilla arenosa intercalada con delgados lentes de gravas. En los bordes de la cuenca esta terraza está cubierta por depósitos de ladera. Hacia el noreste los depósitos son más delgados y las gravas más abundantes y gruesas. Los depósitos de terrazas suprayacen el suelo residual derivado de los granitoides del Batolito Antioqueño.

Cerca del Aeropuerto José María Córdova, en la cuenca de la Quebrada Chachafruto existe una terraza alta, compuesta de limos y arenas con abundantes guijarros de cuarzo embebidos en la masa de limo y arena que corresponde a este nivel.

## FIGURA 11



Terraza 7. Esta terraza es más conspicua aguas abajo del casco urbano de Rionegro en la cota 2135, con una ligera pendiente hacia el oriente. Los remanentes de terraza conservan aún su superficie plana aunque en algunos lugares toma la apariencia de contrafuertes redondeados por debajo de la terraza 8. Los depósitos de esta terraza tienen un espesor variable entre 2 y 6 m y consisten en gravas profundamente meteorizadas cubiertas por limos arenosos. En el sector de La Fe se encuentran dos niveles de terraza a 16 y a 30 m por encima del cauce de la quebrada Las Palmas. Los depósitos de estas terrazas tienen apenas unos pocos metros de espesor; la más baja de ellas está formada por gravas y arenas, y la más alta por arenas, limos y turba que pueden corresponder a los niveles 7 y 8.

Terraza 6. Esta, la más extensa de todas las terrazas identificadas, ocupa la zona conocida como Llano Grande, en la cota 2125, con una ligera pendiente hacia el Este. Los depósitos de esta terraza están formados básicamente por arenas, limos y gravas interestratificados, sobre suelo residual de rocas del Batolito Antioqueño; su espesor máximo es de 25 m, pero en la mayor parte de su extensión apenas alcanza un par de metros y frecuentemente no pasa de 0,5 m. Las fotografías de las Figura 12 a 14 muestran aspectos de los depósitos de terraza de este nivel, cubiertos de ceniza volcánica.



**Figura 12.** Depósito de terraza del nivel 6 al norte de San Antonio de Pereira. Depósito de grava y arena de 2 m de espesor cubierto por ceniza volcánica.



**Figura 13.** Depósito de terraza del nivel 6 en la carretera Llanogrande – Rionegro 0.8 m de grava oxidada y cementada entre el saprolito de roca ígnea y la cubierta de ceniza volcánica.



**Figura 14.** Depósito de terraza del nivel 6 en la carretera Llanogrande – Rionegro 0.1 m de grava entre el saprolito de roca ígnea y la cubierta de ceniza volcánica.

Terraza 5. Esta terraza está claramente identificada a lo largo de la quebrada La Mosca; pero a lo largo del Río Negro es menos evidente. Su aspecto general es la de una superficie amplia, ligeramente inclinada hacia el Oriente, disectada en la parte superior de la vega de la quebrada La Mosca. Su superficie se encuentra alrededor de la cota 2110. En los depósitos de terraza predominan las arenas finas y los limos sobre un delgado estrato de gravas de cuarzo.

Terraza 4. Esta terraza se encuentra en la cota 2105. Es ésta una terraza estrecha que se encuentra en la mayor parte de la cuenca del Río Negro entre 10 y 20 m por encima de la vega aluvial actual. Los depósitos de terraza están formados por arenas y gravas con lentes de limo con un espesor total de 8 m. La fotografía de la Figura 15 ilustra el aspecto general de esta terraza en el sector de Guayabito.



**Figura 15.** Aspecto general de la Terraza 4 al occidente de la Concentración Guayabito.

Terraza 3. Su aspecto es el de una superficie amplia y bien definida con su superficie esencialmente plana. Los depósitos de terraza están formados por una secuencia de gravas y arenas, con intercalaciones de limo, de 4 a 5 m de espesor, sedimentados directamente sobre el saprolito de las rocas del Batolito Antioqueño.



Terraza 2. Esta terraza, estrecha y muy disectada, apenas se distingue de la vega aluvial; La diferencia de cotas entre la vega aluvial y la Terraza 2 es solo de 2 m entre El Tablazo y el casco urbano del municipio de Rionegro. A partir de la desembocadura de la quebrada El Aguila esta diferencia de cotas aumenta a 4 m. Los depósitos de arena intercalados con lentes de limo tienen un espesor de 3.5 m, con algunas gravas moderadamente meteorizadas. En la fotografía de la Figura 16 se aprecia la relación entre estas dos terrazas cerca del antiguo puente de madera en el área urbana de Rionegro.



**Figura 16.** Terrazas 1 y 2 en el área urbana de Rionegro aguas arriba de Puente Real.

Terraza 1. El primer nivel de terraza es realmente un depósito aluvial disectado que se encuentra hoy a 2 m por encima de la vega aluvial, entre los canales del río aguas abajo de la desembocadura de la quebrada El Aguila, formado por 1 a 2 m de arenas limosas.

*Vegas aluviales.* Esta unidad está caracterizada por una superficie plana ligeramente inclinada en dirección de las corrientes, con una amplitud variable a lo largo de las corrientes principales de la zona. La vega aluvial es más amplia en el Río Negro entre El Tablazo y Belén, en el Río Pereira, cerca de la población de La Ceja y en el área de confluencia de las quebradas La Mosca y Marinilla con

el Río Negro. En una parte sustancial de los trayectos de las corrientes que drenan esta zona las vegas aluviales son estrechas al punto de que no alcanzan a ser cartografiables a la escala de esta investigación.

*Campos de dolinas:* En el planalto de Santa Elena, entre la carretera Medellín Rionegro y el Alto de las Palmas se encuentra una unidad geomorfológica especial caracterizada por una topografía suave y la escasez de drenajes superficiales y de corrientes de agua permanente. En esta unidad son comunes las dolinas, llamadas localmente *ollones* (*hoyones?*), *organales*, o *troner*as; son ellas depresiones cerradas por donde fluyen al subsuelo las corrientes, permanentes o efímeras. Algunas de estas depresiones tienen mas de 100 m de longitud, 30 m de ancho, y 10 de profundidad con varios sumideros. Las mas comunes tienen entre 1 y 5 m de diámetro, y entre 0.5 y 5 m de profundidad con un solo sumidero. Al menos tres de las corrientes permanentes en la vereda El Plan, las quebradas, La Tolva, Bizarro y La Espadera, llegan hasta una de estas dolinas y siguen su curso subterráneo (Hoyos, 2000). Esta unidad, aunque se encuentra por fuera del Valle de San Nicolás y de la jurisdicción de CORNARE, tiene particular interés desde el punto de vista geomorfológico e hidrogeológico y está siendo investigada en detalle. Las conexiones hidráulicas aparentemente se dirigen al Valle de Aburrá pero no puede descartarse la conexión del campo de dolinas con el altiplano de Rionegro.

Estas mismas geoformas fueron registradas por Feininger (1969) en Amalfi sobre rocas granitoides del Batolito Antioqueño. En la vereda La Chapa, de El Carmen de Viboral, fue observado en años pasados al menos un sumidero que no fue localizado nuevamente en esta investigación. En los valles de La Ceja y de La Unión fueron observadas varias de estas depresiones sin sumidero, en tanto que los campesinos informaron de la existencia de otras que han sido cegadas. Es posible que una investigación cuidadosa permita identificar y caracterizar estas geoformas de manera sistemática en los valles de Rionegro y de La Unión.

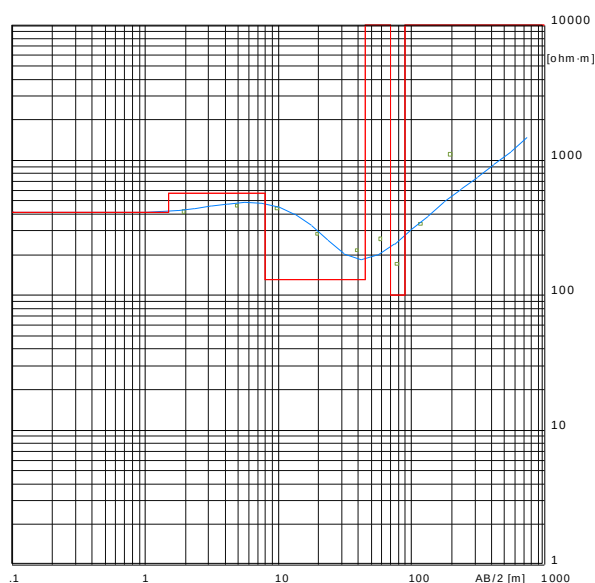
## CARACTERIZACIÓN GEOELÉCTRICA

La exploración geoeléctrica del terreno se llevó a cabo mediante un conjunto de 276 sondeos eléctricos verticales (SEV), utilizando la configuración Schlumberguer. En una primera aproximación se buscó contar con una densidad media de sondeos equivalente a un sondeo por kilómetro cuadrado en toda la extensión de la zona I y un sondeo por cada cuatro kilómetros cuadrados en toda la extensión de la zona II del informe de la Universidad Nacional (1997),

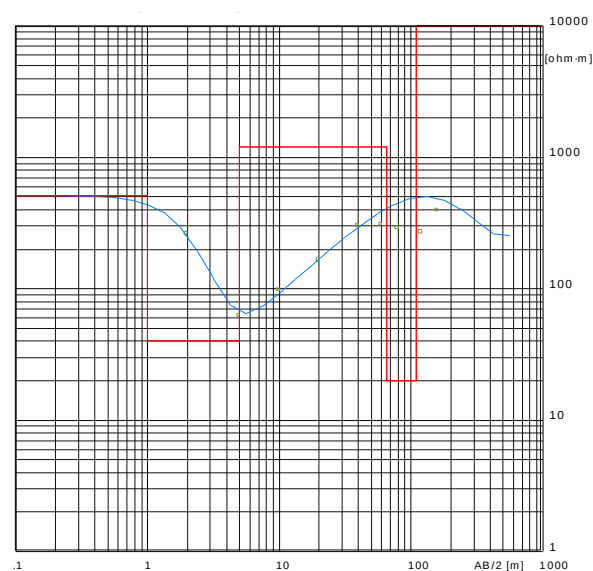
adicionalmente se efectuaron algunos sondeos de acotamiento por fuera del área de potencial hidrogeológico alto y medio.

La zona I, del informe de la Universidad Nacional (1997), definida como una zona con alto potencial hidrogeológico, fue delimitada con base en criterios geomorfológicos: las vegas aluviales y terrazas quedaron incluidas en esta categoría. La zona II fue definida como zona de potencial hidrogeológico intermedio y se le identificó con la unidad geomorfológica de las colinas bajas o colinas saprolíticas del Altiplano de Rionegro; a esta misma categoría pertenece el altiplano de la Unión que no fue evaluado en el informe citado. Los resultados de este trabajo indican que la delimitación de las zonas I y II debe modificarse.

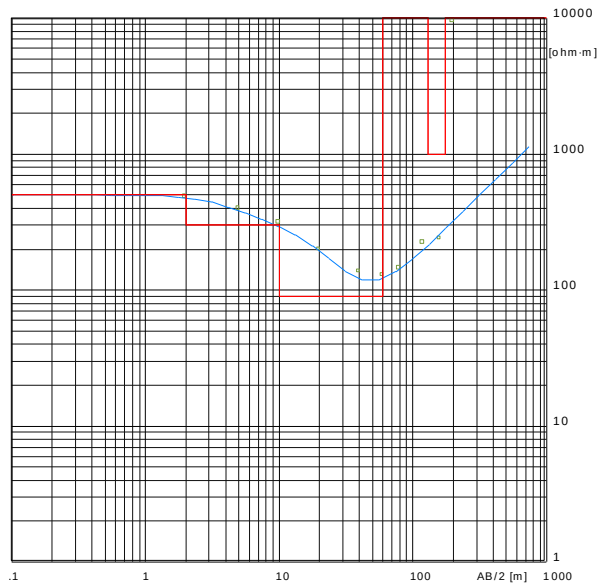
Desde el punto de vista hidrogeológico regional las terrazas altas no se diferencian sustancialmente de las colinas, y más que depósitos de terraza significativos desde el punto de vista geomorfológico e hidrogeológico, pueden considerarse como terrazas de abrasión, conocidas en la literatura geomorfológica anglosajona como *strath terraces*; el delgado espesor de los depósitos de terraza y su alto contenido de limos no permiten asociarlas a las vegas aluviales como acuíferos. En las Figuras 17 a 20 que corresponden a los registros de los sondeos eléctricos verticales 5, 12, 36 y 165, en colinas y terrazas altas, puede apreciarse que las curvas de resistividad aparente en unas y otras es prácticamente la misma.



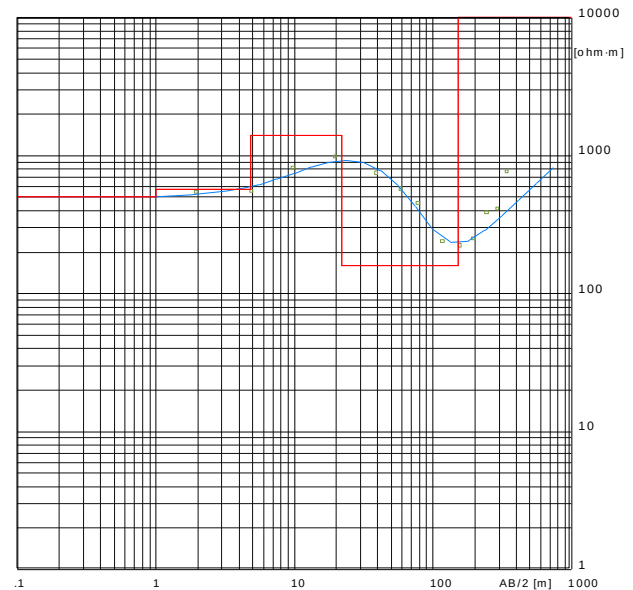
**Figura 17.** Sondeo eléctrico vertical 5 en la terraza alta de Tablacito.



**Figura 18.** Sondeo eléctrico vertical 12 en la terraza de Llanogrande.



**Figura 19.** Sondeo eléctrico vertical 36 en colinas saprolíticas en la margen derecha del Río Pereira.



**Figura 20.** Sondeo eléctrico vertical 165 en colinas saprolíticas. Tablazo

El interés de estos depósitos de terraza desde el punto de vista hidrogeológico es similar al de las cenizas volcánicas por su posición en superficie, la topografía esencialmente horizontal o ligeramente inclinada y su elevada porosidad y permeabilidad; este conjunto de características suyas hacen de estos depósitos y del manto de cenizas volcánicas un elemento clave en el proceso de infiltración así no constituyan reservorios permanentes. Así, la Unidad I, o zona de alto potencial hidrogeológico, debe redefinirse en términos geomorfológicos como la zona de aluviones y terrazas bajas, y la Unidad II, o zona de potencial hidrogeológico medio corresponde a las terrazas altas y colinas saprolíticas. La definición de la zona de potencial hidrogeológico bajo permanece definida en los mismos términos de la Fase I de este estudio.

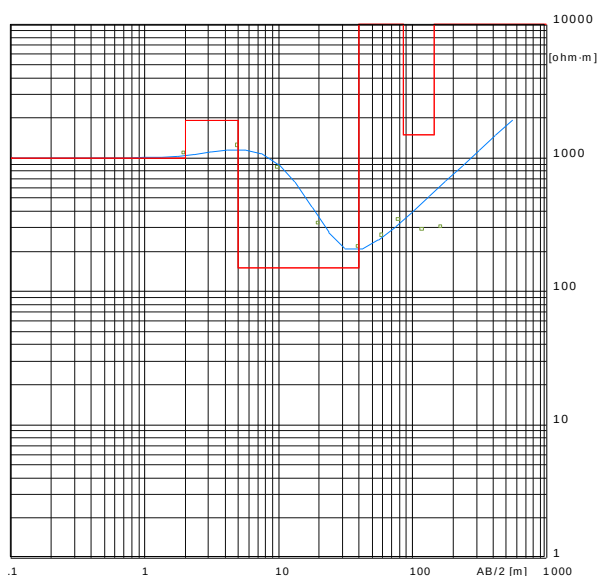
Como criterio general en el altiplano de Rionegro puede tomarse la cota 2100 hasta 2140 como límite entre las unidades I y II. A lo largo de la vega del Río Negro y de la Quebrada La Mosca el límite entre ambas unidades está marcado por la cotas 2100-2120 con los valores más altos aguas arriba en los sectores de El Tablazo y del Hipódromo Los Comuneros. En las quebradas Cimarrona y Pereira el límite está dado aproximadamente por la cota 2110 - 2140, con los valores más altos en la vecindad de las cabeceras municipales de El Carmen de Viboral y de La Ceja.

Los resultados de los sondeos eléctricos, y la investigación de campo conexas, permiten distinguir y caracterizar tres zonas bien definidas:

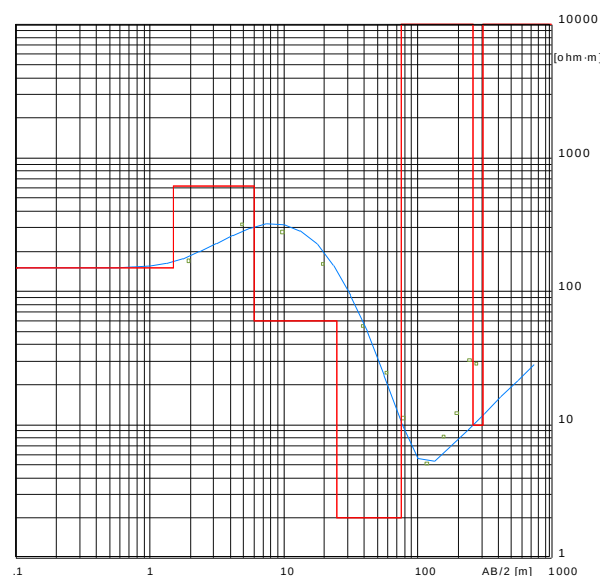
- las vegas aluviales y las terrazas bajas,
- las terrazas altas y las colinas saprolíticas, y
- los escarpes rocosos.

*Zona I: Vegas aluviales y terrazas bajas.*

La vega aluvial del Río Negro fue explorada desde el puente de la carretera Don Diego - Tablazo hasta la desembocadura de la quebrada Marinilla. En toda la extensión de esta vega se encuentran limos y arenas, con resistividades entre 60 y 200  $\Omega\text{m}$ , hasta profundidades del orden de 20 m. Por fuera de la vega aluvial propiamente dicha la profundidad del basamento es del orden de 10 m. En uno de los sondeos, cuya curva de resistividad se encuentra en la Figura 21, se registraron valores de resistividad relativamente altos que pueden indicar la ocurrencia de gravas en el depósito aluvial. En la parte más occidental de la vega del Río Negro, el sondeo 1A, presentado en la Figura 22, muestra una gruesa capa con resistividad del orden de 1  $\Omega\text{m}$ , cuya interpretación admite la hipótesis de la ocurrencia de agua salada en este sector. Dados los antecedentes de la existencia de salados en el altiplano debe examinarse con más detenimiento esta hipótesis.



**Figura 21.** Curva de resistividad aparente del sondeo 63 en la vega aluvial del Río Negro.

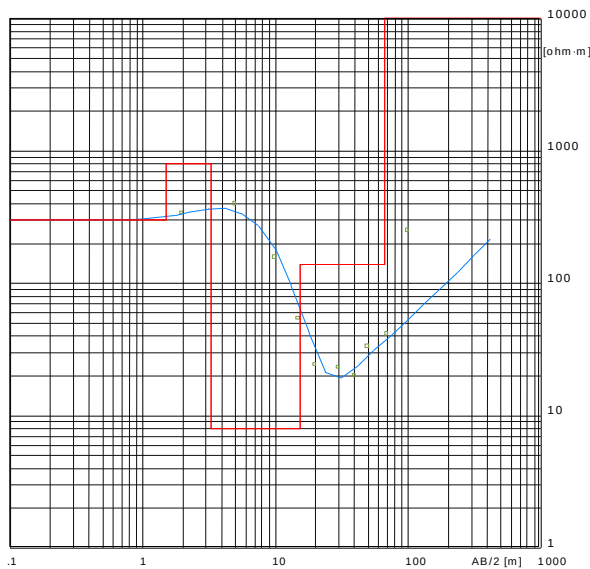


**Figura 22.** Curva de resistividad aparente del sondeo 1A en la vega aluvial del Río Negro

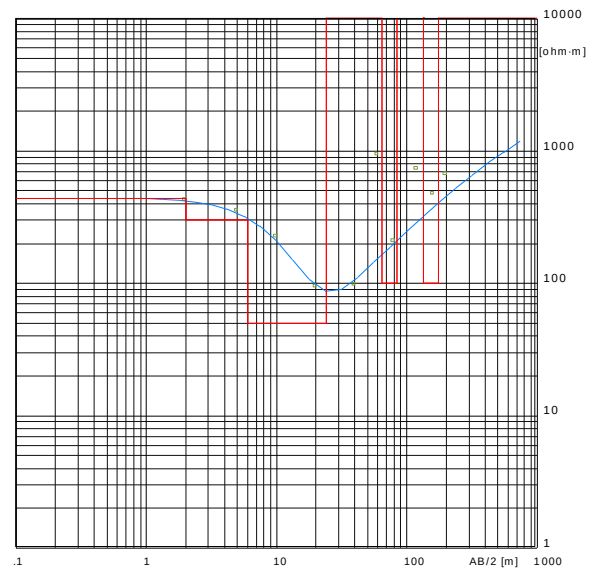


En esta unidad debe considerarse la existencia de limos saprolíticos saturados entre el depósito aluvial y el basamento rocoso que pueden confundirse con limos o arenas finas saturadas. La discriminación entre unos y otros se logró mediante la interpretación regionalizada de los sondeos. El resultado de esta regionalización indica que los depósitos aluviales de esta unidad son menos gruesos de lo que se ha supuesto hasta ahora y que muchos de los pozos perforados en ella explotan parcialmente agua del suelo residual infrayacente al depósito aluvial.

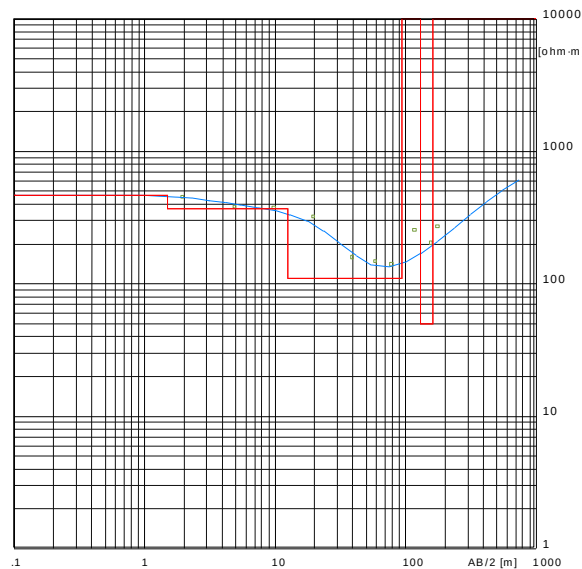
Entre el sector de Guayabito y la confluencia del Río Pantanillo y el Río Negro, éste discurre encañonado; de esta confluencia hasta las afueras de la cabecera municipal del municipio de El Retiro se encuentra una pequeña vega aluvial aislada que puede tener interés hidrogeológico. La vega aluvial de El Retiro y la terraza de Fizebad presentan valores bajos de resistividad que pueden ser interpretados en términos de la existencia de acuíferos salados. En este caso la interpretación de la curva de resistividad aparente está apoyada en la existencia de explotaciones de fuentes saladas en el sector hasta el primer tercio del siglo XX. En las Figuras 23 a 25 se encuentran los resultados de los sondeos 151, 153 y 158, en las cuales se destacan los bajos valores de resistividad en aluviones que han sido interpretados como indicadores de acuíferos salados.



**Figura 23.** Curva de resistividad aparente del sondeo 151 en la vega aluvial del Valle de El Retiro.



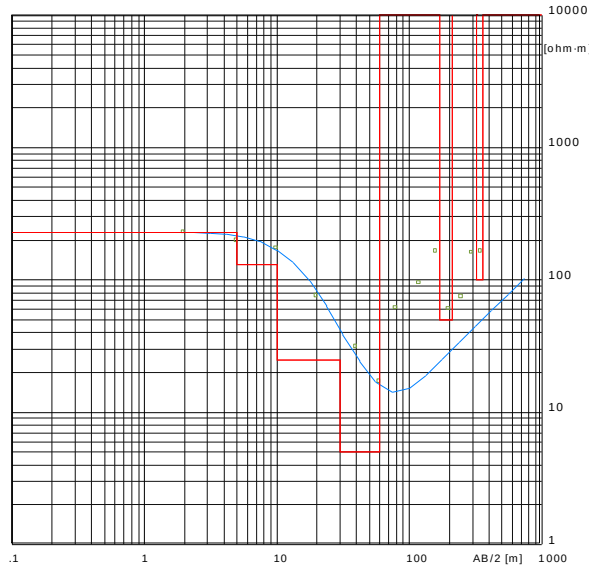
**Figura 24.** Curva de resistividad aparente del sondeo 153 en la vega aluvial del Valle de El Retiro.



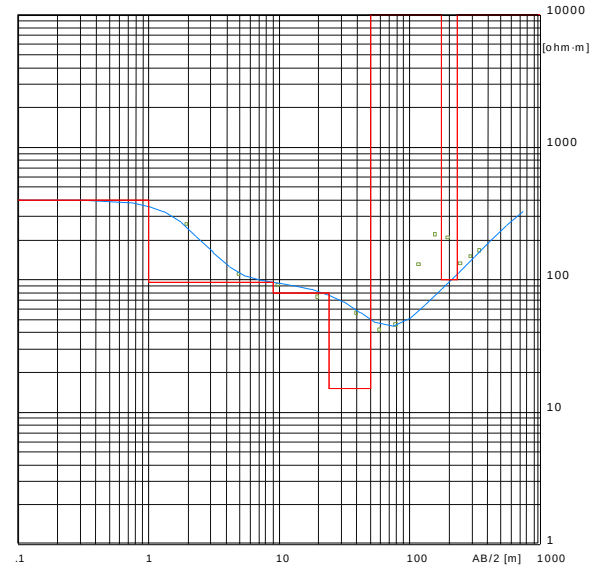
**Figura 25.** Curva de resistividad aparente del sondeo 158 en la terraza de la Hacienda Fizebad

La vega aluvial del Río Pereira presenta la peculiaridad de aumentar de amplitud a medida que se asciende en su curso hasta los alrededores de la cabecera municipal de La Ceja. La mayor variedad en los valores de resistividad que se encuentran en esta vega puede corresponder a una mayor variedad en la litología de los depósitos. En la parte baja de su curso se encuentran estratos con

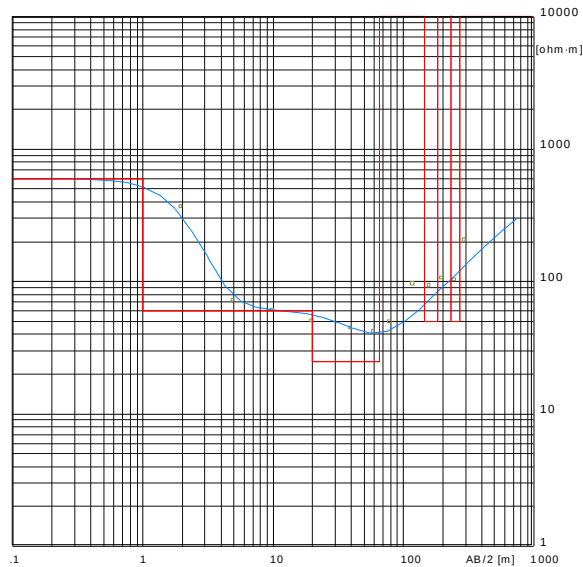
resistividad entre 250 y 600  $\Omega\text{m}$  que, en este entorno, puede interpretarse como correspondiente a mezclas o intercalaciones de gravas y arenas. Los sondeos eléctricos verticales 46, 51 y 56, presentados en las Figuras 26 a 28, son característicos de esta zona. En la parte alta del curso de este río predominan los limos y arenas en la parte superior del depósito, y arcillas limosas en la parte inferior del mismo. El basamento varía en profundidad entre 20 y 80 m en la parte central del depósito aluvial que alcanza hasta 50 m de espesor.



**Figura 26.** Curva de resistividad aparente del sondeo 46 en la vega aluvial del Río Pereira.

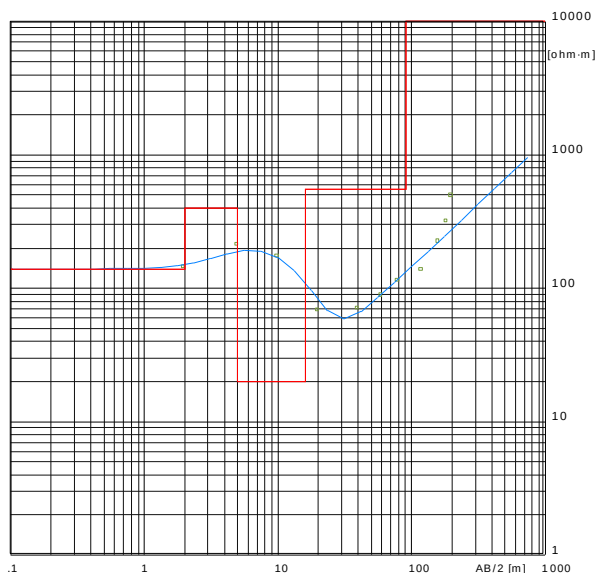


**Figura 27.** Curva de resistividad aparente del sondeo 51 en la vega aluvial del Río Pereira.

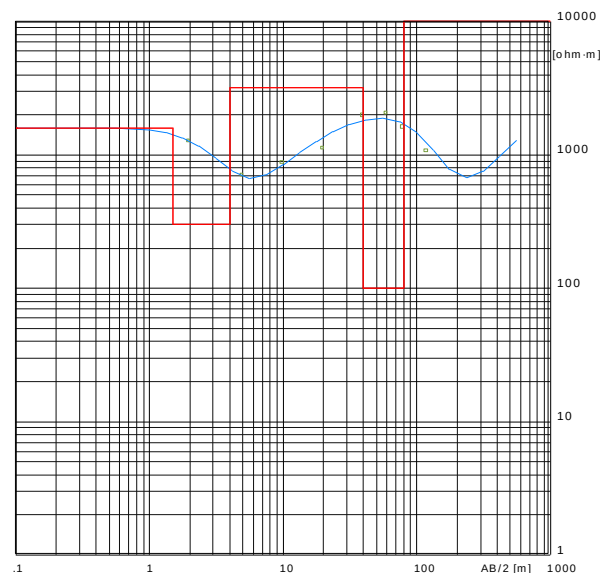


**Figura 28.** Curva de resistividad aparente del sondeo 56 en la vega aluvial del Río Pereira.

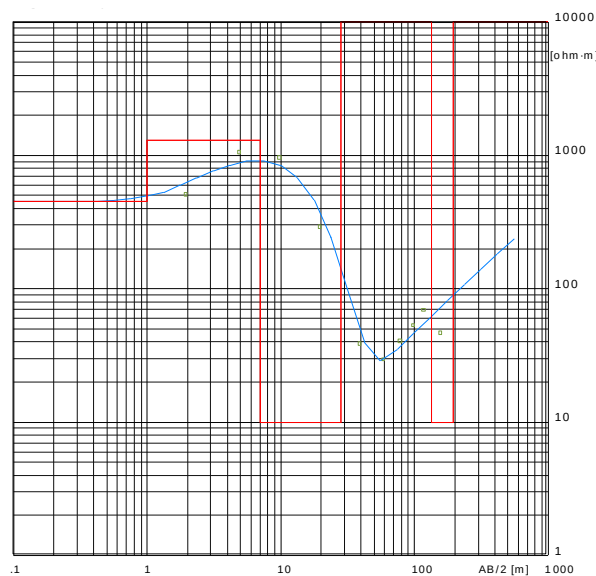
La vega aluvial de la quebrada Cimarrona, es una unidad estrecha y muy somera, al punto que en algunos trechos el cauce de la quebrada corta el saprolito derivado de los granitoides del Batolito Antioqueño y el basamento rocoso puede encontrarse a unas pocas decenas de metros, e incluso a unos pocos metros, de la superficie. Sin embargo, en algunos puntos los SEV muestran el basamento profundidades del mismo orden de magnitud que el de las demás corrientes del área estudiada. Las curvas de resistividad 116, 117 y 120, presentadas en las Figuras 29 a 31, son características de las vegas aluviales de la zona estudiada.. En ellas el basamento geoelectrico se encuentra a distancias variables que pueden pasar de los 60 m aunque el depósito aluvial propiamente dicho apenas tiene un par de metros con una moda de 5 m y un valor máximo de 12.



**Figura 29.** Curva de resistividad aparente del sondeo 116 en la vega de la Quebrada Cimarrona.



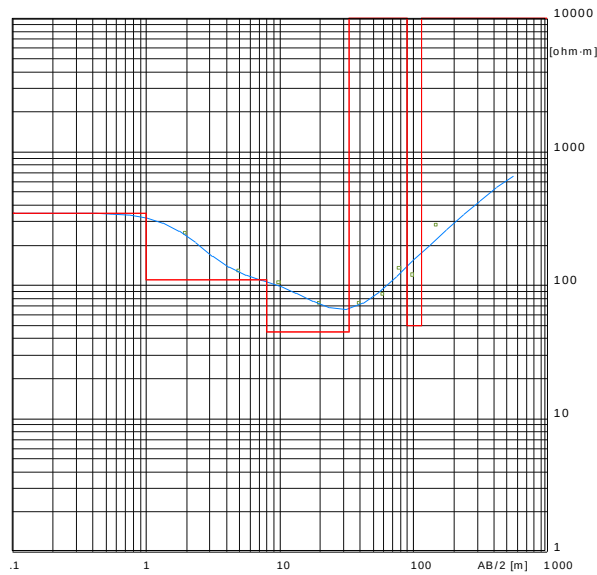
**Figura 30.** Curva de resistividad aparente del sondeo 117 en la vega de la Quebrada Cimarrona.



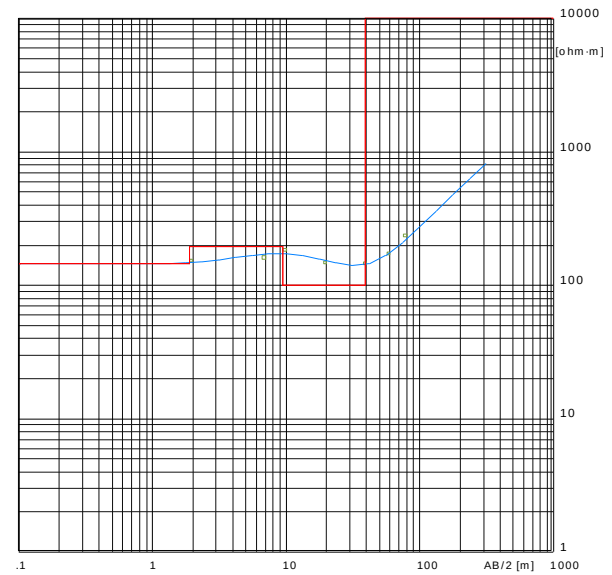
**Figura 31.** Curva de resistividad aparente del sondeo 120 en la vega de la Quebrada Cimarrona.

La quebrada La Mosca tiene una vega aluvial estrecha en la mayor parte de su recorrido y se ensancha cerca de su llegada al Río Negro. La vega aluvial no tiene continuidad en todo el recorrido de la corriente y estrictamente deben considerarse dos vegas separadas: la vega aluvial de Los Comuneros en la parte alta de la cuenca y la vega aluvial de La Mosca en la parte baja. En el trayecto

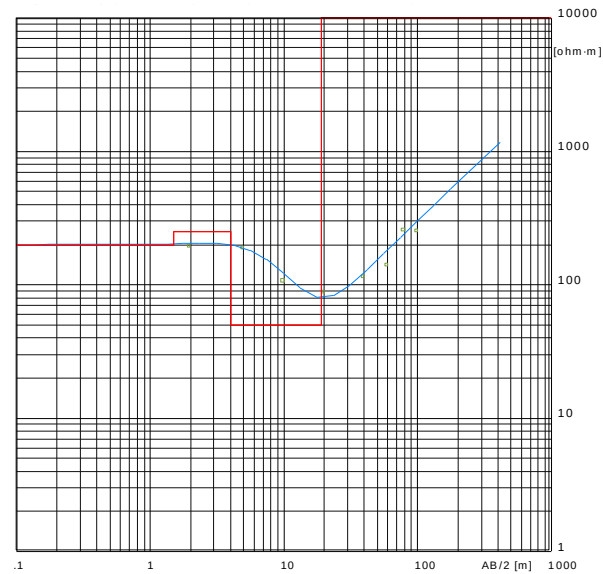
intermedio la quebrada transcurre entre colinas que encajan el cauce en la vecindad de la bifurcación de la carretera a San Vicente. Los sondeos eléctricos verticales 104A, 104B y 132A ejecutados en estas vegas se encuentran en las figuras 32 a 34.



**Figura 32.** Curva de resistividad aparente del sondeo 104A en la vega aluvial de la Quebrada La Mosca al sur del Hipódromo Los Comuneros

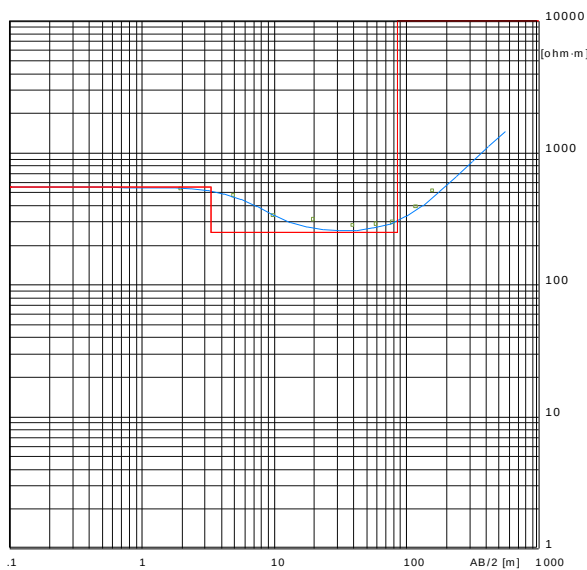


**Figura 33.** Curva de resistividad aparente del sondeo 104B en la vega aluvial de la quebrada La Mosca.

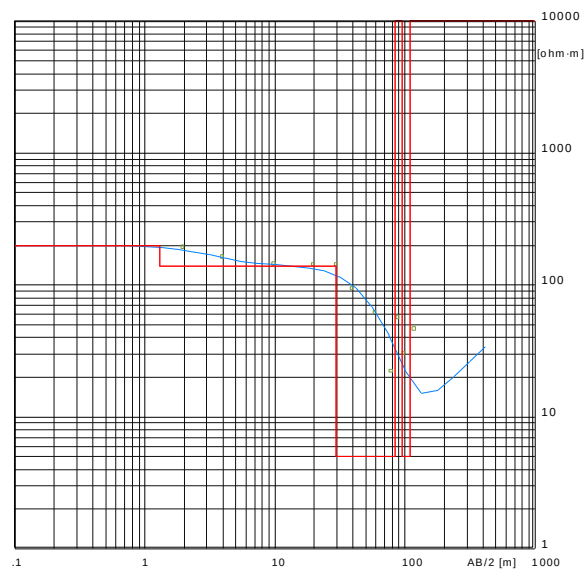


**Figura 34.** Curva de resistividad aparente del sondeo 132A en la vega aluvial de la Quebrada La Mosca al sur del Hipódromo Los Comuneros.

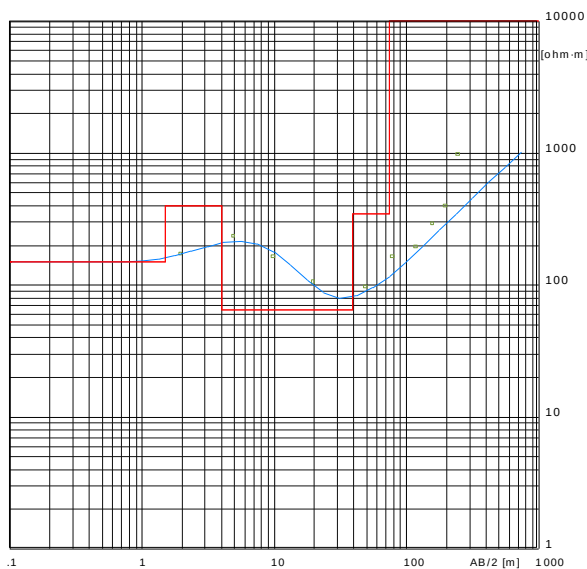
La vega aluvial del Río Piedras en el Valle de la Unión se confunde en gran parte de su recorrido con los depósitos coluviales y con el paisaje suavizado de las colinas bajas desarrolladas en suelos residuales. Los sondeos verticales registrados en las curvas 403 y 413 de las figuras 35 y 36 son típicos de la vega de este río



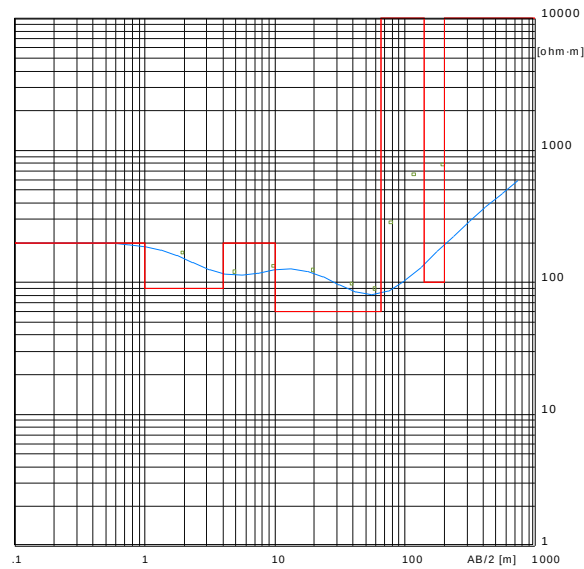
**Figura 35.** Curva de resistividad del sondeo 403 en la vega aluvial del Río Piedras, Vereda San Juan.



**Figura 37.** Curva de resistividad del sondeo 2A en el sector de Guayabito en una terraza baja del Río Negro.



**Figura 36.** Curva de resistividad del sondeo 413 en la vega aluvial del Río Piedras, Vereda Vallejuelito

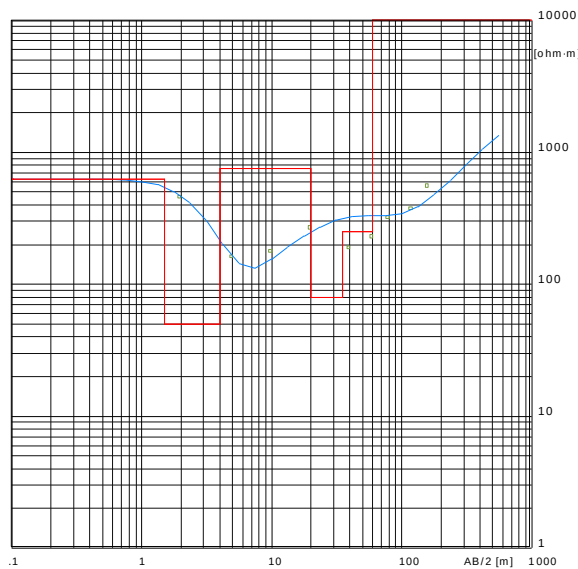


**Figura 38.** Curva de resistividad aparente del sondeo 10 en una terraza baja del Río Negro en el sector de Llanogrande.

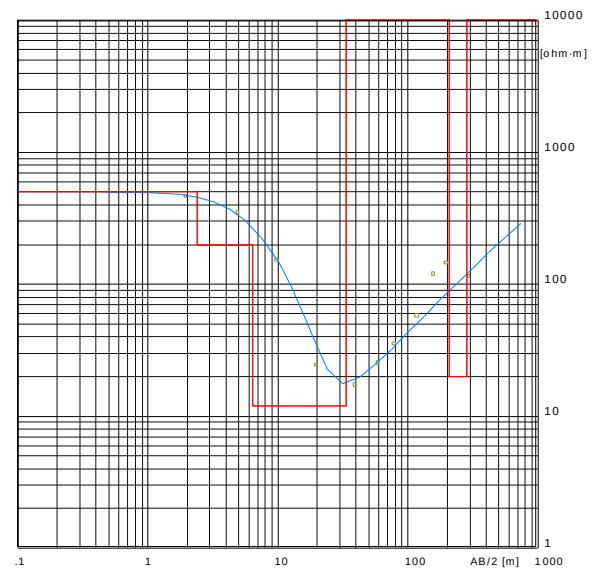
Los sondeos eléctricos verticales correspondientes a las curvas 2A y 10, presentados en las Figuras 37 y 38, son característicos de terrazas bajas en las que los depósitos aluviales pueden reposar sobre el basamento pero, más comúnmente lo hacen sobre suelos residuales. El basamento se encuentra a profundidades variables que pueden ser mayores que 100 m.

*Zona II. Terrazas altas y colinas saprolíticas.*

Los sondeos eléctricos verticales 17, 301 y 505 presentados en las figuras 39 a 41 son típicos de terrazas altas. En estas terrazas es común que haya un nivel de suelo residual entre el depósito aluvial y el basamento cuya profundidad normalmente es mayor que 50 m y puede superar los 100 m.

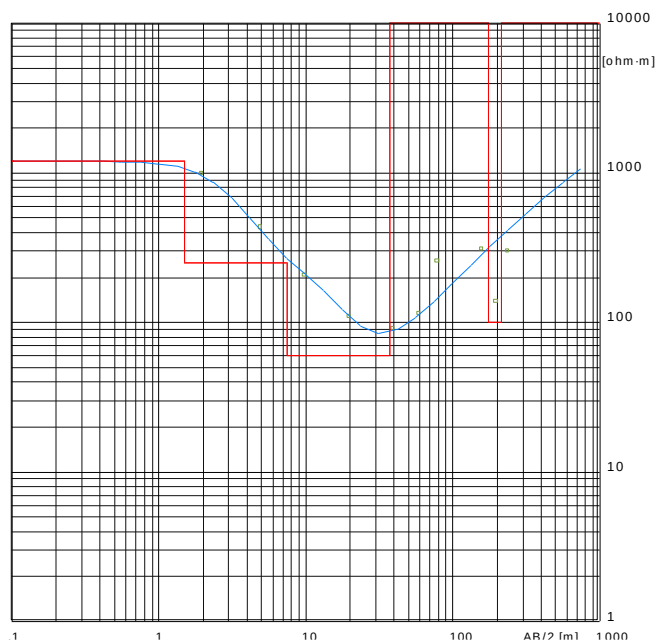


**Figura 39.** Curva de resistividad aparente del sondeo 17 en la terraza de Llanogrande.

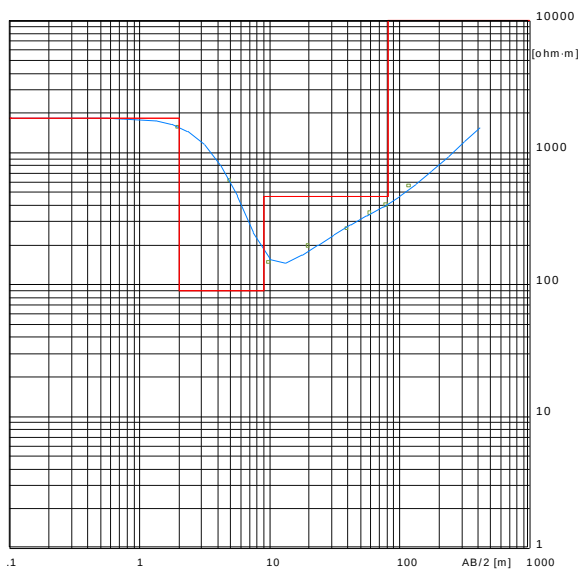


**Figura 40.** Curva de resistividad aparente del sondeo 301 en la terraza alta de la Quebrada Cimarronas

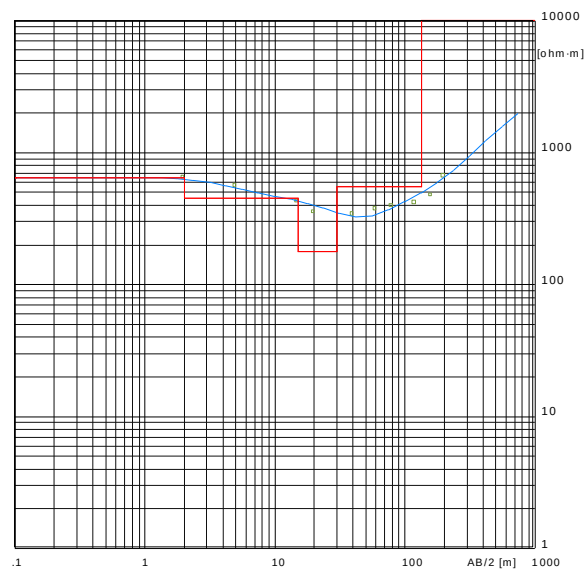




**Figura 41.** Curva de resistividad aparente del sondeo 505 en la terraza de Tablacito.

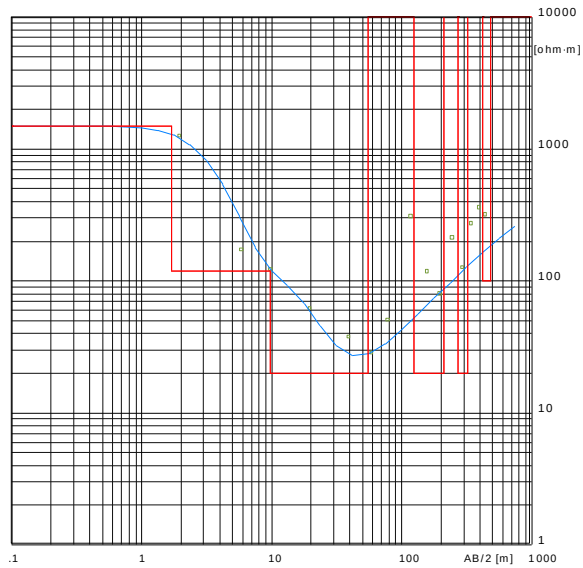


**Figura 42.** Curva de resistividad aparente del sondeo 102 en el borde de la terraza de la Quebrada la Mosca.

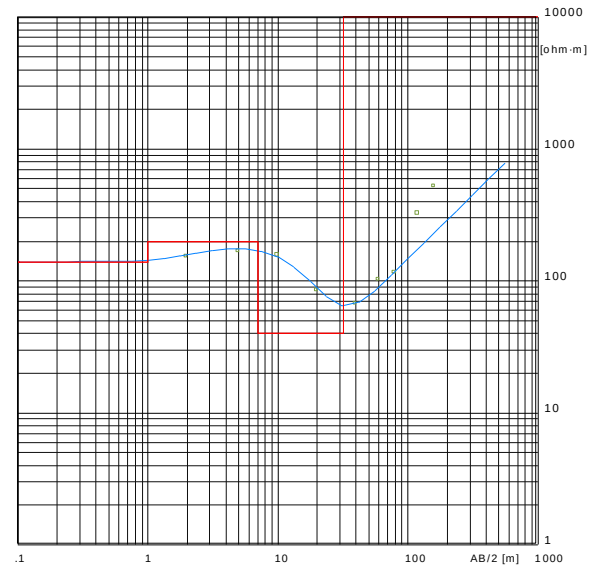


**Figura 43.** Curva de resistividad aparente del sondeo 197 en el borde de la terraza aluvial de la Quebrada la Cimarronas.

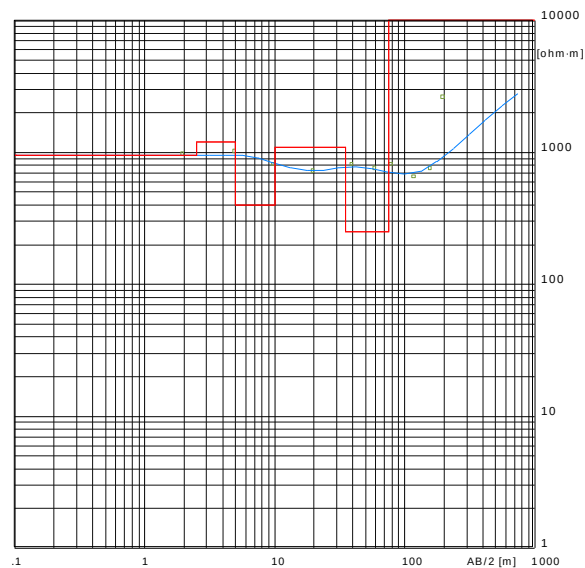
En los límites entre las terrazas altas y las colinas el espesor del depósito aluvial puede ser tan delgado que sea indiferenciable con los métodos geoelectricos. Los sondeos 102 y 197 presentados en las figuras 42 y 43, fueron ejecutados en este ambiente de transición en el que el basamento está a profundidades entre 40 y más de 135 m.



**Figura 44.** Curva de resistividad del sondeo 135 en las colinas de la Vereda Pontezuela.



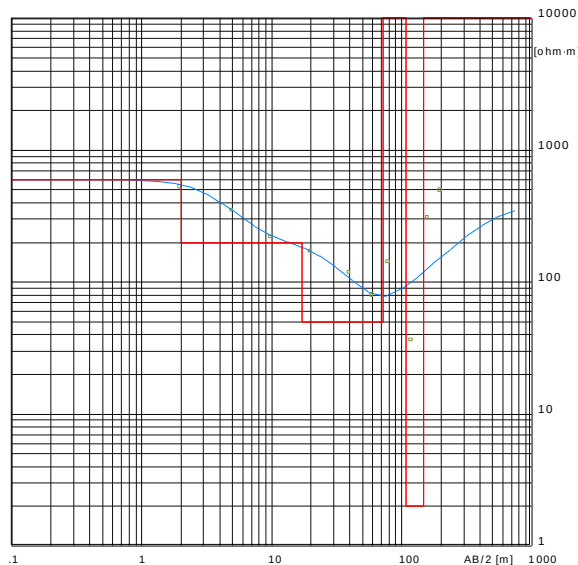
**Figura 45.** Curva de resistividad aparente del sondeo 168 en las colinas al sur del área urbana de La Ceja



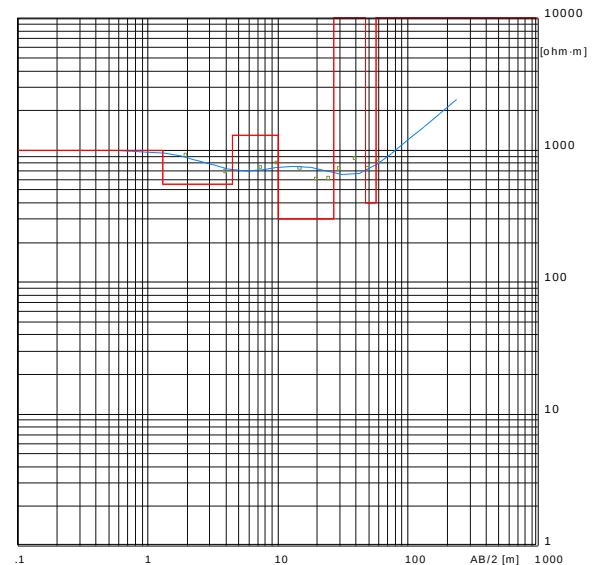
**Figura 46.** Curva de resistividad aparente del sondeo 410 en las colinas al oriente del área urbana de La Unión.

Los sondeos 135, 168 y 410, en las Figuras 44 a 46, son típicos del ambiente de colinas saprolíticas de los altiplanos de Rionegro y de la Unión donde el basamento puede estar en un intervalo de profundidad entre 40 y 200 m.

Los sondeos 167 y 423 son típicos de los depósitos de ladera al pié del escarpe que separa los pisos de Rionegro y de La Unión. Las correspondientes curvas de resistividad aparente se encuentran en las Figuras 47 y 48.

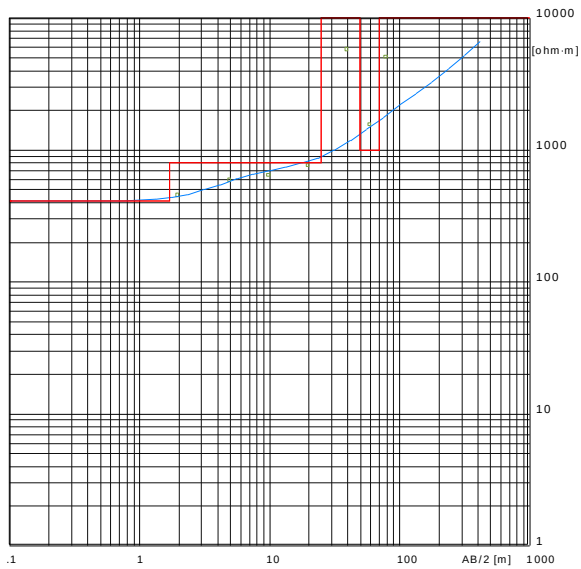


**Figura 47.** Curva de resistividad aparente del sondeo 167 en depósitos de ladera al sur del área urbana de La Ceja.

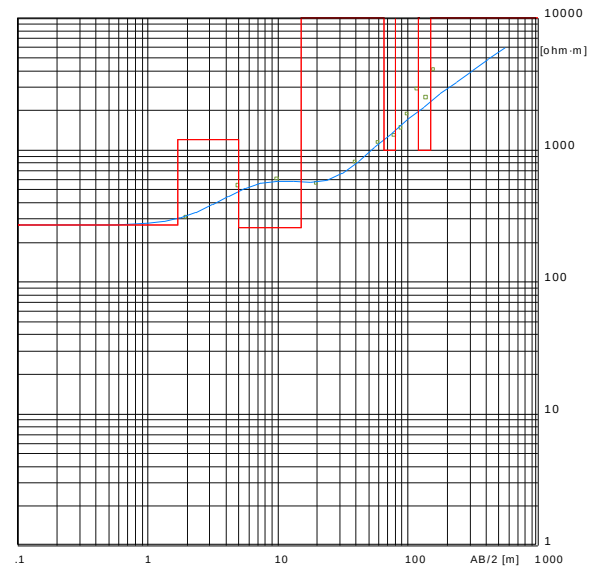


**Figura 48.** Curva de resistividad aparente del sondeo 423 en depósitos de ladera en la Parcelación El Yarumo al norte del área urbana de La Ceja.

En la parte superior del basamento rocoso es común encontrar una fuerte oscilación de la resistividad aparente. El descenso del valor de la resistividad real hasta valores del orden de 1000  $\Omega\text{m}$  puede ser explicado por la existencia de acuíferos confinados en roca fracturada. En las Figuras 49 y 50 se ilustra las curvas de resistividad de dos de los sondeos, 82 y 237, en los que la oscilación de los valores de resistividad puede ser interpretada como indicadora de la ocurrencia de acuíferos confinados

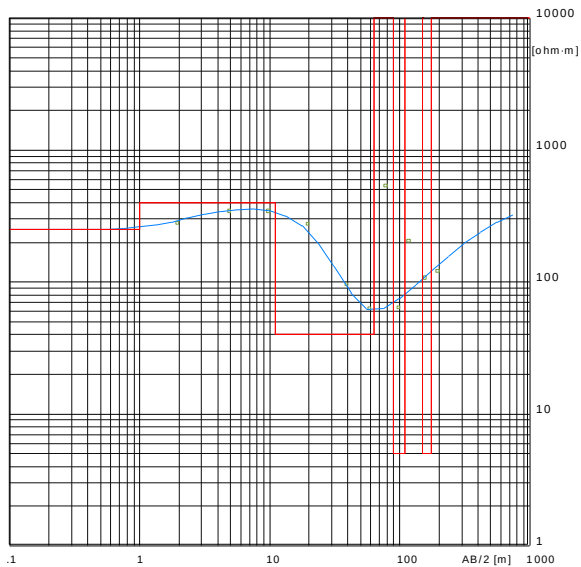


**Figura 49.** Curva de resistividad aparente del sondeo 82.

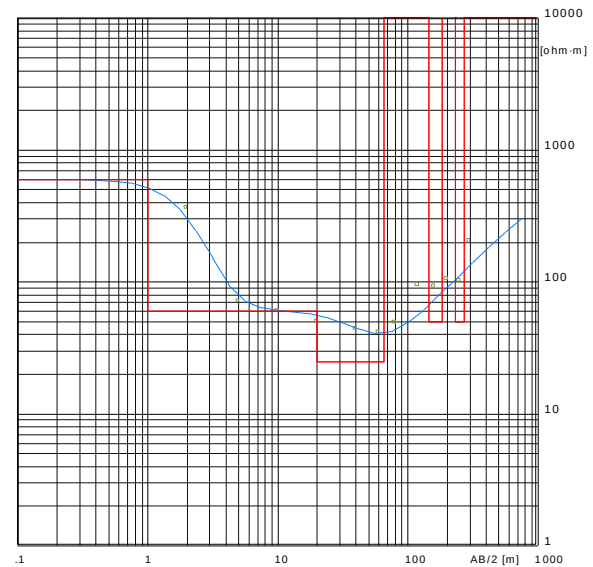


**Figura 50.** Curva de resistividad aparente del sondeo 237.

En ocasiones el valor de la resistividad real puede descender por debajo de  $5 \Omega\text{m}$ . Estos valores mínimos de resistividad en el basamento pueden ser explicados por la ocurrencia de acuíferos salados. La existencia de salados en distintos sitios de la región apoyan esta hipótesis cuya verificación esta por fuera de los alcances de este trabajo. En las Figuras 51 y 52 se ilustra las curvas de resistividad de dos de los sondeos, 20 y 56, en los que la oscilación de los valores de resistividad puede ser interpretada como indicadora de la ocurrencia de acuíferos salobres confinados en el basamento.



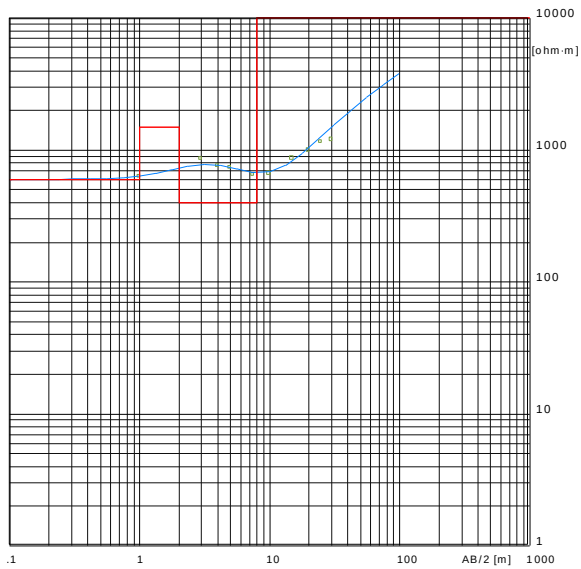
**Figura 51.** Curva de resistividad aparente del sondeo 20



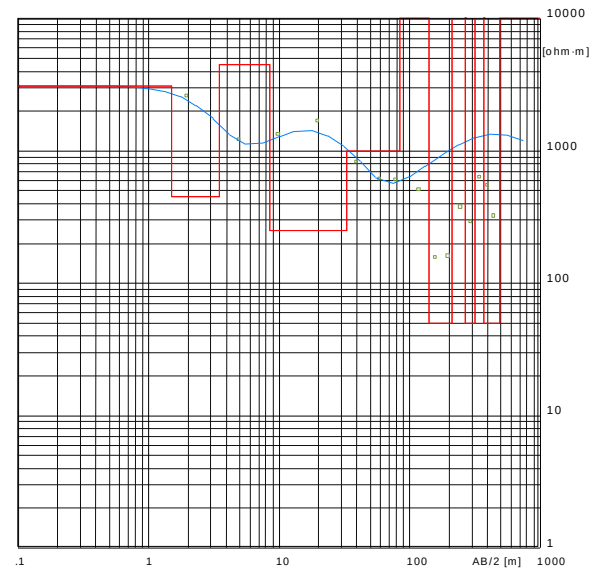
**Figura 52.** Curva de resistividad aparente del sondeo 56.

### *Zona III. Escarpes rocosos.*

Los escarpes rocosos están caracterizados en este trabajo por su posición topográfica y sus rasgos geomorfológicos inconfundibles. La cubierta vegetal que se desarrolla en el delgado estrato de suelo que los cubre no alcanza a ocultar su naturaleza que queda al descubierto en los cauces de las quebradas y en los cortes de las carreteras. En ellos es común encontrar una franja de roca meteorizada y fracturada de unos cuantos metros de espesor cuya resistividad es del orden de 1000  $\Omega m$  que pasa más o menos rápidamente a valores de resistividad del orden de 2000  $\Omega m$  correspondiente a rocas fracturadas y saturadas y luego a los valores corrientes de roca sana por encima de 10000  $\Omega m$ . Las Figuras 53 y 54 ilustran las curvas de resistividad de los sondeos 603 y 904 que consideramos representativos de esta unidad.



**Figura 53.** Curva de resistividad aparente del sondeo 603



**Figura 54.** Curva de resistividad del sondeo 904

La información obtenida en los sondeos eléctricos verticales y la ubicación de los afloramientos rocosos fueron utilizados para generar las isolíneas de resistividad real en superficie y en las cotas 2050 y 2100, en el Altiplano de Rionegro, y en la cota 2450 en el Valle de La Unión, que consideramos de interés para los fines de esta investigación y presentamos en las Figuras 55 a 58.

## FIGURA 55

**FIGURA 56**



**FIGURA 57**

**FIGURA 58**

Por debajo de las cotas 2050 en el altiplano de Rionegro y 2400 en el Valle de La Unión la mayor parte del terreno corresponde al basamento geoelectrico y la información se torna irrelevante desde el punto de vista hidrogeológico, salvo por la existencia de acuíferos confinados en el basamento que trataremos más adelante. Las cotas 2150 en el Altiplano de Rionegro y 2500 en el Valle de La Unión marcan el límite por debajo del cual se encuentra la mayor parte del terreno en cada una de estas unidades y las isolíneas que se generan resultan igualmente irrelevantes. Las isolíneas se presentan como valores numéricos que van de 1 a 9, donde cada uno de estos representa rangos de resistividad que varían según lo anotado en la tabla 2

**Tabla 2.** Rangos de Resistividad

| Clase                | 1    | 2     | 3     | 4     | 5      | 6       | 7       | 8        | 9         |
|----------------------|------|-------|-------|-------|--------|---------|---------|----------|-----------|
| Rangos( $\Omega$ -m) | 0-10 | 10-20 | 20-40 | 40-80 | 80-160 | 160-320 | 320-650 | 650-1500 | 1500-5000 |

## MODELO HIDROGEOLÓGICO

Con base en la información disponible puede presentarse un modelo hidrogeológico regional que explica la recarga y circulación del agua subterránea en el Valle de La Unión y en el Altiplano de Rionegro. El modelo hidrogeológico que presentamos en este capítulo explica y cuantifica la recarga de agua subterránea a partir de la información geológica, hidrometeorológica e hidrogeológica y de los resultados de los sondeos eléctricos verticales.

### ZONAS DE RECARGA.

Las características y la posición de las unidades geomorfológicas mayores permiten postular que **la recarga de la precipitación ocurre en su totalidad en los altiplanos de Rionegro, La Unión y Piedras Blancas - Santa Elena - Las Palmas.** La existencia de depresiones cerradas o dolinas (Feininger, 1970) contribuye de manera significativa a la infiltración en estos altiplanos, en tanto que la infiltración en las laderas de las montañas que los bordean puede considerarse prácticamente nula. El mapa de isopiezas generado a partir de la información obtenida en los sondeos eléctricos verticales y de la localización de los manantiales, aljibes y pozos permite definir las direcciones de flujo del agua subterránea en el área de interés en esta investigación y reconocer las zonas de recarga. En la Figura 59 presentamos el mapa de isopiezas y la red de flujo regional de las aguas subterráneas. En este mapa debe destacarse que el nivel de

la superficie freática se encuentra cerca de la superficie, normalmente a menos de 3 m, salvo en la zona III y en el tercio superior de las colinas de la zona II.

La recarga en el Valle de La Unión entre las cotas 2400 – 2500 corresponde a la precipitación en la cuenca del Río Piedras de la cual se debe sustraer la escorrentía evaluada en el caudal de este río en la estación BP-3 y la evapotranspiración en todo el valle. Esta parte de la recarga alimenta en su totalidad los acuíferos en rocas fracturadas y parcialmente los acuíferos en aluviones y suelos residuales en el Valle de La Unión y en la parte sur del Altiplano de Rionegro.

La recarga en el Altiplano de Rionegro corresponde a la precipitación en la cuenca del Río Negro hasta el sitio conocido como Río Abajo de la cual se debe sustraer la escorrentía evaluada en el caudal de este río en la estación RN-4A y la evapotranspiración en toda la cuenca del Río Negro hasta la vereda Río Abajo en la cota 1980. Esta parte de la recarga regional alimenta en su totalidad los acuíferos en rocas fracturadas en el altiplano y en las laderas de la vertiente sur del Valle de Aburrá y los acuíferos en aluviones de la parte norte del altiplano y parcialmente en la parte sur del mismo, así como parte de los acuíferos en aluviones del Valle de Aburrá (Hoyos et al. 1998).

El peso que puede tener la recarga en los acuíferos de interés para esta investigación a partir de uno y otro piso puede estimarse con base en datos hidrológicos, en la relación entre las áreas de los bordes externos y las del altiplano y el valle, y los gradientes topográficos regionales. La ponderación del aporte de las áreas de recarga propuestas a los diferentes acuíferos puede optimizarse en un futuro mediante el uso de técnicas isotópicas que ya han sido utilizadas en otros proyectos (Hoyos & Arnason, 1998; Hoyos et al 1998, Hoyos & Vélez, 1998).

**FIGURA 59**

En principio puede postularse para efectos de la estimación de la recarga que las tres cuartas partes de la infiltración efectiva en el Valle de La Unión contribuye a la recarga de los acuíferos en este mismo valle, el 2.5% es transferido a los acuíferos del Altiplano de Rionegro, otro tanto alimenta los acuíferos de la vertiente del Río Cauca, y el 20% restante es transferido a los mismo sistemas hidrogeológicos aledaños de la cuenca del río Magdalena.

La infiltración en la cuenca del Río Negro, hasta la estación RN-4A, en la cota 1980 definida como límite inferior para esta investigación, se distribuye de manera aproximada en 10% que alimenta los sistemas hidrogeológicos aledaños en la cuenca del Valle de Aburrá y 90% que llega a los acuíferos del altiplano.

### *EVALUACIÓN DE LA RECARGA*

Para evaluar la recarga en los acuíferos se deben tener en cuenta una serie de consideraciones teóricas; en primer lugar se debe establecer la cantidad de agua que puede recibir el acuífero a partir del cual se llena y las cantidades adicionales de agua que deben salir como escorrentía; también se debe considerar la capacidad que tiene la zona vadosa o zona no saturada del subsuelo para transmitir agua; **la magnitud de la recarga real** se obtiene de un balance hídrico en la cuenca de acuerdo a estos planteamientos. El balance hídrico es la aplicación del principio de conservación de la masa a un volumen de control (en este caso la cuenca del Río Negro o del Piedras); en un período de tiempo dado se establece que la diferencia entre las entradas y salidas del sistema debe ser igual al cambio en la cantidad de agua almacenada. En promedios de largo plazo se puede suponer que el cambio en el almacenamiento es insignificante y la ecuación de balance contiene las siguientes variables:

$$I = P - Q - ETR \pm T$$

- P*: Precipitación promedio multianual (mm)
- Q*: Escorrentía directa promedio multianual (mm)
- ETR*: Evapotranspiración total promedio multianual
- I*: Infiltración total
- T*: Transferencias desde o hacia otras cuencas

### *Precipitación*

En el altiplano de Rionegro se estimó la precipitación total anual promedio multianual para toda la cuenca utilizando el mapa de isoyetas, el cual fue generado en la Fase I del proyecto a partir de información de las estaciones pluviográficas y pluviométricas de toda la zona, ponderando la precipitación con la superficie entre isoyetas; la precipitación promedio obtenida para la cuenca del Río Negro hasta la estación Rioabajo es 2150 mm. Para el altiplano de La Unión se tomó el valor de precipitación total anual (promedio multianual) de la estación La Unión que es 2440 mm.

### *Escorrentía*

En la evaluación de la escorrentía en el altiplano de Rionegro se utilizó información de las estaciones Puente Real y Río Abajo RN-4A operadas por el Ideam y EEPPM respectivamente; en la estación Puente Real se dispone de registros de caudales medios, máximos y mínimos mensuales en el período comprendido entre 1974 y 1991 con información faltante en los años 1985 y 1986; en la estación Rioabajo se tienen los promedios mensuales y anuales multianuales para 29 años de registros reportados en el anuario hidrometeorológico de EEPPM. En el Valle de La Unión se utilizó información de la estación BP-3 disponible en ese mismo anuario; esta estación sólo fue operada durante un año y no cuenta con registro de caudales mínimos.

El procedimiento utilizado para determinar la escorrentía promedio multianual consiste en descontar al caudal medio multianual del caudal base supuesto como el caudal mínimo promedio multianual. En la estación Rioabajo, se extrapoló el caudal mínimo de la estación puente Real usando el método de los rendimientos hidrológicos, o de manera equivalente, expresando los valores en términos de volumen de agua total acumulada en un año por unidad de área, es decir, en lámina, debido a que no se tienen registros de caudales mínimos. En la cuenca del Río Negro el área fue corregida para considerar la intervención debida al aprovechamiento de la quebrada Las Palmas y el Río Pantanillo.

En el río Piedras se aplicó un procedimiento similar extrapolando el caudal mínimo desde la estación Puente Real; en la Tabla 3 se presenta la escorrentía directa estimada en las estaciones Puente Real y Rioabajo en el Río Negro y en la estación BP-3 en el río Piedras.

**Tabla 3.** Escorrentía calculada para las estaciones de interés

| <i>VARIABLE</i>                                    | <i>Puente Real</i> | <i>Río Abajo</i> | <i>Piedras BP-3</i> |
|----------------------------------------------------|--------------------|------------------|---------------------|
| <i>Caudal medio Multianual (m<sup>3</sup>/seg)</i> | 7.4                | 27.3             | 3.3                 |
| <i>Volumen (Hm<sup>3</sup>)</i>                    | 232.7              | 860.9            | 104.1               |
| <i>Area (km<sup>2</sup>)</i>                       | 194                | 715              | 100                 |
| <i>Caudal base (m<sup>3</sup>/seg)</i>             | 3.02               | 7.97             | 0.95                |
| <i>Lámina base (mm)</i>                            | 490                | 490              | 490                 |
| <i>Lámina total (mm)</i>                           | 1204               | 1204             | 1204                |
| <i>Lámina escorrentía directa (mm)</i>             | 713                | 713              | 713                 |

### *Evaporación*

Para estimar la evaporación se aplicaron las metodologías de Turc, Coutagne (Universidad Nacional, 1999) y Cenicafé (Jaramillo, 1989), que se basan en datos meteorológicos sencillos de medir, y el método de tanque evaporímetro con un coeficiente de uso consecutivo de agua en las plantas  $K = 0.7$  aplicado a los datos de la estación La Selva ubicada en Llanogrande.

#### *Ecuación de Turc*

Se utiliza para estimar la evaporación real basándose en un balance de masas, en función de elementos meteorológicos simples como son la temperatura y la precipitación de la cuenca, aplicadas a medidas de largo plazo.

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad \text{para } (P / L) > 0.316$$

$$ETR = P \quad \text{para } (P / L) < 0.316$$

$$L = 300 + 25 T + 0.05 T^3$$

ETR es la evaporación real en mm/año, P es la precipitación anual en mm y T es la temperatura media anual en grados centígrados. (Remenieras, 1974).



Ecuación de Coutagne.

Esta ecuación se basa en las características meteorológicas de la cuenca y da una estimación de la evaporación real en función de la precipitación y la temperatura así:

$$ETR = P - \lambda P^2$$

ETR es la evaporación real en m / año, P es la precipitación en m, y

$$\lambda = \frac{1}{0.8 + 0.14T} ,$$

T es la temperatura media anual en °C. Esta ecuación sólo es aplicable para P comprendido entre  $(8\lambda)^{-1}$  y  $(2\lambda)^{-1}$ , si las precipitaciones son inferiores a  $(8\lambda)^{-1}$  entonces  $ETR=P$ , Si  $P > (2\lambda)^{-1}$ , entonces  $ETP=(4\lambda)^{-1} = 0.20 + 0.035T$  (Remenieras, 1974).

*Ecuación de Cenicafé*

Fue obtenida por el Centro Nacional de Estudios del Café a partir de una regresión a los valores obtenidos de aplicar el método de Penman a los datos de las estaciones climáticas en Colombia (Jaramillo, 1989). Su cálculo es sencillo, ya que sólo depende de la altura sobre el nivel del mar

$$ETR = 4.658 \exp(-0.0002 h)$$

ETR es la evaporación potencial en mm/día y h es la cota sobre el nivel del mar en m.

En la Tabla 4 se presentan los resultados de evaporación promedia anual, en milímetros, obtenidos con los métodos mencionados en los altiplanos de Rionegro y La Unión descartando el método de Cenicafé que aparentemente la sobreestima.

**Tabla 4.** Resultados de evaporación real anual por diferentes métodos

| <i>Método</i>       | <i>Rionegro</i> | <i>La Unión</i> |
|---------------------|-----------------|-----------------|
| <i>Turc</i>         | 861             | 776             |
| <i>Contagne</i>     | 774             | 707             |
| <i>Cenicafé</i>     | 1095            | 1042            |
| <i>Tanque K=0.7</i> | 840             | -               |
| <i>Promedio</i>     | 825             | 740             |

### *Recarga Estimada*

Con base en la información presentada en los apartes anteriores fue calculada la recarga en los dos pisos considerados en este informe con los resultados siguientes:

- *Rionegro*       $I = 2150 - 714 - 825 - 61 = 550 \text{ mm/año}$

Esta cifra se asemeja razonablemente con la lámina de caudal base en la estación RN-4 A. La diferencia puede ser atribuida a la incertidumbre en la estimación de los valores utilizados en la evaluación de la recarga.

- *La Unión*       $I = 2440 - 740 - 714 - 250 = 735 \text{ mm/año}$

En este caso la diferencia entre el valor estimado de la infiltración y el caudal base del Río Piedras en la estación BN-3 obedece a la carencia de información hidrológica de largo plazo en su cuenca y a las suposiciones de las se partió en la estimación de la recarga.

### *ACUÍFEROS*

El conjunto de resultados obtenidos en esta investigación indica que la totalidad del área del proyecto tiene potencial hidrogeológico y bien puede considerarse que no existen discontinuidades mayores en sentido horizontal como lo indica la red de flujo ilustrada en la Figura 59.

Los acuíferos de la región pueden clasificarse en cuatro grandes categorías:

- *Acuíferos libres en aluviones*
- *Acuíferos libres en suelos residuales*

- **Acuíferos libres en rocas fracturadas**
- **Acuíferos confinados en rocas fracturadas**

Los acuíferos libres en aluviones son los más atractivos por su rendimiento probable, en tanto que los acuíferos libres en suelos residuales tienen interés por su amplia distribución y su homogeneidad. Los acuíferos libres en rocas fracturadas tienen un interés sólo marginal. La existencia de acuíferos salados o salobres, tanto en aluviones como en basamento rocoso, debe recibir atención especial por sus implicaciones geológicas e hidrogeológicas.

#### *Acuíferos libres en aluviones.*

Las vegas aluviales y las terrazas bajas de los ríos Negro y Pereira, y de las quebradas La Mosca, Marinilla y Cimarrona forman un cuerpo continuo digitado que tiene su mayor amplitud en el sector de Belén donde confluyen las quebradas Marinilla y La Mosca con el Río Negro. Los depósitos aluviales de esta formación están compuestos predominantemente por arenas y limos y en menor medida por gravas. En la Figura 60 se ilustra la localización y extensión en planta y profundidad de estos acuíferos. La profundidad registrada de los depósitos aluviales en esta unidad tiene un máximo de 22 m y una moda de 12 en los ríos Negro y Pereira y en la quebrada La Mosca; en la quebrada Cimarrona los registros de profundidad del depósito aluvial alcanzan un máximo de 8 m con una moda de 4 m.

Por fuera del cuerpo principal de aluviones ya descrito debe considerarse dos acuíferos menores pero que pueden tener una importancia local en la Hacienda Fizebad y en las afueras del área urbana del municipio de El Retiro. Ambos tienen una extensión inferior a 100 hectáreas, están formados principalmente por arena y grava, y en menor cantidad por limos, y presentan como característica común una señal de resistividad baja en profundidad que puede ser interpretada como indicadora de presencia de agua salada en el aluvión.

Los aluviones del Río Pereira y de la quebrada La Mosca están también divididos por sendos estrechamientos relativamente cortos en el sector de San Antonio en el primero y cerca de la bifurcación de la carretera a San Vicente en la segunda. En el caso del Río Pereira la extensión del aluvión es mayor en la parte alta de la cuenca.

## FIGURA 60

La recarga de estos acuíferos tiene lugar parcialmente por infiltración directa de la precipitación local y parcialmente por la recarga desde el altiplano de la Unión para los aluviones de los ríos Negro y Pereira, y las quebradas Cimarrona y Marinilla, y desde el altiplano de Las Palmas - Santa Elena - Piedras Blancas para los aluviones de la quebrada La Mosca. En dichos aluviones es posible encontrar fuentes saladas. La resistividad real igual o inferior a 5  $\Omega\text{m}$  en estos aluviones, en zonas donde es conocida la existencia de fuentes saladas, ha sido interpretada como indicador de la presencia de acuíferos salados

#### *Acuíferos libres en suelos residuales.*

Puede considerarse que en la totalidad de la extensión del área del proyecto por debajo de la cota 2200 en el altiplano de Rionegro existen acuíferos libres en los suelos residuales cuya recarga tiene lugar tanto por infiltración de la precipitación local como por recarga desde los altiplanos vecinos. La misma afirmación puede hacerse del regolito por debajo de la cota 2500 en el Altiplano de la Unión. Es posible establecer algunas diferencias locales entre acuíferos propiamente dichos y acuitardos dependiendo de la textura y permeabilidad de los diferentes horizontes. Para efectos de la interpretación regional tomaremos 120  $\Omega\text{m}$  como el límite inferior de resistividad que caracteriza los acuíferos. Por debajo de este valor consideraremos que la formación se encuentra en la categoría de acuitardo. En estas condiciones el mapa de isopacas presentado en la Figura 8 corresponde de manera muy aproximada al mapa de acuíferos en suelos residuales. Si a este mapa se le superpone el mapa de acuíferos libres en aluviones queda definido de manera completa el panorama de los acuíferos libres en la zona investigada.

En los suelos residuales es posible encontrar acuíferos y fuentes saladas. La resistividad real igual o inferior a 10  $\Omega\text{m}$  en estos suelos ha sido interpretada como indicador de la presencia de acuíferos salados.

#### *Acuíferos libres en rocas fracturadas.*

En los escarpes rocosos entre las superficies de erosión SI y SII, y en la zona noroccidental del área investigada, donde el regolito es muy somero o inexistente, puede encontrarse acuíferos cuya ocurrencia depende principalmente de la intensidad y del patrón de fracturación de la roca. El área de recarga de estos acuíferos se encuentra entre las cotas 2400 – 2500 alrededor del Altiplano de Rionegro a través de las zonas de falla. Su interés es estrictamente local

### *Acuíferos confinados en rocas fracturadas.*

Cuando la variación de resistividad en la parte superior del basamento permitan interpretarla como roca fracturada con agua en las diaclasas, hemos tomado éste como un acuífero confinado cuyo acuícludo corresponde al sello de limo en las fracturas de la roca. Estos acuíferos pueden ser de agua dulce en intervalos de resistividad del orden de 1000  $\Omega\text{m}$ , y de agua salada en intervalos de resistividad inferiores a 100  $\Omega\text{m}$ .

Los acuíferos confinados en el basamento se encuentran distribuidos en varios niveles y áreas bien definidos. Los acuíferos confinados en el basamento se encuentran en una amplia extensión en el sector norte del área investigada entre los municipios de Guarne y San Vicente distribuidos en dos niveles alrededor de las cotas 1900 y 2000; alrededor de los municipios de Rionegro y El Santuario los acuíferos confinados se encuentran concentrados alrededor de la cota 1900. En las Figuras 61 y 62 se encuentra la distribución de estos acuíferos.

### *Acuíferos salobres.*

Un rasgo frecuente en los registros geoelectricos en amplias zonas del Oriente Antioqueño, es la ocurrencia de zonas de muy baja resistividad que, en ocasiones, disminuye a valores menores que 10  $\Omega\text{m}$  en el regolito y que 100  $\Omega\text{m}$  en el basamento geoelectrico. Estos valores mínimos pueden ser interpretados como indicadores de la existencia de acuíferos salobres. Si bien es cierto que los valores inferiores a 10  $\Omega\text{m}$  en el regolito puede ser interpretado como indicadores de la existencia de arcillas saturadas, la interpretación de estos valores como indicadores de la existencia de acuíferos salobres es más plausible dada la escasez de arcillas en los regolitos tropicales y la existencia de manifestaciones de aguas saladas en superficie y elementos toponímicos que coinciden espacialmente con los registros geoelectricos que han sido interpretados de esta manera. La existencia de fuentes saladas en la región, algunas de las cuales fueron objeto de explotación industrial hasta bien entrado el siglo XX, es un elemento de juicio adicional que permite interpretar las señales de baja resistividad como indicadoras de la ocurrencia de acuíferos salobres. Existe además el antecedente cercano en la vertiente occidental del Valle de Aburrá donde se encontró un acuífero salado en el basamento con una concentración de sales de 165 g/l, durante la excavación de uno de los túneles del Proyecto Río Grande.

Los acuíferos salados pueden ser un importante recurso para la instalación de una industria química en la región.

**FIGURA 61**

## FIGURA 62



La composición química de estos acuíferos esta dominada por la presencia de iones de cloro, bromo, yodo, sulfato, carbonato, hierro, calcio magnesio, sodio y potasio. La concentración de iones en las fuentes saladas presenta una variación tal que no permite hacer una estimación sobre las características particulares de los acuíferos salados y salobres cuya existencia postulamos con base en la información geoelectrica generada en este estudio. Sin embargo, los valores extremadamente bajos de resistividad aparente indican que las concentraciones de sales solubles pueden ser elevadas.

El contenido elevado de potasio y magnesio de las fuentes saladas en Antioquia (Grosse, 1926; Vélez & Restrepo, 1997, White, 1939) hace este recurso atractivo desde el punto de vista de los productos que pueden obtenerse mediante un proceso de producción limpia que consiste básicamente en la precipitación del hidróxido de magnesio y la cristalización por evaporación de los haluros. Cada uno de los productos de esta industria tiene un amplio mercado en la agricultura y en la industria moderna de refractarios, caucho, productos farmacéuticos, etc.

Los acuíferos salobres en el regolito se concentran al norte de las cabeceras municipales de La Ceja y El Retiro y al occidente de la cabecera municipal del El Santuario. Los acuíferos salobres en el basamento rocoso son uno de los rasgos más destacados en esta región con una amplia distribución en la parte sur del altiplano donde han sido identificados al menos tres niveles de ellos en las cotas 1900, 2000 y 2300. El acuífero salobre de la cota 1900 se extiende en una amplia zona entre El Retiro, La Ceja y Rionegro, en tanto que en el Valle de La Unión y en el Planalto de Santa Elena (Hoyos, 2000) tales acuíferos se encuentran alrededor de la cota 2300. En las Figuras 61 y 62 se ilustra la localización de los sondeos donde la señal de resistividad fue interpretada como indicadora de acuíferos salobres en las cotas 1900 y 2000 y la Figura 63 en la cota 2300.

Los acuíferos salados pueden contaminar los acuíferos corrientes cuando los pozos son perforados hasta el nivel de agua salada. La exploración previa a la construcción del pozo mediante métodos geoelectricos permite identificar los niveles de acuíferos salobres y tomar las medidas más apropiadas en el diseño y construcción de los pozos. En principio, cuando se identifique y localice un acuífero salobre los pozos deberán perforarse sólo hasta una cota tal que deje un techo de 30 m entre el acuífero salobre y el fondo del pozo. En caso de pinchar accidentalmente un acuífero salobre, la rejilla inferior deberá estar separada al menos 30 m del acuífero salobre.

**FIGURA 63**

## ZONIFICACIÓN PARA EL APROVECHAMIENTO Y CONSERVACIÓN DEL RECURSO AGUA SUBTERRÁNEA

Los resultados de esta investigación permiten refinar la zonificación que se había propuesto en la primera fase de este estudio.

La zona de alto potencial hidrogeológico, que corresponde a aquella donde es elevada la probabilidad de encontrar agua subterránea en condiciones de explotación eficiente y económica, debido a las características de transmisividad del terreno, debe definirse en términos geomorfológicos como la zona de aluviones y terrazas bajas. La extensión total del terreno en esta categoría es de 70 km<sup>2</sup> y su capacidad de almacenamiento es de  $2.1 \times 10^8$  m<sup>3</sup>. El valor de la capacidad de almacenamiento resulta de multiplicar el volumen total de los depósitos aluviales por su porosidad media, para la que hemos tomado un valor típico de aluviones, igual a 45%. Esta zona corresponde igualmente a la zona de recarga cualitativamente más importante dada su capacidad de infiltración elevada y su topografía plana.

La zona de potencial hidrogeológico alto está dedicada en su mayor parte a actividades pecuarias y, en segundo término, está ocupada por viviendas y algunas instalaciones hoteleras, industriales y agroindustriales. Esta zona no tiene restricciones especiales al uso en el acuerdo 016 de 1998. Sin embargo, los desechos líquidos de las viviendas y de las instalaciones hoteleras, industriales y agroindustriales pueden ser una importante fuente de contaminación a partir de los pozos sépticos y de sus campos de infiltración o de las lagunas de oxidación de las plantas industriales.

La zona de potencial hidrogeológico medio tiene una extensión de 610 km<sup>2</sup> y corresponde a las terrazas altas y colinas saprolíticas, donde la transmisividad del terreno es menor y explotación del agua subterránea tiene un costo más elevado. La capacidad de almacenamiento en esta zona es de  $2.6 \times 10^{10}$  m<sup>3</sup>. El valor de la capacidad de almacenamiento resulta de multiplicar el volumen total del regolito por su porosidad, para la que hemos tomado un valor típico en los horizontes de saprolito y gruss de granitoides, igual a 55%. Esta zona coincide en gran medida con la zona definida como zona de aptitud forestal en el acuerdo 016 de 1998, y corresponde a la zona de recarga cuantitativamente más importante desde el punto de vista de su extensión. Su potencial hidrogeológico tiene espacial importancia dados la extensión y el espesor de los acuíferos que se encuentran en ella.

Los usos del suelo en esta zona incluyen todas las actividades que se desarrollan en la región: agropecuarias, agroindustriales, industriales, comerciales, de servicios y vivienda, y en ella ocurre la mayor parte de la contaminación del agua subterránea por vertimientos líquidos en superficie procedentes de las viviendas y de e instalaciones agropecuarias e industriales, y por el vertimiento subterráneo de los pozos sépticos y de sus campos de infiltración. No es conocido aún el efecto que ha tenido el uso de agroquímicos, tanto de las explotaciones tradicionales como de los cultivos de flores, en las aguas subterráneas. Sin embargo, es de esperar que el uso prolongado de agroquímicos afecte la calidad del agua subterránea y que dicho efecto sea inversamente proporcional a la profundidad. Debe tenerse en cuenta que la contaminación por agroquímicos en zonas donde se ha desarrollado una actividad agropecuaria en los últimos cien años puede superar los niveles aceptados en las normas internacionales hasta profundidades mayores de 100 m. (Hoyos, 1985). La intensa actividad agrícola tradicional en el Valle de La Unión, y la reciente expansión de la agroindustria de las flores hacen conveniente un cuidadoso examen de la calidad de las aguas subterráneas, y la adopción de medidas para controlar la contaminación futura de los acuíferos.

En las zonas de potencial hidrogeológico alto y medio, conviene estimular la construcción de alcantarillados y plantas locales de tratamiento que minimicen la contaminación por vertimiento subterráneo de desechos líquidos, particularmente en las instalaciones industriales, agroindustriales y hoteleras. En su defecto debe promocionarse la construcción y el uso de sistemas mejorados de pozos sépticos.

La definición de la zona de potencial hidrogeológico bajo, que coincide con las definidas como zonas de protección en el artículo segundo del acuerdo 016 de 1998, queda sin modificación respecto a los términos de la Fase I de este estudio. La recarga en estas zonas es mínima y, por el contrario ellas constituyen en su conjunto áreas locales de descarga. La protección acordada en la norma para estas zonas tiene sólo una incidencia secundaria en el sistema hidrogeológico. De tales zonas, sólo tiene interés desde el punto de vista de la recarga el Planalto de Santa Elena, tanto en la cuenca del Río Negro como en la cuenca del Río Medellín.

Como criterio general en el altiplano de Rionegro puede tomarse la cota 2100 hasta 2140 como límite entre las zonas de potencial hidrogeológico alto y medio. A lo largo de la vega del Río Negro y de la Quebrada La Mosca el límite entre ambas unidades está marcado por las cotas 2100-2120 con los valores más altos

aguas arriba en los sectores de El Tablazo y del Hipódromo Los Comuneros. En las quebradas Cimarrona y Pereira el límite está dado aproximadamente por la cota 2110 - 2140, con los valores más altos en la vecindad de las cabeceras municipales de El Carmen de Viboral y de La Ceja.

En la Figura 64 se encuentra la distribución espacial de estas unidades o zonas de potencial hidrogeológico

El manto de cenizas volcánicas es prácticamente ubicuo en las zonas de potencial hidrogeológico alto y medio, se encuentra discontinuo en la zona de potencial hidrogeológico bajo, y no existe en las vegas aluviales sometidas a inundaciones periódicas. Dicho manto constituye un elemento clave en los procesos de infiltración y debe hacerse todos los esfuerzos por su conservación estimulando prácticas agrícolas apropiadas. Cuando los proyectos urbanísticos y de infraestructura obliguen a retirar la capa de ceniza volcánica debe aprovecharse ésta para recuperar canteras y sitios degradados por la erosión, dando aplicación al acuerdo 093 de 2000 del Consejo Directivo de Cornare.

## FIGURA 64

## ELEMENTOS PARA LA REGLAMENTACIÓN DEL USO Y MANEJO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL ALTIPLANO DE RIONEGRO Y EL VALLE DE LA UNIÓN.

El objetivo estratégico del programa de investigación de aguas subterráneas en la región de los Valles de San Nicolás es contar con elementos de juicio sólidos para la planeación del uso, manejo y conservación del agua subterránea. Los resultados presentados en los capítulos anteriores permiten proponer unos criterios generales de reglamentación de las aguas subterráneas en los municipios de Guarne, San Vicente, Rionegro, El Carmen de Viboral, Marinilla, La Ceja, El Retiro, y La Unión, y enunciar algunos proyectos y estudios que conviene adelantar para el mejor conocimiento y manejo de este recurso.

### *Consideraciones generales*

El conocimiento del recurso agua subterránea y de las condiciones generales de oferta y demanda hídrica en la jurisdicción de CORNARE son los elementos básicos de planeación su uso y manejo.

Al definir el manejo del agua subterránea debe considerarse la totalidad de la cuenca como un acuífero que, si bien puede presentar variaciones en sus características locales, no presenta discontinuidades laterales importantes. La mayor parte de la recarga tiene lugar por debajo de la cota 2150 en el Altiplano de Rionegro y por debajo de la cota 2500 en el Valle de La Unión. Desde el punto de vista de la recarga y de las políticas de conservación y manejo pueden definirse tres cotas que servirán como niveles de referencia en la reglamentación: la cota 2120 como nivel de los aluviones y las terrazas bajas en el Altiplano de Rionegro, la cota 2150 como nivel de las terrazas altas en este mismo altiplano y la cota 2500 como el nivel de control en el Valle de La Unión.

Debe tenerse en cuenta además como criterio en la definición de las políticas de manejo de las cuencas de los ríos Negro y Piedras y de sus aguas subterráneas que la recarga en éstas alimenta tanto los acuíferos como el caudal medio de ambos ríos. En consecuencia, la conservación del sistema hidrogeológico y el control de la contaminación de los acuíferos es vital para asegurar los caudales y la calidad del agua en estos ríos.

El nivel de conocimiento que hoy existe sobre la hidrología y la hidrogeología de la zona es de carácter regional, útil para fines de planeación y de manejo, pero insuficiente para definir algunos aspectos de reglamentación o de aplicaciones particulares que pueden ser necesarios en el futuro. En particular no se cuenta

aún con valores de rendimiento y de transmisividad típicos de los diferentes horizontes identificados en los sondeos eléctricos verticales. Estos valores son indispensables para determinar la distancia máxima admisible entre pozos sin que se presente interferencia en su operación.

No se cuenta con información sistemática sobre la calidad del agua subterránea y, menos, sobre el efecto que tienen sobre ella las explotaciones agrícolas y pecuarias, tradicionales o modernas, los desechos líquidos industriales, los pozos sépticos, las estaciones de servicio, los rellenos sanitarios, las plantas industriales y otros focos de contaminación.

En general los niveles freáticos se encuentran a menos de 3 metros bajo la cota del terreno en toda la zona investigada. Esto hace que los acuíferos libres en el regolito sean sumamente vulnerables a la contaminación.

La ocurrencia común de niveles con valores muy bajos de resistividad aparente y real que han sido interpretados como indicadores de acuíferos salobres, tanto en el regolito como en el basamento rocoso, pueden constituir una limitante para el aprovechamiento de las aguas subterráneas en algunos sectores.

No se cuenta aún con una evaluación de vulnerabilidad de los acuíferos, y de los focos de contaminación, presentes o potenciales que permita definir los riesgos a que está sometida la calidad del agua subterránea.

No existe una reglamentación sobre el manejo, aprovechamiento, uso y conservación del agua subterránea que vincule legalmente a los habitantes de la región en general, y a los usuarios de este recurso en particular.

De estas consideraciones generales se siguen algunas recomendaciones sobre políticas y acciones que conviene hacer explícitas para su discusión y futura adopción y ejecución.

#### *Políticas y acciones para la planeación, el manejo y la conservación del agua subterránea*

Conviene a CORNARE recopilar y mantener un banco de datos con la información hidrogeológica disponible en la región. CORNARE, como autoridad ambiental en la región, está en condiciones de obtener la información generada por los usuarios de este recurso. La información recopilada y generada en esta investigación constituye un elemento básico para la puesta en marcha de dicho banco de datos.



El banco de datos hidrogeológico debe comprender:

- Información sobre afloramientos, aljibes y manantiales que incluya:
  - ▲ Localización georreferenciada.
  - ▲ Caudal con la fecha de observación y anotación sobre variaciones temporales.
  - ▲ Protección.
  - ▲ Propietario.
- Información sobre pozos profundos que incluya:
  - ▲ Localización georreferenciada.
  - ▲ Caudal con la fecha de observación y anotación sobre variaciones temporales.
  - ▲ Parámetros hidráulicos del acuífero.
  - ▲ Diseño del pozo.
  - ▲ Datos de la prueba de bombeo.
  - ▲ Propietario.
- Información de sondeos eléctricos verticales que incluya:
  - ▲ Localización georreferenciada.
  - ▲ Datos de campo (valores de AB,MN, potencial espontáneo, diferencia de potencial medido, Intensidad de corriente).
  - ▲ Curvas de resistividad aparente.
  - ▲ Interpretación en términos de modelo geoelectrico y modelo hidrogeológico.
  - ▲ Criterios de interpretación.
- Información sobre fuentes saladas que incluya:
  - ▲ Localización georreferenciada.
  - ▲ Caudal de la fuente.
  - ▲ Composición química del agua.
  - ▲ pH del agua.
  - ▲ Propietario.
  - ▲ Uso histórico.
  - ▲ Uso actual.

La investigación cuyo informe final se encuentra en este documento debe ser complementada con:

- La ejecución de pruebas de bombeo en los pozos existentes en la región con el objeto de estimar los parámetros hidráulicos del acuífero y su correlación

con los valores de resistividad y con la caracterización geoelectrica obtenidos en esta investigación.

- El balance hídrico detallado de la zona, que incluya la evaluación de los caudales mínimos de las fuentes de agua superficiales asociados a varios períodos de retorno.
- La evaluación de la calidad química y bacteriológica del agua subterránea y de las corrientes con un programa de monitoreo periódico que permita evaluar su evolución y la relación que guarde con actividades agropecuarias, agroindustriales e industriales.
- La elaboración de un mapa de vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación, que permita la adopción de normas apropiadas para la explotación de aguas subterráneas en las zonas más susceptibles a la contaminación. La preparación de este mapa no es parte de los alcances de este trabajo y debe ser objeto de un convenio adicional en el que se fije de manera explícita los objetivos y alcances del estudio que tenga como resultado la elaboración de dicho mapa. En la preparación del mapa de vulnerabilidad debe considerarse como elementos básicos de entrada:
  - ▲ El mapa de pendientes.
  - ▲ El uso del suelo.
  - ▲ El espesor del regolito.
  - ▲ La caracterización hidráulica de las formaciones superficiales y del regolito
  - ▲ La profundidad del nivel freático.
- Con base en esta información se evaluará la susceptibilidad local de los acuíferos a la contaminación desde la superficie mediante la calificación paramétrica de los factores que la controlan y se le asigna una calificación del tipo índice. El mapa se obtendrá mediante la regionalización de los valores locales de susceptibilidad.
- La identificación localización y caracterización de los focos actuales de contaminación hídrica. No forma parte de los alcances de este contrato la identificación y caracterización de los focos actuales de contaminación. Una enumeración no taxativa de los tipos de focos de contaminación en el área de estudio comprende:
  - ▲ Rellenos sanitarios.
  - ▲ Pozos sépticos.
  - ▲ Explotaciones pecuarias (porquerizas, caballerizas, establos, gallineros).
  - ▲ Cultivos industriales (flores, frutas).
  - ▲ Cultivos tradicionales (hortalizas, maíz, papa, flores).
  - ▲ Estaciones de servicio.
  - ▲ Plantas industriales.
  - ▲ Vertimientos de alcantarillado a las corrientes superficiales.

- La caracterización de los focos de contaminación debe incluir:
  - ▲ Actividad que genera la contaminación.
  - ▲ Sustancias contaminantes (nombre común, denominación industrial o comercial, composición química, densidad, viscosidad).
  - ▲ Cantidad de sustancias vertidas discriminadas según tipo de sustancia por unidad de tiempo.
  - ▲ Duración de la actividad, señalando el tiempo de iniciación, las variaciones temporales que hayan ocurrido y el tiempo estimado hacia el futuro.
  - ▲ Tratamiento utilizado antes del vertimiento y tipo de control o de seguimiento que siga el operador de la fuente de contaminación.
  - ▲ Modo de vertimiento (en superficie, lagunas de oxidación, a corrientes superficiales, pozos ciegos).
- Caracterización de focos potenciales de contaminación hídrica.
- La instalación de una red de 50 piezómetros, 40 en el Altiplano de Rionegro y 10 en el Valle de la Unión con el objeto de hacer un seguimiento de las variaciones estacionales, y las inducidas por la explotación del acuífero.
- La perforación de 10 pozos de prueba que permitan la verificación de la interpretación del subsuelo propuesta en esta investigación, la evaluación de los parámetros hidráulicos del acuífero y su correlación con los valores de resistividad y con la caracterización geoelectrica obtenidos en esta investigación.
- La evaluación detallada de los niveles de baja resistividad y su relación con los ojos de aguasal o salados con el objeto de validar la interpretación ofrecida en esta investigación y definir el potencial y las limitaciones que plantean estos acuíferos.

*Elementos para la reglamentación del uso, aprovechamiento, manejo y conservación de las aguas subterráneas en la Región de los Valles de San Nicolás.*

Corresponde a CORNARE reglamentar las actividades relacionadas con el manejo, conservación, uso y aprovechamiento de las aguas subterráneas en su jurisdicción, incluidas las que puedan afectar su cantidad o calidad, así no estén directamente asociadas a su explotación, para establecer los mecanismos legales y técnicos para su control y manejo. La elaboración de la propuesta de reglamentación debe estar a cargo de un equipo de especialistas en aguas subterráneas y expertos en derecho administrativo y ambiental. Dicha reglamentación debe tener como base el marco legal y administrativo vigente en el país y ser concertada con las autoridades locales, los gremios, las

organizaciones cívicas y los habitantes de la región, que son usuarios presentes o potenciales del recurso.

El objetivo de la reglamentación del uso, aprovechamiento, manejo y conservación del agua subterránea es asegurar la oferta de agua en cantidad y calidad suficiente y adecuada para el desarrollo sostenible de la región. Concomitante con la reglamentación CORNARE debe definir una política institucional de relaciones con los usuarios del agua subterránea, los consultores en hidrogeología vinculados a la región y los perforadores de pozos, y de difusión en toda la población, que estimule su adopción y aplicación, haciendo énfasis en la importancia del recurso y en los beneficios en el corto y largo plazo de un manejo eficiente y racional del recurso.

La reglamentación sobre aguas subterráneas deberá considerar como componentes básicos la prospección, la perforación, la operación, la conservación, y el control de contaminación:

#### *Sobre la prospección*

En el proceso de exploración y prospección de aguas subterráneas, CORNARE pondrá a disposición de los interesados la información que exista en su centro de documentación sobre el área objeto de investigación. El Consejo Directivo de **CORNARE** definirá el costo del acceso a esta información.

La exploración y prospección básicas para obtener la licencia de perforación y funcionamiento de un pozo debe contemplar los siguientes aspectos:

- Elaboración de la cartografía geológica de superficie de la zona donde se explora en busca de agua subterránea a escala 1:10000 o mayor. La cartografía geológica de superficie debe ser preparada de manera específica para la prospección del agua subterránea y no puede limitarse a la simple recopilación de la información existente y el cambio de escala en los mapas publicados por el Ingeominas o por otras instituciones, por ampliación mecánica, fotostática, o por otro sistema cualquiera, de la cartografía disponible a escalas menores. Como criterio general se considera que la cartografía a escala 1:10 000 requiere una densidad mínima de información equivalente a un punto de observación por cada veinticinco hectáreas. La cartografía de detalle

debe ser contextualizada, conceptual y gráficamente, con la geología regional a escala 1:50 000 o 1:100 000.

- La información geológica de superficie debe complementarse con información del subsuelo obtenida mediante métodos de prospección geofísica que pueden incluir sondeos sísmicos, geoelectrónicos, u otras técnicas apropiadas. **CORNARE** pondrá a disposición de los interesados la información existente en su centro de documentación. El número y profundidad de los sondeos será definido de acuerdo con la extensión del área afectada por la solicitud; como criterio general se considera que es necesario un sondeo por cada 25 hectáreas, con un mínimo de 2 sondeos para el caso de un pozo singular. La información del subsuelo debe complementarse con la información disponible que exista sobre el área de interés. Los resultados de estos sondeos con sus respectivas interpretaciones se deben entregar a **CORNARE**.
- Evaluación de la recarga de la zona donde va a estar ubicado el pozo, lo que permitirá determinar un intervalo para los caudales seguros de explotación. Si el pozo se encuentra cerca de una corriente se debe establecer la relación entre el caudal del pozo y el de la corriente, lo que permite evitar o inducir recarga según sea necesario.
- Determinación de la demanda actual y futura de agua.
- Ubicación del pozo que se va a perforar y de otros que existan dentro del área próxima a éste. La ubicación debe darse por coordenadas astronómicas, o cartesianas con base en cartas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Ubicación del pozo respecto a las posibles fuentes de contaminación tales como: explotaciones pecuarias, cultivos de flores, estaciones de expendio de combustibles, etc.

Los resultados de la prospección deben entregarse a CORNARE y esta entrega será requisito indispensable para obtener la licencia de perforación y explotación

#### *Sobre las perforaciones:*

Quienes soliciten licencia a CORNARE, para perforar y construir pozos están obligados a presentar la información que cubra los siguientes ítems:

- Características hidrogeológicas de la zona, si son conocidas. Esta información incluye: el tipo y la profundidad de los acuíferos,

coeficiente de almacenamiento, permeabilidad y transmisividad del acuífero, rendimiento esperado, posibles fuentes de contaminación

- Relación y características de otros aprovechamientos de aguas subterráneas existentes dentro del área de influencia que determine **CORNARE**.
- Sistema de perforación que se empleará y el plan de trabajo.
- Aviso a la División de Aguas de CORNARE, por lo menos con diez (10) días de anticipación a la iniciación de cualquier perforación, excavación o sondeo y por lo menos con tres (3) días de anticipación a cualquier prueba de bombeo o de producción de las captaciones de aguas subterráneas.
- El peticionario debe contratar a su costa un interventor de la obra quien será responsable de que se cumplan las condiciones y normas impuestas por CORNARE teniendo en cuenta la magnitud e importancia de los pozos proyectadas.

Una vez terminada la perforación del pozo, el propietario o el perforador debe cumplir los siguientes requisitos:

- Poner a disposición de CORNARE, los materiales perforados en cantidad aproximada de dos (2) kilogramos por muestra recuperada cada dos (2) metros de profundidad y en cada cambio litológico.
- Hacer una prueba de bombeo supervisada por funcionarios de CORNARE, si desea hacer la solicitud de licencia de operación del pozo. El interesado deberá instalar los dispositivos que de antemano se determinen por los supervisores para controlar y medir los caudales y niveles de agua en la captación y en los pozos de observación.
- Presentar una memoria escrita y el registro gráfico y descriptivo sobre el proceso de perforación y la prueba de bombeo que incluya:
  - ▲ la localización mediante coordenadas y la nivelación de cota del pozo con relación a las bases planimétricas y altimétricas, establecidas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
  - ▲ los intervalos donde fue encontrada agua, las fluctuaciones de los niveles y todas las incidencias en las labores de perforación.
  - ▲ el perfil estratigráfico, acompañado de los registros de pozo, registros eléctricos y de rayos gamma, si fueron tomados.
  - ▲ la descripción de las formaciones geológicas en la que se incluya el espesor, la composición, la permeabilidad, el volumen estimado de agua almacenada y los niveles estáticos del agua.

- ▲ los niveles del agua contemporáneos en sondeos o cuerpos de agua vecinos.
- ▲ los parámetros hidráulicos de los acuíferos atravesados en la perforación.
- ▲ el rendimiento esperado del pozo, si es productivo.
- ▲ las técnicas empleadas en las distintas fases de la perforación, los elementos utilizados en la medición.
- ▲ los análisis físico-químicos de las aguas, que comprenderán los parámetros que se exigen usualmente según las normas del Ministerio de Salud. CORNARE podrá exigir la determinación de otros parámetros adicionales.

### *Sobre las licencias de explotación*

La solicitud de la licencia de aprovechamiento de agua subterránea debe contener la información que exija CORNARE en formularios especiales que entregará la Corporación al interesado.

Todas las personas a las que se les conceda licencia para construir captaciones de agua subterránea, estarán sometidas a la interventoría obligatoria de CORNARE. Esta revisará el diseño de los pozos y supervisará la ejecución de la prueba de bombeo, la toma de muestras de agua para ensayos físico-químicos, y la instalación de piezómetros y de medidores de caudal.

Los pozos y aljibes de uso doméstico que tengan una profundidad menor que de 20 metros y que no sean explotados con caudales mayores de 0.1 litro por segundo, no requieren de obtención de licencia de aprovechamiento.

La licencia de aprovechamiento de aguas subterráneas a las empresas, explotaciones agrícolas y industrias y entidades que tengan un consumo de agua superior a 2 litros por segundo, exigirá una profundidad del pozo superior a 20 metros.

CORNARE exigirá la legalización de todos los pozos que están activos para determinar los regímenes de operación (caudales y tiempos de bombeo) con base en la reglamentación que expida.

En el proceso de otorgamiento de licencias de aprovechamiento de aguas subterráneas se seguirá el siguiente orden de prioridad:

- Utilización para el consumo humano, colectivo o comunitario, sea urbano o rural.
- Utilización para necesidades domésticas individuales.
- Usos agropecuarios comunitarios, comprendida la acuicultura y la pesca.
- Usos agropecuarios individuales, comprendida la acuicultura y la pesca.
- Usos industriales o manufactureros.
- Usos mineros.
- Usos recreativos comunitarios.
- Usos recreativos individuales.

Para evitar la interferencia que pueda producirse entre dos o más pozos como consecuencia de la solicitud para un nuevo aprovechamiento, CORNARE determinará la distancia mínima que puede mediar entre la perforación solicitada y los pozos existentes, su profundidad y el caudal máximo que podrá explotarse teniendo en cuenta el radio de influencia de cada uno.

La distancia mínima entre pozos será determinada con base en la profundidad del pozo, el caudal medio que se pretenda extraer y las características hidráulicas del acuífero. En principio se tomará 200 m como la distancia mínima entre pozos. En caso de que un usuario solicite una licencia a una distancia menor de 200 m deberá presentar el estudio que demuestre que la explotación que solicita no interferirá con los pozos aledaños.

Cumplidos todos los trámites, y una vez recibidos a satisfacción los informes técnicos requeridos, CORNARE expedirá la resolución por la cual se le concede la licencia de aprovechamiento y en ella quedará consignado:

- La distancia mínima a que se debe perforar el pozo en relación con otros pozos en producción y a focos de contaminación.
- Características técnicas del pozo: diámetro, profundidad, revestimiento, filtros.
- Características técnicas de la bomba o compresor y plan de operación del pozo; se indicará el máximo caudal que puede extraer, en litros por segundo.
- Acuíferos que se deben aislar;



- Acuíferos de los cuales está permitido extraer agua, indicando sus cotas o profundidades límites.
- Tipo de válvula de control o cierre, si el agua surge naturalmente;
- Las demás que considere conveniente CORNARE.

El propietario del pozo lo deberá dotar de contador adecuado, con conexión a un manómetro y de un mecanismo apropiado para la obtención de muestras de agua. Esta disposición será de obligatorio cumplimiento para todos los pozos profundos; de ella estarán exentos los pozos y aljibes para uso doméstico. **CORNARE** hará mediciones periódicas de caudales de los pozos con el objeto de llevar un control de volúmenes bombeados y analizar su evolución a medida que se vaya incrementando la explotación con base en el crecimiento de la demanda.

**CORNARE** hará un seguimiento sistemático a la actividad de los perforadores de la región con el objeto de asegurar el cumplimiento de las disposiciones de la reglamentación que expida.

#### *Protección contra la contaminación*

CORNARE desarrollará mecanismos de coordinación con las entidades competentes para otorgar concesiones, licencias o permisos con el fin de prevenir la contaminación o deterioro de las aguas subterráneas a causa de actividades como la construcción de vías y urbanizaciones, la explotación de minas y canteras, el establecimiento de cementerios, la operación de rellenos sanitarios, los depósitos de materiales contaminantes, la operación de plantas de tratamiento de aguas residuales, la construcción de pozos sépticos, el establecimiento de cultivos industriales y de explotaciones pecuarias, etc., de tal suerte que en la respectiva providencia, se prevean las obligaciones relacionadas con la preservación del recurso hídrico.

CORNARE identificará y caracterizará los focos de contaminación y definirá las medidas de mitigación que deban ser adoptadas en cada caso.

Toda obra de captación de aguas subterráneas, mediante pozos, excavaciones, galerías, etc., deberá estar ubicada a una distancia mínima de 50 m de pozos sépticos, letrinas, caballerizas, explotaciones pecuarias y en general de lugares donde exista la posibilidad de que se produzcan infiltraciones contaminadas a los cuerpos de aguas subterráneas.

Todo pozo perforado o excavado deberá estar debidamente sellado en la parte superior, para evitar accidentes y garantizar que no habrá infiltraciones directas del agua superficial hasta los acuíferos captados. Para tal fin se tendrá en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Las tuberías o camisas de revestimiento de los pozos deberán estar herméticamente unidos unos con otros y deberán proyectarse por encima del nivel del suelo hasta una altura acorde con la finalidad de esta norma.
- Se colocarán filtros del tipo rejilla, tuberías ranuradas o troqueladas, etc., únicamente en los acuíferos que han de ser explotados por debajo del nivel mínimo de bombeo en caso de pozos perforados y de tres (3) metros en el de pozos excavados.
- Todo acuífero de calidad deficiente en sus características físico-químicas o bacteriológicas deberá ser convenientemente sellado de acuerdo a lo que se convenga entre el interesado y CORNARE.
- Entre la tubería o la camisa de revestimiento de los pozos y las paredes naturales de la perforación o excavación, deberá colocarse un sello sanitario que impida la infiltración directa de aguas superficiales hacia el subsuelo. Este sello tendrá una profundidad aproximada de 3 metros, a partir de la superficie; los detalles de diseño y construcción son objeto de la labor de los consultores e interventores quienes deben presentarlos a CORNARE para obtener su aprobación.
- Es obligación de todo propietario sellar debida y oportunamente los pozos o captaciones de agua subterránea que por cualquier motivo estén inactivos. Así mismo, quien abandone un pozo ya construido o una perforación o excavación, deberá sellarlo en forma apropiada para evitar accidentes y la contaminación de las aguas subterráneas.
- En los sitios donde se prevea la ocurrencia de aguas salobres, la perforación del pozo deberá llevarse hasta una profundidad tal que deje un intervalo protector entre el pozo productor y el acuífero salobre de treinta metros de espesor.
- Conviene estimular la construcción de alcantarillados y plantas locales de tratamiento que minimicen la contaminación por vertimiento subterráneo de desechos líquidos, particularmente en las instalaciones industriales, agroindustriales y hoteleras. En su defecto debe promocionarse la construcción y el uso de sistemas mejorados de pozos sépticos.

## REFERENCIAS

- Botero, G., 1963, Contribución al conocimiento de la Geología de la Zona Central de Antioquia, Anales de la Facultad de Minas, 57, 101 p, Medellín.
- Carrillo, J., 1973, Propiedades físicas de los suelos derivados del Batolito Antioqueño, Trabajo de grado, 52 p. Facultad de Minas, Medellín.
- Durango, J., 1975, Erosión y formación de terrazas fluviales en climas tropicales, terrazas del Rionegro y de sus afluentes, Trabajo de grado, 56 p, Facultad de Minas, Medellín.
- Empresas Públicas de Medellín, 1991, Anuario Hidrometeorológico, 178 p, EPM, Medellín.
- Empresas Públicas de Medellín, 1994, Anuario Hidrometeorológico, 136 p, EPM, Medellín.
- Feininger, T., 1969, Pseudokarst on quartzdiorite, Colombia, Zeitschrift für Geomorphologie, Neue Folge Band 13, Heft 3, pp 287 –296, Stuttgart.
- Feininger, T. & Botero, G., 1982, The Antioquia Batholith, Publicación Especial, 12, 50 p, Ingeominas, Bogotá.
- González, H., 1978, Geología de las hojas 167 (Sonsón) y 187 (Salamina) del mapa geológico de Colombia, Informe 1760. 262 p, Ingeominas, Medellín.
- Grosse, E., 1926, Estudio geológico del Terciario Carbonífero de Antioquia en la parte occidental de la Cordillera Central de Colombia, entre el río Arma y Sacaójal, Verlag von Dietrich Reimer, 361 p, Berlín.
- Guymon, G.L., 1994, Unsaturated zone hydrology, Prentice Hall, 21p, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Hermelin, M., 1978, Excursión Zona Central de Antioquia (Valle de Aburrá y sus alrededores), Hoja de Ruta, II Congreso Colombiano de Geología, Bogotá.
- Hermelin, M., 1980, Cenizas volcánicas cuaternarias en el Oriente Antioqueño, Guía de Excursión Rionegro – Santa Fe de Antioquia, Primer Seminario sobre el Cuaternario de Colombia. Bogotá.

Hermelin, M., 1992, Los suelos del oriente antioqueño un recurso no renovable, Bulletin d'Institut Francais d'Etudes Andines, 21(1), 25-36.

Hoyos F., 1985, Environmental Geology of Chandler Quadrangle, MSc Thesis, 83 p, 13 plates, Arizona State University, Tempe, AZ.

Hoyos, F, 1990, Efecto de infiltraciones distantes en la inestabilidad de laderas de alta pendiente, Boletín de Vías, XVII, 71, pp 97 – 128, Universidad Nacional, Manizales

Hoyos, F., Hermelin M. & Toro G., 1984, Régimen de aguas subterráneas en suelos residuales profundos derivados de rocas ígneas y metamórficas en la Cordillera Central de Colombia, Congreso Colombiano de Hidráulica.

Hoyos, F. & Arnason, B., 1998, El caso del gradiente cero: isótopos estables en la hidrogeología de la Zona Central de Antioquia, XII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, Memorias, pp 195 –206., Bogotá.

Hoyos, F., Arnason, B & Salazar, B., 1998, Del altiplano al valle: una conexión hidráulica inferida a partir de información isotópica, XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Memorias, pp 379 –389, Guayaquil.

Hoyos, F. & Vélez; M.V., 1998, Recarga de acuíferos en la Cordillera Central de Colombia determinada mediante isótopos ambientales, XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Memorias, Montevideo.

Hoyos, F., 2000, Estudio hidrogeológico del corredor del Túnel Aburrá Oriente y su manejo ambiental, 53 p., Departamento de Antioquia – Concesión Túnel Aburrá Oriente, Medellín.

Jaramillo, A., 1989, Relación entre la Evaporación y los elementos Climáticos. (Nota Técnica). Cenicafé, Vol. 40, N° 3.

Lima, W.P., 1986, Principios de hidrologia florestal, Universidade de Sao Paulo, 242 p, Piracicaba.

López, J., 1973, Génesis de las arcillas de la Unión, Antioquia, Trabajo de grado, 55 p, Facultad de Minas, Medellín.

Page, W.D., 1980, Guía de excursión Rionegro – Santa Fe de Antioquia, Primer Seminario sobre el Cuaternario de Colombia.

Page, W.D. & James, M., 1981, The antiquity of the erosion surfaces and Late Cenozoic Deposits, Memoria del Primer Seminario sobre el Cuaternario de Colombia, Revista CIAF, 6, 1-3, pp 421 453, Bogotá.

Remenieras, G., 1974, Tratado de Hidrología Aplicada. Técnicos Asociados S.A. Segunda edición. Barcelona.

Restrepo, J.J. & Toussaint, J. F., 1987, El Grupo Ayurá Montebello ¿tiene todavía validez estratigráfica? Seminario Gerardo Botero Arango, pp 167- 173, Medellín.

Universidad Nacional de Colombia & CORNARE, 1997, Evaluación hidrogeológica preliminar para los municipios de El Retiro, Rionegro, La Ceja, El Carmen de Viboral, Guarne y Marinilla, Medellín.

Universidad Nacional de Colombia, 1999, Balances Hidrológicos de Colombia, Medellín.

Vélez, M.V., Smith R., Hoyos, F. & Montoya , R.D., 1998, Evaluación hidrogeológica preliminar de cinco municipios del Oriente Antioqueño, Boletín de Ciencias de La Tierra, Universidad Nacional de Colombia, Sede de Medellín.

Vélez N & Restrepo J.C., 1997, Inventario y Caracterización de los ojos de aguas en el centro de Antioquia, Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia, 32 p, Medellín.

Villegas, F., 1981, Construcción de presas de tierra en condiciones climáticas difíciles e implicaciones para su estabilidad en caso de sismo, Tercer Seminario Internacional sobre Ingeniería Sísmica, Bogotá.

White, A.H., 1939, Salados de El Retiro, Informe Técnico, Regional Minera de Medellín.