

**PROSPECCIÓN GEOLÓGICA PARA AGUAS SUBTERRÁNEAS EN  
ROCAS CRISTALINAS FRACTURADAS DEL MACIZO DE SANTANDER,  
SECTOR ORIENTAL DE BUCARAMANGA**

**OTONIEL ALBERTO VERGARA LÓPEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA**

**2004**

**PROSPECCIÓN GEOLÓGICA PARA AGUAS SUBTERRÁNEAS EN  
ROCAS CRISTALINAS FRACTURADAS DEL MACIZO DE SANTANDER,  
SECTOR ORIENTAL DE BUCARAMANGA**

**OTONIEL ALBERTO VERGARA LÓPEZ**

**Proyecto de grado presentado como requisito  
para optar al título de Geólogo**

**Director**

**JUAN DIEGO COLEGIAL  
GEÓLOGO PhD**

**Codirectora**

**SULLY GÓMEZ ISIDRO  
IC. PhD**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA**

**2004**

## DEDICATORIA

A DIOS, quien siempre me ha acompañado.

A MI MADRE, Blanca Regina López, quien siempre ha estado en todo momento, este logro es tuyo.

A MIS HERMANAS, Angélica y Maria Berta, gracias por su tolerancia.

A LA MEMORA DE MI PADRE, quien deseo para mi esta meta.

**OTONIEL VERGARA LOPEZ**

## **AGRADECIMIENTOS**

Expreso mis mas sinceros agradecimientos a los directores del proyecto, los doctores Sully Gómez y Juan Diego Colegial, por su apoyo, acertada y valiosa orientación.

Al ingeniero Ángel Anaya, por su valioso aporte y quien colaboró incondicionalmente y desinteresadamente en la realización de este proyecto.

A mis compañeros del GPH, Francisco, Eduard, Mauricio y William por su apoyo en la etapa de desarrollo de la campaña de geofísica.

A mis compañeros, Jaime Fiallo y Omar Núñez, estudiantes de Ingeniería Electrónica, por su valiosa colaboración en la adquisición de datos geoelectricos durante la campaña de geofísica.

Y a todos aquellos que de una u otra forma, siempre han creído en mi y contribuyeron de alguna manera en la realización de este logro.

## CONTENIDO

	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>1. GENERALIDADES</b>	2
1.1 OBJETIVOS	2
1.2 SITUACIÓN GEOGRÁFICA	3
1.3 TOPOGRAFÍA	3
1.4 VÍAS DE ACCESO	3
1.5 CLIMA Y VEGETACIÓN	5
1.6 PRECIPITACION	5
1.7 TIPO DE DRENAJE	6
1.8 METODOLOGIA	7
1.9 ESTUDIOS ANTERIORES	11
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	15
2.1 CICLO HIDROLÓGICO	15
2.2 TIPOS DE ACUÍFERO	18
2.2.1 Clasificación de acuerdo a la génesis	18
2.2.2 Clasificación de acuerdo a los criterios físicos	18
2.2.3 Clasificación de acuerdo a los criterios de transmisividad	18
2.2.4 Clasificación de acuerdo a los criterios de la presión	19
2.2.5 Clasificación de acuerdo a los criterios económicos	20
2.3 ACUIFEROS FRACTURADOS	20

<b>3. APROXIMACIÓN ESTRUCTURAL</b>	24
3.1 ANALISIS DE MAPAS TOPOGRÁFICOS	25
3.2 ANALISIS E INTERPRETACIÓN FOTOGEOLOGICA	26
3.2.1 Diagrama Rosa de la Dirección de Lineamientos Fotogeológicos	28
3.2.2 Análisis de la Red de Drenaje Corregida	29
<b>4. GEOLOGÍA</b>	32
4.1 LITOLOGIA	32
4.1.1 Rocas Metamórficas Gneis de Bucaramanga (Peb)	32
4.1.2 Rocas Ígneas Granito Cuarzomonzonita (JRcg)	34
4.1.3 Sedimentos Cuaternarios Formación Bucaramanga (Qblr)	35
4.1.4 Depósitos Aluviales	35
4.1.5 Depósitos Coluviales o de Ladera (Ql)	36
4.2 RASGOS ESTRUCTURALES	36
4.2.1 Marco Tectónico Regional	36
4.2.2 Fallas	37
4.2.3 Diaclasas	43
<b>5. ANALISIS GEOESTADISTICO DE LAS DIACLASAS</b>	
<b>AFLORANTES EN LA ZONA</b>	47
5.1 INTERPRETACIÓN DE DATOS	50
5.1.1 Densidad de Diaclasas	53
5.1.2 Relleno de Diaclasas	54
5.1.3 Diaclasas sin Relleno	56
5.1.4 Diaclasas con Relleno	56
5.2 CARACTERIZACION DEL TERRENO A PARTIR DEL ESTUDIO DE DIACLASAS	57

<b>6. GEOFÍSICA</b>	<b>59</b>
6.1 METODO	59
6.1.1 Fundamentación del Método de Resistividad Eléctrica	59
6.2 MODALIDADES DE DESARROLLO DEL METODO	67
6.2.1 Sondeos Eléctricos Verticales	67
6.3 INTERPRETACIÓN DEL SONDEO GEOELÉCTRICO	68
6.4 APLICACIÓN DEL MÉTODO	72
6.4.1 Equipos Empleados	76
6.5 RESULTADOS OBTENIDOS	78
6.5.1 Sev 1	78
6.5.2 Sev 2	80
6.5.3 Sev 3	81
6.5.4 Sev 4	83
6.5.5 Sev 5	84
6.5.6 Sev 6	85
6.5.7 Sev 7	81
6.5.8 Sev8	88
6.5.9 Corte Geoelectrico	90
<b>7. PERFORACION DE UN POZO EXPLORATORIO PARA LA UBICACIÓN DE UN PIEZOMETRO</b>	<b>91</b>
7.1 PERFORACIÓN DEL POZO	93
7.1.1 Operación de Perforación	94
7.2 HIDROGEOLOGÍA DEL POZO.	95
7.2.1 Columna Litológica del Pozo La Flora-1	96
7.2.2 Columna Litológica del Pozo Bajos de Pan de Azúcar	98

<b>CONCLUSIONES</b>	100
<b>RECOMENDACIONES</b>	102
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	104
<b>ANEXOS</b>	107

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Almacenamiento de agua en la hidrosfera	16
<b>Tabla 2.</b> Direcciones de los Lineamientos Fotogeológicos del área de estudio	28
<b>Tabla 3.</b> Resistividad de materiales geológicos comunes	62
<b>Tabla 4.</b> Configuraciones de electrodos	65
<b>Tabla 5.</b> Comparación de los arreglos de electrodos Dipolo – dipolo, Schlumberger, Square y Wenner	67
<b>Tabla 6.</b> Coordenadas de los sitios donde se realizó cada SEV	76
<b>Tabla 7.</b> Rango de Resistividades aparentes para cada SEV	78
<b>Tabla 8.</b> Unidades geoelectricas y su correlación hidrogeológica SEV1	79
<b>Tabla 9.</b> Unidades geoelectricas y su correlación hidrogeológica SEV2	81
<b>Tabla 10.</b> Unidades geoelectricas y su correlación hidrogeológica SEV3	82
<b>Tabla 11.</b> Unidades geoelectricas y su correlación hidrogeológica SEV4	83
<b>Tabla 12.</b> Unidades geoelectricas y su correlación hidrogeológica SEV 5	85
<b>Tabla 13.</b> Unidades geoelectricas y su correlación hidrogeológica SEV 6	86
<b>Tabla 14.</b> Unidades geoelectricas y su correlación hidrogeológica SEV 7	88
<b>Tabla 15.</b> Unidades geoelectricas y su correlación hidrogeológica SEV8	89
<b>Tabla 16.</b> Bitácora del nivel freático durante la perforación	96
<b>Tabla 17.</b> Columna Litológica del Pozo Bajos de Pan de Azúcar	98

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Localización del área de estudio	4
<b>Figura 2.</b> Variación de la precipitación anual en la zona de estudio	6
<b>Figura 3.</b> Flujo grama de procesos de las fases de trabajo	9
<b>Figura 4.</b> Ciclo hidrológico	15
<b>Figura 5.</b> Condiciones naturales del ciclo hidrológico	17
<b>Figura 6.</b> Modificaciones de las condiciones naturales del Ciclo hidrológico	17
<b>Figura 7.</b> Acuíferos Fracturados	22
<b>Figura 8.</b> Diagrama de rosetas de Lineamientos fotogeológicos	28
<b>Figura 9.</b> Diagrama de rosetas de la Red de Drenaje	30
<b>Figura 10.</b> Panorámica del área de estudio, donde se observan las cuatro fallas principales que la afectan Dirección de la fotografía E-W, sobre Morrórico	37
<b>Figura 11.</b> Panorámica a la altura del barrio los Cedros, donde se observa el trazo de las fallas de Bucaramanga(1) y Morrórico(2), así como un lomo de presión y uno de obturación.	39
<b>Figura 12.</b> Escarpe de falla al sur del área de estudio, a lo largo del trazo de la falla de Morrórico.	40
<b>Figura 13.</b> Espejo de falla(1) y brecha de falla sobre el trazo de la falla Morrórico.	41
<b>Figura 14.</b> Brecha de falla sobre el trazo de la falla Miramanga.	42
<b>Figura 15.</b> Ilustración de un diagrama de Roseta	48
<b>Figura 16.</b> Proyección Estereográfica	49
<b>Figura 17.</b> Diagrama de Rosetas para la zona de estudio	51
<b>Figura 18.</b> Diagrama de Polos y de Contornos de la zona de estudio	52
<b>Figura 19.</b> Espaciamiento entre diaclasas	53

<b>Figura 20.</b> Tipos de relleno para las diaclasas de la zona de estudio	55
<b>Figura 21.</b> Diagrama de rosetas y de contornos para diaclasas sin relleno	56
<b>Figura 22.</b> Diagrama de rosetas y de contornos para diaclasas con relleno	57
<b>Figura 23.</b> (A) Definición básica de resistividad a través de un bloque homogéneo de lado $L$ , con una corriente $I$ y una caída de potencial entre las caras opuestas $V$ . (B) el circuito eléctrico equivalente, donde $R$ es la resistencia	60
<b>Figura 24.</b> Líneas de Corriente y equipotencial, producidas por dos fuentes de corriente	63
<b>Figura 25.</b> Forma generalizada de configuración de electrodos en investigaciones de resistividad	65
<b>Figura 26.</b> Configuración de electrodos usados en investigaciones Eléctricas	66
<b>Figura 27.</b> Cartera de Campo	74
<b>Figura 28.</b> Equipo utilizado en la campaña Geofísica	77
<b>Figura 29.</b> Equipo empleado y arreglo de electrodos Schlumberger	77
<b>Figura 30.</b> Curva y modelo geoelectrico Winsev 5 para SEV1	79
<b>Figura 31.</b> Curva y modelo geoelectrico Winsev 5 para SEV2	80
<b>Figura 32.</b> Curva y modelo geoelectrico Winsev 5 para SEV3	82
<b>Figura 33.</b> Curva y modelo geoelectrico Winsev 5 para SEV4	83
<b>Figura 34.</b> Curva y modelo geoelectrico Winsev 5 para SEV5	84
<b>Figura 35.</b> Curva y modelo geoelectrico Winsev 5 para SEV6	86
<b>Figura 36.</b> Curva y modelo geoelectrico Winsev 5 para SEV7	87
<b>Figura 37.</b> Curva y modelo geoelectrico Winsev 5 para SEV8	89
<b>Figura 38.</b> Maquinaria especializada para perforación de agua subterránea	92
<b>Figura 39.</b> Máquina de perforación	95
<b>Figura 40.</b> Descripción en campo de ripios y corazones	97

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Red de Drenaje	108
Anexo B. Mapa de Drenaje Rectificado	108
Anexo C. Datos de direcciones de la red de drenaje rectificadas	109
Anexo D. Mapa Geológico	110
Anexo E. Descripción de las Diaclasas Cartografiadas en campo	113
Anexo F. Set de datos geofísicos	117
Anexo G. Corte Geoelectrico	125
Anexo H. Columna Litológica del Pozo	125

## RESUMEN

**TÍTULO:** PROSPECCIÓN GEOLÓGICA PARA AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ROCAS CRISTALINAS FRACTURADAS DEL MACIZO DE SANTANDER, SECTOR ORIENTAL DE BUCARAMANGA.\*

**Autor:** Vergara López, Otoniel Alberto.\*\*

**Palabras Claves:** acuífero fracturado, fracturas, diaclasas, aproximación estructural, SEV, pozo.

El área de estudio hace parte de la faja de Bucaramanga, del Macizo de Santander, donde afloran rocas metamórficas del Gneis de Bucaramanga y rocas ígneas. Estas rocas presentan un alto grado de fracturamiento representado por la presencia de fallas y diaclasas, y en algunos sectores un alto grado de meteorización. El objetivo de este trabajo es analizar y estudiar la posible conductividad hidráulica de dichas rocas, para evaluar sus posibilidades de transportar y almacenar aguas subterráneas. Con lo cual se pretende avanzar en los estudios que viene realizando el Grupo de Predicción y Modelamiento Hidroclimático(GPH), de la Universidad Industrial de Santander, encaminados a evaluar las posibilidades que posee el agua subterránea para un futuro abastecimiento de la comunidad de Bucaramanga(Santander – Colombia).

En el presente trabajo, se realizó un estudio sobre la relación espacial existente entre los elementos estructurales, fallas y diaclasas, a partir de análisis foto geológicos y control de campo en afloramientos. Posteriormente se realizó una campaña de geofísica mediante el método de resistividades, aplicando la técnica de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) y una perforación para ubicar un piezómetro.

La información obtenida: cantidad de buzamiento de las diaclasas, densidad de las fracturas, alto porcentaje de diaclasas sin relleno, niveles saturados en los SEV, roca altamente fracturada y meteorizada con escasos niveles de arcillas y todo el tramo saturada en la perforación, indica la existencia de un acuífero fracturado en el área. Para continuar este estudio es recomendable realizar un plan de perforaciones para determinar la continuidad del fracturamiento y meteorización, estudiar las arcillas presentes, realizar un estudio ambiental(calidad del agua), y realizar pozos productores.

---

\* Proyecto de Grado, Modalidad Investigación

\*\* Facultad de Ingenierías Físico – Químicas, Escuela de Geología. Director Juan Diego Colegial.

## ABSTRACT

**TITLE:** GEOLOGICAL PROSPECTION TO SUBTERRANEAN WATERS ON CRYSTALLINE AND FRACTURED ROCKS FROM MACIZO OF SANTANDER, EASTERN SECTOR OF BUCARAMANGA.\*

**AUTHOR:** VERGARA LÒPEZ, OTONIEL ALBERTO.\*\*

**KEY WORDS:** fractured aquifer, fractures, diaclasas, structural approach, EVS, well

The study area belongs to the band of Bucaramanga, from macizo of Santander, where crop up several metamorphic rocks from Gneis of Bucaramanga and ígneas rocks. These rocks present a high degree of fracturing showed by presence of flaw and diaclasas, in some sectors a high degree of meteorization. The purpose of this work is to analyze and study some possible hydraulic conductivity of those rocks, to increase their possibilities of transporting and storing subterranean waters. Which pretend to advance about studies that the Group of Prediction and Hydro climatic modeling (GPH), of Industrial University of Santander has been realized, focus to evaluate the possibilities that subterranean water has for a long-term supplying of community of Bucaramanga (Santander-Colombia).

In present work, had realized a study about spatial relationship between structural elements, flaws and diaclasas, from photo-geological analysis and field control on outcrop. Later, realized a campaign about geophysics by resistivities method, using the electrical vertical sounding technique (EVS) and a perforation to locate a piezómetro.

Data attainment: quantity of dip the diaclasas, thickness of fractures, high percentage of diaclasas without full, levels saturated on EVS, rock highly fractured and meteorized with low levels of clay and all the stretch saturated by the perforation, it shows some existence of a fractured aquifer on the area. To follow this study, is advisable to realize a pattern of perforations or drillings to define the continuation of fracturing and meteorization, also study the present clays, carry out an environmental study( quality of water), and perform producing wells.

---

\*Project of Grade, Modality Investigation

\*\*Faculty of physical-chemistry Engineering, School of Geology. Director Juan Diego Colegial

## INTRODUCCIÓN

El agua subterránea representa una posibilidad para el abastecimiento parcial de la comunidad del área metropolitana de Bucaramanga, como lo indican los estudios de Geología, Hidrología e inventario de recursos hídricos realizados actualmente por el Grupo de Predicción y Modelamiento Hidroclimático (GPH) de la Universidad Industrial de Santander.

El objetivo de este trabajo es analizar y estudiar la posible conductividad hidráulica de las rocas cristalinas presentes en el área, para evaluar la posibilidad de transporte y almacenamiento de aguas subterráneas en dichas rocas.

El área de estudio para este proyecto hace parte del Macizo de Santander ( Faja de Bucaramanga ), donde afloran rocas metamórficas del Gneis de Bucaramanga y rocas ígneas, estas rocas presentan un alto grado de fracturamiento representado por la presencia de fallas y diaclasas, y en algunos sectores un alto grado de meteorización. Las anteriores características le otorgan a estas rocas grandes posibilidades de almacenar y transmitir agua. Con este trabajo se pretende dar un paso mas, en los estudios que viene realizando el GPH, encaminados a evaluar las posibilidades que posee el agua subterránea para un futuro abastecimiento de la comunidad de Bucaramanga.

# 1. GENERALIDADES

## 1.1 OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

Analizar y estudiar la posible conductividad hidráulica de las rocas cristalinas presentes en el área, para evaluar la posibilidad de transporte y almacenamiento de aguas subterráneas en dichas rocas.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ❖ Realizar un estudio fotogeológico de la red de drenaje y de lineamientos, a escala 1:8000.
- ❖ Realizar un estudio geoestadístico de diaclasas y fracturas que permitan determinar las principales zonas de fracturas.
- ❖ Elaborar un mapa geológico del área a escala 1:5000.
- ❖ Realizar SEV que faciliten la elaboración de cortes geoelectrónicos y su interpretación hidrogeológica.
- ❖ Elaborar la columna litológica del pozo perforado a escala 1: 500 en formato digital.

## **1.2 SITUACIÓN GEOGRÁFICA**

El área de estudio esta ubicada en la región de la Cordillera Oriental de los Andes, en el Nororiente de Colombia, hace parte de la Faja de Bucaramanga del Macizo de Santander, donde afloran rocas metamórficas del Gneis de Bucaramanga y rocas ígneas, y comprende 5 Km<sup>2</sup> de extensión limitados por las coordenadas topográficas:

X:1'107.000

X: 1'109.000

Y:1'278.000

Y: 1'280.500

De las planchas 120-II-B-1 y 109-IV-D-3 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, según la proyección Gauss con origen X:1'000.000 y Y: 1'000.000, ubicado en Santa Fe de Bogota.(Figura 1). Políticamente el área está conformada por terrenos pertenecientes al municipio de Bucaramanga, Santander.

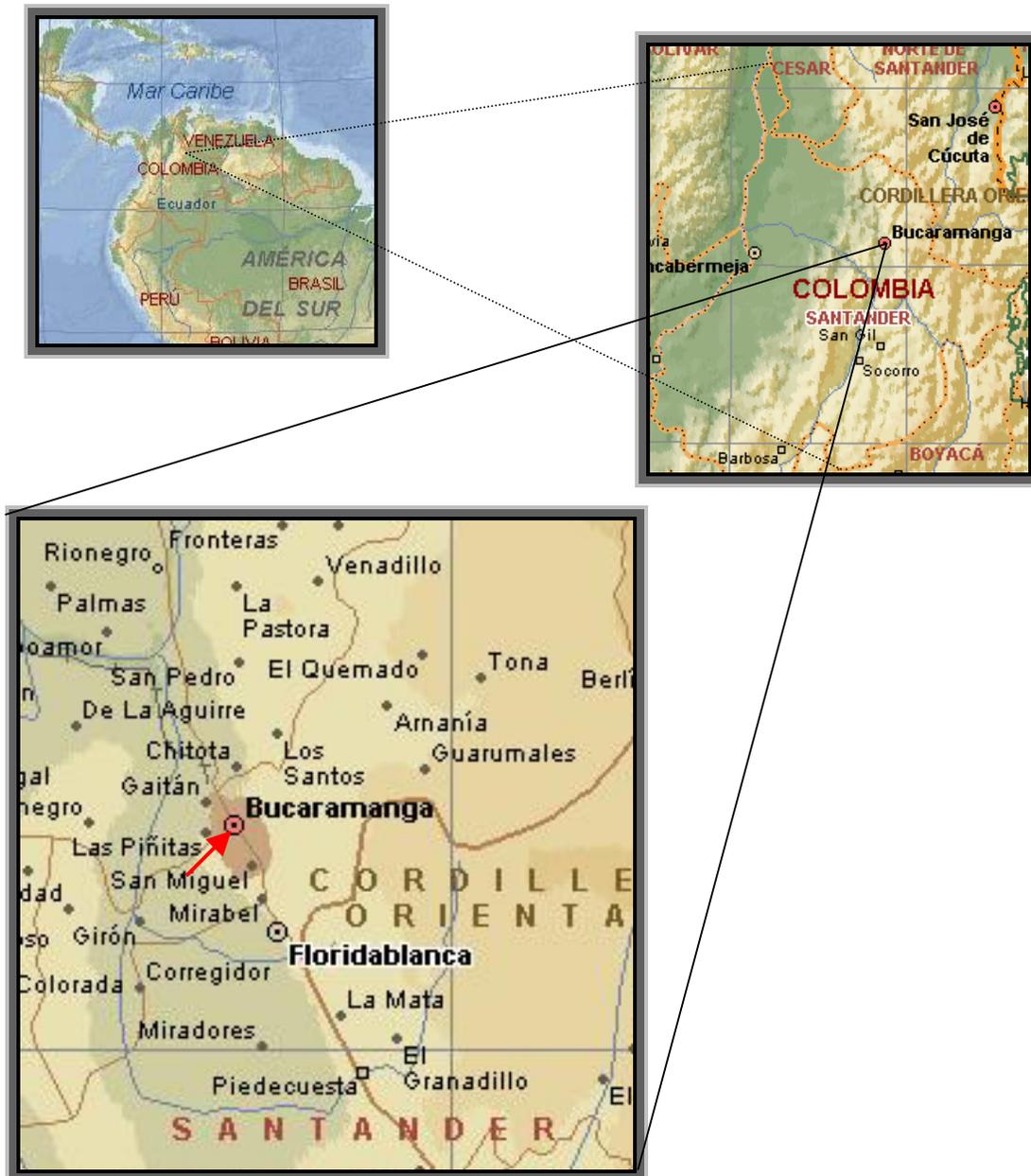
## **1.3 TOPOGRAFÍA**

En general el área presenta un rango de elevaciones que oscila entre 900 m.s.n.m, en las zonas bajas ubicadas en el valle de la Quebrada la Flora al oeste del área de estudio, y los 1400 m.s.n.m., ubicados en el Macizo de Santander al Este del área con una morfología de pendientes abruptas.

## **1.4 VÍAS DE ACCESO**

El área se ubica en la zona Oriental de la Ciudad de Bucaramanga (Santander), donde se encuentran situados los barrios Pan de Azúcar, los Cedros, Terrazas, Álvarez, Albania, Buena vista, Mira Flores, entre otros; y es cortada al Nor oriente por la carretera que conduce a Cúcuta (Norte de Santander). Al occidente del área las vías de acceso son buenas, contando con servicio urbano de buses; mientras que la parte oriental es montañosa y solo cuenta con algunos caminos de herradura.

Figura 1. Localización del área de estudio



Tomado de Enciclopedia Encarta 2003

## 1.5 CLIMA Y VEGETACIÓN

Según CORPLAN 2000, en su artículo Situación Actual y Futuro Inmediato del Área Metropolitana de Bucaramanga, el clima de la zona está definido por la orografía, la cual se caracteriza por ser montañosa y variable, creando diversos microclimas y presentando variaciones en la temperatura en función de la altitud sobre el nivel del mar, que presenta un gradiente desde  $-0.49\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta  $-0.87\text{ }^{\circ}\text{C}$  por cada 100 m de aumento en altura.

Las alturas presentes varían entre los 900 y 1400 m.s.n.m, clasificando el área de estudio de acuerdo al Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) en Bosque Ecuatorial Húmedo, y Bosque Subandino:

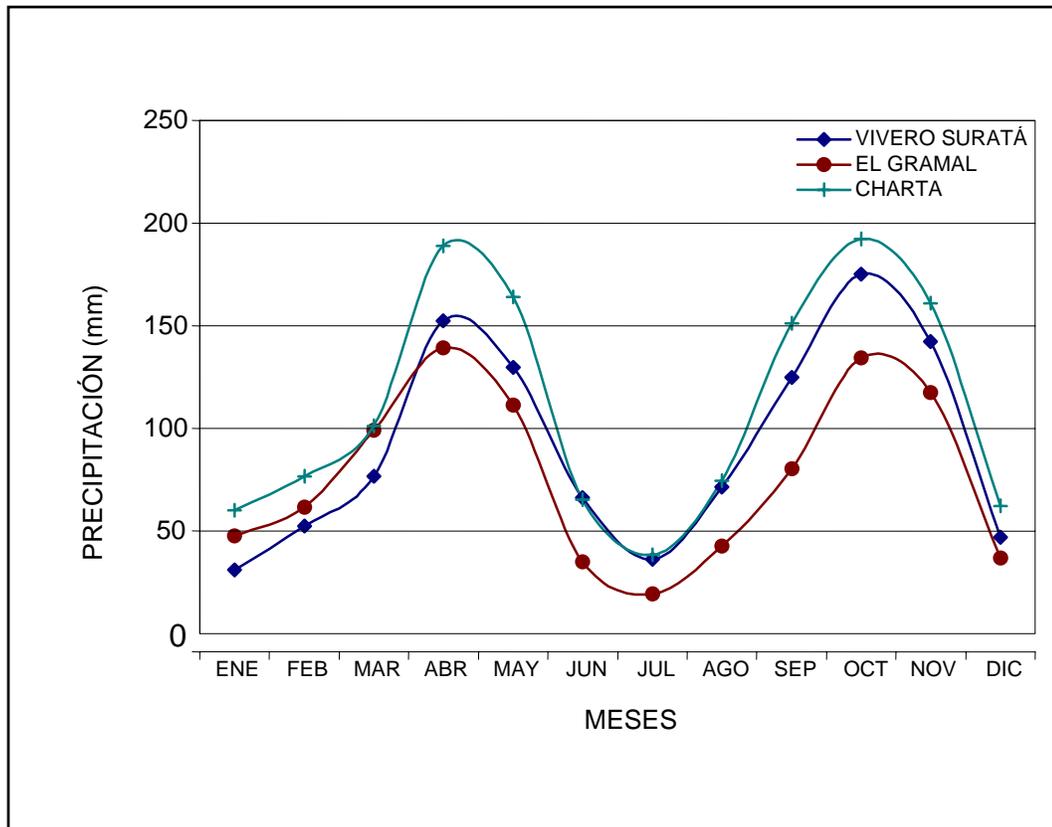
- **BOSQUE ECUATORIAL HÚMEDO.** Corresponde en la zona al rango de elevaciones ubicadas entre los 900 y 1000 m.s.n.m., con una temperatura media anual de  $24^{\circ}\text{C}$ . Los árboles alcanzan alturas hasta de 30 m, como se observa en el valle de la quebrada la Flora.
- **BOSQUE SUBANDINO.** Corresponde en la zona al rango de elevaciones ubicadas entre los 1000 y los 1400 m.s.n.m. con una temperatura media anual entre los  $18$  y  $24^{\circ}\text{C}$ . Los árboles no alcanzan alturas superiores a 30 m, como se observa al este en el nacimiento de las quebradas que surcan el área.

## 1.6 PRECIPITACION

En la Figura 2 tomada de Mendoza y Sandoval, 2002, se aprecia cómo varía en el área, la precipitación a lo largo del año. La curva de precipitación que cubre específicamente el área es la que se presenta en color azul, observándose como hay dos periodos secos y dos de lluvias durante el año.

El primer período seco se inicia a mediados de Diciembre y finaliza a comienzos de Marzo. El segundo se inicia a finales de Mayo y finaliza a mediados de Septiembre.

Figura 2. Variación de la precipitación anual en la zona de estudio



Modificado de Mendoza, C., y Sandoval, R., 2002.

### 1.7 TIPO DE DRENAJE

La zona de estudio hace parte de la subcuenca del Río de Oro ( Mendoza y Sandoval, 2002.), que se forma por la unión de los ríos de Oro y del Hato o Lato y baña las poblaciones de Piedecuesta, Girón y Bucaramanga; y hace parte de la Cuenca Superior del Río Lebrija.

El patrón de drenaje presente en el área refleja el fuerte control estructural, observándose un paralelismo entre los tributarios mayores y una intersección en ángulo agudo con los tributarios menores, característico de un sistema de drenaje angular. En toda el área el drenaje es integrado, observándose con mayor densidad al norte que al sur, reflejando los diferentes grados de permeabilidades secundarias de las rocas en la zona.

El área esta surcada por varias quebradas que tienen una dirección predominantemente NS, NE-SW, las cuales vierten sus aguas a la quebrada la Flora de dirección NS, ubicada al Oeste del área de estudio. La Quebrada la Flora en el límite Norte del área tiene dirección EW para luego cambiar a NS y finalmente desembocar en la Quebrada la Iglesia al SW del área.

## **1.8 METODOLOGIA**

Para el cumplimiento a cabalidad de los objetivos propuestos se desarrollaron sistemáticamente 5 fases, utilizando materiales disponibles, cumpliendo actividades específicas y obteniendo resultados preliminares y finales. Cada fase estuvo integrada por los siguientes elementos:

La **FASE 1**, Fundamentación y Diseño, consistió en una Identificación de fuentes de información, Recopilación de información y realización de un Programa y plan de actividades.

En la **FASE 2**: Desarrollo y Ejecución. se elaboro y definió el marco teórico. Posteriormente se realizaron todas las actividades para la ejecución del proyecto, las cuales se nombran a continuación: cartografía fotogeológica, digitalización de mapas fotogeológicos, aproximación estructural fotogeológica, cartografía geológica (Se tuvo especial cuidado en los rasgos estructurales, por ser el interés primordial de este proyecto. La cartografía se realizó a escala 1:5000), análisis estadístico de diaclasas, campaña geofísica, interpretación de datos geofísicos, perforación de un pozo exploratorio y finalmente el Análisis de datos y resultados preliminares

En la **FASE 3**. Conclusiones definitivas.

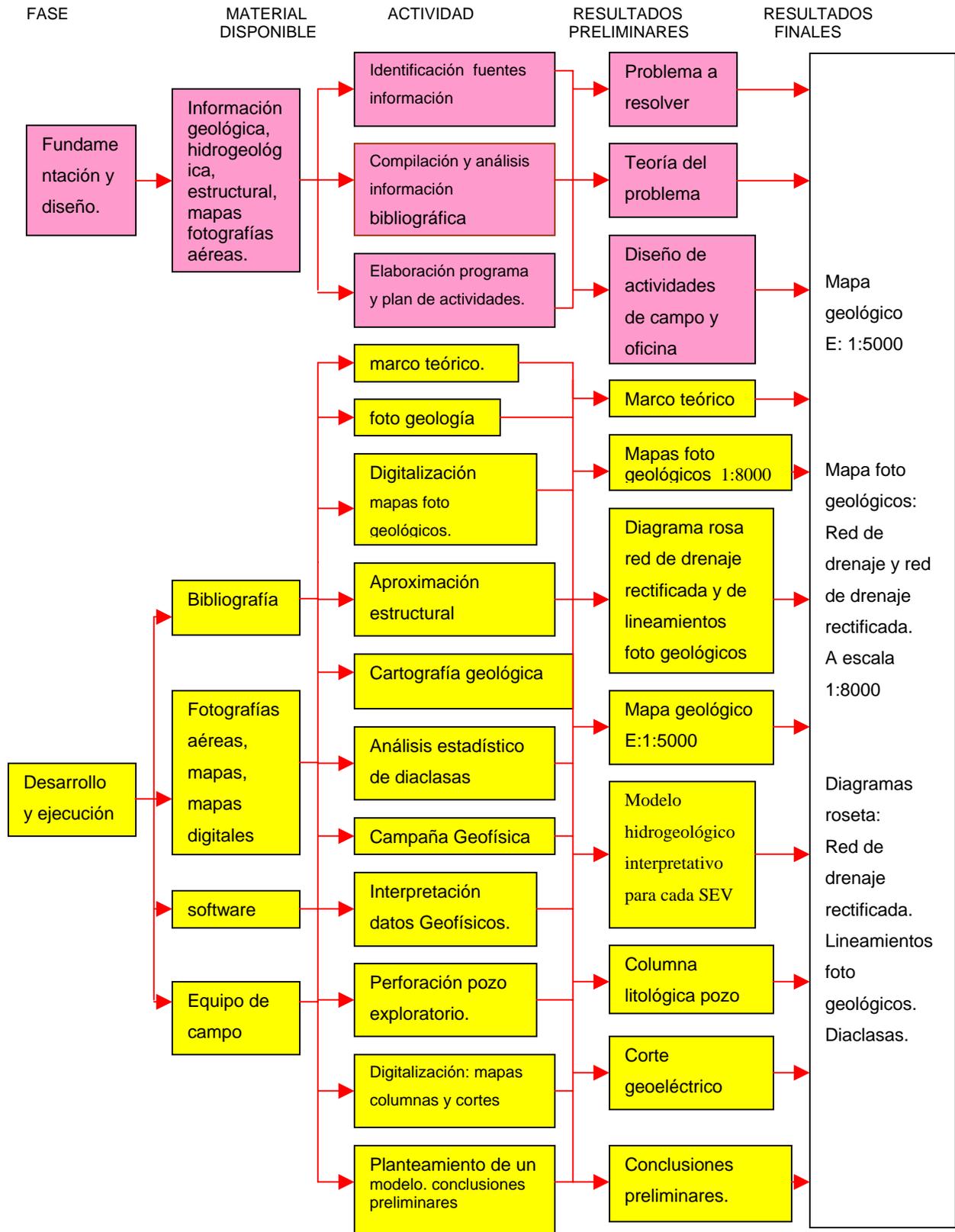
**FASE 4**, se realizó la redacción y edición definitiva de la tesis.

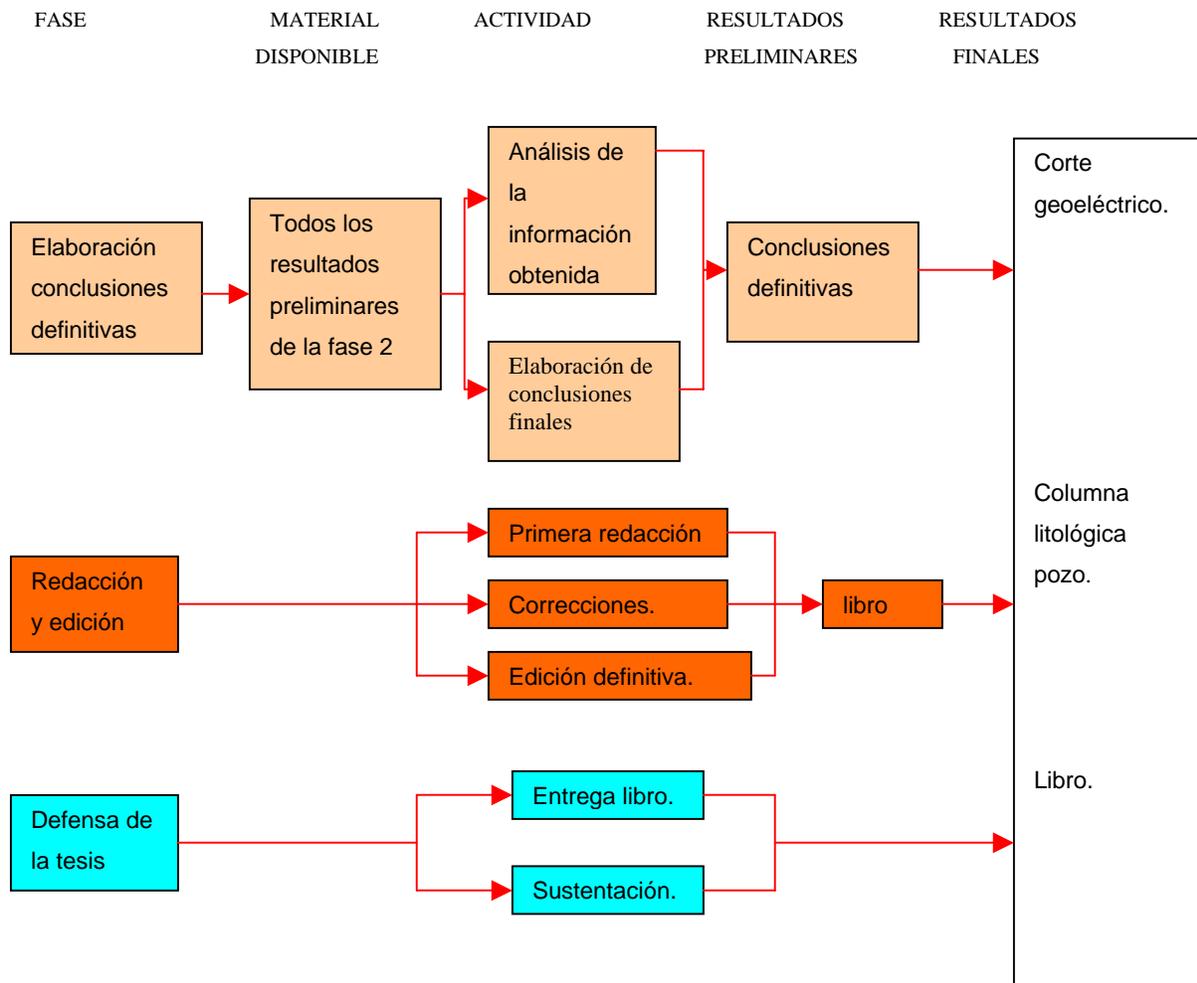
**FASE 5**, Defensa de la Tesis, se solicitaron jurados ante el comité de proyectos de grado de la Escuela de Geología y se realizó la entrega y sustentación de la tesis.

Los pasos seguidos para cumplir los objetivos se ilustran en el flujo grama de procesos de la Figura 3, y la convención de colores para cada fase es la mostrada en el siguiente cuadro:

FASE 1: FUNDAMENTACIÓN Y DISEÑO
FASE 2: DESARROLLO Y EJECUCIÓN
FASE 3: ELABORACION CONCLUSIONES
FASE 4: REDACCION Y EDICIÓN
FASE 5: DEFENSA DE LA TESIS

Figura 3. Flujo grama de procesos de las fases de trabajo.





## **1.9 ESTUDIOS ANTERIORES**

El estudio hidrogeológico de los medios cristalinos fisurados, esta poco desarrollado a nivel mundial, y en efecto, tanto los principios básicos que rigen el movimiento del agua subterránea, como los parámetros hidráulicos que caracterizan a los acuíferos (transmisividad, permeabilidad, almacenamiento), los balances hídricos y el comportamiento hidroquímico, se han referido prioritariamente a los medios con porosidad intergranular, dejando prácticamente en el olvido la caracterización y evaluación de los medios con porosidad por fisura. El déficit en este aspecto ha sido tan notorio, que aún en la actualidad se emplean los conceptos de los primeros, adaptándolos a los medios discontinuos.

Algunos países, en donde afloran grandes áreas de rocas ígneas y metamórficas, aprovechan los caudales de agua que pueden obtener de estas rocas, cuando están fracturadas.

En Uruguay, Montaña, (2002) realizó un estudio para: Caracterizar la circulación y el almacenamiento de agua subterránea en sistemas discontinuos y Desarrollar una metodología para establecer la vulnerabilidad de acuíferos fisurados a la contaminación.

En el Taller de Recursos Naturales, 2002, de la carrera de Ingeniería en Agronomía de la Universidad de La Republica en Montevideo, Uruguay, plantean que cuando las fracturas en rocas cristalinas están abiertas y limpias (afectan a rocas de composición ideal para el almacenamiento de agua subterránea), y las condiciones de recarga están aseguradas mediante interconexión con el sistema hídrico superficial, las probabilidades de obtener caudales satisfactorios en una obra de captación correctamente ubicada, diseñada y construida son elevadas.

Juan Gil Montes, (2002), en su estudio “Abastecimiento de Aguas Subterráneas en Extremadura España” reporta caudales mínimos de 0.5 litros/segundo y caudales máximos, que alcanzan 5 lt/seg en la confluencia de varias fracturas en rocas graníticas. Las rocas metamórficas en Extremadura se encuentran normalmente muy fracturadas a grande profundidades y las consideran como semipermeables, llegando a producir caudales hasta de 10 litros/segundo. Las rocas filonianas, si están muy fracturadas, pueden actuar como drenantes respecto a las rocas encajantes y producir caudales elevados de 1 lt/seg a 5 lt/seg.

En Uruguay, Schildknecht y Neumann-Redlin (2002), realizaron un estudio titulado “Exploración y protección de agua subterránea en acuíferos cristalinos fracturados en el Uruguay”, utilizando fotografías aéreas, imágenes satelitales, y métodos geofísicos electromagnéticos.

En Colombia, el estudio de los medios cristalinos fracturados con fines hidrogeológicos es prácticamente nulo. Vélez Otalvora (1999), hace una breve reseña sobre la posibilidad que representan las rocas metamórficas como almacenadoras de agua.

En el área de estudio, se viene desarrollando, por parte del GPH, una metodología para estudiar la continuidad de las diaclasas en las rocas cristalinas. Así, Beltrán y Rey (2002) en su estudio (no publicado), proponen la existencia de una red de drenaje subterránea en el área.

Otros estudios de los rasgos estructurales en el área, han sido con fines estructurales o geotécnicos. Pinto y Téllez (1999), realizaron un estudio sobre los rasgos neotectónicos asociados al sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta en el Departamento de Santander utilizando imágenes de radar y de satélite.

Londoño et al (1982-1983), realizaron un estudio sobre la evidencia de actividad tectónica cuaternaria de las fallas Santa Marta-Bucaramanga y del Suárez.

Un estudio sobre las evidencias neotectónicas del sistema de fallas del Suárez en su confluencia con el sistema de fallas de Bucaramanga, fue realizado por Díaz y Suárez (1988).

El estudio geotécnico más reciente, llevado a cabo en la zona de estudio, corresponde a la Zonificación Sismo-geotécnica Indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga, realizado por la Subdirección de Amenazas Geoambientales del Ingeominas (INGEOMINAS, 2001).

En el área se han realizado estudios con fines de aguas subterráneas aunque han sido enfocados a las rocas sedimentarias.

El estudio realizado por Duarte y López (1989), plantea la posibilidad de utilizar el agua subterránea para consumo en la Meseta de Bucaramanga. El agua sería explotada de los acuíferos en los depósitos del abanico y en las rocas más profundas de la formación Girón. En este estudio se realizó prospección geofísica, y en dos de los ocho SEV realizados se interpretan unidades geoeléctricas correlacionables hidrogeológicamente con rocas metamórficas fracturadas.

Coy (1985), realizó un estudio sobre drenes transversales aplicados a la Meseta de Bucaramanga.

La empresa Ingeniería de Suelos Ltda., ha realizado gran cantidad de sondeos eléctricos en la zona, aunque todos encaminados a las rocas sedimentarias. En algunos de los sondeos interpreta rocas metamórficas fracturadas y saturadas.

La empresa Pozos y Perforaciones, perforó un pozo en el cementerio Jardines La Colina, interpretando la litología como rocas metamórficas (comunicación verbal con el ingeniero Manuel Ortiz), obteniendo caudales de 0.5 litros/segundo.

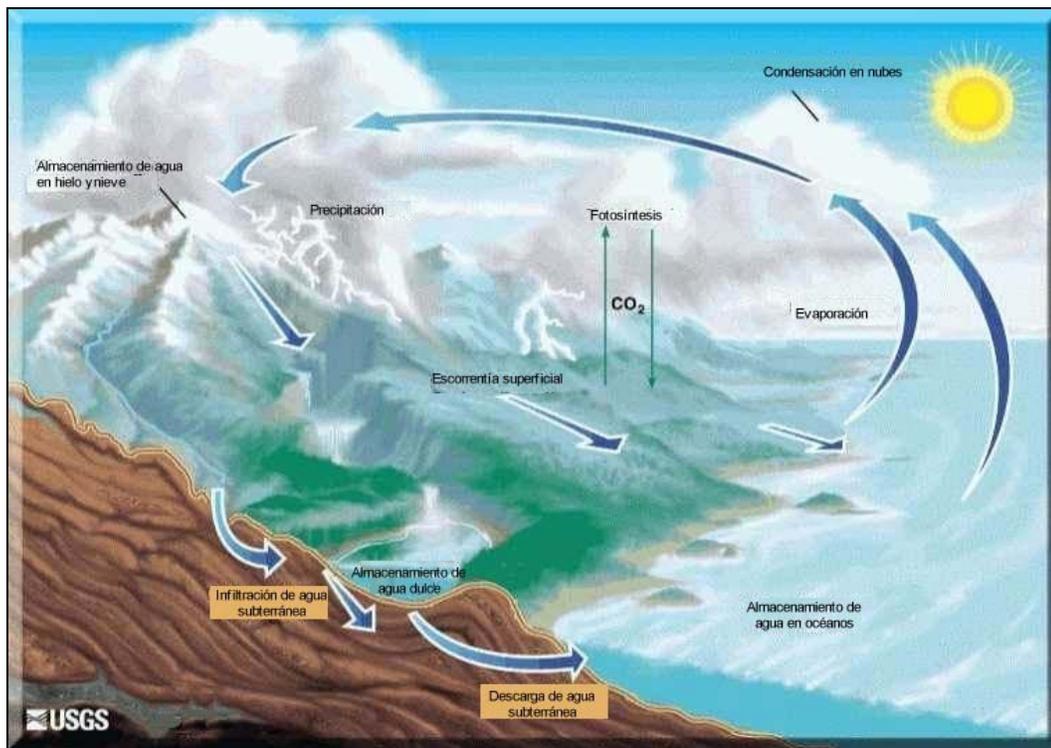
## 2. MARCO TEORICO

En la presente investigación se desarrolla una metodología para la prospección de aguas subterráneas en rocas fracturadas, cuyas características y comportamiento en el aspecto general, han sido muy poco tratados en la literatura hidrogeológica a nivel mundial. A continuación se realiza un breve recuento de algunos aspectos hidrogeológicos referentes al presente tema de estudio.

### 2.1 CICLO HIDROLÓGICO

En el siguiente diagrama (figura 4) podemos observar cómo transcurre el ciclo hidrológico.

Figura 4. Ciclo hidrológico



Tomado de <http://www.fortunecity.com>

En las flechas de la figura anterior hay una explicación completa y detallada del ciclo del agua.

El agua es un componente importante de la dinámica de nuestro planeta. En la tabla 1 podemos observar los diferentes almacenes de agua en la hidrosfera y el porcentaje de cada uno.

Tabla 1. Almacenamiento de agua en la Hidrosfera

<b>Almacenes de agua en la hidrosfera</b>	<b>(%) Porcentaje de agua total</b>
Océanos	97,6
Ríos y lagos	0,017
Humedad en el suelo	0,01
Glaciares	1,9
Agua subterránea	0,5
Vapor de agua en la atmósfera	0,001
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>

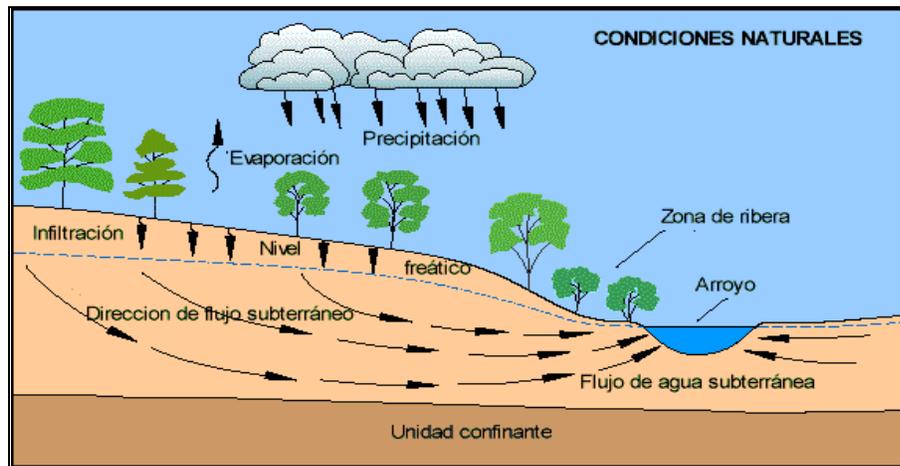
Tomado de <http://www.fortunecity.com>

El agua subterránea ocupa una parte muy pequeña del ciclo completo, pero no por ello menos importante. Si ampliamos el proceso de infiltración en el entorno del subsuelo se podría ver algo como lo representado por la figura 5.

Sin embargo se pueden producir algunas alteraciones en el sistema que modifiquen las condiciones naturales, como por ejemplo la influencia del

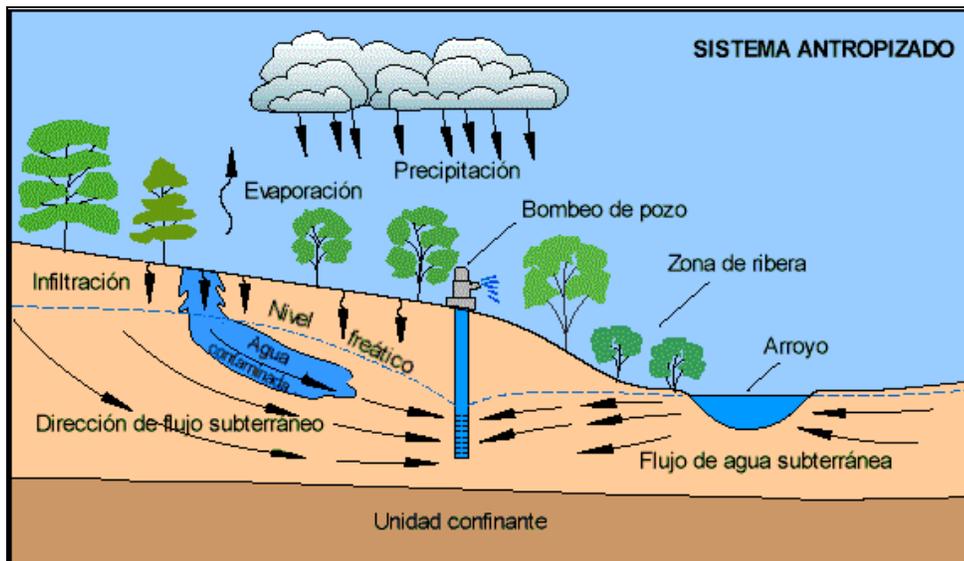
hombre en vertidos químicos y captaciones del agua subterránea, como se observa en la figura 6.

Figura 5. Condiciones naturales del Ciclo hidrológico



Tomado de <http://www.fortunecity.com>

Figura 6. Modificación de las condiciones naturales del ciclo hidrológico



Tomado de <http://www.fortunecity.com>

## 2.2 TIPOS DE ACUÍFERO

Los acuíferos son estructuras del subsuelo capaces de almacenar y ceder agua subterránea.

La clasificación de los acuíferos tiene en cuenta su génesis, y se puede realizar en base a sus propiedades físicas o en base a criterios de rentabilidad (económicos).

**2.2.1 Clasificación de acuerdo a la génesis.** La subdivisión primaria de los acuíferos atiende al proceso de formación de la porosidad, distinguiéndose:

- **Acuíferos porosos:** donde la porosidad es primaria y resulta de los huecos que quedan al sedimentar las rocas detríticas.
- **Acuíferos de fisura:** donde la porosidad es secundaria y resulta de procesos de fracturación y meteorización de rocas impermeables.
- **Acuíferos kársticos:** donde la porosidad es secundaria y resulta de procesos de disolución de rocas solubles (en especial las calizas).

**2.2.2 Clasificación de acuerdo a Los criterios físicos.** Esta clasificación tiene en cuenta fundamentalmente dos parámetros: la transmisividad del subsuelo (que tiene en cuenta la permeabilidad y el espesor saturado del acuífero) y la presión del agua en el seno del acuífero, o dicho de otra manera, el grado de dependencia del agua subterránea con el ciclo superficial.

**2.2.3 Clasificación de acuerdo a los criterios de transmisividad.** La clasificación en función de la transmisividad ( $T$ ), definida como el producto de la permeabilidad ( $k$ ) por el espesor saturado del acuífero ( $b$ ), lleva a una subdivisión arbitraria en:

- ✓ **Acuíferos:** unidades geológicas que almacenan, ceden y dejan pasar el agua subterránea con facilidad (por ejemplo arenas medias a finas bien seleccionadas).
- ✓ **Acuitardos:** unidades geológicas que almacenan agua subterránea pero la dejan pasar o ceden con dificultad (limos arenosos, limos, arenas arcillosas, etc.).
- ✓ **Acuicluídos:** unidades geológicas que almacenan agua subterránea pero que no la ceden ni la dejan pasar (lutitas).
- ✓ **Acuífugos:** unidades geológicas que ni almacenan ni dejan pasar agua subterránea (rocas ígneas o metamórficas inalteradas ni fracturadas).

**2.2.4 Clasificación de acuerdo a los criterios de la presión.** La clasificación en función de la presión del agua en el seno del acuífero lleva a clasificarlos en:

- ✓ **Libres:** el nivel permeable está directamente en contacto con la atmósfera. La presión del agua en el acuífero se iguala a la atmosférica por debajo del techo del mismo.
- ✓ **Confinados:** el techo del acuífero es un acuicluído (impermeable). La presión del agua en el seno del acuífero se estabiliza con la atmosférica por encima de su techo.
- ✓ **Semiconfinados:** es el caso más común. El techo del acuífero es un acuitardo (semipermeable), y la presión del agua se estabiliza por encima de su techo.

**2.2.5 Clasificación de acuerdo a los criterios económicos.** En esta clasificación se considera que un acuífero es aquel que contiene y cede agua subterránea en volumen o calidad tal que la vuelvan económicamente aprovechable. Estos criterios dependerán de las necesidades del usuario final del agua subterránea.

Una unidad geológica podrá ser considerada un acuífero para un usuario y podrá ser clasificada como un acuitardo para otro. Dependerá en los caudales exigidos o simplemente en la conformación geológica de la zona.

Hasta el momento todos los conceptos se han referido a acuíferos porosos o sedimentarios. Estos acuíferos han sido estudiados ampliamente debido a varias causas, entre las que se destaca que las estructuras sedimentarias son relativamente homogéneas en el momento de modelarlas e intentar representarlas matemáticamente, lo que ha permitido estudiarlas a mucho más detalle que los acuíferos fisurados. Su disposición horizontal, con base y techo más o menos horizontales y sin discontinuidades importantes permite extrapolar resultados de estudios puntuales a toda su área de existencia.

### **2.3 ACUIFEROS FRACTURADOS**

Gran parte de los siguientes conceptos fueron tomados de <http://www.fagro.edu.uy/geologia>. Los problemas de los acuíferos de fractura radican en la heterogeneidad que en la enorme mayoría de los casos presentan. Es muy difícil introducir conceptos como el de permeabilidad o transmisividad en grupos de fracturas, y mucho menos la compleja formulación matemática que intenta describir el comportamiento del nivel piezométrico en el momento de la explotación, que presupone condiciones de uniformismo e invarianza de las condiciones de entorno que claramente no se cumplen en el caso de los acuíferos de fractura.

El hecho más notable desde el punto de vista del agua subterránea de las rocas “duras” (ígneas y metamórficas) es que carecen de porosidad. Dicho de otra manera, las rocas “cristalinas” son impermeables, no almacenan ni conducen ningún tipo de fluido por sí mismas.

La única manera de que el agua se infiltre y se almacene en el seno de las rocas del basamento cristalino es que éstas hayan adquirido algún tipo de porosidad secundaria por fenómenos que ocurrieron posteriormente a su génesis. Existen dos fenómenos por los que una roca particular (sin porosidad primaria) adquiere porosidad secundaria: disolución y fracturación.

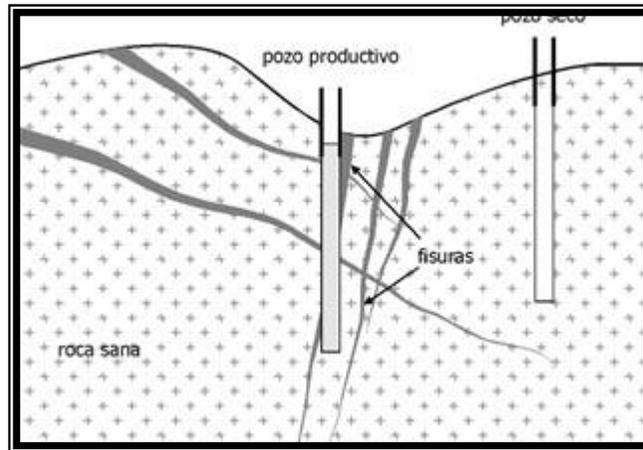
En los primeros centenares de metros de la corteza terrestre las rocas “duras” tienen la propiedad de comportarse de forma frágil. Ello quiere decir que se fracturarán ante esfuerzos que actúen sobre la porción del planeta en el que estén emplazadas. A lo largo de la historia geológica de nuestro país han ocurrido una serie de eventos tectónicos dando lugar a un conjunto de familias de fracturas que recortan al basamento cristalino y que eventualmente permiten la acumulación de agua subterránea.

De lo antes dicho surge naturalmente una observación de vital importancia: la única manera de obtener agua subterránea en un terreno de rocas “duras” es ubicar una perforación que intercepte una fractura, como se observa en la figura 7. Por lo general las fracturas o fallas son verticales a subverticales, por lo que la ubicación precisa de la perforación es crítica.

Es necesario aclarar otro concepto respecto a las fracturas en el basamento cristalino: todas las fracturas viabilizan en mayor o menor medida la circulación del agua subterránea; por lo tanto también serán conductos que favorecen el desarrollo de la meteorización, responsable de la degradación de la roca original y neoformación de minerales estables en condiciones

superficiales. Los minerales estables en la superficie terrestre son por excelencia las arcillas, que resultan del reacomodamiento de los elementos químicos que forman a los minerales constituyentes de las rocas originales (ígneas y metamórficas).

Figura 7. Acuífero Fracturado



Tomada de <http://www.fagro.edu.uy/geologia>

Esto tiene una importancia vital frente al comportamiento del agua subterránea. Si las fracturas afectan rocas compuestas por minerales fácilmente meteorizables, la fractura se verá sellada o taponada con las arcillas neoformadas. Por el contrario, si las fracturas recortan a rocas compuestas por minerales poco alterables éstas permanecerán limpias y abiertas, maximizándose el almacenamiento y la conducción del agua subterránea.

Es necesario además que esas fracturas estén conectadas con el ciclo hidrológico para que puedan recargarse con agua. Toda el agua subterránea proviene de la infiltración de la lluvia, y para llegar desde la atmósfera al subsuelo deberá indefectiblemente atravesar el suelo. Las propiedades químicas del suelo y las actividades que se desarrollen sobre él influirán en la

composición química y la calidad del agua que se infiltrará. El manto de alteración de las rocas cristalinas en los primeros metros desde la superficie funciona como un acuitardo que almacena el agua de lluvia y lentamente la conduce o filtra a las fracturas subyacentes.

Los lugares de la superficie terrestre en que el agua está durante mayor tiempo en contacto con las fracturas que afectan el subsuelo son los cursos de agua superficial: ríos, cañadas y arroyos. Por lo general en áreas de basamento cristalino los cursos superficiales están en mayor o menor grado “controlados” por la red de fracturas del subsuelo. Al estar las rocas duras fracturadas o rotas, a las cañadas, ríos y arroyos se les vuelve más sencillo (desde el punto de vista energético) entallarse sobre las fracturas. Esto tiene efectos beneficiosos sobre el agua subterránea, ya que en una red de fracturas que condiciona a cursos superficiales, la recarga está maximizada.

Una vez que se logra identificar una red de fracturas que afectan rocas poco meteorizables y con recarga asegurada es posible introducir el término **acuífero fracturado**(observar figura 7).

Cuando las fracturas están abiertas y limpias (afectan a rocas de composición ideal para el almacenamiento de agua subterránea), y las condiciones de recarga están aseguradas mediante interconexión con el sistema hídrico superficial, las probabilidades de obtener caudales satisfactorios en una obra de captación correctamente ubicada, diseñada y construida son elevadas.

Es muy importante tener en cuenta que en los acuíferos de fractura es muy difícil establecer superficies piezométricas regionales, es muy difícil predecir el comportamiento del acuífero y de las obras que lo intercepten, los resultados de un estudio puntual no son extrapolables.

### **3. APROXIMACION ESTRUCTURAL**

Para estudiar los fenómenos estructurales se debe tener en cuenta la escala de las mismas estructuras. Así podemos clasificar los métodos de estudio en directos e indirectos, (Albino, 1998).

Los Métodos directos consisten en observar directamente en campo o en muestra de mano los fenómenos existentes, incluyen cualquier descripción de la morfología. La representación de la información se realiza en mapas diagramas, etc.

Los Métodos indirectos, tienen que ver con la geofísica, sísmica, gravimetría, geoeléctrica y proporciona información donde el método directo no alcanza.

Los fenómenos estructurales se estudian básicamente analizando la relación espacial existente entre los elementos lineares y planeares que los constituyen, así como también los aspectos mecánicos y causantes de la deformación estructural de las rocas.

El interés radica principalmente en el conocimiento de la forma, extensión y distribución de las fracturas presentes en el área, dejando de lado los aspectos mecánicos y causantes de la deformación. Para cumplir con este objetivo inicialmente se realizó un estudio fotogeológico y posteriormente un análisis estadístico de lineamientos fotogeológicos y de la red de drenaje, así como un análisis de la topografía, temas que se tratarán en este capítulo. En el capítulo 5 se tratarán los mismos aspectos, aunque con datos tomados directamente en afloramientos.

### **3.1 ANALISIS DE MAPAS TOPOGRÁFICOS.**

Este análisis se realizó con las planchas topográficas 120-II-B-1 y 109-IV-D-3 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, y con la base topográfica a escala 1:2000 digital existente del área metropolitana de Bucaramanga.

De este análisis se concluye: (la topografía, representada por las curvas de nivel se pueden observar en el anexo D).

-Las curvas de nivel presentan dos direcciones predominantes, NNE-SSW y NW-SE. La topografía esta controlada estructuralmente por la dirección general de la Cordillera Oriental (NNE-SSW) y localmente esta desplazada por fallas de rumbo.

-Las direcciones de los ejes de los cerros son dos, una dirección principal NW-SE, que se observa claramente en el sector de mayores alturas al este del área, en el filo donde se ubican los Barrios Buenos Aires y Buena vista, estas direcciones también se observan hacia la parte central del área en las estribaciones de los cerros. Esta dirección es paralela a las fallas de Bucaramanga y la falla de Zapamanga. La otra dirección de los ejes de los cerros como se observa en la figura 8 es NE-SW, paralela a la dirección de la falla la Flora.

-La observación más detallada de este mapa muestra un avanzado estado de deformación estructural, con cambios bruscos en la dirección de los cerros, intersección de direcciones y un visible control en el drenaje, con diferentes direcciones preferenciales.

### **3.2 INTERPRETACION Y ANÁLISIS FOTOGEOLÓGICO**

En esta etapa del proyecto se tuvieron los siguiente objetivos: Identificar fotogeologicamente unidades litológicas, establecer fotogeologicamente el patrón estructural del área, identificar vías de acceso, realizar un mapa de la red de drenaje, realizar un mapa corregido de la red de drenaje, elaborar un diagrama rosa de dirección de lineamientos fotogeológicos, elaborar un diagrama rosa de la red de drenaje corregida, todos ellos encaminados a tener la comprensión inicial del comportamiento estructural del área de estudio. Además, también se enfatizó en determinar los factores topográficos favorables o desfavorables para la exploración de agua subterránea en el sector y establecer sitios propicios para la realización de los Sondeos Eléctricos Verticales.

Este análisis fotogeológico se realizó con fotos aéreas números 199-200-201-202-203 del vuelo c-2526 y las números 61-62-63 del vuelo c-2596, pertenecientes a un sector de las plancha del IGAC 120-II-B-1 y 109-IV-D-3 que corresponden a un sector al oriente de la ciudad de Bucaramanga (Santander).

En este estudio se prestó especial atención a los lineamientos, fallas y fracturas en general, que se trazaron según los criterios y parámetros convencionales de la fotogeología para análisis estructurales, como son: control estructural de la red hidrográfica (drenajes rectos, angularidad de la red fluvial, deflexión de drenajes principales y secundarios etc), escarpes de falla, cambios de pendiente, colinas alineadas, facetas triangulares, sillas de falla, ganchos de falla, trinchera de falla, valles lineales, lomos de presión y charcas de falla.

Se reconocieron tres direcciones principales de lineamientos fotogeológicos, dos de las cuales se correlacionaron con fallas principales durante la etapa de campo y la tercera dirección se dejó como lineamiento fotogeológico. La primera dirección es aproximadamente N-S, la cual coincide con las fallas paralelas al trazo de la falla principal Bucaramanga-Santa Marta, estas fallas paralelas (Bucaramanga-Santa Marta, Morrórico y Miramanga) se reconocen fotogeológicamente por los escarpes de falla, drenajes rectos, cambios de pendiente, colinas alineadas, sillas de falla y charcas de falla. La segunda dirección es la NE-SW y corresponde al trazo de la falla la Flora, la cual se reconoce fotogeológicamente por la angularidad de la red fluvial, ganchos de falla, valles lineales, lomos de presión. Es importante resaltar, el desplazamiento sinextral de la falla La Flora, cuyo movimiento afecta a las fallas paralelas. Más hacia el sur, el trazo de la quebrada La Iglesia se identifica como un lineamiento fotogeológico de dirección NE-SW.

La tercera dirección (SE-NW) no fue correlacionada en campo con ninguna falla principal, fotogeológicamente se identifica por valles lineales, algunos escarpes de falla y algunos deslizamientos.

Una vez realizada la fotogeología se procedió a realizar la medición de las direcciones de los lineamientos fotogeológicos, las cuales se observan en la tabla 2. Con estos datos se realizó un estudio estadístico con el fin de reconocer inicialmente el comportamiento de las fracturas en el área. Este estudio se realizó con el software Steronett 2.0.

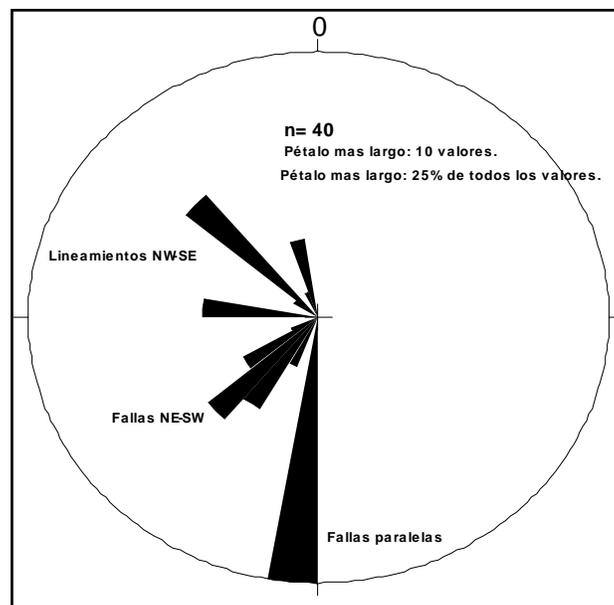
Tabla 2. Direcciones de los Lineamientos Fotogeológicos del área de estudio

Datos numéricos del azimut de los lineamientos fotogeológicos presentes en el área de estudio		
Azimut	Azimut	Azimut
180	340	180
180	225	205
180	315	210
210	340	180
210	220	220
180	300	230
315	230	240
205	225	270
330	180	345
270	180	270
270	315	

### 3.2.1 Diagrama Rosa de la Dirección de Lineamientos Fotogeológicos.

Como se observa en la figura 8 existen en el área de estudio tres direcciones principales de lineamientos fotogeológico una de las cuales corresponde a la dirección principal de diaclasamiento, dirección N50°E.

Figura 8. Diagrama de roseta de lineamientos fotogeológicos.



En ella también se observa, que la tendencia de los lineamientos N-S es la mas abundante, estos lineamientos corresponden a la dirección del patrón de fallas paralelas Santa Marta- Bucaramanga.

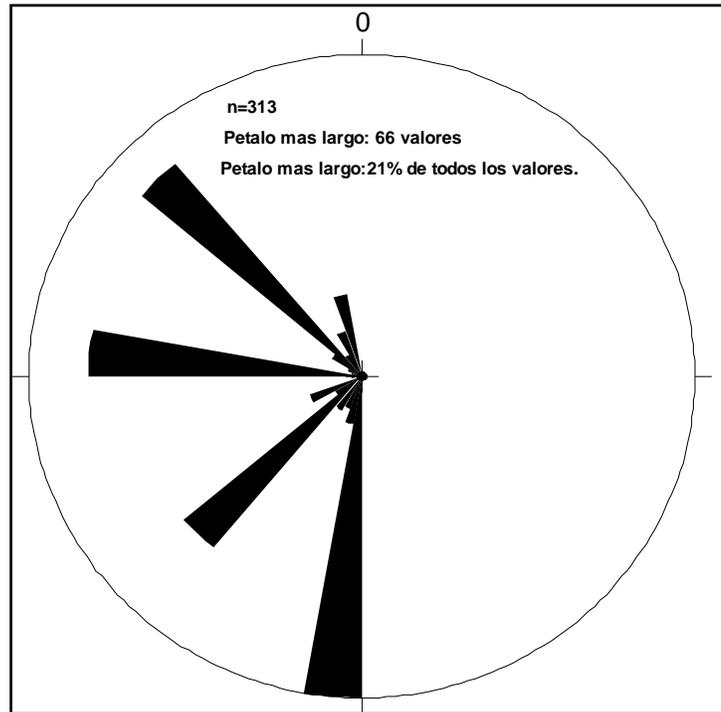
**3.2.2 Red de Drenaje Corregida.** El interés de realizar este estudio radica en que la disposición y arreglo de la red de drenaje de un área esta condicionada por factores topográficos, litológicos y fracturamiento, los cuales conllevan al control de la red y son reflejo de direcciones de fracturas a través de las cuales circula el agua superficialmente.

Para determinar la tendencia de orientación de la red de drenaje (Anexo A) se requiere de un procedimiento de rectificación, el cual consiste en unir los extremos sueltos y los nudos de las quebradas por líneas rectas, y posteriormente se mide la orientación de cada línea, para evaluar estadísticamente su tendencia, la anterior metodología es la descrita por Scheidegger, 1981. La red de drenaje rectificadas del área de estudio se observa en el Anexo B. Con la orientación de cada línea, que en total sumaron 313 datos como se observa en el Anexo C, se construyó un diagrama rosa de la red de drenaje rectificadas, el cual se ilustra en la figura 9.

En éste, se observan cuatro direcciones principales, tres de las cuales, coinciden con las direcciones mencionadas en el diagrama de lineamientos fotogeológicos. Esto no indica que halla una tendencia más que en las presentadas en los lineamientos fotogeológicos, lo que sucede es que esta cuarta tendencia E-W si aparece en los lineamientos, como se observó en la figura 8, pero menos marcada.

Con los dos anteriores diagramas de rosetas observamos la existencia de una relación íntima entre el fracturamiento de un área y su red de drenaje.

Figura 9. Diagrama de roseta de la red de drenaje rectificada.



Del análisis realizado en este capítulo se determinaron tres zonas iniciales de exploración para proseguir con el estudio general propuesto en la metodología de este proyecto; inicialmente se enfatizó en las tres direcciones principales de lineamientos, escogiendo sitios que estuvieran ubicados topográficamente en lugares bajos, intercepción de fallas, lugares amplios, donde se pudieran realizar tendidos (para la investigación geofísica) lo más largo posible y en donde posteriormente se pudiera ubicar un equipo de perforación para la realización del pozo. Teniendo en cuenta los anteriores parámetros se escogieron preliminarmente los siguientes sitios para realizar la geofísica:

1. Quebrada la Flora sobre el trazo de la falla Bucaramanga-Santa Marta.
2. Quebrada la Flora sobre el trazo de la falla la Flora en el parque La Flora.
3. Barrio Bajos de Pan de Azúcar.
4. Barrio el Jardín.
5. Carretera Bucaramanga-Cúcuta a la altura del barrio Miraflores.

## 4. GEOLOGÍA

### 4.1 LITOLOGÍA

**4.1.1 Rocas Metamórficas. Neis de Bucaramanga (Peb).** Esta unidad aflora en tres fajas que aparecen cartografiadas entre los cuadrángulos H12 y H13. El área de estudio se encuentra ubicada en una de las tres fajas, la faja mas occidental, es la que recibe el nombre de faja de Bucaramanga, Ward et al, 1973. Esta faja esta limitada al Oeste por la falla del mismo nombre, y en la vecindad de la ciudad, hacia el Norte hasta el batolito de Río Negro. Hacia el NE esta cubierta por las rocas metamórficas de grado más bajo de la Formación Silgará. El lado oriental esta limitado por el batolito de Santa Bárbara y termina en punta hacia el sur entre este batolito y la falla de Bucaramanga en el área de Cepitá. El neis de esta faja consiste en meta-pelitas, semi-pelitas y meta-areniscas intercaladas con capas delgadas locales de rocas calcosilicatadas y mármol, esta unidad consta de rocas de alto grado de metamorfismo y edad precámbrica. Las zonas de migmatitas que contienen paraneis mezclado con neis augen y neis granítico son abundantes en el neis de Bucaramanga adyacente al Plutón de la Corcova, pero estas rocas están profundamente meteorizadas. Las zonas donde los diques son masas pequeñas de cuarzo monzonita o granodiorita de la Corcova son poco abundantes. Ward et al, 1973.

En el área de estudio afloran dos tipos de Neis (Anexo D), un neis anfibolítico, y un neis Cuarzofeldespático.

- **Neis Anfibólico.** Esta unidad aflora en por lo menos el 50 % del área de estudio, apreciándose buenos afloramientos al noreste sobre la carretera que conduce a la ciudad de Cúcuta, así como en un camino carretable que

conduce del restaurante el Mirador hasta los tanques de almacenamiento de agua del acueducto metropolitano de Bucaramanga. Su composición es: Anfíbol 40%, plagioclasa 20%, cuarzo 30% y piroxenos en menor proporción (5%); como mineral accesorio biotita 2%, como secundarios epidota y clorita. Se caracteriza por presentar una textura néisica muy bien definida, con alternancia composicional de bandas anfibólicas y bandas cuarzofeldespáticas de espesor variable.

En los alrededores del barrio Bajos de Pan de Azúcar, el neis se hace mas biotítico variando su composición a: Biotita 50%, cuarzo 15%, plagioclasa 15%, anfíbol 10% y moscovita 10%. Correspondiente ya a un neis biotítico. Se aprecia claramente la textura néisica y localmente textura hojosa.

Esta unidad se expresa geomorfológicamente con un relieve quebrado que forma sierras alargadas, con filos cortantes en su cima. Las vertientes de cada sierra son rectilíneas. Presenta un drenaje integrado uniforme, de densidad media, con un patrón Angular, se observa como en los valles los tributarios primarios interceptan en ángulo recto a los secundarios y estos últimos son paralelos entre si, dejando ver un control estructural. Todos los valles son profundos y en forma de V. Fotogeologicamente, el tono de esta unidad se aprecia gris claro, aunque es enmascarado en gran parte de su área por la vegetación. Se observa una textura bandeada, donde la vegetación lo permite. La vegetación es abundante principalmente en las vertientes con árboles grandes y arbustos, y es nula solo en los sectores urbanizados.

- **Neis Cuarzofeldespático.** Esta unidad aflora al sur del área, sus afloramientos se pueden apreciar claramente sobre el camino de herradura que comunica el barrio Bajos de Pan de Azúcar con la hacienda la Aurora y de esta ultima a la carretera Bucaramanga-Cúcuta. La roca es leucocrática,

con tonalidades rosadas y blancas, de textura fanerítica y su composición en muestra de mano es Cuarzo 55%, plagioclasa 30%, pirita 5%, Moscovita 5%, Otros 5%, correspondiendo composicionalmente a una Cuarzodiorita.

Geomorfológicamente se observa con cimas redondeadas y las quebradas forman pinzas en sus cabeceras.

**4.1.2 Rocas Ígneas (JRcg).** En el Macizo de Santander afloran varios cuerpos ígneos no foliados que lo intruyen. Estos cuerpos varían desde diorita a granito, Ward, D., et al., (1973). El nombre de Grupo Plutónico de Santander fue propuesto por Ward, D., et al, como término único para definir los batolitos mayores del Macizo de Santander. Este grupo puede dividirse en dos tipos de roca: Granito rosado y Cuarzomonzonita, y Cuarzomonzonita gris y granodiorita. Ward sugiere una edad relativa asignada al Jurásico y/o Triásico-Jurásico, con base en relaciones de campo y dataciones radiométricas.

En el área de estudio afloran rocas ígneas correspondientes al primer tipo de rocas, es decir, Granito y Cuarzomonzonita. (Observar Anexo D)

- **Cuarzomonzonita.** Algunos afloramientos de esta roca se encuentran en los alrededores de los barrios Pan de Azúcar y Bajos de Pan de Azúcar. Es una roca leucocrática, blanca, de textura fanerítica y estructura masiva homogénea aunque con algunas concentraciones locales de cuarzo. Su composición es Cuarzo 50%, Plagioclasa 30%, feldespato potásico 15%, máficos 4%, otros 1%. Este cuerpo es notablemente lineal y sigue la orientación de la falla la Flora, la cual lo limita al Oeste.

- **Granito.** Un cuerpo de granito aflora al Oeste del área de estudio, con una orientación norte-sur y una extensión de aproximadamente 1 Km, entre los

barrios el Jardín y Albania. Este cuerpo sigue la orientación de la Falla de Bucaramanga la cual le ha causado un alto fracturamiento. Es un Granito rosado, de textura fanerítica y estructura masiva homogénea, altamente fracturado y meteorizado. Su composición es Cuarzo 45%, feldespatos potásicos 35%, plagioclasa 10%, óxidos 5%, máficos 5%.

**4.1.3 Sedimentos Cuaternarios. Formación Bucaramanga.** Según Niño y Vargas, 1992, la cuenca de Bucaramanga corresponde a una depresión tectónica asociada a los sistemas de falla Bucaramanga-Santa Marta y Suárez-Riód de Oro y sus sedimentos se pueden definir como una formación compuesta de cinco segmentos, Calcáreo, Órganos, Finos de Bucaramanga, Gravoso y Limos Rojos. Niño y Vargas proponen el nombre de Formación Meseta de Bucaramanga y su ambiente de depósito corresponde a un abanico húmedo de edad Cuaternaria, formado por el paleo cauce del río Surata.

En el área de estudio aflora el segmento Limos Rojos (Qblr), el cual cubre las unidades de rocas ígneas al oeste del área. Este segmento consta de limos gravosos de color amarillo-rojizo, con pequeños niveles de gravas, y presencia de bloques con diámetro hasta de 1 metro, angulares, de baja esfericidad de areniscas blancas silíceas, duras, no friables que poseen un color de alteración naranja. También presencia de cantos de rocas ígneas. Los niveles de gravas son lentes irregulares de poco espesor 20 cm.

**4.1.4 Depósitos Aluviales. Depósitos Aluviales de Cauce y Llanura de Inundación (Qal).** Estos depósitos se originan por la acción de los cauces de las quebradas presentes en la zona. Quebrada la Iglesia y la quebrada la Flora.

Consiste de arenas cuarzosas con poco lodo, cantos de areniscas silíceas, areniscas conglomeráticas, conglomerados, cuarcitas y lodolitas, como también Granito, Granodiorita, Diorita, Gabro, Neis y Esquisto, en una matriz areno lodosa. Los cantos son de forma subredondeada a redondeada y baja esfericidad (Zonificación Sismogeotécnica Indicativa de Área Metropolitana de Bucaramanga, 2001).

**4.1.5 Depósitos Coluviales o de Ladera (QI).** Son depósitos acumulados, por lo general, en la base de escarpes, y provienen del desprendimiento de materiales de laderas adyacentes, por la acción de la fuerza de gravedad. Estos depósitos se encuentran dispersos, relacionados con rocas muy fracturadas del Neis de Bucaramanga y los cuerpos ígneos presentes en el área.

## **4.2 RASGOS ESTRUCTURALES**

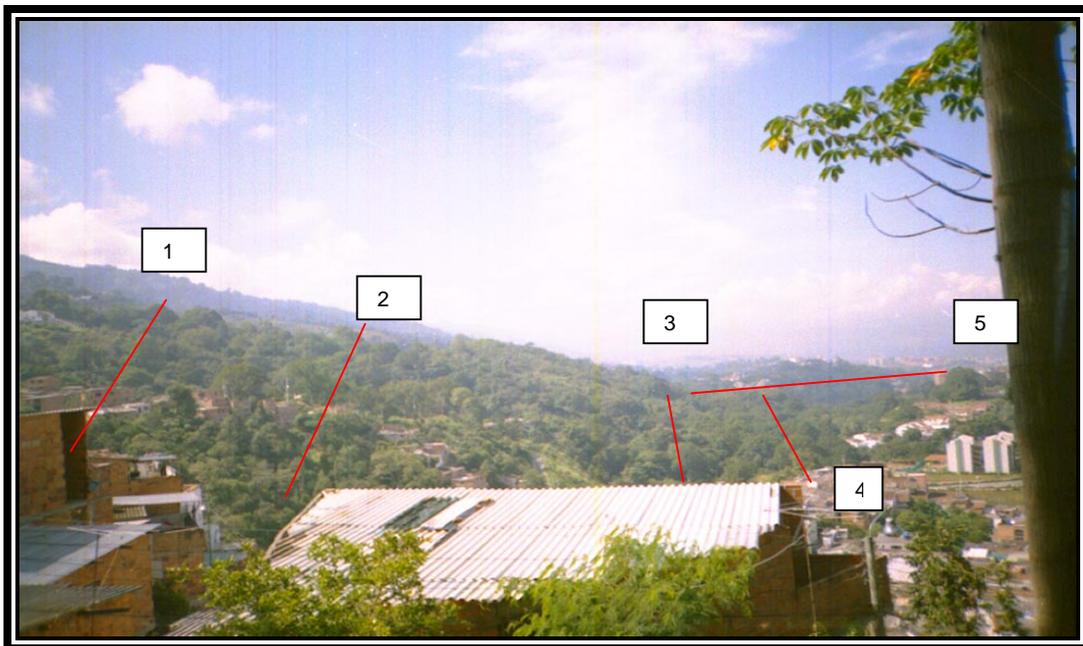
**4.2.1 Marco Tectónico Regional.** El área de estudio se encuentra ubicada en la zona de influencia de la Falla de Bucaramanga, que es una falla de extensión regional que puede trazarse desde el extremo sur del Macizo de Santander hasta la Costa Caribe, al Oeste de Santa Marta. La Falla de Bucaramanga domina el patrón de fallas en el área estudiada donde se han observado sistemas de fallas paralelas. La zona de falla contiene mucha roca fracturada y localmente cizallada con numerosas superficies de espejos de falla orientados en diferentes direcciones. Esta falla tiene una traza aproximadamente recta desde el Playón (Santander) hasta el río Manco , cerca de los Curos; esta traza se halla interrumpida solamente donde la falla esta desplazada por otras de rumbo NE.(Ward et al, 1973).

El buzamiento aparentemente fuerte y la gran distancia a lo largo de la cual pueden trazarse los lineamientos comprueban que es una gran falla de rumbo (Raasveldt et al, 1956).

Julivert(1961) muestra la falla de Bucaramanga como perteneciente a una serie de fallas inversas de ángulo alto con el bloque oriental levantado y con un desplazamiento primariamente vertical.

**4.2.2 Descripción de Fallas.** Como ya se menciona en el capítulo 3, se reconocieron tres direcciones principales de lineamientos fotogeológicos, de las cuales en esta fase de campo dos de dichas direcciones se correlacionaron con fallas principales y la tercera dirección se dejó como lineamiento fotogeológico.

Figura 10. Panorámica del área de estudio, donde se observan las cuatro fallas principales que la afectan. Dirección de la fotografía E-W, sobre Morrорico.



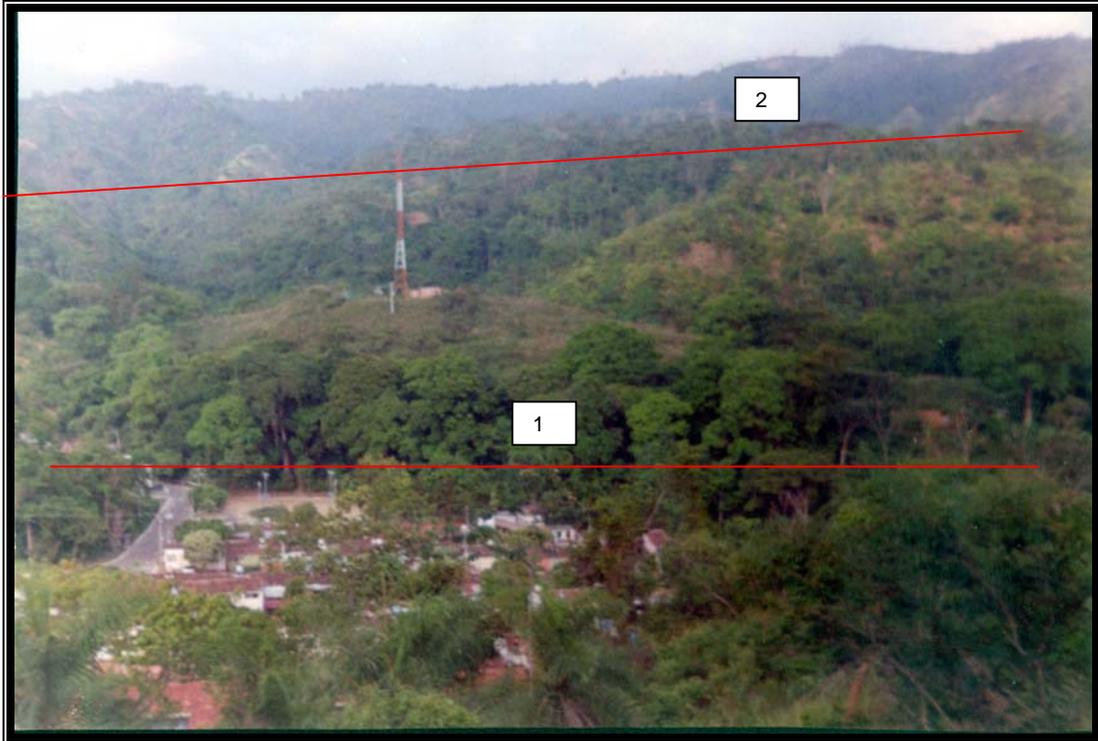
En la panorámica (figura 10) anterior se pueden observar las cuatro fallas principales que afectan el área de estudio y que corresponden a dos de las tres direcciones de lineamientos fotogeológicos. En la dirección aproximada N-S se encuentran las fallas Miramanga (1), Morrорico (2), y la falla de Bucaramanga a la cual corresponden los trazos (3) y (4). En la dirección NE-

SW se observa el trazo de la falla la Flora (5). En campo para el reconocimiento de fallas se utilizaron criterios geomorfológicos y rasgos intrínsecos a la falla. Criterios geomorfológicos como drenajes rectos, angularidad de la red fluvial, deflexión de drenajes principales y secundarios, escarpes de falla, cambios de pendiente, colinas alineadas, sillas de falla, ganchos de falla, trinchera de falla, valles lineales, lomos de presión, lomos de Obturación y charcas de falla. Rasgos intrínsecos a la falla, como rocas cataclásticas y estructuras en el plano de la falla.

- **Fallas Paralelas.** Las fallas paralelas corresponden a las de dirección N-S, es decir, la falla de Miramanga, la de Morrórico y la falla Principal de Bucaramanga. Estas fallas presentan un patrón subparalelo, además de una geometría de franja alargada, característica de fallas de rumbo. Los cerros y los drenajes desplazados hacia el Sureste, como ocurre en varios sectores de la quebrada la flora, denotan el movimiento sinextral de estas fallas.

En la siguiente panorámica (figura 11), se observa el trazo de las fallas de Bucaramanga (1) y la de Morrórico (2), se logra apreciar un lomo de Obturación que consiste en un levantamiento rodeado por un drenaje alineado al trazo de falla, (el levantamiento sobre el cual se ubica la torre de transmisión). También se observa un lomo de Presión al SE de la torre, que es un levantamiento alineado al trazo de falla.

Figura 11. Panorámica a la altura del barrio los Cedros, donde se observa el trazo de las fallas de Bucaramanga(1) y Morrорico(2), así como un lomo de presión y uno de obturación. Dirección de la fotografía N-S



En la Figura 12, se logra apreciar el cambio abrupto de la pendiente del terreno a lo largo del trazo de la falla de Bucaramanga, rasgo geomorfológico al que se le denomina escarpe de falla. Se denota el cambio litológico entre las rocas cristalinas al este de la falla principal y las rocas sedimentarias al Oeste de la falla principal.

Figura 12. Escarpe de falla al sur del área de estudio, a lo largo del trazo de la falla de Bucaramanga. Dirección de la fotografía NE-SW.



Fotogeológicamente se reconocieron dos lagunas de falla, una a lo largo del trazo de la falla de Miramanga y la otra sobre la falla de Morrórico, hacia el norte del área de estudio, aunque solo una de estas lagunas se reconoció en campo, el lago Miramanga, sobre el trazo de la falla que lleva su mismo nombre. Estas lagunas son pequeños cuerpos de aguas, originados por el estancamiento de antiguos drenajes, producto de movimientos diferenciales del terreno, tanto en la vertical como en la horizontal.

La deflexión de Drenajes es otra característica geomorfológica que presentan estas fallas. Muchos drenajes deflectados, es decir, corrientes de primer o segundo orden que cambian abruptamente de dirección, se observan a la altura del barrio Albania, y el barrio bajos de pan de azúcar.

Los ganchos de Falla también son comunes en el área de estudio, los cuales consisten en cerros desplazados con respecto al eje de la divisoria de aguas principal; este desplazamiento puede indicar el sentido del movimiento de una falla de rumbo, esta característica deja ver en el área el movimiento sinextral de estas fallas paralelas.

Dentro de los rasgos intrínsecos, se observaron en campos innumerables espejos de fallas y estrías en los planos de las fallas, principalmente a lo largo del trazo de la falla de Bucaramanga y la falla de Morrórico. Así como brechas de falla a lo largo de las fallas mencionadas anteriormente y también sobre la falla de Miramanga. Estos rasgos se pueden apreciar en las figuras 13 y 14.

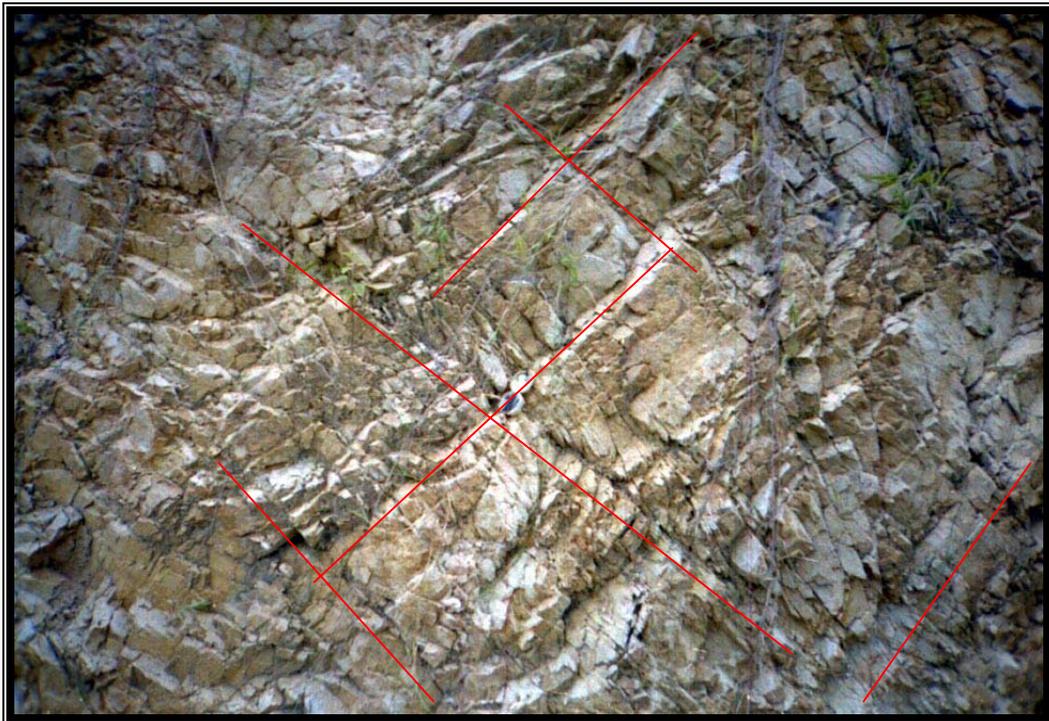
Figura 13. Espejo de falla (1) y brecha de falla sobre el trazo de la falla Morrórico, estación ubicada sobre el camino que conduce del restaurante el mirador a los tanques del acueducto. Dirección de la fotografía N80W.



En la anterior fotografía, se aprecia el plano de un espejo de falla, sobre el cual es posible apreciar en campo estrías de falla.

En la figura 14 se puede apreciar una brecha de falla ubicada sobre el trazo de la falla Miramanga, nótese el alto grado de fracturamiento de la roca y la interconexión entre dichas fracturas.

Figura 14. Brecha de falla sobre el trazo de la falla Miramanga, estación ubicada sobre el camino que conduce del restaurante el mirador a los tanques del acueducto. Dirección de la fotografía N-S.



- **Fallas Dextrales.** En el área de estudio se reconoce el trazo de la falla la Flora, la cual tiene un rumbo N 40-50 E. Esta falla se trazó principalmente por criterios geomorfológicos, como la deflexión de drenajes, las corrientes de aguas que tienen dirección N-S y NE-SW, son desplazadas hacia el S-W a lo largo del trazo de la falla.

También se observan ganchos de fallas, los cerros que tienen dirección N-S y NW-SE, son desviados hacia el SW, en la zona de influencia de la falla. La

dirección del cerro donde se ubica el barrio Altos de pan de azúcar esta dominada por el trazo de esta falla.

Las características de valle lineal, típica de una falla de rumbo, pueden observarse al Oeste del cerro Altos de Pan de Azúcar, a la altura del parque la Flora.

Todas las anteriores características evidencian el comportamiento dextral de esta falla, el cual afecta las fallas paralelas, cortándolas y desplazando su trazo a lo largo de la falla la Flora hacia el S-W.

**4.2.3 Diaclasas.** Este tipo de fracturas menores son estructuras muy importantes para estudios hidrogeológicos, ya que sus características geométricas como inclinación, longitud, espaciamiento, interconexión y persistencia en el perfil del suelo, son las que definen o no la existencia de un acuífero de fisura. Las diaclasas son fracturas que muestran un muy pequeño desplazamiento normal a su superficie y nada o muy pequeño desplazamiento paralelo a las superficies de fractura. A continuación trataremos varias características de las diaclasas (tipo y tamaño de fractura, interconexión de fracturas, tipo de roca donde se produce la fracturación, porosidad de fractura) que pueden facilitar o no el almacenamiento de agua. Los siguientes conceptos son tomados de [www.fagro.edu.uy/geologia](http://www.fagro.edu.uy/geologia) .

#### **Tipo y tamaño de fractura.**

Si se relaciona al almacenamiento de agua en las rocas cristalinas, con el tipo de fractura, se pueden distinguir tres casos:

**Caso 1.** Fracturas de Tensión. Tienen generalmente gran capacidad de almacenamiento debido al buen desarrollo de redes de fracturas interconectadas donde se generan grandes espacios de circulación y

almacenamiento de agua, transformando el cuerpo rocoso en buenos sistemas para el almacenamiento de agua subterránea.

**Caso 2.** Fracturas de corrimiento. Puede suceder que dos o más fallas se corten formando ejes de intersección con grandes espacios o cavernas que permiten almacenamientos de grandes volúmenes de agua con rendimientos excepcionales a poca profundidad.

Constituyen verdaderas fallas, con desplazamiento relativo de los bloques a lo largo de los flancos de debilidad. En algunos casos, el movimiento origina un fuerte brechamiento, que puede tener diferentes tamaños, en función de la mecánica del fallamiento, del comportamiento de la roca y de los procesos de alteración. Los tamaños gruesos y medianos generan porosidades efectivas altas, constituyendo buenos acuíferos o con mayor propiedad, buenos conductores hidráulicos. Los finos presentan baja permeabilidad y por ello poseen un comportamiento asimilable al de un acuitardo.

En otros casos, están casi cerradas debido al efecto de presiones residuales normales a los planos de corrimiento, que tienen posición subhorizontal, lo que elimina los espacios entre bloques.

**Caso 3.** Fracturación por descompresión. La pérdida de carga litostática que afecta a los cuerpos ígneos y metamórficos por erosión de las unidades suprayacentes, generan una serie de fracturas horizontales o subhorizontales paralelas a la superficie, que funcionan como colectores del flujo circulante desde las fracturas verticales.

Sin duda alguna en el área de estudio, se presentan los tres tipos de fracturas, fracturas de tensión como las que se observan en la figura 14 que constituyen verdaderos enjambres de fracturas con gran densidad e

interconectadas entre si. Fracturas de corrimiento, en la intersección de las fallas paralelas con las fallas dextrales, constituyéndose en sectores de gran posibilidad para la presencia de agua y fracturas por descompresión ya que en el área existen datos de diaclasas con buzamientos subhorizontales en ángulos que oscilan entre 15 y 30 grados, además por el solo hecho de tratarse de rocas metamórficas que en algún tiempo geológico estuvieron a grandes profundidades y hoy se encuentran aflorando en la superficie, indica que a través del tiempo han perdido carga litostática.

### **Interconexión de Fracturas.**

El volumen de agua almacenado depende en gran medida de la densidad de fracturas interconectadas y de la macro porosidad de fractura.

En el capítulo siguiente trataremos con mas detalle este aspecto.

### **Tipo de roca donde se produce la fracturación.**

"Rocas compactas" o "Rocas secas" (Acuífugos). Corresponden a rocas masivas con baja o ausente fracturación sin posibilidad de almacenamiento de agua. Estas rocas son verdaderos Acuífugos (Larsson, 1985).

- **Rocas dúctiles.** (Acuitardos). Son principalmente esquistos de bajo grado, las fracturas, cuando existen, se encuentran rellenas por materiales de alteración tipo arcilla

- **Rocas fracturadas.** (Acuíferos). Corresponden a rocas intrusivas como granitos, granódioritas, pegmatitas y rocas de medio a alto metamorfismo como gneises, anfibolitas y cuarcitas. Estas tres últimas litologías son las más frecuentes en el basamento y presentan sectores con alta densidad de fracturación que constituyen verdaderos acuíferos.

### **Porosidad de fractura.**

Este factor depende del tipo de roca y de los procesos de alteración que producen los materiales de relleno de las fracturas.

En el ámbito investigado se presentan:

Gneises y Granitos: su alteración produce granulometrías arenosas, transformando el espacio de fractura en una zona de alta porosidad y permeabilidad, lo que genera buenos acuíferos.

Otro elemento que incide en la porosidad secundaria, es la sucesión de eventos tectónicos que sufre un mismo cuerpo rocoso. Esta actividad facilita la acción de los procesos de alteración, favoreciendo la formación de niveles arcillosos que disminuyen notoriamente la permeabilidad y la porosidad de fractura.

En este aspecto de la alteración secundaria se ven favorecidos los sectores donde afloran granitos, cuarzomonzonitas y gneises Cuarzo feldespáticos, ya que estos poseen en menor cantidad minerales susceptibles a transformarse en arcillas.

## 5. ANALISIS GEOESTADISTICO DE LAS DIACLASAS AFLORANTES EN LA ZONA

En el presente capítulo se realiza un análisis espacial de las Diaclasas con el fin de encontrar su relación estructural con las fallas presentes en el área, además, se calcula un valor aproximado de densidad de fracturas que permite visualizar el grado de fracturamiento presente, y por último, se grafica un diagrama de frecuencia de los diferentes rellenos encontrados en la zona.

Los datos que se procesaron fueron tomados directamente en la etapa de campo sobre los cuerpos ígneos y metamórficos presentes en la zona de estudio. Sus aptitudes y características se describen en el Anexo E.

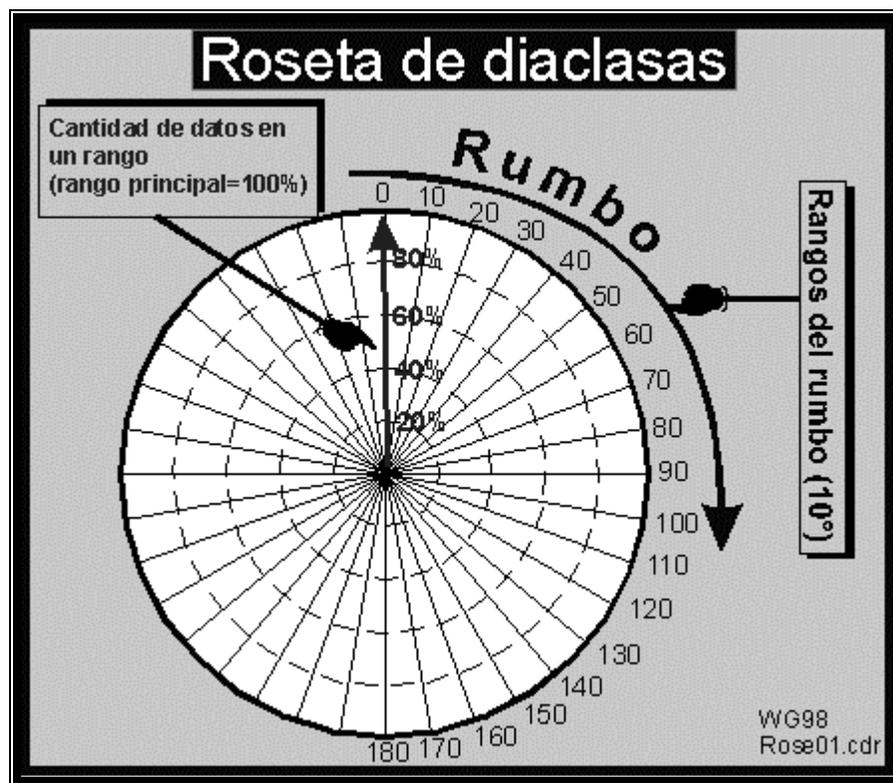
Para la interpretación de las Diaclasas se empleó el Software Georient versión 7.2, el cual genera diagramas de rosetas (en donde se obtiene la dirección principal del rumbo), y diagramas de polos y de contornos (en donde se observa la densidad de datos en una determinada dirección, y la dirección principal del buzamiento).

Para entender estos diagramas es necesario tener en cuenta los siguientes conceptos:

- **DIAGRAMA DE ROSETAS.** Una roseta de diaclasas es un diagrama sencillo que permite visualizar las direcciones de los rumbos generales de estructuras tabulares (Diques) y de planos tectónicos (Diaclasas, Fallas). En este tipo de diagrama no hay información sobre la dirección de buzamiento. En conclusión, se puede describir este diagrama como un histograma redondo, lo cual significa que los rangos de rumbo se ubican al margen del círculo desde arriba (Norte o  $0^{\circ}$ ), hacia abajo (Sur o  $180^{\circ}$ ) en sentido de las

manecillas del reloj. La cantidad de los datos con respecto de un rango se encuentran en el eje desde el centro (como 0%) hacia la margen (como 100%) (Figura 15). Solamente es necesario calcular la mitad de los rangos (medio círculo) porque el rumbo es un elemento bidireccional y automáticamente cubre el rango opuesto, es decir el rango de diferencia de 180° (lado opuesto) se marca igualmente.

Figura 15. Ilustración de un diagrama de Roseta



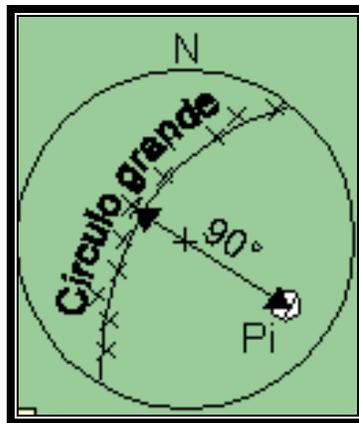
Fuente: Tomado de Departamento de Ingeniería de Minas, Área de Geología, Universidad de Atacama, Copiapó, Chile.

Para confeccionar una Roseta se necesita una base de datos tectónicos, (Mínimo 15 datos para que estadísticamente sea válido), los cuales se pueden presentar en tres tipos de notaciones. Existe además un Software como el Georient versión 7.2 empleado en este proyecto, que calcula y

grafica las rosetas, sin embargo, es mejor verificar los resultados, teniendo en cuenta el tipo de notación que se introduce al computador.

- **DIAGRAMA DE POLOS.** Una proyección estereográfica permite representar un plano inclinado. Para cada plano solo hay una perpendicular a él, llamado polo del plano que se puede representar mediante un punto, en una red estereográfica polar equiareal de Lambert-Schmidt (con graduación polar) (Figura 16). Ésta, permite contar la densidad de polos y está marcada en intervalos de  $2^\circ$ . Para utilizar esta plantilla, se empleó el Software Georient versión 7.2.

Figura 16. Representación de un polo



Fuente: Tomado de Departamento de Ingeniería de Minas, Área de Geología, Universidad de Atacama, Copiapó, Chile.

En la mayoría de las proyecciones de cualquier tipo, el número de dimensiones de lo representado es siempre una dimensión menos. El hemisferio se reduce a un plano, un plano a una línea, y una línea a un punto. Otra ventaja de esta proyección en particular es que un plano se puede representar mediante un punto, lo que reduce a otra dimensión menos los valores de lo representado.

Para visualizarla, se coloca la mano izquierda extendida, con la palma hacia arriba y los dedos apuntando al N, sosteniendo un lápiz entre los dedos de modo que sea perpendicular al plano de la mano.

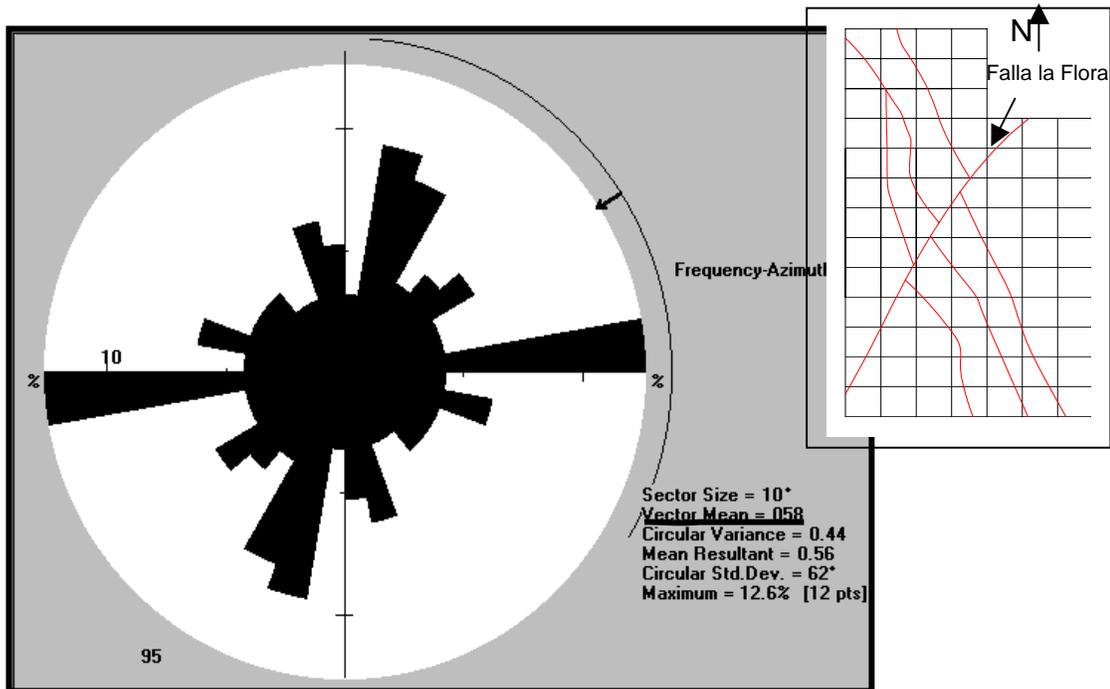
El lápiz pinchará el hemisferio inferior en un punto del cuadrante noroeste. Este punto siempre está a  $90^\circ$  del plano; por consiguiente, desde la traza del círculo lo máximo que se cuentan son  $90^\circ$ , de derecha a izquierda, a lo largo del diámetro Este-Oeste y se marca P, que es la proyección del polo del plano.

La línea que constituye el polo se proyecta como un punto; este punto, por lo tanto representa el plano. Cualquier estructura lineal se puede representar análogamente por una proyección directa, pero cuando para representar un plano se emplea un polo, éste es una proyección recíproca.

## **5.1 INTERPRETACIÓN DE DATOS**

Teniendo en cuenta los conceptos presentados anteriormente, se procede a analizar la relación espacial entre las diferentes Diaclasas y su comportamiento con respecto a las fallas del área de estudio. En total se procesaron 95 datos en el Software Georient. A continuación se presentan los respectivos diagramas junto con su interpretación.

Figura 17. Diagrama de Rosetas para la zona de estudio



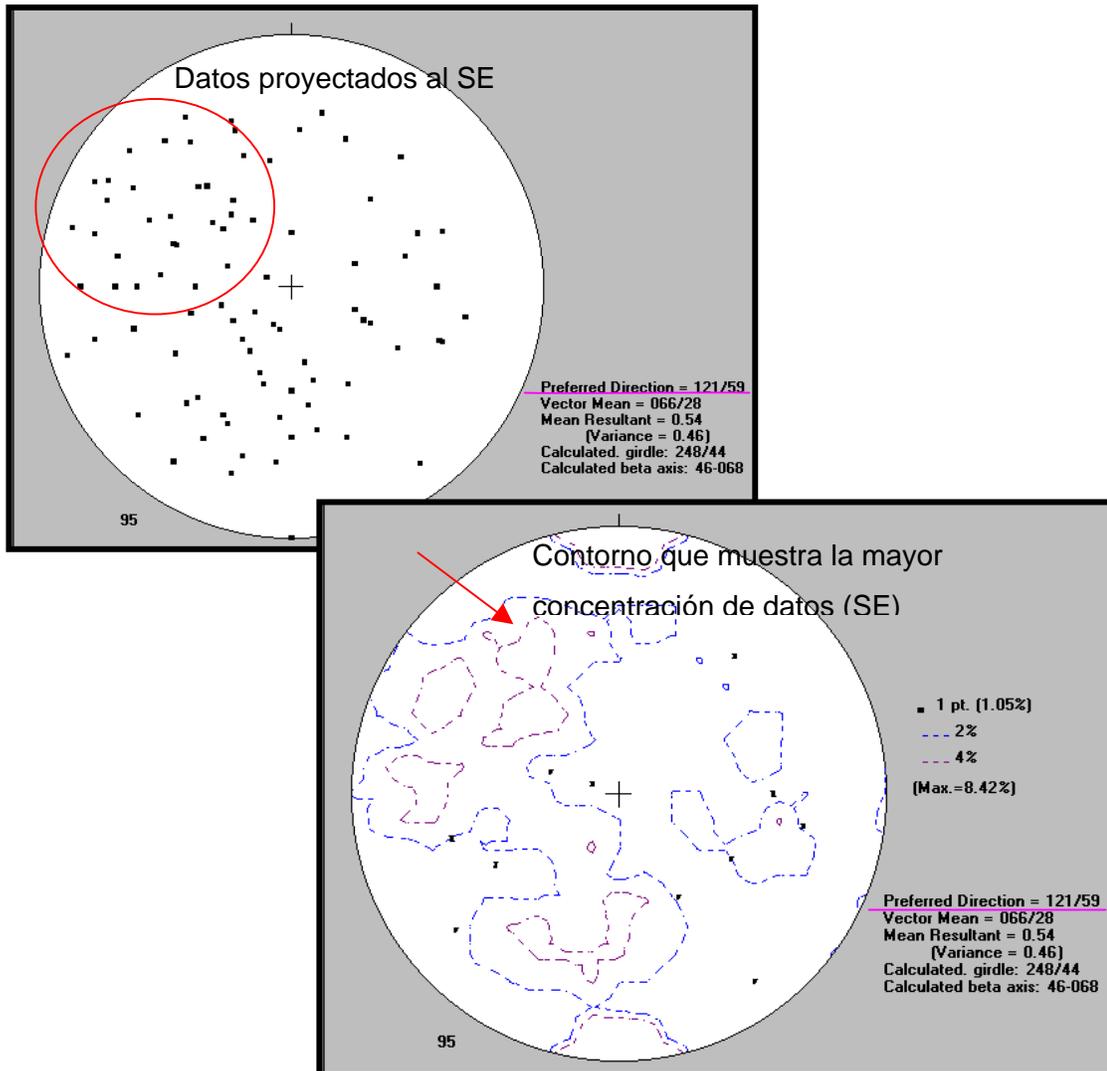
El rumbo de las Diaclasas en el área de estudio está marcado por el azimut  $58^{\circ}$  como lo muestra la roseta de la Figura 17, cuya dirección marca la mayor población de datos. Como se observa en el recuadro de la derecha, este dato de rumbo, es aproximado al rumbo de la Falla La Flora, lo que indica que las Diaclasas de la zona están influenciadas por el comportamiento tectónico de dicha Falla.

En la Figura 18, se puede ver la distribución de la población de Diaclasas con respecto al buzamiento, el cual indica una concentración de datos hacia el SE, (proyección a  $90^{\circ}$  del plano de la diaclasa) con una cantidad de buzamiento en promedio de  $59^{\circ}$ .

El análisis del buzamiento de las Diaclasas permite obtener una aproximación a la dirección en la cual el agua puede fluir y su cantidad de buzamiento, es un dato que muestra si la inclinación de los planos de las

Diaclasas favorece la retención del agua, o por lo contrario, la deja infiltrar de forma vertical.

Figura 18. Diagrama de Polos y de Contornos de la zona de estudio

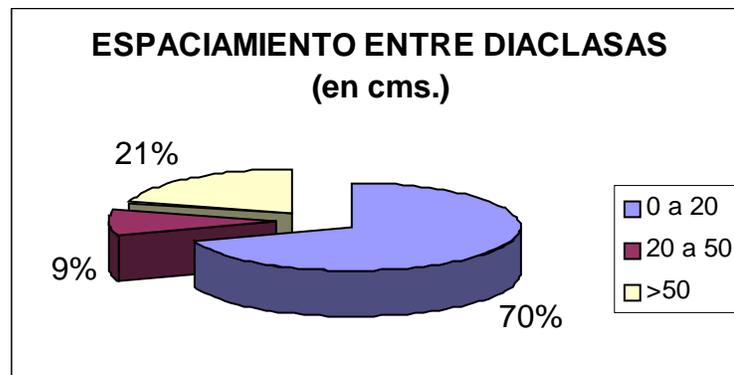


Como lo señalan los estereogramas de la Figura 18 las Diaclasas en la zona presentan una inclinación de buzamiento de  $59^\circ$ , orientados hacia el SE. Este dato revela la capacidad que tienen las Diaclasas para retener el agua que se infiltra por los planos de las mismas y además, este ángulo de inclinación permite proyectar a profundidad la intersección entre Diaclasas, las cuales

hacen factible la interconexión entre planos, facilitando una conexión hidráulica.

**5.1.1 DENSIDAD DE DIACLASAS.** El estudio de esta característica, es de especial interés, pues, aporta información con respecto a la susceptibilidad o capacidad de la roca, para dejar fluir el agua lluvia hacia el subsuelo, es decir, el grado de fracturamiento o porosidad secundaria sobre las rocas cristalinas del sector. Para obtener este parámetro, se procedió a encontrar un valor aproximado, que representará la densidad de fracturamiento en la zona, de la siguiente manera: se tomó la distancia entre Diaclasas, y estas distancias, se dividieron en 3 rangos de espaciamiento, que facilitaron su análisis estadístico. Estos rangos son: 0-20 cm, 20–50 cm y >50 cm. Los resultados se graficaron en una torta de frecuencias (Figura 19).

Figura 19. Espaciamiento entre Diaclasas



Como se muestra en la anterior figura, el rango con mayor frecuencia es el que varía entre 0 a 20 cm, es decir, el 70% de las Diaclasas de la zona de estudio se encuentran en promedio a una distancia no mayor de 20 cm. A partir de este dato, se concluye, que si se tiene una diaclasa cada 20 cm en el terreno, entonces en el área existe un promedio de 25 diaclasas por metro cuadrado ( $25d/m^2$ ). Este calculo refleja el alto grado de fracturamiento

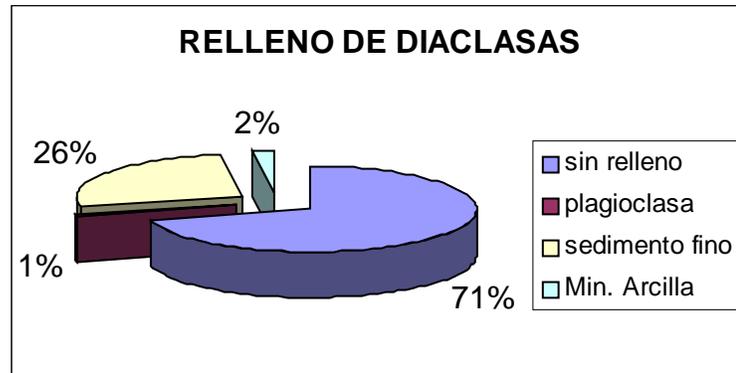
producto del fallamiento que se encuentra en la zona y por lo tanto la susceptibilidad del terreno a la infiltración de agua lluvia.

Es muy importante tener en cuenta, que este dato de densidad solo nos da una idea general del fracturamiento que se presenta en el área, ya que estos cálculos dependen en gran forma de los datos que fueron tomados en campo y estos a su vez de la presencia de afloramientos en el área. Así de los 23 afloramientos que se tomaron datos de Diaclasas, seis corresponden al cuerpo ígneo (deltas 5, 8, 10, 12 y 32), tres al orthonéis (deltas 35, 36 y 37) y catorce al gneis; las familias de diaclasas observadas en el orthonéis y en el paraneis son similares (Observar Anexo E) y las presentes en el ígneo como es por demás lógico también se observan en el Gneis y algunas presentes en el gneis no se observan en el ígneo, por lo cual el dato de densidad de diaclasas obtenido se asumiría como un dato para el gneis y la densidad de diaclasas para el ígneo se tomaría como menor de 25 diaclasas por metro cuadrado. Sin embargo hay que tener en cuenta que en las zonas donde existen tramos de fallas son más susceptibles a un mayor fracturamiento, y el cuerpo ígneo (Granito y Cuarzomonzonita), es afectado directamente por el trazo de la Falla de Bucaramanga y la Falla de Morrórico por lo que debe esperarse que el cuerpo ígneo este mucho más fracturado y meteorizado. Por las anteriores razones podemos asumir el dato obtenido de 25 diaclasas por metro cuadrado como una buena aproximación de la densidad de diaclasas existentes en el área de estudio.

**5.1.2 RELLENO DE DIACLASAS.** Una diaclasa tiene en general dos formas de manifestarse, la primera, cuando las paredes de la diaclasa se encuentran limpias y la segunda cuando se encuentra algún mineral que esté sellando estas paredes, este último no es favorable ya que disminuiría la porosidad secundaria en las rocas de la zona y por tanto la infiltración de agua en el terreno.

En la zona, se identificaron 3 tipos de rellenos: plagioclasa, minerales de arcilla precipitados y sedimento fino, cuya frecuencia de presentación se ilustra en la Figura 20.

Figura 20. Tipos de relleno para las Diaclasas de la zona de estudio



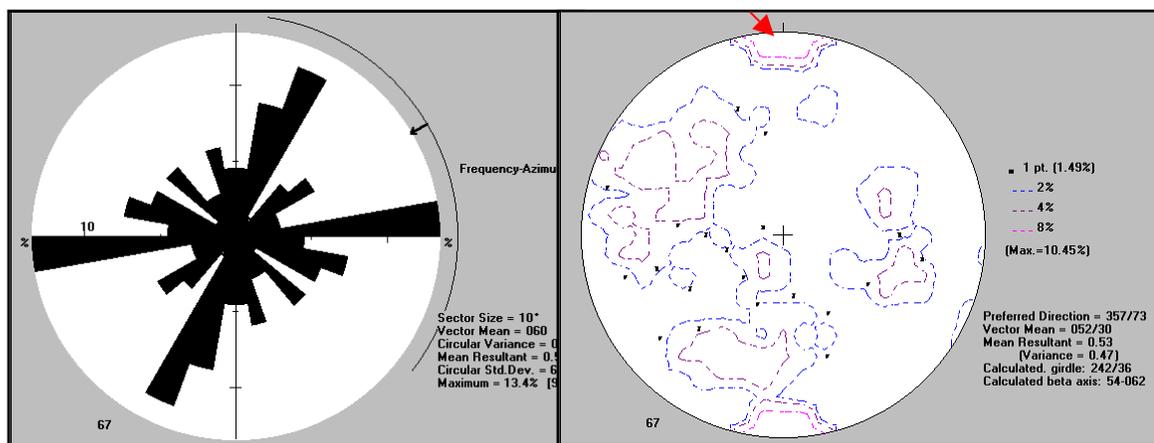
Como resultado de este análisis se obtiene que el 71% de las Diaclasas se encuentran sin relleno; esto se debe, a que las fracturas están afectando rocas compuestas por minerales poco alterables, lo que indica que las diaclasas permanecerán limpias, maximizándose el almacenamiento y la conducción del agua subterránea.

Para el 29% restante, se tiene que el sedimento fino es el relleno con mayor frecuencia, es decir, representa el 26%.

Se puede concluir que la porosidad de la zona se ve reducida en un 29%, debido a los rellenos de las Diaclasas, sin embargo, el fracturamiento presente sigue siendo un factor muy importante para la capacidad de infiltración de las rocas. A continuación se muestran principales direcciones en que se encuentran las Diaclasas rellenas y sin relleno:

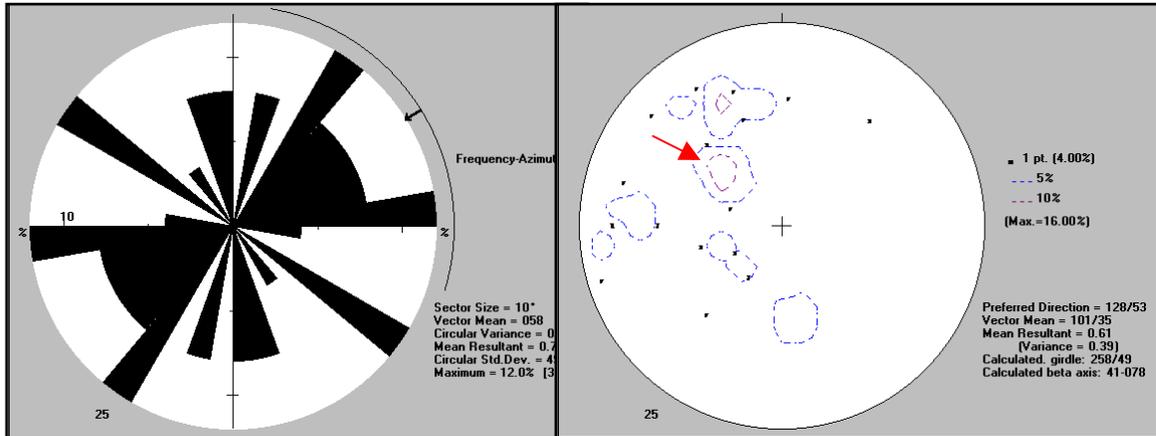
**5.1.3 DIACLASAS SIN RELLENO.** El rumbo para estas Diaclasas es N60°E (Figura 21), cuyo dato es aproximado a la tendencia general de las Diaclasas en la zona (N58°E). La dirección de Buzamiento se ubica hacia el NW, es decir, diametralmente opuesto a la tendencia de la zona (SE) y la cantidad de buzamiento es 73°, es decir, las Diaclasas sin relleno tienen una mayor influencia tectónica debido a que se presentan de forma subvertical a vertical.

Figura 21. Diagrama de rosa y de contornos para diaclasas sin relleno



**5.1.4 DIACLASAS CON RELLENO.** El rumbo y el buzamiento para estas diaclasas concuerda con la tendencia general de la zona, es decir, un rumbo de N58°E y una dirección de buzamiento hacia el SE, con una cantidad de 53°. (Figura 22)

Figura 22. Diagrama de rosa y de contornos para diaclasas con relleno



## 5.2 CARACTERIZACION DEL TERRENO A PARTIR DEL ESTUDIO DE DIACLASAS

A partir del análisis realizado anteriormente, se deducen condiciones físicas del terreno en superficie que son las que se esperan en profundidad.

Las Diaclasas se encuentran orientadas con la Falla la Flora, con un rumbo de N58°E, cabe resaltar que la quebrada la Flora tiene su trayectoria controlada por la falla del mismo nombre. Esto demuestra el régimen tectónico de la zona de estudio, lo cual es importante para entender el comportamiento sistemático de los rasgos estructurales. Por lo tanto la Falla la Flora ha causado un determinado fracturamiento en su área de influencia sobre las rocas cristalinas de la zona, el cual puede ser aprovechado para buscar condiciones de permeabilidad.

Este fracturamiento se representa con un rango de 25 diaclasas por metro cuadrado (25d/m<sup>2</sup>), es decir, una Diaclasa cada 20 cm, con una cantidad de buzamiento de 59° en promedio, lo que garantiza la interconexión en

profundidad de estas fracturas y por ende algún tipo de conexión hidráulica subterránea. Todos estos datos junto con el 71% de Diaclasas sin relleno, indican que la zona presenta gran susceptibilidad a la infiltración de agua lluvia captada por los planos de las Diaclasas y llevadas a profundidad por la interconexión de las mismas, lo que sugiere una saturación del subsuelo hasta donde las fracturas persistan.

## 6. GEOFISICA

Dadas las características geológicas (rocas cristalinas y un fuerte control estructural) del área de estudio, así como la escasez de información geofísica y la falta de perforaciones con fines de investigación en dichas rocas, se hizo necesario la realización de una campaña de geofísica con el objeto de valorar la información geológica de superficie, que indica la existencia de una red de drenaje subterránea debido al fuerte control estructural.

Debido a la litología de las rocas existentes en el área de estudio, el descenso de los valores en la curva de resistividad debe atribuirse únicamente a la presencia de agua en el subsuelo. A continuación se expone los fundamentos de la metodología empleada, y los resultados obtenidos.

### 6.1 METODO

El método escogido es una técnica por resistividad, consistente en una campaña mediante sondeos eléctricos verticales (SEV), empleando el dispositivo Schlumberger. Este método (SEV) es la técnica geofísica más generalizada para determinar las variaciones verticales de resistividades en el subsuelo.

**6.1.1 Fundamentos del Método de Resistividad Eléctrica.** La Resistividad es la resistencia en ohmios al paso de la corriente eléctrica. Gran parte de los siguientes conceptos son tomados de REYNOLDS, 1997. Considere un cubo eléctricamente uniforme de lado  $L$  a través del cual una corriente ( $I$ ) está circulando, como se muestra en la figura 23. El material dentro del cubo se opone a la conducción de la electricidad dentro de él, lo cual da como resultado una caída de potencial ( $V$ ) entre las caras opuestas. La resistencia

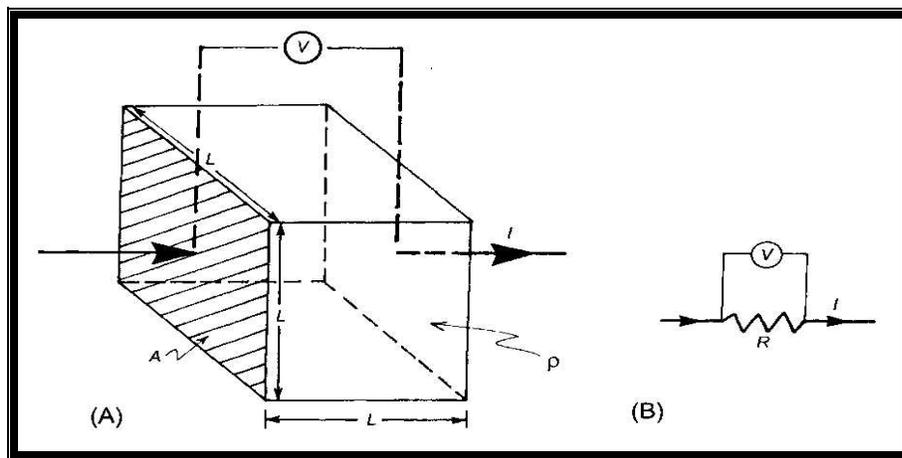
(R) es proporcional a la longitud (L) del material resistivo e inversamente proporcional a la sección transversal de área (A), así:

$$R \propto L/A$$

La anterior relación puede escribirse como:

$$(1) \quad R = \rho L/A, \text{ donde } \rho \text{ es la resistividad verdadera.}$$

Figura 23. (A) Definición básica de resistividad a través de un bloque homogéneo de lado L, con una corriente I y una caída de potencial entre las caras opuestas V. (B) el circuito eléctrico equivalente, donde R es la resistencia.



Tomado de Reynolds 1987.

De acuerdo a la ley de Ohm's:

$$(2) \quad R = V/I,$$

La relación de la caída de potencial al aplicar una corriente también define la resistencia R del cubo.

Las expresiones (1) y (2) pueden combinarse para formar el producto de una resistencia (ohm) y una distancia (área/longitud; metros); por lo tanto las unidades de resistividad son ohm-metros ( $\Omega\text{m}$ ). El inverso de la resistividad

$(1/\rho)$  es la conductividad ( $\sigma$ ), la cual tiene unidades de siemens/metro que son equivalentes a  $(\Omega^{-1}\text{m}^{-1})$ .

$$(3) \quad \rho = V/I * A/L \text{ } (\Omega/\text{m})$$

Hay tres formas mediante las cuales la corriente eléctrica puede conducirse a través de las rocas: conducción electrolítica, electrónica y dieléctrica.

- La conducción electrolítica ocurre por el movimiento relativamente lento de iones dentro de un electrolito y depende entre otros factores del tipo de ion, concentración iónica y movilidad.
- La conducción electrónica es el proceso que se da en metales, los cuales permiten un rápido movimiento de electrones.
- La conducción dieléctrica ocurre en muchos materiales débilmente conductores (o aislantes) cuando una corriente alternante externa es aplicada, lo cual causa una leve excitación de los electrones del átomo con respecto a su núcleo.

En la mayoría de las rocas la conducción ocurre por medio de los fluidos en los poros que actúan como electrolitos entre los granos de minerales de la roca, los cuales contribuyen muy poco a la conductividad total de la roca, excepto donde los granos son buenos conductores de la corriente eléctrica.

La resistividad de los materiales geológicos exhibe uno de los más grandes rangos entre todas las propiedades físicas, oscila entre  $1.6 * 10^{-8} \Omega\text{-m}$  para el oro nativo a  $10^{16}$  para el azufre puro. Las rocas ígneas tienden a tener las resistividades más altas; las rocas sedimentarias tienden a ser más conductivas, principalmente debido a su alto contenido de fluidos en los poros; y las rocas metamórficas tienen resistividades intermedias pero también pueden ser grandes. Resistividades de algunos minerales comunes y rocas se muestran en la tabla 3.

Tabla 3 Resistividades de materiales geológicos comunes

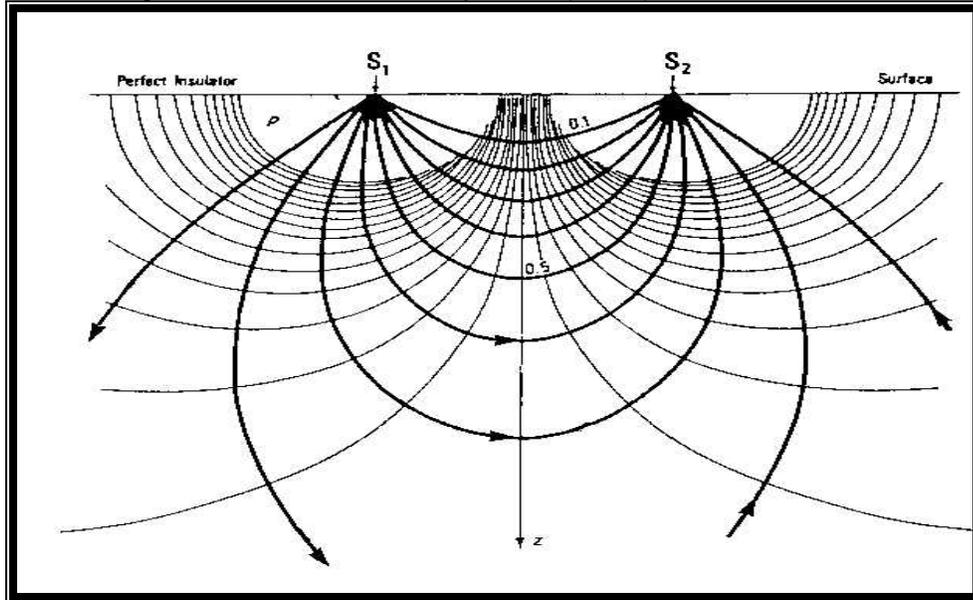
Material	Resistividad nominal ( $\Omega\text{m}$ )
Cuarzo	$3 \cdot 10^2 - 10^6$
Granito	$3 \cdot 10^2 - 10^6$
Granito Meteorizado	$3 \cdot 10 - 5 \cdot 10^2$
Syanita	$10^2 - 10^6$
Diorita	$10^4 - 10^5$
Gabro	$10^3 - 10^6$
Basalto	$10 - 1.3 \cdot 10^7$
Esquito (Calcáreo y Micáceo)	$20 - 10^4$
Aluviones y Arenas	$10 - 8 \cdot 10^2$
Gravas secas	1400
Gravas Saturadas	100
Suelo arenoso seco	80 - 1050
Terreno completamente insaturado	30 - 100
Terreno completamente saturado	15- 30
Shales consolidados	$20 - 2 \cdot 10^3$
Conglomerados	$2 \cdot 10^3 - 10^4$
Areniscas	$1 - 7.4 \cdot 10^8$
Limonitas	$5 \cdot 10 - 10^7$

Tomado de Reynolds 1987

### Flujo de Corrientes en Terrenos Homogéneos.

Cuando dos fuentes de corrientes son enterrados en una superficie de un medio homogéneo de resistividad  $\rho$ , ocurre una distribución de potencial en el terreno (figura 24). Para describir el voltaje en cualquier punto se utiliza la expresión (4).

Figura 24. Líneas de corriente y equipotencial producidas por dos fuentes de corriente. Original de Van Nostrand y Cook(1966).



Tomado de Reynolds(1997).

Para dos fuentes de corriente el potencial  $V_p$  en cualquier punto P del terreno es igual a la suma de los voltajes de los dos electrodos, así:

$$V_p = V_A + V_B,$$

Donde  $V_a$  y  $V_B$  son las contribuciones de potencial de los dos electrodos, A(+I) y B(-I).

Los potenciales en los electrodos M y N son:

$$V_M = \rho I / 2\pi ( 1/AM - 1/BM), \quad V_N = \rho I/2\pi(1/AN - 1/NB).$$

La diferencia de potencial  $dV_{MN}$ , puede ser reescrita de la siguiente forma:

$$dV_{MN} = V_M - V_N = \rho I/2\pi \{ (1/AM - 1/MB) - (1/AN - 1/NB) \}$$

Ordenando, la resistividad  $\rho$  esta dada por la siguiente expresión:

$$(4) \quad \rho = (dV_{MN} / I) * 2\pi * \{ (1/AM - 1/MB) - (1/AN - 1/NB) \}$$

## **Resistividad Aparente, Configuración de Electrodo y Factor Geométrico**

La resistividad aparente es el valor obtenido del producto de la resistividad medida (R) por un factor geométrico (K) que depende del tipo del arreglo geométrico de electrodos en el terreno, y tiene unidades de metros, así la resistividad aparente ( $\rho_a$ ) tiene unidades de  $\Omega$ -m.

### **Caso general**

La expresión (4) tiene dos partes, una el término de resistencia (R;  $\Omega$ ) y la otra el término que describe la geometría de la configuración de electrodos usada, la cual se conoce como el factor geométrico (K, metros). El factor geométrico está definido por la expresión:

$$K = 2 \pi ( 1/AM - 1/MB - 1/AN + 1/NB )^{-1}.$$

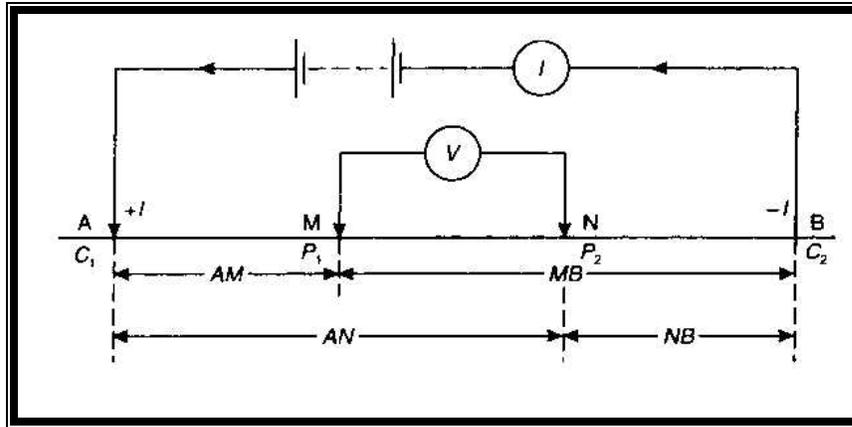
Donde el terreno no es uniforme, la resistividad así calculada es llamada resistividad aparente ( $\rho_a$ ):

$$\rho_a = RK, \text{ donde } R = dV / I.$$

Como en realidad el subsuelo no conforma un medio homogéneo, la resistividad obtenida no es más grande que la resistividad “verdadera” y más aun la resistividad aparente ( $\rho_a$ ) obtenida puede ser negativa. Lo anterior es muy importante para recordar que la resistividad aparente no es una propiedad física del medio existente en el subsuelo, y es diferente a la resistividad verdadera. Consecuentemente, todos los datos de campo de resistividad son resistividades aparentes mientras que los obtenidos por técnicas de interpretación son resistividades verdaderas.

En la figura 25, observamos la configuración general de electrodos en investigaciones de resistividad.

Figura 25. Forma generalizada de configuración de electrodos en investigaciones de resistividad. Original de Van Nostrand y Cook(1966)



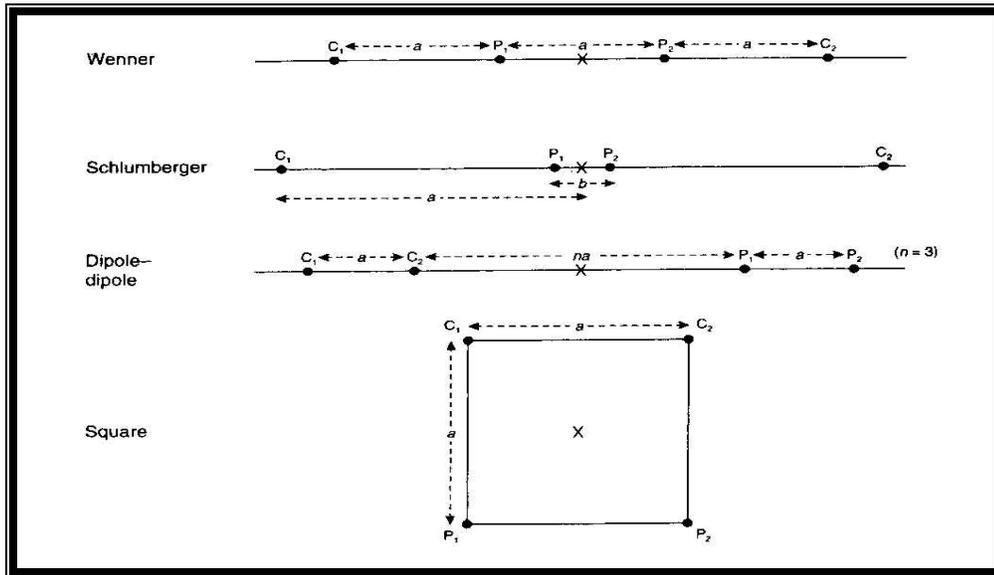
Tomado de Reynolds(1997).

Existen tres principales tipos de configuración de electrodos, dos de los cuales reciben el nombre de sus creadores: Frank Wenner (1912) y Conrad Schlumberger y un rango de subtipos (observar tabla 4 y figura 26)

Tabla 4. Configuraciones de electrodos

<b>Arreglos Wenner</b>	Wenner Estándar Wenner Offset Arreglo Lee particionado Tripotencial (arreglos $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ )
<b>Arreglos Schlumberger</b>	Schlumberger Estándar Arreglo Brant Arreglo Gradiente
<b>Arreglos Dipolo – Dipolo</b>	Normal (axial o polar) Azimutal Radial Paralelo Perpendicular Polo – dipolo Ecuatorial Cuadrado (forma especial del ecuatorial)

Figura 26. Configuración de electrodos usados en investigaciones eléctricas



Tomado de Reynolds(1997).

El factor geométrico para los diferentes tipos de arreglo se presenta a continuación:

Arreglo Wenner:

$$\rho_a = 2\pi a R \quad (\text{arreglos } \alpha, \beta,)$$

$$\rho_a = 3\pi a R \quad (\text{arreglo } \gamma)$$

Arreglo Lee:

$$\rho_a = 4\pi a R$$

Arreglo Schlumberger:

$$\rho_a = (\pi a^2 / b) * (1 - b^2 / 4a^2) R; \quad 5b \leq a$$

Arreglo Dipolo-Dipolo:

$$\rho_a = \pi n(n + 1) (n + 2) a R$$

Arreglo Polo-dipolo:

$$\rho_a = 2\pi n(n + 1) a R$$

Arreglo Cuadrado (square):

$$\rho_a = \pi a (2 + \sqrt{2}) R$$

Los diferentes tipos y estilos de configuración de electrodos tienen sensibilidades, ventajas y desventajas. Algunos factores que afectan la elección del tipo de arreglo son la cantidad de espacio disponible para realizar el arreglo, la intensidad de labor para cada método, la sensibilidad a la inhomogeneidad lateral (Habberjam y Watkins 1967 ; Barker 1981) y la interfase de penetración (Broadbent y Habberjam 1971). Observar tabla 5.

Tabla 5. Comparación de los arreglos de electrodos dipolo-dipolo, Schlumberger, Square y Wenner

<b>Criterio</b>	<b>Wenner</b>	<b>Schlumberger</b>	<b>Dipolo-dipolo</b>	<b>Square</b>
Resolución Vertical	<i>///</i>	<i>//</i>	<i>/</i>	<i>//</i>
Profundidad de penetración	<i>/</i>	<i>//</i>	<i>///</i>	<i>//</i>
Susceptibilidad para SEV	<i>//</i>	<i>///</i>	<i>/</i>	x
Sensibilidad a la orientación	Si	si	moderado	No
Sensibilidad lateral	Alta	moderado	moderado	Baja
Intensidad de labores	Si	moderado	moderado	Si
Facilidad de interpretación	<i>///</i>	<i>///</i>	<i>//</i>	<i>/</i>
<i>/ = pobre; // = moderado; /// = bueno; x = inadecuado</i>				

## 6.2 MODALIDADES DE DESARROLLO DEL MÉTODO

Hay dos modalidades de desarrollar el arreglo de electrodos. Una es para sondeos profundos para determinar la variación vertical de la resistividad, la cual se conoce como sondeo eléctrico vertical (SEV). La otra es para sondeos horizontales, para determinar la variación horizontal de la resistividad y es llamada recorrido de separación constante (RSC). A continuación se describe la modalidad SEV.

**6.2.1 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV).** Consisten en introducir una corriente eléctrica desde la superficie a través del subsuelo mediante electrodos o varillas conductoras. A medida que se incrementa la distancia entre los electrodos de corriente se incrementa también la penetración de la corriente.

En el caso del arreglo schlumberger (figura 26 B) los electrodos de potencial ( $P_1P_2$ ) son ubicados a un espaciamiento fijo ( $b$ ) el cual no excede un quinto del espaciamiento medio de los electrodos de corriente. (a). Los electrodos

de corriente son ubicados progresivamente a distancias mucho mas grandes. Cuando el voltaje medido entre  $P_1$  y  $P_2$  cae a valores muy bajos (debido a que el gradiente de potencial decrece progresivamente con el incremento de la separación de los electrodos de corriente), los electrodos de potencial se ubican a un espaciamiento mayor ( $b_2$ ). Las medidas se siguen tomando y la separación de los electrodos de potencial se incrementa cada vez que sea necesario hasta que el SEV sea completado. Un SEV usando el arreglo Schlumberger, (el cual fue utilizado en esta investigación) requiere menos espacio que cualquiera de los dos métodos Wenner y menos movimiento físico de los electrodos que el arreglo Wenner normal y menos cable es utilizado.

Los valores de resistividad aparente medidos son dibujados en una gráfica llamada “curva de campo”, los ejes X, Y representan los valores logarítmicos de la separación media de los electrodos de corriente ( $AB/2$ ) y la resistividad aparente ( $\rho_a$ ).

### **6.3 INTERPRETACIÓN DEL SONDEO GEOELECTRICO.**

Es importante aclarar que la interpretación de la información obtenida en los SEV, por si sola, no nos indican ni la litología, ni la presencia, cantidad y calidad de agua existente en el subsuelo; lo que determina es una serie de “unidades geoelectricas” que se caracterizan por su resistividad, espesor y profundidad. Sin embargo, como las propiedades eléctricas de dichas unidades son intrínsecas a la composición del subsuelo (rocas y fluidos), es posible realizar un modelo interpretativo correlacionando la información de las “unidades geoelectricas” con la información geohidrologica, geológica y geofísica disponible. Por lo que un estudio geoelectrico por si solo, sin la información geohidrilogica no tendrá relevancia. La información de dicho modelo puede aproximarse a la obtenida en una perforación mecánica.

Una vez se cuente con los datos adquiridos en campo, se procede a realizar la interpretación, la cual se lleva a cabo en dos etapas:

- (A) determinación de las unidades geoelectricas.
- (B) Correlación geohidrológica.

### **(A) Determinación de las unidades geoelectricas.**

La calidad de los resultados de esta interpretación depende de lo sofisticado del método de adquisición de los datos de campo, como regla general, el espesor de las capas y sus resistividades tienen una precisión entre 1% y 10 %, siendo menor cuando se utilizan técnicas de campo burdas.

Las curvas de campo de los SEV puede realizarse cualitativamente usando la simple forma de la curva, semi cuantitativamente utilizando modelos gráficos de la curva y cuantitativamente con modelos de computador.

### **Aproximación de campo.**

El primer paso en cualquiera interpretación de una curva de un sondeo de resistividad aparente es analizar la forma de la curva, el ángulo máximo de pendiente que puede tener una grafica (en papel bilogaritmo) de resistividad en su tramo ascendente es de  $45^{\circ}$ ; si el ángulo es mayor de  $45^{\circ}$  hay error en los datos o distorsión de estos por efectos geométricos debido a la gran inclinación de las capas en el subsuelo.

Se identifica el número de unidades geoelectricas, observando en la curva el número de puntos de deflexión que esta tenga. La presencia de puntos de deflexión indica las interfaces geoelectricas en el subsuelo, así, el numero de capas debe ser uno mas que el numero de limites entre los puntos; Sin embargo, las coordenadas de los puntos de deflexión no indican la profundidad de los limites de cada capa, ni proveen información especifica de las resistividades verdaderas.

Las magnitudes relativas de las resistividades verdaderas de cada unidad se obtienen de los tramos de la curva con menor pendiente.

Como puede observarse, con solo disponer de la forma de la curva del SEV, se puede establecer el número mínimo de capas horizontales y la magnitud relativa de la resistividad verdadera de cada capa.

### **Aproximación semi-cuantitativa**

La interpretación de las curvas de campo puede realizarse con un set de curvas maestras calculadas teóricamente, el modelo se basa en suponer un terreno estratificado horizontalmente y que las capas más profundas tienen mayor espesor que las que yacen por encima. Esta segunda hipótesis, no siempre es válida, por lo que el uso de las curvas maestras puede resultar en una estimación poco acertada del modelo físico real.

Un libro de curvas maestras fue publicado por la Asociación Europea de Geofísicos de Exploración, basados en el trabajo realizado por Mooney y Wetzel 1956.

La curva de campo se dibuja en papel transparente y en la misma escala logarítmica que las curvas patrón. La curva de campo se superpone sobre las patrón y se hace coincidir con la que más se asimile, trasladando los espesores y resistividades de la curva teórica a la de campo, y estos parámetros indicaran teóricamente las distintas capas y su resistividad.

### **Aproximación cuantitativa.**

Disponer de un computador facilita esta primera etapa de la interpretación. Este método es el más riguroso, pero a la vez peligroso, ya que con los métodos de computador se puede caer en una sobre interpretación de los datos.

Los detalles del método llamado “filtro digital linear”, se encuentran en Koefoed(1979).

El programa sintetiza un perfil de resistividad aparente para un modelo de n capas, en donde las variables son espesor y resistividad de las capas. Los perfiles obtenidos pueden compararse con las curvas de campo y ajustando los valores de resistividad y espesor por prueba y error, es posible obtener la correspondencia más próxima a la curva de campo.

### **(B) Correlación Geohidrológica**

Esta es la etapa definitiva de la interpretación, en la cual se correlaciona cada modelo de SEV aceptado, con el conocimiento de la geología local del área que se este trabajando. La importancia del conocimiento geológico radica en que un modelo de SEV puede corresponder a varias litologías diferentes, por lo que, si no se tiene claro el contexto geológico, puede incurrirse en interpretaciones erróneas.

Con la información contenida en tablas, como la presentada en la tabla 3, pueden presentarse la descripción en términos litológicos de cada unidad geoeléctrica. Así el modelo final debe contener: número de la unidad, espesor, resistividad verdadera, profundidad y descripción en términos litológicos.

Entre más datos sobre el subsuelo del área estudiada se disponga, en lo referente a perforaciones, datos geofísicos, datos del agua subterránea, etc, serán mejores los resultados obtenidos mediante la interpretación de los SEV's.

#### **6.4 APLICACIÓN DEL MÉTODO**

Inicialmente se decidió utilizar el arreglo Schlumberger y se prepararon en oficina, la cartera de campo (observar figura 27) con un modelo de valores típicos de AB/2, MN/2 y K (algunos de estos valores debieron ser modificados en campo), el papel bilogaritmo para graficar la curva de campo, calculadora, lápices de colores, taja lápiz y borrador; así como los materiales de campo necesarios (brújula, altímetro, martillo, lupa) y se constató el buen estado y funcionamiento del equipo de geoelectrica (cables, fusibles, electrodos, cintas métricas, multimetros, terrameter, porras).

El trabajo de campo fue realizado en dos fases, ambas bajo condiciones climáticas muy favorables. La primera fase se llevó a cabo durante los días 17 al 20 de diciembre de 2002, en la cual se realizaron 7 SEV. La segunda se llevó a cabo entre los días 14 y 15 de febrero de 2003, en la cual se realizaron 4 SEV, de los cuales el realizado sobre la quebrada la Flora en el barrio Morrórico fracasó, debido a las condiciones del terreno.

En total se realizaron 11 SEV de los cuales uno fracasó y otros dos (el del barrio Pan de Azúcar Bajos y el del parque el Prado) fueron SEV repetidos con diferentes juegos de apertura de los electrodos para verificación de los resultados. En resumen el total de SEV empleados en la interpretación fueron 8.

De los ocho SEV, siete fueron realizados en el piedemonte de la zona montañosa, donde se había previsto buenas condiciones para el flujo de agua subterránea; y uno en la zona de pendiente montañosa (Barrio Mira Flores) para corroborar el grado de infiltración por las fracturas de la roca cristalina.

En cuanto a litología, de los ocho SEV, cinco fueron realizados sobre rocas ígneas, dos sobre gneis y uno sobre ortonéis.

La geoelectrica ejecutada en este proyecto fue corta(espaciamiento en el terreno), debido a la complicada topografía y vegetación del área.

Figura 27. Cartera de campo

**GEOELECTRICA PROYECTO:**

OBSERVADOR:						SEV#:
X:	Y:	Z:	RUMBO:		HOJA#:	
OBSERVACIONES:						
Estación	AB/2	MN/2	I(mA)	V(mV)	k(m)	Pa(ohm-m)
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						

## LOCALIZACIÓN DE LOS SEV's.

Los sitios donde se realizaron los ocho SEV son los siguientes:

### **SONDEO**

### **LOCALIZACIÓN**

- |       |   |
|-------|---|
| SEV 1 | Sobre la quebrada la Flora. En el camino de herradura que comunica los Barrios Albania y Altos del Jardín.  |
| SEV 2 | Sobre el camino que parte de la intersección de la avenida 42 con la avenida Pan de Azúcar y la quebrada la Flora; y que se ubica entre los barrios Cabecera Parque y Altos del Jardín. |
| SEV 3 | Parque la Flora   |
| SEV 4 | Sobre un carreteable destapado localizado en la parte posterior de la UDES.   |
| SEV 5 | Sobre el camino que parte de la cra 53 en la Urbanización el Nogal y Se comunica con la casa La Aurora.   |
| SEV 6 | Sobre la quebrada la Flora, en el camino de herradura que comunica el Barrio Albania con el Barrio Altos del Jardín. Al norte del SEV 1.  |
| SEV 7 | Barrio Bajos de Pan de Azúcar. Carrera 56 con Calle 51.   |
| SEV 8 | Barrio Morrórico. Sobre la carretera que conduce a Cúcuta. Frente al Piqueteadero la Oreada.  |

En la Tabla 6 se presentan las coordenadas de cada SEV .

Tabla 6. Coordenadas de los sitios donde se realizó cada SEV

<b>SONDEO</b>	<b>Norte (N)</b>	<b>Este(E)</b>	<b>Altura (Z)</b>	<b>AB/2 en m</b>
SEV 1	1'279.703	1'107.434	1027msnm	50
SEV 2	1'279.217	1'107.560	1012msnm	45
SEV 3	1'278.000	1'107.171	937msnm	120
SEV 4	1'277.375	1'108.540	1028msnm	110
SEV 5	1'278.568	1'107.944	1016msnm	50
SEV 6	1'280.001	1'107.436	1046msnm	60
SEV 7	1'278.920	1'107.930	1044msnm	134
SEV 8	1'280.770	1'107.850	1100msnm	65

Donde AB es la extensión lograda en cada SEV. Como puede observarse en el 62.5% de los sondeos no pudo lograrse una penetración mayor de 65 m, esto debido a la complicadas condiciones topográficas y cubierta vegetal del área. En promedio la penetración alcanzada en la campaña geofísica fue de 79.25 metros.

**6.4.1 Equipos Empleados.** Para la realización de los SEV se empleó un equipo transmisor convencional: “Terrameter Hidrosistem Rc12”, con electrodos de acero recubiertos con una película de cobre, propiedad de la Escuela de Geología de la UIS.

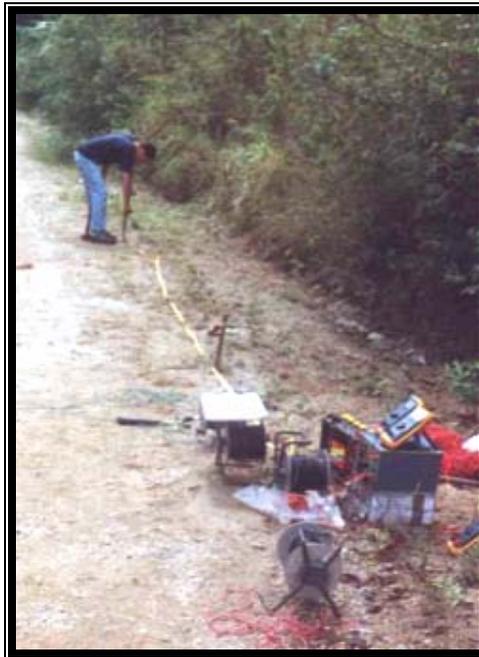
Como receptor (voltímetro), así como en las lecturas del transmisor (amperímetro), se emplearon dos multímetros digitales marca Mastech MY 64.

En las figuras 28 y 29 se observa el equipo empleado.

Figura 28. Equipo utilizado en la campaña geofísica: terrameter, multimetros.



Figura 29. Equipo empleado y arreglo de electrodos Schlumberger



## 6.5 RESULTADOS OBTENIDOS

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en la interpretación de las curvas de campo de los SEV y su correlación Hidrogeológica. Para cada SEV se presenta la curva y el modelo generado por computador, de la grafica 30 a la 37, y su Correlación hidrogeológica, de la tabla 8 a la tabla 15. El set de datos utilizados para cada SEV se puede observar en el anexo G. En la tabla 7 se presenta el rango de resistividades para cada SEV, como puede apreciarse son rangos que oscilan en valores bajos para tratarse de rocas frescas (observar tabla 3), y mas bien corresponden a rocas meteorizadas y saturadas de agua.

Tabla 7. Rango de resistividades aparentes para cada SEV

Sondeo	Rango
SEV 1	63 – 255 ohm-m
SEV 2	34 – 60 ohm-m
SEV 3	22 – 55 ohm-m
SEV 4	50 – 95 ohm-m
SEV 5	33 – 57 ohm-m
SEV 6	54 – 168 ohm-m
SEV 7	42 – 84 ohm-m
SEV 8	121 – 157 ohm-m

**6.5.1 INTERPRETACIÓN SEV 1.** Profundidad de investigación: AB/2 de 50 metros. Limitada por sinuosidad de la canalización, la topografía abrupta, la abundante vegetación y las condiciones del terreno (presencia de aluviones, coluviones que no permitieron un buen contacto de los electrodos). El terreno es plano a ondulado.

Figura 30. Curva y modelo Geoeléctrico Winsev5 para SEV 1.

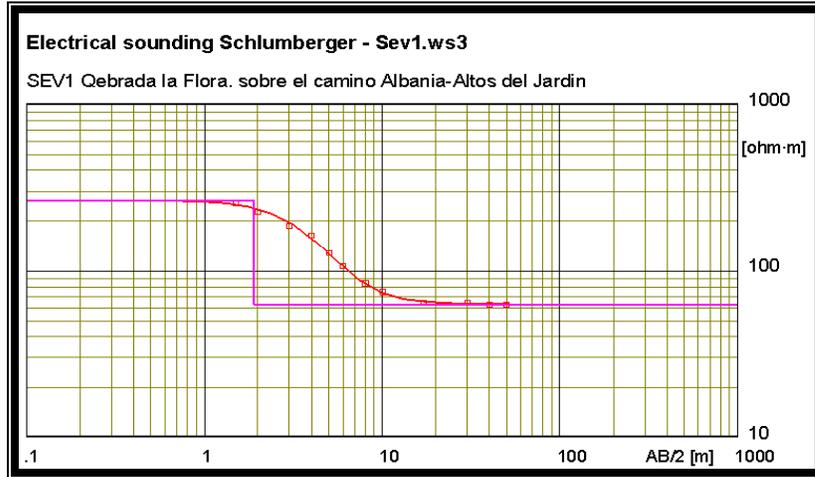


Tabla 8. Unidades geoeléctricas y su correlación hidrogeológica. SEV 1

Unidad Geoeléctrica WinSev 5.	Resistividad (ohms-m)	Espesor (m)	Profundidad(m) De ↗ hasta	Correlación Hidrogeológica
I	265	1.9	0-1.9	Granito meteorizado y fracturado, húmedo, no saturado de agua.
II	63		1.9 -	Nivel freático, granito fracturado, porosidad secundaria por fracturas, descomposición de feldspatos y minerales arcillosos.

El sondeo fue realizado sobre una capa de suelo delgada (10cm), con alto contenido de materia orgánica y de color negro. En el sector afloran aluviones compuestos por arena, grava, cantos y bloques de rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas producto de la sedimentación de la Quebrada la Flora. Así como depósitos de derrubio con cantos angulares y sin ninguna esfericidad. También afloran capas de arcillas gravosas.

La litología dominante del sector es un cuerpo ígneo tipo granito, meteorizado fuertemente. El curso de la Quebrada la Flora en este sector es controlado por una falla geológica que afecta el cuerpo ígneo. A la profundidad que penetró este sondeo no hay evidencias de una roca fresca, por el contrario la curva de resistividad y el modelo predicen condiciones de una roca muy meteorizada y fracturada a mas de 50 metros de profundidad. Con los alcances de este sondeo hablar de dicha profundidad es incierto.

**6.5.2 INTERPRETACIÓN SEV 2.** Profundidad de investigación: AB/2 de 45 metros. Limitada por desniveles topográficos. Terreno plano a ondulado.

Figura 31. Curva y modelo Geoeléctrico Winsev5 para SEV 2.

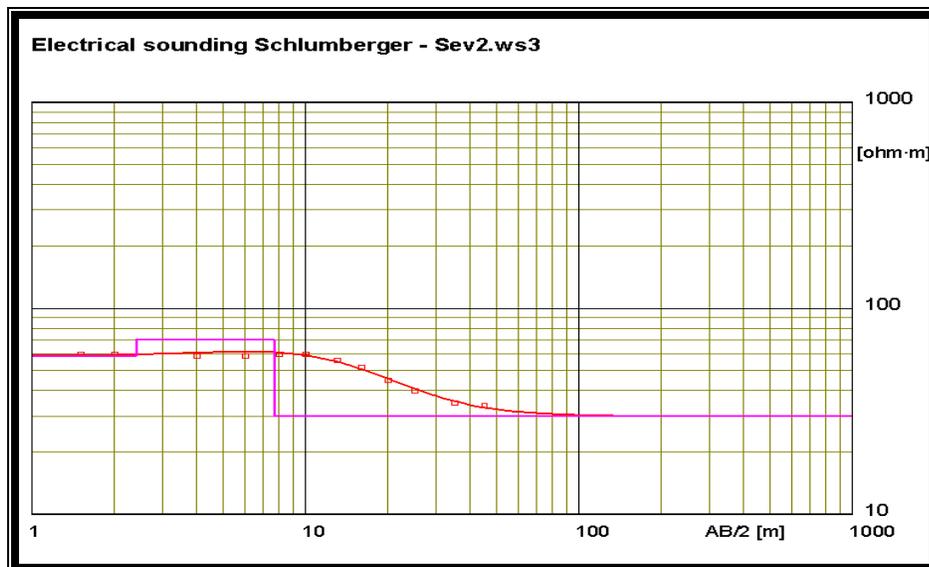


Tabla 9. Unidades geoelectricas y su correlación hidrogeológica. SEV 2.

Unidad Geoelectrica WinSev 5	Resistividad (ohms-m)	Espesor (m)	Profundidad (m) de ↵ hasta	Correlación Hidrogeológica
I	59	2.4	0-2.4	Granito y Cuarzomonzonita fracturada meteorizada, húmeda
II	71	5.3	2.4-7.7	Granito y Cuarzomonzonita meteorizada. O diques intrusivo.
III	30	7.7-		Granito y Cuarzomonzonita fracturada y con un alto grado de meteorización. Nivel freático. Porosidad secundaria por alteración de feldespatos y minerales arcillosos. Roca saturada.

En el sector afloran rocas ígneas, granito y Cuarzomonzonita. Este sondeo muestra por debajo de los 7.7 metros rocas ígneas fuertemente meteorizada y saturadas de agua, y aun a los 45 metros no hay evidencia de roca fresca, por lo que este sector es de interés para la perforación de un pozo exploratorio, además se encuentra en una zona de fracturas de corrimiento por la intersección de la Falla la Flora con las Fallas de Bucaramanga y Morrónico.

**6.5.3 INTERPRETACIÓN SEV 3.** Profundidad de investigación: AB/2 de 120 metros. Terreno Plano y levemente ondulado.

Figura 32. Curva y modelo geoelectrico Winsev5 para SEV 3

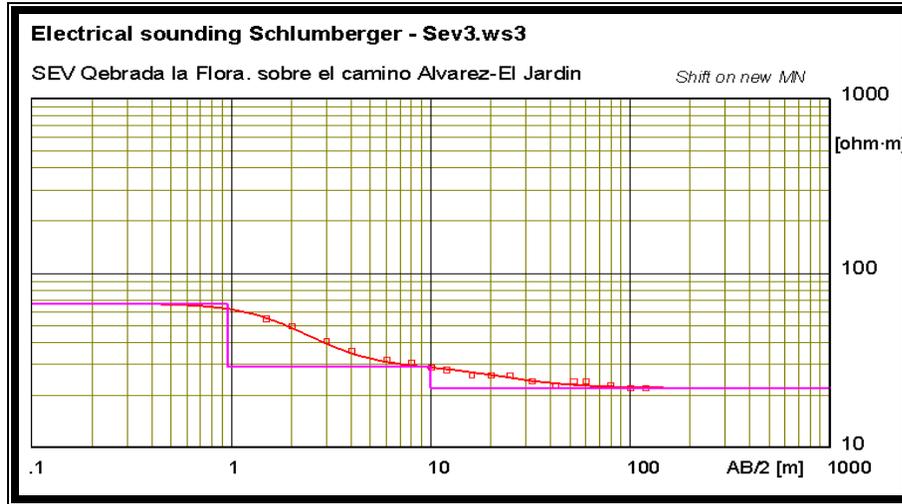


Tabla 10. Unidades geoelectricas y su correlación hidrogeológica. SEV 3.

Unidad Geoelectrica WinSev 5.	Resistividad (ohms-m)	Espesor (m)	Profundidad de $\square$ (m) hasta	Correlación Hidrogeológica
I	67	0.96	0-0.96	Arcilla gravosa, con cantos y bloques de arenisca silíceas; húmeda.
II	29	9	0.96 – 10	Arcillas y limos gravosos, con cantos y bloques de areniscas. Nivel freático.
III	22		10 - ?	Roca ígnea, Cuarzomonzonita y Granito, con alto grado de meteorización y fracturamiento. Nivel saturado

Este sondeo muestra la tercera unidad con resistividades alrededor de los 22 ohms y por debajo de los 10 metros y la cual podría corresponder a roca ígnea saturada, con una buena porosidad secundaria ocasionada por el fracturamiento y la fuerte meteorización, o también podría corresponder a limos y arcillas gravosas saturadas.

**6.5.4 INTERPRETACIÓN SEV 4.** Profundidad de investigación: AB/2 de 120 metros.

Terreno: Levemente inclinado.

Figura 33. Curva y modelo Geoeléctrico Winsev 5 para SEV 4.

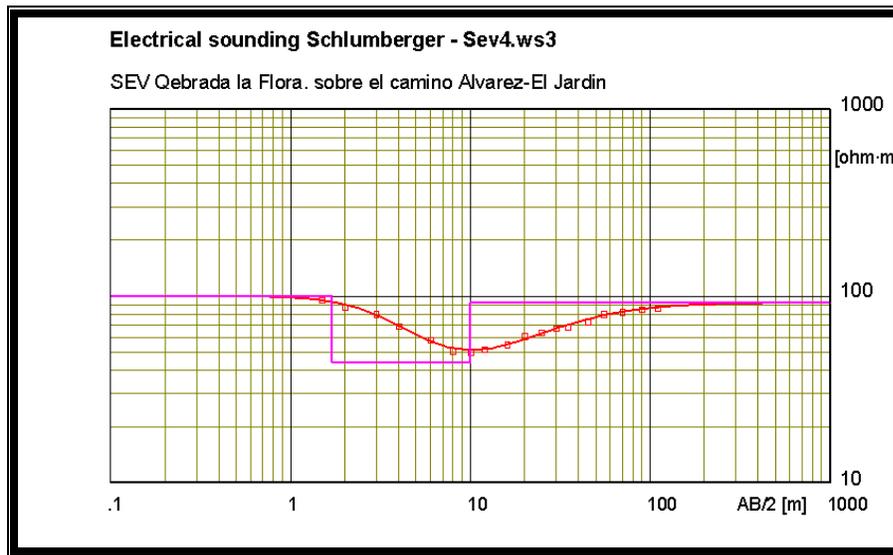


Tabla 11. Unidades geoeléctricas y su correlación hidrogeológica. SEV 4.

Unidad Geoeléctrica WinSev 5.	Resistividad (ohms-m)	Espesor (m)	Profundidad (m) de □ hasta	Correlacion Hidrogeológica
I	100	1.7	0 - 1.7	Gneis con fracturamiento espaciado, y meteorizado, húmedo.
II	44	8.3	1.7 - 10	Gneis meteorizado y fracturado, saturado. Nivel freático.
III	92		10 - ?	Gneis con fracturas cerradas, menos meteorizado o cuerpo intrusivo.

Este fue uno de los sondeos con mayor profundidad de penetración, y aunque la resistividad de la unidad más profunda es aun baja para los valores de resistividad del gneis fresco, tiene una tendencia a aumentar, lo cual es desfavorable ya que disminuye sus posibilidades de contener agua; sin embargo, si la tendencia de la resistividad a aumentar se debe al menor grado de meteorización en profundidad sin afectar el fracturamiento las posibilidades serian buenas.

**6.5.5 INTERPRETACIÓN SEV 5.** Profundidad de investigación: AB/2 de 50 metros, limitada por una quebrada y la urbanización. Terreno: Levemente inclinado.

Figura 34. Curva y modelo geoelectrico Winsev5 para SEV 5

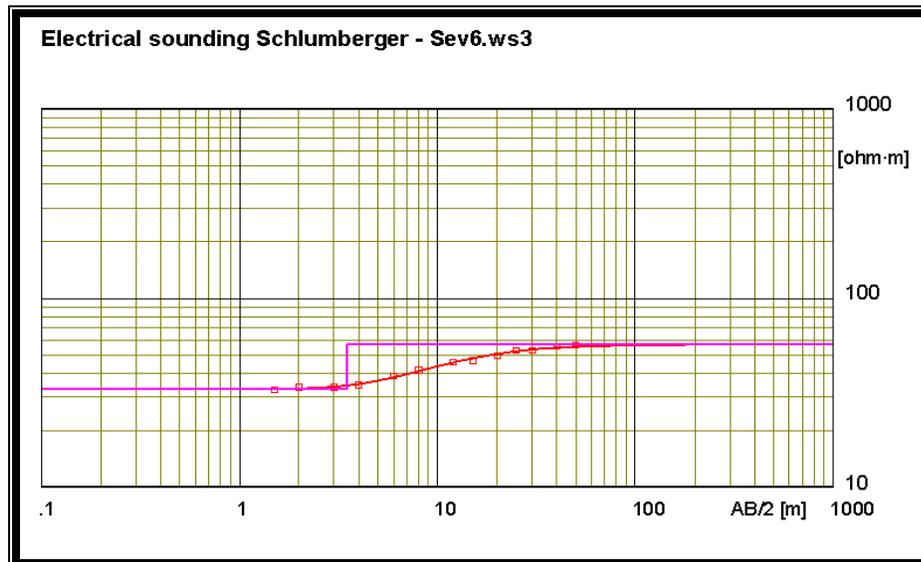


Tabla 12. Unidades geoelectricas y su correlación hidrogeológica. SEV 5.

Unidad Geoelectrica WinSev 5.	Resistividad (ohms-m)	Espesor (m)	Profundidad (m) de ↗ hasta	Correlación Hidrogeológica
I	33	3.5	0 – 3.5	Gneis Cuarzo feldespático meteorizado.
II	57		3.5 – ?	Gneis con menor grado de meteorización.

Los valores de resistividad de las dos unidades que muestra este sondeo son bajos, aunque tienen la tendencia a aumentar a mayor profundidad, lo cual es desfavorable ya se que disminuyen las posibilidades de contener agua en profundidad. Otra posibilidad, radica en la presencia de niveles altamente meteorizados y constituidos esencialmente por arcillas, que constituirían barreras en profundidad para el flujo de agua.

**6.5.6 INTERPRETACIÓN SEV 6.** Profundidad de investigación: AB/2 de 60 metros. Limitada por el trazo de la Quebrada la Flora y las condiciones topográficas.

Terreno: ondulado.

Figura 35. Curva y modelo geoeléctrico Winsev5 para SEV 6.

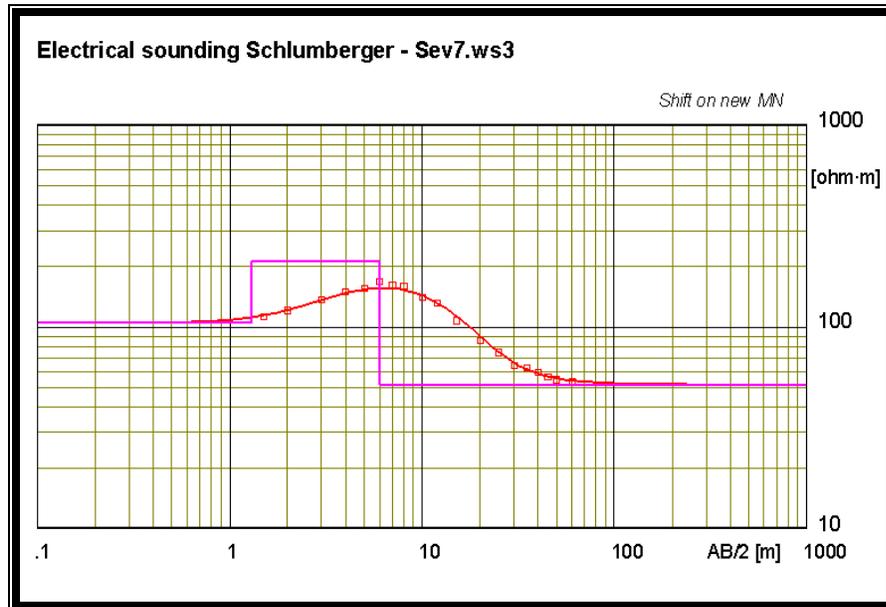


Tabla 13. Unidades geoeléctricas y su correlación hidrogeológica. SEV 6.

Unidad Geoelectrica WinSev 5.	Resistividad (ohms-m)	Espesor (m)	Profundidad (m) de □ hasta	Correlación Hidrogeológica
I	105	1.3	0 - 1.3	Arcilla areno-gravosa con cantos y guijos angulares.
II	210	4.7	1.3 – 6.0	Granito meteorizado y fracturado, seco.
III	52		6.0 - ?	Granito fuertemente meteorizado y seco. Nivel freático. Zona saturada.

Este sondeo muestra muy claramente la diferencia de resistividades entre el granito fracturado y meteorizado, no saturado, con el granito de las mismas

cualidades pero saturado de agua. A los 60 metros no hay evidencia aun de roca fresca, lo cual indica por lo menos un nivel saturado de 54 metros. Este es un sitio indicado para ubicar un pozo exploratorio.

**6.5.7 INTERPRETACIÓN SEV 7.** Profundidad de investigación: AB/2 de 134 metros. Terreno plano, parcialmente cubierto por capa asfáltica.

Figura 36. Curva y modelo Geoeléctrico Winsev5 para SEV 7.

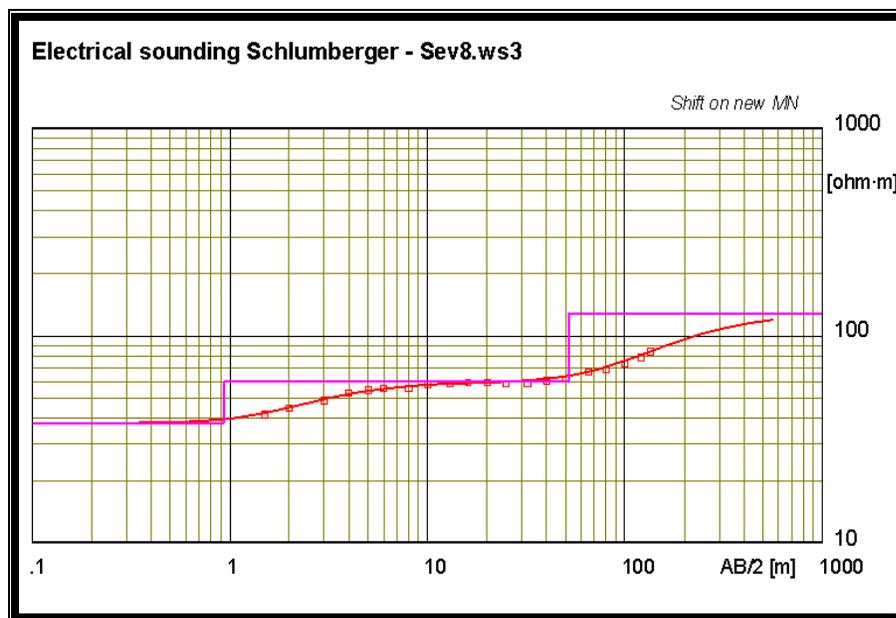


Tabla 14. Unidades geoelectricas y su correlación hidrogeológica. SEV 7.

Unidad Geoelectrica WinSev 5.	Resistividad (ohms-m)	Espesor (m)	Profundidad (m) de ↗ hasta	Correlación Hidrogeológica
I	38	0.93	0 – 0.93	Roca ígnea, Cuarzomonzonita, fuertemente meteorizada y fracturada. Saturada.
II	60	51	0.93 – 52	Roca ígnea, Cuarzomonzonita meteorizada y fracturada. Saturada.
III	128		52 - ?	Roca ígnea, Cuarzomonzonita, con menor grado de meteorización, o diques intrusivo.

La curva geoelectrica interpretada, presenta un comportamiento diferente a las curvas de los demás sondeos realizados sobre roca ígnea, la resistividad tiende a aumentar en profundidad. La segunda unidad es de gran interés ya que tiene valores similares a las capas saturadas de los SEV 1,2 y 6. La ubicación de este SEV también es de gran interés, ya que define el posible comportamiento lateral de las rocas en el subsuelo, en el área de la quebrada la Flora hasta este SEV, además de ubicarse en una zona de fracturas de corrimiento.

**6.5.8 INTERPRETACIÓN SEV 8.** Profundidad de investigación: AB/2 de 65 metros, limitada por la topografía abrupta.

Terreno: levemente inclinado.

Figura 37. Curva y modelo Geoeléctrico Winsev5 para SEV 8.

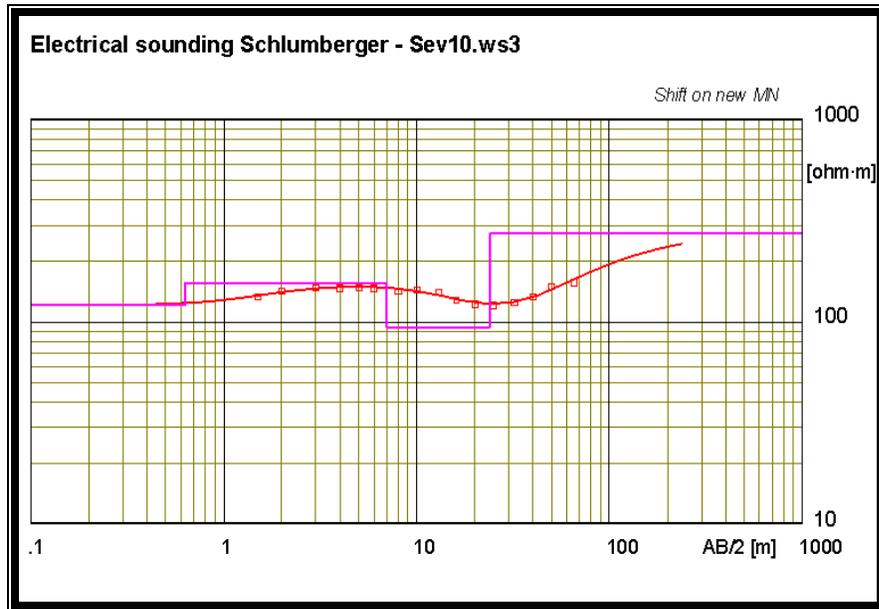


Tabla 15. Unidades geoeléctricas y su correlación hidrogeológica. SEV 8.

Unidad Geoeléctrica	Resistividad (ohms-m)	Espesor (m)	Profundidad (m) de ↗ hasta	Correlación Hidrogeológica
WinSev 5.				
I	121	0.63	0 – 0.63	Suelo areno gravoso. Seco.
I	156	6.4	0.63 – 7	Gneis fracturado. Zona de infiltración.
III	94	17	7 - 24	Gneis fracturado. Zona de infiltración. Mayor concentración de humedad por aporte del valle de la Quebrada la Flora a este nivel.
IV	273		24 - ?	Gneis con fracturas cerradas.

Este sondeo muestra el comportamiento hidrológico del gneis (no meteorizado), en la zona de alta pendiente. Las unidades I y II son zonas de infiltración que permiten el transporte del agua de las zonas altas pendientes a las zonas bajas donde se encuentra la roca ígnea y el gneis meteorizado.

**6.5.9 Corte Geoeléctrico 7-1-2-3.** Un tema complicado de trabajar, en esta zona con grandes desniveles topográficos, con rocas cristalinas que pueden presentar una meteorización diferencial, así como una fracturación heterogénea, convirtiendo el material rocoso en el subsuelo en un cuerpo totalmente heterogéneo, es determinar la continuidad lateral de las unidades geoeléctricas interpretadas en cada SEV y correlacionarlas entre sí. En los resultados de los SEV 1,2,3 y 6 se observa una Correlación entre sus unidades geoeléctricas, por lo que fue posible realizar el presente corte Geoeléctrico.

En el corte (Anexo G), se aprecia la continuidad lateral del nivel saturado, y con profundidades que podrían superar los 120 metros (SEV3), lo cual ofrece grandes posibilidades a la zona de ser un acuífero fracturado.

## **7. PERFORACION DE UN POZO EXPLORATORIO PARA LA UBICACIÓN DE UN PIEZOMETRO.**

Como recurso mineral que es, el agua subterránea debe ser prospectada y explorada, en este capítulo trataremos lo referente a una fase muy importante al respecto, la perforación de un pozo en la cual se enfatizó sobre las condiciones del macizo rocoso.

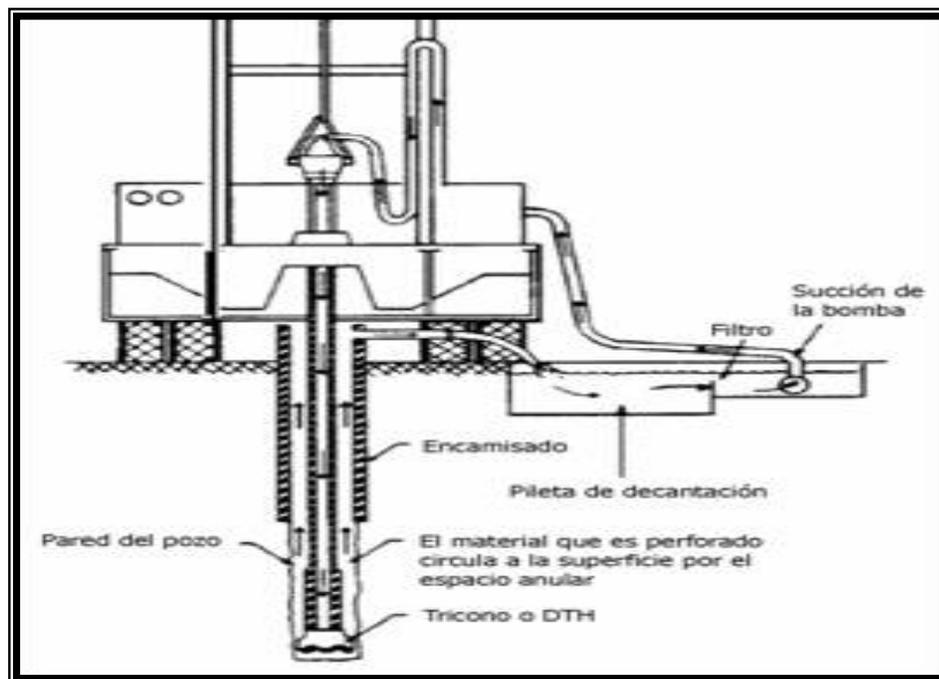
Para explorar, captar o explotar el agua subterránea se pueden implementar varias metodologías, algunas convencionales (pozos cavados o cisternas, pozos perforados), o no convencionales (drenes horizontales, pozos puntuales, zanja y colector, etc). Nos referiremos al método escogido para realizar el pozo de exploración, inicialmente presentamos una descripción teórica de la metodología, aclarando que el trabajo de perforación para este trabajo fue encaminado a la ubicación de un piezómetro y no a un pozo productor como tal, lo cual cambia un poco las condiciones de perforación aunque en esencia es la misma metodología.

Los pozos perforados a máquina: bajo este título se agrupan todas las perforaciones de pequeño diámetro (3" a 10") realizados con máquinas perforadoras manuales o mecánicas. La enorme mayoría de las perforaciones tienen entre 4 y 6 pulgadas de diámetro (pueden llegar a 8 pulgadas en pozos industriales).

Métodos de perforación: existen 3 métodos fundamentales de perforación: percusión por cable (paulatinamente en desuso), rotación, y roto percusión o martillo de fondo. La percusión por cable es un método lento de perforación que se puede adecuar a cualquier sustrato, aunque en rocas duras las velocidades de avance pueden ser del orden de 1 metro por día o menos.

Los métodos de rotación y roto percusión implican maquinaria especializada (observar Figura 38), con bombas de aire, espuma y/o lodo y un cabezal rotatorio que impulsa una columna de barras huecas con una herramienta de perforación en la punta inferior.

Figura 38. Maquinaria especializada para perforación de pozos de agua subterránea



Tomada de <http://www.fagro.edu.uy/geologia>.

La herramienta de perforación puede ser un trícorno en el caso de perforación por rotación, o un martillo de fondo (DTH) en caso de roto percusión. Cualquiera sea la herramienta, por el interior de la columna de barras huecas circula un fluido (lodo en caso del trícorno y aire o espuma o agua en caso del DTH que tiene por cometido refrigerar y arrastrar los trozos de roca o sedimento que están siendo perforados al exterior).

La perforación por rotación con trícorno y lodo es especialmente adecuado a terrenos poco consolidados o rocas pobremente cementadas rocas

sedimentarias) o rocas meteorizadas en el caso de rocas cristalinas. La perforación con martillo de fondo y aire comprimido es el método por excelencia para rocas duras: basamento cristalino, basalto, rocas sedimentarias muy cementadas, etc. Las velocidades de avance del martillo de fondo en rocas duras son altas permitiendo construir un pozo rápidamente.

Una vez que la operación de perforación ha culminado comienza la etapa de armado del pozo. En esta etapa se determina el tipo de encamisado (PVC o hierro); el tipo, ubicación y longitud de la zona filtrante; y la granulometría del prefiltro (si fuese necesario).

A medida que progresa la operación de perforación se van tomando y describiendo las muestras que salen por la boca del pozo (arrastradas por el fluido de perforación), se controlan las velocidades de avance y la viscosidad del fluido.

La boca de la perforación debe mantenerse por encima del terreno circundante, cerrarse herméticamente para evitar que entren animales o se tiren residuos en su interior. A veces se construyen tapas de hierro con una bisagra y candado y a veces se pegan tapas de PVC con silicona.

### **7.1 PERFORACIÓN DEL POZO.**

Los objetivos de la perforación se dirigen a la investigación de las condiciones hidrogeológicas del subsuelo y por último la ubicación de un piezómetro.

Una vez realizados todos los pasos para determinar sitios promisorios para la ubicación de pozos, se decidió perforar en el lugar donde se realizó el SEV 1 con coordenadas 1'279.703N, 1'107.434E, 1027msnm, ya que este lugar se

encuentra en una zona altamente fracturada y de acuerdo a la interpretación del sondeo se esperaba encontrar un nivel saturado subsuperficialmente a 1.9 metros y conformado por granitos altamente fracturados y meteorizados. Inicialmente la profundidad planeada del pozo fue de 55 metros aunque esta se cambió a 90 metros en la marcha de la perforación debido a que las condiciones de fracturación y meteorización de la roca seguían siendo optimas, lo cual a la vez retroalimentó las interpretaciones de los SEV.

**7.1.1 Operación de Perforación.** Para la perforación del pozo se empleó el método de rotó percusión como se observa en la Figura 39, utilizándose tanto trícono como DTH y fue realizada por la empresa P y P Ltda.

Inicialmente se programaron 55 metros de perforación con tubería de acero de 3" y DTH corazonando todo el tramo, con enfriamiento por agua, la cual se tomó de la quebrada la Flora, por lo cual no se realizó inicialmente piscina de lodos. Este plan se llevó a cabalidad hasta los 54 metros de profundidad con una rata de perforación de 13.5 metros por día. En este punto se presentaron problemas técnicos por el daño de la broca y la inestabilidad del pozo(el grado de meteorización de las rocas fue mucho mas alto que el esperado, con niveles de arcilla mínimos), por lo cual se decidió cambiar el método de perforación a trícono, tubería de 2" y bentonita conllevando la realización de una piscina de lodos. Con los anteriores cambios se pudo seguir perforando hasta los 69.40 metros de profundidad. La profundidad no se pudo aumentar por problemas de capacidad de la máquina de perforación. Una vez terminadas las operaciones de perforación se instalan el piezómetro, 69 metros de tubería en pvc ranurada todo el tramo, con un sello sanitario en concreto a 50 centímetros de profundidad y 50 centímetros sobre el terreno, con tapa en tubo de acero atornillada.

Figura 39. Máquina de perforación empleada, con el método de roto percusión.



## 7.2 HIDROGEOLOGÍA DEL POZO

Como se indicó al inicio de este capítulo, el objetivo del pozo fue la instalación de un piezómetro y no un pozo de producción como tal, lo cual no permitió la investigación de las condiciones hidráulicas del medio en el subsuelo, de modo que se limitó a la investigación de las condiciones de fracturamiento de las rocas.

Las labores de perforación se llevaron a cabo en los días 6 a 9 de febrero y 14 a 16 de febrero de 2003, para un total de 7 días perforando. Los días 10 al 13 no se perforó por los problemas técnicos ocurridos y que debieron ser solucionados. A continuación en la tabla 16, se presenta una bitácora de la profundidad del nivel freático medido en metros, por la mañana(NF,M) y por la tarde(NF,T) durante los siete días de la perforación.

Tabla 16. Bitácora del nivel freático durante la perforación.

Día	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
NF,M (m)	2	1.8	1.25	1.25	1.5	1.8	1.8	1.8	1.5	1.8	1.8
NF,T (m)	0.8	0.9	1	1							

Al observar los datos de la tabla 16, resulta interesante el descenso del valor en profundidad del NF ocurrido los días 8 y 9 de febrero, lo cual podría interpretarse como la existencia de dos acuíferos separados en profundidad, esta separación estaría en el tramo comprendido entre los 13.7 metros y los 32.6 metros, que fue el tramo perforado el día 7 de febrero, entonces este descenso en profundidad del nivel freático sería debido al aporte del acuífero más profundo. Sin embargo hay dos hechos relevantes que podrían en duda la anterior idea, durante la madrugada del día 8 se presentó una fuerte y constante lluvia, por lo cual la variación del nivel freático es mucho más factible que se deba al aporte superficial de aguas lluvias; a la vez puede observarse en los datos de la misma tabla que el nivel freático luego se estabiliza alrededor de los 1.8 metros. El descenso en los valores de profundidad del NF tomados por la tarde se debe al agua que es introducida al pozo por la máquina perforadora.

El parámetro RQD fue del orden de 0.002, lo que manifiesta el avanzado estado de fracturamiento y meteorización de la roca.

**7.2.1 Columna Litológica del Pozo La Flora-1.** durante la perforación se realizó un trabajo de control de los corazones y muestras de ripios extraídos, como se observa en las Figuras 40.

Figura 40. Descripción en campo de ripios y corazones.



La litología encontrada en profundidad corresponde a un cuerpo ígneo de característica homogénea con algunos cambios composicionales de Granito a Cuarzomonzonita y algunos mas notables a granódioritas.

Por la anterior razón las divisiones que se realizan en la columna litológica no obedecen a cambios litológicos marcados, si no al estado de fracturamiento y meteorización en que se encuentra la roca. En el anexo C, se presenta la profundidad y la descripción litológica de cada tramo. En la descripción se tienen en cuenta dos factores, que son: la litología y las condiciones de la muestra en superficie.

La siguiente es la nomenclatura de la composición mineral de la roca utilizada en el Anexo H:

Q: Cuarzo	P: Plagioclasas	F: Feldespato potasico
M: Minerales Máficos	Mi: Micas	O: Otros

Como puede observarse en la columna litológica (Anexo H) y por el RQD, las rocas perforadas presentan un alto estado de meteorización, sin embargo las concentraciones de arcillas son mínimas y predominan en los tramos 26.5-32.6 y 57.05-60.1, especialmente en su base, donde se observó una concentración de arcilla de color verde. En los demás tramos aparece una predominancia de detritos arenosos y gravosos con poco o nada de arcilla. Llama especialmente la atención el tramo 6.38-10.8 por observarse detritos en forma de guijarros y sin nada de arcilla, limpios, estas serian las condiciones ideales para un acuífero fracturado.

En lo que respecta a la saturación, esta comienza desde los dos metros de profundidad y se mantiene todo el tramo perforado, siendo incierta la máxima profundidad de fracturación y por ende de saturación, por lo cual se recomienda realizar pozos de mayor profundidad.

**7.2.2 Columna Litológica del Pozo Bajos de Pan de Azúcar.** Posterior a la culminación de este trabajo, el GPH, prosiguió como tenía planeado con las investigaciones en el extremo norte del SEV 7. A continuación en la tabla 17 presentamos los resultados obtenidos de la columna litológica de dicho pozo.

Tabla 17. Columna litológica del Pozo Bajos Pan de Azúcar

Profundidad (m)	Descripción Litológica
12	Granito rosado meteorizado. Nivel freático a los 10 metros
4204	Roca Meteorizada
48	Granodiorita gris verdosa, fracturada y presencia de arcillas
55.4	Granito a Cuarzomonzonita anfibólica rosada, poco fracturada
64.50	Granodiorita gris verdosa con buen fracturamiento
69.15	Granito a Cuarzomonzonita rosada, meteorizada
72.5	Diorita gris verdosa, bajo grado de fracturamiento

En este pozo, se observaron varios aspectos muy favorables, como un alto grado de fracturamiento, mínima presencia de arcillas, saturación de agua de todo el pozo, posibilidades de que el fracturamiento y la saturación continúen aun más al Este.

## CONCLUSIONES

En el área de estudio existen todas las características de un acuífero fracturado: la cantidad de buzamiento de la población principal de diaclasas tiene azimut  $58^{\circ}$  con una cantidad de buzamiento de  $59^{\circ}$  al SE, lo que asegura la retención del agua en profundidad, un alta densidad de fracturas, 25 diaclasas por metro cuadrado ( $25d/m^2$ ), con una cantidad de buzamiento de  $59^{\circ}$  en promedio, lo que garantiza la interconexión en profundidad de estas fracturas y por ende algún tipo de conexión hidráulica subterránea y un alto porcentaje, 71%, de las diaclasas del área se encuentran limpias sin ningún tipo de relleno, lo que facilita la infiltración del agua desde la superficie y por tanto una recarga garantizada.

Todos los SEV's interpretados, indican niveles saturados, ninguno muestra una roca fresca, y por ende de grandes espesores, mayores de 50 metros, siendo incierto al máximo espesor, ya que debido a las limitaciones de topografía no se pudieron lograr penetraciones promedio mayores de 65 metros.

En las dos perforaciones se encontró la roca altamente fracturada y meteorizada con niveles de arcillas muy escasos, en su gran mayoría (el 90%) el material extraído se aprecia arenoso, gravoso, y limpio; los dos pozos muestran niveles saturados espesos; la suma de los dos anteriores condiciones propician un ambiente óptimo para la acumulación de grandes cantidades de agua y facilitan su recuperación y posterior utilización (observar las recomendaciones al respecto).

Las mejores posibilidades, se encuentran en las zonas topográficamente bajas: a lo largo de la quebrada la Flora, los barrios bajos de Pan de Azúcar, los Cedros, y a lo largo del trazo de la fallas de Morrónico y Bucaramanga al sur del área. En estas zonas afloran los cuerpos de roca ígnea descritos en el capítulo 4, estos cuerpos tienen la ventaja sobre el Gneis, de estar constituidos en un gran porcentaje por cuarzo, el cual proporciona unas cualidades ideales (de escasa arcilla) a la roca ígnea meteorizada. Mientras que el Gneis Anfibolítico, posee mayor contenido de minerales susceptibles a transformarse en arcilla cuando se produce la meteorización. Y como ya se indicó, estas arcillas pueden originar el taponamiento de la porosidad secundaria.

## RECOMENDACIONES

Se debe continuar con el trabajo, seguir perforando y determinar las condiciones de continuidad del fracturamiento y meteorización.

Los lugares recomendados para seguir perforando son los que se encuentran a lo largo de la quebrada La Flora, como se observa en el corte geoelectrico es una zona altamente fracturada y meteorizada. Por las condiciones topográficas y el resultado del sev, el parque la flora es un buen lugar para perforar. La zona ubicada en la intersección de las fallas paralelas con la falla La Flora, es también un muy buen lugar, por constituir una zona de fracturas de corrimiento.

Se recomienda realizar un plan de perforaciones en una malla que cubra la zona al este de la quebrada la Flora hacia el piedemonte y también hacia la zona oeste de la quebrada ( el limite es incierto), para determinar la continuidad del fracturamiento y la meteorización. Así como pozos que superen los 100 metros de profundidad para determinar si es posible, la profundidad a la que se encuentra la roca sana.

Es conveniente realizar un pozo productor para determinar las condiciones hidráulicas presentes en el medio.

Aunque los niveles arcillosos son mínimos, es recomendable realizar un estudio sobre el tipo de arcillas que se encontraron en la perforación, para determinar de que tipo se tratan y si son fuente importante de taponamiento de porosidad secundaria.

Se recomienda realizar un estudio detallado sobre la calidad del agua, no solo la obtenida del pozo realizado en este trabajo, sino también de todas las corrientes superficiales existentes en la zona. Así mismo realizar un estudio ambiental, sobre las posibles fuentes de contaminación antropicas existentes en la zona (cañerías de aguas negras, lavaderos de carro, etc)

En los futuros pozos que se realicen, se debe aplicar algún método directo (corazones) o indirecto (geofísico) para investigar el fracturamiento presente en los pozos.

Para realizar el anterior punto y obtener mayor eficiencia (obtención de corazones, ripios y mayor profundidad), se debe utilizar una maquina de perforación mucho mas eficiente.

Para adquirir información mas amplia desde el punto de vista geofísico, se debe utilizar otros métodos geofísicos, como tomografías, sísmica de refracción, y métodos para aplicar en pozos, como los que detectan fracturas.

La descripción litológica realizada en este proyecto, se hizo a nivel macroscópico, es recomendable realizar secciones delgadas de las diferentes litologías aflorantes en la zona, para tener un conocimiento mayor de dicha litología.

## BIBLIOGRAFÍA

ALBINO, León., Geología Estructural. Bucaramanga. Escuela de Geología UIS, 1998.

BELTRÁN, Ruth y REY, Alexander, Comportamiento Estructural asociado al Sistema de Fallas Bucaramanga – Santa Marta y diaclasas, para definir una Red de Drenaje Subterráneo en el Macizo de Santander, sección entre Piedecuesta (Río de Oro) y Bucaramanga (Río Suratá). Universidad Industrial de Santander, 2002.

CORPORACIÓN METROPOLITANA DE PLANEACIÓN Y DESARROLLO DE BUCARAMANGA (CORPLAN). Situación Actual y Futuro Inmediato del Área Metropolitana de Bucaramanga: Subsistema Biofísico – Ambiental. Bucaramanga. 2000.

COY, R, Estudio de Drenes Transversales aplicados a la Meseta de Bucaramanga. Bucaramanga. Escuela de Ingeniería Civil. UIS, 1985.

CURSO DE HIDROGEOLOGÍA BÁSICO. PROBLEMAS Y TEORÍA.-.  
<http://www.fortunecity.com/campus/carthage/1033/Index.htm>

DENNIS, J, Structural Geology. USA. Edit John Wiley & Sons., 1972.

DIAS y SUAREZ., Evidencias Neotectónicas del Sistema de Fallas del Suárez en su Confluencia con el Sistema de fallas de Bucaramanga. Bucaramanga. Escuela de Geología UIS, 1998.

DUARTE, C y LOPEZ, C, Agua Subterránea Como Posibilidad de Consumo en la Meseta de Bucaramanga. Bucaramanga. Escuela de Ingeniería Civil. UIS, 1989.

GARCIA, Carlos, Manual de Laboratorio de Petrología Ígnea. Bucaramanga. Escuela de Geología UIS, 1997.

GARCIA, C, Manual de Laboratorio de Petrología Metamórfica. Bucaramanga. Escuela de Geología UIS, 1997.

GEOCONTROL., Sondeos Eléctricos Verticales, Resistividad VLF. Madrid España.

KOEFOD, Geosonding Principles. Amsterdam. Edit. Elsevier, 1978.

NIÑO, Aura y VARGAS, Guillermo, Modelo de Evolución Para el Abanico de Bucaramanga. Facies-UIS, vol 2 N° 1 y 2, 1993.

PINTO, J y TELLEZ, G, Interpretación de los Rasgos Neotectónicos Asociados al Sistema de Fallas Bucaramanga-Santa Marta en el Departamento de Santander Mediante el Procesamiento Digital de Imágenes de Radar y Satélite. Bucaramanga. Escuela de Geología. UIS, 1999.

REYNOLDS, J, An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. West Sussex. England. Editorial Jhon Wiley & Sons Ltda., 1997.

SCHEIDEGGER, A, La Conexión de Algunos Rasgos Geológicos y Geomorfológicos con la Tectónica. Bogota. Geología Colombiana. Universidad Nacional de Colombia, No 12, Pág. 33-55., 1981.

SCHILDKNECHT, F, Exploración y protección de agua subterránea en acuíferos cristalinos fracturados en el Uruguay. pagina:[http://www.bgr.de/b1hydro/fachbeitraege/d199902/s\\_uruguay.htm](http://www.bgr.de/b1hydro/fachbeitraege/d199902/s_uruguay.htm)

Taller de Recursos Naturales, 2002. Ingeniería Agrónoma. Montevideo Uruguay. Universidad de La Republica, 2002. [http://www.fagro.edu.uy/geologia/web/t2/t2\\_gcp01.html](http://www.fagro.edu.uy/geologia/web/t2/t2_gcp01.html)

VELEZ OTALVARO, Hidráulica de Aguas Subterráneas. Medellín. Universidad de Colombia, 1999.

WARD D, et al, Geología de los cuadrángulos H12 Bucaramanga y H13 Pamplona Departamento de Santander. Ingeominas. Boletín Geológico Vol. XX, N° 13, 1973.

# **ANEXOS**

**ANEXO A: RED DE DRENAJE SUPERFICIAL.**

**ANEXO B: MAPA DE DRENAJE RECTIFICADO.**

**Nota: para observar los anexos A, B, D, G y H es necesario el software AutoCAD.**

**ANEXO C. DATOS NUMÉRICOS DEL AZIMUT DE LAS COMPONENTES DE LA RED DE DRENAJE RECTIFICADA DEL ÁREA ESTUDIO.**

<b>Datos numéricos del azimut de las componentes de la red de drenaje rectificada del área estudio</b>				
Azimuth	Azimuth	Azimuth	Azimuth	Azimuth
210	190	270	230	300
180	335	300	270	225
180	210	270	225	225
180	225	300	340	315
210	180	180	240	315
210	205	240	270	315
180	210	260	200	315
315	190	225	210	315
205	180	225	270	315
330	180	225	180	270
270	180	225	270	315
270	315	345	180	270
234	190	270	215	315
315	270	340	225	340
240	210	225	190	315
180	315	295	190	315
310	315	270	225	180
240	275	225	315	180
180	180	315	270	315
225	180	315	270	225
315	315	315	225	225
315	200	315	225	330
270	180	280	315	270
315	270	310	180	180
270	270	180	225	190
270	270	280	225	320
270	270	225	225	180
270	225	225	230	340

**Datos numéricos del azimut de las componentes de la red de drenaje rectificada del área estudio**

Azimuth	Azimuth	Azimuth	Azimuth	Azimuth
270	180	270	340	320
315	270	180	320	195
225	180	340	320	315
225	190	320	200	180
330	320	320	180	180
340	340	300	230	180
180	180	270	315	225
180	315	270	270	225
180	315	180	180	225
225	180	195	270	180
225	315	225	180	180
180	180	220	270	180
180	180	220	180	225
180	315	220	180	
180	230	270	180	
225	180	180	315	
270	330	200	270	
180	250	270	315	
225	270	240	315	
180	180	270	315	
225	180	315	270	
225	180	315	270	
330	180	350	270	
270	180	330	270	
225	180	330	270	
180	240	180	225	
180	240	200	260	
270	225	330	180	

310	225	180	180
315	300	310	180
315	270	225	220
315	300	340	230
330	315	340	240
315	240	340	270
315	240	340	190
270	240	340	190
270	270	340	180
290	300	290	315
225	330	270	315
180	270	315	315

**ANEXO D. MAPA GEOLOGICO**

**ANEXO E.** Descripción de las diaclasas cartografiadas en campo.

RUMBO	DIR. BUZAM.	RELLENO	ESPACIAM.	OBSERVACIÓN
N70°E/90°	0/90°	ninguno	5cm	cerradas
N74°W/44°NE	16°/44°	plagioclasa	2cm	cerradas. Con estrías
N47°W/32°NE	43°/32°	ninguno	>50cm	cerradas
N30°W/56°NE	60°/56°	ninguno	>50cm	cerradas
N85°W/70°NE	5°/70°	ninguno	10cm	cerradas
N80°W/70°SW	190°/70°	ninguno	10cm	cerradas
N65°W/62°NE	25°/62°	ninguno	>50cm	abiertas
N20°E/53°SE	110°/53°	ninguno	20cm	abiertas
N15°W/50°SW	255°/50°	ninguno	20cm	abiertas
N75°W/20°NE	15°/20°	ninguno	<10cm	abiertas
N85°E/90°	0/90°	ninguno	>50cm	abiertas
N60°E/48°NW	330°/48°	ninguno	5cm	abiertas
N50°E/55°SE	140°/55°	ninguno	<5cm	abiertas
N65°E/90°	0/90°	ninguno	>50cm	abiertas
N25°E/35°NW	295°/35°	ninguno	10cm	abiertas
N-S/60°W	270°/60°	ninguno	5cm	abiertas
N60°W/70°NE	30°/70°	ninguno	20cm	abiertas
N25°E/64°SE	115°/64°	ninguno	2cm	abiertas
Horizontales		ninguno	>50cm	abiertas
N35°W/20°NE	55°/20°	ninguno	5cm	abiertas
N10°E/70°SE	100°/70°	ninguno	10cm	abiertas
N15°W/32°NE	75°/32°	ninguno	10cm	abiertas
N32°E/73°SE	122°/73°	ninguno	10cm	abiertas
N30°E/52°NW	300°/52°	ninguno	5cm	abiertas
N55°E/90°	0/90°	ninguno	20cm	abiertas
N15°E/84°SE	105°/84°	ninguno	5cm	abiertas
N25°E/78°SE	115°/78°	ninguno	5cm	abiertas
N25°E/38°NW	295°/38°	ninguno	5cm	abiertas
N49°E/75°SE	139°/75°	ninguno	10cm	abiertas

RUMBO	DIR. BUZAM.	RELLENO	ESPACIAM.	OBSERVACIÓN
N74°W/70°NE	16°/70°	ninguno	20cm	abiertas
E-W/24°S	180°/24°	sedimento fino	2cm	abiertas
N15°W/66°NE	75°/66°	ninguno	50cm	abiertas
N57°W/34°NE	33°/34°	sedimento fino	50cm	abiertas
N58°E/77°SE	148°/77°	sedimento fino	10cm	abiertas
N80°E/60°NW	350°/60°	sedimento fino	20cm	abiertas
N30°E/80°SE	120°/80°	ninguno	50cm	abiertas
N70°E/70°SE	160°/70°	sedimento fino	50cm	abiertas
N20°E/12°SE	110°/12°	ninguno	10cm	abiertas
N56°W/80°NE	34°/80°	ninguno	>50cm	cerradas
E-W/62°N	0°/62°	ninguno	>50cm	cerradas
N50°E/55°SE	140°/55°	ninguno	10cm	abiertas
N50°E/55°SE	95°/55°	ninguno	10cm	abiertas
N85°W/55°SE	5°/55°	ninguno	>50cm	abiertas
N28°E/83°SE	118°/83°	ninguno	10 a >50cm	abiertas
N70°E/67°SE	160°/67°	ninguno	5cm	abiertas
N62°W/60°NE	28°/60°	ninguno	10cm	cerradas
N30°W/30°NE	60°/30°	sedimento fino	>50cm	abiertas
N72°W/76°NE	18°/76°	ninguno	>50cm	abiertas
N47°E/57°SE	137°/57°	sedimento fino	>50cm	abiertas
N70°W/40°NE	20°/40°	ninguno	>50cm	cerradas
N23°W/57°SW	247°/57°	ninguno	20cm	cerradas
N70°E/58°SE	160°/58°	sedimento fino	10-50cm	abiertas
N-S/80°E	90°/80°	sedimento fino	5-10cm	abiertas e irregulares
N20°E/64°NW	290°/64°	ninguno	>50cm	abiertas
N18°E/30°SE	108°/30°	sedimento fino	10-50cm	abiertas
N87°W/64°SW	183°/64°	sedimento fino	2-50cm	abiertas
N48°W/64°NE	42°/64°	ninguno	10-50cm	abiertas
N82°E/51°NW	352°/51°	sedimento fino	5cm	abiertas
N40°E/39°SE	130°/39°	sedimento fino	10 a >50cm	abiertas
N54°E/82°NW	324°/82°	sedimento fino	20cm	abiertas
N50°W/68°SW	220°/68°	sedimento fino	5cm	abiertas

RUMBO	DIR. BUZAM.	RELLENO	ESPACIAM.	OBSERVACIÓN
N40°E/80°SE	130°/80°	sedimento fino	10-50cm	abiertas
N55°E/70°SE	145°/70°	ninguno	10 a >50cm	abiertas
N-S/42°E	90°/42°	ninguno	2cm	abiertas
N15°W/78°NE	75°/78°	ninguno	>50cm	abiertas
N50°W/60°NE	40°/60°	sedimento fino	10cm	abiertas
N39°E/44°SE	129°/44°	sedimento fino	5cm	abiertas
N80°E/54°SE	170°/54°	ninguno	5cm	abiertas
N60°E/34°SE	150°/34°	ninguno	5cm	abiertas
N15°E/78°SE	105°/78°	sedimento fino	2cm	abiertas. Superficie plana
N48°W/50°SW	222°/50°	ninguno	1cm	abiertas. Superficie plana
N77°E/42°NW	347°/42°	sedimento fino	5cm	abiertas. Superficie plana
N17°W/86°NE	73°/86°	sedimento fino	50cm	abiertas. Superficie plana
N20°W/90°	0°/90°	ninguno	>50cm	abiertas
N65°W/19°NE	25°/19°	ninguno	>40cm	abiertas e irregulares
N40°W/90°	0°/90°	ninguno	1cm	abiertas e irregulares
N15°W/45°NE	75°/45°	sedimento fino	5cm	abiertas
N80°E/34°NW	350°/34°	ninguno	10cm	abiertas e irregulares
N35°E/70°NW	340°/70°	ninguno	5cm	abiertas. Superficie plana
N56°E/45°SE	146°/45°	ninguno	2cm	abiertas
E-W/45°N	0°/45°	ninguno	2cm	abiertas
N20°E/52°SE	110°/52°	ninguno	5cm	abiertas
N80°W/90°	0°/90°	ninguno	2cm	abiertas
N70°E/65°NW	340°/65°	ninguno	2cm	abiertas
N-S/80°E	90°/80°	ninguno	10cm	abiertas
N10°E/70°NW	280°/70°	ninguno	5cm	abiertas
N20°E/30°NW	290°/30°	Min. Arcillas	>50cm	abiertas. Superficie plana
N41°W/90°	0°/90°	sedimento fino	5cm	abiertas. Superficie plana
N80°E/30°NW	250°/30°	Min. Arcillas	5cm	abiertas. Superficie plana
N30°E/58°SE	120°/58°	ninguno	5cm	abiertas e irregulares
N50°E/41°NW	140°/41°	sedimento fino	10cm	abiertas e irregulares
N-S/62°E	90°/63°	sedimento fino	15cm	abiertas
N20°W/65°SW	250°/65°	ninguno	5cm	cerradas

RUMBO	DIR. BUZAM.	RELLENO	ESPACIAM.	OBSERVACIÓN
N40°W/77°NE	50°/77°	ninguno	20cm	cerradas
N-S/70°E	90°/70°	ninguno	2cm	cerradas
N70°W/64°SW	200°/64°	ninguno	10cm	cerrada
N20°E/65°NW	290°/65°	ninguno	10cm	abiertas e irregulares

## ANEXO F: SET DE DATOS GEOFISICOS.

Juego de Datos para el SEV 1.

LOCALIZACIÓN: Camino Albania-Altos del Jardín		FECHA: Diciembre 17 de 2002
DEPARTAMENTO: Bucaramanga-Santander		SONDEO N°: 1
PROYECTO: Prospección Geológica para Aguas Subterráneas en Rocas Cristalinas fracturadas.		AZIMUT: 42°
OBSERVADOR: Otoniel Vergara		EQUIPO: Hidrosistem Rc12
COORDENADAS: N: 1'279.703 E: 1'107.434 Z: 1027msnm		
ESTACIÓN N°.	AB/2 (m)	RESISTIVIDAD APARENTE (ohm-m)
1	1.5	255
2	2	228
3	3	187
4	4	163
5	5	128
6	6	107
7	8	84
8	10	75
9	17	65
10	30	65
11	40	63
12	50	63

Juego de Dato para el SEV 2.

LOCALIZACIÓN: Cabecera parque-Altos del Jardín		FECHA: Diciembre 17 de 2002
DEPARTAMENTO: Bucaramanga-Santander		SONDEO N°: 2
PROYECTO: Prospección Geológica Para Aguas Subterráneas en Rocas Cristalinas fracturadas.		AZIMUT: 60°
OBSERVADOR: Otoniel Vergara		EQUIPO: Hidrosistem Rc 12
COORDENADAS: N: 1'279.217 E: 1'107.560 Z: 1012 msnm		
ESTACIÓN N°.	AB/2 (m)	RESISTIVIDAD APARENTE (ohm-m)
1	1.5	60
2	2	60
3	4	59
4	6	59
5	8	60
6	10	60
7	13	56
8	16	52
9	20	45
10	25	40
11	35	35
12	45	34

Juego de Datos para el SEV 3.

LOCALIZACIÓN: Parque la Flora		FECHA: Diciembre 17 de 2002
DEPARTAMENTO: Bucaramanga Santander		SONDEO N°: 3
PROYECTO: Prospección Geológica para Aguas Subterráneas en Rocas Cristalinas fracturadas.		AZIMUT: 25°
OBSERVADOR: Otoniel Vergara		EQUIPO: Hidrosistem Rc 12
COORDENADAS: N: 1'278.000 E: 1'107.171 Z: 937 msnm		
ESTACIÓN N°.	AB/2 (m)	RESISTIVIDAD APARENTE (ohm-m)
1	1.5	55
2	2	50
3	3	41
4	4	36
5	6	32
6	8	31
7	10	29
8	12	28
9	16	26
10	20	26
11	25	26
12	32	24
13	42	24
14	52	24
15	60	24
16	80	24
17	100	24
18	120	24

Juego de Datos para el SEV 4.

LOCALIZACIÓN: camino aledaño a la UDES		FECHA: Diciembre 18 de 2002
DEPARTAMENTO: Bucaramanga Santander		SONDEO N°: 4
PROYECTO: Prospección Geológica para Aguas Subterráneas en Rocas Cristalinas fracturadas.		AZIMUT: 320°
OBSERVADOR: Otoniel Vergara		EQUIPO: Hidrosistem Rc 12
COORDENADAS: N: 1`277.375 E: 1`108.540 Z: 1028 msnm		
ESTACIÓN N°.	AB/2 (m)	RESISTIVIDAD APARENTE (ohm-m)
1	1.2	95
2	2	87
3	3	80
4	4	69
5	6	58
6	8	51
7	10	50
8	12	52
9	16	55
10	20	61
11	25	64
12	30	67
13	35	68
14	45	73
15	55	80
16	70	82
17	90	85
18	110	86

Juego de Datos para el SEV 5.

LOCALIZACIÓN: Urbanización el Nogal.		FECHA: Diciembre 19 de 2002
DEPARTAMENTO: Bucaramanga-Santander		SONDEO N°: 5
PROYECTO: Prospección Geológica para Aguas Subterráneas en Rocas Cristalinas fracturadas.		AZIMUT: 15°
Observador: Otoniel Vergara		EQUIPO: Hidrosistem Rc 12
COORDENADAS: N: 1'278.568 E: 1'107.944 Z: 1.016		
ESTACIÓN N°.	AB/2 (m)	RESISTIVIDAD APARENTE (ohm-m)
1	1.5	33
2	2	34
3	3	34
4	4	35
5	6	39
6	8	42
7	12	46
8	15	47
9	20	50
10	25	53
11	30	53
12	40	56
13	50	57

Juego de Datos para el SEV 6.

LOCALIZACIÓN: Camino Albania-Altos del Jardín		FECHA: Diciembre 20 de 2002
DEPARTAMENTO: Bucaramanga-Santander		SONDEO N°: 6
PROYECTO: Prospección Geológica para Aguas Subterráneas en Rocas Cristalinas fracturadas.		AZIMUT: 320°
OBSERVADOR: Otoniel Vergara		EQUIPO: Hidrosistem Rc 12
COORDENADAS: N: 1'280.001 E: 1'107.436 Z: 1046		
ESTACIÓN N°.	AB/2 (m)	RESISTIVIDAD APARENTE (ohm-m)
1	1.5	113
2	2	121
3	3	137
4	4	150
5	5	155
6	6	168
7	7	161
8	8	160
9	10	141
10	12	131
11	15	108
12	20	86
13	25	75
14	30	65
15	35	63
16	40	60
17	45	57
18	50	55
19	60	54

Juego de Datos para el SEV 7.

LOCALIZACIÓN: Bajos de Pan de Azúcar. Cra 56-CII 51		FECHA: Febrero 14 de 2003
DEPARTAMENTO: Bucaramanga-Santander		SONDEO N°: 7
PROYECTO: Prospección Geológica para Aguas Subterráneas en Rocas Cristalinas fracturadas.		AZIMUT: 325°
OBSERVADOR: Otoniel Vergara		EQUIPO: Hidrosistem Rc 12
COORDENADAS: N: 1'278.920		E: 1'107.930 Z: 1044 msnm
ESTACIÓN N°.	AB/2 (m)	RESISTIVIDAD APARENTE (ohm-m)
1	1.5	42
2	2	45
3	3	49
4	4	53
5	5	55
6	6	56
7	8	56
8	10	58
9	13	59
10	16	60
11	20	60
12	25	59
13	32	59
14	40	61
15	50	62
16	65	67
17	80	69
18	100	74
19	120	79
20	134	84

Juego de Datos para el SEV 8.

LOCALIZACIÓN: Barrio Morrórico		FECHA: Febrero 14 de 2003
DEPARTAMENTO: Bucaramanga-Santander		SONDEO N°: 8
		AZIMUT: 50°
OBSERVADOR: Otoniel Vergara		EQUIPO: Hidrosistem Rc 12
COORDENADAS: N: 1'280.770 E: 1'107.850 Z: 1100msnm		
ESTACIÓN N°.	AB/2 (m)	RESISTIVIDAD APARENTE (ohm-m)
1	1.5	133
2	2	142
3	3	148
4	4	147
5	5	148
6	6	147
7	8	143
8	10	144
9	13	140
10	16	128
11	20	123
12	25	121
13	32	125
14	40	134
15	50	150
16	65	157

ANEXO G: CORTE GEOELECTRICO.

ANEXO H: COLUMNA LITOLÓGICA DEL POZO LA FLORA 1.