

**CARTOGRAFIA GEOLÓGICA Y CARACTERIZACION ESTRUCTURAL DE LA
SUBCUENCA DE LA QUEBRADA RIO SUCIO, MUNICIPIO DE TONA, SANTANDER,
ORIENTADO A DEFINIR UN MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL.**

**ALEXANDRA MILENA ULLOA PINILLA
NADIA ROCIO ROJAS PARRA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIA FISICO QUIMICAS
ESCUELA DE GEOLOGIA
BUCARAMANGA
2005**

**CARTOGRAFIA GEOLÓGICA Y CARACTERIZACION ESTRUCTURAL DE LA
SUBCUENCA DE LA QUEBRADA RIO SUCIO, MUNICIPIO DE TONA, SANTANDER,
ORIENTADO A DEFINIR UN MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL.**

**ALEXANDRA MILENA ULLOA PINILLA
NADIA ROCIO ROJAS PARRA**

**Proyecto de grado para optar
el título de Geólogo**

**Director
JUAN DIEGO COLEGIAL GUTIERREZ
Geólogo Phd.**

**Codirector
JORGE ALBERTO GUZMAN JAIMES
Ingeniero Civil Msc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIA FISICO QUIMICAS
ESCUELA DE GEOLOGIA
BUCARAMANGA**

2005

DEDICATORIA

Por ser el pilar de mi vida, este trabajo antes que nada es para toda mi familia (nonas, tias, primos, etc, etc), en especial a mi apa, mi ama y las niñas. Espero que sea lo suficientemente bueno, para que se pueda igualar a todo lo que he recibido de ellos. Y a Dios le doy gracias por haberme dado padres y hermanas como los que tengo, además de la vida que he tenido hasta ahorita. Bueno pa' terminar me despido y espero que este trabajo sea de ayuda pa'l que lo este leyendo y no sólo pa' burlarse de lo que escribamos acá, ejercicio muy usual en nosotros los estudiantes, yo lo hacia, por eso es que lo digo.

Chao.....y que gracias.

Alexandra Milena Ulloa Pinilla

Y Saludos pa' San Vicente de Chucurí (Santander)

DEDICATORIA

La verdad nunca pense poder lograr llegar a este final, pero aunque a golpes y tropiezos termine, siempre tuve a Dios que me alentaba a seguir adelante y ante todo que siempre me dio oportunidades para continuar.

En este camino la que apunta de regaños y mucho amor siempre fue y sera mi motivo de lucha y alegria, mis animos con coraje bravo, eres tu mamita al fin cumpli tus sueños, lento pero lo cumpli, por que al ver tu lucha y entrega por mi no me dejo desfallecer. A toda mi familia les digo siempre Gracias y a mis amigos por estar ahí, sin afan y sin prisa diciendome apurese tambien se las dedico muy especialmente.

Nadia

AGRADECIMIENTOS

Las autoras expresan sus agradecimientos a:

El Grupo de Predicción y Modelamiento Hidroclimático por la colaboración y valorar nuestro trabajo

Nuestros Directores Jorge Alberto Guzmán y Juan Diego Colegial por sus recomendaciones y total atención

Los ingenieros Angel Anaya y Edward Niño por su apoyo y dedicación en este proyecto

Los compañeros de la CERS por su aprecio y sus voces de ánimo para seguir adelante.

La gente de la Vereda El Tembladal por su gran hospitalidad y generosidad.

La Escuela de Geología

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	1
1. GENERALIDADES	4
1.1 LOCALIZACION	5
1.2 VIAS DE ACCESO	5
1.3 POBLACION	5
1.4 CLIMA.	5
1.4.1 Precipitación	6
1.4.2 Temperatura.	7
1.5 HIDROGRAFIA	8
1.6 SUELOS	9
1.6.1 Descripción de los suelos de la zona de estudio.	10
1.6.2 Parametrización de los suelos de la cuenca	15
1.7 COBERTURA VEGETAL	15
1.7.1 Vegetación de la Microcuenca de la quebrada Río Sucio.	16
1.7.2 Zonas de Vida en la Microcuenca de la quebrada de Río Sucio.	16
1.8 AMBITO GEOLÓGICO	18
1.8.1 ESTUDIOS ANTERIORES	18
2. CARTOGRAFIA GEOLOGICA	23
2.1 REVISION DE CARTOGRAFIA PRE – EXISTENTE	24
2.2 FOTOGEOLOGÍA	26
2.3 CAMPO	30

2.4	PROCESAMIENTO Y ANALISIS DE DATOS	35
3.	GEOLOGIA	36
3.1	LITOLOGÍA	36
3.1.1	Ortoneís (pDO).	36
3.1.2	Cuarzomonzonita de Santa Bárbara (JRcs).	39
3.1.3	Formación Girón (Jg).	39
3.1.4	Formación Tambor (Kita).	41
3.1.5	Formación Rosablanca (Kir).	41
3.1.6	Formación Paja (Kip).	43
3.1.7	Formación Tablazo (Kit).	43
3.1.8	Depósitos Recientes.	44
3.2	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	46
3.2.1	Fallas	48
3.2.2	Pliegues	55
3.2.3	Diaclasas	55
4.	GEOMORFOLOGIA	59
4.1	MORFOLOGÍA EN LA CUENCA EXPERIMENTAL DE RIO SUCIO	59
4.1.1	Formas De Origen Estructural (S)	60
4.1.2	Formas De Origen Denudacional (D)	62
4.1.3	Formas De Origen Karstico (K)	65
4.1.4	Formas De Origen Glacial (G)	66
4.1.5	Formas De Origen Fluvial (F)	67
5.	GEOFÍSICA	68
5.1	SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL.	69
5.1.1	Sondeo Schlumberger	69
5.1.2	Efectos laterales en el SEV y ambigüedades en su interpretación	70
5.2	TOMOGRFÍA ELÉCTRICA	70

5.3 EQUIPO UTILIZADO.	73
5.4 UBICACIÓN DE SONDEOS ELECTRICOS VERTICALES Y TOMOGRAFÍAS	73
5.5 INTERPRETACION DE LOS SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES (SEV'S)	75
5.5.1 Sondeo Eléctrico 1	75
5.5.2 Sondeo Eléctrico 2	75
5.5.3 Sondeo Eléctrico 3	76
5.5.4 Sondeo Eléctrico 4	77
5.5.5 Sondeo Eléctrico 5	78
5.5.6 Sondeo Eléctrico 6	78
5.5.7 Sondeo Eléctrico 7	79
5.5.8 Sondeo Eléctrico 8	80
5.5.9 Sondeo Eléctrico 9	82
5.5.10 Sondeo Eléctrico 10	82
5.5.11 Sondeo Eléctrico 11	83
5.5.12 Sondeo Eléctrico 12	83
5.5.13 Sondeo Eléctrico 13	84
5.5.14 Sondeo Eléctrico 14	84
5.5.15 Sondeo Eléctrico 15	85
5.5.16 Sondeo Eléctrico 16	85
5.5.17 Sondeo Eléctrico 17	86
5.5.18 Sondeo Eléctrico 18	86
5.5.19 Sondeo Eléctrico 19	87
5.6 TOMOGRAFIAS ELECTRICAS	88
5.6.1 Tomografía El Rosedal	88
5.6.2 Tomografía El Alto	89
5.6.3 Tomografía La López	89
5.6.4 Tomografía La Casita.	90
5.6.5 Tomografía La Caiceda.	91

5.6.7 Tomografía La Valenciana.	92
6. ANÁLISIS DE SEDIMENTOS	93
6.1 PROCEDIMIENTO.	96
6.1.1 Recolección de muestras.	96
6.2.2 Preparación de la muestra.	100
6.2.3 Condiciones de Medición de las Muestras.	101
6.2.4 Resultados	102
7. APROXIMACION A UN MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA MICROCUENCA DE RIO SUCIO.	106
7.1 FACTORES ORIENTADOS A LOS PROCESOS DE RECARGA ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE DEL RECURSO HIDRICO	107
7.1.1 Análisis De Factores Hidroclimáticos	107
7.1.2 Análisis De Factores Fisicos.	110
7.1.3 Análisis De Factores Geológicos	116
7.1.4 Análisis De Factores Hidroquímicos	124
7.1.5 Análisis de depósitos.	125
7.2 ZONAS DE RECARGA Y MECANISMOS EXFILTRACION EN LA CERS.	127
7.3 PROCESO DE MODELACION. MODELO CONCEPTUAL	138
7.4 MODELO GEOLOGICO TRIDIMENSIONAL.	140
7.5 ESTIMACION DE LAS UNIDADES HIDROGEOLOGICAS	141
7.6 METODOLOGIA PARA LA CONSTRUCCION DE UNA APROXIMACION AL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL	145
7.6.1 Ejecución	157
CONCLUSIONES	160
RECOMENDACIONES	

BIBLIOGRAFÍA	161
ANEXOS	165

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.	4
Figura 2. Ubicación Espacial y contraste Topográfico de la CERS.	5
Figura 3. Variación multianual de la precipitación meteórica de las C.E.R.S.	6
Figura 4. Variación multianual de la precipitación oculta en la C.E.R.S.	7
Figura 5. Variación multianual de la temperatura con respecto a la altitud	8
Figura 6. Red Hidrográfica de la C.E.R.S.	8
Figura 7. Procesos principales del ciclo hidrológico que se presentan en superficie.	9
Figura 8. Mapa de suelos.	10
Figura 9. Mapa de cobertura vegetal en la C.E.R.S.	16
Figura 10. Modelo Digital de Elevaciones y Red Hídrica de la CERS.	17
Figura 11. Diagrama de Holdridge.	17
Figura 12. Metodología para la Cartografía Geológica de la CERS.	24
Figura 13. Cartografía Geológica.	25
Figura 14. Cartografía Geológica.	26
Figura 15. Mapa de Deltas	30
Figura 16. Mapa geológico de la Cuenca Experimental de la Quebrada Río Sucio.	38
Figura 17. Ubicación de los principales depósitos de la CERS.	45
Figura 18. Mapa Estructural de la Cuenca Experimental de la Quebrada Río Sucio.	47
Figura 19. Diagrama de Rosetas	57
Figura 20. Comportamiento estructural del Ortoneis.	57

Figura 21. Comportamiento estructural de la Formación Tambor.	58
Figura 22. Comportamiento estructural a nivel mesoscópico de la Formación Rosablanca.	58
Figura 23. Principio del SEV.	69
Figura 24. Sondeo Schlumberger. .	69
Figura 25. Diferentes dispositivos usados en Tomografías Geoeléctricas.	71
Figura 26. Discretización 2D del subsuelo.	72
Figura 27. Mapa de Ubicación de los Sondeos Eléctricos Verticales y Tomografías.	74
Figura 28. Curva de campo y unidades geoelectricas del SEV 3.	77
Figura 29. Curva de campo y unidades geoelectricas del SEV 8.	80
Figura 30. Curva de campo y unidades geoelectricas del SEV 8.	81
Figura 31. Tomografía Rosedal	88
Figura 32. Tomografía El Alto.	89
Figura 33. Tomografía La López.	90
Figura 34. Tomografía La Casita.	91
Figura 35. Tomografía La Caiceda.	91
Figura 36. Tomografía La Valenciana.	92
Figura 37. Clasificación de los tipos de transporte de sedimentos.	97
Figura 38. Difractograma M1.	102
Figura 39. Difractograma M8.	103
Figura 40. Difractograma M16.	104
Figura 41. Distribución de la oferta hídrica multianual de la CERS	107
Figura 42. Precipitación meteórica y oculta multianual de la CERS	108
Figura 43. Sondeo Eléctrico Vertical 17.	109
Figura 44. Mapa de pendientes de la CERS mayores al 70%	110
Figura 45. mapa de pendientes de la CERS menores del 30%	111
Figura 46. Desarrollo de la red hidrográfica	112
Figura 47. Sistemas de fallas paralelas pertenecientes a la Microcuenca	120

de Arcos con una dirección preferencial de diaclasamiento	
Figura 48. Buzamiento de las capas de la formación Rosablanca	126
Figura 49. Cartografía de los depósitos y puntos de la campaña de geofísica	129
Figura50. Corte Hidrogeológico 156.	130
Figura 51. Leyenda de la información incorporada en los perfiles hidrogeológicos.	132
Figura 52. Corte hidrogeológico 87.	134
Figura 53. Corte hidrogeológico 55.	135
Figura 54. Corte hidrogeológico 82.	136
Figura 55. Líneas de flujo inducidas por sistemas de fallas y por sistemas de diaclasas.	137
Figura 56 Procesos de una modelación	138
Figura 57. Procesos de Calibración y Simulación	140
Figura 58. Relación información para procesar el mapa hidrogeológico	143
Figura 59. Sinopsis del proceso de elaboración y utilización de un modelo General Hidrogeológico	145
Figura 60. Almacenamiento Capilar y Cobertura superficial del Suelo,	149
Figura 61. Conductividad hidráulica en la capa superior de suelo. Khs.	151
Figura 62. Conductividad hidráulica en la capa inferior de suelo Kp	152
Figura 63. Mapa De Unidades Hidrogeológicas 5 Semillas , Sin Oferta Hídrica	153
Figura 64. Mapa De Unidades Hidrogeológicas, 6 Semillas Sin Oferta Hídrica.	154
Figura 65. Mapa De Unidades Hidrogeológicas, 7 Semillas Sin Oferta Hídrica, Con Suavizado De Pendientes	156

LISTA DE FOTOS

Foto 1. Suelos Tipo 1.	11
Foto 2. Suelo Tipo 2e. Sector de La López al SW de la C.E.R.S	12
Foto 3. Suelos tipo 3. Parte central de la CERS	14
Foto 4. Fotografía aérea 14 del vuelo C – 1713.	29
Foto 5. Afloramiento y detalle de Ortoneis de Berlín en el sitio La Laguna	37
Foto 6. Cuarzomonzonita de Santa Bárbara	39
Foto 7. Afloramiento y Detalle de los niveles de areniscas conglomeráticas violáceas de la formación Girón	40
Foto 8. Afloramiento meteorizado de las areniscas de la formación Tambor,	42
Foto 9. Caliza micritica fosilifera de la formación Rosablanca	43
Foto 10. Intercalaciones de Areniscas de grano fino con shales negros con presencia de concreciones de la formación Paja	44
Foto 11. Afloramiento de Kit. Intercalación de paquetes delgados de areniscas y limonitas	45
Foto 12. Deposito formado por procesos de remoción de vertientes	49
Foto 13. Falla La Cristalina	49
Foto 14. Trazo de la falla Río Sucio	50
Foto 15. Brecha de falla	51
Foto 16. Nacimiento de La Quebrada La López	51
Foto 17. Trazos de las fallas La Cueva y La López 2	52
Foto 18. Falla Capillas	53
Foto 19. Fallas Girón y La Loma	54
Foto 20. Parte media de la CERS	55

Foto 21. Sistema de fallas menores	56
Foto 22. Red de diaclasas	61
Foto 23. Sinclinal El Alto	62
Foto 24. Talud de Derrubios	64
Foto 25. Cono de derrubios sobre el Ortoneis	64
Foto 26. Deslizamientos en el sector de Agua Blanca	65
Foto 27. Procesos de reptación	66
Foto 28. Depósitos morrénicos	73
Foto 29. Equipo Utilizado en campaña de geoelectrica	95
Foto 30. Depósito del Cañón del Río Sucio	96
Foto 31. Recolección de muestras de sedimentos	119

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estaciones -Precipitación Meteórica Información Hidrológica 1986-2000.	6 7
Tabla 2. Estaciones -Precipitación Oculta Información Hidrológica 1986-2000.	11
Tabla 3. Fase por pendiente de los suelos	15
Tabla 4. Relaciones de la textura con algunas propiedades del suelo .	27
Tabla 6. Relación de Estaciones con datos estructurales	31
Tabla 7. Ubicación Sondeos Eléctricos Verticales y Tomografías Eléctricas	74
Tabla 8. Tabla de resultados para SEV 1	75
Tabla 9. Tabla de resultados para SEV 2	76
Tabla 10. Tabla de resultados para SEV 3	77
Tabla11. Tabla de resultados para SEV 4	78
Tabla 12. Tabla de resultados para SEV 5	79
Tabla 13. Tabla de resultados para SEV 6	80
Tabla 14. Tabla de resultados para SEV 7	81
Tabla 15. Tabla de resultados para SEV 8	82
Tabla 16. Tabla de resultados para SEV 9	82
Tabla 17. Tabla de resultados para SEV 10	83
Tabla 18. Tabla de resultados para SEV 11	83
Tabla 19. Tabla de resultados para SEV 12	84
Tabla 20. Tabla de resultados para SEV 13	84
Tabla 21. Tabla de resultados para SEV 14	85

Tabla 22. Tabla de resultados para SEV 15	86
Tabla 23. Tabla de resultados para SEV 16	86
Tabla 24. Tabla de resultados para SEV 17	86
Tabla 25. Tabla de resultados para SEV 18	87
Tabla 26. Tabla de resultados para SEV 19	87
Tabla 27. Relación muestreo de sedimentos	98
Tabla 28. Fases correspondientes a los picos del difractograma M1.	102
Tabla 29. Fases correspondientes a los picos del difractograma M8.	103
Tabla 30. Fases correspondientes a los picos del difractograma M16.	104
Tabla 31. Relaciones de la textura con algunas propiedades del suelo	113
Tabla 32. Estimación de la porosidad	126
Tabla 33. Parametrización del modelo hidrogeológico 1	148
Tabla 34. Parametrización del modelo hidrogeológico 2	150
Tabla 35. Centroides. Mapa de Zonas Hidrogeológicas.	155

TITULO

CARTOGRAFIA GEOLÓGICA Y CARACTERIZACION ESTRUCTURAL DE LA SUBCUENCA DE LA QUEBRADA RIO SUCIO, MUNICIPIO DE TONA, SANTANDER, ORIENTADO A DEFINIR UN MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL.*

Alexandra Milena Ulloa y Nadia Rocío Rojas**

PALABRAS CLAVES: CERS, Complejidad Estructural, Geofísica, Geomorfología Depósitos, Modelo Hidrogeológico Conceptual, Unidades Hidrogeológicas.

RESUMEN

En este proyecto se exponen los resultados de los estudios geológicos, estructurales, geofísicos e hidrogeológicos desarrollados en la Cuenca Experimental de Río Sucio (CERS), Municipio de Tona, Santander, en un área de 20Km²; en la que se presentan rocas de tipo metamórfico (Ortoneis de Berlín), ígneo (Cuarzomonzonita de Santa Bárbara) y sedimentario (Formaciones Girón, Tambor, Rosablanca, Paja y Tablazo), distribuidas en bloques estructurales y cubiertas parcialmente por depósitos cuaternarios glaciares, aluviales y de vertiente. La complejidad estructural está definida por dos direcciones preferenciales del fracturamiento, una dirección principal en sentido NW-SE controlando los afluentes de la quebrada Río Sucio y otra NE-SW relacionada con fallas locales.

Las geoformas presentes en la CERS son las encargadas del modelado del paisaje, desarrolladas por procesos denudacionales, estructurales, fluviales, kársticos y glaciares, siendo las generadoras de las zonas de depósitos caracterizadas por altas porosidades y composición variable, constituyéndose como zonas de almacenamiento de agua. La geofísica aplicada permitió determinar espesor de estos depósitos, características hidráulicas (porosidad y permeabilidad) y corroborar el comportamiento de las estructuras en subsuperficie. A partir de análisis de difracción de rayos X de los sedimentos que contaminan la Quebrada Río Sucio y que se encuentran influenciados por la acción directa de los depósitos (torrencial y de vertiente) presentes a lo largo del cauce de la quebrada se plantea una relación composición del depósito – roca parental.

Hacia la aproximación de un modelo hidrogeológico conceptual se utilizó información de campo y datos obtenidos por observación directa de los procesos hidrológicos que acontecen en la CERS, siendo los factores hidroclimáticos, físicos, geológicos e hidroquímicos los que se orientan hacia la dinámica (recarga, almacenamiento y transporte) del recurso hídrico. Teniendo en cuenta la influencia de estos parámetros en superficie, subsuperficie y su relación con pendientes, suelos y vegetación se pueden definir siete unidades hidrogeológicas.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico Químicas, Escuela de Geología
Directores: Jorge Alberto Guzmán y Juan Diego Colegial

TITLE

GEOLOGICAL CARTOGRAPHY AND STRUCTURAL CHARACTERIZATION OF THE SUBCATCHMENT OF QUEBRADA RIO SUCIO, MUNICIPALITY OF TONA, SANTANDER, APPROACH TO DEFINE A CONCEPTUAL HYDROGEOLOGICAL MODEL.*

Alexandra Milena Ulloa y Nadia Rocío Rojas**

KEY WORDS: CERS, Structural Complexity, Geomorphology, Geophysics, Deposits, Conceptual Hydrogeological Model, Hydrogeological Units.

ABSTRACT

In this project the results of the geologic, structural, geophysical studies and hydrogeological are exposed, developed in the Cuenca Experimental de Río Sucio (CERS), Municipality of Tona, Santander, in an area of 20Km²; in the one that rocks of metamorphic type are presented (Ortoneis of Berlin), igneous (Cuarzomonzonita of Santa Bárbara) and sedimentary (Formations Girón, Tambor, Rosablanca, Paja and Tablazo), distributed partially in structural blocks and covered by deposits quaternary glaciers, alluvial and of slope. The structural complexity is defined by two preferential strikes of faulting, a main strike in sense NW-SE controlling the tributaries of the Río Sucio and other NE-SW related with local faults.

The geoforms present in the CERS is those in charge of the modeling of the landscape, developed by processes of origin denudational, structural, fluvial, karst and glaciers, being the generating of the areas of deposits characterized by high porosities and variable composition, constituting you as areas of storage of water. The applied geophysics allowed to determine thickness of these deposits, hydraulic characteristics (porosity and permeability) and to corroborate the behavior of the structures in subsurface. Starting from analysis of diffraction of rays X of the silts that contaminate the Río Sucio and that they are influenced by the direct action of the deposits (torrential and of slope) you present along the bed of the gulch and to establish a relationship between composition of the deposit - rock type.

Toward the approach of a conceptual hydrogeological model field information and data obtained by direct observation of the hydrological processes that happen in the CERS, being the factors was used, hydroclimatic, physical, geologic and hydrochemical those that are guided toward the dynamics (recharges, storage and transport) of the water. Keeping in mind the influence of these parameters in surface, subsurface and their relationship with slopes, floors and vegetation can be defined seven hydrogeological units.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico Químicas, Escuela de Geología
Directores: Jorge Alberto Guzmán y Juan Diego Colegial

INTRODUCCION

A partir de la necesidad de optimizar los procesos de exploración y explotación del agua resulta fundamental identificar la existencia de los diversos sistemas hidrogeológicos por complejos que ellos sean y poder plantear con certeza programas de exploración y explotación del recurso hídrico. Lo anterior implica lograr un profundo conocimiento sobre los procesos hidrológicos que ocurren en nuestras zonas de alta montaña, procesos que no han sido plenamente identificados y estudiados, para lograr este objetivo es necesario instrumentar nuestras cuencas, paralelamente iniciar investigación de los fenómenos hídricos, geológicos, geotécnicos y antropicos que ocurren en las mismas.

El presente estudio se ha realizado con el fin de servir como base en la aproximación a un modelo hidrogeológico conceptual que se lleva a cabo por el Grupo de Predicción y Modelamiento Hidroclimático, el cual tiene como misión la investigación, el estudio y la apropiación de conocimiento del recurso hídrico superficial y subterráneo así como los procesos hidrogeológicos que ocurren y determinan su movimiento en nuestras cuencas de alta montaña. Por tal razón la microcuenca de la quebrada Río Sucio fue escogida como cuenca experimental de alta montaña para el desarrollo de dicho modelo.

El desarrollo de este trabajo sigue con la línea de investigación en hidrogeología de manera interdisciplinaria en donde es importante incorporar los parámetros geológicos, por lo cual se implementaron metodologías que permitieran detallar rasgos importantes de

la geología de la Microcuenca de Río Sucio, ya que son las formaciones geológicas el medio de almacenamiento y transporte del agua subterránea; las metodologías se encuentran encaminadas a un estudio a detalle de las litologías y estructuras en superficie y en el subsuelo y su relación con los recursos hídricos de la cuenca, para lo cual se realizó la cartografía geológica detallada a escala 1:10000, campañas de geofísica que pretendían definir características hidráulicas principalmente de los depósitos, para este propósito se llevaron a cabo 19 sondeos eléctricos verticales y 6 Tomografías eléctricas, caracterización de las estructuras presentes en la zona y análisis de la procedencia de los sedimentos que contaminan la quebrada Río Sucio.

A partir del análisis e interpretación de la información adquirida durante el trabajo de campo y adicionando datos de estaciones hidroclimáticas, información de hidroquímica, porosidades obtenidas a partir de resistividad aparente y factor de formación se elaborará una aproximación a un modelo hidrogeológico conceptual de la CERS y mediante la realización de perfiles geológicos y las tomografías eléctricas el modelo tridimensional de geología de la cuenca.

Para una mejor claridad del presente documento a continuación describimos su estructura y la idea de los aspectos fundamentales que lo componen. En el capítulo uno se centra sobre la CERS, sus generalidades y la superficie. El Capítulo dos describe la metodología llevada a cabo para la realización de la cartografía geológica. En el capítulo tres se hace la descripción de las diferentes formaciones litológicas y el comportamiento estructural de la CERS. El capítulo cuatro presenta las geoformas identificadas. El capítulo cinco muestra las técnicas geofísicas utilizadas para efectuar el diagnóstico de las estructuras y litología en subsuelo determinar desarrollo de dos modelos hidrológicos, en el capítulo seis se presentan los análisis de los fenómenos de sedimentación al cauce principal y en el capítulo 7 se realiza la aproximación a un modelo hidrogeológico conceptual para la Cuenca Experimental de Río Sucio.

OBJETIVO GENERAL

Realizar la cartografía geológica en detalles y caracterización estructural del área de la subcuenca de la quebrada Río Sucio en el municipio de Tona, Santander, con el fin de definir los parámetros estructurales, litológicos, geomorfológicos que caracterizan el

comportamiento de la subcuenca, definiéndose este trabajo como herramienta en la futura elaboración del modelo hidrogeológico de una cuenca de alta montaña.

Objetivos Específicos

- Realizar la cartografía geológica a una escala 1: 10.000 mediante reconocimiento de campo del área de estudio. cuya extensión es 16 Km²
- Realizar una cartografía geológica específica a una escala 1:5.000 según zonas que presente un especial interés ya sea desde el punto de vista estructural o hidrogeológico.
- Realizar cortes geoelectricos a partir de tomografías y sondeos eléctricos verticales (según las necesidades del área), con el fin de definir continuidad de estructuras geológicas o hidrogeológicas en subsuelo.
- Elaborar un mapa de terrenos estructurales a partir de la distribución de fracturas, para determinar posibles zonas de almacenamiento de agua.
- Determinar y evaluar las diferentes zonas de recarga de la subcuenca, de acuerdo con características geomorfológicas, litológicas, hidrológicas y estructurales.
- Realizar un mapa hidrogeológico a partir de la relación unidades roca / depósitos sedimentarios, mediante fotointerpretación y reconocimiento de campo.
- Obtener un modelo estructural tridimensional de la cuenca a partir del desarrollo de perfiles geológicos.

1. GENERALIDADES

1.1 LOCALIZACION

El área de estudio comprende la Cuenca Experimental de la quebrada Río Sucio (C.E.R.S.) ubicada en las cabeceras del río Tona, la cual hace parte de la vereda El Tembladal hacia el norte de la parte urbana del municipio de Tona (Figura 1 y 2). Esta limitada al norte por la quebrada Los Arcos, al sur por la quebrada La Lúcura, al este por el borde del altiplano de Berlín y al Oeste por la Loma El Guayabal. Cubre una extensión de 20 Km² y hace parte de las planchas 110 – III – C – 1,2; escala 1 : 10000 de 1981 y cuyas coordenadas son : X = 1280000 – 1290000, Y = 1124000 – 1129000, con origen en Santa Fe de Bogotá.

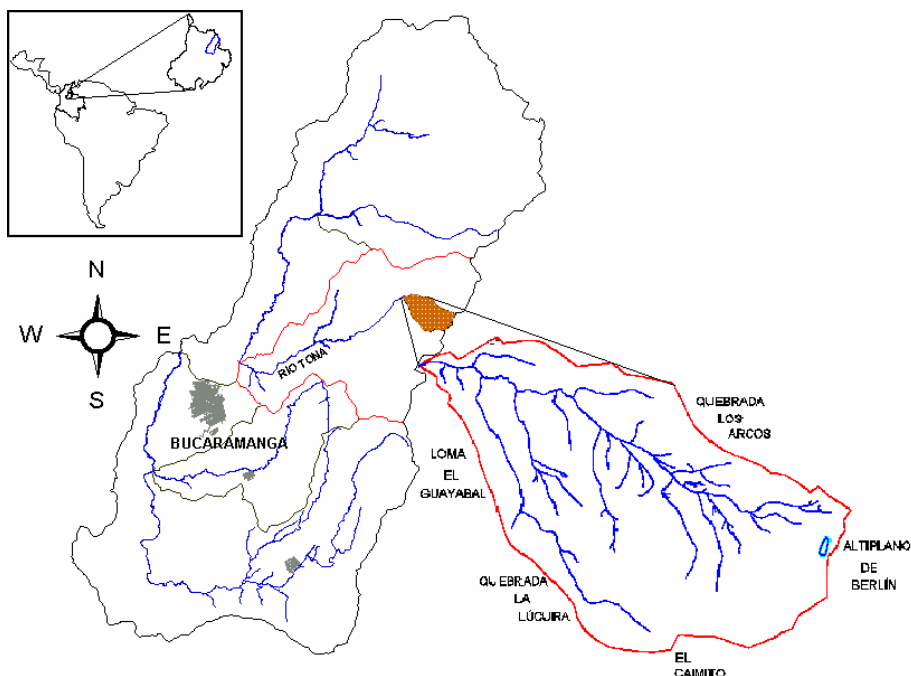


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.

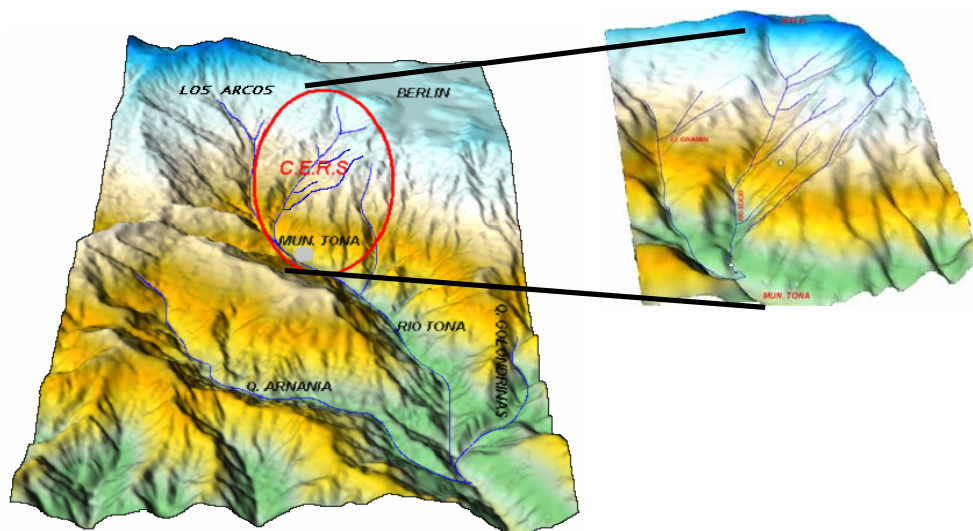


Figura 2. Ubicación Espacial y contraste Topográfico de la CERS.

1.2 VIAS DE ACCESO

Para llegar a la zona de estudio se puede utilizar dos vías, sea tomando el desvío de la carretera Bucaramanga – Cúcuta en el Km. 18 que conduce al municipio de Tona, al llegar a éste se toma la carretera que conduce al corregimiento de Berlín, recorriendo unos 2 Km. hasta El Tembladal. Otra forma de llegar, es utilizando la misma carretera que atraviesa toda el área de estudio pero saliendo desde Berlín en el Km. 99. Alternativo a estas dos vías, se encuentran caminos de herradura que acortan el tiempo de acceso a la zona, además, comunican las diferentes fincas de la zona.

1.3 POBLACION

La población rural de la vereda El Tembladal, que hace parte del municipio de Tona está constituida por 200 habitantes aproximadamente y su actividad económica se basa principalmente en la ganadería con propósitos lecheros y agricultura de subsistencia. Entre los cultivos más importantes se destacan los de papa, maíz, arveja, además, los habitantes de la zona han constituido la cooperativa de productos lácteos Coalagra que es la encargada de comprar un porcentaje de la leche producida en la zona.

1.4 CLIMA.

La Cuenca Experimental de Río Sucio (C.E.R.S) alcanza altitudes entre los 1850 a 3550 m.s.n.m. originándose climas variados tales como templado, frío y subparamo bajo

(Gómez y Santana,1995), observándose un nivel alto de humedad, principalmente en las zonas de mayor altitud.

1.4.1 Precipitación. La precipitación es un factor que influye en los procesos de meteorización y por lo tanto en los fenómenos de remoción en masa, por otra parte también determina la densidad de la vegetación.

En la C.E.R.S se presentan dos formas de precipitación: meteórica y oculta; los meses de Marzo, Abril, Mayo, Septiembre, Octubre y Noviembre muestran la mayor precipitación meteórica formando parte de los periodos de invierno, en los cuales se acentúan los procesos de sedimentación y contaminación natural a la quebrada Río Sucio; los meses de menor precipitación meteórica: Diciembre, Enero, Febrero, Junio, Julio y Agosto corresponden al verano. La figura 3 muestra la variación multianual de la precipitación meteórica de la C.E.R.S, durante el periodo de 1986-2000, la información fue tomada de las estaciones Berlín, Tona, El Picacho y La Galvicia (Tabla1).

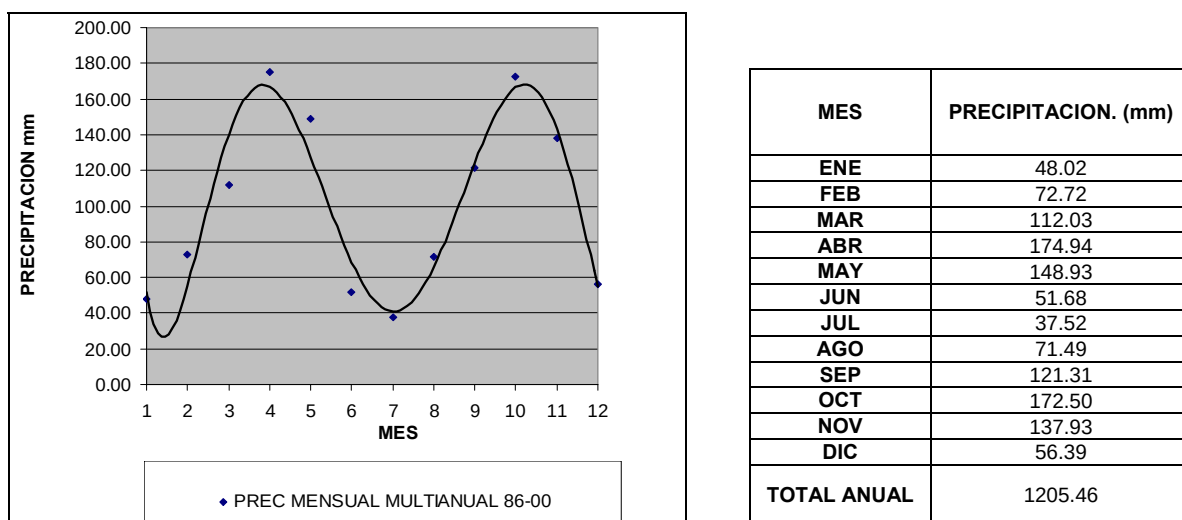


Figura 3. Variación multianual de la precipitación meteórica de las C.E.R.S. Tomada GPH (2005).

ESTACION	INSTITUCION	TIPO	ESTE	NORTE	ELEVACION	PREC. MULTIANUAL
Berlin	IDEAM	CO	1133000	1286700	3214	700.2713
Tona	IDEAM	PM	1122700	1287800	1910	1456.374
El Picacho	IDEAM	PM	1122500	1278000	3310	1636.344
La Galvicia	IDEAM	PM	1112600	1279150	1779	1976.38

Tabla 1. Estaciones -Precipitación Meteórica Información Hidrológica 1986-2000. Tomada GPH 2005

La precipitación oculta presenta un carácter mas sectorial, y consiste en el ascenso primero de los frentes húmedos, para luego “chocar”, en las partes altas de la cuenca,

estas masas alcanzan allí el punto de rocío, y se produce la condensación, las zonas de choque de los frentes húmedos se caracterizan en la C.E.R.S por tener una vegetación muy boscosa, y los meses de mayor influencia son Abril, Mayo y Junio (Figura 4). Las estaciones utilizadas fueron Berlín, Vivero Surata y Charta (Tabla 2).

PRECIPITACION OCULTA EN LA C.E.R.S

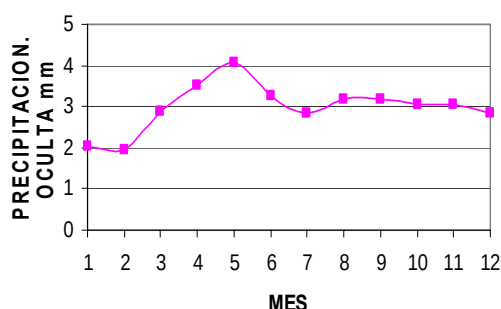


Figura 4. Variación multianual de la precipitación oculta en la C.E.R.S. Tomada GPH (2005).

MES	PRECIPITACION OCULTA (mm)
ENE	2.05
FEB	1.93
MAR	2.89
ABR	3.53
MAY	4.05
JUN	3.28
JUL	2.82
AGO	3.16
SEP	3.18
OCT	3.06
NOV	3.04
DIC	2.82
TOTAL	35.82

ESTACIÓN	INSTITUCIÓN	TIPO	ESTE	NORTE	ELEVACIÓN
Belin	IDEAM	CO	1133000	1286700	3214
Vivero Surata	IDEAM	CO	1120400	1306100	1725
Charta	CDMB	CO	1122280	1297072	1950

Tabla 2. Estaciones -Precipitación Oculta Información Hidrológica 1986-2000. Tomada GPH 2005

1.4.2 Temperatura. Es una de las variables importantes al igual que la precipitación, influyentes en los procesos de meteorización y desintegración de las rocas (principalmente gelifracción), debido a los cambios fuertes de temperaturas diurnas y nocturnas. En la figura 5 se observa la variación de la temperatura con respecto a la altitud.

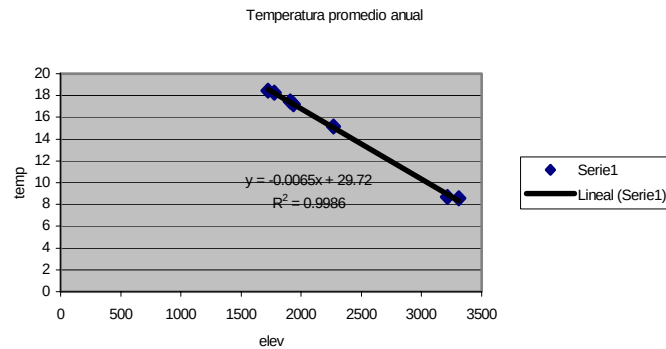


Figura 5. Variación multianual de la temperatura con respecto a la altitud en la C.E.R.S. Tomada GPH (2005).

1.5 HIDROGRAFIA

La principal corriente de agua del área de estudio corresponde a la quebrada Río Sucio, la cual nace en el Alto el Vivito donde recibe el nombre de Chorro el Vivito a una altitud de 3400 m.s.n.m. En su curso medio recibe el nombre de quebrada Río Sucio, corre en dirección SE – NW cambiando su rumbo hacia la desembocadura en la quebrada Arcos, formando el Río Tona. El curso de esta quebrada es controlado por la falla del Río Sucio y durante su recorrido recibe aportes de varias quebradas también de muy alta pendiente como son Relumbrante, Casa Balcón, Figueros en la zona alta, además las quebradas El Chorrerón, La Colmena, La López, en la parte media, se puede observar en la figura 6, la ubicación de estas corrientes.

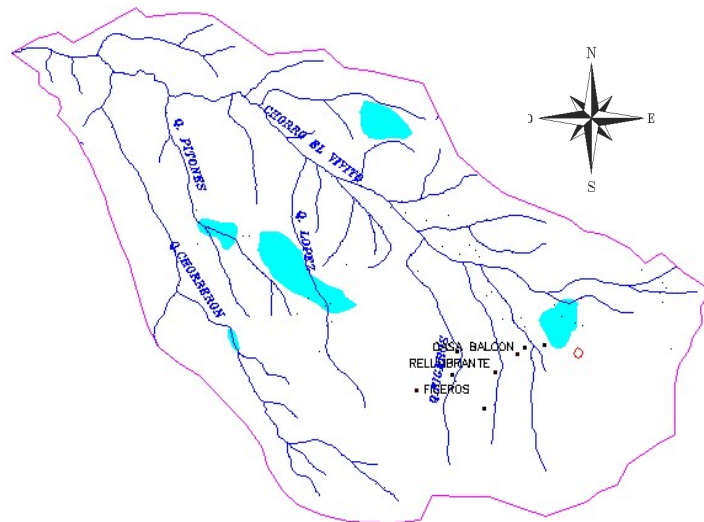


Figura 6. Red Hidrográfica de la C.E.R.S. Tomada Mendoza y Orozco (2005).

1.6 SUELOS

El sistema suelo-atmósfera es el espacio vital donde se lleva a cabo gran parte de los procesos del ciclo hidrológico. Si enfatizamos en el suelo, es allí donde se condiciona principalmente los fenómenos de infiltración, escorrentía superficial, almacenamiento de humedad, flujo sub Superficial entre otros, además es allí donde tienen soporte el componente biótico que afecta el ciclo hidrológico. Figura 6



Figura 7. Procesos principales del ciclo hidrogeológico que se presentan en superficie.

Una vez el agua precipita y entra al suelo, ésta circula por los poros ocupándolos en forma parcial o total dependiendo de la estructura, textura y demás parámetros propios de los suelos. Parte del agua infiltrada percolará una vez se alcancen ciertas condiciones (Capacidad de campo), cierta cantidad del agua precipitada empezará a escurrir superficialmente una vez el contenido de humedad en el suelo llegue a su nivel máximo. Además de la cantidad de humedad que el suelo pueda retener se condiciona el tipo de vegetación y el tipo de cultivos que eventualmente podrían aparecer en superficie (Punto de marchites).

Lo anterior desde el punto de vista hidrológico; desde el punto de vista geotécnico, la alteración de los parámetros físicos de los suelos (Contenido de humedad, textura, estructura) influye directamente en los procesos de degradación de los mismos (procesos de erosión) ya que factores como la consistencia, la plasticidad, la penetrabilidad, permeabilidad, la misma fertilidad y el grado de desarrollo de los horizontes se ven afectados.

1.6.1 Descripción de los suelos de la zona de estudio. La descripción de los suelos se hace de acuerdo a la observación de campo así como la base cartográfica generada en el POAT del municipio de Tona – Santander.

El material parental, la acción climática, y la morfología del terreno son los principales factores que condicionan los suelos en la CERS, (textura, fertilidad, profundidad de desarrollo, pedregosidad, contenido de humedad).

De esta forma los suelos de la microcuenca se pueden clasificar en 13 rangos diferentes basada en la roca madre y la textura de cada tipo de suelo, Gradex, 2001: 1ab, 1cd, 1e, 1g, 2cd, 2e, 2g, 3ab, 3cd, 3e, 3g, 5e.5g. como se muestra en la figura 7.

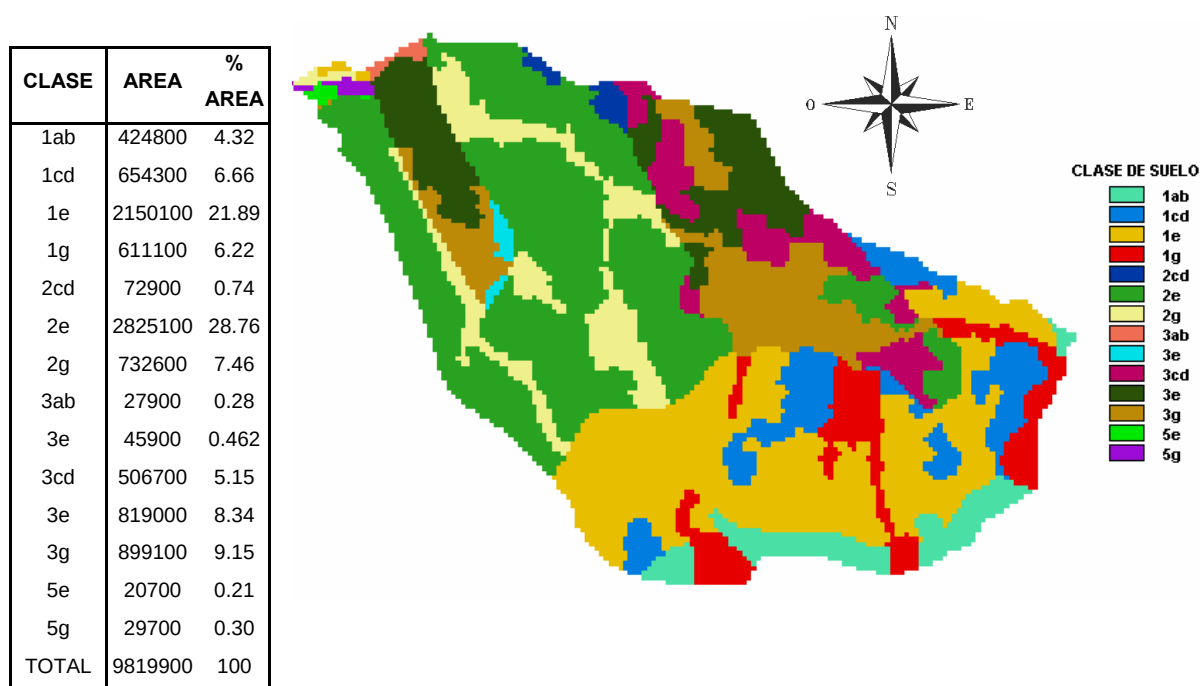


Figura 8. Mapa de suelos. Tomada Gradex 2001

En la anterior clasificación, el número indica la caracterización cartográfica y en general esta en función de las siguientes características:

Suelos tipo 1: Propios de bajas temperaturas, altas pendientes, baja profundidad y baja fertilidad natural.

Suelos tipo 2: Suelos susceptibles a la erosión, bajas profundidades, altas pendientes y baja fertilidad natural.

Suelos tipo 3: Suelos susceptibles a la erosión, alta profundidad de desarrollo, altas pendientes.

Suelos tipo 5: Caracterizados por suelos con alta pedregosidad tanto en superficie como en el perfil.

La letra o letras minúsculas que acompañan el primer número, indican la fase por pendiente, así: ver tabla 3:

FASE	PENDIENTE %
A	1-3
B	3-7
C	7-12
D	12-25
E	25-50
F	50-100
G	>100

Tabla 3. Fase por pendiente de los suelos.

Los suelos tipo 1 se encuentran sobre los 2750 m.s.n.m hasta los 3400 m.s.n.m, común en este tipo, las fases 1ab, 1cd, 1e y 1g. Los suelos 1ab corresponden a suelos poco profundo en la parte alta de la cuenca, en la fase de campo se reconocieron por ser suelos con pendientes muy suaves del 1 – 7 % y profundidades de desarrollo bajas. Estos suelos son propios de la cabecera de la quebrada el Chorrerón, la zona aledaña a la laguna y el sector sur en la zona alta entre la vereda El Cadillal y la divisoria con la cuenca dela quebrada la Lúcura. (Ver foto 1)

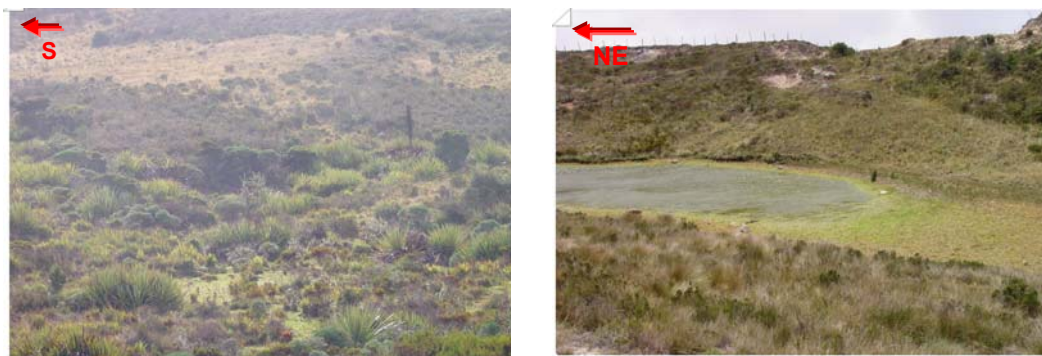


Foto 1. Suelos Tipo 1. Cabecera de la quebrada El Chorrerón y zona aledaña a la Laguna

Los suelos 1cd con pendientes entre el 7 y el 25% se ubican en zonas adyacentes a la zona de depósitos del Rosedal, el carbón, agua blanca. Estos suelos corresponden a zonas escalonadas suaves en la parte alta, dichas zonas se aprecian fácilmente a lo largo del camino el lago – Agua Blanca. Estos suelos son menos profundos que los anteriores. Los suelos 1e con pendientes entre el 25-50% son corresponden a la interfase entre la zona alta, alrededor de los 3000 m.s.n.m. Y la zona alta de depósitos Agua blanca y rosedal.

Los suelos 1g con pendientes superiores al 100% corresponden a las vertientes de los las cabeceras de las quebradas El Vivito, Relumbrante y el Chorrerón.

Los suelos tipo 2 se encuentran desde los 2900 metros hasta el cierre de la cuenca aproximadamente sobre los 2000 m.s.n.m. a esta clase corresponden las fases 2cd, 2e y 2g. Los suelos 2cd con pendientes entre el 7-25% se localizan aproximadamente sobre los 2500 m.s.n.m en el sector norte de la cuenca (sector de Bélgica).

Los suelos tipo 2e que cuya área es aproximadamente el 28% del área de la cuenca se encuentran principalmente adyacentes a las vertientes de los cauces principales de las quebradas el Chorrerón, López y el sector bajo de la quebrada Río sucio (Foto 2). Son suelos poco profundos, como es el caso del sector sur occidental del Ortoneis, La Cueva, López, la parte baja de la Casita, El progreso.



Foto 2. Suelo Tipo 2e. Sector de La López al SW de la C.E.R.S.

Los suelos tipo 2g (pendientes superiores al 100%) corresponden a las vertientes de las quebradas Chorrerón, López y Río sucio bajo. En algunos el fondo de estas quebradas tiende a ser rocoso y estable ya que se soportan sobre formaciones muy competentes

En general los suelos tipo 2 son suelos menos superficiales que los suelos de tipo 1, donde el desarrollo esta en función entre otros factores de morfología del terreno. Son suelos más susceptibles a la erosión. entre los principales accidentes se pueden mencionar: depósitos torrenciales, coladas de barro (Parte Alta y media de la quebrada López, parte alta y media de la quebrada La Colmena, La Casita, zona baja del Carbón principalmente), derrubios gravitacionales (sector de las peñas, parte media de la quebrada el Chorrerón, laderas del cauce principal de Río Sucio, proximidades de el cerro de las cruces, etc), terrazas que originan valles colgados (sector sur oriental de la cuenca, Sector La Cueva).

En general la textura de estos suelos es franco arenosa, para suelos propios de las areniscas de las Formaciones Tambor, Tablazo y algunos niveles conglomerados de la formación Girón (parche de formación Girón en la zona alta de la cuenca), franco arcillosa para suelos propios del Ortoneis, formación paja y niveles arcillosos de las formaciones Tablazo, Tambor y Girón, y una mezcla entre arenoso y arcilloso dependiendo de la cantidad de feldespatos potásicos de la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara que aflora en la zona. Equivalen aproximadamente al 37% del área de la cuenca.

Los suelos tipo 3 se encuentran entre los 2800 m.s.n.m y el cierre de la cuenca sobre los 2000 m.s.n.m. Comprende las fases 3ab, 3cd, 3e, y 3g. A este tipo corresponden principalmente la mayoría de depósitos, zonas de encharcamiento y zonas preferenciales de almacenamiento en la Microcuenca (foto 3). La clase 3cd por ejemplo corresponde a los depósitos desde Agua Blanca - Casa Balcón - Relumbrante hasta los depósitos del Rosedal y parte del Carbón, y los depósitos de La Casita principalmente.



Foto 3. Suelos tipo 3. Parte central de la CERS

La clase 3e corresponde a depósitos tipo colada de barro, ubicados en El Alto sobre los 2450 m.s.n.m, en la parte alta de la Casita y en la cabecera de la quebrada La colmena al occidente de la casa López.

La clase 3g corresponde a flujos generalmente tipo colada de barro en zonas de pendientes muy fuertes principalmente entre los sectores El Carbón, La Casita y López – La Colmena.

En general los suelos tipo 3 son suelos con una mayor profundidad efectiva que los suelos de tipo 1 y 2, generalmente en condiciones de pendientes suaves. Son suelos susceptibles a la erosión.

Como se ha mencionado anteriormente la textura de estos suelos es función directa del material parental, para el caso del Ortoneis y niveles conglomeráticos (arenas) de algunas formaciones sedimentarias como Tambor, Girón, Tablazo, la textura del suelo tendrá propiedades mas arcillosas y arenosas respectivamente.

Los suelos tipo 5, se localizan en la zona baja de la cuenca, prácticamente a la salida de la cuenca sobre los 2000 m.s.n.m. las fases de este tipo presentes en la zona son 5e y 5g, ambas por debajo de los 2100 m.s.n.m. Estos suelos se caracterizan por su pedregosidad tanto superficialmente como en profundidad.

1.6.2 Parametrización de los suelos de la cuenca. Si bien se ha descrito los suelos de la zona (texturas, profundidades, etc) según la cartografía existente y las apreciaciones de las salidas de campo, es necesario determinar cualitativamente los rangos de los parámetros físicos e hidráulicos que determinan el movimiento, almacenamiento y ocurrencia del recurso hídrico, tales como la permeabilidad, capacidad de almacenamiento entre otros.

La tabla 4 relaciona la textura con algunas propiedades de los suelos. (referenciada en Ramírez, 1999)

TEXTURA	PERMEABILIDAD cm/h	LIMITE LIQUIDO	INDICE DE PLASTICIDAD	CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO cm/cm
Arcillo – areno limoso	0.15 – 0.5	40 - 45	10 -20	0.14 – 0.16
Franco arcillo limoso	0.5 – 1.0	40 - 50	10 - 20	0.18 – 0.2
Franco Arcilloso	0.5 – 1.6	30 – 40	15 - 20	0.18 – 0.20
Franco	1.6 – 5.0	25 - 35	5 – 10	0.14 – 0.18
Franco limoso	1.6 – 5.0	30 – 40	5 – 10	0.15 – 0.2
Arcillo Arenoso	0.15 – 0.5	25 - 40	5 - 20	0.12 - 0.16
Franco Arcillo arenoso	0.5 – 1.6	25 - 35	5 - 15	0.10 – 0.16
Franco arenoso muy fino	1.6 – 5.0	25 – 30	5 - 10	0.16 – 0.18
Franco arenoso	5 – 16	-	-	0.11 – 0.13
Areno francoso	16 – 50	-	-	0.08 – 0.10
Arena	50 -	-	-	0.06 – 0.08

Tabla 4. Relaciones de la textura con algunas propiedades del suelo .Tomado de Ramírez (1999).

1.7 COBERTURA VEGETAL

Si bien el suelo condiciona parte de los procesos hídricos, como la infiltración, el escurrimiento y el almacenamiento de la humedad en subsuperficie, también es el soporte de la componente biótica de estos procesos, que a su vez también interactúa en forma significativa en los proceso hidrológicos y en los procesos de estabilización del mismo suelo.

De esta forma la cobertura vegetal influye tanto en los procesos de interceptación, almacenamiento, transporte y succión de la humedad como en la dinámica de estabilización y prevención de la erosión en el suelo debido a la estructura de su sistema radicular.

1.7.1 Vegetación de la Microcuenca de la quebrada Río Sucio. La vegetación de la zona esta condicionada, por la temperatura, la cantidad de humedad en el suelo, el desarrollo edáfico del suelo y factores climatológicos como el viento, la precipitación, entre otros.

El análisis de la cobertura vegetal, se basó tanto en la cartografía elaborada por Gradex (2001) modificada (actualizada) con observaciones de la campaña de Campo. Como resultado, se presenta el mapa de cobertura vegetal. Figura 7.

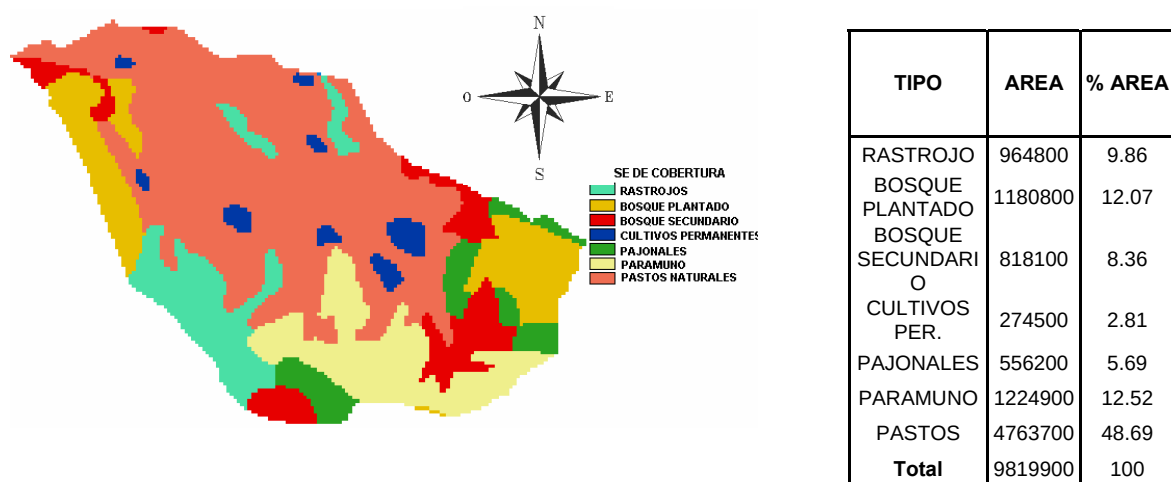


Figura 9. Mapa de cobertura vegetal en la C.E.R.S. Tomada GPH (2005).

Los principales tipos de vegetación tal como se observan en la anterior figura son: Rastrojo, bosque plantado, bosque secundario, cultivos permanentes, pajonales, matorrales paramunos y pastos.

1.7.2 Zonas de Vida en la Microcuenca de la quebrada de Río Sucio. El desarrollo de las zonas de vida en la CERS esta fuertemente condicionado por el clima, la fisiografía y la vegetación. De acuerdo a la figura 8 en la CERS se encuentran los siguientes pisos térmicos

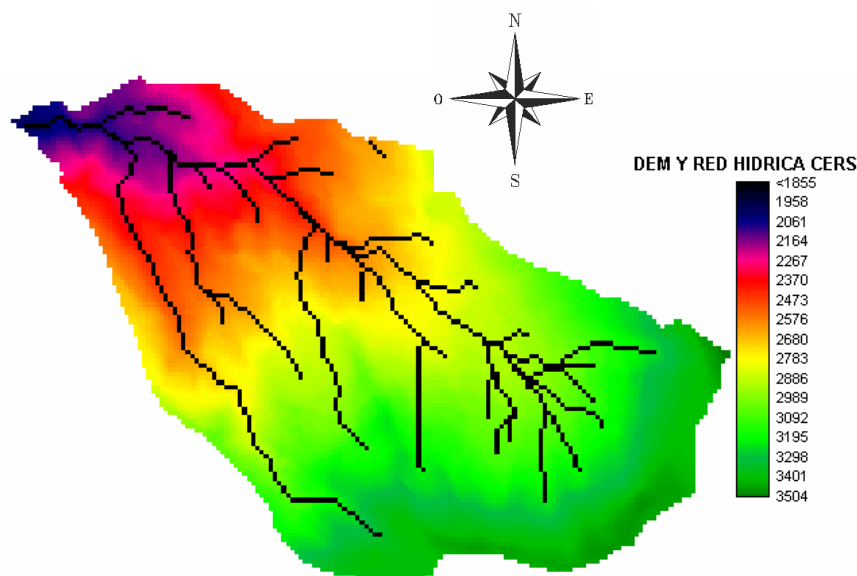


Figura 10. Modelo Digital de Elevaciones y Red Hídrica de la CERS. Explica la ubicación de los pisos térmicos.

- **Piso montano bajo:** Corresponde a las zonas de la parte media baja de la microcuenca. Con temperaturas medias entre 12 y 18°C
- **Piso montano:** Es el piso preferencial que se encuentra en la cuenca, las temperaturas se encuentran entre los 6 y los 12 grados corresponde a las zonas medias y altas.
- **Piso subalpino:** Se localiza al oriente y en la parte alta de la microcuenca en inmediaciones de la mesa de Berlín.

Las anteriores zonas climáticas homogéneas se ven representadas en el diagrama de zonas de vida de Holdridge, Figura 9.

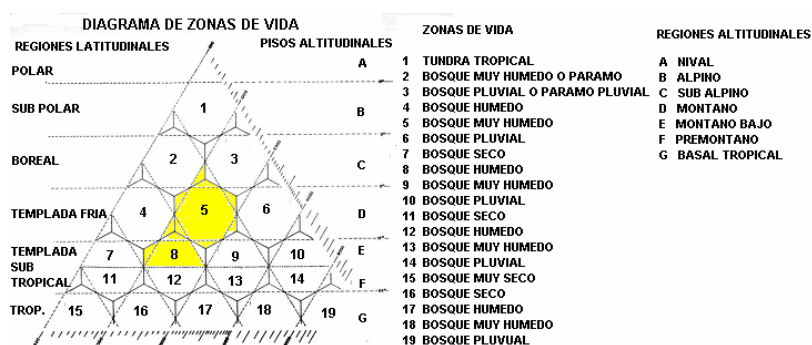


Figura 11. Diagrama de Holdridge. Clasificación de formaciones vegetales del mundo o zonas de vida. Tomado de Ramírez (1999).

De acuerdo al diagrama de Holdridge, al estudio de las variables hidroclimáticas, los suelos y la cobertura vegetal, las principales zonas de vida presentes en la microcuenca son:

Bosque muy Húmedo Montano (bmh-M): temperaturas entre 6 y 12°C, pluviosidad anual promedio entre 1000 y 2000 mm. Elevaciones entre 3650 y 2720 m.s.n.m aproximadamente y evapotranspiración real entre 820 mm / año y 990 mm / año.

Bosque Húmedo Montano Bajo (bh-MB): temperaturas entre 12 y 17°C, pluviosidad anual promedio entre 1000 y 2000 mm. Elevaciones entre 1950 y 2720 m.s.n.m aproximadamente y evapotranspiración real entre 1150 mm / año y 990 mm / año.

1.8 AMBITO GEOLÓGICO

Geológicamente se ubica en la parte oriental del macizo de Santander. Litológicamente aflora rocas sedimentarias de las formaciones Girón, Tambor, Rosablanca, Paja y Tablazo, depósitos cuaternarios de tipo glacial, torrenciales y de deslizamiento, rocas metamórficas (Ortoneis) y rocas ígneas (Cuarzomonzonita de Santa Bárbara). Las edades de estas rocas oscilan entre el Paleozoico inferior y el Cretácico medio. Los rasgos estructurales más sobresalientes son las fallas La Cristalina y Río Sucio, y los sinclinales El Alto y El Gramal.

1.8.1 ESTUDIOS ANTERIORES

Los modelos de aguas subterráneas son en general de muy reciente concepción por lo cual, los primeros modelos de simulación aparecieron en el primer cuarto del siglo XX y eran principalmente de arena y verticales de fluido viscoso y su finalidad se reducía a estudios de laboratorio. En el segundo cuarto del siglo pasado se continuó con la misma tónica y solo a partir de 1950 y especialmente a partir de 1960, es cuando empieza un vertiginoso desarrollo, basado principalmente en las mallas de capacidades y resistencias con utilización de los modernos componentes y aparatos electrónicos y en el uso de ordenadores cada vez mas potentes y técnicas de calculo de gran eficacia. En realidad avanzan más rápidamente las técnicas de modelación que las técnicas hidrológicas para obtener datos y concepciones sobre los sistemas acuíferos.

El desarrollo, en lo que respecta a modelos que tratan de la cantidad del agua en el medio saturado es ya considerable, y se están iniciando aquellos otros que incluyen el flujo en el medio no saturado, aunque para estos últimos subsisten dificultades en cuanto a conocimientos básicos y datos experimentales.

A partir de la necesidad de desarrollar nuevas técnicas de exploración y explotación del recurso hídrico se han realizado estudios para definir diferentes tipos de modelos hidrogeológicos, entre ellos, modelos conceptuales que tienen como base fundamental la geología y los aspectos hidrológicos. Algunos de los trabajos más representativos en este campo realizados en Colombia se comentan a continuación:

Durante 1999 se hizo una propuesta de un modelo hidrogeológico conceptual a partir de la caracterización física de la subcuenca del Río Pamplonita con énfasis en las áreas de Cúcuta y Villa del Rosario por Argemiro Ramírez, donde se evaluó dentro de un modelo conceptual los elementos físicos que influyen en la cobertura vegetal, permeabilidad de los suelos, de los sistemas hidrológicos superficiales y de las unidades hidrogeológicas que conforman el comportamiento dinámico del régimen hídrico en la subcuenca del Río Pamplonita.

En el año 2001, se realizó una tesis de postgrado donde se delimitan las zonas hidrogeológicas de Colombia a escala 1:1.200.000 por Nelson Omar Vargas Martínez, a partir de un modelo geológico del subsuelo, siguiendo las normas y estándares fijados por la Asociación Internacional de Hidrogeólogos. Se definen 16 cuencas hidrogeológicas que alojan sistemas acuíferos multicasas con condiciones favorables para su explotación las cuales abarcan el 74% de la extensión total del territorio nacional. Los mapas obtenidos se acompañan de cortes hidrogeológicos que le dan tridimensionalidad a las representaciones e ilustran la geometría y potencialidad acuífera de las unidades propuestas.

En 2004 se presentó el trabajo de un modelo conceptual del sistema acuífero del bajo Cauca antioqueño, realizado por Teresita Betancur V. Et al, estudio con el cual se logró definir un modelo conceptual de los acuíferos de la región a partir de la evaluación Hidrogeológico entre los municipios de Caucasia y Cáceres en el bajo Cauca antioqueño (Corantioquia, Universidad de Antioquia 2003). La construcción de este primer modelo para esta zona utilizó metodologías de evaluación hidrológicas tradicionales y validadas

en todo el mundo, también para el procesamiento de la información se hizo uso de las mejores herramientas geoinformáticas y se desarrollaron módulos de aplicación dentro del software para Sistemas de Información Geográfica, SIG, ArcView.

En los últimos dos años se han realizados trabajos como: “Modelación de acuíferos para el aprovechamiento sostenible del agua subterránea”, estudio realizado por EIDENAR-Grupo de Aguas Subterráneas, Universidad Nacional de Colombia, donde se presenta un modelo de simulación hidrogeológica para el acuífero comprendido en la zona plana de los municipios de Tulúa, San Pedro y Buga (Valle del Cauca – Colombia). Inicialmente se partió de un modelo conceptual ajustado a las características y condiciones del acuífero, construido con base en información real tomada de campo. La modelación se realizó mediante la utilización del programa Visual Modflow, el cual utiliza el método de diferencia finita, consiguiendo un buen ajuste en la diferencia entre los niveles piezométricos medidos y calculados, y a su vez un bajo error de calibración. Y el estudio titulado “Un modelo conceptual de recarga en acuíferos de Bucaramanga a partir de rasgos hidrogeológicos y uso de isótopos estables del agua” por la doctora Sully Gómez, en donde se plantea un primer modelo conceptual de recarga a acuíferos a partir del estudio de los rasgos geológicos estructurales e hidrológicos mas importantes.

Regionalmente hablando, y generada la necesidad de investigación a partir del hecho que el municipio de Tona, especialmente la zona norte ha sido afectada por diferentes procesos erosivos que ha afectado tanto la estabilidad de los terrenos como el aporte de sedimentos a la fuentes hídricas especialmente a la quebrada Río Sucio, por este hecho tanto la Universidad Industrial de Santander, como el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga ayudados por diferentes entidades tanto privadas como estatales han venido llevando a cabo una serie de trabajos determinado a evaluar la gravedad de esta situación, especialmente en la zona crítica del Tembladal.

Algunas conclusiones importantes de estos estudios se comentan a continuación:

En el año de 1987, se efectuó un estudio de control de sedimentos en la cuenca Alta del Río Tona, realizado por Cesar Buitrago Gómez y Germán Cote Mendoza en el que se concluyó que la microcuenca de la Quebrada Río Sucio transporta una cantidad de

sedimentos excesivamente alta para el volumen reducido de sus aguas, ello como consecuencia de poseer zonas inestables tanto en las laderas como en las orillas de su cauce, por lo cual recomendaron trabajos de carácter mecánico encaminados a disminuir el volumen de sedimentos a lo largo de la Quebrada Río Sucio y del Río Tona.

En el año 1.995, se realizó el estudio de Geología, Geomorfología y Química de los procesos de inestabilidad de la zona del Tembladal, elaborado por Laura Gómez Ríos y Hernando Santana Acosta, en el cual se definió una gran complejidad estructural. Se localizaron geoformas estructurales y las debidas a procesos de orden climático, conceptuándose las dominancias de origen estructural relacionadas con la dinámica de la cordillera oriental.

También se encontró que los mayores aportes de sedimentos ocurren en los períodos de altas precipitaciones y que las rocas que aportan mayor cantidad de sedimentos corresponden a las calizas meteorizadas, shales y materiales inconsolidados compuestos principalmente por shales.

En 1.997 con el fin de evaluar el potencial de inestabilidad del sector de La Casita se llevó a cabo el trabajo “Aspectos Geotécnicos de los sectores inestables de la microcuenca de Río Sucio parte alta de la cuenca del río Tona en el departamento de Santander”, elaborado por Wilfredo Del Toro, ingeniero civil, en el que se identificaron 3 sectores inestables denominados La Casita, Bélgica y López. Se efectuaron sondeos geoelectrónicos, realizados por los geólogos Carlos M. Wandurraga Barón y Pablo Mora González.

Complementariamente a los dos estudios anteriores, paralelamente se adelantó otro estudio titulado “Análisis de las influencias de los factores geomorfológicos en los procesos erosivos de la microcuenca de la quebrada Río Sucio parte alta de la río Tona”, elaborado por William Hernández Gutiérrez, Ingeniero Civil. Según este estudio, el origen de los fenómenos ligados a los materiales no consolidados del sector de La Casita es muy complejo y tienen relación directa con la tectónica, otro factor que tiene incidencia en la inestabilidad del depósito, es la continuada presencia de afloramientos de aguas subterráneas las cuales brotan en la superficie de forma incontrolada saturando la masa del suelo, haciéndola inestable.

Para finalizar en 2003, la compañía del acueducto metropolitano de Bucaramanga contrató la Mapingeniería Cia. Ltda. para efectuar el trabajo “Estudio De Sedimentos Para La Cuenca Superior Del Río Tona (Carrizal)” en el cual a partir de las observaciones se pudo evaluar el potencial erosivo a futuro de la Quebrada Río Sucio, que parece ser mucho menos intenso que en el pasado reciente. De todos modos, hay depósitos menores comparativamente con los del pasado reciente, los cuales merecen cierta atención, pues por épocas podrán suministrar cargas de muy difícil tratamiento en caso de tomarse la decisión de construirse un embalse en el sitio de Carrizal.

2. CARTOGRAFIA GEOLOGICA

La cartografía geológica de superficie consiste en registrar en un plano, la naturaleza litológica o estratigráfica y las características estructurales de los afloramientos de las rocas.

En la Cuenca Experimental del Río Sucio (CERS) se realizó la cartografía geológica detallada sobre la escala topográfica 1:10000, levantada para la elaboración del Modelo Digital de Elevaciones de la CERS Buenahora, Osorio (2005), en la cual se registró la información litológica y estructural, dando como resultados los mapas: geológico, estructural y de depósitos, los cuales sirven como herramienta tanto en la elaboración del modelo tridimensional como en la aproximación del mapa hidrogeológico.

La metodología utilizada para obtener dichos mapas se define a continuación (Figura 12):

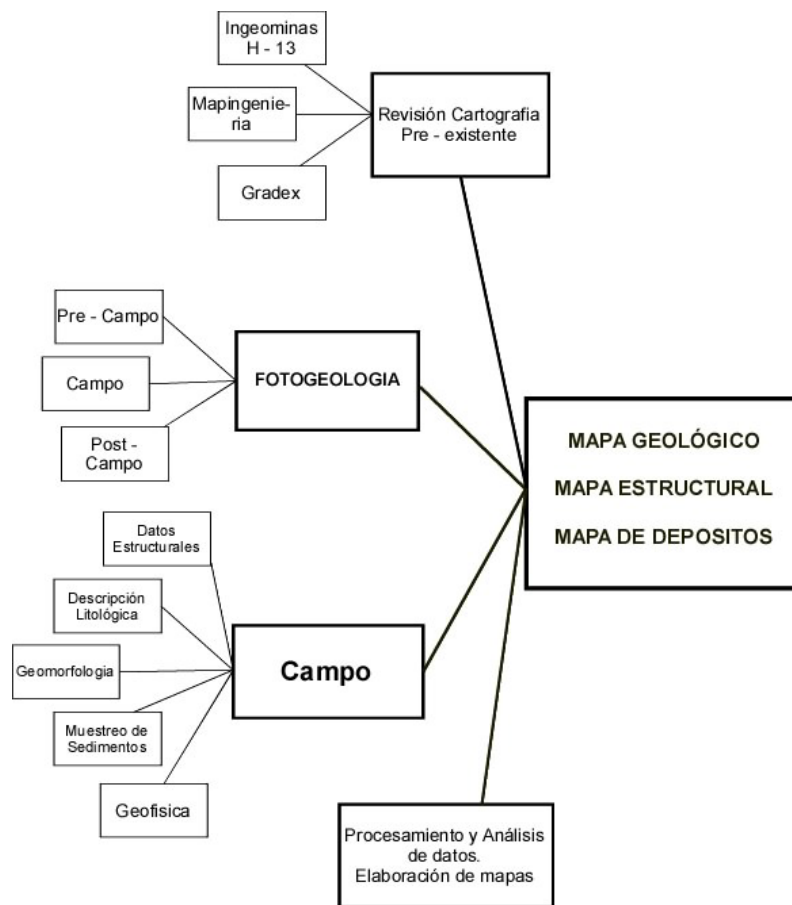


Figura 12. Metodología para la Cartografía Geológica de la CERS.

2.1 REVISION DE CARTOGRAFIA PRE – EXISTENTE

Para la zona de la Vereda El Tembladal, municipio de Tona, se han realizado algunos trabajos de cartografía geológica, siendo el primero el desarrollado por Ward en 1973 a escala 1: 100000 “Geología de los cuadrángulos H12 y H13, Bucaramanga y Pamplona”, Volumen XXI, número 1-3 del Ingeominas, obteniéndose un mapa generalizado de las litologías y estructuras.

Con el fin de analizar los procesos de inestabilidad que dan origen a la contaminación de la quebrada Río Sucio se realizó en 1995 la tesis Gómez y Santana, de la cual se deriva un mapa geológico a escala 1 : 5000, con una base topográfica 1 : 25000 del IGAC.

Siguiendo los requerimientos de las políticas nacionales para el desarrollo de todas las zonas del país, la empresa Gradex, realizó el Plan de Ordenamiento Ambiental-Territorial. Desarrolló una cartografía a escala 1: 25000, amplió el detalle en cuanto a estructuras de la zona, como se puede ver en la figura 13

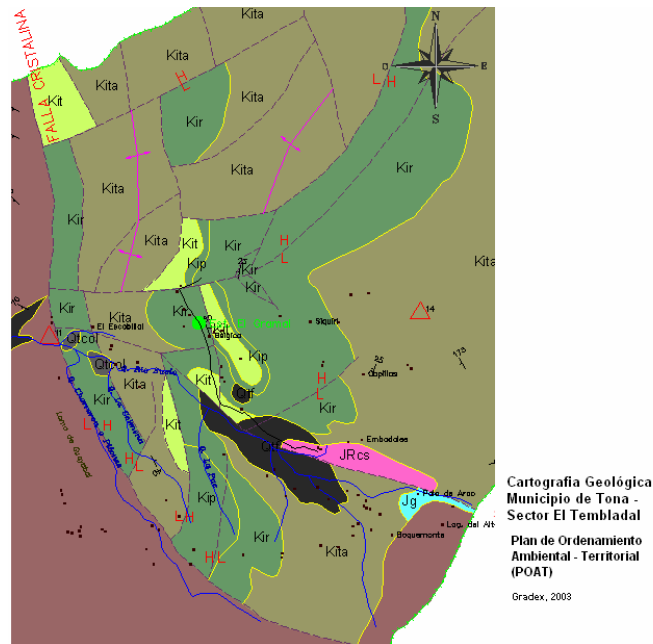


Figura 13. Cartografía Geológica. Gradex (2003).

Para profundizar el trabajo de Gómez y Santana la Corporación del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga CAMB en el año 2003 contrató a MAPINGENIERIA Cia. Ltda. para realizar el Estudio De Sedimentos Para La Cuenca Superior Del Río Tona (Carrizal), en el cual se produjeron algunos cambios, en cuanto a ubicación de fallas, contactos litológicos y disposición de pliegues. (Figura 14)

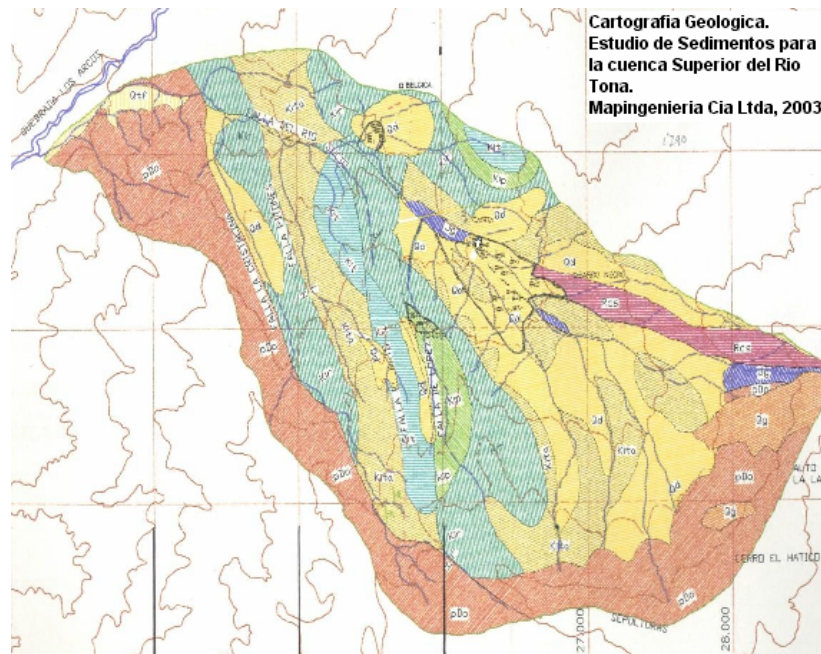


Figura 14. Cartografía Geológica. Mapingeniería (2003).

Tomando como base todos estos estudios de cartografía geológica, se procedió a la validación de la información, siendo corroborada mediante una campaña de campo, describiendo la mayor cantidad de afloramientos de roca.

2.2 FOTOGEOLOGÍA

En esta etapa del proyecto trabajamos con fotografías aéreas verticales ya que son las más semejantes a los mapas planimétricos. El gran valor de las fotografías aéreas radica en su detallada representación de la superficie terrestre.

Esta herramienta fue utilizada antes de salir al campo para obtener una idea de los rasgos geológicos y de accesibilidad del área y, después de concluida esta etapa han sido de gran ayuda en la compilación de los datos geológicos y geográficos en zonas de difícil acceso, para el seguimiento de estructuras en las zonas planas del páramo de Berlín y teniendo en cuenta, tonos, texturas y moteados se redefinieron algunos contactos litológicos.

Se analizaron las fotografías aéreas relacionadas en la tabla 5:

Vuelo	Fotos	Escala	Año
C - 1624	119-120-121	1:24000	1976
C - 1713	12 – 13 - 14	1:21000	1978
C - 2579	221 - 222	1 : 37250	1995

Tabla 5. Relación Fotografías Aéreas usadas en el Proyecto

En la interpretación de fotografías aéreas se tienen en cuenta las siguientes fases:

- Observación directa de los elementos visibles en las fotografías. La detección permite el descubrimiento y exploración de los objetos y las superficies que se observan en las imágenes.
- El reconocimiento, permite apreciar sus formas, tamaños y otras propiedades visibles y asociarlos con la aplicación temática.
- Identificación, procura relacionarlos con algo conocido por su nombre o términos específico

2.2.1 Etapas básicas durante el proceso de Identificación

La primera etapa que se debe tomar en todo estudio fotogeológico es la descripción detallada del drenaje, en la microcuenca esta sujeta a numerosos controles por parte de litología, topografía y principalmente por las estructuras; en el caso del fuerte control estructural presente en la zona, la red de drenaje corre por fallas y fracturas debido a que son sectores de menor resistencia, en consecuencia la redes de fallas paralelas tienden a formar redes de tipo paralelas o subparalelas. Esto se hace evidente al comparar las fotografías A y B, drenaje y sistema de fallas, respectivamente.

La segunda etapa consiste en la identificación de litologías teniendo en cuenta diversos elementos propios de cada tipo de roca como:

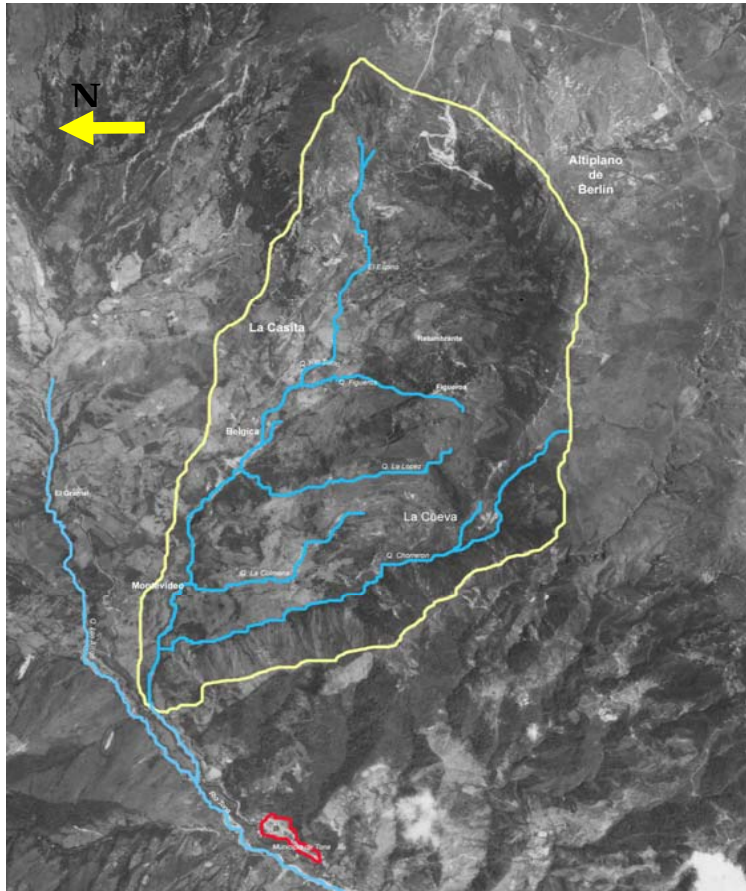
- Tonos característicos
- Formas de modelado a que dan lugar
- Tipología de la red de drenaje a que dan lugar

- Comportamiento de la vegetación en relación a los diferentes tipos de roca.

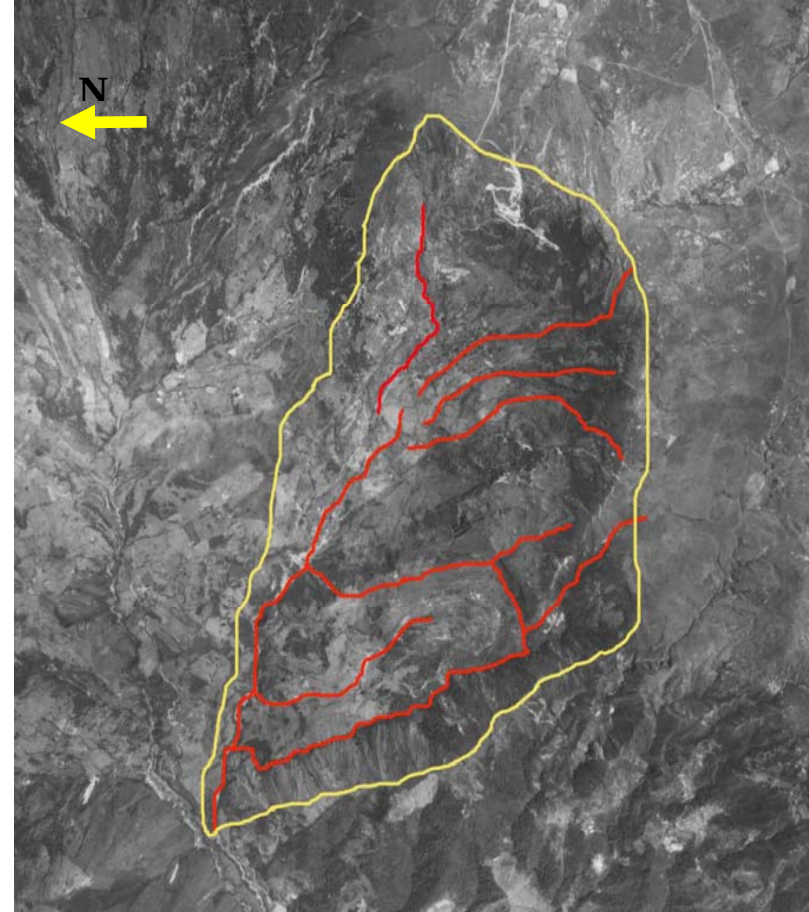
En las fotografías aéreas de la CERS, las rocas sedimentarias presentan planos de estratificación y un bandeo característico fácilmente identificable en la fotografía aunque, en algunos casos, pueden aparecer oculto por la vegetación. En el caso de las rocas cristalinas como la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara se identifica por los tonos claros, un modelado redondeado y escasa vegetación y el Ortoneis presenta fuertes pendientes y crestas, con tonos claros, se observa poca densidad en la red de drenaje y una vegetación muy pobre.

En la tercera etapa se identifican las fallas y fracturas de gran tamaño las cuales se diferencian por rasgos estructurales como facetas triangulares, escarpes, contrastes de litológicos y cambios bruscos en el drenaje.

En cuanto a los plegamientos, los sinclinales la charnela sinclinal suele coincidir con una zona deprimida apareciendo sierras alargadas cuya vertiente más suave mira hacia el eje del sinclinal, también se pueden reconocer por los buzamientos de las capas presentes en el centro de la estructura (Formación Tablazo), los cuales son visibles en las fotos, ya que son paquetes de calizas y areniscas.



A



B

Foto 4. Fotografía aérea 14 del vuelo C – 1713. A) Red de drenaje y B) Sistema de Fallas, de la CERS

La fotointerpretación en esta etapa resulto indispensable en el seguimiento de estructuras que de la cuenca continúan hacia el altiplano de Berlín, permitiendo validar el comportamiento de las fallas como zonas de transporte preferencial del agua entre la zona del cuaternario de Berlín y los depósitos de la parte media de la cuenca.

2.3 Campo.

El proceso para realizar la cartografía geológica detallada escala 1:10000 de la CERS, en su etapa de campo se constituyo de los siguientes pasos:

- Un reconocimiento general de las unidades de roca y estructuras, para definir áreas y detalles que sean cubiertos con trayectos de mayor efectividad.
- Toma de datos generales litológicos, estructurales y geomorfológicos; además de fotografías de afloramientos y estructuras donde se efectúan las observaciones y la representación sobre el mapa de estos puntos o afloramientos, y de otros datos geológicos. Durante esta fase, en la zona de estudio se describieron litológicamente y estructuralmente 189 estaciones (Figura 15)

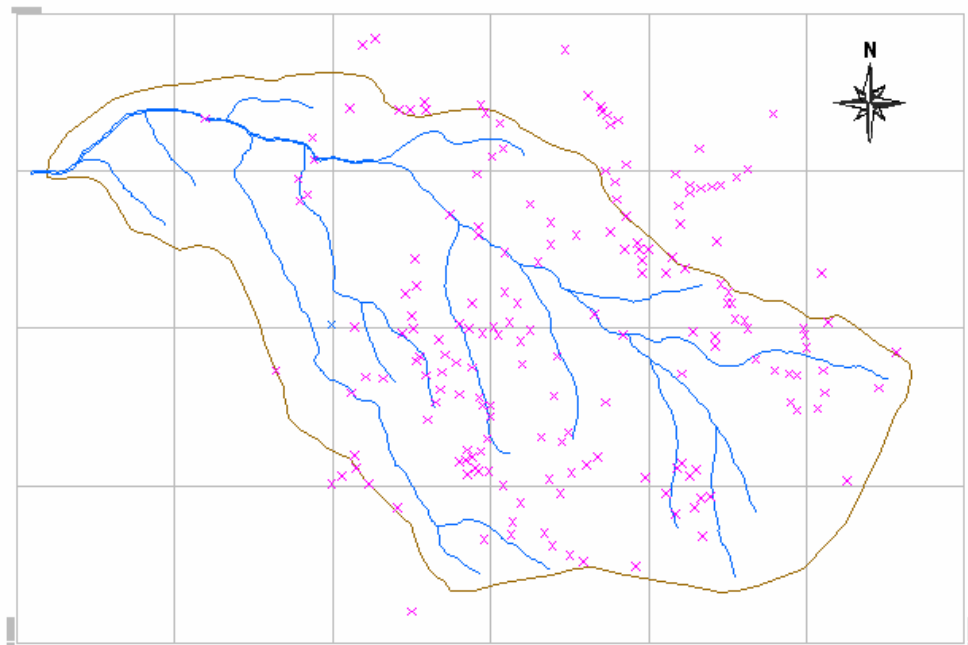


Figura 15. Mapa de Deltas.

DELTA	X	Y	LITOLOGIA	RUMBO	BUZAMIENTO
1	1124990	1287010	Pdo		
2	1125060	1287060	Pdo		
3	1125140	1287190	Pdo		
4	1125150	1287110	Pdo		
5	1125230	1287010	Pdo		
6	1125410	1286860	Pdo		
7	1125500	1286200	Pdo		
8	1125960	1286660	Pdo		
9	1126130	1286690	Pdo		
10	1126140	1286770	Jg - Kita	N85E	72NW
11	1125990	1287090	Kir		
12	1125210	1287690	Pdo – Kita		
13	1125650	1287530	Kir	N60E,	20SE
14	1125800	1287580	Kir	N45W	41NE
15	1125880	1287750	Kita	N63E	50SE
16	1126190	1286890	Kita		
17	1126370	1287040	Kita	N35W	59NE
18	1126320	1287310	Kir	N55E	35NW
19	1126610	1287130	Kita	NS	30W
20	1124640	1287730	Pdo		
21	1125320	1287680	Kita	N10W	49NE
22	1125590	1287700	Kita	N7E	60SE
23	1125690	1287720	Kita	N14W	59NE
24	1125550	1287820	Kir	N35W	31SW
25	1125530	1287790	Kita	N66E	29NW
26	1125120	1287590	Pdo		
27	1126800	1288820	Kir	N65E	36NW
28	1126450	1287280	Kita	N58W	33NE
29	1126680	1287180	Kita	N29E	27NW
30	1126510	1287080	Kir	N25E	43NW
31	1126440	1286950	Kita	N61E	37NW
32	1126490	1287340	Kita	N11E	33NW
33	1128570	1287850	Kita	N59W	50SW
34	1128460	1287620	Pdo		
35	1128120	1287590	Pdo		
36	1128110	1287730	Pdo		
37	1127280	1287980	Jcs		
38	1127420	1287890	Jcs		
39	1127680	1287800	Kir		
40	1127800	1287730	Kita	N10E	29NW
41	1128000	1287880	Jcs		
42	1127940	1287700	Jg	N66E	47NW
43	1127890	1287710	Kita	N38E	69NW
44	1127990	1287960	Jg	N69W	49NE
45	1127980	1288000	Kita	N85E	41NW
46	1128140	1288040	Kita	N79E	31NW
47	1128100	1288350	Kita	N32W	37NE
48	1127900	1287530	Pdo		
49	1128260	1287030	Pdo		
50	1126920	1286490	Geoformas		

51	1126590	1286520	Kita	N61E	55NW
52	1126500	1286560	Kita	N70E	36NW
53	1126390	1286620	Kita	N81E	19NW
54	1126340	1286700	Kita	N77E	54NW
55	1126400	1287570	Kita	N71W	24NE
56	1126660	1288090	Kita	N19W	57SW
57	1126420	1287820	Kita	N10W	26SW
58	1126200	1287770	Kir	N39W	41SW
59	1125930	1287560	Kir	N30W	19SW
60	1125950	1287510	Kir	N19E	31NW
61	1126000	1287510	Kita	N23E	45NW
62	1126000	1287440	Kita	N30E	43NW
63	1125980	1287300	Kita	N50E	52NW
64	1125940	1287220	Kita	N35E	40NW
65	1125850	1287230	Kir	N14W	48NE
66	1125880	1287180	Kir	N28E	66NW
67	1125800	1287150	Kita	N45E	56NW
68	1125920	1287090	Kir	N60E	74NW
69	1126250	1287990	Kita	N55E	31NW
70	1126120	1288040	Kita	N5W	28SW
71	1126020	1288010	Kir	N10W	17SW
72	1125860	1288000	Kip	N45E	21NW
73	1125950	1287970	Kip	N35W	40NE
74	1125710	1287830	Kit	N80W	39NE
75	1125670	1287930	Kit	N65W	56NE
76	1125800	1288030	Kip	N27W	71SW
77	1125140	1288010	Kita	N74W	81NE
78	1125500	1288080	Kit	N29W	49NE
79	1125440	1287970	Kita	N57W	36NE
80	1125510	1288000	Kir	N85W	56SW
81. 1ª. Dir 2ª. Dir 3ª. Dir	1127210 1127200 1127190	1287710 1287700 1287730	kita	N49E N35W N60W	45NW VERTICALES 41NE
82	1127390	1286930	Kir	N27E	34NW
83	1127330	1286920	Kip		
84	1127290	1286860	Kip	N71E	40SW
85	1127170	1286820	Kita	N442W	32NE
86	1127340	1286680	Kip	N27W	50NE
87	1127210	1287140	Kir	N70W	41NE
88	1127180	1287110	Kir	N20W	28NE
89	1127260	1287060	Kir	N27W	81NE
90	1127300	1287100	Jg	N85W	51NE
91	1126960	1288350	Kita		
92	1126960	1288430	Kita	N80E	71NW
93	1127150	1288450	Kita	N40E	71NW
94	1127230	1288380	Kita	N29W	36SW
95	1126850	1288500	Kita-Jcs	N60E	30NW
96	1127430	1288550	Kita	N21W	23SW
97	1127000	1288500	Kir	N45E	40NW
98	1126930	1288540	Kir	N80W	71SW

99	1127560	1288960	Depósito		
100	1127460	1288910	Kita	N35E	25SE
101	1127400	1288900	Depósito		
102	1127330	1288890	Kita	N31E	40NW
103	1127260	1288910	Kita	N34W	35NE
104	1127260	1288860	Kita	N10E	41NW
105	1127190	1288780	Kita – Kir	N48E	42NW
106	1127200	1288660	Kir	NS	40W
107	1126860	1288710	Kita – Kir	N21E	51NW
108	1126860	1289040	Kir	N65E	33NW
109	1126760	1289290	Kir	N80E	29NW
110	1126710	1289380	Kir	NS	35W
111	1126620	1289480	Kita	N33W	78NE
112	1126840	1287960	Kita	N55W	18NE
113	1126730	1287530	Kita	N20W	58NE
114	1126980	1287050	Kita	N21W	44NE
115	1127110	1286950	Kita	N42E	34NW
116	1126790	1288930	Kir	NS	35W
117	1126730	1289000	Kir	N44W	40SW
118	1126470	1289770	Kir	N5W	71SW
119	1125940	1289420	Kir	N23W	36NE
120	1125590	1289390	Kita		
121	1125580	1289440	Kit	N5W	48NE
122	1125490	1289390	Kit	N5W	65NE
123	1125420	1289390	Kit	N5W	29NE
124	1126300	1288420	Depósito		
125	1126170	1288160	Kita	N22W	35SW
126	1125880	1288160	Kir	N15W	48SW
127	1125530	1288270	Kit	N55W	49NE
128	1125460	1288220	Kit	N45W	N44E
129	1125520	1288440	Kit	N64W	63SW
130	1126380	1288530	Kita	N10E	39NW
131	1126090	1288230	Kir	N39W	50NE
132	1126090	1288480	Kit	N65W	47NE
133	1125920	1288640	Jg	N20E	71SE
134	1125920	1288590	Kip	N24W	68NE
136	1125740	1125740	Kip	N8E	57NW
137	1124190	1289330	PDo		
138	1125910	1288980	Kita	N67W	17NE
139	1125270	1289840	Kit	EW	32S
140	1126250	1288790	Kir	N55W	50SW
141	1126760	1288610	Kir	N34W	64SW
142	1126540	1288590	Kita-Kir	N36E	68SE
143	1126380	1288670	Kit	N15E	54NW
144	1126940	1288500	Falla		
145	1127110	1288350	Kita-Falla		
146	1127420	1287950	Jcs- Falla		
147	1127550	1288060	Kita-Jcs		
148	1127630	1288000	Kita-Falla		
149	1127610	1288050	Falla		
150	1127530	1288160	Kita	N42W	70SW

151	1127510	1288230	Falla		
152	1127460	1288280	Kita	N67E	35NW
153	1127500	1288160	Kita	N15E	46NW
154	1127940	1287480	PDo		
155	1128070	1287490	PDo		
156	1126190	1287920	Kita	N5E	32NW
157	1126050	1287960	Falla		
158	1125780	1287780	Kir	N11W	67SW
159	1125680	1287610	Kir	N65E	22NW
160	1125600	1287420	Falla		
161	1125844	1287160	Kita	N59E	60NW
162	1125902	1287110	Kir	N70E	65NW
163	1126080	1287000	Kita	N76E	45NW
164	1125850	1287070	Kir	N70E	71NW
165	1127170	1288980	Kita	N15W	64SW
166	1127320	1289140	Kita	N45E	34NW
167	1126810	1289320	Kir	N16E	35NW
168	1126740	1289350	Falla		
169	1126700	1289410	Kir	NS	42W
170	1126080	1289140	Kit	N25W	80SW
171	1126060	1289300	Kit	N10W	71SW
172	1125970	1289370	Kit	N23W	68SW
173	1126010	1289090	Kit	N24W	65NE
174	1127630	1289010	Kita	N15W	35SW
175	1127790	1289360	Kita	N32E	26NW
176	1124880	1289070	Kita	N14W	86SW
177	1124780	1288950	Falla	N23W	68SW
178	1124840	1288850	Kit	NS	VERTICALES
179	1124790	1288810	Kir	N15E	53NW
180	1124870	1289210	Kita	N5W	79SW
181	1125110	1289400	Falla		
182	1125190	1289800	Kita	N63W	29SW
183	1125900	1288980	Kita	N5E	23NW
184	1125900	1288950	Jg-Kita	HORIZONTALES	
185	1125890	1289050	Kita	N86W	24NE
186	1125530	1289350	Kit	N85E	36SE
187	1126410	1288810	Kir	N73W	35SW
188	1124630	1289690	Kita	NS	68W
189	1124290	1289800	Kir	N15W	80NE

Tabla 6. Relación de Estaciones con datos estructurales

- Definir zonas críticas que resulten interesantes, en cuanto a complejidad estructural, espesores de depósitos y disposición litológica para especificar los puntos de sondeos eléctricos verticales y tomografías.

- Determinación de puntos para el muestreo de los sedimentos, los cuales permitan establecer la litología parental que contaminan el cauce de la quebrada Río Sucio.
- Observación de la red hídrica y su asociación con el comportamiento estructural (fallas y diaclasas) y si esta influenciada por la litología presente en la zona.

2.4 PROCESAMIENTO Y ANALISIS DE DATOS

La información obtenida de la campaña de campo y fotointerpretación fue procesada, analizada y registrada sobre la topografía actualizada dando como resultado el mapa geológico, notándose varios cambios con respecto a las cartografías anteriores. Una vez elaborado el mapa de Geología de la CERS, se realizan cortes geológicos los cuales sirven de apoyo en la obtención del modelo tridimensional, permitiendo mostrar de una forma subjetiva el comportamiento de las estructuras a profundidad. Adicionando otros componentes como datos climáticos, hidrológicos e hidroquímicos permiten determinar, con mayor o menor precisión según los casos, los límites y tipos de las principales unidades hidrogeológicas y con ajuste de toda esta información se procede a la elaboración del mapa Hidrogeológico.

3. GEOLOGIA

En la Cuenca Experimental de Río Sucio (CERS) se presentan rocas de tipo metamórfico, ígneo y sedimentario; debido al complejo control estructural (figura , las formaciones se distribuyen en el área como bloques estructurales y no se logra observar una secuencia completa que se pueda relacionar con la disposición estratigráfica normal descrita para la sección tipo, como se puede observar en el mapa geológico de la cuenca (figura 1). Por su carácter hidrogeológico los depósitos sedimentarios cuaternarios son las unidades más importantes ya que sus propiedades hidráulicas favorecen el almacenamiento y movimiento del agua, mientras que, las unidades de roca se caracterizan por tener un alto grado de compactación lo cual disminuye la permeabilidad y los parámetros de almacenamiento, sin embargo, por efecto del fracturamiento (diaclasas y fallas) presentan porosidad secundaria condicionando procesos de disolución y meteorización aumentando las propiedades hidráulicas lo cual se evidencia por la presencia de rutas preferenciales de flujo dentro de las formaciones, ya sea de carácter sedimentario o cristalino.

3.1 LITOLOGÍA.

3.1.1 Ortoneís (pDO). Como Ortoneis fue inicialmente definido por Ward, et al. (1973) un cuerpo metamórfico de origen ígneo, con estructura néisica, aspecto masivo y composición félsica a intermedia. Se propone el nombre de Ortoneis de Berlín por encontrarse la sección tipo en los alrededores de Berlín, donde tiene su mayor extensión y está mejor expuesto (carretera Bucaramanga - Pamplona). Existen cuerpos menores del Ortoneis de Berlín relacionados con el flanco oriental de los batolitos de Mogotes y Santa Bárbara.

El Ortoneis de Berlín intruye el Complejo Bucaramanga y está cubierto discordantemente por sedimentitas del Devónico medio. Con base en observaciones y relaciones estratigráficas de campo, esta unidad puede abarcar edades del Proterozoico superior al Paleozoico inferior (Ward, et al. 1973). Sin embargo, se conocen algunos registros radiométricos que han arrojado edades mínimas; por ejemplo, la datación Rb/Sr en roca total de un ortoneis en el Río Caraba (Plancha 110, Pamplona) dio una edad de 450 ± 80 m.a., y la datación K/Ar en una metadiorita al Occidente de Ocaña (Plancha 76, Ocaña) que determinó una edad de 413 ± 30 m.a (Goldsmith, et al. 1971).

En la CERS se define como un Neis cuarzofeldespático con presencia de granate y estaulolita, hacia la zona SW; muy alterado e intruido por una serie de diques básicos y ácidos. Se caracteriza por una morfología en crestas afiladas hacia el sureste de la zona de estudio (Ver foto 4).

Según sus características hidrogeológicas el Ortoneis no es un cuerpo que se pueda definir como un buen almacenador o conductor de agua de agua, aunque hacia la zona SE, se definen una serie de familias de diaclasas que persisten por toda la divisoria de la CERS, desarrollando porosidad secundaria en la roca, permitiendo la circulación de agua desde el altiplano de Berlín hacia la parte central de la cuenca.



Foto 5. Afloramiento y detalle de Ortoneis de Berlín en el sitio La Laguna, 3300 m.s.n.m. Roca alterada y muy fracturada, presenta superficies de oxidación violáceas, que se pueden confundir con Jg

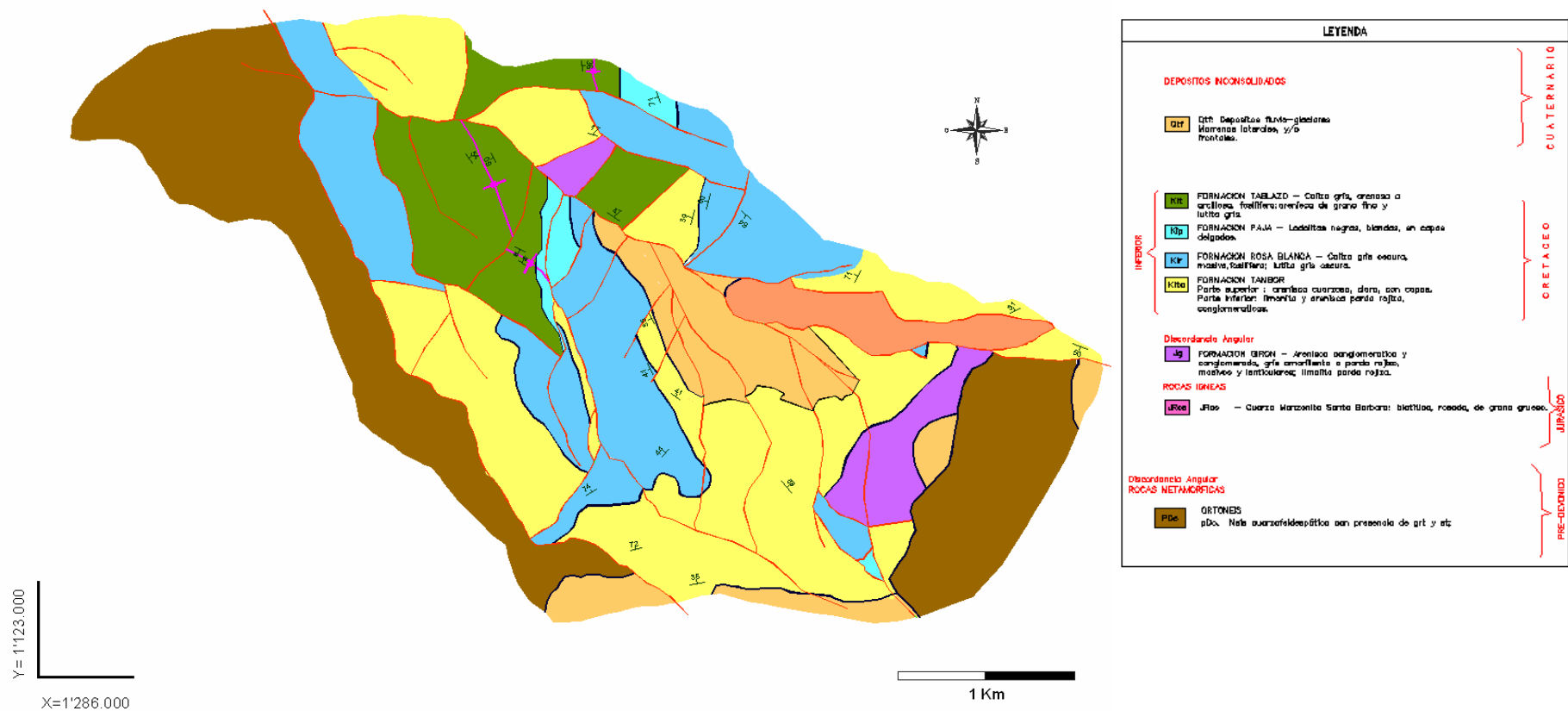


Figura 16. Mapa geológico de la Cuenca Experimental de la Quebrada Río Sucio. Escala 1 : 10000.

3.1.2 Cuarzomonzonita de Santa Bárbara (JRcs). Aflora al Oriente del Departamento, en los sectores de Los Curos, Santa Bárbara, Baraya y en los alrededores de Berlín.

La Cuarzomonzonita es de color rosado, naranja a gris violáceo, de grano medio a grueso, inequigranular, compuesta por feldespato potásico, plagioclasa, cuarzo, biotita y localmente hornblenda.

Se presenta en la C.E.R.S. como un cuerpo alargado y aislado de la masa principal del intrusivo, debido a la fuerte actividad tectónica de la zona, que lo pone en contacto fallado con las formaciones sedimentarias; se caracteriza por sus colores claros, y se constituye por feldespato potásico, cuarzo, plagioclasa, biotita y óxidos. Una de las características principales es el relieve redondeado (foto 5) y drenaje recto.

Al igual que el Ortoneis, sus propiedades hidrogeológicas son debidas a la porosidad secundaria otorgada por el diaclasamiento; según lo observado en campo, este cuerpo cristalino se constituye como una zona de transporte de agua desde la parte oriental del alto El Vivito, hacia la zona de depósitos.



Foto 6. Cuarzomonzonita de Santa Bárbara, caracterizada por un relieve de colinas suaves y redondeadas

3.1.3 Formación Girón (Jg). Inicialmente el término "Girón Series" fue creado por Hettner (1892) para designar una megasecuencia aflorante al Occidente de Bucaramanga en los alrededores de Girón, Santander. Se adelantaron varios estudios y entre éstos se destaca el de Trumphy (1943) pero fue Langenheim (1954) quien fijó la sección tipo en la

angostura del Río Lebrija y la dividió en tres miembros: uno inferior arenoso (750 m), uno intermedio lodoso (1.250 m) y otro superior arenoso (1.500 m) para un espesor total de 3.500 m. La Formación Girón está compuesta por areniscas de grano medio, grueso a ligeramente conglomerática, de color rojo violáceo, rojo grisáceo y gris verdoso, estratificación cruzada, en capas gruesas, con interestratificaciones de limolitas y lodolitas, de color rojo violeta grisáceo y algunos niveles delgados de conglomerados con guijos de cuarzo hasta de 4 cm. El espesor de esta unidad varía considerablemente de un sitio a otro, siendo el máximo espesor medido de 4.650 m en el río Lebrija. El ambiente de sedimentación es continental, fluvial a lacustre-fluviátil.

En la zona, la formación Girón se distingue como dos parches significativos en la zona, uno ubicado en la parte media del cañón de la quebrada Río Sucio donde se diferencia de Kita por ser un paquete de areniscas conglomeráticas violáceas, ver foto 6; y el otro hacia el sureste, caracterizado por ser una Intercalación de areniscas de grano medio, limolitas y areniscas conglomeráticas violáceas, además, se pueden diferenciar dos fragmentos no cartografiables en la finca El Uvo ubicada al sur de la C.E.R.S y otro fragmento en la zona de la finca Rosedal.



Foto 7. Afloramiento y Detalle de los niveles de areniscas conglomeráticas violáceas de la formación Girón.

3.1.4 Formación Tambor (Kita). Fue definida por primera vez por Cediell (1968) y redefinida por Laverde (1985). Está constituida por areniscas conglomeráticas, lodolitas rojo grisáceas y cuarzoareniscas gris amarillentas con estratificación cruzada, en capas tabulares de espesores variables. La sección tipo de Tambor, se encuentra a continuación de la formación Girón en el valle del Río Lebrija, el espesor es de 218 m. Estas facies han sido interpretadas como depósitos fluviales acumulados por corrientes trenzadas (Clavijo, 1985; Laverde y Clavijo, 1985; Laverde, 1985).

La Formación Tambor comprende la mayor extensión en la CERS, con niveles bien definidos de cuarzoareniscas de grano muy grueso – fino, con superficies de oxidación, intercaladas con lodolitas silíceas, fisiles, de color gris hacia el contacto concordante con Kir, por otro lado, se observan niveles de areniscas oscuras, con algún aporte de tipo carbonáceo como se ve en la foto 7. En la microcuenca la Formación Tambor se encuentra afectada por un juego de fallas de tipo normal, colocando bloques unos encima de otros que definen una repetición de la secuencia y aumentando el espesor total. La diferenciación de los niveles de Kita se hace a partir de la composición y del grado de porosidad; este último aspecto es muy importante desde el punto de vista hidrogeológico; siendo la zona del Uvo y Figueroa donde ésta formación presenta una mayor compactación, disminuyendo el porcentaje de porosidad, mientras que en la zona correspondiente a la parte central de la cuenca el contenido de matriz es mayor y con un grado de compactación menor; también se observa una mayor oxidación y algunos niveles de areniscas con materia orgánica. (Foto 7).

3.1.5 Formación Rosablanca (Kir). Descrita originalmente por Wheeler (1929) y estudiada en detalle por Cardozo y Ramírez (1985) en la región de Villa de Leiva (Boyacá) y Gámbita (Santander). Se encuentra ampliamente distribuida en el Departamento de Santander. Está compuesta en su parte inferior por capas de caliza y yeso con oolitos, ostrácodos y dolomías; hacia la parte superior consta de areniscas y lodolitas calcáreas. En la parte inferior presenta depósitos evaporíticos como yeso y polihalita que indican una hipersalinidad y tranquilidad en las condiciones de depositación; el resto de la secuencia se depositó en un medio marino somero en condiciones neríticas. El espesor varía de 150 a 425 m.

A partir de la fuerte actividad tectónica el Kir en la CERS es fácilmente diferenciable, ya que se encuentra como escarpes de falla, mostrándose gruesos bancos de calizas micríticas grises hacia el este de la zona, con presencia de niveles fosilíferos (foto 8) y venillas de calcita intercaladas con delgadas capas de shales oscuros, y superficies de disolución, debidas a la composición química tanto de la roca, como de las aguas que la han alterado, junto con este proceso, se encuentra el diaclasamiento de Kir, los cuales aumentan la porosidad secundaria de las calizas.



Foto 8. Afloramiento meteorizado de las areniscas de la formación Tambor, observándose un nivel con presencia de materia orgánica dándole una coloración negra, también se presentan una patinas de óxidos.



Foto 9. Caliza micrítica fosilífera de la formación Rosablanca, ubicadas al Este de la cuenca localizada en el sector de Cabecera del Llano.

3.1.6 Formación Paja (Kip). Inicialmente descrita por Wheeler ,1935 y su localidad tipo es el Cerro Rosablanca al Oriente del puente sobre el Río Sogamoso. Esta unidad está constituida por lutitas y shales gris oscuros a azulosos, fosilíferas, con intercalaciones de areniscas gris amarillentas, de grano fino, con algunas intercalaciones de shales grises localmente arenosas, calcáreas, fosilíferos localmente limosos a arenosos; con intercalaciones de areniscas gris amarillentas, de grano fino, también pequeñas intercalaciones de calizas grises, localmente arenosas, fosilíferas. Se estima que su depósito tuvo lugar en un ambiente epicontinental. El espesor varía entre 125 y 625 m.

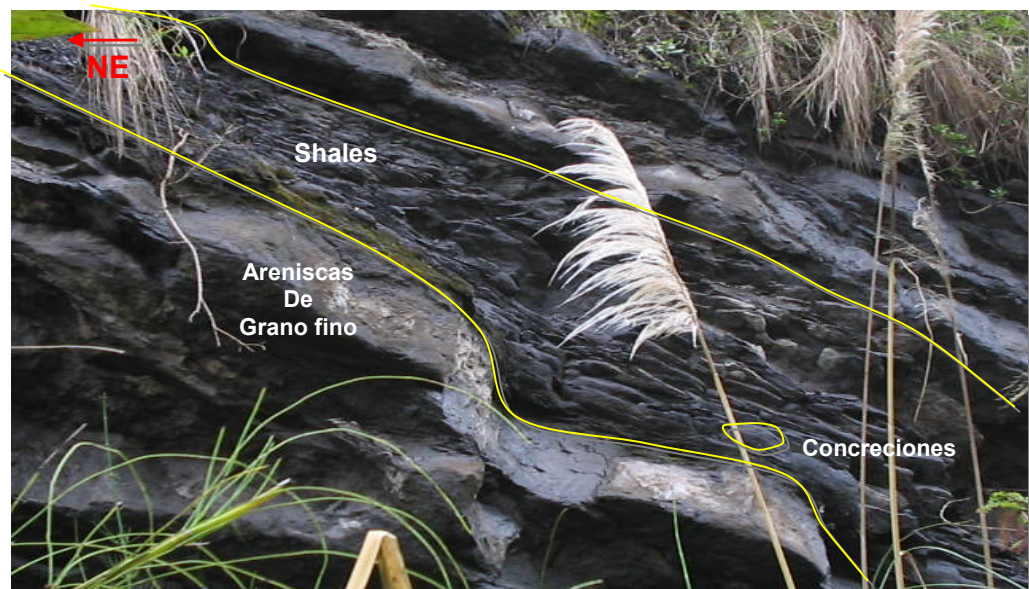


Foto 10. Intercalaciones de Areniscas de grano fino con shales negros con presencia de concreciones de la formación Paja, ubicado al oeste aguas debajo de la quebrada Río Sucio a una altura de 2450 m.s.n.m.

En la CERS se encuentra constituida por niveles de delgados paquetes de areniscas de grano fino, lodolitas y arcillolitas fisiles negras (shales), con presencia de impresiones de restos fósiles, concreciones y nódulos calcáreos (foto 9), además un alto contenido de sulfuros como pirita, como se puede observar en los datos arrojados a partir del análisis de sedimentos por difracción de rayos x (ver difracción), intercaladas con areniscas de grano muy fino, silíceas (ver foto 6).

3.1.7 Formación Tablazo (Kit). Descrita por Wheeler ,1935 y la localidad tipo está en el sitio Tablazo, en el puente del cruce del Río Sogamoso de la vía Bucaramanga - San

Vicente. La secuencia de esta unidad consiste de calizas gris a negras, fosilíferas, localmente glauconíticas y arcillosas de color negro, con niveles intercalados de arcillolitas grises a gris azulado, calcáreas, fosilíferas, en capas medianas a gruesas, con intercalaciones de arenisca grises, grano fino a medio, arcillosas, levemente calcáreas, en capas delgadas. El ambiente de depósito parece corresponder a condiciones neríticas, pocas profundas. El espesor varía entre 150 y 325 m.

En la CERS está compuesta por niveles de cuarzoareniscas de grano fino – lodolitas fósiles y calizas micriticas negras con un alto aporte terrígeno, con marcas de disolución, se encuentran ubicadas como parte de los núcleos de los sinclinales El Alto y El Gramal (foto 10).



Foto 11. Afloramiento de Kit. Intercalación de paquetes delgados de areniscas y limonitas

3.1.8 Depósitos Recientes. Asociados principalmente a las zonas de congruencia de fallas principales de la parte central de la cuenca y originados por procesos de tipo fluvial, glacial y de dinámica de vertientes. (Foto 11 y Figura 11).

los de mayor extensión y profundidad en la cuenca, por lo tanto desde el punto de vista hidrogeológico son los de mayor importancia, por sus valores altos de porosidad y permeabilidad, los convierten en excelentes almacenadores y conductores de agua.

Depósitos aluviales: se presentan a lo largo del cauce de la quebrada Río Sucio, son de dos tipos: torrenciales y terrazas. Los primeros corresponden a acumulaciones de carácter heterométrico, transportados por escorrentías superficiales y ocasionado por eventos mayores de lluvias, se pueden observar en la cabecera de la Quebrada Río Sucio. Las terrazas son acumulaciones de antiguos sucesos de inundación por la quebrada Río Sucio están ubicadas en el sector denominado La Batea.

Depósitos glaciares: localizados en la parte alta de la cuenca hacia el páramo de Berlín, diferenciándose los depósitos morrénicos constituidos por material heterométrico compuesto de areniscas de la Formación Tambor y Ortoneis, angulares; se encuentran a una altura de 3440 m.s.n.m, por otro lado, en los sectores de La Laguna y el nacimiento de la Quebrada El Chorrerón se ubican depósitos fluvio-glaciares formados por cantos subredondeados de areniscas y Ortoneis

3.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

La microcuenca ha sido afectada por fuerzas tectónicas deformando las unidades de roca presente, formando una cuenca estructural o un área complejamente fallada (Figura 12 Mapa Estructural).

Los procesos de deformación obedecen principalmente al levantamiento del cuerpo cristalino (Ortoneis) sometiendo a esfuerzos compresivos la cobertera sedimentaria, generando estructuras a diferentes escalas, encontrándose fallas verticales, inversas, normales y de rumbo de carácter regional y local, diaclasamiento, sinclinales y plegamientos locales (Figura 12)

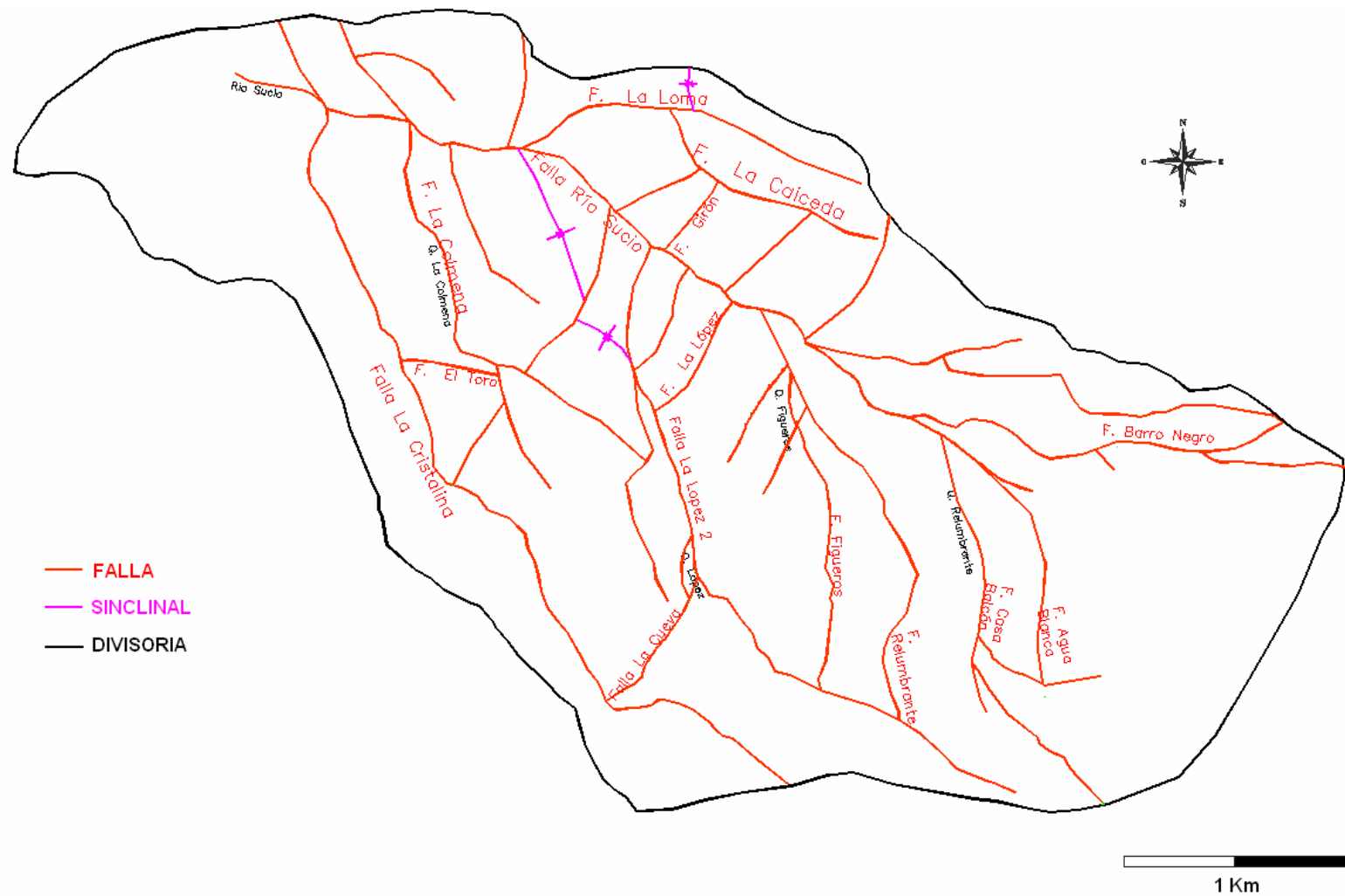


Figura 18. Mapa Estructural de la Cuenca Experimental de la Quebrada Río Sucio. Escala 1 : 10000.

El comportamiento estructural de la CERS se caracteriza por presentar dos direcciones preferenciales del fracturamiento, una en sentido NW-SE, la cual es la dirección predominante de las fallas controladoras de la mayoría de los afluentes de la quebrada Río Sucio y otra en sentido NE-SW relacionado a fallas de tipo mas local.

A partir del estudio fotogeológico, recolección de datos en campo y pruebas geoelectricas, se definieron estas estructuras; los criterios para su identificación fueron la existencia de espejos y estrías de falla, lineamientos, rocas brechadas, escarpes, lagunas, paredes, sillas y barras estructurales, facetas triangulares, mineralizaciones de sulfuros.

3.2.1 Fallas

- **Falla La Cristalina.** Falla regional de tipo normal, con una inclinación aproximada de 70° hacia el noreste y de rumbo N25W, pone en contacto el ortoneis con la cobertera sedimentaria cretácica, además define el curso de la quebrada El Chorreron; hacia el sureste el trazo de la falla está cubierto por un depósito fluvio glacial. Esta falla se puede identificar fácilmente, por el contraste litológico, presencia de facetas triangulares, escarpes de falla (foto 13), estrías y una intrincada red de fracturas.

- **Falla Del Río Sucio.** Falla de rumbo con movimiento sinextral desplazando la falla La Colmena, además presenta un movimiento en la componente vertical, poniendo en contacto formación Tambor con Tablazo. Se encuentran asociadas a esta falla los sistemas de las fallas menores de la parte central de la CERS (foto 14).



Foto 13. Falla La Cristalina de movimiento normal con un alto ángulo de inclinación del plano de falla, colocando en contacto el Ortoneis y rocas sedimentarias cretácicas, en la cual también se observa hacia el Oeste formas estructurales denominadas: facetas triangulares y escarpes de falla. Tomada de Buenahora, Osorio (2005)



Foto 14. Trazo de la falla Río Sucio en el sector de La Casita, y confluencia de la falla Girón

- **Falla La Colmena.** Esta falla de rumbo N21W, se comporta de forma vertical poniendo en contacto Rosablanca y Tablazo, pero al ser afectada por la falla Guayabal, que presenta un rumbo N25E, este comportamiento varía a ser de tipo inverso con una

inclinación de 20NE. A la altura de los 2700 msnm se encuentra cubierta por depósitos asociados a movimientos de remoción en masa.

- **Falla Barro Negro.** Falla vertical con una orientación de N75W, pone en contacto la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara con la formación Girón, Tambor y Rosablanca hacia el sur, donde se encuentran brechas de falla, en esta misma zona se presentan mineralizaciones de sulfuros de Cu, como Malaquita y Azurita, además de una muy compleja red de venillas de cuarzo entrecortadas. (foto 15)

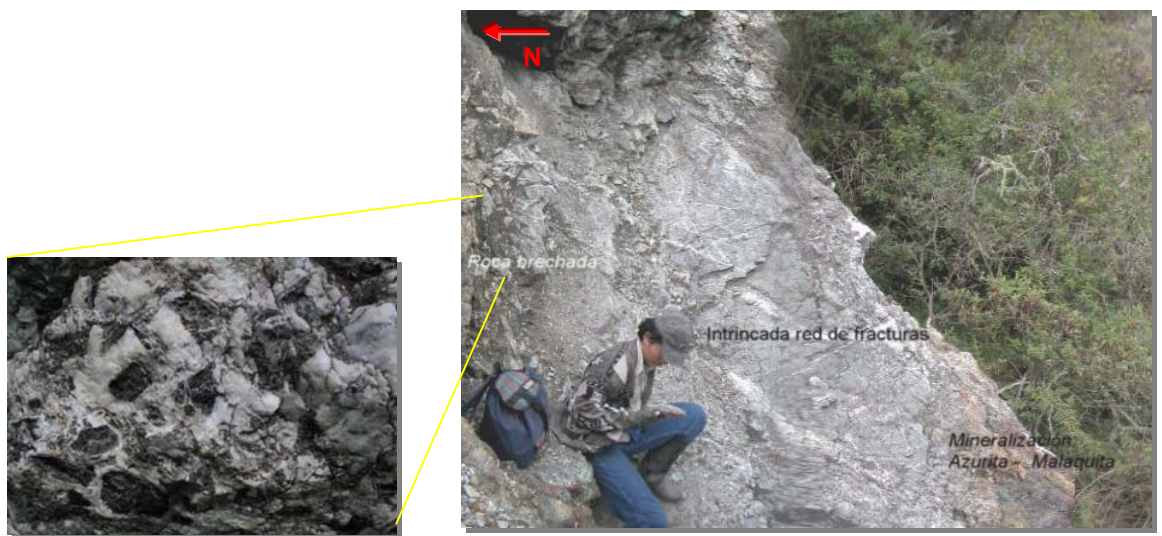


Foto 15. Brecha de falla, contacto entre cuarzomonzonita de Santa Bárbara y Formación Tambor.

- **Falla La López.** Falla de tipo normal con una orientación de N20E, y un buzamiento del plano de falla de 17°SW, poniendo en contacto Rosablanca y Tambor, se encuentra limitada por la falla Relumbrante y López 2.
- **Falla López 2.** Con una orientación de N25W a N5E presentando dos tipos de movimientos uno de tipo vertical desde la falla Río Sucio hasta los 3100 msnm, viéndose afectada por la falla La Cueva, cambiando a ser una falla de tipo normal con un plano de inclinación 41 SW. (Foto16).



Foto 16. Nacimiento de La Quebrada La López, controlada por el comportamiento normal de la falla La López 2, también se pueden observar un juego de escamas, que podrían ser debidas a un fallamiento interestratificado.

- **Falla La Cueva.** Falla vertical con una orientación de N30E , limitada por las fallas La Cristalina y López 2, es identificada por la presencia de escarpe, facetas triangulares y el cambio en la dirección del buzamiento de las capas, como se menciono anteriormente afecta el comportamiento de la falla La López 2. (Foto17).



Foto 17. Se observan los trazos de las fallas La Cueva y La López 2, evidenciándose la variación en la aptitud de los estratos en las formaciones presentes

- **Falla Capillas.** Falla de tipo normal de dirección N45E e inclinación 34° NW, produciendo una repetición de la secuencia de la formación Rosablanca, se evidencia por una silla de falla; hace parte del sistema de fallas que originaron la geoforma estructural denominada *cerro testigo*. (Foto18).



Foto 18. Falla Capillas reconocida por la presencia de una silla de falla, limitando al Sur el cerro testigo.

- **Falla La Caiceda.** Falla local de comportamiento vertical, con una orientación S56E, se encuentra evidenciada por un escarpe, estrías y laguna de falla. Pone en contacto la formación Rosablanca con la secuencia Girón – Tambor las cuales presentan variación de los buzamientos. Limitada por la falla Capillas y la falla La Loma.
- **Falla La Loma.** Falla inversa de rumbo este – oeste con una inclinación de 45°S, trunca la secuencia Rosablanca – Paja – Tablazo que forma parte del sinclinal El Gramal y la pone en contacto fallado con las formaciones Tambor - Rosablanca de diferente inclinación; además se observa una silla de falla hacia el este.
- **Falla Girón.** Falla inversa con rumbo N10E y una inclinación de N45W, pone en contacto la formaciones Girón – Tablazo (foto 19); la presencia de esta falla generan procesos gravitacionales que dan origen a un depósito de talud de derrubios.

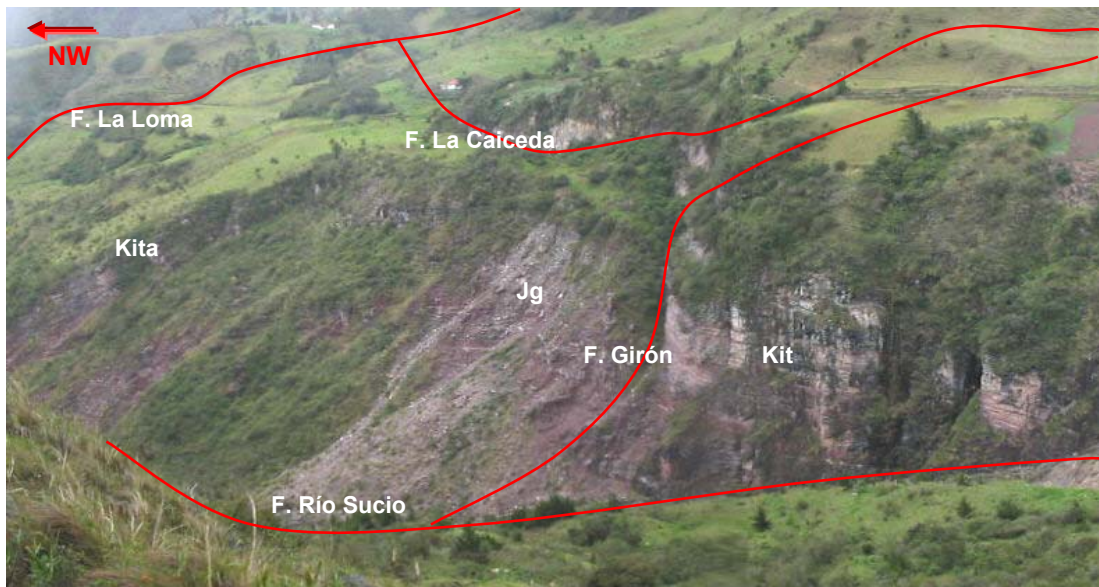


Foto 19. Fallas Girón y La Loma de movimiento inverso que convergen en la falla Río Sucio, también se observa la falla la Caiceda limitada al Norte por la falla La Loma.

▪ SISTEMA DE FALLAS DE LA PARTE MEDIA

Se constituye como un juego de fallas de comportamiento normal casi paralelas que según los lineamientos fotogeológicos van desde el altiplano de Berlín hasta converger en la zona de depósitos de la parte central de la CERS, y en la falla Río Sucio. Estas fallas se encuentran asociadas a cauces de quebradas que son controladas por las mismas. Las fallas son: Casa Balcón, Relumbrante, Figueros y Agua Blanca, que presentan una dirección promedio entre N58W y N5E; y un bajo ángulo de inclinación del plano de falla. Se encuentran localizadas principalmente sobre la formación Tambor ocasionando deformaciones de alargamiento de la secuencia.

En este sistema de fallas, también se encuentra la falla Coronas de movimiento inverso que coloca en contacto las formaciones Rosablanca y Girón, limitada por la falla Casa Balcón. (foto 20).



Foto 20. Parte media de la CERS, donde se observa el sistema de fallas normales, casi paralelas, provenientes del cuaternario de Berlín.

SISTEMA DE FALLAS MENORES

La microcuenca de Río Sucio presenta una dirección preferencial de las fallas principales de N21W, asociado a estas grandes fracturas se encuentran casi perpendicularmente un sistema de fallas menores con un rumbo promedio de N67W, evidenciadas por cambios bruscos en los buzamientos, el alineamiento de los cauces, lineamiento de cerros y rompimiento de los escarpes generando desplazamientos por el plano de estratificación formando escamas o fallas interestratificadas.(foto 21)

Según observaciones de campo y patrones de distribución de los rasgos estructurales visibles en el mapa, las fallas menores se relacionan con las características intrínsecas de las rocas y a las zonas afectadas por los pliegues y fallas regionales.

Por lo tanto el comportamiento dúctil de las rocas de la Formación Paja (principalmente shale negro), muestra la zona de menor fracturamiento, Todo lo contrario ocurre para las areniscas y calizas de las Formaciones Tambor y Rosablanca respectivamente, las cuales se encuentran mas influenciadas por el fallamiento debido a su comportamiento frágil; en el caso de la Formación Tablazo continua con el comportamiento frágil de las Formaciones Tambor y Rosablanca, aunque este constituida por niveles intercalados de rocas dúctiles y quebradizas.

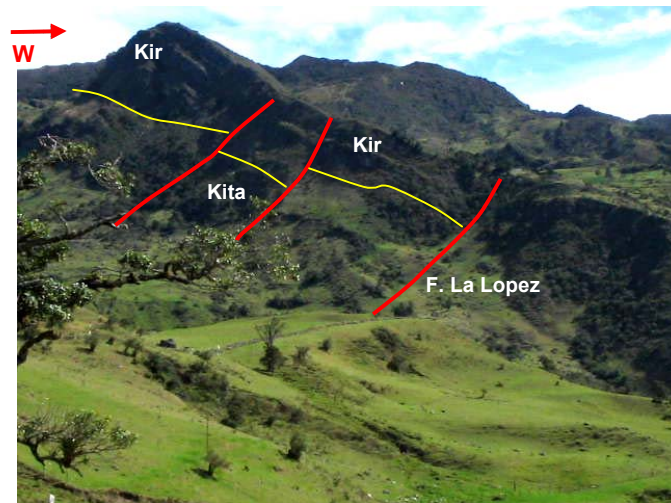


Foto 21. Sistema de fallas menores. Se observa el desplazamiento ocasionado por las fallas.

3.2.2 Pliegues

- **Sinclinal El Alto.** Es una estructura sobresaliente al NW del área, cuyo eje presenta un rumbo variable de N55W a N25W, debido a la presencia de la Falla de rumbo El Toro, corta el eje de la estructura y cambia su dirección. El núcleo del sinclinal lo constituye rocas de la formación Tablazo. El flanco occidental se encuentra disectado por la falla La colmena. El flanco oriental lo conforman las formaciones Rosablanca, Paja y Tablazo.

- **Sinclinal El Gramal.** Localizado al Norte del área. Es una estructura abierta, asimétrica cuyo eje presenta un rumbo N23W. En el núcleo de la estructura esta constituido por la formación Tablazo, truncado al sur de la estructura por la falla La Loma.

3.2.3 Diaclasas.

A diferencia de las fallas las diaclasas son fracturas a lo largo de las cuales no se ha producido un desplazamiento apreciable. En el área de estudio las diaclasas son ocasionadas por la intensa deformación de las rocas y la mayoría se produce en grupos aproximadamente paralelos. Estos conjuntos de diaclasas ejercen una fuerte influencia sobre procesos de meteorización química como la disolución, que tiende a concentrarse en los trazos de las fracturas, produciendo vías preferenciales de agua.

Análisis Geoestadístico De Las Diaclasas. Para la interpretación estadística de las diaclasas y fallas se empleó el Software GEOrient 9.2, el cual genera diagramas de rosetas en donde se obtiene la dirección principal del rumbo, de estructuras tabulares (Diques) y de planos tectónicos (Diaclasas, Fallas).

En total se procesaron 94 datos en el Software Georient (figura 19 A). A continuación se presentan los respectivos diagramas junto con su interpretación. El rumbo de las diaclasas con mayor densidad de datos es aproximadamente N66E con un máximo de 10 datos. La mayoría de las diaclasas son cerradas, o abiertas, rellenas de material arcilloso, provenientes de la meteorización de la roca. En un buen número de afloramientos estos juegos de diaclasas forman intrincadas redes de fracturamiento que se ven relacionadas con la actividad de fallas como la Cristalina, Barro Negro, Río Sucio (Foto 22).

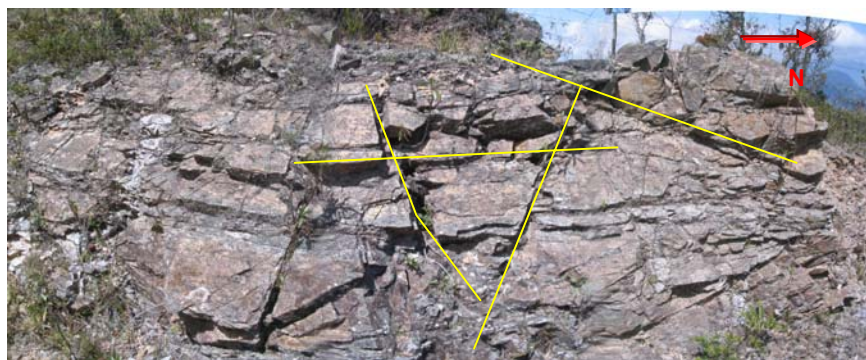


Foto 22. Red de diaclasas, con diferentes orientaciones, que se cortan entre sí. Afloramiento de Ortoneis ubicado en la zona suroriental de la CERS.

Al analizar la relación espacial entre diaclasas y fallas del área de estudio (figura 13, A y B), se observa que los rumbos preferenciales de estos dos tipos de estructuras son perpendiculares.

La mayor cantidad de datos de diaclasas se tomaron en el Ortoneis a lo largo de la quebrada El Chorrerón, que está siendo afectada por la falla La Cristalina; según datos tomados de Orozco y Mendoza, 2005; se observan incrementos de caudales, por lo tanto, este comportamiento se debe al aporte de la precipitación en la parte alta del

Ortoneis, que luego se infiltra utilizando como rutas de migración, las familias de diaclasas abiertas de la zona, hacia el caudal del Chorrerón.

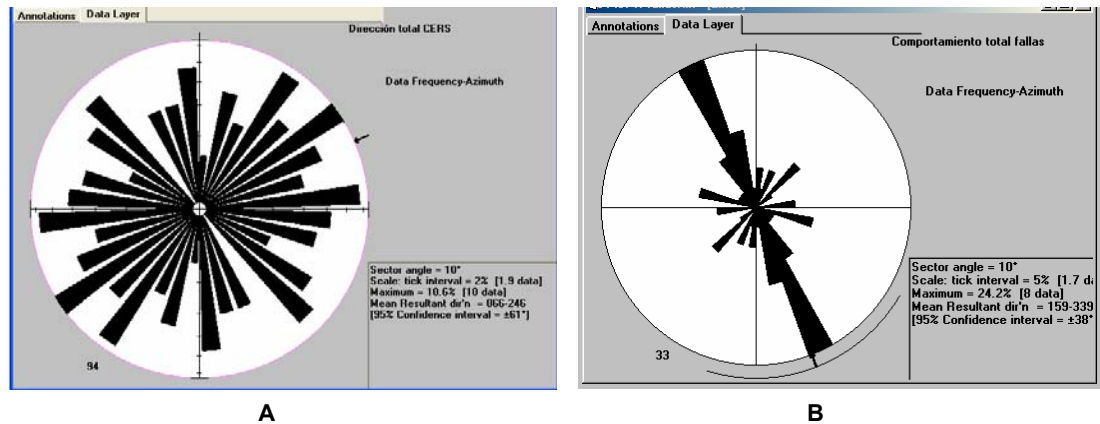


Figura 19. Diagrama de Rosetas, obtenido a partir de los datos de azimutes de diaclasas en la CERS. Georient 9. A) Distribución total de diaclasas, B) Distribución total de fallas.

También se identificaron afloramientos hídricos en zonas de mayor densidad de diaclasas, aproximadamente a los 2150 m.s.n.m., hacia la parte Noroeste de la CERS, donde se encuentran las fallas La Cristalina y Río Sucio, en este punto las diaclasas se encuentran cerradas y espaciadas de 1cm – 40 cm., provocando la exfiltración del agua (Figura 20).

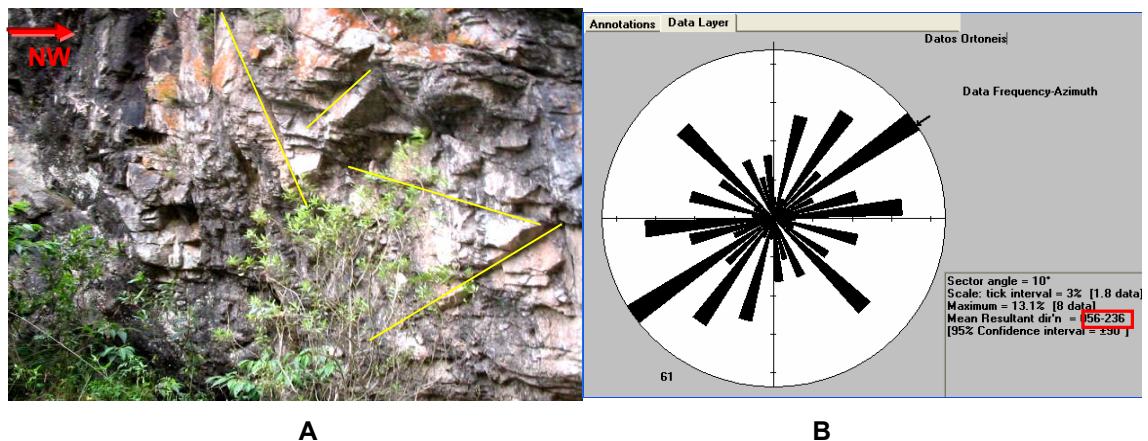


Figura 20. Comportamiento estructural del Ortoneis. A) Red de diaclasamiento presente en el Ortoneis a los 2050 m.s.n.m. B) Distribución estadística de las diaclasas en el Ortoneis.

La Formación Tambor también presenta una alta densidad de diaclasas (figura 21), las cuales influyen en los procesos de meteorización de la roca, debido a que los agentes

químicos y físicos del medio actúan más rápidamente sobre las superficies de fracturamiento, por esta razón, es usual encontrar pátinas de oxidación y sulfuros.

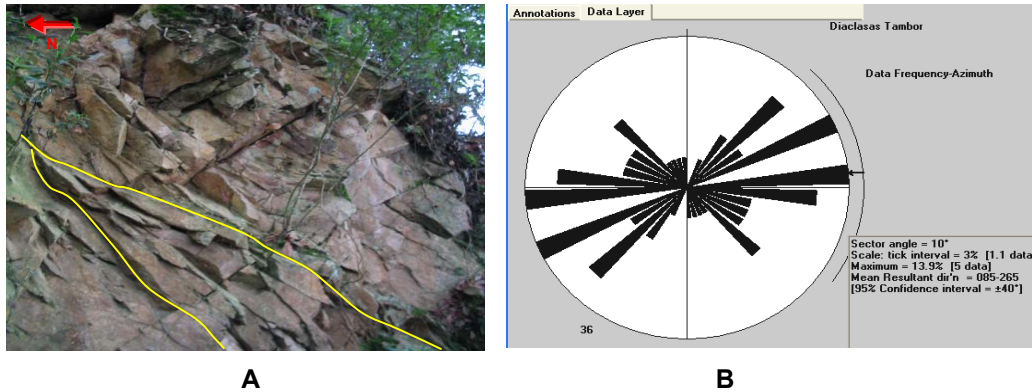


Figura 21. Comportamiento estructural de la Formación Tambor. A) Red de diaclasamiento presente en Kita. B) Distribución estadística de las diaclasas en Kita.

En la Formación Rosablanca se puede observar que debido al avanzado proceso de disolución en la roca, no se pueden determinar planos claros de diaclasamiento, en vez de diaclasas, se pueden definir como cárcavas y formas cársticas, que actúan como canales de almacenamiento y transporte de aguas subterráneas, esto se hace evidente por los nacimientos y escorrentías superficiales presentes en las calizas de Rosablanca (Figura 22)

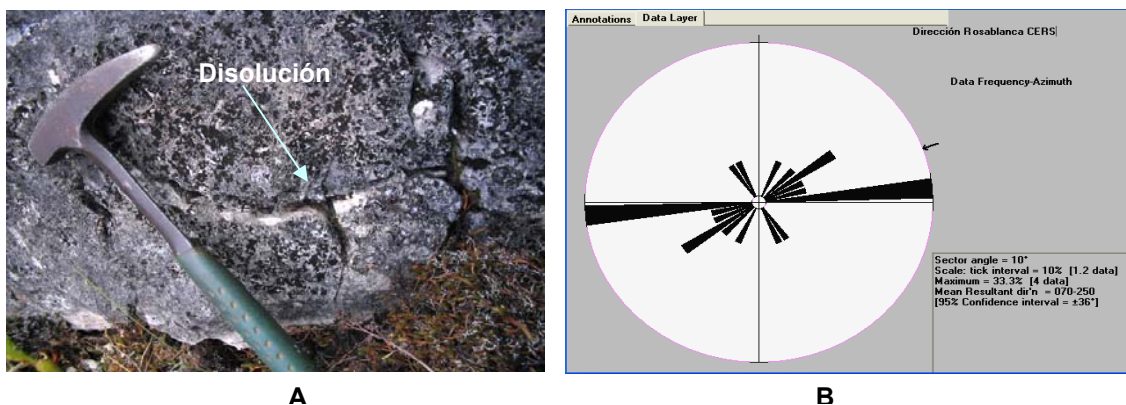


Figura 22. Comportamiento estructural a nivel mesoscópico de la Formación Rosablanca. A) Superficies de disolución de la Formación Rosablanca, B) Distribución estadística de las diaclasas de la Formación Rosablanca.

4. GEOMORFOLOGIA

En el estudio de las formas del relieve terrestre, se encuentra una serie de unidades topográficas llamadas vertientes, las cuales presentan un reflejo directo de la acción de distintos procesos responsables de transformar constantemente las superficies, dichos procesos pueden ser exógenos debidos al clima y procesos endógenos que dependen de las fuerzas internas que afectan la corteza.

En una región de laderas o vertientes se pueden observar paisajes formados por procesos denudacionales, paisajes controlados estructuralmente, paisajes fluviales, paisajes kársticos y paisajes glaciares. Dentro del primer tipo incluye los procesos continuados por un largo tiempo, como los procesos por erosión y remoción en masa. Los paisajes controlados estructuralmente están relacionados con las diferentes clases de estructuras geológicas las cuales ejercen una influencia dominante en las formas de un paisaje, los paisajes fluviales y kársticos están influenciados por la acción del agua, aunque el primero es por escorrentía superficial y el otro por aguas subterráneas; para el caso de los paisajes de origen glaciar el modelado del paisaje esta dado por el movimiento del hielo y su cobertura parcial por los depósitos glaciares.

4.1 MORFOLOGÍA EN LA CUENCA EXPERIMENTAL DE RIO SUCIO

Las laderas de la cuenca experimental de Río Sucio han sido formadas por procesos de origen interno, debido a los movimientos de levantamiento del basamento cristalino, generando las deformaciones del material litológico, dando lugar a un paisaje empinado y escarpado, con algunas pendientes largas y homogéneas; otras cortas y abruptas, las cuales bajo la influencia del clima y agentes detonantes como el agua y la gravedad han contribuido al modelado del paisaje.

Dentro del modelado de las formas y desarrollo de los paisajes, se encuentran varios tipos de depósitos o formas debidas a la erosión glacial; otros procesos mas recientes ocasionados por la acción fluvial, fluvio-glacial, karstificación e incluso las acciones antrópicas, son varios los factores que condicionan estos procesos: presencia de agua en la superficie y el subsuelo, pendiente del terreno, tipos de rocas, estructuras de las mismas (deformaciones y fracturas), permeabilidad y otros mas.

De acuerdo al tipo de relieve presente en la cuenca experimental del Río Sucio y utilizando la clasificación geomorfológica del ITC, Van Zuidam, et al (1985) se subdividió en formas de origen denudacional, formas de origen estructural, formas de origen fluvial, formas de origen kárstico y formas de origen glacial.

4.1.1 Formas De Origen Estructural (S)

En la zona se manifiestan diversas formas de este tipo, condicionadas por la tectónica y las propiedades mecánicas de las rocas; encontrándose las siguientes unidades geomorfológicas:

Unidad S7: En la microcuenca solo se observa una forma de origen estructural correspondiente a esta unidad denominada: cerro testigo

- **Cerro testigo:** son colinas aisladas por un intenso fallamiento y luego erosionada, en la zona de estudio se identifica esta geoforma al NE, predominando en esta estructura la Formación Rosablanca, delimitada por escarpes de falla.

Unidad S9: en esta unidad se encuentran los sinclinales y paredes estructurales

- **Sinclinales.** Son pliegues cóncavos originados por esfuerzos compresionales, en el área se presentan dos estructuras de esta clase: uno ubicado al NW correspondiente al Sinclinal El Alto cuyo flanco occidental se encuentra truncado por la falla La Colmena; y al Norte se localiza el Sinclinal El Gramal limitado al occidente por la falla Aposentos. (Foto 23)



Foto 23. Sinclinal El Alto, se identifica por los buzamientos que convergen hacia el centro de la estructura, encontrándose la formación Tablazo en la parte central, además se observa una barra estructural constituida por la misma formación.

- **Planos Estructurales.** Corresponden a superficies del terreno que siguen la misma dirección del buzamiento de los estratos. En la zona se encuentran asociados a trazos de fallas, corresponden principalmente a la Formaciones Tambor y Rosablanca.

Unidad S12 En esta unidad corresponden los escarpes rocosos, escarpes de fallas, valles colgados y facetas triangulares.

- **Escarpes Rocosos.** Son pendientes abruptas, verticales a casi verticales, en la que se observa la estratificación, característicos de las areniscas y las calizas; se encuentran localizados en los sectores de Figueros y Cabecera del Llano.
- **Escarpes de Falla.** Ladera de superficie rectilínea asociada con el talud del plano de falla, se puede observar un ejemplo en el trazo de la falla La Cristalina. (Foto 13)
- **Facetas triangulares.** Formas triangulares que se desarrollan sobre escarpes de falla o también a lo largo de las líneas de falla. (Foto 13)
- **Valles colgados.** Son geoformas relacionadas a un origen estructural, y a procesos de remoción fluvial del material de trituración de la actividad de las fallas asociadas a estas formas, observándose principalmente a lo largo de la falla Río Sucio y el valle de la quebrada El Chorrerón.

4.1.2 Formas De Origen Denudacional (D)

Son geoformas presentes en unidades litológicas diferentes, por lo general se caracterizan por ser un material que se mantiene coherente y se mueve a lo largo de una superficie bien definida, pueden considerarse lentos o rápidos dependiendo de la inclinación de las pendientes y el material implicado, son procesos donde actúa la gravedad y el principal agente detonante es el agua.

En la cuenca se observaron las siguientes unidades geomorfológicas:

Unidad D7 Hace referencia a los taludes de derrubios.

- **Taludes de derrubios.** Se relacionan con desprendimientos de material rocoso depositándose en la parte baja de la pendiente; algunos se encuentran en el sector de Figueros, y al Oeste de El Carbón, el material proviene principalmente de las calizas de la formación Rosablanca, (foto 24) además, sobre el cañón de la quebrada Río Sucio, con material proveniente de la formación Girón.

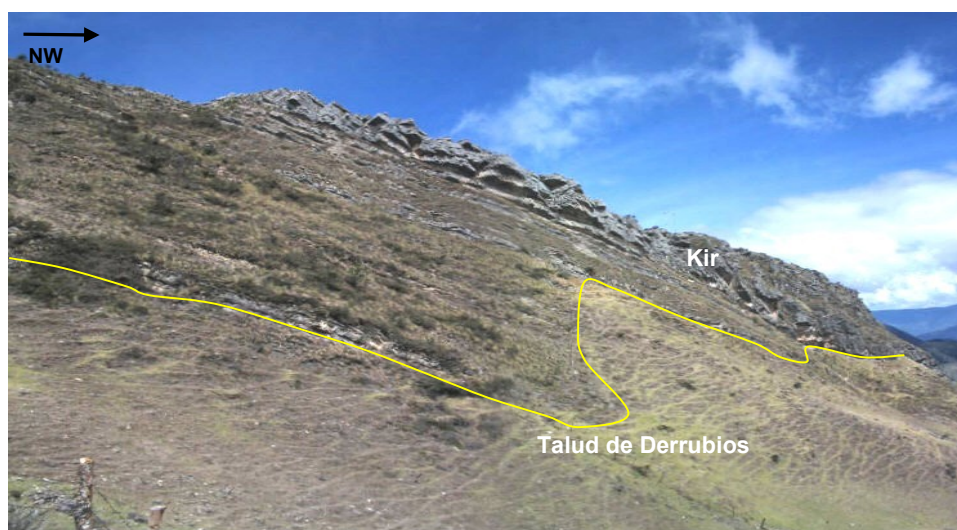


Foto 24. Talud de Derrubios, provenientes de la formación Rosablanca

Unidad D11. Esta unidad hace referencia a todos los movimientos en masa; los cuales se entienden por movimientos pendiente abajo de roca, detritos y suelo bajo la influencia directa de la gravedad, no precisan un medio de transporte; pero hay varios factores que desempeñan un papel importante en cuanto a la superación de la inercia y el

desencadenamiento de movimientos descendentes. Entre estos factores se cuentan la saturación en agua del material, el exceso de inclinación de las pendientes, la eliminación de la vegetación fija y las vibraciones del suelo debidas a terremotos.

Dentro de estos movimientos en masa presentes en la microcuenca se encuentran; deslizamientos, coladas de barro, conos de derrubios y reptación.

- **Conos de derrubios.** Son depósitos de fragmentos gruesos asociados principalmente a los escarpes de la falla La Cristalina, causados por el fracturamiento y la meteorización que presenta el cuerpo cristalino Ortoneis. (Foto 25).

- **Cicatrices de desprendimiento:** Son formas que pueden estar ligadas tanto a desprendimientos gravitacionales como a movimientos en masa. Se localizan sobre diversas litologías, los relacionados con desprendimientos gravitacionales están asociados con el Ortoneis (Pdo); en el caso de los movimientos en masa afines a estas cicatrices de desprendimiento son las coladas de barro, encontrándose en el sector de La Cueva, sobre las formaciones Tambor y Rosablanca.

- **Deslizamientos.** Son movimientos de masa relativamente lentos, ocasionados por presencia del agua, la gravedad y las propiedades inherentes de las rocas; estos se encuentran controlados por la estratificación, diaclasas y fallas. Se pueden localizar en la parte media de la cuenca en el sector de Agua Blanca sobre la Formación Tambor Y en el sector de La Casita sobre la Formación Girón. (Foto 26).



Foto 25. Cono de derrubios sobre el Ortoneis al Oeste aguas abajo de la Quebrada El Chorreron, ligada a esta forma también se presenta en la parte superior del cono una cicatriz de desprendimiento.



Foto 26. Deslizamientos en el sector de Agua Blanca, en los cuales se observan superficies curvas denominadas: coronas que son parte las zonas morfológicas de un deslizamiento; se les encuentra sobre las areniscas de Tambor.

- **Coladas de Barro:** Grandes movimientos de masa, que adquieren una forma de lengua, se encuentran en los nacimientos de la quebrada La Colmena; el material de estas coladas se encuentran como depósitos sobre las formaciones Tambor y Rosablanca, cubriendo los trazos de las Fallas La Colmena y Falla Nacimiento.
- **Reptación:** Es un tipo de movimiento de masa lento, causados por la expansión y contracción alternativas del material de superficie por humectación y sequía, se localizan en cercanías de la Finca Agua Blanca (Foto 27).



Foto 27. Procesos de reptación, identificándose por la inclinación de los árboles. Predios de la finca Agua Blanca.

4.1.3 Formas De Origen Cárstico (K)

Los principales agentes climáticos como el agua, hielo y viento son los encargados de modificar el terreno ya sea erosionándolo o acumulando material, produciendo geoformas particulares, dentro de las cuales se encuentran las producidas por procesos de karstificación como es el caso de las dolinas, cárcavas y grietas.

Unidad K9 Se observan dolinas, cárcavas y grietas.

- **Dolinas, Cárcavas, Grietas.** Ubicadas al Este del sector denominado La Casita y al Oeste de La Cruz, sobre las calizas de la formación Rosablanca; material que favorece

este tipo de procesos por acción del agua, la cual sigue líneas de debilidad de la roca, como diaclasas y planos de estratificación permitiendo estas clases de geoformas.

4.1.4 Formas De Origen Glacial (G) Se evidencian en la parte alta de la cuenca, debidas a periodos de enfriamiento por glaciares de altitud durante el cuaternario, como lo demuestran las acumulaciones observadas, como es el caso de las morrenas terminales y los depósitos fluvio-glaciares.

Unidad G7: Son depósitos heterométricos, no estratificados originados por la acción de un glaciar depositadas por valles glaciares son típicamente de forma convexas, en la cuenca se presentan en la parte alta de la cuenca, en el límite de la divisoria.

- **Morrenas Terminales.** Los depósitos morrénicos están constituidos por fragmentos subangulares y litológicamente compuestos de areniscas de la Formación Tambor y roca cristalina del Ortoneis, ligeramente compactos, se ubican en la parte trasera de la divisoria hacia el sur. (Foto 28).

Unidad G8: Son depósitos originados a partir del descongelamiento del glaciar, cuyo flujo define cauces cargados de sedimentos provenientes del mismo.

- **Depósitos fluvio-glaciares.** Constituida por fragmentos subredondeados de areniscas y ortoneis, de tamaños que no sobrepasan los 30 cm., poco cementados. Se observan entre en el Sector de la Laguna y el Alto el Vivito, y en el nacimiento de la Quebrada El Chorrerón



Foto 28. Depósitos morrénicos ubicados en la parte sur de la cuenca sobre el altiplano de Berlín.

4.1.5 Formas De Origen Fluvial (F),

Tal es el caso de los depósitos torrenciales, son acumulaciones de carácter heterométrico, posiblemente de aportes de las vertientes, ocasionados por eventos lluviosos excepcionales, estos depósitos se encuentran ubicados en el sector de La Casita, sobre el curso de la quebrada Río Sucio, constituida por fragmentos de areniscas, calizas, cuarzomonzonita, en una matriz arcillosa negra.

Todas estas formas encargadas de modelar las vertientes, a su vez han sido las generadoras de formar unas zonas de depósitos planas y amplias constituidas por material heterométrico y de composición variable en la parte media de la cuenca. Las cuales sirven como zonas de almacenamiento de agua y debido a que es un material ligeramente consolidado, bastante poroso, presenta una alta conductividad.

5. GEOFÍSICA

La Prospección Geofísica puede definirse como una técnica que permite efectuar un diagnóstico de la constitución del subsuelo por interpretación de unos documentos que son el resultado de unas mediciones y de unos cálculos.

El ámbito de aplicación de la Geofísica a la Hidrogeología abarca una gran variedad de temas; unos están relacionados con la creación de modelos hidrogeológicos para el control y gestión de acuíferos; otros se refieren a cuestiones derivadas de la contaminación por las actividades agrícolas, industriales y de residuos urbanos; otros temas están relacionados con la conservación de la Naturaleza; otras cuestiones se refieren a problemas geotécnicos, como la influencia de la oscilación del nivel freático en la estabilidad de obras; o los temas vinculados al almacenamiento superficial y subterráneo de sustancias, obras mineras, etc. En cada uno de estos temas, se requiere la determinación de una serie de parámetros; unos pueden ser de tipo geométrico: potencia, profundidad y extensión lateral de los acuíferos, acuitardos y sustrato impermeable, posición del nivel freático, etc.; otros se refieren a características hidráulicas ligadas a la litología, como la porosidad y permeabilidad, con los que poder evaluar la transmisividad y coeficiente de almacenamiento; otros son dinámicos: velocidad y dirección de flujo; otros son datos sobre recarga y extracción: conexiones entre unidades aflorantes y profundas, envejecimiento de pozos, etc. (Plata Torres, 2000)

El método resistivo es uno de los procedimientos geofísicos utilizados para obtener información acerca de las unidades del subsuelo enfocado hacia la hidrogeología, donde la resistividad es el parámetro inherente a cada material a medir.

5.1 SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL.

La finalidad del sondeo eléctrico vertical (SEV) es averiguar la distribución vertical en profundidad de las resistividades aparentes bajo el punto sondeado a partir de medidas de la diferencia de potencial en la superficie. Se utiliza sobre todo para detectar y establecer los límites de capas horizontales de suelo estratificado (Figura 23).

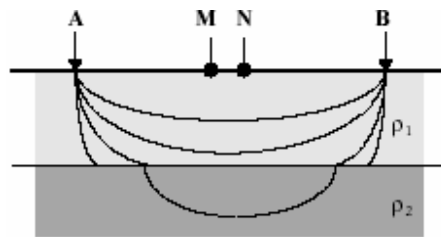


Figura 23. Principio del SEV. A medida que A y B se separan, la corriente va penetrando en las capas más profundas.

La profundidad de penetración de la corriente eléctrica depende de la separación de los electrodos inyectores AB. Si la distancia entre los electrodos AB aumenta, la corriente circula a mayor profundidad pero su densidad disminuye.

5.1.1 Sondeo Schlumberger. Dado el dispositivo Schlumberger AMNB con $AB \gg MN$, el sondeo consiste en separar progresivamente los electrodos inyectores A y B dejando los electrodos detectores M y N fijos en torno a un punto central fijo P (Figura 24). La representación de este sondeo muestra en ordenadas ρ_a ($\Omega \cdot m$) y en abscisas la distancia $AB/2$ (m). En este sondeo el efecto de las heterogeneidades irrelevantes es menor pues sólo se mueven el par de electrodos inyectores A y B.

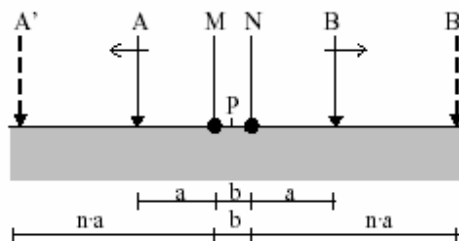


Figura 24. Sondeo Schlumberger. Los electrodos A y B se abren progresivamente mientras M y N están fijos.

5.1.2 Efectos laterales en el SEV y ambigüedades en su interpretación. Si el dispositivo electródico está próximo a un contacto vertical, las líneas de corriente serán distorsionadas por lo que ΔVMN se verá afectado por el otro medio, tanto más cuanto mayor sea la separación de los electrodos AB. Por lo tanto, la medida de la resistividad aparente en un SEV está influida por la distribución de resistividades en un cierto volumen de terreno. Esto implica que para distancias AB grandes no se sabrá si la resistividad aparente es debida a cambios de estructuras en la profundidad o a las heterogeneidades laterales por contraste de resistividades (Orellana, 1982).

Puede ocurrir que las curvas de resistividad aparente para dos casos diferentes de SEV sean idénticas si la relación entre profundidad a la que se encuentra un estrato y su resistividad permanece constante, lo que provoca una ambigüedad en la deducción del grosor de la capa y su resistividad.

Para el procesamiento de la información obtenida en campo se utilizó el programa IPI2Win desarrollado por la Universidad Estatal de Moscú, y está diseñado para la interpretación 1D de las curvas de sondeo eléctrico vertical a lo largo de un perfil. Se supone que quien va a analizar los resultados cuenta con experiencia suficiente para resolver problemas geológicos y lograr el ajuste de las curvas de sondeos teórica y calculada de los datos obtenidos en campo.

La mayor ventaja de este programa es que permite al interprete según su propio criterio darle una solución a las curvas y por eso, es posible elegir, entre un juego de soluciones equivalentes, la que mayor se ajuste tanto a los datos geofísicos (e.j. la que produzca un menor error de ajuste) como a los datos geológicos (e.j. sección geoeléctrica en correspondencia a la información geológica).

5.2 TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA

El método de la Tomografía eléctrica es una técnica de investigación de Resistividad de áreas con anomalías complejas (resistivas o conductivas); tienen como finalidad estudiar las variaciones laterales de resistividad del subsuelo. Se trata pues, de un método de investigación, muy apropiado (por su alta resolución lateral) para detectar cambios

geológicos verticales o inclinados, tales como diaclasas o fracturas. Este método es el de mayor potencial por la innovación de los instrumentos y software interpretativos.

Consiste en medir la Resistividad Aparente con un dispositivo tetraelectródico determinado y con una separación constante entre electrodos denominada "a", e ir variando las distancias entre los pares de electrodos emisor-receptor por múltiplos de un valor denominado "n", de tal forma que el resultado final será una sección de resistividad aparente a varios niveles "n" en profundidad; datos que posteriormente son tratados por medio de algoritmos matemáticos de Inversión.

La Inversión arroja como resultado una "Imagen de Resistividades y Profundidades Verdaderas" que se correlaciona con la información geológica, perforaciones, geoquímica, hidrogeología, edafología, etc. A través de la Interpretación se llega a las conclusiones del Diagnostico Ambiental, que puede ser constatada con las observaciones de campo y datos de perforaciones y/o calicatas mecánicas

Los Dispositivos más usados comúnmente para determinaciones de resistividad se muestran en la Figura 25. La elección de la "mejor" configuración para un sondeo de campo depende del tipo de estructura a ser estudiada, profundidad, la sensibilidad del amperímetro y el nivel de ruido de fondo de la zona de estudio.

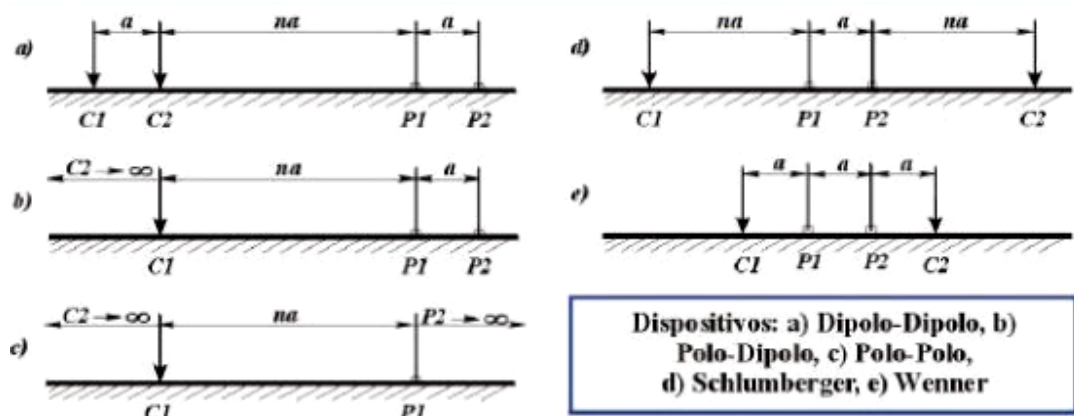


Figura 25. Diferentes dispositivos usados en Tomografías Geoelectricas.

El software utilizado para procesar los datos obtenidos en campo fue el ELETOM desarrollado por Geo & Soft Internacional y es un programa que efectúa la inversión completa 2D de perfiles eléctricos de superficies obtenidos con cualquier aparato de medida (Wenner, dipolo-dipolo, polo-dipolo, polo-polo, aparatos definidos por el usuario) con un máximo de 64 posiciones de electrodos.

ELETOM utiliza el método de los elementos finitos (FEM) en dos dimensiones para modelizar la respuesta eléctrica del subsuelo. Los elementos de la malla discreta son trapezoidales para permitir la compensación de cualquier tipo de desnivel entre las posiciones electródicas. (Figura 26)

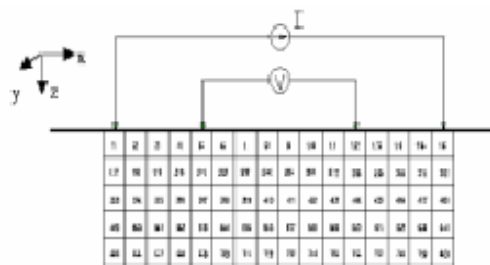


Figura 26. Discretización 2D del subsuelo.

Con este programa no es necesario especificar ningún tipo de parámetro para la construcción de la malla, tan solo la posición y la numeración de los electrodos utilizados para las medidas de campo.

El algoritmo iterativo de inversión se basa en la minimización del error cuadrático medio entre los datos de campo y los datos simulados mediante el FEM. La convergencia del algoritmo se obtiene mediante la estimación automática de un parámetro de estabilización (realizada con el método de los coeficientes recíprocos generalizados) repetida a cada iteración.

La reducción del efecto del ruido presente en los datos se obtiene con una regresión lineal iterativa que permite compensar la imposibilidad de conocer la varianza estadística de cada dato.

El resultado se obtiene en forma de una sección de resistividad real reconstruida con una precisión (en las dos dimensiones) igual a la mitad de la distancia más pequeña entre

electrodos, con la posibilidad de seleccionar la escala de tonalidad de los colores para evidenciar en modo óptimo las anomalías presentes en el terreno.

5.3 EQUIPO UTILIZADO.

Para la realización de los SEV y las tomografías se empleó un equipo transmisor convencional: “Terrameter Hidrosystem Rc12”, incluidos el amperímetro y voltímetro con electrodos de acero recubiertos con una película de cobre, 4 carretes de alambre de cobre, propiedad de la escuela de Geología de la UIS. (Foto 29)



Foto 29. Equipo Utilizado en campaña de geoeléctrica

5.4 UBICACIÓN DE SONDEOS ELECTRICOS VERTICALES Y TOMOGRAFIAS

Las técnicas geofísicas superficiales utilizadas en este proyecto fueron: los sondeos eléctricos verticales y las tomografías eléctricas. Los sitios escogidos para la realización de la campaña de geofísica en la cuenca, tenían el propósito de efectuar un diagnóstico de la constitución del subsuelo, con el fin de corroborar y determinar el comportamiento de las estructuras en profundidad, estado de la roca, espesor de los depósitos, características hidráulicas ligadas a la litología, como la porosidad y la permeabilidad, para este fin se realizaron 19 sondeos eléctricos verticales (SEV) y seis tomografías eléctricas (Figura 27).

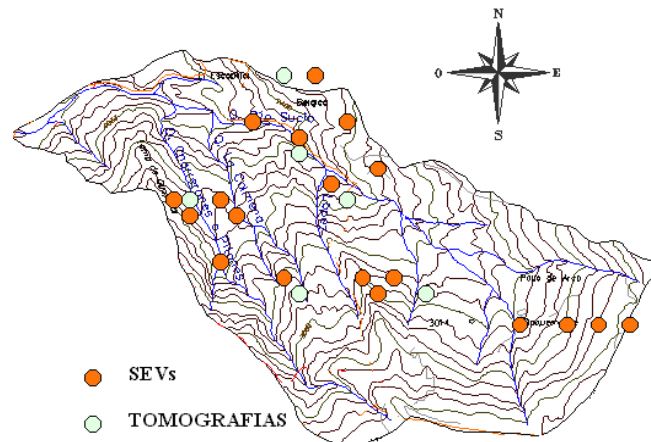


Figura 27. Mapa de Ubicación de los Sondeos Eléctricos Verticales y Tomografías.

N°	Tipo De Ensayo	Lugar	X	Y	Z	Alcance AB/2 (m)
1	Tomografía	Rosedal	1126950.0000	1288050.0000	2880	120
2	Tomografía	La Casita	1126225.0250	1288738.7400	2660.430	140
3	Tomografía	La Caiceda	1125848.9070	1288941.2370	2537.7760	90
4	Tomografía	La Valenciana	1125618.6280	1289495.9790	2465.8050	90
5	Tomografía	El Alto	1125065.3210	1288201.3970	2542.4540	110
6	Tomografía	La López	1125850	1287700	2880	100
7	SEV	Finca El Alto	1125186.1	1288165.189	2583.147	60
8	SEV	Finca El Alto	1125002.849	1288155.818	2551.062	40
9	SEV	Finca El Alto	1125177.533	1287905.223	2668.293	60
10	SEV	Finca El Alto	1125383.835	1288199.211	2655.252	40
11	SEV	Finca El Alto	1124960.714	1288250.208	2536.805	50
12	SEV	Finca La López	1125695	1287800	2850	40
13	SEV	Finca El Carbón	1126670	1288120	2810	50
14	SEV	Finca La Casita	1126128.282	1288756.644	2650.133	50
15	SEV	Finca Bélgica - La Caiceda	1125848.907	1288941.237	2537.776	60
16	SEV	Finca La Valenciana	1125815.742	1289611.928	2471.311	50
17	SEV	Finca La Aguada	1125942.826	1289534.837	2520.552	60
18	SEV	Finca La Cruz	1126155	1289095	2620	60
19	SEV	Finca El Carbón 2	1126432.106	1288218.886	2747.737	60
20	SEV	Finca El Carbón 3	1126421.506	1288009.682	2781.719	60
21	SEV	Arriba de la Laguna	1128513.346	1287526.231	3424.615	70
22	SEV	La Laguna	1128346.474	1287212.631	3403.064	80
23	SEV	Las Cruces	1128100.407	1287274.625	3332.635	
24	SEV	Entre Agua Blanca y Las Cruces	1127722.78	1287347.841	3130	60

Tabla 7. Ubicación Sondeos Eléctricos Verticales y Tomografías Eléctricas

5.5 INTERPRETACION DE LOS SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES (SEV'S)

Los SEV's fueron realizados con un tendido tipo Schlumberger con un AB/2 promedio de 60 mts, la ubicación del punto central se escogió a partir de la complejidad estructural de ciertas zonas.

Con los resultados arrojados por el Ipi2win 2000 se obtiene una curva de campo más refinada y además, la distribución de unidades geoelectricas en subsuperficie. Mediante la interpretación de las curvas de resistividad para cada sondeo y conociendo los valores de las resistividades de los diferentes tipos de materiales del subsuelo y la geología del área, se identificaron las siguientes unidades geoelectricas:

5.5.1 Sondeo Eléctrico 1

Ubicación: Finca El Alto; X = 1125186.1000; Y = 1288165.1890; Z = 2583.1470 m.s.n.m.

Este SEV se llevo a cabo sobre la quebrada La Colmena, cuyo curso se ve directamente afectado por la falla del mismo nombre, poniendo en contacto rocas de las Formaciones Tambor (Kita) y Tablazo (Kit). Ver anexos

Descripción

Capa 1: Deposito heterogéneo saturado con un espesor de 4.0063 m

Capa 2: Arenisca muy meteorizada, saturada con un espesor de 6.7576 m

Capa 3: Intercalación niveles finos / areniscas

N° Capas	1	2	3
Pa promedio (ohm-m)	118.32	59.115	277.28
h (m)	4.0063	6.7576	
d (m)	4.0063	10.764	

Tabla 8. Tabla de resultados para SEV 1

5.5.2 Sondeo Eléctrico 2

Ubicación: Casa El Alto; X = 1125002.8490, Y = 1288155.8180; Z = 2551.0620 m.s.n.m

El SEV se desarrollo sobre la Formación Tambor, muy cercanos a la falla La Cristalina, por lo tanto en el contacto fallado Ortoneis -Tambor, el objetivo principal de este fue averiguar el comportamiento del Ortoneis a profundidad, y ver si está funcionando como sello o como vía de transporte, pero debido a la topografía del área, no se pudo realizar el SEV con un AB/2 mayor de 40m.

N° Capas	1	2
Pa promedio (ohm-m)	132	631
h (m)	11.1	
d (m)	11.1	

Tabla 9. Tabla de resultados para SEV 2

Descripción

Capa 1: Cuarzoarenisca porosa con algún grado de saturación con un espesor de 11.1m

Capa 2: Arenisca bien consolidada.

5.5.3 Sondeo Eléctrico 3

Ubicación: Finca El Alto; X = 1125177.5330, Y = 1287905.2230, Z = 2668.2930 m.s.n.m

El SEV se desarrollo sobre la formación Tambor con un AB/2 de 60 m, muy cercano a las fallas Cristalina y Guayabal, Al procesar la información de profundidad y como se puede ver en la Figura 28 no se observa ningún cambio debido al comportamiento de las fallas, se diferencian tres niveles dentro de la misma formación y diferenciándose cuatro unidades geoelectricas en el sondeo.

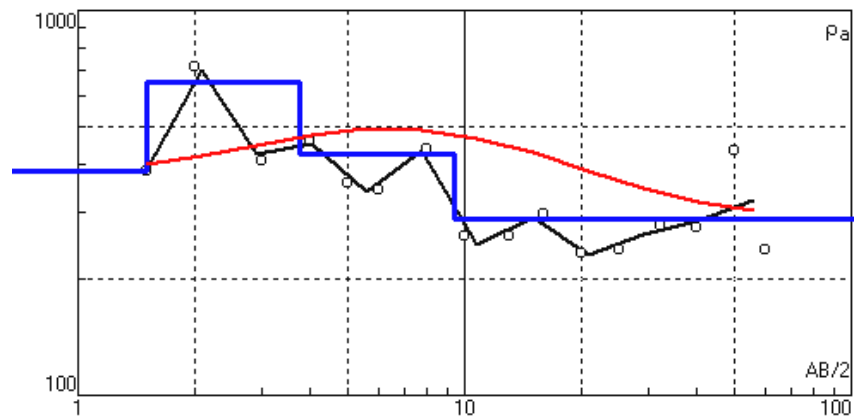


Figura 28. Curva de campo y unidades geoelectricas del SEV 3.

N° Capas	1	2	3	4
Pa promedio (ohm-m)	382	651	423	287
h (m)	1.5	2.25	5.63	?
d (m)	1.5	3.75	9.38	?

Tabla 10. Tabla de resultados para SEV 3

Descripción

Capa 1: deposito seco con un espesor de 1.5m

Capa 2: Arenisca no saturada con un espesor de 2.25m

Capa 3: Arenisca con presencia de agua con un espesor de 5.63m

Capa 4: Arenisca saturada

5.5.4 Sondeo Eléctrico 4

Ubicación: Finca El Alto X = 1125383.8350; Y =1288199.2110; Z = 2645

El SEV se desarrollo sobre la Formación Tambor, cerca de una falla normal con dirección NW-SE, los datos de resistividad nos muestra dos unidades geoelectricas que definen dos niveles de areniscas una con mayor porosidad dando los valores mas bajos de resistividad

N° Capas	1	2
Pa promedio (ohm-m)	140	238
h (m)	15.9	
d (m)	15.9	

Tabla 11. Tabla de resultados para SEV 4

Descripción

Capa 1: Arenisca parcialmente saturada con un espesor de 15.9m

Capa 2: Arenisca no saturada

5.5.5 Sondeo Eléctrico 5

Ubicación: Finca El Alto. X = 1125383.8350; Y = 1288199.2110; Z = 2655.2520

Debido al contraste morfológico de la zona, se pretendía definir el comportamiento estructural y litológico, este punto se escogió por ser el punto medio del bloque dominado por la falla La Colmena. Como resultado el SEV muestra la continuidad de la Formación Tambor

N° Capas	1	2
Pa promedio (ohm-m)	175	372
h (m)	1.97	
d (m)	1.97	

Tabla 12. Tabla de resultados para SEV 5

Descripción

Capa 1: Depósito saturada con un espesor de 1.98 m

Capa 2: Intercalación de Areniscas poco porosas y muy compactas.

5.5.6 Sondeo Eléctrico 6

Ubicación: Finca El Alto X = 1124960.7140; Y = 1288250.2080; Z = 2536.8050

Con el objetivo de definir el contraste de resistividades ofrecido por la formación Rosablanca y su comportamiento estructural, en el sector de El Alto, se llevó a cabo un tendido con un AB/2 de 50 m.

N° Capas	1	2	3
Pa promedio (ohm-m)	372	225	546
h (m)	8.61	30	
d (m)	8.61	38.6	

Tabla 13. Tabla de resultados para SEV 6

Descripción

Capa 1: Caliza fracturada seca con un espesor de 8.61 m

Capa 2: Caliza fracturada, parcialmente saturadas con un espesor de 30 m.

Capa 3: Caliza sana.

5.5.7 Sondeo Eléctrico 7

Ubicación: Finca La López. X =1125695, Y =1287800, Z =2850 m.s.n.m

Este SEV se desarrolló sobre la Formación Tablazo, con un AB/2 de 40 m, observándose posiblemente un trazo de falla, debido a que se observa una repetición de las unidades geoelectricas (figura 29), niveles finos con niveles calcáreos.

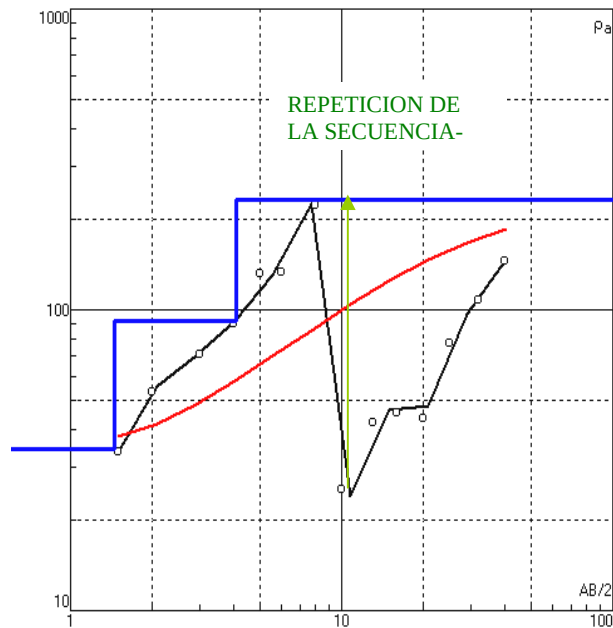


Figura 29. Curva de campo y unidades geoelectricas del SEV 7 .

N° Capas	1	2	3
Pa promedio (ohm-m)	34.4	91.8	232
h (m)	1.45	2.63	6.13
d (m)	1.45	4.08	10.2

Tabla 14. Tabla de resultados para SEV 7

Descripción

Capa 1: Depósito con un espesor de 1.45m

Capa 2: Lodolitas con un espesor de 2.63m

Capa3: Margas con un espesor de 6.13m hasta la línea de falla. Después de este límite se presenta una repetición de estas dos últimas capas.

5.5.8 Sondeo Eléctrico 8

Ubicación: Finca El Carbón; X = 1126670, Y = 1288120, Z = 2810

Se realizó sobre un depósito torrencial y de derrubios, con un AB/2 de 50 m, se diferencian 3 unidades geoelectricas, una superficial correspondiente al depósito saturado, la segunda unidad se correlaciona con areniscas de la Formación Tambor y la

tercera unidad presenta un ascenso en los valores de resistividad, propios de rocas cristalinas en este caso la cuarzomonzonita de Santa Bárbara (Figura 30).

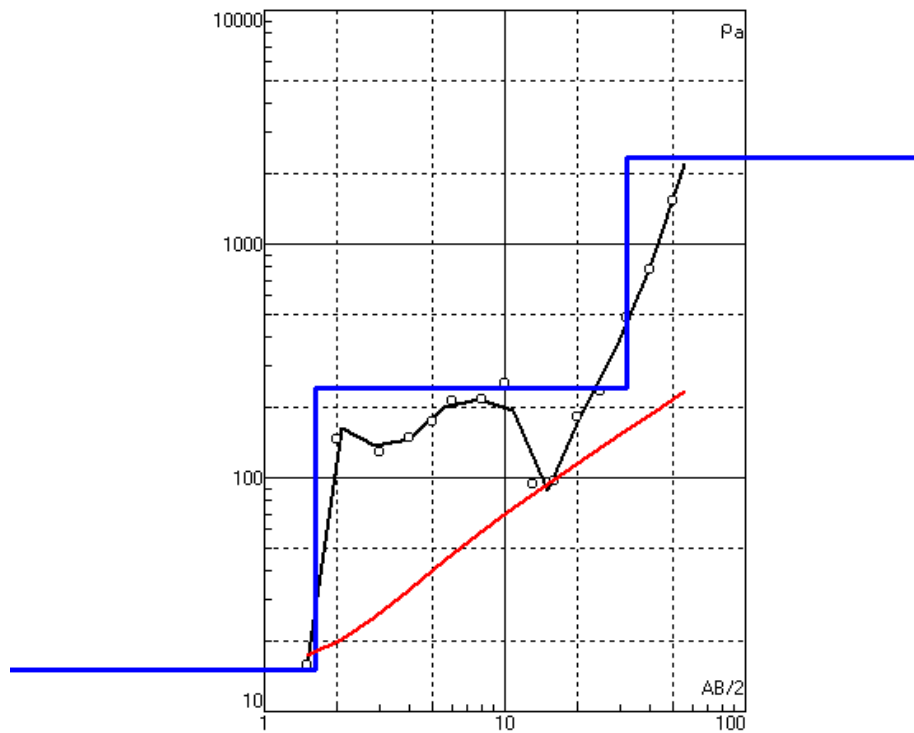


Figura 30. Curva de campo y unidades geoelectricas del SEV 8.

N° Capas	1	2	3
Pa promedio (ohm-m)	15.1	242	2344
h (m)	1.63	30.5	
d (m)	1.63	32.1	

Tabla 15. Tabla de resultados para SEV 8

Descripción

Capa 1: Depósito de material heterogéneo, saturado con un espesor de 1.63m

Capa 2: Areniscas con un espesor de 30.5m

Capa 3: Cuarzomonzonita

5.5.9 Sondeo Eléctrico 9

Ubicación: Finca La Casita X = 1126128.2820; Y = 1288756.6440; Z = 2650.1330

Este sector se ve afectado por un juego de fallas asociadas al comportamiento de la falla Río Sucio, y por lo tanto, se ven encontrados dos bloques estructurales, uno constituido por la Formación Tablazo y el otro por la Formación Girón; al llevar a cabo este sondeo se pretendía definir a cierta profundidad este contraste.

N° Capas	1	2
Pa promedio (ohm-m)	47.9	499
h (m)	2.94	
d (m)	2.94	

Tabla 16. Tabla de resultados para SEV 9

Descripción

Capa 1: Depósito parcialmente saturado con un espesor de 2.94 m

Capa 2: Intercalación de areniscas – calizas.(ver curva de campo en anexos)

5.5.10 Sondeo Eléctrico 10

Ubicación: Finca Bélgica - la Caiceda X = 1125848.9070; Y = 1288941.2370; Z = 2537.7760

El lugar de este tendido es un valle amplio y poco profundo, relacionado estructuralmente con la falla El Gramal; hidrogeológicamente el depósito se caracteriza por estar saturado.

N° Capas	1	2	3
Pa promedio (ohm-m)	29.8	219	1343
h (m)	2.94	15.5	
d (m)	2.94	17.3	

Tabla 17. Tabla de resultados para SEV 10

Descripción

Capa 1: Depósito heterogéneo, saturado con un espesor de 2.94 m

Capa 2: Niveles de areniscas y calizas disueltas, con un espesor de 15.5

Capa 3: Roca sana, insaturada.

5.5.11 Sondeo Eléctrico 11

Ubicación: Finca La Valenciana X = 1125815.7420; Y = 1289611.9280; Z = 2471.3110
Este SEV se definió a partir de la necesidad de corroborar la disposición del Sinclinal El Gramal, especialmente la existencia de la Formación Paja.

N° Capas	1	2	3	4
Pa promedio (ohm-m)	65.3	43.5	124	587
h (m)	3.06	4.59	16.1	
d (m)	3.06	7.66	23.7	

Tabla 18. Tabla de resultados para SEV 11

Descripción

Capa 1: Depósito saturado con un espesor de 3.06 m

Capa 2: Niveles roca de grano fino de espesor de 4.59

Capa 3: Niveles de Areniscas seca con 16.1 m de espesor

Capa 4: Caliza sana

5.5.12 Sondeo Eléctrico 12

Ubicación: Finca La Aguada X = 1125942.8260; Y = 1289534.837; Z = 2520.5520

Al igual que el sondeo anterior, este tendido se llevo a cabo con la finalidad de definir la disposición estructural y litológica del sinclinal El Gramal.

N° Capas	1	2	3	4
Pa promedio (ohm-m)	55	43.5	124	178
h (m)	3.06	4.59	16.1	
d (m)	3.06	7.66	23.7	

Tabla 19. Tabla de resultados para SEV 12

Descripción

Capa 1: Depósito saturado con un espesor de 3.06 m

Capa 2: Niveles roca de grano fino de espesor de 4.59

Capa 3: Niveles de Areniscas seca con 16.1 m de espesor

Capa 4: Caliza con disolución.

5.5.13 Sondeo Eléctrico 13

Ubicación: Finca La Cruz; X = 1126155, Y = 1289095, Z = 2620

Siguiendo con la línea de los sondeos 11 y 12, este SEV se hacia necesario para ubicar la formación Paja del Sinclinal El Gramal, esperábamos por lo tanto niveles con baja resistividades suprayacido por una unidad que presentará contrastes resistivos.

N° Capas	1	2	3
Pa promedio (ohm-m)	10.2	191	7897
h (m)	2.07	7.54	
d (m)	2.07	9.61	

Tabla 20. Tabla de resultados para SEV 13

Descripción

Capa 1: Depósito saturado con un espesor de 2.07

Capa 2: Nivel de areniscas con un espesor de 7.54 m

Capa 3: Caliza sana

5.5.14 Sondeo Eléctrico 14

Ubicación: Camino Casita – López; X = 1126432.1060; Y = 1288218.8860; Z = 2747.7370

Por ser una de las áreas de mayor extensión del depósito, se planteo este sondeo con la finalidad de definir el espesor y el grado de saturación, además se quería cómo afectaba la falla Río Sucio a la Formación Tambor, en este lugar.

N° Capas	1	2	3
Pa promedio (ohm-m)	122	806	325
h (m)	5	9.85	
d (m)	5	14.9	

Tabla 21. Tabla de resultados para SEV 14

Descripción

Capa 1: Depósito parcialmente seco con un espesor de 5 m

Capa 2: Nivel de areniscas compactas con un espesor de 9.85 m

Capa 3: Areniscas con menor resistividad que el nivel anterior, debido a la trituration ocasionada por la falla.

5.5.15 Sondeo Eléctrico 15

Ubicación: Finca El Carbón X = 1126421.5060; Y = 1288009.6820; Z = 2781.7190

Este sondeo junto con el SEV 16 constituye una línea que atraviesa el depósito de la Finca El Carbón, que es uno de los más importantes, a la hora de hablar de contribución a la Quebrada Río Sucio.

N° Capas	1	2
Pa promedio (ohm-m)	97.5	1030
h (m)	5.54	
d (m)	5.54	

Tabla 22. Tabla de resultados para SEV 15

Descripción

Capa 1: Depósito parcialmente saturado con un espesor de 5.54 m

Capa 2: Nivel de areniscas compactas, que presenta una repetición de secuencia, debido a la falla que se encuentra aproximadamente a los 20 m.

5.5.16 Sondeo Eléctrico 16

Ubicación: Altiplano de Berlín; X = 1128513.3460; Y = 1287526.2310; Z = 3424.6150

El objetivo de este sondeo fue definir el espesor de la zona de alteración del neis y su relación discordante con la Formación Tambor.

N° Capas	1	2
Pa promedio (ohm-m)	3716	63719
h (m)	9.25	
d (m)	9.25	

Tabla 23. Tabla de resultados para SEV 15

Descripción

Capa 1: Cuarzoareniscas compactas, secas, con un espesor de 9.25 m

Capa 2: Ortoneis alterado, a los 50 mts de profundidad se nota un bajón de resistividades, debida a una zona de diaclasamiento, correlacionable con la aparición de los nacimientos de la parte central de la CERS.

5.5.17 Sondeo Eléctrico 17

Ubicación: Altiplano de Berlín, La Laguna X = 1128346.4740; Y = 1287212.6310; Z = 3403.0640

Este tendido se llevo a cabo, con el fin de relacionar la presencia de la laguna, con los niveles freáticos de la zona.

N° Capas	1	2
Pa promedio (ohm-m)	367	2106
h (m)	4.06	
d (m)	4.06	

Tabla 24. Tabla de resultados para SEV 15

Descripción

Capa 1: Ortoneis diaclasado y alterado, con un espesor de 4.06 m.

Capa 2: Ortoneis sano, a los 15 m de profundidad se nota una baja en los datos de resistividades, debida a las variaciones composicionales del neis.

5.5.18 Sondeo Eléctrico 18

Ubicación: Las Cruces X = 1128100.4070; Y = 1287274.6250; Z = 3332.6350

Junto con los SEV's 16,17 éste se llevó a cabo para definir el limite entre el metamórfico alterado y el sano.

N° Capas	1	2	3
Pa promedio (ohm-m)	629	3426	31122
h (m)	4.02	16.2	
d (m)	4.02	20.2	

Tabla 25. Tabla de resultados para SEV 15

Descripción

Capa 1: Ortoneis muy alterado, las bajas resistividades corresponden a niveles arcillosos.

Capa 2: Ortoneis con un grado menor de alteración y diaclasamiento, comparado con la capa 1.

Capa 3: Ortoneis sano

5.5.19 Sondeo Eléctrico 19

Ubicación: Agua Blanca X = 1127722.7800; Y = 1287347.8410; Z = 3128.4980

Este SEV se llevo a cabo, con el fin de definir el espesor del depósito, ya que este se constituye como una zona de almacenamiento de agua, que posteriormente va a hacer su aporte al caudal del Río Sucio.

N° Capas	1	2	3
Pa promedio (ohm-m)	283	1989	12116
h (m)	5.99	32.9	
d (m)	5.99	38.9	

Tabla 26. Tabla de resultados para SEV 15

Descripción

Capa 1: Depósito constituido por aportes de las formaciones de Ortoneis, Girón, y Tambor, con muy buena porosidad y está parcialmente saturado, con un espesor de 5.99 m.

Capa 2: Nivel de Areniscas compactas, inalteradas.

Capa 3: Ortoneis sano.

5.6 TOMOGRAFÍAS ELECTRICAS

Las tomografías eléctricas efectuadas en la cuenca, nos presenta un perfil del subsuelo, diferenciando unidades resistivas; el rango de resistividades es fijado durante el procesamiento de los datos, para lo cual se utilizó el software ELETOM, el cual procesa la información por medio de algoritmos matemáticos de inversión, arrojando como resultado una imagen de la distribución de las resistividades en el subsuelo y profundidades verdaderas, que se correlaciona con la geología.

5.6.1 Tomografía El Rosedal

Ubicación: Mesa El Rosedal. X = 1126950.0000; Y = 1288050.0000 ; Z = 2880

Siendo los depósitos las unidades con mayor importancia hidrogeológica en la cuenca, era necesario determinar las profundidades y algunas propiedades hidráulicas; por lo tanto se realizó una de las tomografías en el depósito mas sobresaliente, ubicado en la parte media de la CERS (Figura 31).

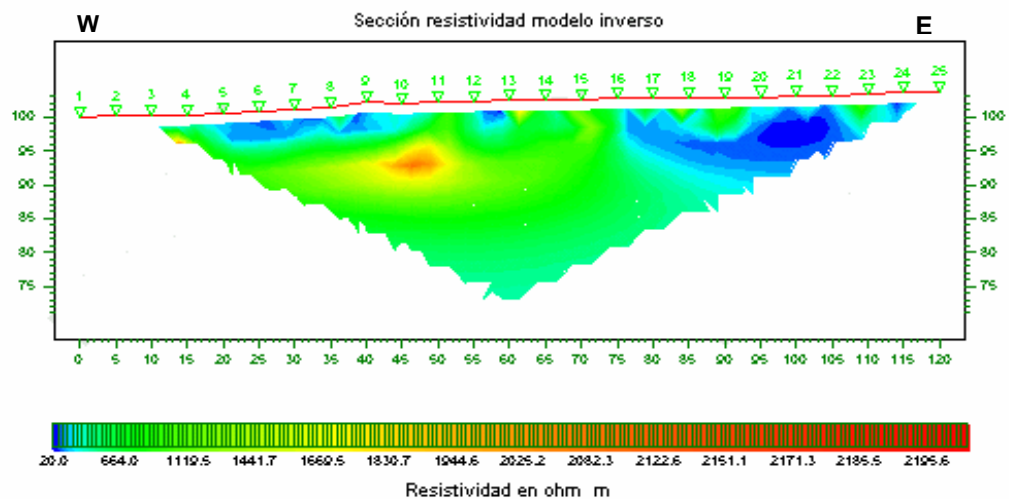


Figura 31. Tomografía Rosedal, se observan unidades de resistividades aparentes muy bajas (azul) correspondiendo a un depósito saturado.

La sección de la tomografía de Rosedal muestra una zona de depósitos muy saturada con resistividades que oscilan entre los 20-100 ohm-m variando su profundidad de aproximadamente 5m hacia el oeste de la tomografía, hasta casi 15 m al Este muy

cercanos a los trazos de la falla Barro Negro que actúa como cauce de la Quebrada El Vivito, encontrándose sobre una unidad geoelectrica muy impermeable con resistividades aparentes altas entre 300-2200 ohm-m características de las areniscas no saturadas de la Formación Tambor

5.6.2 Tomografía El Alto.

Ubicación: Finca El Alto. X = 1125065.3210; Y = 1288201.3970; Z = 2542.4540

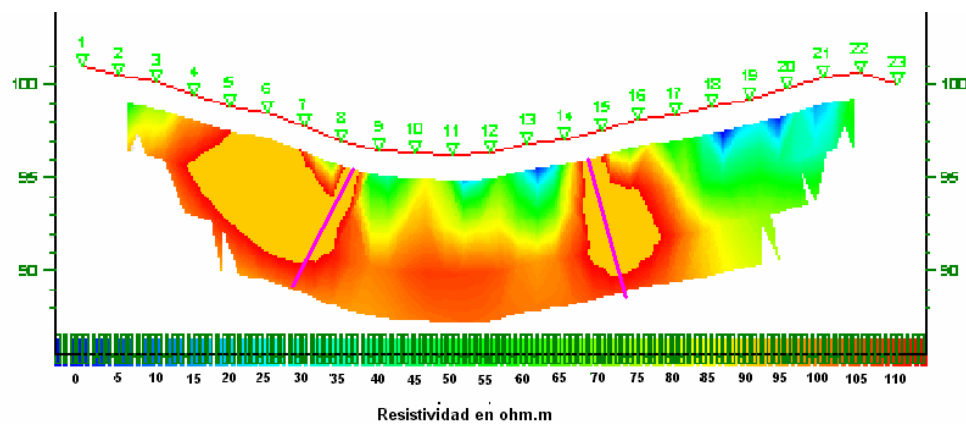


Figura 32. Tomografía El Alto.

Se puede observar un depósito de 4 m con una resistividad media de 20 ohm.m, además se definen zonas de saturación con resistividad menores a 20 ohm.m de color azul oscuro (Figura 32).

Hacia la parte central de la sección de resistividad se presentan dos trazos de falla, que se comportan como zonas de percolación de agua, por la disminución de resistividades a lo largo de los trazos (en fucsia) que contrasta con las altas resistividades de la zona vecina con resistividades aproximadas de 110 ohm.m.

5.6.3 Tomografía La López.

Ubicación: Finca La López. X = 1125850; Y = 1287700; Z = 2880

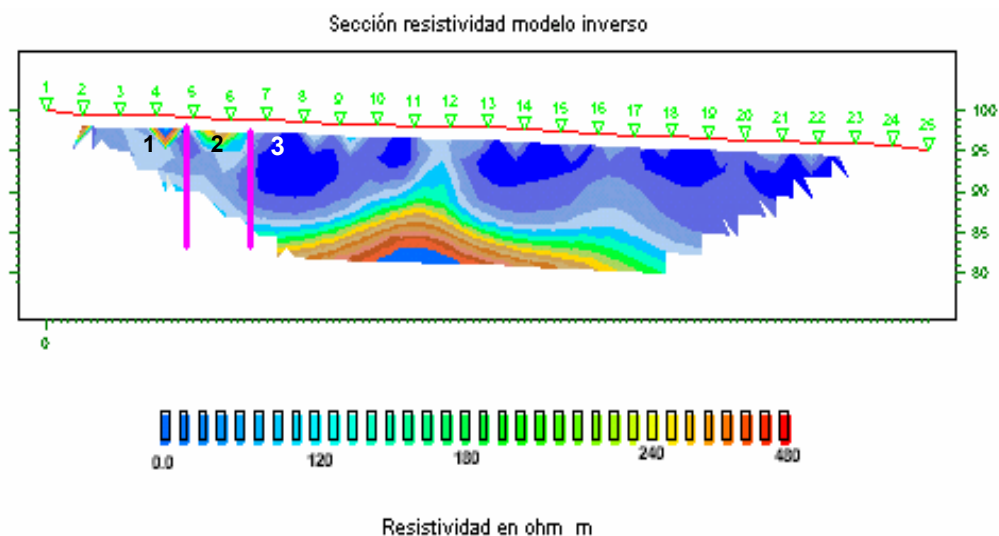


Figura 33. Tomografía La López.

En la sección de resistividad se puede definir un depósito de espesor de 7 – 10 m con una resistividad media de 30 ohm.m. Entre los sectores 2 y 3 se nota un desplazamiento de las unidades geoelectricas, donde se puede definir una falla geológica; por otro lado, los sectores 1 y 2 presentan un drástico cambio de resistividades a una misma profundidad, definiéndose otra falla (figura 33). Este juego estructural afecta el movimiento del agua, facilitando la percolación.

5.6.4 Tomografía La Casita.

Ubicación: Finca El Alto. X = 1126225.0250; Y = 1288738.7400; Z = 2660.430

Se observa un deposito con una profundidad aproximada de 12m desde la superficie, con resistividades aparentes promedio entre 80 y 150 ohm-m, también se diferencia la presencia de una falla, que al comparar con datos de superficie corresponde con el trazo de la falla La Caiceda, la cual provoca una ruta de precolación preferencial del agua (figura 34). La zona de saturación se encuentra en las calizas de la Formación Tablazo, alcanzando profundidades hasta de 20m por la facilidad de disolución de la roca al contacto con el agua.

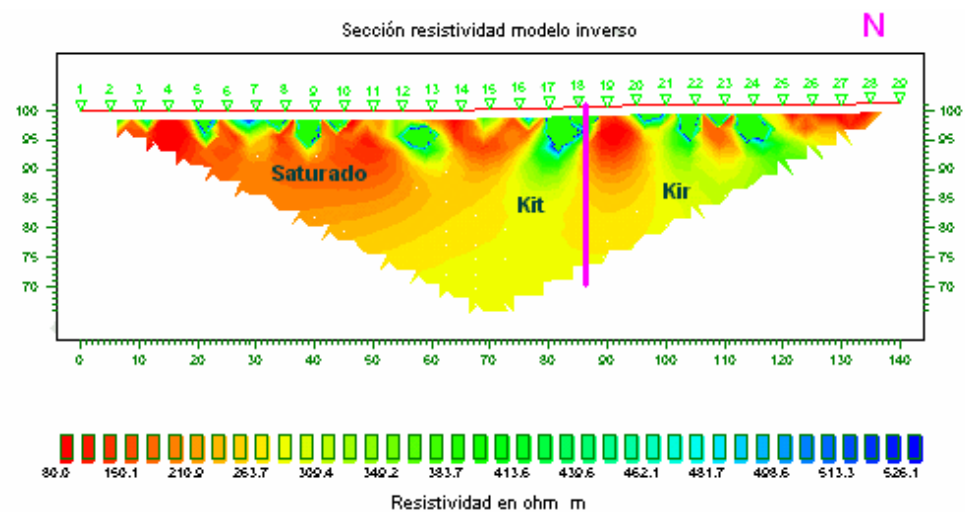


Figura 34. Tomografía La Casita.

5.6.5 Tomografía La Caiceda.

Ubicación: Finca La Caiceda. X = 1125848.9070; Y = 1288941.2370; Z = 2537.7760.

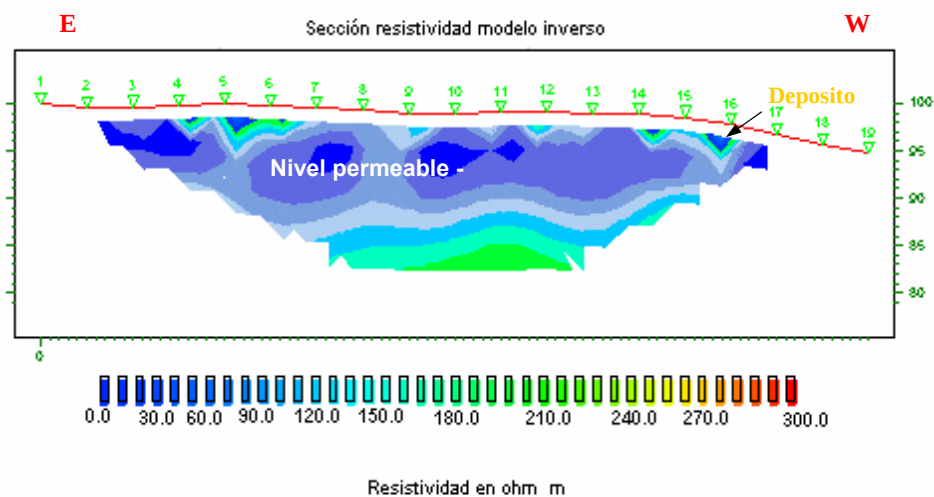


Figura 35. Tomografía La Caiceda.

Se observa varias zonas de depósitos que varían entre 1 a 3m de profundidad con resistividades de 60ohm-m parcialmente saturados, ubicados en la zona cóncava de una serie de plegamientos posiblemente causados por la acción de las fallas La Caiceda y Río

El punto 1 (figura 35) ubicado al Este de la tomografía, es muy cercano a una laguna de falla, originada por el trazo de la falla La Caiceda; la cual esta siendo alimentada por un flujo subterráneo dado que los niveles freáticos se encuentran mas elevados. Por otro lado la laguna podría estar aportando agua al nivel permeable-saturado mostrado en la Tomografía.

Ubicación: Finca La Valenciana. X = 1125618.6280; Y = 1289495.9790; Z = 2465.8050

Figura 36. Tomografía La Valenciana.

6. ANÁLISIS DE SEDIMENTOS

Las aguas que fluyen en corrientes naturales y ríos tienen la habilidad de socavar los lechos de los canales, de transportar partículas y de depositar los materiales modificando así la topografía de los lechos. En general, el transporte de sedimentos es un termino utilizado para el transporte de material (limo, arena, grava, canto rodado) en ríos y corrientes. El material transportado se conoce como carga de sedimento. Se hace distinción entre carga de lecho y la carga en suspensión. La carga de lecho se caracteriza por granos que ruedan a lo largo del lecho, mientras que la carga en suspensión se refiere a granos mantenidos en suspensión debido a la turbulencia.

Para el transporte de carga de lecho los modos básicos del movimientos de la partículas son: Rodante, Deslizante y Por Saltación.

El transporte de carga de lecho se encuentra asociado muy de cerca con las fuerzas intergranulares. Este ocurre en una región delgada del fluido cerca del lecho (algunas veces conocida como capa de saltación).

Durante el movimiento de carga de lecho los granos en movimiento se encuentra sometido a fuerzas gravitacionales hidrodinámicas e intergranulares. A la inversa el peso de la carga de lecho se transfiere como un esfuerzo normal a los granos (inmóviles) del lecho.

El sedimento en suspensión puede ser descrito como el movimiento de partículas de sedimento durante el cual las partículas se encuentra rodeadas por el fluido. Los granos se mantienen dentro de la masa de fluido mediante agitación turbulenta sin contacto frecuente con el lecho. La suspensión de sedimentos ocurre cuando el flujo turbulento es lo suficientemente fuerte para balancear el peso de las partículas. El transporte de materia suspendida ocurre por una combinación de difusión turbulenta advectiva y convección, la difusión advectiva caracteriza el movimiento aleatorio y mezcla de partículas a través de toda la profundidad del agua sobreimpuesta al movimiento longitudinal del flujo. En

una corriente con partículas más pesadas que el agua la concentración de sedimentos es mayor cerca al fondo y la difusión turbulenta induce una migración de los granos hacia arriba a regiones de concentraciones mas bajas.

Uno de los objetivos al realizar una campaña de geología era definir algunos parámetros que rigen el gran aporte de sedimentos a la corriente de la Quebrada Río Sucio, a la altura del sitio La Casita.

Los sedimentos en la corriente de la Quebrada Río Sucio son producto principalmente del fenómeno de erosión, dicho proceso comienza con las caída del agua sobre la superficie de los depósitos que desde el punto de vista geomorfológico se generaron a partir de eventos torrenciales y de vertiente (foto 30 A y B), por lo tanto, el material que los constituye es heterométrico embebido en una matriz de tamaño de grano fino con aporte orgánico.

Debido al cambio drástico de las pendientes en el cauce de la Quebrada Río Sucio, el agua al caer genera dispersión de las partículas que están formando los depósitos, las cuales empiezan a formar parte de la carga en suspensión. Posteriormente en el transcurso de la quebrada las pendientes empiezan a suavizarse y por ende la disminución de la energía de la corriente, iniciando el proceso de depositación del material fino hacia las laderas del cauce. Una de las características observadas en el sector de contaminación por parte de los sedimentos a la quebrada Río Sucio, es la densidad de estos en la corriente, empezando un proceso de compactación de las partículas finas denominada floculación.



Foto 30. Depósito del Cañón del Río Sucio. Lugar de recolección de sedimentos M2.
 A) Aguas antes de ser contaminadas por los sedimentos producidos en el depósito, B) Aguas contaminadas, depósito con gran aporte de sedimentos oscuros.

Para poder llevar a cabo una evaluación, ante todo, cualitativa del tipo de mineralogía presente en estos sedimentos y teniendo en cuenta que la fracción contaminante se relaciona con las partículas de menos de $2\mu\text{m}$ de tamaño de grano (arcilla); se formularon tres análisis de difracción de rayos X, realizados por el Grupo de Investigación en Química Estructural, Laboratorio de Difracción de Rayos X, adscrito a la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander. Este tipo de pruebas son las más acertadas para definir la composición de una carga sedimentaria que presente gran proporción de dicha granulometría.

Los criterios para escoger estas tres muestras fueron: correlacionar mineralógicamente el material del depósito con la roca parental, que está localizada en el camino hacia López, y que se constituye como un shale negro con algún aporte de carbonatos y sulfuros debidos al ambiente de depositación, propios de la formación Paja (foto 31A). Por otra parte, también es de vital importancia los cambios que se pudieran producir en la constitución mineralógica de la carga sedimentaria, fracción arcilla, siendo estos minerales los constituyentes principales de un shale, las cuales al entrar en contacto con agua van a producir una serie de reacciones e intercambios catiónicos, propios de su estructura laminar, y que por lo tanto, condicionan la cohesión del material, todo esto

después de un recorrido considerable, en nuestro caso hasta el sitio denominado La Batea (foto 31B).



A **B**
Foto 31. Recolección de muestras de sedimentos. A) M1, sedimentos de la roca parental en el camino López – El Carbón. B) La Batea, sitio de recolección M16

6.1 PROCEDIMIENTO.

6.1.1 Recolección de muestras. Esta etapa se llevó a cabo 1 día antes del análisis, para que la mineralogía no se viera afectada por cambios drásticos de humedad; se tomaron 16 muestras de sedimentos, precipitados y roca, relacionados con la Formación Paja, el depósito de La Casita, y la carga sedimentaria de la Quebrada Río Sucio, de las cuales se escogieron tres de las zonas más representativas por su aporte de material: **Camino López – Carbón, Depósito, La Batea.**

Estas muestras se tomaron teniendo en cuenta la forma como fueron transportadas y luego depositadas, ya que estos dos parámetros son particulares para los sedimentos de grano fino; por un lado los niveles de energía en los cuales se deposita las fracciones limo y arcilla son muy bajos, característicos de zonas de muy baja pendiente, además este tipo de partículas se transportan en la carga que va en suspensión por el medio líquido (figura 37), con el que interactúa modificando las características físicas y química, tanto del agua como de las mismas arcillas.

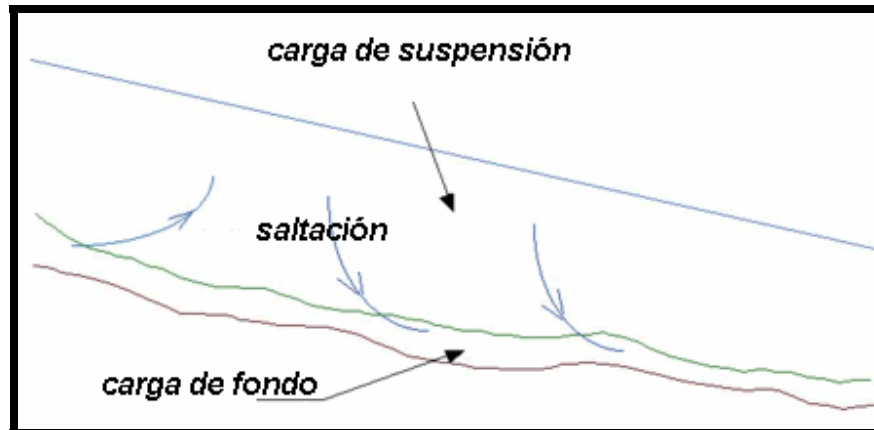


Figura 37. Mecanismos de transporte de sedimentos.

A partir de estos parámetros y teniendo en cuenta que, el cauce de la quebrada Río Sucio presenta cambios drásticos de pendiente, originados por el patrón estructural regional y que se encuentra sedimentológicamente influenciado por la presencia de depósitos de material inconsolidado, más el contraste de formaciones a lado y lado del cañón; se define una relación directa entre la morfología del cañón, la sedimentología y la mineralogía, y cómo dicha relación influencia la contaminación de la Quebrada Río Sucio, para lo cual se tomaron las siguientes muestras:

LOCALIZACIÓN	SITIO DE RECOLECCIÓN	DESCRIPCIÓN
2830 m.s.n.m Camino Finca La López – El Carbón 	M1. Muestra de la Formación Paja, In Situ.	Arcillolita laminada, de color negro, inalterada. Difracción de Rayos X
2800 m.s.n.m Camino Finca La López – El Carbón	M2. Muestra de la Formación Paja, In Situ.	Arcillolitas laminada, de color negro, con superficies de oxidación.
2790 m.s.n.m Camino Finca La López – El Carbón 	M3. Muestra de zona de meteorización de La Formación Paja.	Muestra del horizonte superficial definido a partir de limolitas de la Formación Paja.
2620 m.s.n.m Curso de la Quebrada Río Sucio.	M4. Aguas abajo, a mano izquierda del cauce de la Quebrada Río Sucio. Depósito Fluvio glaciar.	Muestra de arcillolita negra, calcárea, con superficies de oxidación, además se presenta yeso fibroso y cristales de calcita. En este depósito se observa aporte de sedimentos de Jcs, Kita, Kir, Kip.

2590 m.s.n.m. Curso de la Quebrada Río Sucio 	M5. Sobre el cauce de la Quebrada Río Sucio. Depósito Fluvio glacial	Muestra de material mas fino, de color negro, transportado por flotación y depositado en las zonas mas planas del cauce y por lo tanto con de menor energía.
2590 m.s.n.m. Curso de la Quebrada Río Sucio	M6. Sobre el cauce de la Quebrada Río Sucio, aguas abajo a mano derecha. Depósito Fluvio glacial	Material fino de color blanco, calcáreo (efervece al contacto con HCl) transportado por flotación y depositado en las riberas del Río Sucio
2590 m.s.n.m. Curso de la Quebrada Río Sucio	M7. Riberas de la quebrada Río Sucio, aguas abajo a mano izquierda. Depósito Fluvio glacial.	Muestra de suelo orgánico de color oscuro.
2580 m.s.n.m. Curso de la Quebrada Río Sucio. 	M8. Sobre el cauce de la Quebrada Río Sucio, aguas abajo a mano derecha. Depósito Fluvio glacial	Material fino oscuro, muy fluido, se relaciona directamente con la coloración de la Quebrada Río Sucio, a partir de esta altura, hay un quiebre en la pendiente y se inicia la contaminación de la Quebrada. Difracción de Rayos X (Foto)
2570 m.s.n.m Curso de la Quebrada Río Sucio	M9. Sobre el cauce de la Quebrada Río Sucio, aguas abajo a mano izquierda. Formación Paja, mientras que hacia la derecha aparece una afloramiento de la Formación Tablazo.	En este lugar se ve un contraste litológico, pero donde hay más depositación es hacia el lado izquierdo, aquí la energía es un poco menor y se definen zonas de encharcamiento, y el aporte de sedimento de menor tamaño es muy significativo, del cual se obtiene una muestra de color oscuro
2520 m.s.n.m Cauce de la Quebrada Río Sucio	M10. Muestra de fondo de la Quebrada Río Sucio.	Sedimentos de grano muy fino : lodolita / arcillolita.

2420 m.s.n.m Cauce de la Quebrada Río Sucio	M11. Sobre el cauce de la Quebrada Río Sucio, aguas abajo a mano derecha.	Sedimento de grano muy fino, que ha sido transportado por suspensión y depositado hacia la orilla de la quebrada, en las zonas de menor energía de la corriente.
2410 m.s.n.m. Cañón de la Quebrada Río Sucio	M12. Afloramiento de la Formación Paja, a mano izquierda aguas debajo de la quebrada Río Sucio.	Muestra de roca sana de la Formación Paja. Shales negros, calcáreos.
2130 m.s.n.m Cauce de la Quebrada Río Sucio, 50 metros arriba de la entrega de la Quebrada El Chorreron	M13. Sobre el cauce de la Quebrada Río Sucio, aguas abajo a mano derecha.	Sedimento fino depositado por la corriente lateral de la quebrada Río Sucio.
2080 m.s.n.m Entrega de la quebrada El Chorreron a la Quebrada Río Sucio	M14. Lecho de la Quebrada Río Sucio.	Sedimento poco seleccionado, de tamaño de grano mayor que las anteriores muestras,
2050 m.s.n.m La Batea, cauce de la quebrada Río Sucio 	M15. Cauce de la Quebrada Río Sucio	Material no seleccionado, heterométrico, con aporte de diferentes formaciones como Pdo, Jg, Kita, Kir, Kip; carga de fondo de la quebrada.
2050 m.s.n.m La Batea, cauce de la quebrada Río Sucio	M16. Ribera de la Quebrada Río Sucio, a mano derecha aguas abajo.	Sedimentos de grano fino, oscuros, con la capacidad de hincharse en presencia de agua. Difracción de Rayos X (foto)

Tabla 27. Relación muestreo de sedimentos

6.2.2 Preparación de la muestra. Para este proceso se maceró la muestra en un mortero de ágata y el espécimen seleccionado de la muestra fue montado en un crisol de aluminio mediante la técnica de llenado lateral.

6.2.3 Condiciones de Medición de las Muestras.

Voltaje	40 (kV)
Corriente	20 (mA)
Rendijas (Slits) DS	1.0°
RS	0.3 mm
SS	1.0°
Velocidad de Barrido	1.2° / min
Muestreo	0.02°
Rango de Medición	2 – 70°
Radiación	CuK α
Monocromador	Grafito
Difractómetro	Rigaku modelo D – MAX – III/B
Base de datos cristalográfica	Powder Diffraction File (PDF –2) del International Center for Diffraction Data (ICDD)

La identificación cualitativa de las fases presentes en las muestras, se realizó mediante comparación de las reflexiones del perfil observado con las reflexiones de los perfiles de difracción reportados en la base de datos Powder Diffraction File del International Center for Diffraction Data (ICDD) utilizando el software respectivo. En el proceso de identificación se aplicó el método de Hanawalt.

6.2.4 Resultados

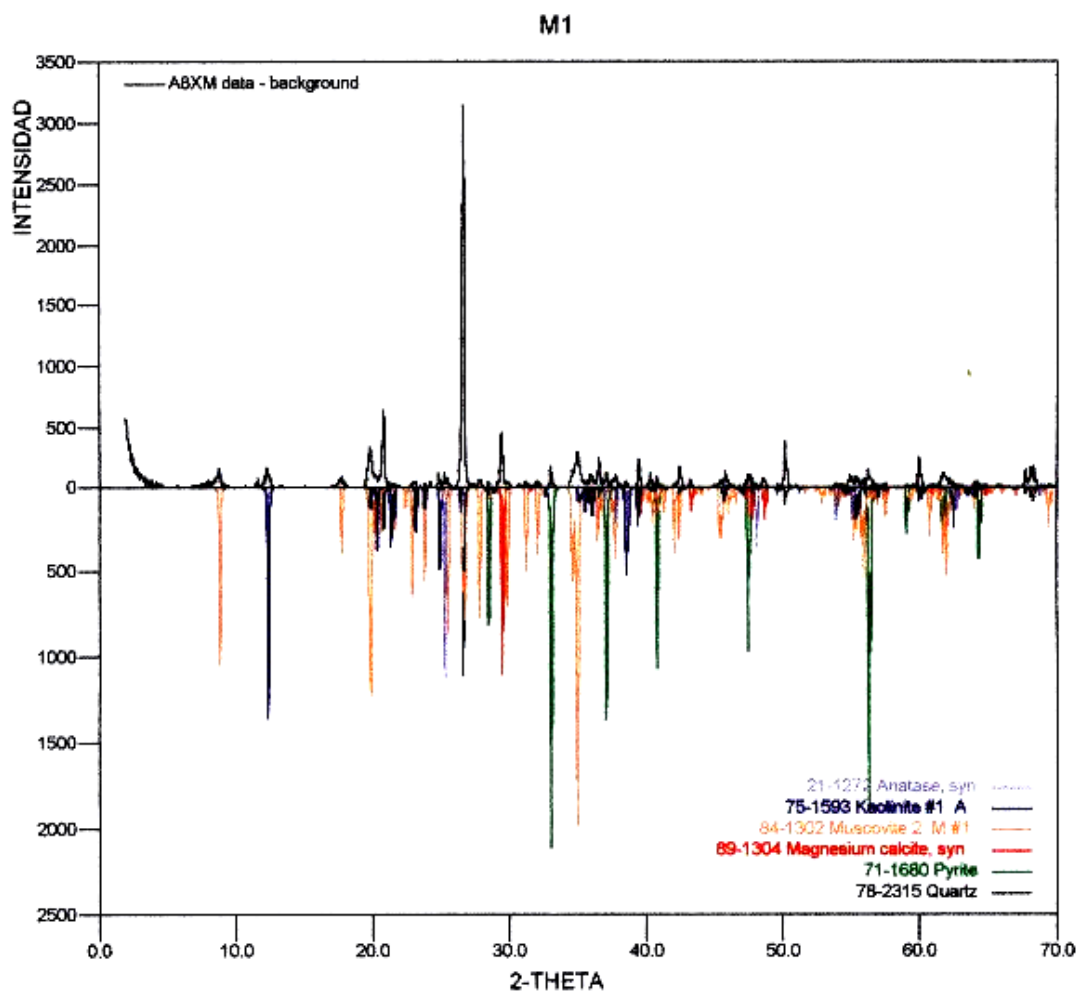


Figura 38. Difractograma M1.

FASE	TARJETA PDF – 2	NOMBRE MINERAL
SiO_2	78 – 2315	Cuarzo
FeS_2	71 – 1680	Pirita
$(\text{Mg}_{0.03}\text{Ca}_{0.97})(\text{CO}_3)$	89 – 1304	Calcita magnésica
$\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	84 – 1302	Moscovita
$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	75 – 1593	Kaolinita
TiO_2	21 - 1272	Anatasa

Tabla 28. Fases correspondientes a los picos del difractograma M1. Camino López – Carbón, 2800 m.s.n.m.

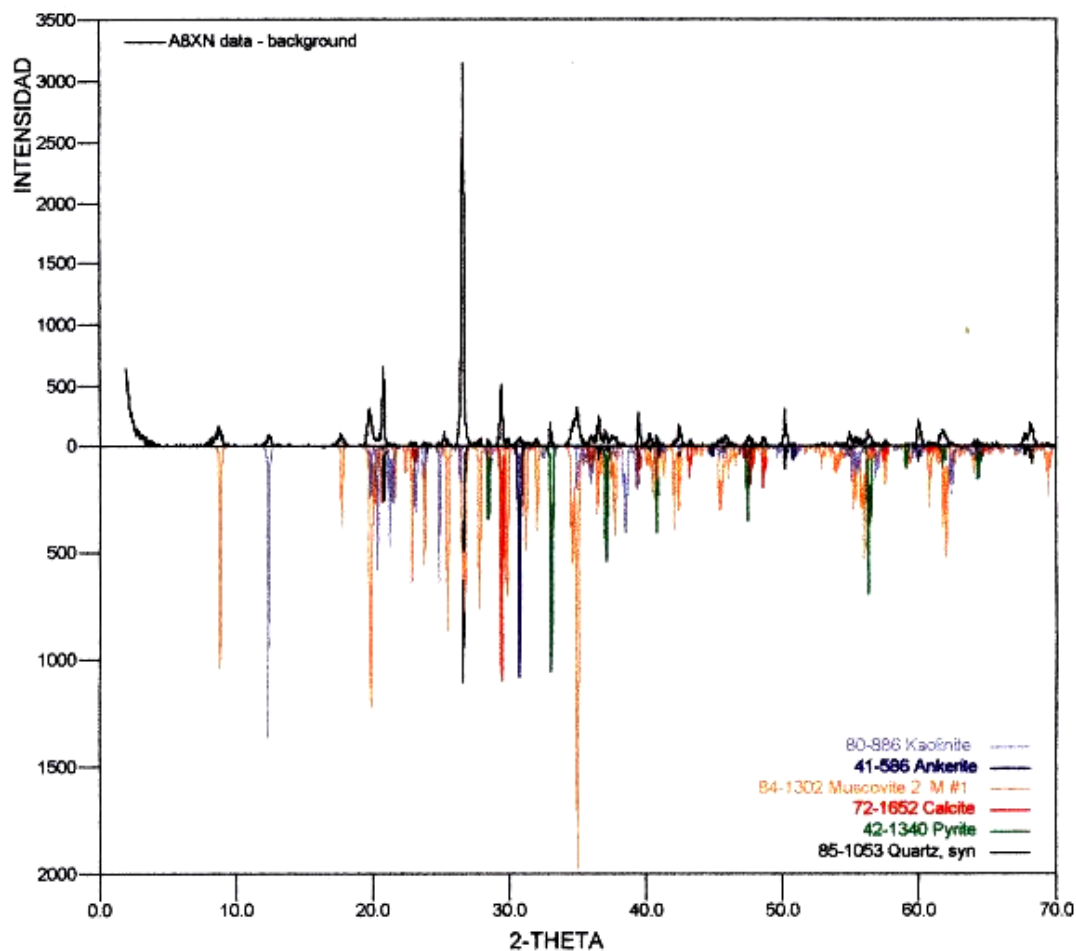


Figura 39. Difractograma M8.

FASE	TARJETA PDF – 2	NOMBRE MINERAL
SiO_2	85 - 1053	Cuarzo
FeS_2	42 – 1340	Pirita
CaCO_3	72 - 1652	Calcita
$\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	84 – 1302	Moscovita
$\text{Ca}(\text{Fe} + 2 \text{Mg})(\text{CO}_3)_2$	41 – 586	Ankerita
$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	80 – 886	Kaolinita

Tabla 29. Fases correspondientes a los picos del difractograma M8. Depósito sobre la quebrada Río Sucio, 2590

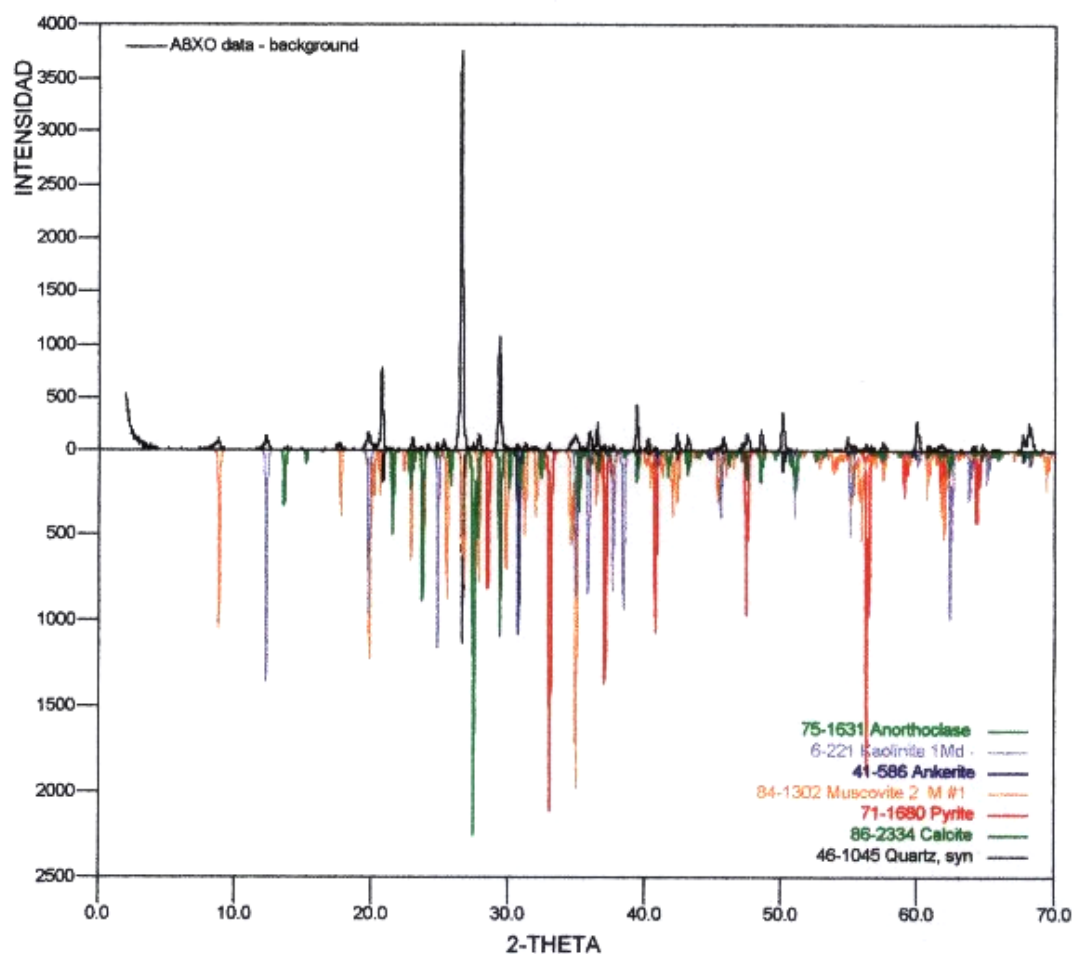


Figura 40. Difractograma M16.

FASE	TARJETA PDF – 2	NOMBRE MINERAL
SiO_2	46 – 1045	Cuarzo
CaCO_3	86 – 2334	Calcita
FeS_2	71 – 1680	Pirita
$\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	84 – 1302	Moscovita
$\text{Ca}(\text{Fe} + 2 \text{Mg})(\text{CO}_3)_2$	41 – 586	Ankerita
$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	6 – 221	Kaolinita
$(\text{Na}_{0.667}\text{K}_{0.333})(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	75 – 1631	Anortoclasa

Tabla 30. Fases correspondientes a los picos del difractograma M16. La Batea 2000 m.s.n.m

Al relacionar los tres difractogramas, se hace notable la influencia de la formación Paja sobre el depósito de la Quebrada Río Sucio, sobre todo por el comportamiento similar de

la pirita en las tres muestras, éste mineral es uno de los constituyentes mas representativos de Paja, además de la presencia de cuarzo, calcita, y moscovita, caolinita en las muestras.

El único constituyente que difiere al comparar M1 y M8 es la anatasa un dióxido de titanio que no se encuentra en la muestra 8, esta afirmación es muy consistente con el comportamiento químico de los óxidos, los cuales al verse afectados por algún tipo de transporte, cambios en el grado de oxigenación y otros aspectos de carácter físico, se empiezan a comportar de una forma inestable.

En M16 además de la ausencia de la anatasa, podemos observar dos fases diferentes a M1: ankerita (también presente en M8) y anortoclasa. La primera es un carbonato magnésico cuya fuente, debe ser, la formación Rosablanca, que es de carácter calcáreo en casi la totalidad de su extensión; mientras que, la anortoclasa es una aluminosilicato de sodio y potasio, generalmente proveniente de un tipo de roca cristalina, ya sea ígnea o metamórfica, lo cual indica que la presencia de la anortoclasa es debida a la meteorización del ortoneis, que constituye el cañón de la quebrada Río Sucio.

7. APROXIMACION A UN MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA MICROCUENCA DE RIO SUCIO.

La hidrogeología, como parte de la hidrología, estudia la relación entre el recurso hídrico, y el medio geológico que controla algunos procesos, como almacenamiento, infiltración y diferentes componentes de la escorrentía total, no se puede tratar como el estudio de un sistema independiente, olvidando los procesos que acontecen de la superficie hacia arriba, una característica del sistema hidrológico en general, es la continuidad y correlación de sus procesos y componentes hídricas, en sus diferentes subsistemas de control, sistema de control atmosférico, de superficie, de subsuperficie y subsistema de control subterráneo.

De esta forma un modelo hidrogeológico o Hidrológico, debe brindar información sobre los diferentes procesos que transforman las entradas hídricas, en un espacio de control determinado (cuenca hidrológica y/o hidrogeológica) en las salidas del mismo sistema hidrológico. Estos “procesos de transformación”, están condicionados por factores climáticos, meteorológicos, geomorfológicos, litológicos y estructurales, hidroquímicos, así como por factores físicos (Suelos, Cobertura vegetal)

Lo anterior implica un estudio interdisciplinario fuerte que permita conocimiento temático de diferentes áreas, geología, suelos, cobertura vegetal, fisiografía, hidroquímica, geomorfología, geotecnia, hidráulica superficial y subterránea entre otras.

Si bien la información temática recolectada y la observación directa de los procesos hidrológicos que acontecen en la micro cuenca de la quebrada Río Sucio, ha permitido comprender mejor estos procesos, aun falta mucho por investigar, es por eso que el modelo hidrogeológico que en este trabajo se presenta, corresponde a una primera

aproximación, que intenta explicar algunos procesos que ocurren en cuencas de alta montaña, como los de la CERS, además de tratar de dar solución a las siguientes fenómenos:

- Cuantificación del recurso hídrico
- Procesos de transporte y movimiento
- Controles de almacenamiento
- Influencia de los factores físicos en el comportamiento dinámico del régimen hídrico en la cuenca experimental de Río Sucio.

7.1 FACTORES ORIENTADOS A LOS PROCESOS DE RECARGA ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE DEL RECURSO HIDRICO

7.1.1 Análisis De Factores Hidroclimáticos. Los factores climáticos condicionan las entradas y las salidas hídricas, del sistema hidrológico de superficie, estas entradas y salidas están representadas por las diversas formas de precipitación y la evapotranspiración real, respectivamente, quienes regulan la oferta hídrica en la microcuenca.

La distribución de la oferta hídrica en la C.E.R.S, da una idea de la forma en que el recurso hídrico esta disponible para infiltrar o escurrir. Desde este punto de vista son las zonas bajas y sur occidentales las que presentan los mayores valores de OH. (Figura 41)

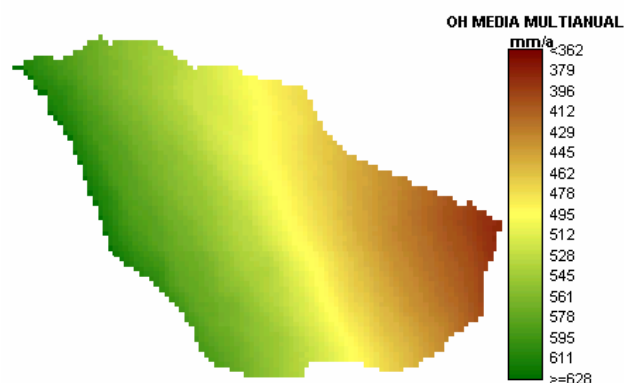


Figura 41. Distribución de la oferta hídrica multianual de la CERS

Lo anterior podría explicar, porque una microcuenca, como es el caso del Chorrerón, con una red hídrica superficial poco desarrollada, y área menor al 20% del área de la C.E.R.S, produzca caudales cercanos al 30% del caudal registrado en la batea.

Sin embargo, la magnitud de la oferta hídrica, en la zona media alta no es nada despreciable, lo anterior sumado a que aproximadamente el 85% de la cuenca se concentra en esta zona, sobre los 2500 m.s.n.m, (figura 42), indica que cualquier entrada hídrica allí, tiene significativa importancia.

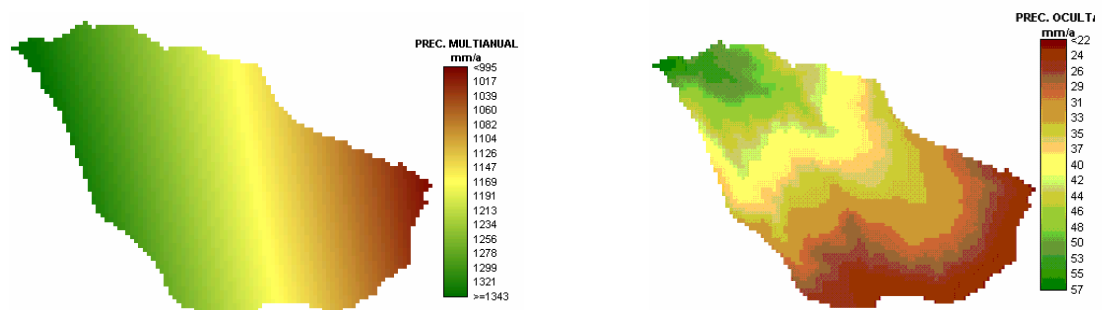


Figura 42. Precipitación meteórica y oculta multianual de la CERS.

Uno de los procesos hídricos observados en esta zona, es la condensación permanente por rocío, o precipitación oculta. La cual condiciona a que constantemente la vegetación y el suelo se encuentren saturadas. De igual forma los niveles de humedad en el suelo, permanentemente estarían en la capacidad de campo, lo anterior sumado a la morfología escarpada de la cuenca favorecería el escurrimiento superficial.

Según lo observado en campo, en los aforos e inventario de nacimientos, en el análisis de los rasgos estructurales, en la fotogeología y en los ensayos de geofísica en la C.E.R.S, no se puede atribuir todo el recurso hídrico que se evidencia en la zona de estudio, como el producto de precipitaciones y procesos en la misma, sino también a procesos de recarga extra cuenca, los cuales estarían alimentando la red hídrica de la C.E.R.S.

La campaña de inventario y aforos de afloramientos de agua Orozco, Mendoza (2005), mostró nacimientos en la parte alta, con caudales superiores a 1.0 lps en épocas de estiaje, como es el caso del punto "NSUC.I.2.1" el cual, se encuentra en la zona alta de la

microcuenca, sobre los 3110 m.s.n.m aproximadamente, este caudal aflora en superficie gracias al cambio de conductividad hidráulica producto de una zona de contacto de diferentes litologías, Deposito cuaternario y la formación Girón.

De igual forma, los datos de geología estructural tomados y las observaciones de campo, indican que en las redes hídricas más desarrolladas, (mayores caudales), como son las microcuencas de las quebradas el vivo, principal afluente de la quebrada río sucio, y la quebrada El Chorrerón, la dirección de sus cursos se encuentra, condicionada por la orientación de un sistema de fallas regionales, como son las falla La cristalina y la falla Río Sucio. (Ver mapa estructural figura 18).

La geoelectrica en la zona alta (sondeos eléctricos verticales # 16,17,18 y 19) realizados entre los 3110 y 3430 m.s.n.m aproximadamente, muestran que si bien las resistividades aparentes en superficie, son altas, propias de rocas cristalinas sanas o con poco efecto de la meteorización, SEV 16, su resistividad aparente disminuye en profundidad SEVs 17, 18 y 19. Esta disminución en rocas de este tipo, puede obedecer a niveles fracturados, meteorizados y/o saturados, como se observa en el SEV 17 (Figura 43) unas bajas resistividades para una unidad de Neis fracturado y meteorizado

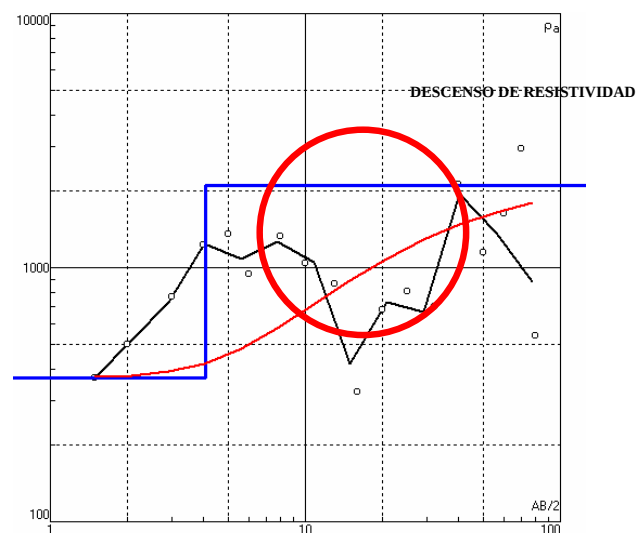


Figura 43. Sondeo Eléctrico Vertical 17. Se diferencian dos unidades geoelectricas identificándose un fuerte descenso en la resistividad debido a un intenso diaclasamiento o por cambios composicionales del Ortoneis

7.1.2 Análisis De Factores Físicos. Dentro de los factores físicos a analizar se encuentran la morfometría, suelos, vegetación y geomorfología.

- **Morfometría.** La morfometría de la zona de estudio, indica pendientes suaves, medias y altas, Sin influencia de otras variables, la pendiente del terreno, puede facilitar la infiltración, en zonas de pendientes bajas o moderadas o favorecer la escorrentía directa en zonas de altas pendientes.

De esta forma las zonas de mayor pendientes como las vertientes de la quebrada el Chorrerón, las vertientes de la quebrada Río Sucio en su parte baja, y la zona que delimita las microcuencas de la quebrada López y el cauce de la quebrada Figueros, facilitan el escurrimiento directo y dificultan los procesos de infiltración. (Figura 44)

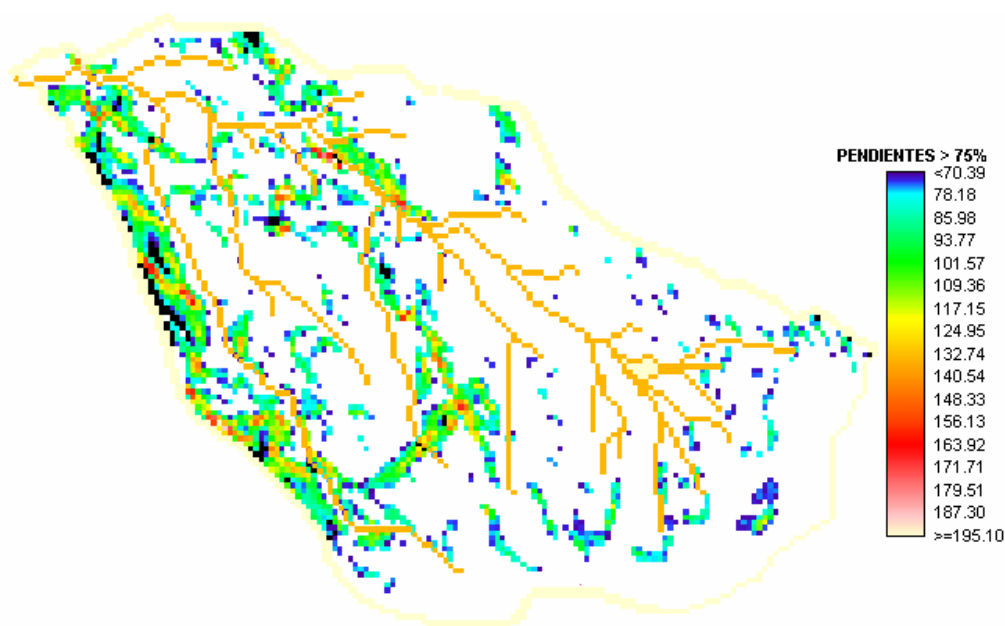


Figura 44. Mapa de pendientes de la CERS mayores al 70%

Las zonas de pendientes bajas, menores al 30%, corresponden a la zona de los depósitos, depósitos morrénicos y fluvio-glaciares en la parte alta, depósitos torrenciales y de vertientes tipo coladas de barro en la parte media alta, casa balcón, Rosedal, Carbón, La casita, López, depósitos aluviales y terrazas en el cierre de cuenca. (Figura 45).

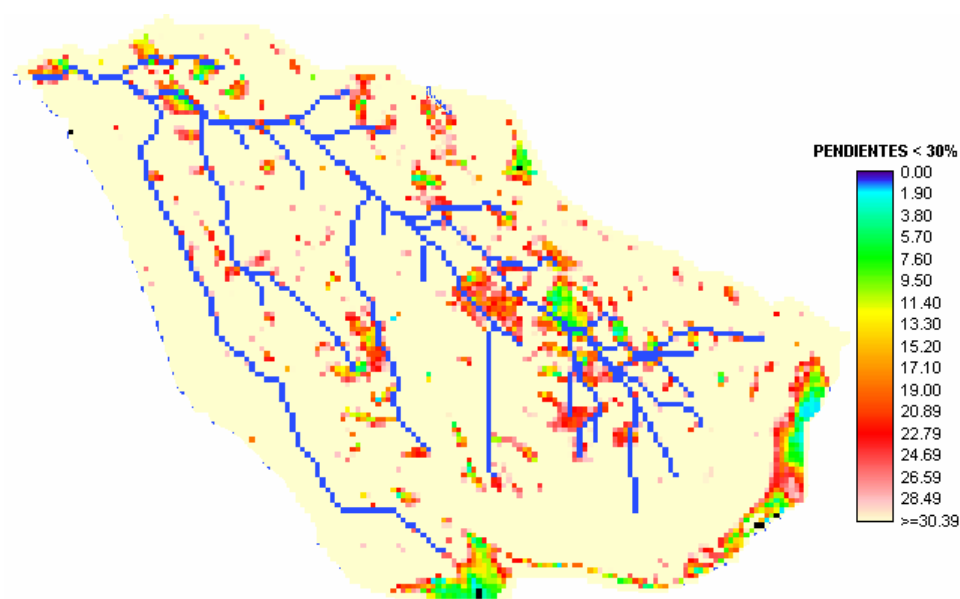


Figura 45. mapa de pendientes de la CERS menores del 30%

La gran parte de estas zonas de bajas pendientes, es usada en practicas agrícolas, y son zonas preferenciales de encharcamiento, almacenamiento e infiltración.

El orden de Hortón y la densidad de corrientes apunta a los procesos de erosión y permeabilidad, de esta forma valores grandes indican suelos poco resistentes a la erosión o relativamente impermeables, pendientes altas y cobertura vegetal escasa, como se aprecia en la parte alta del cauce principal del Río Sucio, aguas arriba de la zona de depósitos (Figura 46).

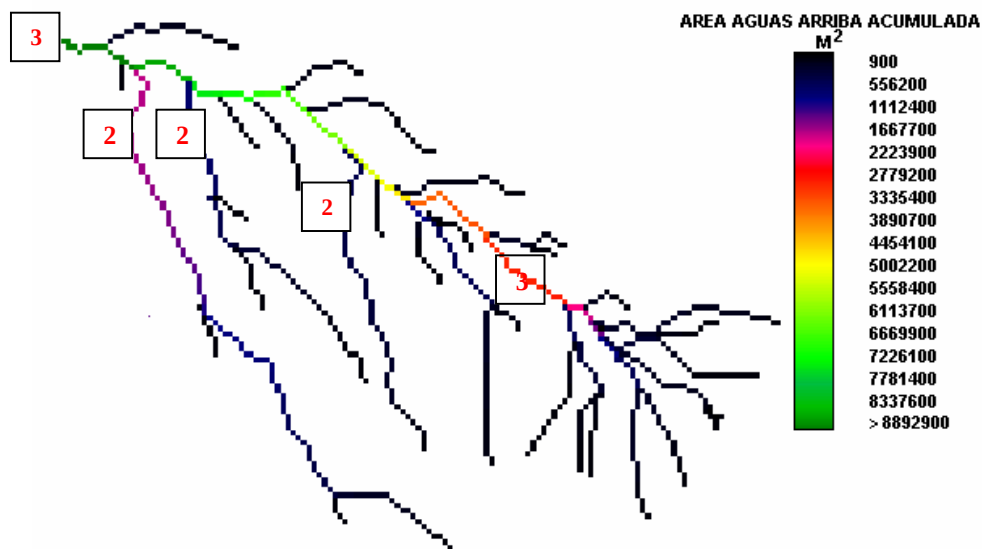


Figura 46. Desarrollo de la red hidrográfica

- **Suelos.** Las características del suelo condicionan los procesos de infiltración, escorrentía superficial, almacenamiento de humedad, flujo subsuperficial entre otros. Son las propiedades hidráulicas y de almacenamiento, que están en función de la estructura, textura, y material parental, las que facilitan o dificultan la circulación por los espacios de los poros que en últimas condicionan las etapas iniciales de procesos de infiltración y precolación.

Desde el punto de vista de las características del material parental, los suelos provenientes de los niveles arenosos y conglomeráticos de las formaciones sedimentarias Tambor, Girón y Tablazo, al tener texturas arenosas, franco arenosas y franco arcillo arenosas, son los que tienen conductividades mayores (a excepción de los depósitos), parámetro condicionado principalmente por la morfología.

Los suelos provenientes de los niveles arcillosos y limosos de las formaciones Tambor, Girón y Tablazo, así como los suelos con material parental de la formación Paja, al tener texturas arcillosas, arcillo limosas y franco arcillosas, tienen conductividades menores.

Los suelos de mayor conductividad y porosidad corresponden a las zonas de depósitos, especialmente los depósitos dedicados a usos agrícolas, las cuales evidencian permanentemente tablas freáticas altas (zonas de encharcamiento).

Si bien se ha descrito los suelos de la zona (texturas, profundidades, etc) según la cartografía existente y las apreciaciones de las salidas de campo, es necesario determinar cualitativamente los rangos de los parámetros físicos e hidráulicos que determinan el movimiento, almacenamiento y ocurrencia del recurso hídrico, tales como la permeabilidad, capacidad de almacenamiento entre otros en relación con la textura. La tabla 31, de la Soil Conservation Service, USDA, relaciona la textura con algunas propiedades de los suelos. (referenciada en Ramírez, 1999)

TEXTURA	PERMEABILIDAD cm/h	LIMITE LIQUIDO	INDICE DE PLASTICIDAD	CAPACIADAD DE ALMACENAMIENTO cm/cm
Arcillo – areno limoso	0.15 – 0.5	40 - 45	10 -20	0.14 – 0.16
Franco arcillo limoso	0.5 – 1.0	40 - 50	10 - 20	0.18 – 0.2
Franco Arcilloso	0.5 – 1.6	30 – 40	15 - 20	0.18 – 0.20
Franco	1.6 – 5.0	25 - 35	5 – 10	0.14 – 0.18
Franco limoso	1.6 – 5.0	30 – 40	5 – 10	0.15 – 0.2
Arcillo Arenoso	0.15 – 0.5	25 - 40	5 - 20	0.12 - 0.16
Franco Arcillo arenoso	0.5 – 1.6	25 - 35	5 - 15	0.10 – 0.16
Franco arenoso muy fino	1.6 – 5.0	25 – 30	5 - 10	0.16 – 0.18
Franco arenoso	5 – 16	-	-	0.11 – 0.13
Areno francoso	16 – 50	-	-	0.08 – 0.10
Arena	50 -	-	-	0.06 – 0.08

Tabla 31. Relaciones de la textura con algunas propiedades del suelo (referenciada en Ramírez, 1999)

Según la anterior tabla, se observa que los suelos con texturas Franco arcillosas a areno francosas, son los que facilitan los procesos de infiltración y posterior recarga.

La profundidad de los suelos también es importante tanto desde el punto de vista de almacenamiento como de la infiltración. Al respecto, son los suelos ubicados en las zonas de los depósitos los que mayor desarrollo tienen.

- **Vegetación.** Si bien el suelo condiciona parte de los procesos hídricos, como la infiltración, el escurrimiento y el almacenamiento de la humedad en subsuperficie, también

es el soporte de la componente biótica de estos procesos, que a su vez interactúa en forma significativa en los procesos hidrológicos y en los procesos de estabilización del mismo suelo.

De esta forma la cobertura vegetal influye tanto en los procesos de interceptación, almacenamiento, transporte y succión de la humedad como en la dinámica de estabilización y prevención de la erosión en el suelo debido a la estructura de su sistema radicular.

Desde el punto de vista hidrológico los principales efectos de la cobertura vegetal tienen que ver con:

- La interceptación de la precipitación, que es el agua que se almacena o se retiene en la planta en función de sus características foliares, puede llegar a ser muy alta en condiciones de bajas intensidades en la precipitación y alta cobertura vegetal.
- La cobertura vegetal es uno de los factores que suavizan los picos de los hidrogramas de caudal ya que el almacenamiento foliar y la interceptación de la lluvia en la vegetación, disminuyen la escorrentía superficial (especialmente en lluvias poco intensas) y el poder erosivo sobre el suelo (especialmente en lluvias muy intensas).
- Debido al trabajo mecánico de penetración y crecimiento de las raíces, aumentan la porosidad y disminuyen la compactación, y al convertirse el tallo de las plantas en un conducto preferencial de transporte, se favorece el aumento de las tasas de infiltración.
- Condicionan los procesos de succión y transpiración de la humedad en el suelo, que junto con la evaporación, se puede asociar como la parte del agua en el ciclo hídrico, de uso consuntivo por el componente biótico y se ven reflejados en los procesos de evapotranspiración.

Desde el punto de vista de la recarga, y sin analizar el efecto del uso consuntivo, factor ya tratado en el estudio de la evapotranspiración e implícito en la oferta hídrica, las zonas de cultivos permanentes, cartografiadas, forman parte de la cobertura vegetal (Figura 9), son

las zonas más promisorias que influyen en los procesos de infiltración; estas zonas están permanentemente con sistemas de riego artificiales, además la capa superficial del suelo que pudiese estar compacta, es removida, aumentando la facilidad de infiltración.

Estas zonas además se caracterizan, por estar ubicadas en suelos con fuerte desarrollo edáfico, lo cual favorece los procesos de almacenamiento. Las zonas preferenciales de uso agrícola, se encuentran en la mayoría de depósitos torrenciales y de vertientes tipo colada de barro y deslizamientos, fincas El Carbón, El Alto, La Casita, Agua Blanca, López, Rosedal, El Espino, Casa Balcón.

Es interesante observar que en la mayoría de estas zonas con uso agrícola, muchas veces no existen sistemas de drenajes, que sirvan para bajar la sobresaturación de la tabla freática, formándose de esta forma zonas de encharcamiento, estos sistemas de drenajes son aconsejables para evitar la desestabilización como zonas de recarga edafológicas.

La principal cobertura vegetal de la cuenca, son los pastos, estas zonas están destinadas a la explotación ganadera, principalmente estas actividades se dan en zonas con suelos muy poco profundos, las practicas de sobre pastoreo, tienden a sobre compactar el suelo, esto unido a la poca profundidad del mismo, dificulta los fenómenos de infiltración superficial, facilitando la esorrentía directa.

- **Geomorfología.** Las características geomorfológicas controlan el almacenamiento, caudales base, la porosidad la conductividad y los procesos de infiltración, principalmente las geoformas debidas a procesos denudacionales, formas de origen fluvial, formas de origen cárstico y formas de origen glacial.

Las geoformas más interesantes desde el punto de vista del almacenamiento, son los deslizamientos, las coladas de barro y los depósitos torrenciales. La mayoría de éstos, especialmente los depósitos con pendientes suaves, presentan niveles freáticos altos, lo cual se observa en la presencia de zonas de encharcamiento. Estas zonas de encharcamiento condicionan la existencia de ecosistemas tipo humedal. Los humedales en la micro cuenca generalmente se los identifica como áreas que se encharcan gran

parte del año (en la época de las diferentes campañas de campo, y salidas a la zona de estudio, alrededor de 8 meses, éstas zonas siempre evidenciaron niveles freáticos elevados aflorando en la superficie) en suelos de baja permeabilidad, bajas pendientes y zonas destinadas a usos agrícolas sin drenajes adecuados.

Las bajas permeabilidades en los suelos son producto del sobre pastoreo que compacta la capa superficial del suelo, en los depósitos de la zona media alta, Rosedal, y efectos de depositación de materiales como el carbonato de calcio, caliche, en los depósitos existentes entre el Carbón y la Casita. Este material propio de suelos parentales de la Formación Rosablanca, al depositarse, dificulta los procesos de infiltración.

7.1.3 Análisis De Factores Geológicos. La geología es junto con los factores climatológicos, las variables que condicionan principalmente, la ocurrencia, movimiento y almacenamiento del recurso hídrico en la C.E.R.S y de esta forma las unidades hidrogeológicas. Las características geológicas estudiadas, se enfocaron al estudio de los factores litológicos y factores estructurales.

o **Litología.** Al estudiar las diferentes características inherentes a las unidades de roca, condiciona los procesos de infiltración, movimiento y almacenamiento que ocurren en subsuperficie bajo efectos del agua.

La litología condiciona los procesos de infiltración y transporte tanto por porosidades primarias como secundarias, ambas tipologías presentes en la zona de estudio. La porosidad secundaria desde el punto de vista litológico se evidencia en la C.E.R.S por procesos de diaclasamiento por gelifracción pretérita, y disolución ante la influencia de factores externos hidroclimáticos.

El diaclasamiento por gelifracción pretérita, se presenta en la parte alta, en especial en los cuerpos de roca metamórficos y calizas sedimentarias, donde por efectos de fuertes cambios en la temperatura, ocasionando planos de diaclasas, éste proceso facilita la acción de la meteorización tanto química como mecánica.

La porosidad en función de la litología de la C.E.R.S: Las principales características litológicas que influyen en las propiedades hidráulicas que condicionan los procesos de infiltración y transporte en subsuperficie, observadas en la C.E.R.S son:

➤ Formación Rosablanca: Son calizas con porosidad secundaria producto de la disolución ante agentes externos (Hidroquímicos) y fracturamiento producto de patrones estructurales tanto locales como regionales; algunas geoformas que apreciadas fueron, geoformas cársticas, como dolinas y cavernas y geoformas por lavado superficial, tipo estalactita – estalagmita, producto de la dinámica en la precipitación del carbonato de calcio, propio de este tipo de formación sedimentaria.

Esta formación presenta cambios leves en sus facies de depositación, si bien predominan los paquetes calcáreos, existen niveles con un porcentaje de material terrígeno, los cuales condicionan que los procesos de disolución sean menores debido a que la sílice presente en estos materiales no reacciona ante la presencia del agua. Estos niveles se hacen mas evidentes cerca de las zonas de contacto con las formaciones subyacentes y suprayacentes.

➤ Formación Tambor: Es una formación constituida principalmente por paquetes potentes de arenisca blanca. En la Parte Alta es compacta y de grano grueso, su matriz es arcillo limosa, pero se puede disgregar fácilmente, su porosidad esta en función de su matriz y del grado de fracturamiento.

La Formación Tambor se hace más impermeable hacia el contacto con la formación Rosa Blanca, pues aparecen niveles de finos, tipo arcillolitas de color gris que actúan como barreras impermeables. Este cambio de litología implica un cambio en conductividad hidráulica, que condiciona la aparición de algunas quebradas como el cauce principal de La López y algunos brazos de la Colmena.

En algunos sectores como El Uvo, se caracteriza por ser una arenisca de grano muy fino, bien cementada, con diaclasas cerradas. Lo anterior implica que en estas zonas las tasas de infiltración son bajas casi nulas.

➤ Formación Paja: Es una formación compuesta por material tipo Arcillolitas, limolitas consolidadas y shales negros , lo anterior indica que su porosidad primaria es nula, La porosidad secundaria es baja a nula y esta en función de las condiciones estructurales y de fallamiento, sin embargo, la formación Paja prefiere dejarse moldear que romperse (Fracturarse).

El material meteorizado que compone la formación, se disuelve fácilmente ante la presencia de agua, y tiene la característica de ser un material altamente soluble, color carbonáceo, que puede viajar grandes distancias sin precipitar y que una vez llega a las redes hídricas principales, confiere el típico color oscuro propio de las aguas de la quebrada Río Sucio.

➤ Formación Tablazo: Esta formación esta compuesta por paquetes duros de Calizas y Areniscas, y por paquetes finos de limolitas y shales. Se presume que los paquetes duros pueden funcionar como acuíferos tipo acuitardo y los blandos como acuicierres.

La porosidad primaria de la Formación Tablazo es menor que la de F. Tambor debido a que en general sus niveles son mas impermeables, sin embargo la porosidad secundaria puede ser mayor que en la Formación Tambor, merced a los procesos de disolución de la los niveles de calizas. Estos procesos de disolución aumentan debido a la influencia de los sistemas estructurales de fallas regionales y locales, ejemplo de lo anterior es el contacto fallado entre las formaciones Tablazo y Rosablanca, que acelera dichos procesos, evidenciados en las altas durezas de las aguas de la quebrada la Colmena.

Los paquetes finos de esa formación tienden a ser dúctiles y sus paquetes duros tienden a ser frágiles, sin embargo a diferencia de los paquetes duros de la formación Rosa Blanca que posee paquetes muy potentes, los paquetes de la formación Tablazo son más delgados, además las areniscas de Tablazo tienen mayor contenido de matriz arcillosa que los niveles similares de Tambor, lo que también incide en que se rompan menos. Lo anterior condiciona que se quiebren menos que los de la Formación Rosablanca.

La condición de ductilidad de los niveles finos, y de poca fragilidad de los niveles duros, facilita que esta formación sea muy moldeable, lo anterior se evidencia en las geoformas

tipo pliegue que se observan en la C.E.R.S como son los sinclinales El Alto y El Gramal formando parte del núcleo de estas estructuras. (Foto 32)



Foto 32. Sinclinal El Alto. Ubicado al SW de la cuenca

➤ Cuarzomonzonita de Santa Bárbara: A simple vista es permeable solo en sus contactos, ya que éstos son fallados. Sin embargo el análisis geoestadístico de diaclasas en esta zona, indica una orientación preferencial N45E, esta dirección se asemeja a la de cuatro cauces que atraviesan la Cuarzomonzonita que hacen parte del inventario hídrico de la CERS Orozco, Mendoza (2005)

El sector nororiental de la CERS, Barro Negro, El vivo, y los límites de las anteriores con la microcuenca de la quebrada Los Arcos, zona donde se ubica el cuerpo intrusivo, tiene como característica morfológica, la elevada densidad de drenajes superficiales. Lo anterior se puede explicar por el elevado control estructural de la zona.

La figura 47 ilustra el comportamiento anterior, donde la dirección preferencial de diaclasamiento, es perpendicular al sistema de control geológico. En este sistema, se identifica la falla regional de Río Sucio, que condiciona el nacimiento del cauce principal de la quebrada El vivo, y otros sistemas de fallas paralelas, que de igual forma ponen en contacto los depósitos aluviales de la mesa de Berlin, con las cuencas de alta montaña adyacentes a la misma. Por lo tanto, la Cuarzomonzonita es importante desde el punto de

vista de transporte ya que la estructura diaclasada con su orientación preferencial, sirve de vía al recurso hídrico externo que ingresa a la C.E.R.S.

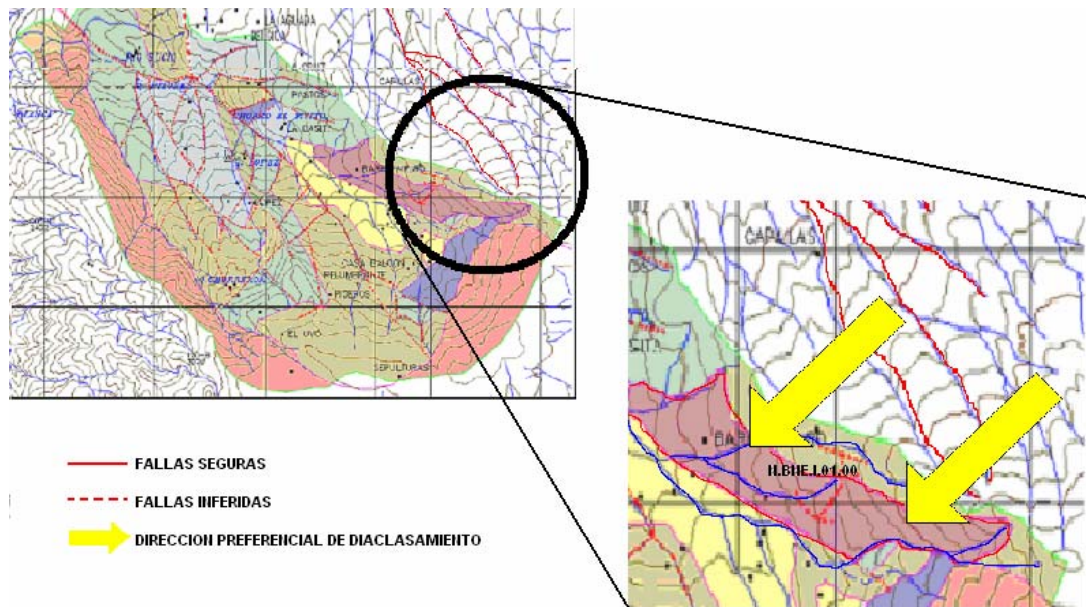


Figura 47. Sistemas de fallas paralelas pertenecientes a la Microcuenca de Arcos con una dirección preferencial de diaclasamiento NE-SW, el cual también afecta la Cuarzomonzonita, sirviendo de vía al recurso hídrico externo que ingresa a la C.E.R.S.

El cambio de litología que como ya se ha explicado implica un cambio en la conductividad hidráulica, condiciona el afloramiento de algunos cauces, como es el caso de los nacimientos importantes que ocurren en la Cuarzomonzonita, donde el agua que es transportada en subsuperficie en la formación Tambor, aflora tan pronto encuentra el contacto con la Cuarzomonzonita, esta última al ser una roca cristalina tiene conductividades muy bajas por lo cual para el agua es mas fácil aflorar.

➤ Ortoneis: Esta roca metamórfica de origen ígneo, cuarzo feldespática, presenta una porosidad primaria casi nula, según Vélez (1999), para rocas cristalinas ésta es menor al 1%. Desde el punto de vista del diaclasamiento, que constituye la porosidad secundaria de la roca, la mayor densidad se encuentra en la parte baja de la cuenca pero son cerradas, en la parte alta de la divisoria el diaclasamiento es menos denso con algunas diaclasas abiertas y otras rellenas por material arcilloso,. Los procesos de gelifracción, aumentarían la apertura del diaclasamiento en la zona alta.

El análisis geoestadístico de diaclasas en el Ortoneis, evidencia orientaciones preferenciales paralelas y perpendiculares al control estructural de la falla regional la cristalina. Estas direcciones son N 45 E y N 45 W. Estas orientaciones forman una red de diaclasamiento que confieren al Ortoneis un alto fracturamiento, especialmente en la zona baja donde el espaciamiento entre diaclasas es menor, sin embargo en esta zona las diaclasas están cerradas. El aporte de estas familias de diaclasas al cauce principal de la quebrada Chorrerón, se corroboró en las campañas de hidroquímica efectuadas Orozco, Mendoza (2005).

Algunos puntos datados en la campaña, presentaron, valores de ph bajos además de valores de potencial redox negativos. Lo anterior evidencia aguas infiltradas y transportadas en ambientes reductores, que afloran en superficie cuando las familias de diaclasas tienden a cerrarse en profundidad.

➤ Depósitos: Son acumulaciones de sedimentos recientes, se presentan en varias partes de la cuenca y están constituidos por material de deslizamientos, derrubios de taludes, reptaciones, depósitos torrenciales, fluvioglaciares y morrénicos, distribuidos de la siguiente forma:

En la parte alta de la cuenca se encuentran depósitos fluvioglaciales y morrénicos, caracterizados por material heterométrico, anguloso y altas porosidades primarias (nacimiento Chorrerón y en la parte alta del nacimiento de el Vivito).

En la parte media alta, Casa Balcón, Agua Blanca El Rosedal y El Carbón, el material acumulado corresponde a depósitos torrenciales y de vertientes tipo colada de barro, deslizamientos, reptaciones y tipo talud de derrubios, estos materiales presentan tamaños heterométricos y formas angulosas, lo cual favorece la infiltración y el almacenamiento debido a altas porosidades.

En la parte media, los depósitos de López corresponden a deslizamientos y coladas de barro y los de la casita, depósitos de vertiente. Finalmente los depósitos en la zona baja

de la cuenca, cerca de la batea son de tipo aluvial, material heterométrico mas redondeado presentando una pseudo estratificación.

Desde el punto de vista de la porosidad, los depósitos morrénicos son los que poseen mayores valores, seguidos por los aluviales, torrenciales, fluvio glaciares y depósitos de vertiente.

Los depósitos son importantes desde el punto de vista de la recarga, el almacenamiento y el transporte; al estar ligados a zonas de bajas pendientes, facilitan las tasas de infiltración, salvo las zonas influenciadas por el sobre pastoreo. Las altas porosidades de estos depósitos no consolidados, brindan excelentes las condiciones para el almacenamiento, y el tipo de material que los constituye favorece altas porosidades efectivas que facilitan el movimiento del agua en sub-superficie. Generalmente constituyen acuíferos libres, que regulan el caudal base aportado a la red hídrica de la C.E.R.S.

La porosidad en función de la estructura de la C.E.R.S: Los controles geológicos y los patrones de diaclasamiento, apuntan a condicionar la porosidad secundaria por fracturamiento.

El sistema de fallas obedece a patrones regionales y locales, en función de la extensión e influencia. Las fallas regionales como la falla La Cristalina y Río Sucio, están alineadas con los cauces mas desarrollados (Caudal y densidad de drenajes), como son el cauce principal de las quebradas el Chorrerón y Río Sucio, respectivamente. Estarían colocando en contacto el agua de los depósitos cuaternarios de Berlín con la micro cuenca.

Los sistemas de fallamiento local presentan orientaciones principalmente paralelas o perpendiculares a los sistemas regionales, y es esta complejidad estructural la que condiciona la distribución de la litología en la CERS. Además las orientaciones preferenciales de los patrones de diaclasamiento, tienden a ser paralelo o perpendicular a los sistemas del control estructural.

Los diferentes tipos de contactos, especialmente los fallados, que enfrentan dos litologías diferentes, muchas veces permiten el afloramiento de nacimientos. Lo anterior es posible pues el contacto litológico implica cambio en los parámetros hidráulicos de subsuperficie y superficie, que condicionan la infiltración o exfiltración del agua.

Como ejemplos de lo anterior, se puede mencionar la aparición de el cauce de López que esta influenciado por el contacto entre Tambor y Rosa Blanca, los niveles impermeables de Tambor próximos a la zona del contacto, serian la barrera impermeable que forzaría a la exfiltración. De igual forma el afloramiento de varios cauces en la zona de contacto Tambor - Cuarzomonzonita.

EL buzamiento de las diferentes capas de las formaciones sedimentarias condiciona la infiltración, almacenamiento y movimiento del recurso hídrico en la zona de estudio. Por ejemplo en zona alta del nacimiento de la quebrada la López, la Formación Rosa Blanca presenta en superficie patrones de fallas interestratificadas (escamas estructurales), que facilitan la infiltración, transporte y posterior exfiltración en zonas más bajas ayudada también por el buzamiento de las capas. (foto 33)



Foto 33. El buzamiento de las capas de la formación Rosablanca, se encuentran condicionando la infiltración, transporte y posterior exfiltración del nacimiento de la Quebrada López.

La principal influencia del buzamiento al almacenamiento, se da cuando se presentan los pliegues, especialmente los sinclinales. El sinclinal de El Alto es el único pliegue en la zona de estudio. Este sinclinal constituido por rocas de la formación Tablazo, donde los niveles duros y frágiles de calizas se encuentran en superficie, y los niveles dúctiles, de finos, areniscas, en la parte inferior, estos niveles finos constituirían un acuífero.

7.1.4 Análisis De Factores Hidroquímicos. La campaña de hidroquímica, fue orientada a la validación de los procesos observados desde las campañas de geología y geofísica. Orozco, Mendoza (2005).

Brindo información sobre los nacimientos que exfiltran agua de ambientes reductores, estos ambientes se caracterizan por rangos ácidos bajos de pH y potenciales redox menores a 100 mv. En los ambientes reductores el contenido de oxígeno es muy bajo a nulo, ya que la mayor parte de éste se consume en las diferentes reacciones en el subsuelo. De esta forma aguas de ambientes reductores, están muy correlacionados con aguas subterráneas.

Otro parámetro que indica la naturaleza del agua subterránea que exfiltra, es el contenido de carbonatos, ya que a mayor recorrido del agua en el subsuelo, el contenido de este anión es mayor.

De igual forma los contenidos de carbonato y calcio permiten evidenciar los fenómenos de disolución y karstificación (La Cruz, Alto de la Cruz), que condicionan las características de altas durezas en las aguas de algunos cauces.

La comparación de los valores de electroconductividad de las aguas muestreadas, dieron información sobre las características del almacenamiento. La concentración de los cationes y aniones principales dio información del tiempo de residencia y la evolución geoquímica de las aguas subterráneas.

El análisis de la Secuencia de Chevotarev, indica, que para el caso del nacimiento principal de la quebrada de Río Sucio, que de acuerdo a la clasificación de los triángulos de Piper sus aguas se comportan como bicarbonatadas cálcicas y magnésicas Orozco, Mendoza (2005). Esta tendencia magnésica, indicaría mayor tiempo de residencia y evolución geoquímica de las aguas en la zona saturada. Lo anterior da idea de tiempos de viaje subterráneos mayores. Si se observa la ubicación espacial del este nacimiento, éste se encuentra ubicado muy próximo a la divisoria en la parte alta, luego estos tiempos de viaje se correlacionan con flujos externos hacia la microcuenca, si a lo anterior

se suma el comportamiento regional de la falla Río Sucio, se puede pensar en fenómenos de recarga productos del contacto entre el cuaternario de la mesa de Berlín y la zona de estudio.

La misma secuencia de Chevotarev evidencia que los mayores tiempos de almacenamiento de las muestras tomadas, ocurren en la zona de depósito Rosedal – Casa Balcón – El Carbón, cuyas aguas fueron clasificadas como sulfatadas cálcicas.

7.1.5 Análisis de depósitos. Las campañas de geología y observaciones de campo, permitieron cartografiar y caracterizar las zonas de los principales depósitos en la C.E.R.S.

Además de lo anterior, las campañas de hidroquímica y geofísica brindaron información sobre la capacidad de almacenamiento de los niveles superficiales de los depósitos. Gran parte de los 19 sondeos eléctricos verticales y las 6 tomografías eléctricas, fueron realizadas sobre zonas de depósitos, esta agresiva campaña de geofísica permitió conocer sus profundidades, contenido de humedad, extensión, intuir sobre la clase de material que los conforma.

La resistividad aparente de los diferentes niveles de los depósitos, junto con la información de electro conductividad del agua almacenada en estas formaciones, permitió estimar los valores de porosidad y estimar el volumen almacenado en los mismos. La figura 48 muestra, la cartografía de los depósitos observados en la zona de estudio, y descritos a lo largo del presente informe,

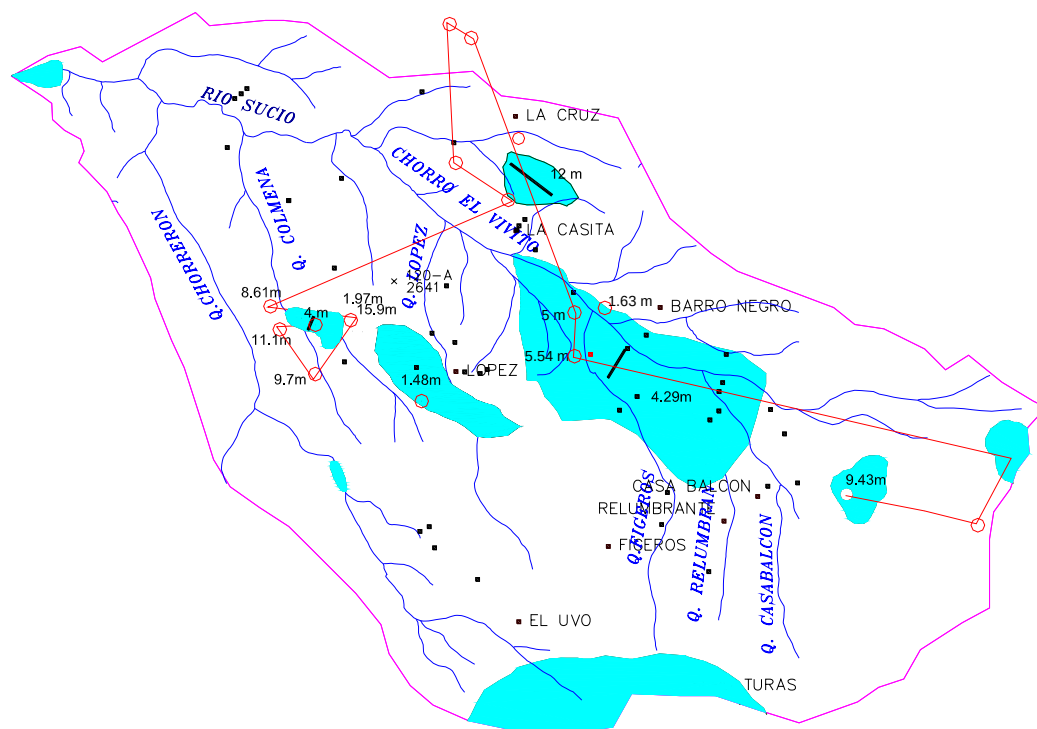


Figura 48. Cartografía de los depósitos y puntos de la campaña de geofísica

En la figura 48 se observan además de las zonas de depósitos, los ensayos geofísicos usados en la caracterización de los mismos. Los depósitos caracterizados desde el punto de vista de las herramientas hidroquímicas y geofísicas fueron: Carbón-Agua blanca – Rosedal, López, El Alto, La Casita, el deposito entre El alto de las Cruces y Agua Blanca, llamado en el análisis como, deposito zona alta.

DEPOSITO ANALIZADO	AREA m ²	ESPESOR SUPER. m	VOL. m ³	RESIST. APAREN T Omh-m	E.C AGUA μS/cm	FACTOR FORM.	POROSIDAD	VOL. AGUA m ³	LAMINA m
Rosedal-Casa Balcón - El Carbón	670662	4.29	2878820	84.6	560	4.74	0.27	801971.2	1.19
López	137141	1.48	202969	33.8	550.8	1.86	0.57	116040.1	0.8
El Alto	31135	8.536	265770	254.2	421.8	10.72	0.14	39506.89	1.2
La Casita	62608	12	751307	115	623	7.16	0.20	152329.5	2.43
Zona Alta	58096	9.43	547845	143	205	2.93	0.40	220881.8	3.84

Tabla 32. Estimación de la porosidad a partir del factor de formación, la resistividad aparente y texturas de los depósitos (tomada GPH,2005)

En la tabla anterior se observa que las mayores porosidades totales se encuentran en los depósitos tipo colada de barro del sector de López, de igual forma allí mismo se presentan

las menores resistividades aparentes, con valores que indicarían niveles de humedad altos. Sin embargo estos altos niveles de humedad y de porosidad que dan la idea de grandes volúmenes almacenados, no se reflejan en los bajos caudales de la quebrada La López, influenciada por el depósito. Una posible explicación a este fenómeno estaría en la textura arcillozade los suelos y material que compone el depósito, que condicionaría porosidades efectivas muy bajas.

El depósito Rosedal-Casa Balcón - El Carbón, es el principal depósito almacenador de la microcuenca, y que regula los caudales base de los cauces y de las zonas de encharcamiento, aguas debajo de él mismo.

Los menores valores de porosidad, se encuentran en la zona de la finca El alto, estos depósitos tipo colada de barro, están compuesto de material fino principalmente, además las prácticas de ganadería extensiva en esta zona son evidentes, provocando la compactación del terreno.

El depósito cercano a la finca la casita, tipo depósito vertiente, son los de mayor profundidad en sus niveles iniciales, cabe observar que la profundidad analizada en las estimaciones anteriores, corresponden a los niveles homogéneos superiores de los depósitos, a los que se puede asociar el agua almacenada estudiada en las pruebas de hidroquímica.

7.2 ZONAS DE RECARGA Y MECANISMOS EXFILTRACION EN LA CERS.

La recarga y exfiltración de los cauces, están condicionados principalmente por controles litológicos y estructurales. Los cambios de litología, ya sea por contacto normal o fallado, implican, cambio de conductividad hidráulica, esto es facilidad o dificultad en el movimiento del agua de subsuperficie.

El sistema de control estructural (fallas y diaclasas) además de afectar el transporte del recurso hídrico dentro de la zona de estudio, se convierte en un patrón de rutas preferenciales de recarga a la microcuenca. Estos sistemas colocan en contacto el agua

almacenada en los depósitos cuaternarios del altiplano de Berlín con la red hídrica de la C.E.R.S.

El nacimiento principal de el Chorro el Vivito, principal nacimiento de la quebrada Río Sucio, exfiltra en el contacto entre los depósitos fluvioglaciales de la parte alta y el Ortoneis, a pesar de que este ultimo en superficie se presenta diaclasado, éstas fisuras se cierran en profundidad. Se puede observar en el sondeo eléctrico vertical 16 en el cual se evidencia los cambios fuertes de resistividad aparente a la profundidad que se observa este afloramiento hídrico, indicando el trazo de la falla Barro Negro. (Figura 50)

En el corte 156, se aprecia este cambio de litología, en la parte alta, el corte sigue la trayectoria de la falla de Río sucio. La caracterización hidroquímica de este nacimiento indica un comportamiento de Bicarbonatada Magnésica a Bicarbonatada sódica Orozco, Mendoza (2005), lo anterior demuestra que las aguas que exfiltran en este punto poseen un mayor desarrollo geoquímico, que podría asociarse a mayores tiempos de residencia o de viaje. Como se observa, la anterior clasificación hidroquímica, concuerda bien con la presencia de la falla regional de Río Sucio- Barro Negro.

Como se aprecia en el corte 156, la capa superior del Neis se encuentra diaclasada, este diaclasamiento es menos intenso que en la zona cercana a la batea, zona occidental de la C.E.R.S, este diaclasamiento, es acelerado por los fenómenos de gelifracción pretérita.

De igual forma se observa que la surgencia de algunos afloramientos de agua, están influenciados por la presencia de fallas, estas fallas actúan de la siguiente forma: colocando en contacto dos litologías diferentes o colocando en contacto dos litologías de igual formación, sin embargo con diferentes facies. Este patrón se repite en los nacimientos que evidencian los otros cortes hidrogeológicos.

La figura 49 indica la diferente información incorporada a los perfiles hidrogeológicos, información litológica, control estructural, nacimientos y red hidrográfica, vegetación, variación de la precipitación meteórica y oculta, caracterización hidronímica, pruebas de geofísica realizadas y rutas de flujo.

La ubicación espacial de los perfiles hidrogeológicos se indica en la figura 55.



Figura 49. Leyenda de la información incorporada en los perfiles hidrogeológicos.

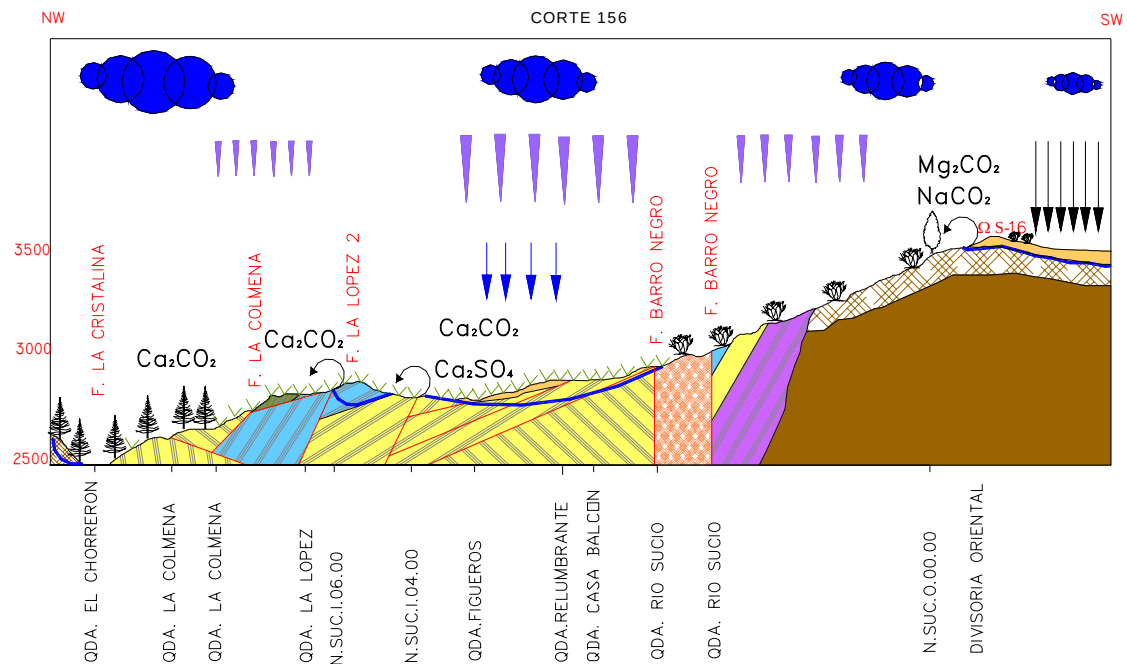


Figura 50. Corte Hidrogeológico 156. Corte caracterizado por seguir la trayectoria de la falla Río Sucio

De igual forma se indica la variación de la precipitación meteórica y oculta, que como se observa esta condicionada por la elevación.

En la figura 51 se muestra el corte hidrogeológico No. 87, este corte muestra la presencia de rutas de flujo preferenciales como medios de recarga a la C.E.R.S. Estas rutas se deben al alto grado de diaclasamiento en la zona nororiental que limita con la parte alta de la cuenca de la quebrada Los Arcos y a la orientación preferencial de estos sistemas.

En la misma figura se observa el control geológico que influencia la exfiltración del nacimiento, sobre la quebrada Barro Negro, el agua de subsuperficie que ingresa a la C.E.R.S, una vez se encuentra con la roca cristalina de la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara, aflora en superficie ya que la permeabilidad de la roca cristalina es muy baja. La ruta de flujo estaría influenciada tanto por la orientación preferencial de las familias de diaclasas analizadas y por el buzamiento característico de los paquetes de la formación Tambor en esta zona.

Un cambio de litología también condiciona la exfiltración del nacimiento principal de la quebrada Relumbrante, contacto formación Tambor – Formación - Rosa blanca. Es interesante anotar que esta clase de contacto litológico condiciona otros nacimientos de otras corrientes (López y La Colmena principalmente).

Desde el punto de vista de clasificación hidroquímica, el nacimiento indicado en la corriente de la quebrada Barro Negro , se caracteriza como bicarbonatado magnésica, lo cual correspondería a aguas exfiltradas de mayor desarrollo geoquímico e implicaría tiempos de residencia mayores. La exfiltración principal de la quebrada Relumbrante se caracteriza como Bicarbonatada Cálcica, que según la secuencia de Chevotarev, corresponderían a aguas con menor desarrollo geoquímico y menores tiempos de residencia .Orozco, Mendoza (2005)

Tanto en el perfil hidrogeológico 156 como en el 87, se indica el comportamiento hidroquímico de las aguas de la principal zona de depósito en la C.E.R.S, los puntos muestreados indican aguas tipo bicarbonatadas cálcicas a sulfatadas cálcicas, lo anterior se puede explicar, si se tiene en cuenta que esta zona es receptora de varias corrientes como, Relumbrante, Figueros, Casa Balcón, El Vivito, Barro Negro y algunas exfiltraciones importantes no asociadas a los anteriores cuerpos de agua como es el caso del nacimiento que se produce por el contraste litológico de la Formación Girón y depósitos . Bajo estas condiciones esta zona de depósitos, estaría funcionando como un acuífero libre que recibe aporte de flujos con diferentes comportamientos geoquímicos, y que constantemente regula el aporte a los cauces aguas abajo del mismo.

Esta condición de zona de almacenamiento en función de diferentes flujos, es la que permite la presencia de las elevadas tablas freáticas, evidenciadas en el tiempo de la campaña de campo en la época de estiaje y visitas posteriores.

En el corte también se muestra el desarrollo de la cobertura vegetal en función el grado de disponibilidad hídrica. La vegetación en la zona de recarga indicada se caracteriza por ser alta, frondosa y muy densa, a diferencia de la vegetación tipo arbustiva y de matorral en el resto del perfil.

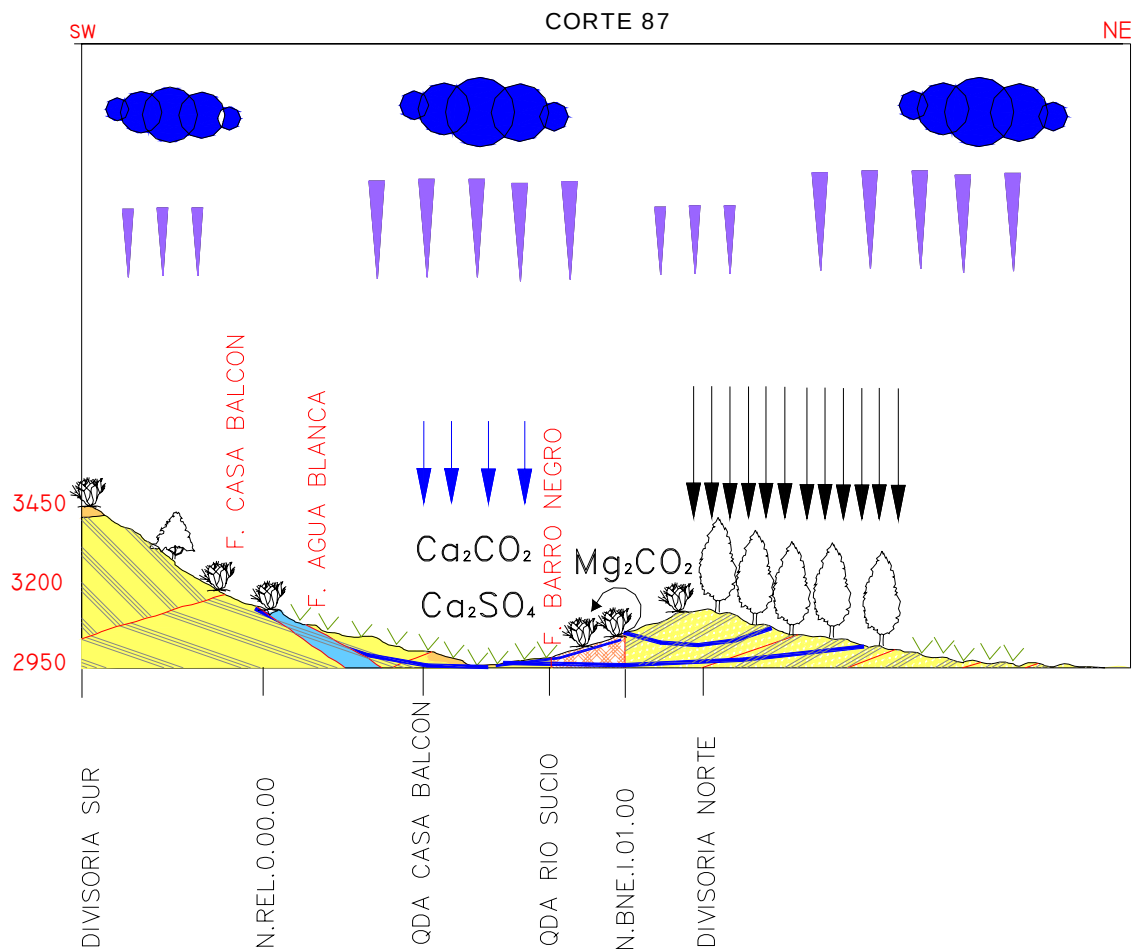


Figura 51. Corte hidrogeológico 87. Muestra la presencia de rutas de flujo preferenciales como medios de recarga de la CERS.

La figura 52, muestra el perfil hidrogeológico 55. en éste se observan los nacimientos de la quebrada El Chorrerón y el nacimiento principal de la quebrada La López.

Los nacimientos de la quebrada el Chorrerón están controlados por dos cambios diferentes de litología, el nacimiento exfiltra función al contacto en superficie entre los depósitos fluvioglaciares y el Neis fracturado.

El nacimiento principal de esta quebrada, se produce merced al contacto fallado entre el cuerpo metamórfico y la formación Tambor. Estos contactos caracterizan el tipo de cauce y el volumen de agua que exfiltra, de esta forma el nacimiento de la quebrada Chorrerón, se caracteriza por exfiltrar bajos volúmenes de carácter intermitente que algunos metros aguas abajo se infiltran por completo.

El nacimiento principal del Chorrerón, es de tipo permanente, y se encuentra alineado con la falla regional la Cristalina, esta última condiciona su carácter permanente y los volúmenes mayores en su nacimiento.

El nacimiento principal de la quebrada La López se produce por el contacto normal de las formaciones Tambor y Rosa Blanca. La formación tambor en la zona cercana al contacto, es más impermeable ya que su matriz es más arcillosa, a lo anterior hay que añadir que el efecto de la falla López 2, la cual esta colocando en contacto diferentes secuencias sedimentarias dispuestas en forma cóncava a lo largo de la falla, dando la impresión de un sinclinal. Esta disposición de los paquetes de las formaciones afectadas por el control estructural, facilita el movimiento, almacenamiento y posterior exfiltración en la zona de contacto Tambor – Rosa Blanca.

Desde el punto de vista hidroquímico, el comportamiento de los nacimientos de la quebrada el Chorrerón, varían entre Bicarbonatados Cálcicos y Bicarbonatados Sódicos, siendo estas últimas las de mayor desarrollo geoquímico y por ende evidencian mayores tiempos de residencia. Lo anterior esta asociado a la presencia de la falla regional La Cristalina y su aptitud como ruta preferencial. El comportamiento Bicarbonatado cálcico del nacimiento de la quebrada La López, indica menor desarrollo geoquímico.

Las rutas de flujo trazadas obedecen a consideraciones de contacto litológico y control estructural como es el caso de el Chorrerón, la orientación y disposición de los niveles de la formación Tambor y Rosablanca debido a la influencia de la falla López 2, como es el caso de el nacimiento de la quebrada López y a las orientaciones preferenciales en la Cuarzomonzonita y zonas aledañas.

La figura 53 muestra el corte hidrogeológico 82, y permite analizar las exfiltraciones en los nacimientos de las quebradas Casa Balcón, Relumbrante y Algunos Brazos de la Colmena.

En general estos se dan por cambios en las litologías y disposición en los buzamientos de las formaciones Tambor y Rosa Blanca principalmente.

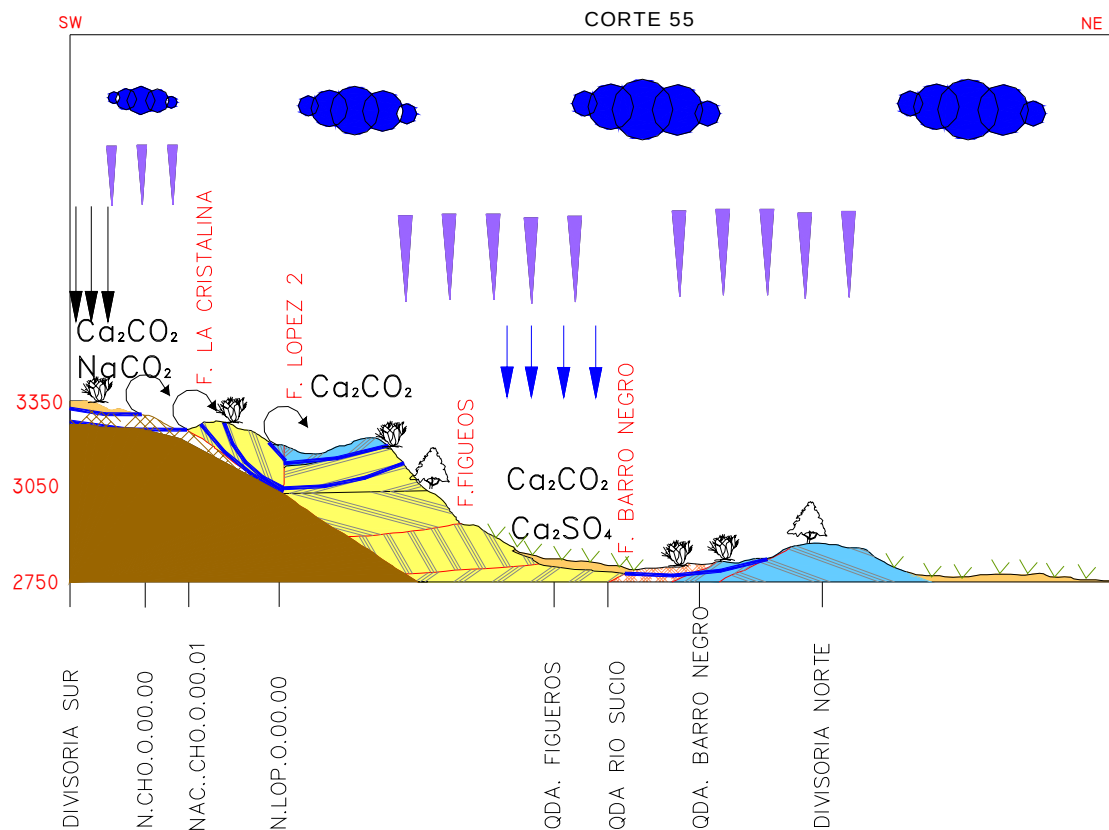


Figura 52. Corte hidrogeológico 55. se observan los nacimientos de la quebrada El Chorrerón y el nacimiento principal de la quebrada La López.

El nacimiento principal de la quebrada Casa Balcón, se debe al contacto fallado entre las formaciones Tambor y Rosa blanca así como a la disposición y buzamiento de los paquetes de la formación Rosa Blanca. El nacimiento principal de la quebrada Relumbrante, esta condicionado por el contacto fallado entre las formaciones Rosablanca y Tambor así como a la disposición y buzamiento de los paquetes de la formación Tambor.

El nacimiento mostrado de la quebrada La Colmena de igual forma obedece al contacto fallado entre las formaciones Rosablanca y Tambor así como a la disposición y buzamiento de los paquetes de la formación Tambor.

El comportamiento hidroquímico de estos nacimientos permite clasificarlos como Bicarbonatados Cálculos, evidenciando tiempos de viaje cortos y bajo desarrollo geoquímico.

Como se observa en el mapa geológico y en los perfiles hidrogeológicos, el control estructural de la C.E.R.S, es determinante en la disposición de las litologías, razón a lo

anterior es muy difícil encontrar litologías dispuestas en una secuencia estratigráficamente concordante. El predominio de los contactos fallados, evidencia a la fuerte presencia de bloques estructurales.

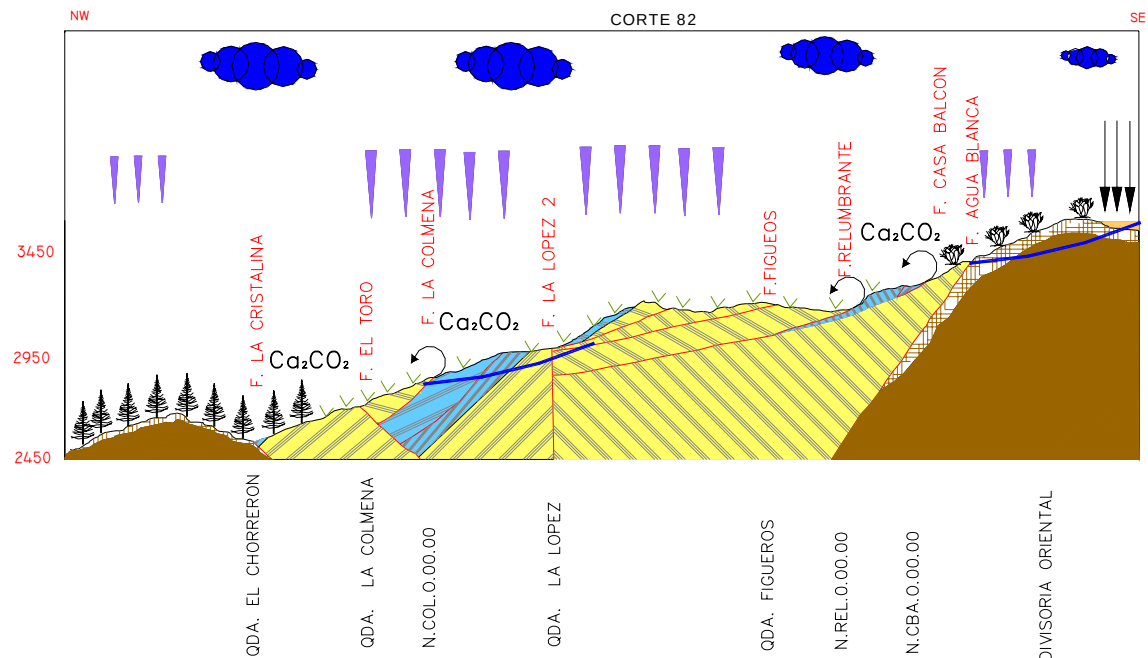


Figura 53. Corte hidrogeológico 82. Analiza las exfiltraciones en los nacimientos de las quebradas Casa Balcón, Relumbrante y Algunos Brazos de la Colmena.

Los bloques estructurales, son tramos de litologías, que han sido desplazados, por diferentes esfuerzos, lo cual implica cambio en la orientación original de sus estratos, además de aumentar la porosidad secundaria en los trazos de fallas.

La recarga hacia la cuenca, esta controlada principalmente por los sistemas de fallas regionales, como son las fallas de Río Sucio y la Falla La Cristalina, además de algunas fallas mas locales que colocan en contacto la zona alta de la C.E.R.S con el altiplano de Berlín.

A la presencia de estas fallas en la zona alta, hay que sumar el comportamiento ortogonal de la red de fallamiento en la C.E.R.S, que controlan la disposición de los bloques estructurales. Este sistema de fallas, permiten la presencia de una zona de trituración que tiene su importancia desde el punto de vista hidrogeológico, al aumentar las porosidades secundarias, alterar los buzamientos de los bloques estructurales permitiendo en algunos casos el almacenamiento y el transporte. La presencia de esta red ortogonal de fallamiento, controla la orientación preferencial y la

intensidad del diaclasamiento, facilitando o dificultando el movimiento a través de las diaclasas.

Ejemplo de lo anterior se puede observar en la zona alta cuenca, la zona comprendida entre las fallas de Río sucio y Relumbrante, condicionan la presencia de familias de diaclasas ortogonales cuya orientación preferencial facilita el flujo en sentido EW y en parte sur de la microcuenca de Arcos que limita con la C.E.R.S la gran densidad de fallas en sentido NW-SE, produce una red de diaclasamiento ortogonal con dirección preferencial NE – SW, esta dirección facilita el flujo hacia la cuenca.

Otro comportamiento identificado, fue el de la familia de diaclasas del Ortoneis al sur del cauce de la quebrada el Chorrerón. En general, se pueden distinguir orientaciones ortogonales de diaclasamiento, predominando la dirección N45E perpendicular a la Falla la cristalina.

La figura 54, indica la orientación y magnitud de los diferentes tipos de flujos inducidos, que condicionan los procesos de recarga a la C.E.R.S. Además en ella se puede apreciar la red ortogonal del sistema de fallamiento de la micro cuenca.

Es interesante observar el control de los patrones de fallamiento a la red hidrográfica de la zona en estudio. El alineamiento de ambas redes es muy evidente.

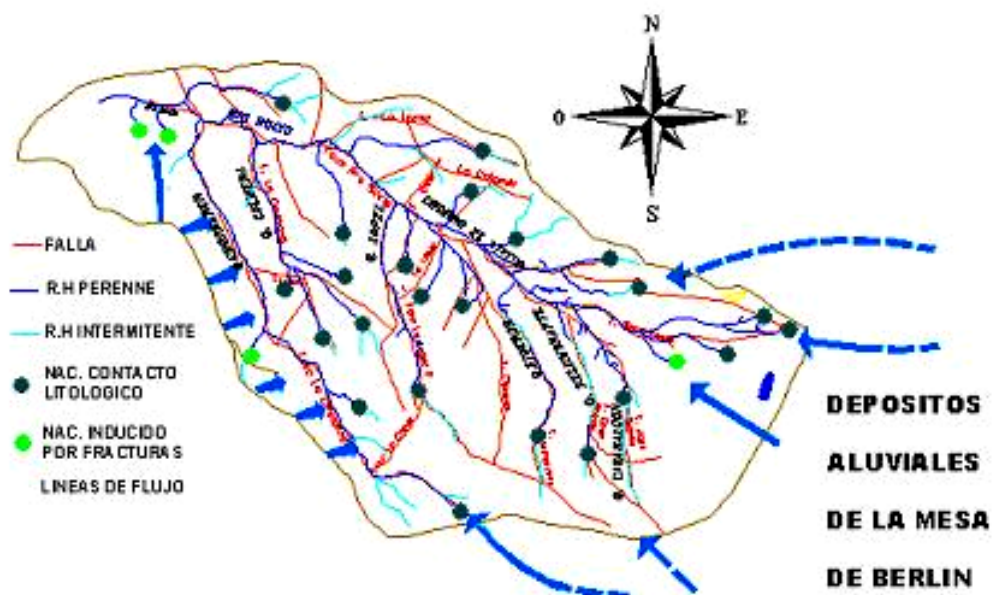


Figura 54. Líneas de flujo inducidas por sistemas de fallas y por sistemas de diaclasas. También presenta las líneas de los cortes hidrogeológicos

7.3 PROCESO DE MODELACION. MODELO CONCEPTUAL

Cualquier modelo es una simplificación de una situación real que se conoce sólo puntualmente a través de un número limitado de datos. Por otra parte, si se conociese exactamente la situación real, no sería operativo ni posible reproducirla exactamente en el modelo planteado. El modelo es una simplificación. La validez es la simplificación depende del objetivo que se pretende conseguir con el modelo. Cuando el objetivo se complica se tiene que complicar el modelo.

El proceso a seguir en una modelación es el de la figura 55. De la situación real a través de los estudios hidrogeológicos se pasa a un modelo conceptual. De acuerdo con el objetivo y la necesidad de simulación, se elige el método operativo.

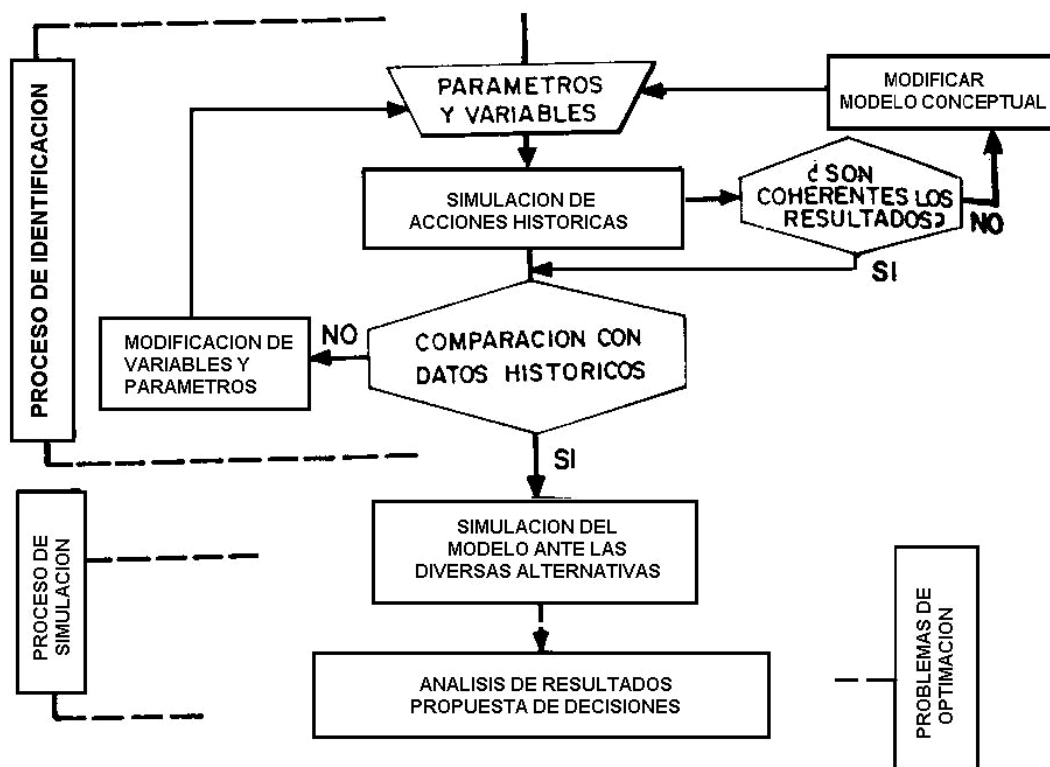


Figura 55. Procesos de una modelación tomado de Custodio Llamas (1996)

En la figura 56 se expresan gráficamente los procesos que se siguen en la utilización de un modelo.

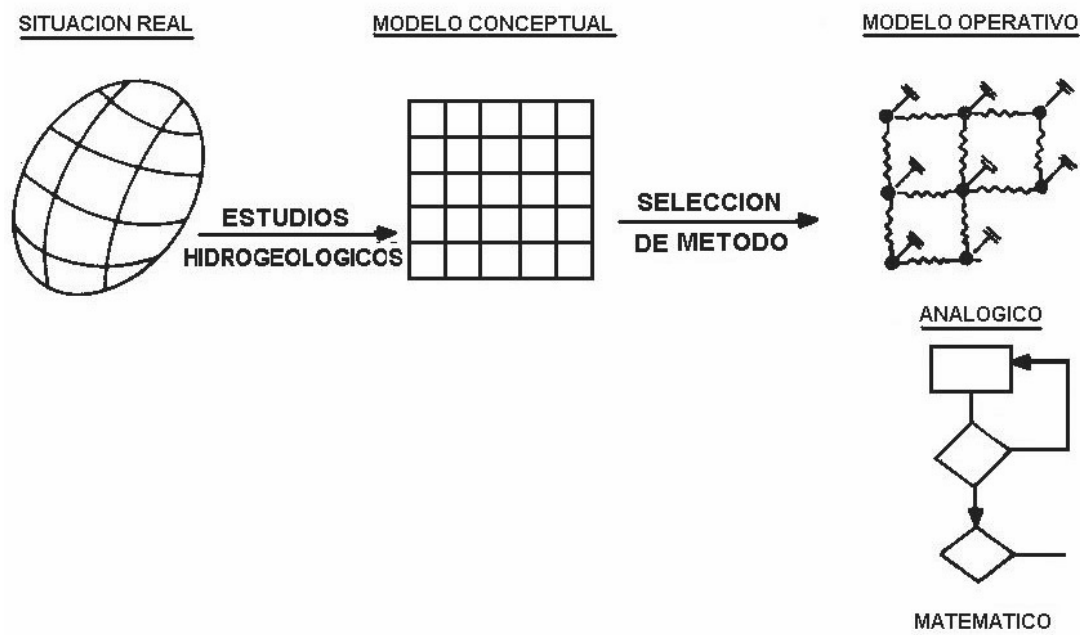


Figura 56. Procesos de Calibración y Simulación, tomado de Custodio Llamas (1996)

Se asignan unos parámetros y una variable al modelo, se simulan unas acciones históricas conocidas y se inspeccionan los resultados para ver si son coherentes con los datos reales que se poseen. Si no lo son, habría que modificar el modelo conceptual. Para ello, conviene reconsiderar el problema, para ver si alguna de las hipótesis puede ser modificada razonablemente de acuerdo con los datos hidrogeológicos disponibles, o incluso puede ser necesario realizar alguna investigación complementaria.

Una de las herramientas útiles que ayuda a definir un modelo conceptual geológicamente consistente del área de estudio, es un modelo geológico tridimensional el cual puede ser usado en el modelamiento del flujo de aguas subterráneas.

7.4 MODELO GEOLOGICO TRIDIMENSIONAL.

La representación de la geología es una parte esencial en el modelamiento de aguas subterráneas (Recursos hídricos), por lo tanto un modelo geológico no es único y refleja la intención del uso. En la cuenca experimental de Río Sucio, el modelo tridimensional geológico intenta mostrar subjetivamente el comportamiento de las estructuras en subsuelo, los cambios de geometría de las capas geológicas y el enfrentamiento de

litologías, lo cual se encuentra directamente relacionado con los procesos de infiltración, exfiltración, transporte y almacenamiento del recurso hídrico, tanto en superficie como en subsuperficie.

En el proceso de interpretar los datos disponibles dentro de un modelo geológico 3 – D, la cantidad de datos disponibles, la heterogeneidad y la complejidad de las formaciones llegan a dificultar el establecer una visión general de los principales rasgos geológicos.

Para la elaboración del modelo tridimensional se realizaron una serie de perfiles geológicos sobre la cartografía geológica modificada permitiendo una aproximación al comportamiento estructural, mediante la proyección de los datos estructurales tomados en superficie. También se aplicaron datos complementarios, como los datos de la campaña de geofísica que ayudaron en la aproximación de espesores de las zonas de depósitos y en corroborar el comportamiento de algunas estructuras para el modelo.

Para la representación grafica del modelo se utilizo el programa grafico SURFER, el cual, permite la interpolación de los datos XYZ obtenidos de los perfiles geológicos y geoeléctricos, generando la siguiente imagen 3-D (Figura 57)

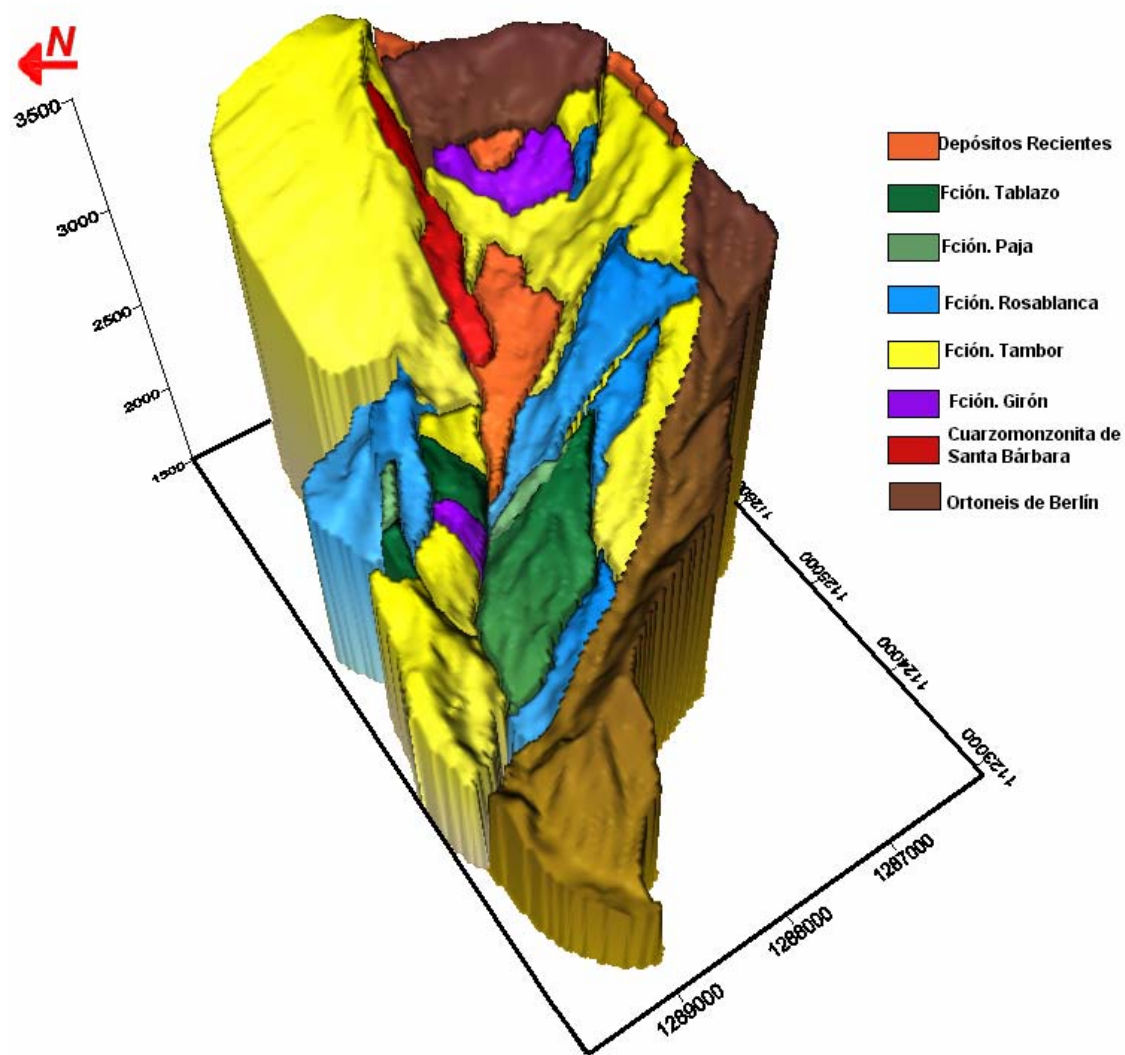


Figura 57. Modelo Geológico Tridimensional de la CERS

7.5 ESTIMACION DE LAS UNIDADES HIDROGEOLOGICAS

Se define una unidad hidrogeológica, como una zona con similares propiedades de almacenamiento y transporte del recurso hídrico subterráneo, lo que se deriva de iguales condiciones de permeabilidad, pendiente, porosidad efectiva, trasmisividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento

El transporte está determinado por parámetros hidráulicos como disposición de los estratos, porosidad secundaria, orientación de las diaclasas conductividad y transmisividad hidráulica. El almacenamiento esta en función de la porosidad efectiva, coeficiente de almacenamiento; parámetros condicionados por el control geológico.

La Estimación de las unidades hidrogeológicas contribuye a la formulación del Modelo Hidrogeológico Conceptual de la CERS; cabe aclarar que obtener la información necesaria para llegar a un modelo conceptual es una tarea multidisciplinaria, en la cual es necesario estimar y calcular diferentes parámetros como son las variables hidráulicas, parámetros geoquímicos, identificación de zonas de vida, variables hidrometereológicas y climáticas, en fin todos los parámetros que condicionan los sistemas hídricos de superficie, subsuperficie y subterráneos .

Teniendo en cuenta lo anterior el presente trabajo esta orientado hacia la consecución de una primera aproximación a un modelo hidrogeológico conceptual de la zona de estudio.

7.6 METODOLOGIA PARA LA CONSTRUCCION DE UNA APROXIMACION AL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL

La información temática desarrollada en la CERS ha permitido la identificación de algunos procesos hidrogeológicos orientados al almacenamiento, transporte y fenómenos de recarga; las variables hidrológicas de entrada al modelo fueron analizadas a partir de información hidroclimática de las estaciones cercanas a la cuenca, además la campaña de campo permitió identificar otras entradas como es la precipitación oculta. La fotogeología, el control estructural y la campaña de hidroquímica (iones principales) permitieron identificar fenómenos de recarga externa hacia la cuenca desde el altiplano de la mesa de Berlín.

La información morfométrica, la campaña de geofísica, la disposición estructural y la identificación de diferentes fenómenos de carácter fisicoquímicos como la disolución y el fracturamiento permitieron evidenciar orientaciones y rutas preferenciales de transporte en la cuenca. Por otro lado, gracias a la campaña de topografía se obtuvo un conocimiento más detallado de la fisiografía de la cuenca, el mapeo de los depósitos y la estimación de algunos parámetros hidráulicos como la porosidad efectiva desde técnicas geofísicas y geoquímicas, así como la identificación de las profundidades de estos depósitos permitieron tener conocimiento de la dinámica de las zonas de almacenamiento.

La figura 58 ilustra la interacción de cada uno de los mapas temáticos y de la diferente información recolectada en campo, anteriormente descrita

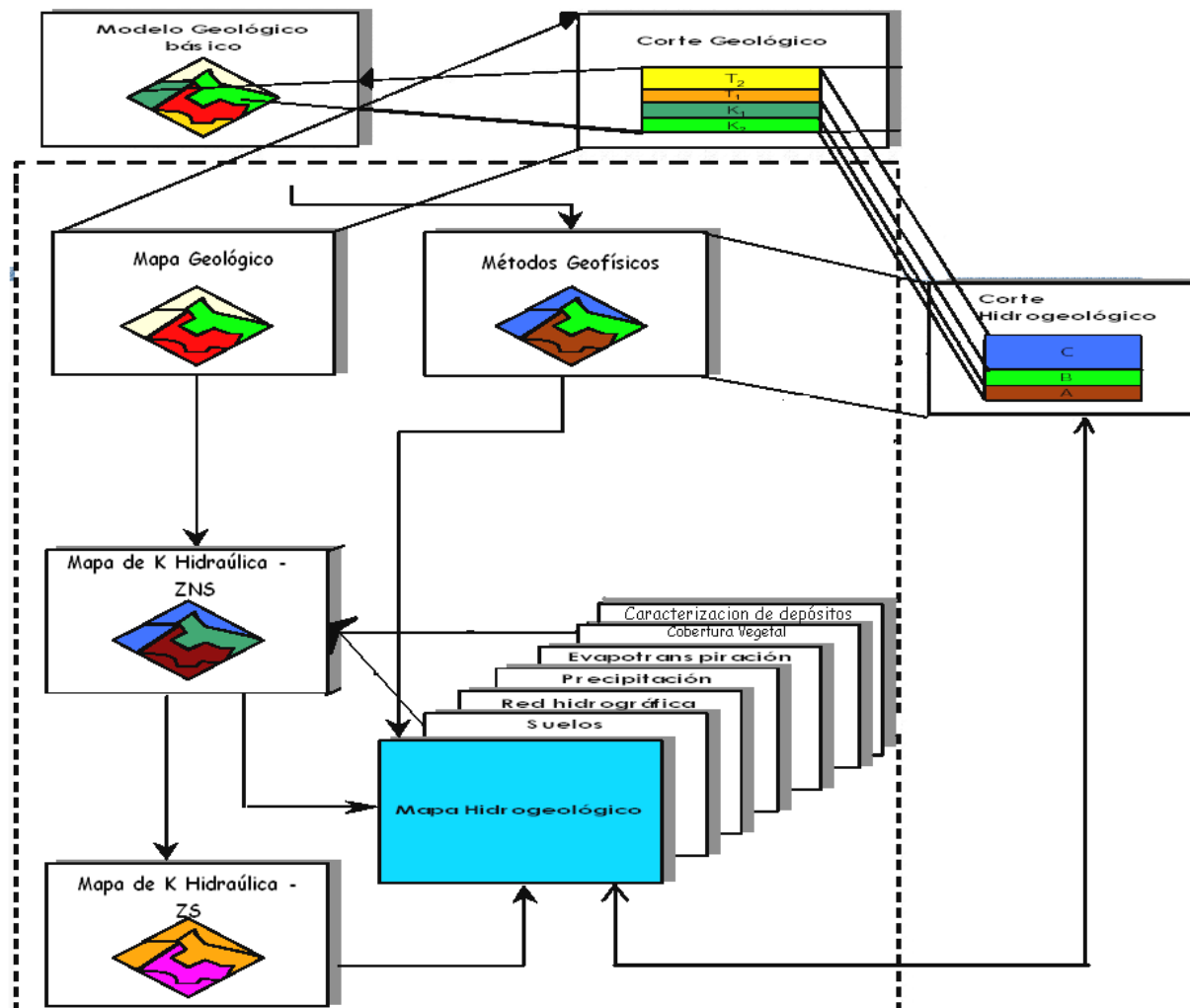


Figura 58. Relación información para procesar el mapa hidrogeológico

La recolección bibliográfica, campaña de de campo y el procesamiento de datos en oficina, permitió la elaboración de mapas temáticos en las siguientes áreas:

- Geología
- Suelos
- Cobertura Vegetal
- Hidrografía
- Depósitos, (extensión, profundidad y porosidad total)
- Precipitaciones (meteórica y oculta)
- Evapotranspiración
- Pendientes
- También se han definido mapas secundarios en función de las texturas de los suelos, cobertura vegetal, geología estructural que condicionan la facilidad o dificultad de transporte en la zona superficial del suelo , en la zona no saturada y saturada.

El objetivo de realizar estos mapas es conservar el protocolo en la evolución de un sistema metodológico que permite elaborar un modelo de mapa hidrogeológico ya sea completo o aproximado, esta evolución se puede conceptuar como un modelo sinóptico (figura 59).

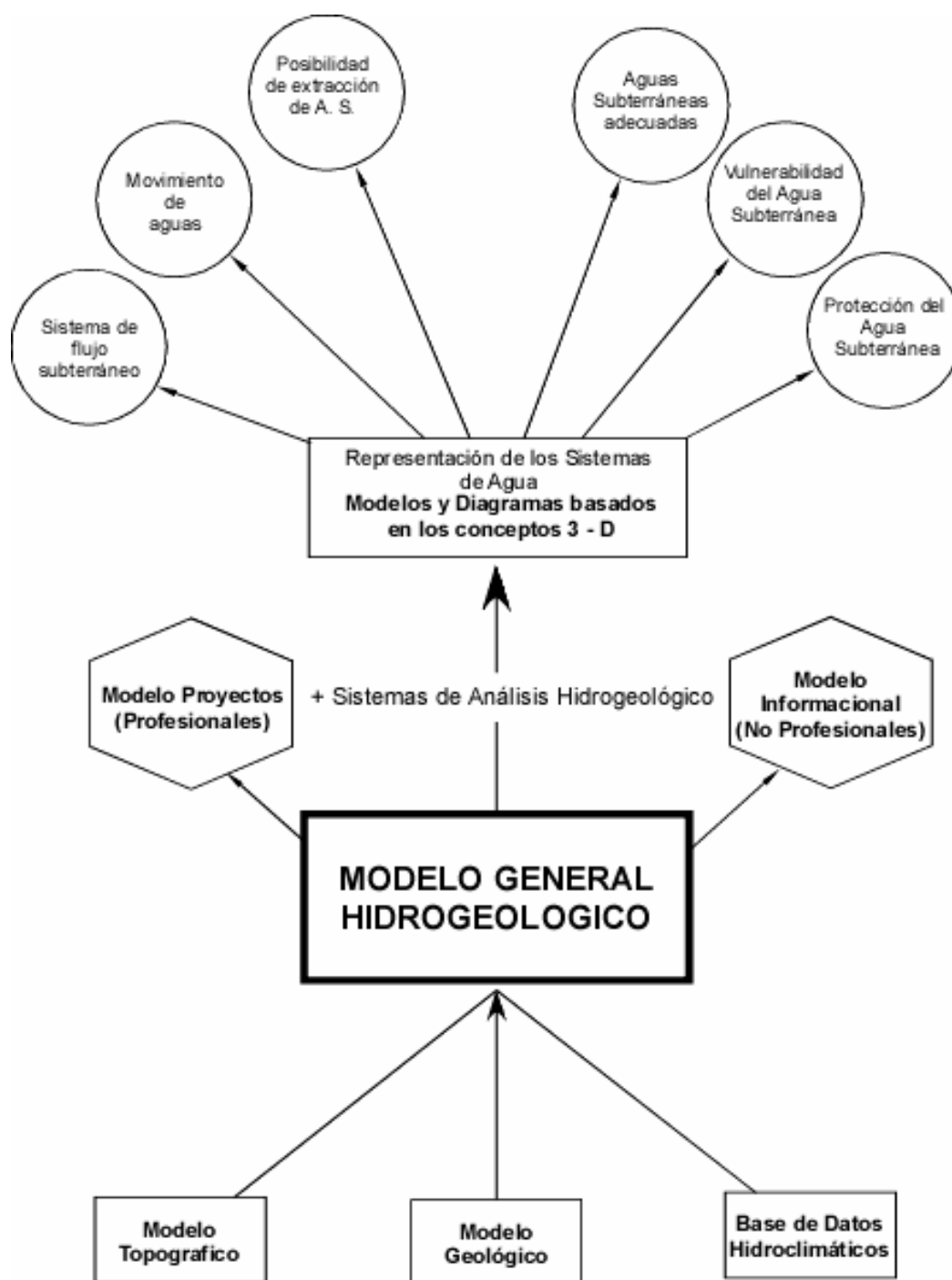


Figura 59. Sinopsis del proceso de elaboración y utilización de un modelo General Hidrogeológico

7.6.1 Ejecución

Para la consecución de las Unidades Hidrogeológicas de la CERS y tomando como base la relación de los mapas temáticos ya definidos, se tiene en cuenta

aspectos tales como el transporte, almacenamiento y ocurrencia del agua; esta información es tratada estadísticamente, a partir de Técnicas de Análisis Multivariante, considerando que para este tipo de análisis cada punto espacializado posee atributos físicos propios (geología, la cobertura vegetal, suelos y oferta hídrica) que lo identifican .

En este caso la técnica multivariante utilizada es el clustering, el cual tiene como objetivo identificar y agrupar comportamientos similares desde el punto de vista matemático y a partir de los análisis de la similaridad. En individuos o muestras a los cuales se les asocia diferentes variables se les puede definir como similares de acuerdo a la distancia que hay entre ellos, esta semejanza es evaluada por diferentes métodos, entre otros por el cuadrado de las distancias euclidianas.

Si los datos o valores observados en cada uno de los individuos son de tipo cuantitativo, un criterio o medida de similaridad estaría dado por el concepto de métrica; de esta manera podemos decir que dos objetos son o no similares de acuerdo a la distancia que hay entre ellos

El análisis multivariante se enfoca en dos aspectos: i) identificar los clusters o conglomerados y los miembros que contienen y ii) determinar el número óptimo de cluster de cada análisis.

Hacia el primer aspecto los métodos de agrupación se dividen en jerárquicos y no jerárquicos y se utilizan técnicas como el vecino mas cercano, mas lejano y los coeficientes de asociación, sin embargo, de no conocer el número de clusters alrededor de los cuales se van a agrupar los miembros, muestras o individuos genera incertidumbre; métodos como el K medios tiende a salvar esta limitación, en este método se tiene el conocimiento del numero de cluster alrededor de los cuales los miembros se van a agrupar. Razón a esto es la metodología mas indicada para realizar los mapas de unidades hidrogeológicas en función de las variables antes nombradas.

El procedimiento llevado a cabo para producir el mapa de unidades hidrogeológicas se definió a partir del procesamiento de los datos para 6 variables:

- Pendientes
 - Geología
 - Almacenamiento Capilar y Cobertura superficial del Suelo, Kh
 - Conductividad hidráulica en la capa superior de suelo. Khs
 - Conductividad hidráulica en la capa inferior de suelo. Kp
 - Oferta Hídrica
-
- ***Almacenamiento Capilar y Cobertura superficial del Suelo, Kh.*** Este parámetro, tiene en cuenta la cantidad de almacenamiento de agua en la parte superior del suelo por efecto de interceptación en la vegetación y acumulación de agua en la superficie por causa de encharcamiento. De acuerdo con lo anterior, se analizó que el parámetro en cuestión está estrechamente relacionado con el uso de suelo y la textura dada por la clasificación de suelos, arenosa, arcillosa, franca etc. Además si se tiene en cuenta que esta textura en suelos in situ está controlada por el material parental, cabe la posibilidad de que la geología condicione también el comportamiento de esta variable. Las texturas de los suelos condicionan las propiedades hidráulicas de transporte y de almacenamiento.

A cada uno de los parámetros anteriores se les dio un peso en función de la capacidad de almacenamiento según las texturas del suelo, ver tabla de Parametrización en el modelo hidrogeológico (tabla 33) y el grado de interceptación.

TEXTURA	Vr.	COBERTURA VEGETAL	Vr.	GEOLOGIA	Vr.
Franco-arcillosa	7	Bosque Plantado	7	Cuarzomonzonita	2
Franco-arcillosa-limosa	7	Bosque Secundario	6	Girón	2
Franco-limosa	6	Cultivos Permanentes	5	Paja	1
Franca	5	Matorral Paramuno	4	Rosa Blanca	5
Franco arenosa muy fina	5	Pajonal	3	Tablazo	3
Arcillosa arcillo limosa	4	Pastos	2	Ortoneis	4
Arcillo Arenosa	4	Rastrojos	1	Depósitos	3
Franco Arcillo Arenosa	4			Tambor imperm.	6
Franco Arenosa	3			Zona de trituración	3
Areno Francosa	2				
Arena	1				

Tabla 33. Parametrización del modelo hidrogeológico 1

En la tabla 33 los valores bajos indican coberturas con poca capacidad para interceptar la lluvia, texturas con baja capacidad para el almacenamiento capilar así como litologías poco porosas con baja permeabilidad primaria.

El comportamiento de la formación tambor se dividió en dos zonas lejanas a los contactos con mayor valor y zonas cercanas a los contactos, mas impermeables, mayores niveles de arcillolitas, con valores mas bajos. De igual forma se creo un corredor de trituración en función a los sistemas de fallamiento en la C.E.R.S.

El MDT de esta variable se calculó asignando diferentes pesos de tipo cualitativo a las variables descritas anteriormente, la variable Kh se expresó de la siguiente forma:

$$Kh = \frac{4 * Mapa_Suelos + 3 * Mapa_CoberturaV + 1 * Mapa_Geologia}{8}$$

EL mapa generado se muestra a continuación, Figura 60:

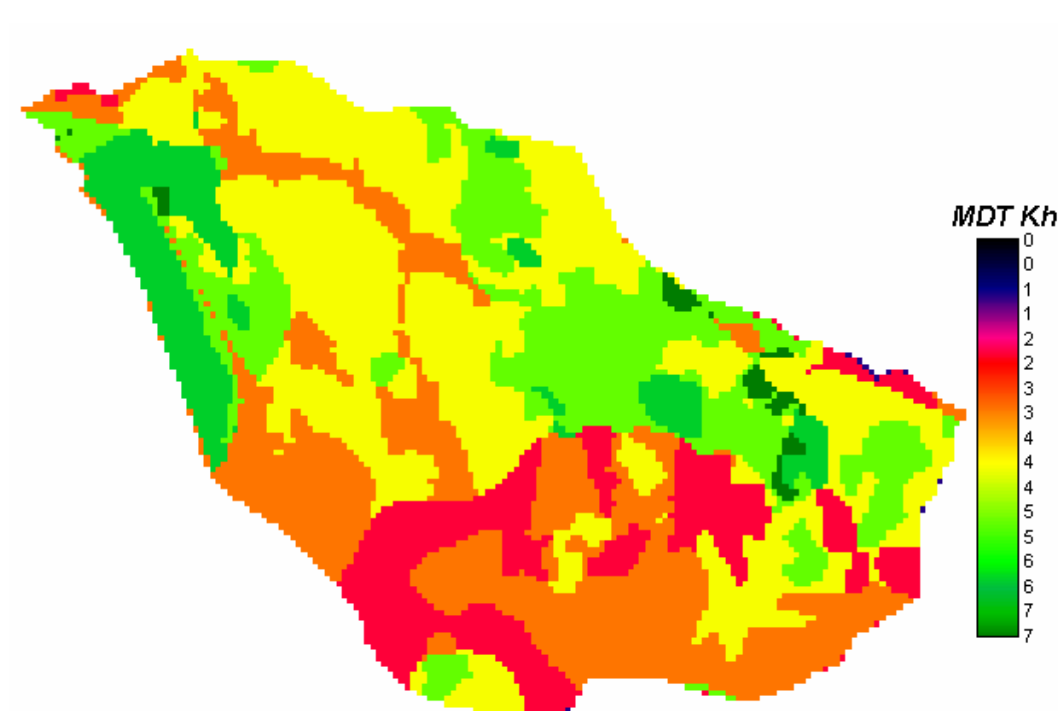


Figura 60. Almacenamiento Capilar y Cobertura superficial del Suelo,

La figura 60 indica la presencia de 7 zonas homogéneas de almacenamiento capilar homogéneas en la C.E.R.S, según la parametrización dada.

▪ **Conductividad hidráulica en la capa superior de suelo. K_h s.** La conductividad hidráulica es una propiedad intrínseca del suelo, que define la cantidad de agua que puede pasar de la parte superior de suelo hacia la zona inferior y por consiguiente la cantidad de escorrentía superficial producida, teniendo en cuenta la disponibilidad de agua. Esta propiedad o parámetro está directamente relacionado con el tipo de suelo encontrado en la zona no saturada, siendo uno de los factores más importantes y definitivos a la hora de hacer un balance hidrológico, porque esta capacidad que tiene el suelo al dejar pasar el agua regula la cantidad que llega a la siguiente zona que es la zona previa a la saturada que luego actúa análogamente.

Para la elaboración del modelo digital de terreno se analizaron los mapas de suelos, cobertura vegetal y geología. La asignación de pesos se realizó en función de la

facilidad de transporte, dada por la conductividad hidráulica ver tabla de parametrización (tabla 34), y facilidad para infiltración según la cobertura vegetal, de igual forma características de la porosidad primaria y secundaria de la geología de la zona. La tabla 34 indica la parametrización sugerida para el cálculo de esta variable.

Se observa que a las coberturas vegetales tipo cultivos permanentes se les ha asignado el mayor peso, estas coberturas se caracterizan por estar permanentemente irrigadas, además la capa superficial de los suelos que generalmente se encuentra compactada se ha removido, lo cual facilita la infiltración.

TEXTURA	Vr.	COBERTURA VEGETAL.	Vr.	GEOLOGIA	Vr.
Franco-arcillosa	5	Bosque Plantado	2	Cuarzomón	2
Franco-arcillosa-limosa	7	Bosque Secundario	3	Giron	2
Franco-limosa	6	Cultivos Permanentes	7	Paja	1
Franca	6	Matorral Paramuno	4	Rosa Blanc	5
Franco arenosa muy fina	6	Pajonal	5	Tablazo	3
Arcillosa arcillo limosa	5	Pastos	4	Orto neiss	4
Arcillo Arenosa	4	Rastrojos	6	Depósitos	3
Franco Arcillo Arenosa	5			Tambor impermeable	6
Franco Arenosa	7			Zona de trituración	3
Areno Francosa	8				
Arena	9				

Tabla 34. Parametrización del modelo hidrogeológico 2

El MDT de esta variable se calculó asignando diferentes pesos de tipo cualitativo a las variables descritas anteriormente, la variable Khs se expresó de la siguiente forma:

$$Khs = \frac{4 * Mapa_Suelos + 1 * Mapa_CoberturaV + 1 * Mapa_Geologia}{6}$$

El mapa generado se muestra a continuación, Figura 61

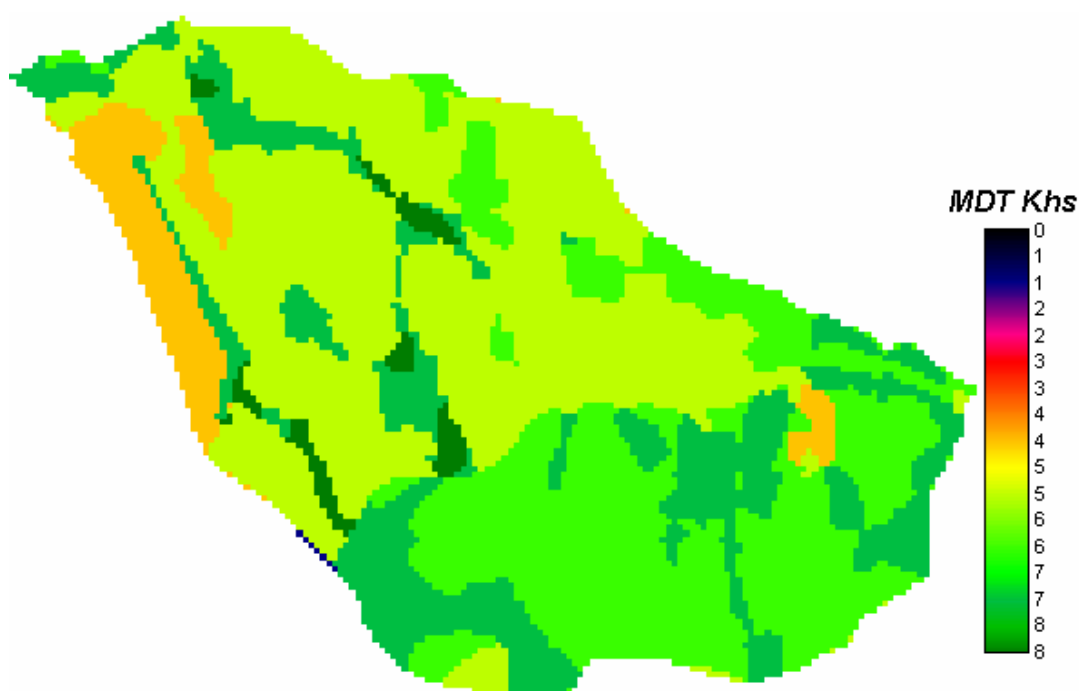


Figura 61. Conductividad hidráulica en la capa superior de suelo. Khs.

La figura 61 indica la presencia de 8 zonas homogéneas de Conductividad hidráulica en la capa superior de suelo.

- **Conductividad hidráulica en la capa inferior de suelo Kp.** La conductividad hidráulica en la parte inferior del suelo define el paso del agua de la zona no saturada a la zona saturada; este fenómeno es también conocido como percolación, el agua luego de percolarse se convierte en flujo subterráneo el cual puede llegar a convertirse en aporte al flujo base metros mas adelante. Este parámetro esta estrechamente relacionado con la geología de la zona y la cantidad de humedad en la zona inmediatamente superior.

Para la construcción de este MDT, se utilizo los mapas de geología, así como el mapa de Khs creado anteriormente. El MDT de esta variable se calculó asignando diferentes pesos de tipo cualitativo a las variables descritas anteriormente, la variable Khs se expresó de la siguiente forma:

$$Kp = \frac{4 * Mapa_Geologia + 1 * Khs}{5}$$

EL mapa generado se muestra a continuación, Figura 62

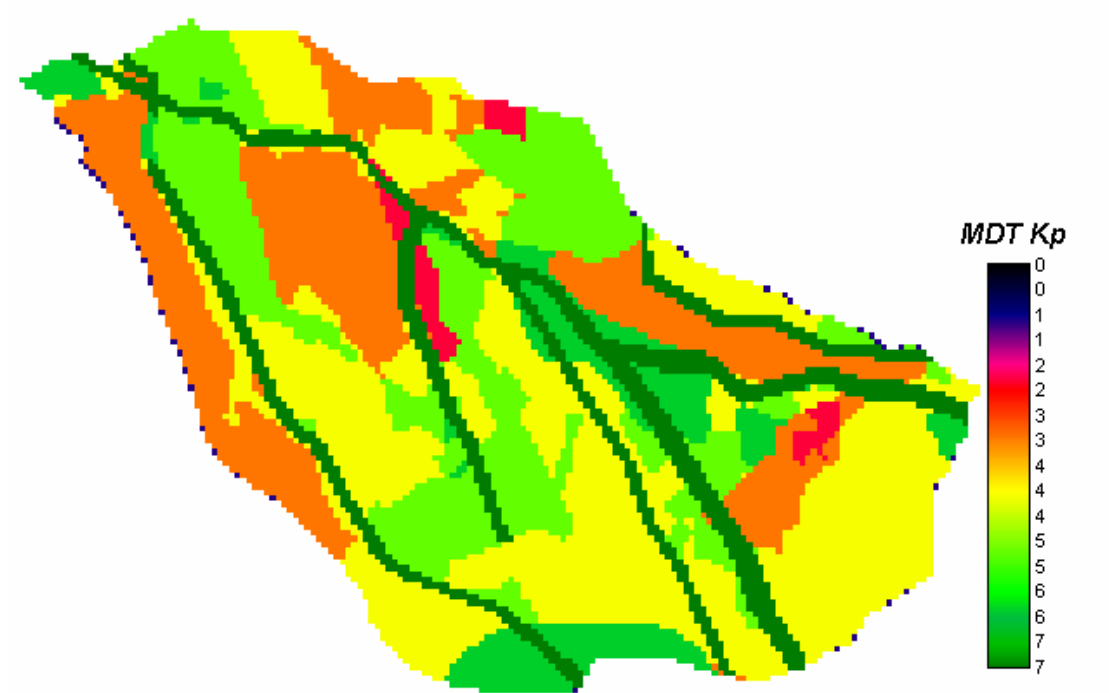


Figura 62. Conductividad hidráulica en la capa inferior de suelo Kp

La figura 62 indica la presencia de 7 zonas homogéneas de Conductividad hidráulica de precolación, Kp en la C.E.R.S, según la parametrización dada.

A partir del análisis de esta seis variables y la discriminación de todos los puntos se produjeron 10864 celdas, las cuales fueron procesadas en el software R generando el análisis de clusters y por lo tanto la distribución en zonas homogéneas diferenciadas por el número de semillas escogidas y la variable oferta hídrica para una primera aproximación al mapa, ya que este procedimiento se llevo a cabo sin el suavizado de pendientes, originándose las siguientes imágenes.

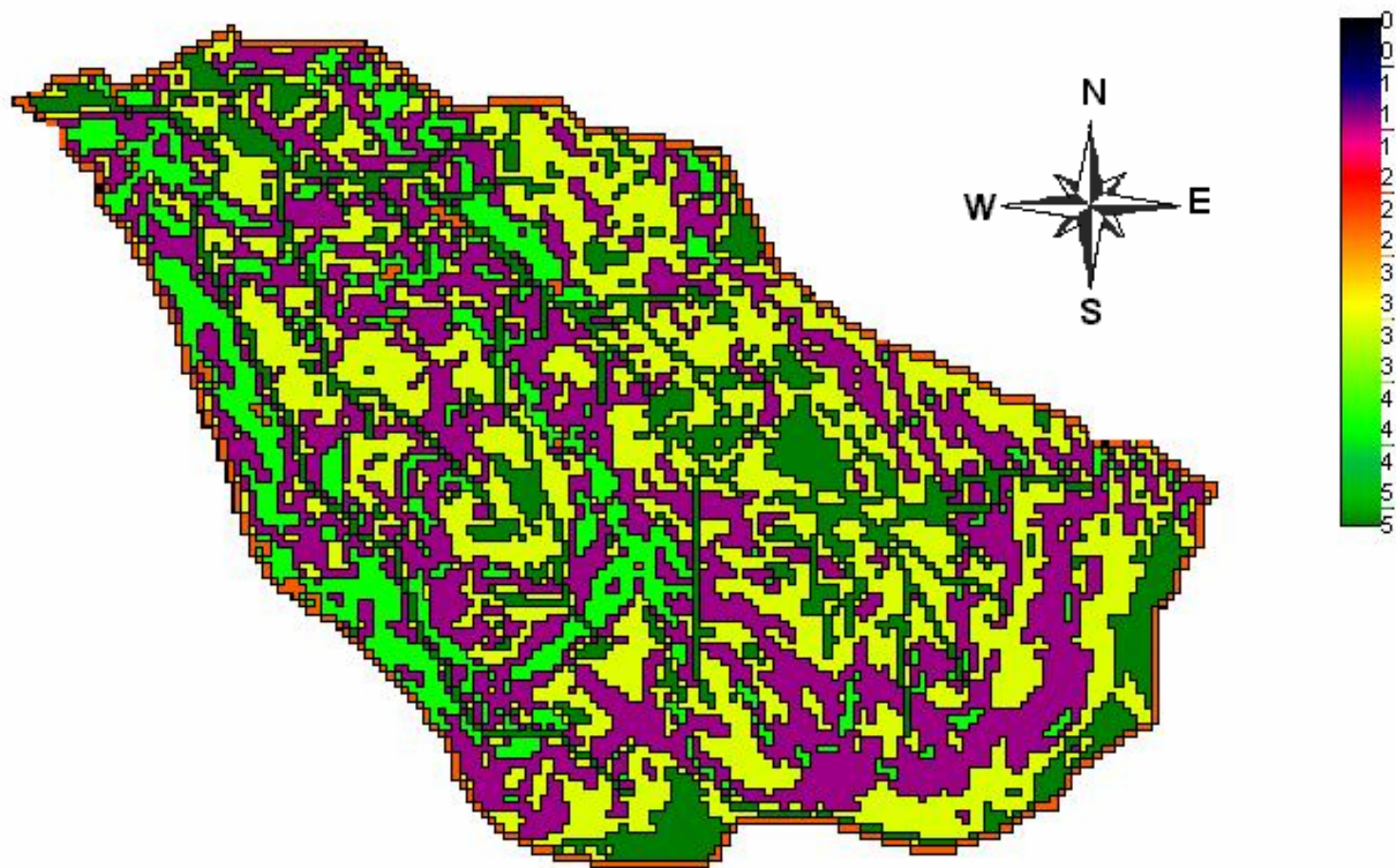


Figura 63. Mapa De Unidades Hidrogeológicas 5 Semillas , Sin Oferta Hídrica

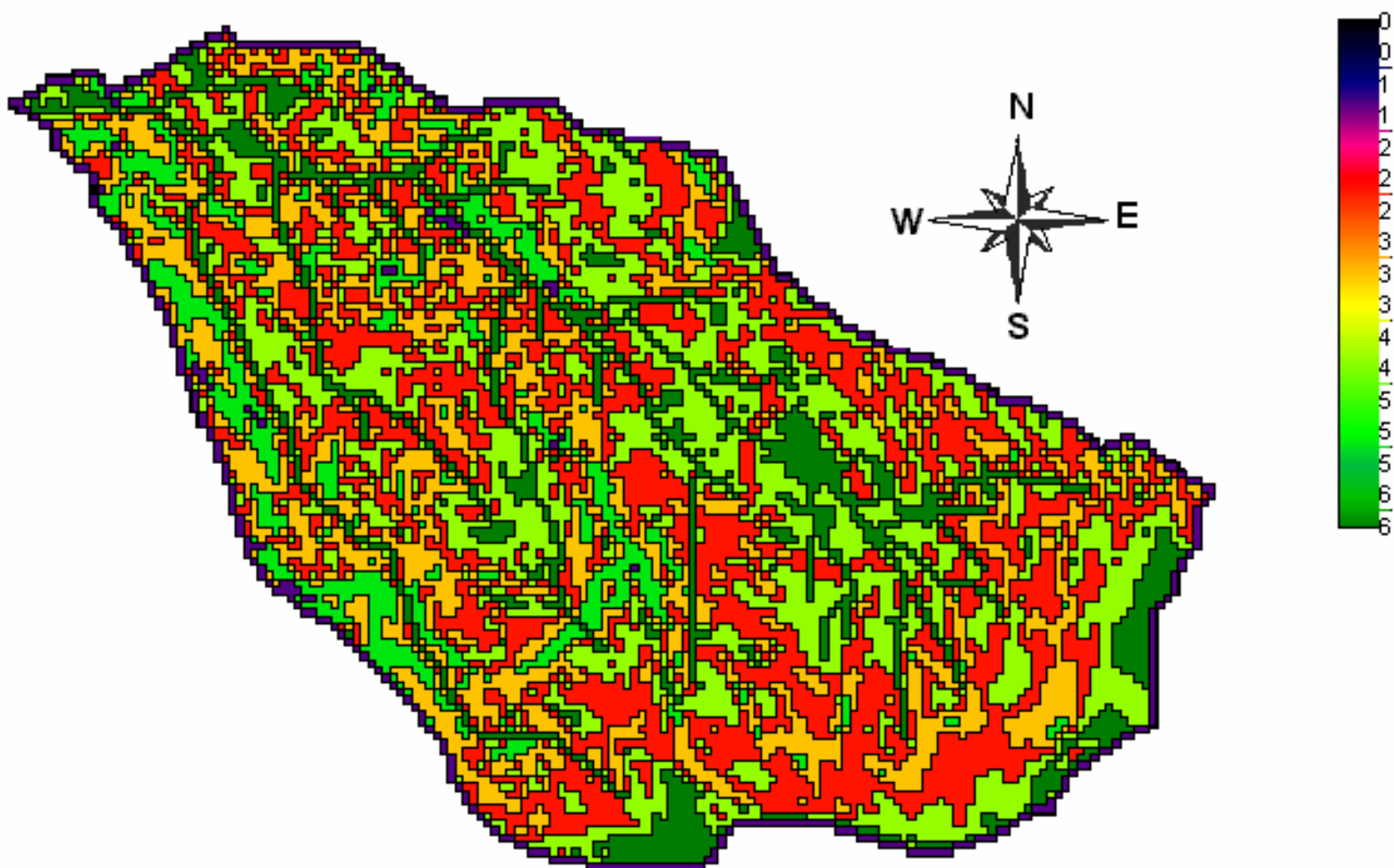


Figura 64. Mapa De Unidades Hidrogeológicas, 6 Semillas Sin Oferta Hídrica.

Este procedimiento se llevó a cabo en el software Idrisi 32, la figura ii y iii se escogieron como las mejores primeras aproximaciones a nuestro mapa de unidades hidrogeológicas, ya que se pueden diferenciar tanto en ii como en iii comportamientos hidrogeológicos correlacionables regidos por la geología, las pendientes, vías preferenciales de transporte y la distribución de depósitos sedimentarios.

	Geología	Pendientes	K1	K2	K3
1	1.664352	3.472222	4.41088	5.543981	2.788194
2	7.581417	2.692732	4.48942	5.515179	6.465501
3	5.926199	2.416974	2.648524	6.958487	6.108856
4	6.574074	4.431287	2.920565	6.201267	4.097466
5	3.851871	3.79106	3.975052	5.441788	5.339917
6	6.005757	4.717329	4.768566	4.801957	3.392631
7	5.856805	2.534499	4.067108	5.65879	3.886106

Tabla 35. Centroides. Mapa de Zonas Hidrogeológicas.

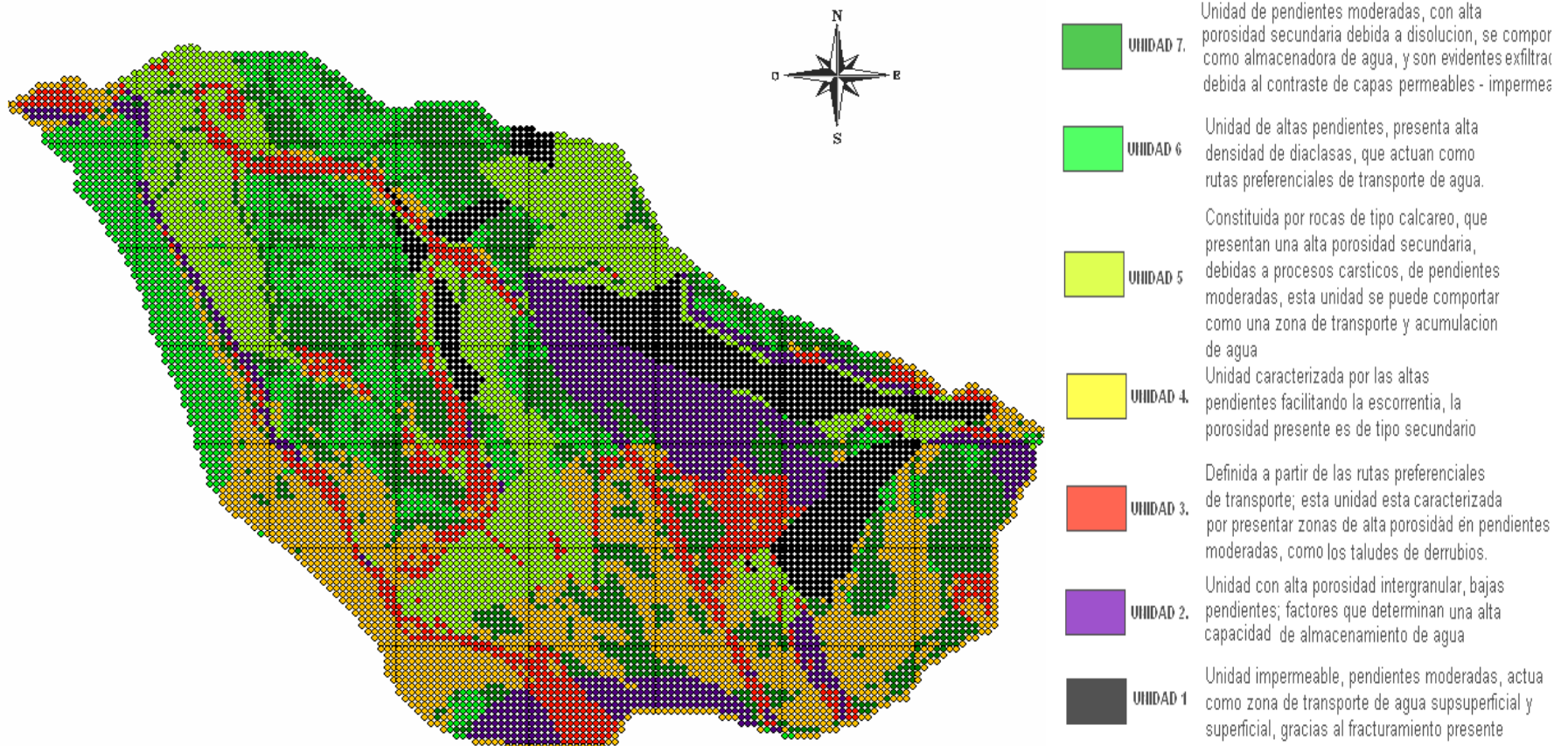


Figura 65. Mapa De Unidades Hidrogeológicas, 7 Semillas Sin Oferta Hídrica, Con Suavizado De Pendientes

CONCLUSIONES

- Al validar la cartografía anterior, definida con una escala 1 : 5000, pero sobre una topografía 1 : 10000; se ha podido redefinir contactos formacionales, fallas, pliegues, además se diferenciaron los depósitos recientes según su génesis.
- Por medio de la fotointerpretación se siguieron los trazos del sistema de falla de la Parte Media, los cuales presentan una dirección NW y que continúan en el altiplano de Berlín, comportándose como rutas preferenciales de transporte desde la zona de recarga de Berlín hacia los depósitos almacenadores de la Cuenca Experimental Río Sucio (CERS)
- Debido a la complejidad estructural de la CERS no se define un comportamiento secuencial de las formaciones; en vez de esto, la cuenca se constituye como un sistema de bloques estructurales que repiten secuencias y enfrenta diversas litologías en un solo punto.
- A partir de las propiedades hidráulicas de cada unidad litológica consolidada presente en la CERS, la formación Rosablanca, caracterizada por la porosidad secundaria originada a partir de la disolución de tipo químico y el fracturamiento, se constituye como la unidad que permite con mayor facilidad el movimiento y almacenamiento de agua; al igual que la formación Tablazo. La Formación Tambor además de presentar porosidad secundaria, posee porosidad de tipo intergranular o primaria, pero debido al grado de compactación hacia la zona SE de la CERS disminuye estas características.

- Durante la campaña de geofísica donde se llevaron a cabo 19 Sondeos Eléctricos Verticales y 6 Tomografías y el posterior procesamiento de datos se identificaron espesores aproximados de los depósitos, además se definió el comportamiento de algunas estructuras geológicas en subsuelo. Con los datos de resistividad aparente, y con la electroconductividad del agua almacenada de estas unidades fue factible establecer valores de porosidad y estimar el volumen almacenado en los mismo.
- Según el análisis estadístico de las direcciones de diaclasas se hace evidente un comportamiento perpendicular a los trazos de las fallas principales de la CERS, presentándose una mayor densidad de diaclasamiento en las zonas de confluencia de fallas como La Cristalina y Río Sucio.
- A partir de la clasificación del ITC de Holanda se definieron, según su génesis, cinco unidades geomorfológicas presentes en la CERS : de origen denudacional, estructural, cárstico, fluvial y glacial; las cuales controlan el almacenamiento, caudal base, porosidad, conductividad y procesos de infiltración.
- En la realización del mapa de unidades Hidrogeológicas se tuvieron en cuenta los factores orientados a los procesos de recarga, almacenamiento y transporte de agua, así como también, factores hidroclimáticos que condicionan el balance hídrico de la CERS, factores físico como la distribución de pendientes, suelos, vegetación y las geoformas. Por otro lado la geología condiciona principalmente la ocurrencia, movimiento y almacenamiento de agua.
- En general todas las fallas ya sean de tipo regional o local, se comportan como rutas preferenciales de movimiento del agua; y además como zonas de precolación.
- Los diferentes tipos de contacto, especialmente los fallados que son los encargados de enfrentar litologías diferentes, son las estructuras que definen zonas de exfiltración, como en el nacimiento de la quebrada La López, La Colmena, debido al cambio de los parámetros hidráulicos de subsuperficie y superficie.

- De acuerdo a los análisis de los factores hidroquímicos, la mayoría de nacimientos se caracterizan por presentar rangos ácidos de pH y potenciales redox menores a 100 mV, lo que define una proveniencia subterránea; otro parámetro que indica la naturaleza del agua subterránea es el contenido de carbonatos bajo; el cual define que el recorrido de agua en el subsuelo es considerablemente largo.
- Los depósitos cuaternarios del altiplano de Berlín, que bordean la divisoria sur de la CERS, se definen como la principal zona de recarga; además se presentan zonas de recarga local como el nacimiento de la quebrada La López y la zona calcárea de La Casita.
- Para la determinación de las unidades hidrogeológicas las variables implicadas en el proceso fueron pendientes, geología, almacenamiento capilar, cobertura superficial del suelo, conductividad en la capa superior e inferior del suelo.
- El resultado de este procedimiento fue un mapa de siete unidades hidrogeológica, las cuales presentan propiedades homogéneas.
- El transporte de sedimentos de fracción fina de la quebrada Río Sucio es debido a cambio drásticos de pendiente, observándose antes del punto crítico del escalonamiento estructural del cañón de la quebrada, que la energía no es suficiente para erosionar y re TRABAJAR la zona de depósitos, y que por lo tanto en esta zona el agua todavía se ve limpia.

RECOMENDACIONES

- Profundización del análisis para la caracterización de las diaclasas, con objeto de definir mas detalladamente el flujo subterráneo en la CERS.
- Análisis petrológico de secciones delgadas para caracterizar los tipos de porosidad a nivel microscópico.
- Caracterización composicional y textural detallada de suelos y depósitos con el fin refinar los parámetros hidráulicos de las zonas de baja pendiente.
- Perforación de pozos para obtener datos litológicos, estructurales e hidráulicos en profundidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BILLINGS Marland. Geología Estructural, Editorial Universitaria de Buenos Aires, Argentina, 1965.

BUENAHORA, Carlos; Osorio, H. Elaboración Del Modelo Digital De Elevaciones Para La Optimización De La Cuenca Del Río Sucio. Universidad Industrial de Santander. 2005

BUITRAGO, G, César; Cote, M. Control de sedimentos en la cuenca alta del río Tona. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 1987.

CASSIRAGA, Eduardo. Incorporación de Información blanda para la cuantificación de la incertidumbre: aplicación a la hidrogeología. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 1999.

CLAVIJO, Jairo; Royero G.. 2000. Mapa Geológico Generalizado Del Departamento De Santander (Escala 1:400.000) Memoria Explicativa, Ingeominas, 2000, Bucaramanga

COMPTON, Robert. Geología de Campo. Jhon Wiley & Sons, Inc; 1970, México D.F.

CUSTODIO, E;. Llamas M.. Hidrologia Subterránea, Segunda Edición, Tomo 2. Ediciones Omega, Barcelona, 1996.

CHANSON, Hubert. Hidráulica del flujo en canales abiertos, Mc Graw Hill, Bogotá, 2002.

DEL TORO, Wilfredo. Aspectos Geotécnicos de los sectores inestables de la microcuenca de Río Sucio parte alta de la cuenca del río Tona en el departamento de Santander. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 1.997

FILI, Mario F ,et. Al. Modelo hidrogeológico conceptual de la relación entre los acuíferos Pampeano y Puelche en un sector del sur de la provincia de santa fe. Republica Argentina, PROINSA - Proyectos de Ingeniería S.A. Santa Fe, Argentina

GÓMEZ, Laura; Santana, H. Geología, Geomorfología y Química de los procesos de inestabilidad de la zona del Tembladal. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 1.995.

GPH ; Cuenca Experimental Del Rio Sucio. Municipio de Tona – Santander. Grupo en Predicción y Modelamiento Hidroclimático - GPH, Universidad Industrial de Santander, 2005

GRADEX. Estudio De Impacto Ambiental Para La Regulación Del Río Tona. Informe Final. Compañía Del Acueducto Metropolitano De Bucaramanga S.A. Bucaramanga, 2003.

GUTIÉRREZ E. , Materón M. H. Modelación De Acuíferos Para El Aprovechamiento Sostenible Del Agua Subterránea. Universidad Nacional de Colombia, 2000

HERNÁNDEZ, William. Análisis de las influencias de los factores geomorfológicos en los procesos erosivos de la microcuenca de la quebrada Río Sucio parte alta del río Tona. Universidad Industrial de Santander. 2001

JULIVERT, M. Barrero, D., . et al.,. Lexique Stratigraphique International, Amerique Latine Colombia (Premiere Parte). Centre National de la Recherche Scientifique. Volumen 5, fascículo 4a, Colombie,. 1968

LAHEE, Frederic . Geología Práctica. Ediciones Omega, S. A. ; Barcelona, 1962

MAPINGENIERIA Cia. Ltda.. Estudio De Sedimentos Para La Cuenca Superior Del Río Tona (Carrizal). Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, 2003

MORALES, L., Hatfield, W., et al., General geology and oil occurrence of the Middle Magdalena Valley, Colombia. In habitat of oil a Symposium American Association of Petroleum Geologists Bulletin, Tulsa. 1958.

OROZCO, Fabián; Mendoza, L. Inventario de afloramientos y caracterización hidroquímica básica de la Cuenca Experimental de Río Sucio. Universidad Industrial de Santander, 2005.

RAMÍREZ, Argemiro. Propuesta de un modelo hidrogeológico conceptual a partir de la caracterización física de la subcuenca del Río Pamplonita – Énfasis áreas de Cucuta y Villa del Rosario – Departamento Norte de Santander, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 1999.

VARGAS, Nelson Omar. Zonas Hidrogeológicas Homogéneas De Colombia, Escala 1:1.200.000. Postgrado en Recursos Hidráulicos, UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, Bogotá D.C. 2001.

VAN ZUIDAM, R. A. Et. Al.; Aerial Photo – interpretation in Terrain Analysis and geomorphologic mapping. Smith Publ. The Hague, 1982

Direcciones Internet

www.inei.gob.pe

www.unesco.org.

www.guanajuato.gob.mx

http://aguas.igme.es/igme/publica/sim_hidro_Murcia/tomo%20XXIII/28.pdf

http://gw.ehnr.state.nc.us/Acrobat%20Docs/legrand_04.pdf#search='hydrogeological%20model'

<http://verde.nau.edu/Research/Navarro/ch3.pdf#search='hydrogeological%20model'>

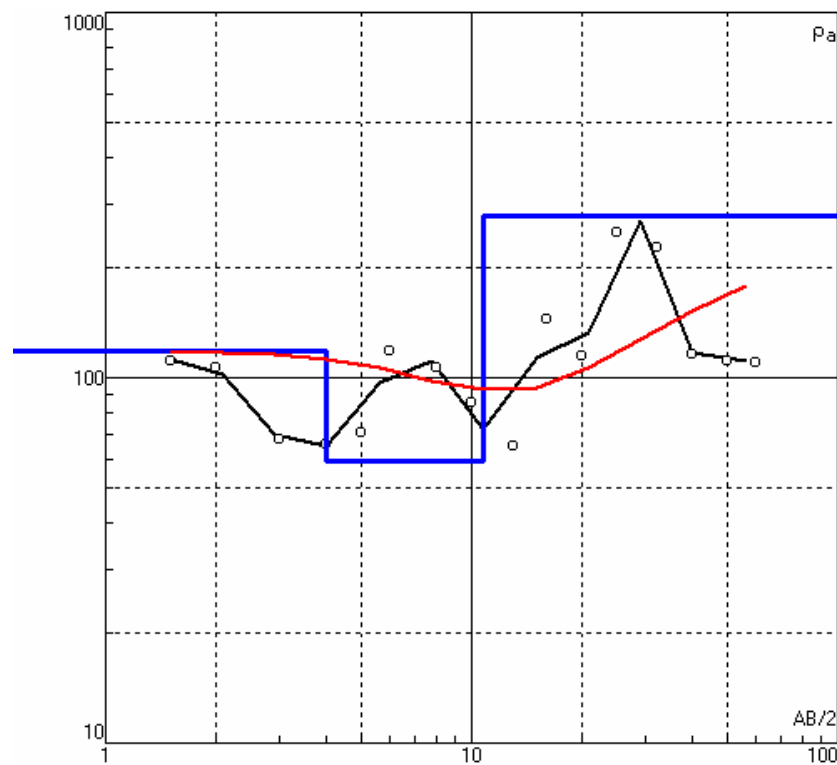
<http://www.stormingmedia.us>

ANEXOS

ANEXO I

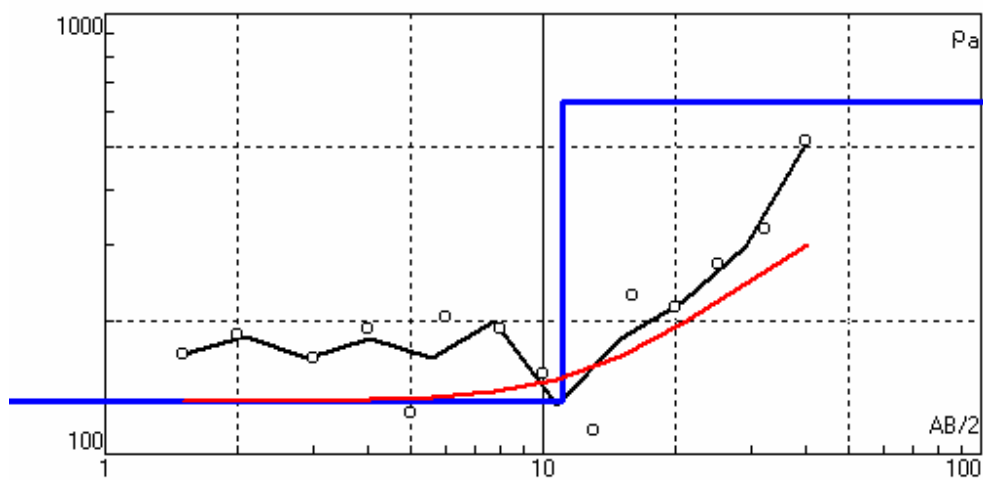
SEV I. FINCA EL ALTO X = 1125186.1000; Y =1288165.1890 Z= 2583.1470

Delta	AB / 2	MN/2		Intensidad	Voltaje	K	Resistencia	Resistividad
1	1.5	0.4	0.8	140	1902.5	8.21	13.5892857	111.5680357
2	2	0.4	0.8	145	1020.5	15.08	7.03793103	106.132
3	3	0.4	0.8	170	331	34.71	1.94705882	67.58241176
4	4	0.4	0.8	185	195.15	62.2	1.05486486	65.61259459
5	5	0.4	0.8	180	131	97.55	0.72777778	70.99472222
6	6	0.4	0.8	180	151.2	140.74	0.84	118.2216
10	8	1.5	3	160	264	64.66	1.65	106.689
13	10	2	4	310	350	75.4	1.12903226	85.12903226
14	13	2	4	600	299.5	129.58	0.49916667	64.68201667
17	16	2	4	335	245	197.92	0.73134328	144.7474627
20	20	3	6	237.5	133.05	204.72	0.56021053	114.6862989
21	25	3	6	115	89.43	322.53	0.77765217	250.8161557
23	32	4	8	190	109	395.84	0.57368421	227.0871579
28	40	8	16	125	47.95	301.59	0.3836	115.689924
30	50	8	16	91	21.2	478.31	0.23296703	111.4304615
31	60	8	16	115	18.3	694.29	0.15913043	110.4826696



SEV II. FINCA EL ALTO, X=1125002.8490, Y=1288155.8180 Z=2551.0620

Delta	AB /2	MN/2	Intensidad	Voltaje	K	Resistencia	Resistividad
1	1.5	0.4	70	1435.5	8.21	20.50714286	168.363643
2	2	0.4	60	745.5	15.08	12.425	187.369
3	3	0.4	70	332	34.71	4.742857143	164.624571
4	4	0.4	50	154	62.2	3.08	191.576
5	5	1.5	90	469.5	23.82	5.216666667	124.261
6	6	1.5	40	232	35.34	5.8	204.972
7	8	1.5	50	148.5	64.66	2.97	192.0402
8	10	1.5	80	118.3	102.36	1.47875	151.36485
9	13	1.5	90	58.1	174.62	0.645555556	112.726911
10	16	2	50	58.1	197.9	1.162	229.9598
11	20	2	80	55.2	311,012	0.69	214.6
12	25	2	90	49.6	487.73	0.551111111	268.793422
13	32	2	75	30.3	801,106	0.404	323.65
14	40	4	100	82.25	622.03	0.8225	511.619675

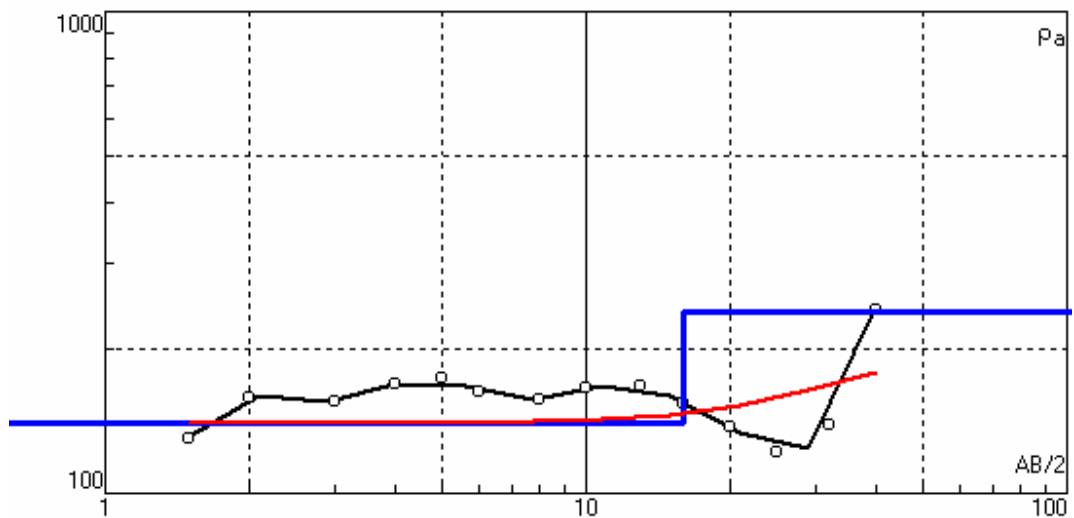


SEV III. Finca El Alto, $x = 1125177.5330$, $y = 1287905.2230$; $z = 2668.2930$

Delta	AB /2	MN/2	INTENSIDAD	VOLTAJE	K	RESISTENCIA	RESISTIVIDAD
1	1.5	0.4	25	1165	8.21	46.6	382.586
2	2	0.4	25	1179	15.08	47.16	711.1728
3	3	0.4	30	349.5	34.71	11.65	404.3715
4	4	0.4	25	184.5	62.2	7.38	459.036
5	5	0.4	40	146	97.55	3.65	356.0575
6	6	0.4	30	73	140.74	2.43333333	342.467333
7	8	0.4	35	61	250.27	1.74285714	436.184857
8	10	1.5	35	89	102.36	2.54285714	260.286857
9	13	1.5	30	44.5	174.62	1.48333333	259.019667
10	16	1.5	40	44.5	179.92	1.1125	200.161
11	20	4	40	62	150.8	1.55	233.74
12	25	4	45	45	239.15	1	239.15
13	32	5	40	35	313.84	0.875	274.61
14	40	8	45	40.5	301.6	0.9	271.44
15	50	8	30	27	478.3	0.9	430.47
16	60	10	45	19.5	549.78	0.43333333	238.238

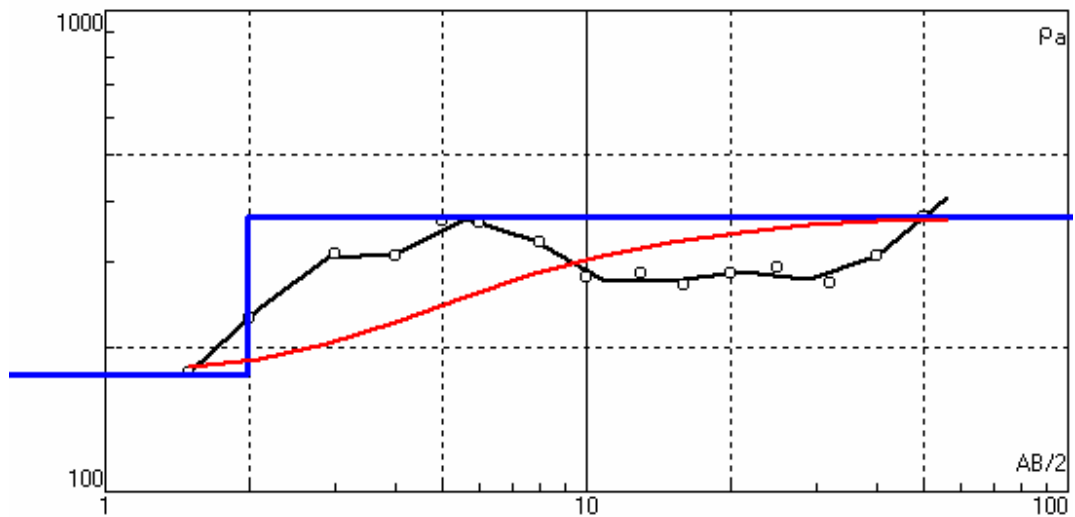
SEV IV. Finca El Alto (h = 2650 m.s.n.m) x = 1125383.8350;y = 1288199.2110; z =2645

Delta	AB /2	MN/2	intensidad	voltaje	K	resistencia	resistividad
1	1.5	0.4	115	1827	8.21	15.8869565	130.431913
2	2	0.4	150	1577.5	15.08	10.5166667	158.591333
3	3	0.4	175	782.5	34.71	4.47142857	155.203286
4	4	0.4	140	380	62.2	2.71428571	168.828571
5	5	0.4	165	292.5	97.55	1.77272727	172.929545
6	6	0.4	145	168	140.74	1.15862069	163.064276
7	8	1.5	175	425	64.66	2.42857143	157.031429
8	10	1.5	180	290	102.36	1.61111111	164.913333
9	13	1.5	160	153.5	174.62	0.959375	167.526063
10	16	3	165	196	129.33	1.18787879	153.628364
11	20	4	145	132.5	150.8	0.9137931	137.8
12	25	6	300	236	154.2	0.78666667	121.304
13	32	8	180	132	188.49	0.73333333	138.226
14	40	8	190	152	301.59	0.8	241.272



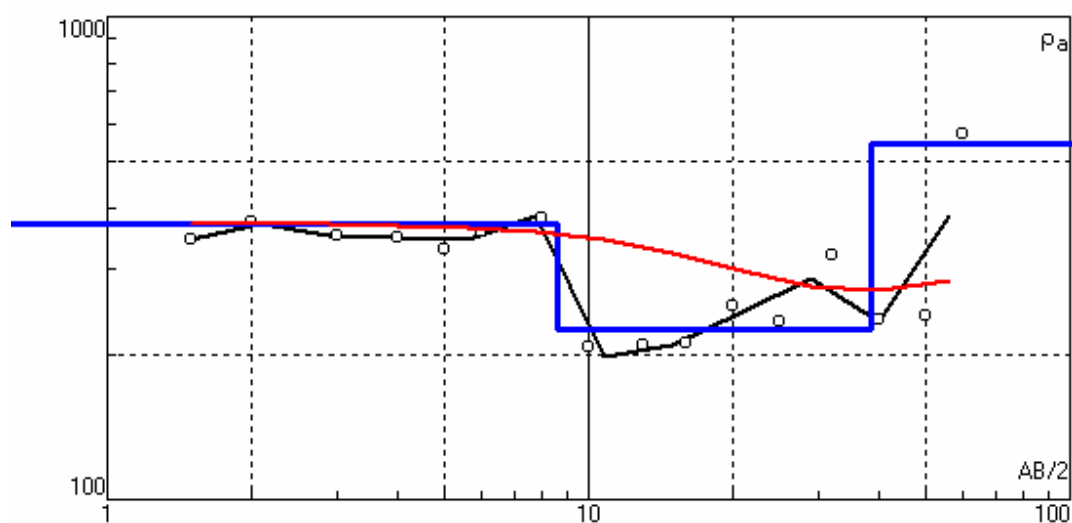
SEV V. Finca El Alto. X= 1125383.8350; Y=1288199.2110; Z=2655.2520

Delta	AB /2	MN/2	INTENSIDAD	VOLTAJE	K	RESISTENCIA	RESISTIVIDAD
1	1.5	0.4	155	3335	8.21	21.516129	176.647419
2	2	0.4	140	2135	15.08	15.25	229.97
3	3	0.4	160	1433.5	34.71	8.959375	310.979906
4	4	0.4	145	719	62.2	4.95862069	308.426207
5	5	0.4	160	599	97.55	3.74375	365.202813
6	6	0.4	170	438	140.74	2.57647059	362.612471
7	8	0.4	160	210	250.27	1.3125	328.479375
8	10	1.5	160	434.5	102.36	2.715625	277.971375
9	13	1.5	165	267.5	174.62	1.62121212	283.096061
10	16	1.5	225	227.5	265.72	1.01111111	268.672444
11	20	4	200	377	150.8	1.885	284.258
12	25	4	210	255.5	239.15	1.21666667	290.965833
13	32	6	210	219.5	258.65	1.0452381	270.350833
14	40	6	210	158	409.45	0.75238095	308.062381
15	50	8	170	132	478.3	0.77647059	371.385882



SEV VI. Finca El Alto; **X = 1124960.7140; Y = 1288250.2080; Z = 2536.8050**

Delta	AB /2	MN/2	INTENSIDAD	VOLTAJE	K	RESISTENCIA	RESISTIVIDAD
1	1.5	0.4	105	4400	8.21	41.9047619	344.038095
2	2	0.4	80	1985	15.08	24.8125	374.1725
3	3	0.4	100	1010.5	34.71	10.105	350.74455
4	4	0.4	95	534.5	62.2	5.62631579	349.956842
5	5	0.4	90	303	97.55	3.36666667	328.418333
6	6	0.4	100	256	170.74	2.56	437.0944
7	8	0.4	90	137	250.27	1.52222222	380.966556
8	10	2	105	288.5	75.4	2.74761905	207.170476
9	13	2	60	97	129.58	1.61666667	209.487667
10	16	2	80	85	197.92	1.0625	210.29
11	20	2	100	81	311.02	0.81	251.9262
12	25	5	175	216	188.49	1.23428571	232.650514
13	32	5	150	153	313.84	1.02	320.1168
14	40	8	230	180	301.59	0.7826087	236.026957
15	50	10	270	172	376.99	0.63703704	240.156593
16	60	13	235	325	414.57	1.38297872	573.341489



SEV VII. Finca La López; X = 1125695; Y = 1287800; Z = 2850

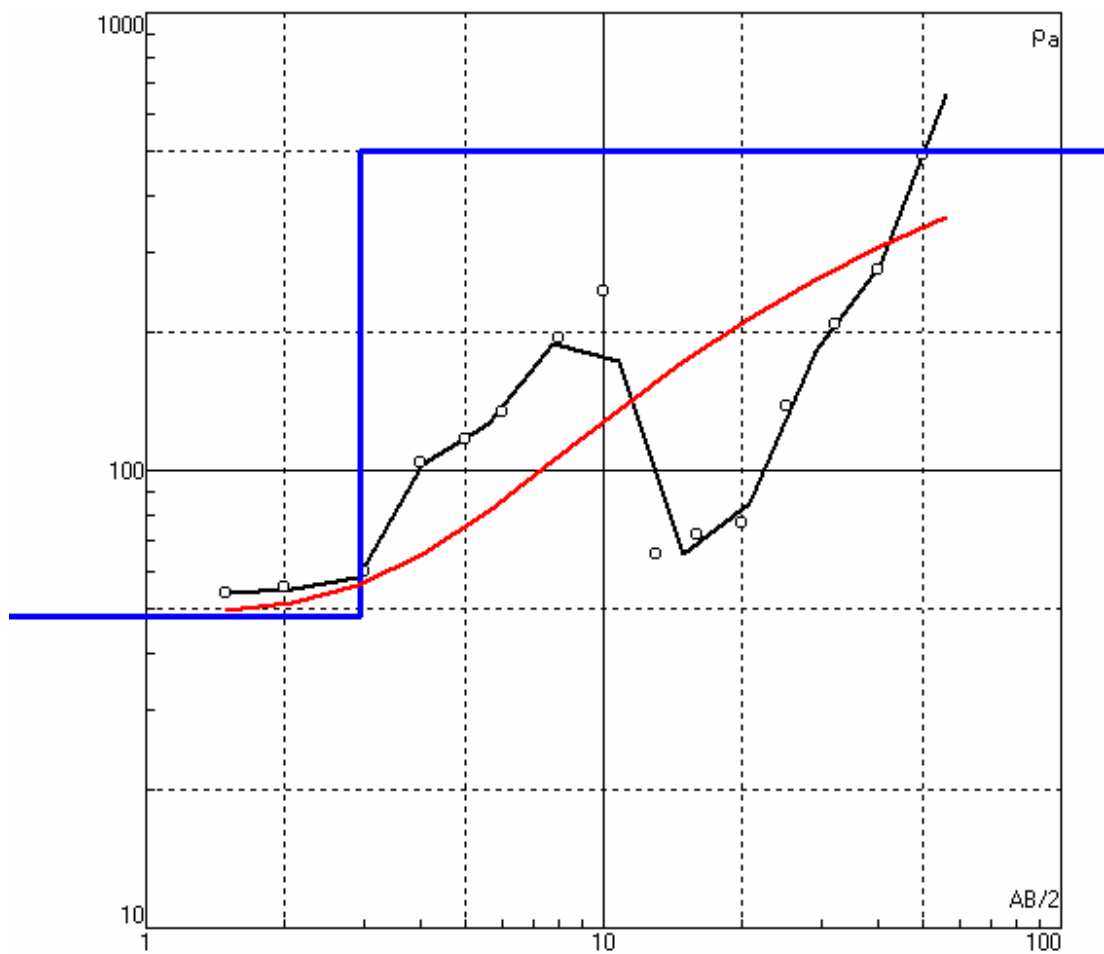
Delta	AB /2	MN/2	Intensidad	Voltaje	K	Resistencia	Resistividad
1	1.5	0.4	195	802.5	8.21	4.11538462	33.7873077
2	2	0.4	190	670	15.08	3.52631579	53.1768421
3	3	0.4	240	494	34.71	2.05833333	71.44475
4	4	0.4	250	361	62.2	1.444	89.8168
5	5	0.4	230	310	97.55	1.34782609	131.480435
6	6	0.4	245	231	140.74	0.94285714	132.697714
7	8	0.4	260	231	250.27	0.88846154	222.355269
8	10	3	280	148	47.65	0.52857143	25.1864286
9	13	3	250	126	83.77	0.504	42.22008
10	16	3	320	112	129.33	0.35	45.2655
11	20	5	320	118	117.81	0.36875	43.4424375
12	25	5	280	115	188.49	0.41071429	77.4155357
13	32	5	260	89	313.84	0.34230769	107.429846
14	40	5	265	78	494.8	0.29433962	145.639245

EV VIII. Finca El Carbón

Delta	AB /2	MN/2	INTENSIDAD	VOLTAJE	K	RESISTENCIA	RESISITIVIDAD
1	1.5	0.4	125	239	8.21	1.912	15.69752
2	2	0.4	165	1607.5	15.08	9.74242424	146.915758
3	3	0.4	175	649	34.71	3.70857143	128.724514
4	4	0.4	125	296.5	62.2	2.372	147.5384
5	5	0.4	125	224	97.55	1.792	174.8096
6	6	0.4	95	144.7	140.79	1.52315789	214.4454
7	8	0.4	175	151	2850.27	0.86285714	2459.37583
8	10	0.4	200	128.8	392.07	0.644	252.49308
9	13	3	165	185.5	83.77	1.12424242	94.1777879
10	16	3	330	248.5	129.33	0.7530303	97.3894091
11	20	3	240	214	204.72	0.89166667	182.542
12	25	3	220	159.1	322.53	0.72318182	233.247832
13	32	3	120	110	531.45	0.91666667	487.1625
14	40	3	85	78.75	833.04	0.92647059	771.787059
15	50	3	75	88.2	1304.28	1.176	1533.83328

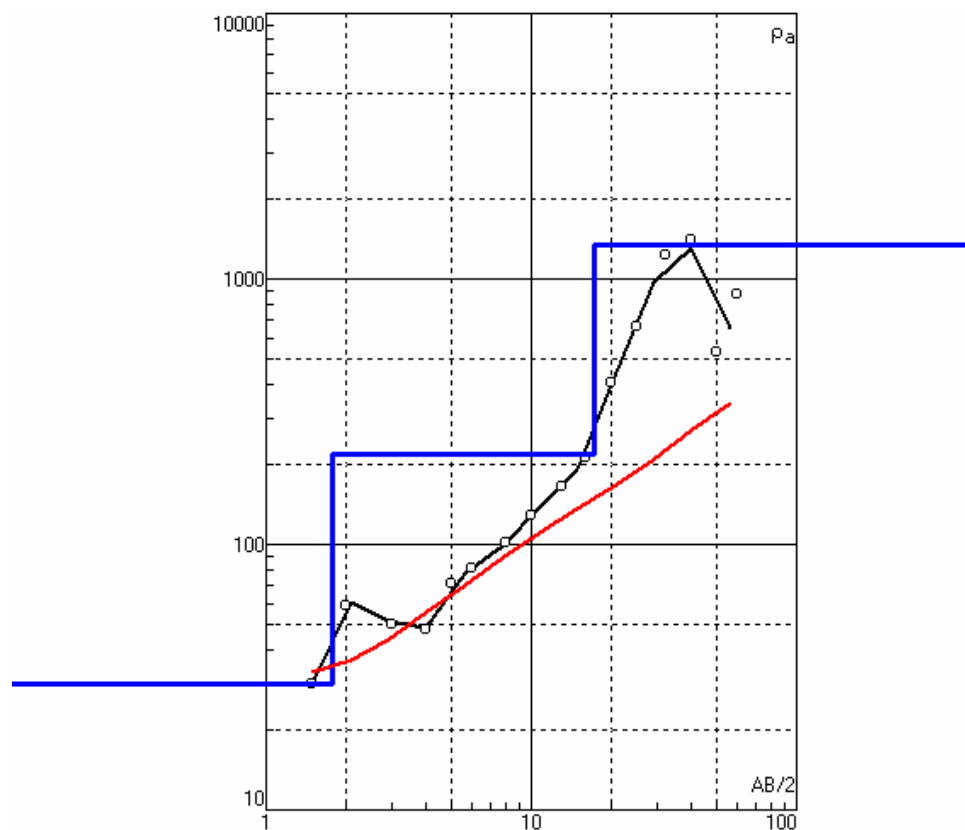
SEV IX. Finca La Casita $x= 1126128.2820$; $y= 1288756.6440$; $z= 2650.1330$

Delta	AB /2	MN/2	INTENSIDAD	VOLTAJE	K	RESISTENCIA	RESISTIVIDAD
1	1.5	0.4	165	1088.5	8.21	6.5969697	54.1611212
2	2	0.4	185	682.5	15.08	3.68918919	55.632973
3	3	0.4	285	493.5	34.71	1.73157895	60.1031053
4	4	0.4	245	408	62.2	1.66530612	103.582041
5	5	0.4	285	343	97.55	1.20350877	117.402281
6	6	0.4	300	285	140.74	0.95	133.703
7	8	0.4	285	222	250.27	0.77894737	194.947158
8	10	0.4	325	205	392.07	0.63076923	247.305692
9	13	3	250	195.45	83.77	0.7818	65.491386
10	16	3	340	190.75	129.33	0.56102941	72.5579338
11	20	5	315	204.35	117.81	0.64873016	76.4269
12	25	5	260	191	188.49	0.73461538	138.467654
13	32	5	210	138.9	313.84	0.66142857	207.582743
14	40	5	225	124.8	494.8	0.55466667	274.449067
15	50	5	175	109.7	777.54	0.62685714	487.406503



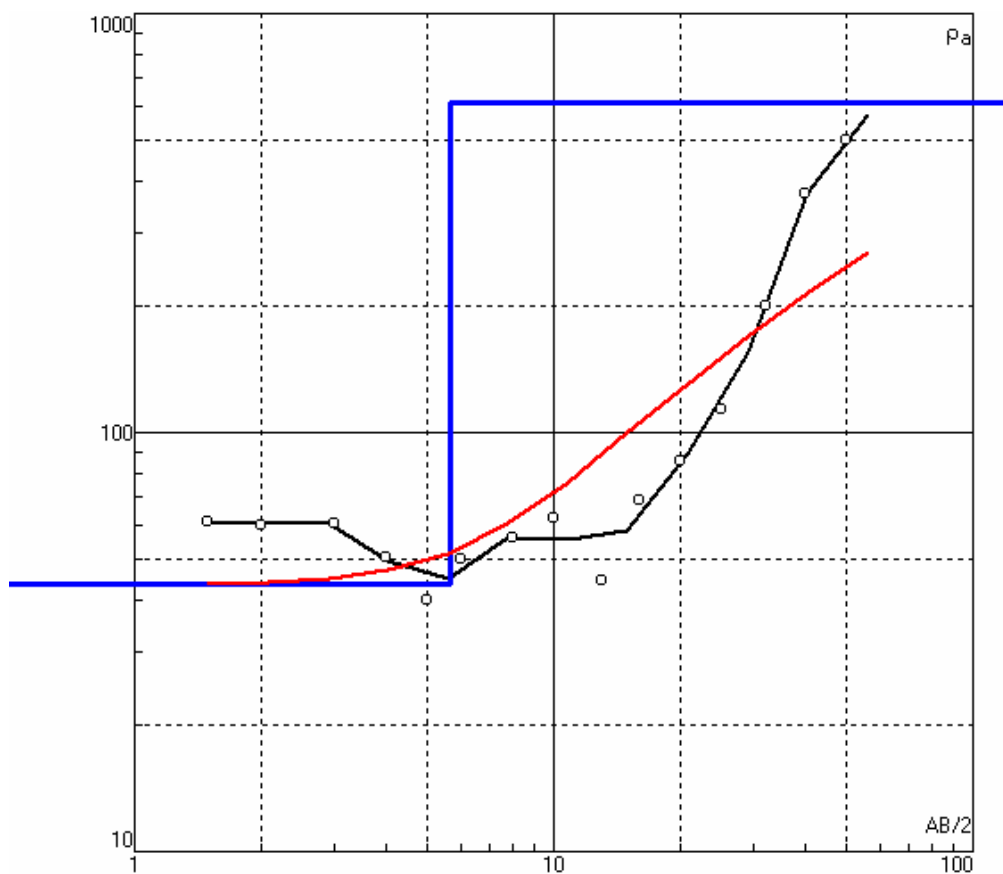
SEV X. Finca Bélgica $x = 1125848.9070$; $y = 1288941.2370$; $z = 2537.7760$

Delta	AB /2	MN/2	INTENSIDAD	VOLTAJE	K	RESISTENCIA	RESISITIVIDAD
1	1.5	0.4	350	1273.5	8.21	3.63857143	29.8726714
2	2	0.4	345	1340	15.08	3.88405797	58.5715942
3	3	0.4	390	561	34.71	1.43846154	49.929
4	4	0.4	350	269.5	62.2	0.77	47.894
5	5	0.4	370	270	97.55	0.72972973	71.1851351
6	6	1.5	330	761	35.34	2.30606061	81.4961818
7	8	1.5	385	601	64.66	1.56103896	100.936779
8	10	1.5	410	511	102.36	1.24634146	127.575512
9	13	1.5	340	319.5	174.62	0.93970588	164.091441
10	16	1.5	390	313	265.73	0.8025641	213.265359
11	20	1.5	315	306.5	416.52	0.97301587	405.280571
12	25	1.5	300	303.5	652.14	1.01166667	659.7483
13	32	1.5	260	299.5	1069.97	1.15192308	1232.52313
14	40	1.5	350	294	1673.16	0.84	1405.4544
15	50	3	280	113	1304.28	0.40357143	526.370143
16	60	3	300	139.65	1880.24	0.4655	875.25172



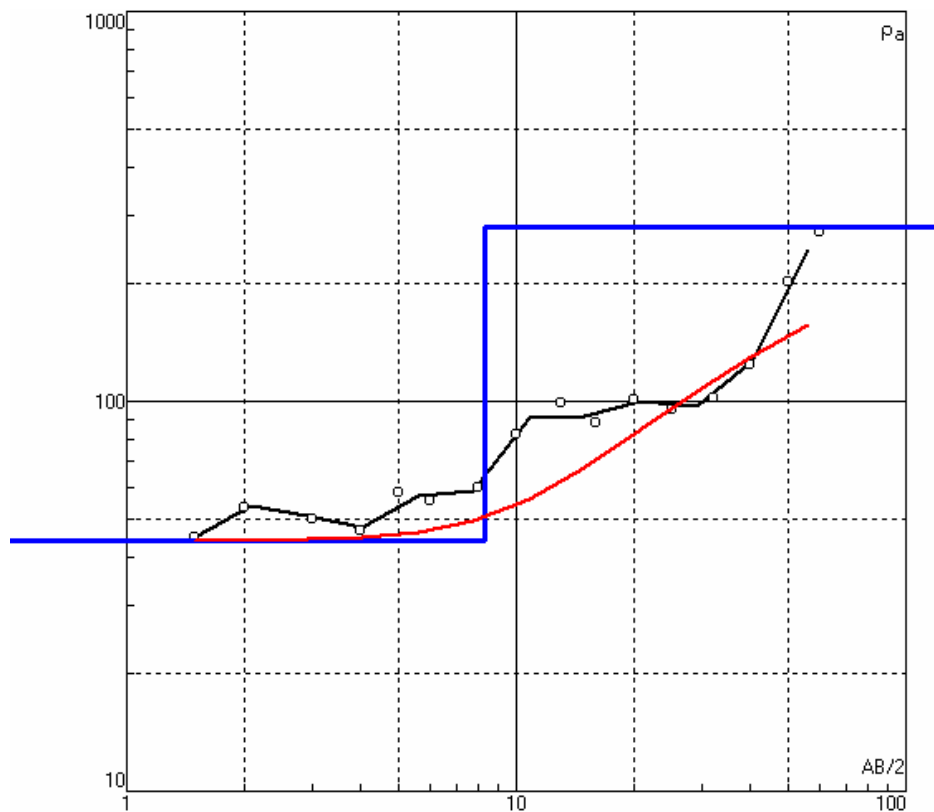
SEV XI. Finca La Valenciana X = 1125815.7420; Y = 1289611.9280; Z = 2471.3110

Delta	AB /2	MN/2	intensidad	Voltaje	K	Resistencia	Valor
1	1.5	0.4	300	2245	8.21	7.48333333	61.4381667
2	2	0.4	300	1198.5	15.08	3.995	60.2446
3	3	0.4	330	574	34.71	1.73939394	60.3743636
4	4	0.4	390	316	62.2	0.81025641	50.3979487
5	5	2	345	830	16.49	2.4057971	39.6715942
6	6	2	500	995	25.13	1.99	50.0087
7	8	2	440	526	47.12	1.19545455	56.3298182
8	10	2	520	433	75.4	0.83269231	62.785
9	13	4	600	441	60.08	0.735	44.1588
10	16	4	540	396	94.25	0.73333333	69.1166667
11	20	4	490	277	150.8	0.56530612	85.2481633
12	25	6	615	453	154.2	0.73658537	113.581463
13	32	6	420	325	258.66	0.77380952	200.153571
14	40	6	400	363	409.45	0.9075	371.575875
15	50	6	410	318	645.07	0.77560976	500.322585



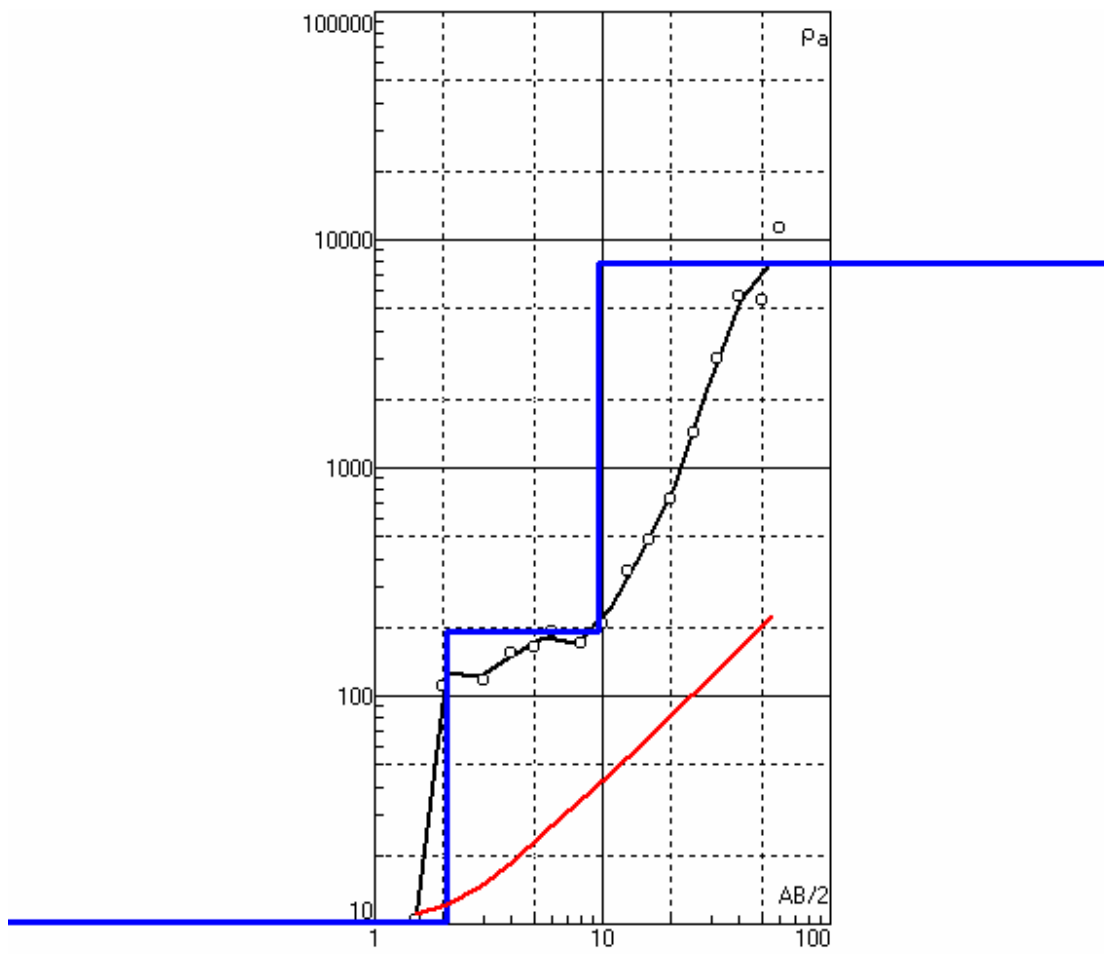
SEV XII. Finca La Aguada X = 1125942.8260; Y=1289534.837; 2520.5520

Delta	AB /2	MN/2	INTENSIDAD	VOLTAJE	K	RESISTENCIA	RESISTIVIDAD
1	1.5	0.4	280	1532	8.21	5.47142857	44.9204286
2	2	0.4	200	709	15.08	3.545	53.4586
3	3	0.4	300	432.5	34.71	1.44166667	50.04025
4	4	0.4	170	127.05	62.2	0.74735294	46.4853529
5	5	0.4	170	102	97.55	0.6	58.53
6	6	2	210	465	25.13	2.21428571	55.645
7	8	2	220	281	47.12	1.27727273	60.1850909
8	10	2	220	241	75.4	1.09545455	82.5972727
9	13	2	230	176.5	129.58	0.7673913	99.4385652
10	16	4	170	158.9	94.25	0.93470588	88.0960294
11	20	4	200	133.6	150.8	0.668	100.7344
12	25	4	300	118.9	239.15	0.39633333	94.7831167
13	32	6	340	133.8	258.66	0.39352941	101.790318
14	40	6	400	121	409.45	0.3025	123.858625
15	50	6	280	88	645.07	0.31428571	202.736286
16	60	6	280	81.6	933.05	0.29142857	271.917429



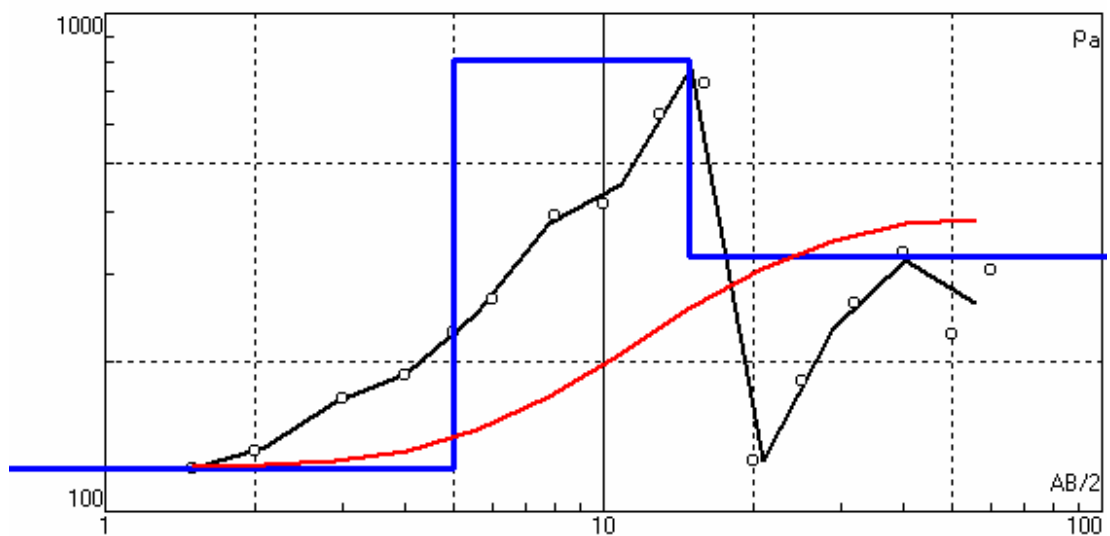
SEV XIII. Finca La Cruz

AB /2	MN/2	INTENSIDAD	VOLTAJE	K	RESISTENCIA	RESISTIVIDAD
1.5	0.4	240	302	8.21	1.25833333	10.3309167
2	0.4	240	1767	15.08	7.3625	111.0265
3	0.4	240	805.5	34.71	3.35625	116.495438
4	0.4	250	615	62.2	2.46	153.012
5	0.4	235	397	97.55	1.6893617	164.797234
6	0.4	250	338	140.74	1.352	190.28048
8	0.4	220	148.3	250.27	0.67409091	168.704732
10	2	190	522	75.4	2.74736842	207.151579
13	2	160	438	129.58	2.7375	354.72525
16	2	170	413	197.92	2.42941176	480.829176
20	2	150	353.5	311	2.35666667	732.951613
25	2	120	353.5	487.73	2.94583333	1436.77129
32	2	95	358.5	801	3.77368421	3023.12106
40	2	80	359	1253.29	4.4875	5624.13888
50	2	130	359	1960	2.76153846	5412.61538
60	2	90	358.5	2824	3.98333333	11248.9333



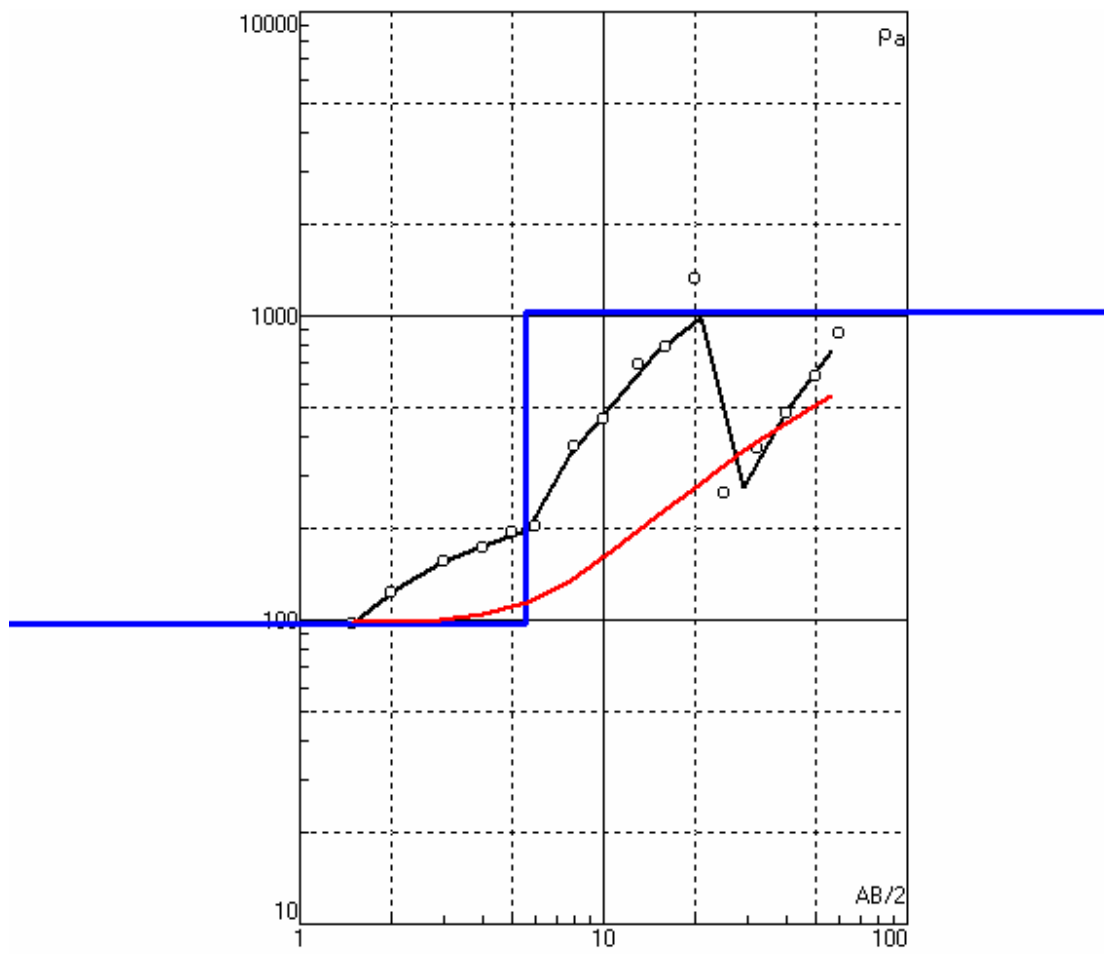
SEV XIV. El Carbón X = 1126432.1060; Y = 1288218.8860; Z = 2747.7370

Delta	AB /2	MN/2	Intensidad	Voltaje	K	Resistencia	Resistividad
1	1.5	0.4	180	2675	8.21	14.86111111	122.009722
2	2	0.4	170	1485	15.08	8.73529412	131.728235
3	3	0.4	145	706	34.71	4.86896552	169.001793
4	4	0.4	155	469	62.2	3.02580645	188.205161
5	5	0.4	155	362	97.55	2.33548387	227.826452
6	6	0.4	165	313	140.74	1.8969697	266.979515
7	8	0.4	175	275	250.27	1.57142857	393.281429
8	10	0.4	200	212.05	392.07	1.06025	415.692218
9	13	0.4	225	212.35	663.03	0.94377778	625.75298
10	16	0.4	295	212.85	1004.68	0.72152542	724.902163
11	20	4	250	210	150.8	0.84	126.672
12	25	4	220	168.3	239.15	0.765	182.94975
13	32	4	210	139.3	395.84	0.66333333	262.573867
14	40	4	240	127.6	622.03	0.53166667	330.712617
15	50	6	215	75.5	64.07	0.35116279	22.499
16	60	6	245	80.4	933.05	0.32816327	306.192735



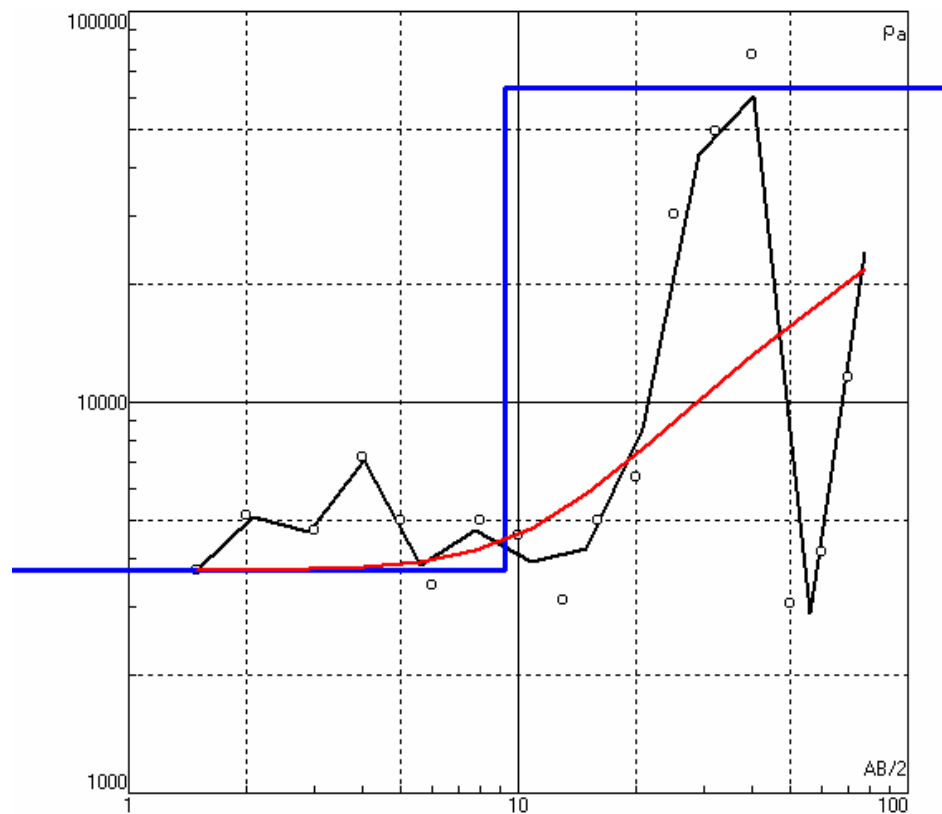
SEV XV. Finca El Carbón X = 1126421.5060; Y = 1288009.6820; Z = 2781.7190

Delta	AB /2	MN/2	Intensidad	Voltaje!	K	Resistencia	Resistividad
1	1.5	0.4	205	2435	8.2074	11.8780488	97.4878976
2	2	0.4	195	1588.5	15.08	8.14615385	122.844
3	3	0.4	195	871.5	34.715	4.46923077	155.149346
4	4	0.4	245	684.5	62.204	2.79387755	173.790359
5	5	0.4	220	438.5	97.546	1.99318182	194.426914
6	6	0.4	205	296.35	140.74	1.44560976	203.455117
7	8	0.4	235	351	250.7	1.49361702	374.449787
8	10	0.4	255	296	392.07	1.16078431	455.108706
9	13	0.4	215	225	663.03	1.04651163	693.868605
10	16	0.4	195	154.2	1005	0.79076923	794.723077
11	20	0.4	185	155.75	1570	0.84189189	1321.77027
12	25	4	180	195.7	239.15	1.08722222	260.009194
13	32	4	100	93	395.84	0.93	368.1312
14	40	4	100	76.7	622.04	0.767	477.10468
15	50	4	100	65	975.46	0.65	634.049
16	60	4	75	46.9	1407	0.62533333	879.844



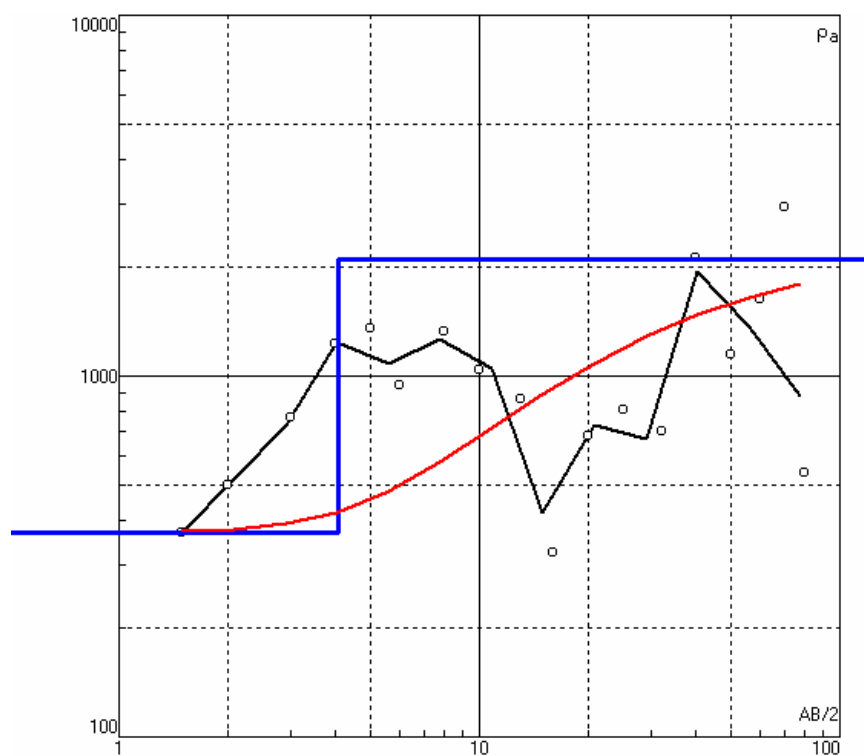
SEV 16. La Laguna X = 1128513.3460; Y = 1287526.2310 ; Z = 3424.6150

Delta	AB /2	MN/2	Intensidad	Voltaje	K	Resistencia	Resistividad
1	1.5	0.4	20	9055	8.2074	452.75	3715.90035
2	2	0.4	20	6810	15.08	340.5	5134.74
3	3	0.4	20	2713	34.715	135.65	4709.08975
4	4	0.4	10	1167.5	62.204	116.75	7262.317
5	5	0.4	15	767.5	97.546	51.1666667	4991.10367
6	6	0.4	20	485	140.74	24.25	3412.945
7	8	0.4	15	297	250.7	19.8	4963.86
8	10	0.4	20	233	392.07	11.65	4567.6155
9	13	0.4	40	187.8	663.03	4.695	3112.92585
10	16	0.4	30	149.5	1005	4.98333333	5008.25
11	20	0.4	30	122.35	1570	4.07833333	6402.98333
12	25	0.4	10	122.85	2454	12.285	30147.39
13	32	0.4	10	122.7	4021	12.27	49337.67
14	40	0.4	10	123.15	6283	12.315	77375.145
15	50	4	20	62.4	975.46	3.12	3043.4352
16	60	4	20	58.9	1407	2.945	4143.615
17	70	4	10	60.6	1918	6.06	11623.08



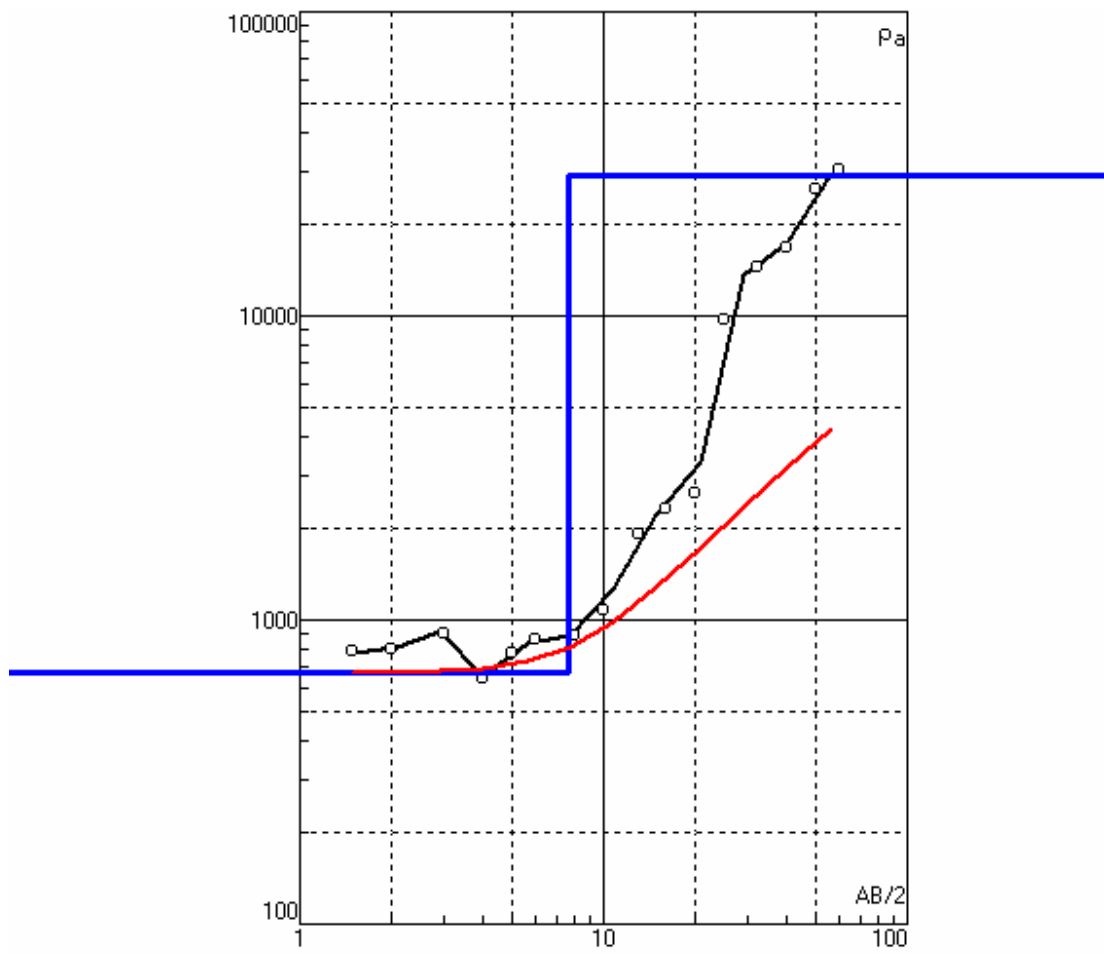
SEV 17. La Laguna X = 1128346.4740; Y = 1287212.6310; Z = 3403.0640

Delta	AB /2	MN/2	Intensidad	Voltaje	K	Resistencia	Resistividad
1	1.5	0.4	85	3805	8.2074	44.7647059	367.401847
2	2	0.4	80	2640	15.08	33	497.64
3	3	0.4	20	441	34.715	22.05	765.46575
4	4	0.4	20	395	62.204	19.75	1228.529
5	5	0.4	15	209	97.546	13.9333333	1359.14093
6	6	0.4	30	201.95	140.74	6.73166667	947.414767
7	8	0.4	20	106	250.7	5.3	1328.71
8	10	0.4	50	132	392.07	2.64	1035.0648
9	13	0.4	60	78.4	663.03	1.30666667	866.3592
10	16	2	75	122.9	197.92	1.63866667	324.324907
11	20	2	30	65.9	311.02	2.19666667	683.207267
12	25	2	40	65.9	487.73	1.6475	803.535175
13	32	2	75	65.9	801.11	0.87866667	703.908653
14	40	2	57.7	98.1	1253	1.70017331	2130.31716
15	50	4	50.7	59.35	975.46	1.17061144	1141.88464
16	60	4	47.8	55.7	1407	1.16527197	1639.53766
17	70	4	28.9	44.35	1918	1.53460208	2943.36678
18	80	4	125	26.8	2507	0.2144	537.5008



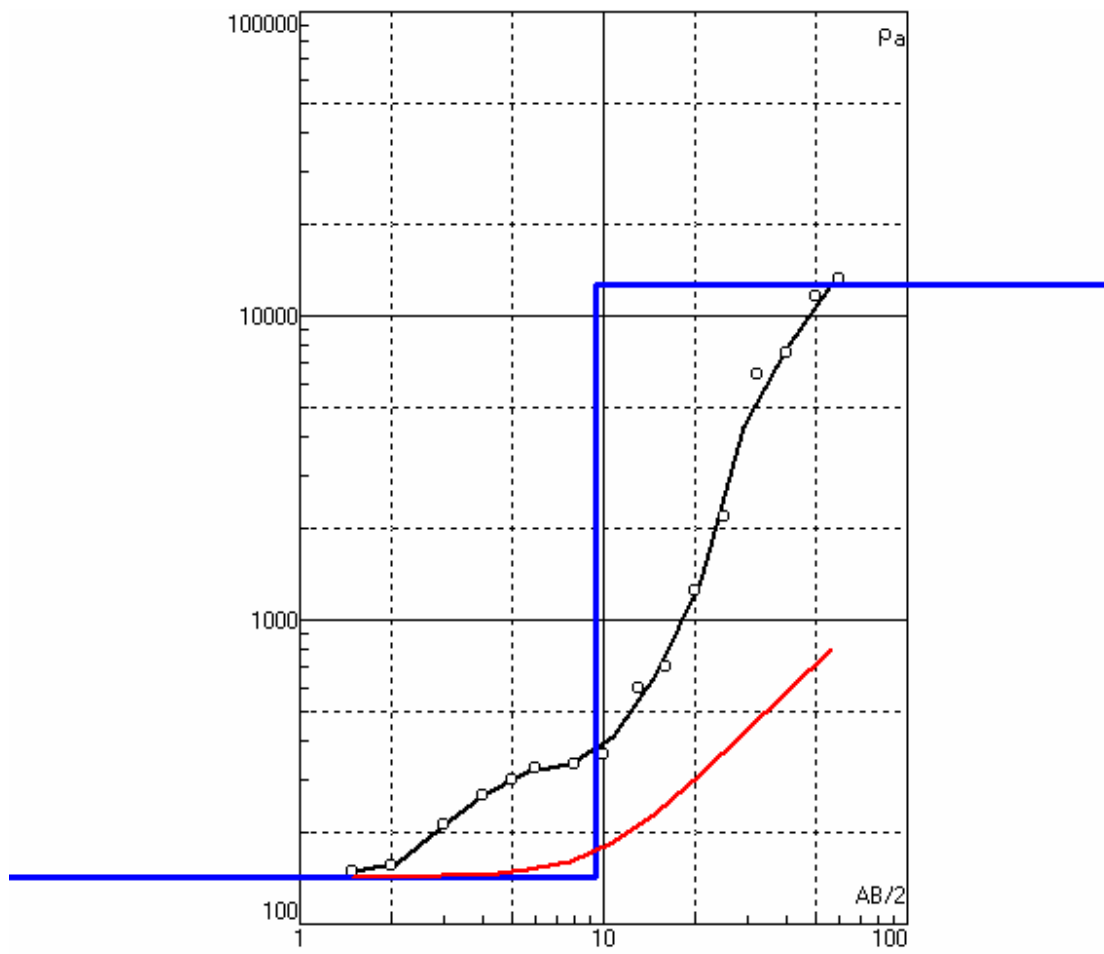
SEV 18. Las Cruces **X = 1128100.4070** ; **Y = 1287274.6250** ; **Z = 3332.6350**

Delta	AB /2	MN/2	Intensidad	Voltaje	K	Resistencia	Resistividad
1	1.5	0.4	80	7645	8.2074	95.5625	784.319663
2	2	0.4	70	3710	15.08	53	799.24
3	3	0.4	65	1685	34.715	25.9230769	899.919615
4	4	0.4	70	725	62.204	10.3571429	644.255714
5	5	0.4	65	515	97.546	7.92307692	772.864462
6	6	0.4	65	400	140.74	6.15384615	866.092308
7	8	0.4	80	285	250.7	3.5625	893.11875
8	10	0.4	55	150.4	392.07	2.73454545	1072.13324
9	13	0.4	80	230	663.03	2.875	1906.21125
10	16	0.4	80	185	1005	2.3125	2324.0625
11	20	0.4	100	166	1570	1.66	2606.2
12	25	0.4	30	119	2454	3.96666667	9734.2
13	32	0.4	30	108	4021	3.6	14475.6
14	40	0.4	40	107.5	6283	2.6875	16885.5625
15	50	0.4	40	107	9817	2.675	26260.475
16	60	0.4	50	107.5	14137	2.15	30394.55



SEV 19. Agua Blanca X = 1127722.7800 ; Y = 1287347.8410 ; Z = 3128.4980

Delta	AB /2	MN/2	Intensidad	Voltaje	K	Resistencia	Resistividad
1	1.5	0.4	130	2360	8.2074	18.1538462	148.995877
2	2	0.4	120	1235	15.08	10.2916667	155.198333
3	3	0.4	110	675	34.715	6.13636364	213.023864
4	4	0.4	100	425	62.204	4.25	264.367
5	5	0.4	120	365	97.546	3.04166667	296.702417
6	6	0.4	110	255	140.74	2.31818182	326.260909
7	8	0.4	115	155	250.7	1.34782609	337.9
8	10	0.4	125	115	392.07	0.92	360.7044
9	13	2	110	510	129.59	4.63636364	600.826364
10	16	2	110	390	197.92	3.54545455	701.716364
11	20	2	60	240	311.02	4	1244.08
12	25	2	55	245	487.73	4.45454545	2172.61545
13	32	2	30	240	801.11	8	6408.88
14	40	2	40	240	1253	6	7518
15	50	2	40	235	1960	5.875	11515
16	60	2	50	235	2824	4.7	13272.8



TOMOGRAFIA 1. El Alto. X = 1125065.3210; Y = 1288201.3970; Z = 2542.4540

A	B	M	N	V/I	
	0	20	5	15	4.14
	5	25	10	20	8.33
	0	30	10	20	6.48
	10	30	15	25	5.75
	5	35	15	25	2.94
	0	40	15	25	2.07
	15	35	20	30	7.05
	10	40	20	30	3.37
	5	45	20	30	2.15
	0	50	20	30	2.89
	20	40	25	35	4.3
	15	45	25	35	2.26
	10	50	25	35	1.63
	5	55	25	35	1.35
	0	60	25	35	1.45
	25	45	30	40	5.58
	20	50	30	40	3.78
	15	55	30	40	3.45
	10	60	30	40	3.08
	5	65	30	40	2.55
	0	70	30	40	3.06
	30	50	35	45	4.89
	25	55	35	45	2.88
	20	60	35	45	2.21
	15	65	35	45	1.97
	10	70	35	45	2.13
	5	75	35	45	1.53
	0	80	35	45	2.08
	35	55	40	50	2.76
	30	60	40	50	1.54
	25	65	40	50	0.95
	20	70	40	50	0.92
	15	75	40	50	0.65
	10	80	40	50	2.28
	5	85	40	50	2.3
	0	90	40	50	1.88
	40	60	45	55	2.94
	35	65	45	55	1.93
	30	70	45	55	1.73
	25	75	45	55	1.27
	20	80	45	55	0.91
	15	85	45	55	1.66

10	90	40	60	3.78
5	95	40	60	2.21
0	100	40	60	3.34
45	65	50	60	2.5
40	70	50	60	1.14
35	75	50	60	0.69
30	80	50	60	0.57
25	85	50	60	0.53
20	90	45	65	1.98
15	95	45	65	1.61
10	100	45	65	1.54
5	105	45	65	1.56
0	110	45	65	1.82
50	70	55	65	3.33
45	75	55	65	1.44
40	80	55	65	1.55
35	85	55	65	1.87
30	90	55	65	2.33
25	95	55	65	1.31
20	100	55	65	0.88
15	105	50	70	1.49
10	110	50	70	1.59
55	75	65	70	2.96
50	80	65	70	1.47
45	85	65	70	1.03
40	90	65	70	1.22
35	95	65	70	0.91
30	100	65	70	0.77
25	105	55	75	1.98
20	110	55	75	1.79
60	80	65	75	4.33
55	85	65	75	3.26
50	90	65	75	3.77
45	95	65	75	1.58
40	100	65	75	2.25
35	105	65	75	3.8
30	110	65	75	2.81
65	85	70	80	2.6
60	90	70	80	2.19
55	95	70	80	1.15
50	100	70	80	0.89
45	105	70	80	0.82
40	110	70	80	0.88
70	90	75	85	4.76
65	95	75	85	1.15

60	100	75	85	0.96
55	105	75	85	1.31
50	110	75	85	0.95
75	95	80	90	2.81
70	100	80	90	3.3
65	105	80	90	2.7
60	110	80	90	2.17
80	100	85	95	1.75
75	105	85	95	1.15
70	110	85	95	1.1
85	105	90	100	2.16
80	110	90	100	1.61
90	110	95	105	3.3

TOMOGRAFÍA 2. La López. X = 1125850; Y = 1287700; z = 2880

a	b	m	n	V/I
0	20	5	15	1.09846154
5	25	10	20	3.70149254
0	30	10	20	1.71875
10	30	15	25	4.19354839
5	35	15	25	4.28571429
0	40	15	25	5.85185185
15	35	20	30	2.2625
10	40	20	30	1.62692308
5	45	20	30	1.05263158
0	50	20	30	0.91969697
20	40	25	35	1.12424242
15	45	25	35	0.70491803
10	50	25	35	0.56666667
5	55	20	40	1.06666667
0	60	20	40	1.07462687
25	45	30	40	1.33333333
20	50	30	40	0.43611111
15	55	30	40	0.27837838
10	60	30	40	0.19189189
5	65	25	45	0.53333333
0	70	25	45	0.63768116
30	50	35	45	1.42857143
25	55	35	45	0.975
20	60	35	45	0.81578947

15	65	35	45	0.8358209
10	70	35	45	0.77142857
5	75	35	45	0.79344262
0	80	35	45	0.65405405
35	55	40	50	1.05432099
30	60	40	50	0.62352941
25	65	40	50	0.5
20	70	35	55	1.17460317
15	75	35	55	1.02631579
10	80	35	55	1.02777778
5	85	35	55	1.11111111
0	90	35	55	1.04545455
40	60	45	55	1.46976744
35	65	45	55	0.80952381
30	70	45	55	0.57317073
25	75	40	60	0.90909091
20	80	40	60	0.8091954
15	85	40	60	0.75581395
10	90	40	60	0.88125
5	95	40	60	0.83809524
0	100	40	60	0.74117647
45	65	50	60	1.7027027
40	70	50	60	1.09302326
35	75	50	60	1.09411765
30	80	50	60	0.80898876
25	85	50	60	0.74725275
20	90	50	60	0.80769231
15	95	50	60	0.75
10	100	50	60	0.80606061
5	105	50	60	0.79393939
0	110	50	60	0.71944444
50	70	55	65	1.29268293
45	75	55	65	1.00277778
40	80	55	65	0.91666667
35	85	55	65	0.88235294
30	90	55	65	0.67428571
25	95	55	65	0.64871795
20	100	55	65	0.703125
15	105	50	70	0.46756757
10	110	50	70	0.54054054
5	115	50	70	0.48787879
0	120	50	70	0.44736842
55	75	60	70	0.86904762
50	80	60	70	0.38571429
45	85	60	70	0.30222222

40	90	60	70	0.17
35	95	55	75	0.30263158
30	100	55	75	0.35294118
25	105	55	75	0.48888889
20	110	55	75	0.54761905
15	115	55	75	0.54761905
10	120	55	75	0.57894737
60	80	65	75	0.89230769
55	85	65	75	0.61219512
50	90	65	75	0.3925
45	95	65	75	0.27119048
40	100	60	80	0.79487179
35	105	60	80	0.55189873
30	110	60	80	0.40652174
25	115	60	80	0.3125
20	120	60	80	0.2952381
65	85	70	80	1.8275
60	90	70	80	1.27027027
55	95	70	80	1.07058824
50	100	70	80	0.91176471
45	105	70	80	0.61538462
40	110	70	80	0.58157895
35	115	70	80	0.58095238
30	120	70	80	0.51521739
70	90	75	85	1.48705882
65	95	75	85	1.03797468
60	100	75	85	0.91666667
55	105	75	85	0.68172043
50	110	75	85	0.73170732
45	115	75	85	0.58979592
40	120	75	85	0.62727273
75	95	80	90	0.9547619
70	100	80	90	0.57142857
65	105	80	90	0.34090909
60	110	80	90	0.23958333
55	115	80	90	0.18315789
50	120	80	90	0.16829268
80	100	85	95	0.99746835
75	105	85	95	0.43406593
70	110	85	95	0.30434783
65	115	85	95	0.26236559
60	120	85	95	0.23
85	105	90	100	1.10853659
80	110	90	100	0.7311828
75	115	90	100	0.51428571

70	120	90	100	0.40898876
90	110	95	105	1.1
85	115	95	105	0.93670886
80	120	95	105	0.74047619
95	115	100	110	1.08765432
90	120	100	110	0.46
100	120	105	115	1.03536585

TOMOGRFÍA 3. Rosedal. X = 1126950.0000; Y = 1288050.0000; Z = 2880

A	B	M	N	V/I
	0	20	5	15 12.9
	5	25	10	20 22.175
	0	30	10	20 16.44
	10	30	15	25 29.2636364
	5	35	15	25 10.7
	0	40	15	25 8.54285714
	15	35	20	30 16.7111111
	10	40	20	30 6.46
	5	45	20	30 3.45454545
	0	50	20	30 3.81333333
	20	40	25	35 4.27272727
	15	45	25	35 8.16
	10	50	25	35 3.52
	5	55	25	35 2.06666667
	0	60	25	35 1.15714286
	25	45	30	40 3.71818182
	20	50	30	40 6.35
	15	55	30	40 3.21818182
	10	60	30	40 2.41818182
	5	65	30	40 2.03636364
	0	70	30	40 2.3
	30	50	35	45 18.8181818
	25	55	35	45 4.87692308
	20	60	35	45 5.4
	15	65	35	45 2.88
	10	70	35	45 2.50909091
	5	75	35	45 3.25714286
	0	80	35	45 4.08
	35	55	40	50 26.5692308
	30	60	40	50 4.78333333
	25	65	40	50 3.93333333

20	70	40	50	3.28888889
15	75	40	50	2.70666667
10	80	40	50	2.73333333
5	85	40	50	2.6
0	90	40	50	5.06
40	60	45	55	21.8923077
35	65	45	55	8.53333333
30	70	45	55	6.16
25	75	45	55	4.91111111
20	80	45	55	3.27777778
15	85	45	55	4.96
10	90	45	55	2.5
5	95	45	55	2.17142857
0	100	45	55	3.7875
45	65	50	60	16.2363636
40	70	50	60	5.33076923
35	75	50	60	5.10857143
30	80	50	60	4.12
25	85	50	60	2.31833333
20	90	50	60	3.52
15	95	50	60	1.48615385
10	100	50	60	1.26375
5	105	50	60	1.03461538
0	110	50	60	2.08714286
50	70	55	65	19.1222222
45	75	55	65	5.55555556
40	80	55	65	2.70307692
35	85	55	65	3.16
30	90	55	65	1.612
25	95	55	65	1.125
20	100	55	65	1.09384615
15	105	55	65	1.04615385
10	110	55	65	0.96857143
5	115	55	65	1.08333333
0	120	55	65	1.37857143
55	75	60	70	20.2444444
50	80	60	70	7.77777778
45	85	60	70	7.848
40	90	60	70	3.50769231
35	95	60	70	3.05692308
30	100	60	70	2.59733333
25	105	60	70	1.886875
20	110	60	70	2.74272727
15	115	60	70	2.79181818
10	120	60	70	2.21642857

60	80	65	75	12.525
55	85	65	75	8.625
50	90	65	75	10.4
45	95	65	75	2.7125
40	100	65	75	2.03636364
35	105	65	75	3.83333333
30	110	65	75	4.22727273
25	115	65	75	3.64615385
20	120	65	75	4.32727273
65	85	70	80	16.4
60	90	70	80	6.97142857
55	95	70	80	2.00333333
50	100	70	80	2.17142857
45	105	70	80	1.67333333
40	110	70	80	1.57142857
35	115	70	80	1.51846154
30	120	70	80	1.59636364
70	90	75	85	15.6666667
65	95	75	85	4.41333333
60	100	75	85	0.58165548
55	105	75	85	0.77469335
50	110	75	85	0.955
45	115	75	85	0.67466667
40	120	75	85	0.55647059
75	95	80	90	9.76923077
70	100	80	90	5.25333333
65	105	80	90	3.14615385
60	110	80	90	4.28
55	115	80	90	2.93333333
50	120	80	90	3.5
80	100	85	95	12.76
75	105	85	95	2.98090909
70	110	85	95	2.05
65	115	85	95	1.468
60	120	85	95	1.614
85	105	90	100	10.34
80	110	90	100	2.59230769
75	115	90	100	1.88333333
70	120	90	100	1.19090909
90	110	95	105	6.80625
85	115	95	105	1.64666667
80	120	95	105	0.99083333
85	115	100	110	7.55833333
80	120	100	110	4.06666667
100	120	105	115	7.66785714

TOMOGRÁFIA 4. La Casita X = 1126225.0250; Y = 1288738.7400; Z = 2660.3430

A	B	M	N	V/I
	0	20	5	15 6.10882353
	5	25	10	20 5.65151515
	0	30	10	20 1.9
	10	30	15	25 6.54705882
	5	35	15	25 1.92
	0	40	15	25 0.88344828
	15	35	20	30 6.51071429
	10	40	20	30 3.53793103
	5	45	20	30 2.25
	0	50	20	30 2.31851852
	20	40	25	35 7.47826087
	15	45	25	35 1.92
	10	50	25	35 1.34068966
	5	55	25	35 1.02153846
	0	60	25	35 0.76222222
	25	45	30	40 7.27692308
	20	50	30	40 3.3
	15	55	30	40 1.93333333
	10	60	30	40 1.30153846
	5	65	30	40 1.01714286
	0	70	30	40 0.98333333
	30	50	35	45 9.35384615
	25	55	35	45 3.99090909
	20	60	35	45 2.78333333
	15	65	35	45 2.35
	10	70	35	45 2.03076923
	5	75	35	45 1.93846154
	0	80	35	45 1.53571429
	35	55	40	50 7.60909091
	30	60	40	50 2.18846154
	25	65	40	50 1.05136364
	20	70	40	50 0.62846154
	15	75	40	50 0.5325
	10	80	35	55 0.68333333
	5	85	35	55 0.49230769
	0	90	35	55 0.38133333
	40	60	45	55 7.86818182
	35	65	45	55 2.95
	30	70	45	55 1.45923077
	25	75	45	55 1.04636364
	20	80	45	55 0.74846154

15	85	40	60	2.55
10	90	40	60	2.13571429
5	95	40	60	1.94666667
0	100	40	60	1.98571429
45	65	50	60	9.94782609
40	70	50	60	4.23636364
35	75	50	60	3.1
30	80	50	60	2.3
25	85	50	60	2.48181818
20	90	50	60	2.20833333
15	95	50	60	1.9125
10	100	50	60	1.78461538
5	105	50	60	1.81153846
0	110	50	60	1.83076923
50	70	55	65	8.72916667
45	75	55	65	3.19
40	80	55	65	1.71294118
35	85	55	65	1.04583333
30	90	55	65	0.76538462
25	95	50	70	0.92727273
20	100	50	70	0.50115385
15	105	50	70	0.41041667
10	110	50	70	0.43
5	115	50	70	1.085
0	120	45	75	1.09733333
55	75	60	70	11.05
50	80	60	70	4.18947368
45	85	60	70	2.375
40	90	60	70	2.01818182
35	95	60	70	1.56153846
30	100	60	70	1.51583333
25	105	60	70	1.43083333
20	110	60	70	1.3925
15	115	60	70	1.25923077
10	120	60	70	1.082
5	125	60	70	1.13642857
0	130	60	70	1.12285714
60	80	65	75	9.2
55	85	65	75	3
50	90	65	75	1.55545455
45	95	65	75	1.03083333
40	100	65	75	0.88636364
35	105	60	80	0.97727273
30	110	60	80	0.79769231
25	115	60	80	0.75416667

20	120	55	85	1.27307692
15	125	55	85	1.33666667
10	130	55	85	1.24076923
5	135	55	85	1.13642857
0	140	55	85	1.27916667
65	85	70	80	9.76363636
60	90	70	80	2.8
55	95	70	80	1.55
50	100	70	80	0.87
45	105	65	85	1.29636364
40	110	65	85	0.86545455
35	115	65	85	0.72090909
30	120	60	90	0.82
25	125	60	90	0.71714286
20	130	60	90	0.54416667
15	135	60	90	0.475
10	140	60	90	0.4173913
70	90	75	85	9.80909091
65	95	75	85	4.00952381
60	100	75	85	2.67
55	105	75	85	2.1047619
50	110	75	85	1.82857143
45	115	75	85	1.5175
40	120	75	85	1.42666667
35	125	75	85	1.53904762
30	130	75	85	1.24538462
25	135	75	85	1.2656
20	140	75	85	1.34695652
75	95	80	90	12.8153846
70	100	80	90	4.12
65	105	80	90	2.84705882
60	110	80	90	2.24941176
55	115	80	90	2.44714286
50	120	80	90	2.06375
45	125	80	90	2.12933333
40	130	80	90	1.9725
80	100	85	95	1.45636364
75	105	85	95	1.33583333
70	110	85	95	9.305
65	115	85	95	2.92941176
60	120	85	95	1.5
55	125	80	100	1.102
50	130	80	100	0.81714286
45	135	80	100	3.13846154
40	140	80	100	2.73333333

85	105	90	100	2.15789474
80	110	90	100	2.39625
75	115	90	100	7.46666667
70	120	90	100	2.71875
65	125	90	100	1.32352941
60	130	85	105	0.872
55	135	85	105	0.566
50	140	85	105	1.73052632
90	110	95	105	2.44833333
85	115	95	105	1.574
80	120	95	105	10.7777778
75	125	95	105	3.91578947
70	130	95	105	2.21904762
65	135	95	105	2.08
60	140	95	105	1.8225
95	115	100	110	1.436
90	120	100	110	1.6
85	125	100	110	8.86315789
80	130	100	110	3.43636364
75	135	100	110	2.025
70	140	100	110	1.266
100	120	105	115	1.10105263
95	125	105	115	0.94105263
90	130	105	115	11.8142857
85	135	105	115	4.72
80	140	105	115	2.86666667
105	125	110	120	2.4
100	130	110	120	1.944
95	135	110	120	10.77
90	140	110	120	5.25333333
110	130	115	125	3.29
105	135	115	125	2.78
100	140	115	125	11.35
115	135	120	130	3.59
110	140	120	130	2.33333333
120	140	125	135	8.53636364

TOMOGRÁFIA 5. La Caiceda. X = 1125848.9070; Y = 1288941.2370; Z = 2537.7760

a	b	m	n	resistencia
	0	20	5	15 1.40625
	5	25	10	20 2.65
	0	30	10	20 1.53548387
	10	30	15	25 2.77704918
	5	35	15	25 1.63773585
	0	40	15	25 0.97619048
	15	35	20	30 2.62033898
	10	40	20	30 1.48857143
	5	45	20	30 1.06341463
	0	50	20	30 0.91805556
	20	40	25	35 2.63666667
	15	45	25	35 0.63484848
	10	50	25	35 0.59733333
	5	55	20	40 1.71428571
	0	60	20	40 1.46478873
	25	45	30	40 2.35820896
	20	50	30	40 0.78644068
	15	55	30	40 0.38707692
	10	60	25	45 1.04745763
	5	65	25	45 1.81818182
	0	70	25	45 1.44444444
	30	50	35	45 1.90517241
	25	55	35	45 1.06031746
	20	60	35	45 0.43245902
	15	65	30	50 1.66551724
	10	70	30	50 1.26315789
	5	75	30	50 1.96097561
	0	80	30	50 1.28653846
	35	55	40	50 1.8
	30	60	40	50 1.11111111
	25	65	40	50 0.52
	20	70	35	55 1.37666667
	15	75	35	55 1.63809524
	10	80	35	55 1.01904762
	5	85	35	55 1.55918367
	0	90	35	55 1.3
	40	60	45	55 2.07323944
	35	65	45	55 1.11666667
	30	70	45	55 0.6375
	25	75	40	60 0.79903846
	20	80	40	60 0.62714286
	15	85	40	60 2.25357143

10	90	40	60	1.57352941
45	65	50	60	2.51612903
40	70	50	60	1.1372549
35	75	50	60	0.47709091
30	80	50	60	0.51714286
35	85	45	65	1.4984127
30	90	45	65	0.7454902
50	70	55	65	1.98225806
45	75	55	65	1.1625
40	80	55	65	0.56266667
35	85	50	70	0.821875
30	90	50	70	1.56538462
55	75	60	70	2.1
50	80	60	70	0.74815789
45	85	60	70	0.47413793
40	90	60	70	0.66458333
60	80	65	75	3.6
55	85	65	75	1.69333333
50	90	65	75	1.244
65	85	70	80	1.95344828
60	90	70	80	1.20816327
70	90	75	85	2.01538462

TOMOGRFIA 6. Finca La Valenciana. X = 1125618.6280; Y = 1289495.9790; Z = 2465.8050

a	b	m	n	resistencia
	0	20	5	15 1.1245283
	5	25	10	20 1.08148148
	0	30	10	20 0.55147059
	10	30	15	25 1.5625
	5	35	15	25 0.85263158
	0	40	15	25 0.58076923
	15	35	20	30 1.20597015
	10	40	20	30 0.76470588
	5	45	20	30 0.38804348
	0	50	15	35 0.59690722
	20	40	25	35 1.30454545
	15	45	25	35 0.64603175
	10	50	25	35 0.39666667
	5	55	20	40 0.82692308
	0	60	20	40 0.77380952
	25	45	30	40 1.38955224
	20	50	30	40 1.03896104
	15	55	30	40 0.78181818
	10	60	25	45 1.29014085
	5	65	25	45 0.58603774
	0	70	25	45 0.43896104
	30	50	35	45 1.60307692
	25	55	35	45 0.66470588
	20	60	35	45 0.38262295
	15	65	30	50 0.67343284
	10	70	30	50 0.62985075
	5	75	30	50 0.39758621
	0	80	30	50 0.33638298
	35	55	40	50 2.0859375
	30	60	40	50 0.87118644
	25	65	40	50 0.49238806
	20	70	35	55 0.32693548
	15	75	35	55 0.75625
	10	80	35	55 0.419
	5	85	35	55 0.58913043
	0	90	35	55 0.41506849
	40	60	45	55 2.36190476
	35	65	45	55 1.55087719
	30	70	45	55 1.2125
	25	75	45	55 0.78648649

20	80	45	55	0.72
15	85	40	60	0.44071429
10	90	40	60	0.350625
45	65	50	60	2.43676471
40	70	50	60	0.84090909
35	75	50	60	0.69354839
30	80	50	60	0.4865625
35	85	45	65	0.87647059
30	90	45	65	0.91212121
50	70	55	65	2.7140625
45	75	55	65	0.95609756
40	80	55	65	0.56972222
35	85	50	70	1.45588235
30	90	50	70	1.06296296
55	75	60	70	2.56333333
50	80	60	70	1.0765625
45	85	60	70	0.58460317
40	90	60	70	0.39606557
60	80	65	75	2.82580645
55	85	65	75	1.0537037
50	90	65	75	0.89433962
65	85	70	80	3.87333333
60	90	70	80	2.45714286
70	90	75	85	2.68392857

ANEXO II

INVENTARIO DE CORRIENTES TRIBUTARIAS

En este apartado se presenta el inventario actualizado y la georeferenciación de la red hídrica de la CERS; de vital importancia en la descripción de los procesos hidrogeológicos y modelamiento hidrológico

- **NOMENCLATURA DE LOS AFLUENTES**

Con el objetivo de poder organizar la información (red hídrica y puntos de muestreo) de forma espacial sencilla para su posterior uso, se deben fijar códigos que no dé lugar a varias interpretaciones y que además sean claros, por esta razón los puntos son jerarquizados a partir de su ubicación en la red hídrica, con la siguiente codificación.



Figura 1. : Nomenclatura utilizada.

K: Consiste en una letra y hace referencia al tipo de punto a identificar, **N** en el caso de los Nacimientos o **C**, para un punto cualquiera que es datado sobre la corriente.

COD: El código está compuesto por tres letras y denota la corriente a la cual pertenece el punto censado, las corrientes principales de la C.E.R.S, y los códigos utilizados son resumidos en la siguiente Tabla

Tabla 2.1: Codificación utilizada para las corrientes en la nomenclatura.

<i>CODIGO</i>	CORRIENTE	<i>CODIGO</i>	CORRIENTE
BNE	Q. Barro Negro	COL	Q. Colmena
CBA	Q. Casa Balcón	FIG	Q. Figueros
CHO	Q. Chorreron	LOP	Q. Lopez
SUC	Q. Río Sucio	REL	Q. Relumbrante

L: Indica la orientación del punto con respecto a la corriente principal , considerando el frente, siempre aguas abajo y denotando con **I** los puntos a Izquierda, **D** los puntos a derecha y **O** los puntos sobre el cauce principal.

X: Se compone por dos números arábigos, que indican el orden de llegada de los afluentes a la respectiva corriente principal, esta numeración se realiza en el sentido de las manecillas del reloj para los puntos localizados a Izquierda, y en sentido contrario para los puntos a la derecha, entendiéndose con un ID = 00, los nacimientos principales.

Y: Este identificador consta de dos números y muestra el orden que ocupa el punto en cuestión dentro de los demás puntos de muestreo, la numeración empieza siempre desde cero (nacimientos), y aumenta aguas abajo en el cauce.

El recorrido de la cuenca se realizó ordenado por corrientes tributarias principales, Chorrerón, Colmena, López, Figueros, Relumbrante, Casa Balcón, Barro Negro y Río sucio.

Una vez se ha ubicado el cauce principal, verificando que el origen de la esorrentía no sea producto de la actividad antrópica como puede ser, mangueras rotas, vertimientos de aguas servidas o fugas en bebederos de animales; se recorre el mismo en búsqueda del Nacimiento, este presenta las siguientes características particulares:

- **Bajo caudal:** Los caudales en los nacimientos, si no se tratan de un afloramiento de agua producto del cambio de litología abrupto, resultan ser muy bajos, inferiores a 0.5 lt/seg, llegando a ser incluso en algunas zonas imposibles de medir.
- **Cambio de litología:** Una de las posibles razones causantes de los afloramientos de agua, es el cambio de conductividad hidráulica provocado por la variación de litología, esta condición se ve reflejada en la aparición súbita de un caudal considerable; en la CERS, el nacimiento que presenta estas condiciones es N.SUC.I.03.00, que está ubicado al este de la cuenca, corresponde a el nacimiento de la segunda corriente que irriga el camino de el Espino a la Cruz, y es originado en el contacto de la formación Girón (parte superior), y Tambor (parte inferior), su caudal es de 0.8 lt/seg.
- **Color ocre-Terracota:** La coloración de las zonas de nacimiento, pueden tomar estas tonalidades por la oxidación de minerales presentes con alto contenido de Fe principalmente
- **Película viscosa:** Algunos nacimientos pueden llegar a presentar películas viscosas tipo tornasol, sobre el agua que exfiltra, producto de actividad biótica, como es caso de algunas familias de algas, que por efectos biofílmicos, dan a las aguas de los nacimientos caracterizados por bajas velocidades, estos colores, esta información se corroboró con el análisis de limnología
- **Bajo contenido de Oxígeno:** se pueden validar con certeza los verdaderos nacimientos, los valores son bajos casi nulos, debido a que el oxígeno es consumido en las reacciones de oxidación que se dan en el subsuelo.

- **Bajo potencial de Redox (Eh) :** El potencial redox es utilizado como indicador en la identificación de los nacimientos, al depender de la cantidad de gas disuelto en el agua, especialmente al oxígeno disuelto, (escaso en aguas de reciente exfiltración), el Eh tiene tendencia a tener valores por bajo de los 100 mV e incluso, hasta negativos.

CARACTERISTICAS GENERALES DE LOS AFLUENTES

Durante la campaña del inventario, se observaron algunas particularidades de los diferentes afluentes, que pueden llegar a influir en el comportamiento hidroquímico, estas observaciones generales se presentan a continuación y se encuentran organizadas por corrientes.

• **CHORRERON**

Por su altura la zona del nacimiento principal del Chorrerón (N.CHO.O.00.00) está cubierto por vegetación de tipo páramo, siendo destinada al pastoreo .

En su recorrido hacia el Río Sucio, el Chorrerón se encuentra encausado por la falla La Cristalina, que pone en contacto el Neis en la margen Izquierda, y en el margen derecha las formaciones Tambor, Rosa Blanca.

Además del nacimiento principal, CHO cuenta con dos nacimientos adicionales, el primero en el sector de la cueva (N.CHO.D.01.00), sobre la formación Tambor y el segundo en el Neiss (N.CHO.I.01.00).

Morfológicamente, CHO se caracteriza por ser la microcuenca que tiene en varios sectores la mayor pendiente de la CERS, convirtiéndola en la subcuenca que

reacciona mas rápido ante cualquier estímulo; además de tener dos caídas, una a la altura de la finca el Alto y otra justo en la entrega a Río Sucio (de 8 y 10 m aproximadamente); aumentando la disponibilidad de oxígeno en el agua.

- **COLMENA**

La Colmena se encuentra en los predios de la finca el Alto, y es alimentada por seis nacimientos, Geológicamente está conformada por las formaciones Tambor, Rosa Blanca y algunos derrubios, en los nacimientos N.COLO.00.00 y N.COL.I.02.00, es común encontrar shales y areniscas de la formación tambor con la coloración rojiza del óxido de Fe, presente principalmente en las areniscas. En el último tramo del cauce de la colmena presenta incrustaciones, formadas de caliche , por otra parte en las zonas aledañas al cauce existen deslizamientos en áreas de shales, con coloraciones que van de negro a morado, con trazas verdes de Magnesio que supone un grado considerable de meteorización.

- **LÓPEZ**

La quebrada López se encuentra ubicada en la finca, que lleva este mismo nombre, desde su nacimiento, a una altura de 2990 msnm, hasta su unión con el Río Sucio, López es afectada por varios agentes externos, que pueden llegar a alterar el comportamiento y composición de sus aguas, estos factores se relacionan a continuación:

- A una altura de 2.970 msnm, al lado Izquierdo del cauce principal, se encontró una conducción de agua, proveniente del chorrerón que le aporta a la Q. López un importante caudal (0.3 lt/seg), mezclando de esta forma las propiedades de estas dos corrientes al ponerlas en contacto, (ver cauce en rojo en la Foto 2.5).
- El cauce se encuentra ubicado en un área destinada al pastoreo, por lo cual es posible que se vean aumentados algunos iones como Potasio, Nitritos y Nitratos,

- Existen cultivos vecinos los cuales pueden aumentar el contenido de potasio, por los fertilizantes empleados.

Por la disposición estructural geológica de López, en la parte alta, esta corriente se convierte en una de las mas complejas e interesantes, en cuanto al tema de la recarga dentro de la CERS, su cabecera se encuentra formada por fallas interestratificadas, la parte media corresponde a depósitos y además es atravesado por varias fallas locales.

- **FIGUEROS**

Figueros está ubicado en un valle colgado, constituido por la formación Tambor, tiene la particularidad de ser una corriente que desaparece el tramo intermedio de su propio cauce, justo en zonas de depósitos hasta la exfiltración final en la parte trasera de la casa del Carbón, donde continua su recorrido hacia Río sucio

- **RELUMBRANTE**

La corriente llamada relumbrante nace a una altura 3140 msnm, en la parte Norte de la CERS en algunos depósitos ubicados sobre la formación Tambor, su exfiltración se produce en una zona de raíces, el caudal de aporte es aproximadamente 0.6 l/seg, sus aguas son utilizadas para el riego y su cauce transcurre en zonas de pastoreo hasta la meseta de depósitos de rosedal

- **CASA BALCÓN.**

El cauce conocido como Casa Balcón, tiene su nacimiento a una altura de 3010 msnm, sobre depósitos, en cuanto a caudal, muy cerca de su nacimiento a una altura de 2990 se aforaron 0.125 l/seg, este caudal es incrementado al transcurrir el cauce por dos nacimientos N.CBA.D.01.00.00 y N.CBA.D.02.00.00, que continúan y son los responsables de las zona saturada en la primera meseta (Rosedal), ubicada en la parte media de la cuenca,

Esta planicie esta compuesta por material de depósito muy suelto y una capa de suelo orgánico bastante gruesa que facilitan el almacenamiento de una cantidad apreciable de agua, ésta agua es encausada por surcos en forma de espina de pescado que sirven de bebederos al ganado al mismo tiempo que la recoge y la conduce junto con la corriente principal del río sucio hacia una cárcava a la segunda meseta.

- **QUEBRADA RÍO SUCIO**

Río sucio se encuentra atravesando la CERS en el sentido Este a Oeste hacia la parte Norte de la misma, el nacimiento principal se encuentra a una altura de 3360 msnm, acompañado por cinco nacimientos cercanos; es el sector de la CERS con mayor densidad de puntos de exfiltración, aspecto que se hace visible también en las zonas vecinas afuera de la cuenca.

En los alrededores del Nacimiento principal de Río Sucio, se puede encontrar tapetes de pequeñas plantas hidrófilas almacenadoras de agua como la sphagnum sp, planta capaz de retener hasta siete veces su peso en agua (Vélez Ma. Victoria, 2005), el N.SUC.O.00.00 se encuentra ubicado sobre Neis, durante el descenso del SUC hacia la meseta de Rosedal, es interceptado por dos nacimientos N.SUC.I.02.00 y N.SUC.I.03.00, el primero llega al Río Sucio por la parte trasera de la casa del Espino; el segundo es el que inunda en dos puntos el camino que conduce del espino a la Laguna y presenta unas características muy particulares, se debe a un cambio en la conductividad hidráulica, causado por el cambio de litología que pone en contacto la formación Girón y algunos depósitos, su cauce no presenta ninguna turbiedad, el fondo es de material limoso de color pardo oscuro, posiblemente por la precipitación del potasio y el hierro producido por la formación Girón

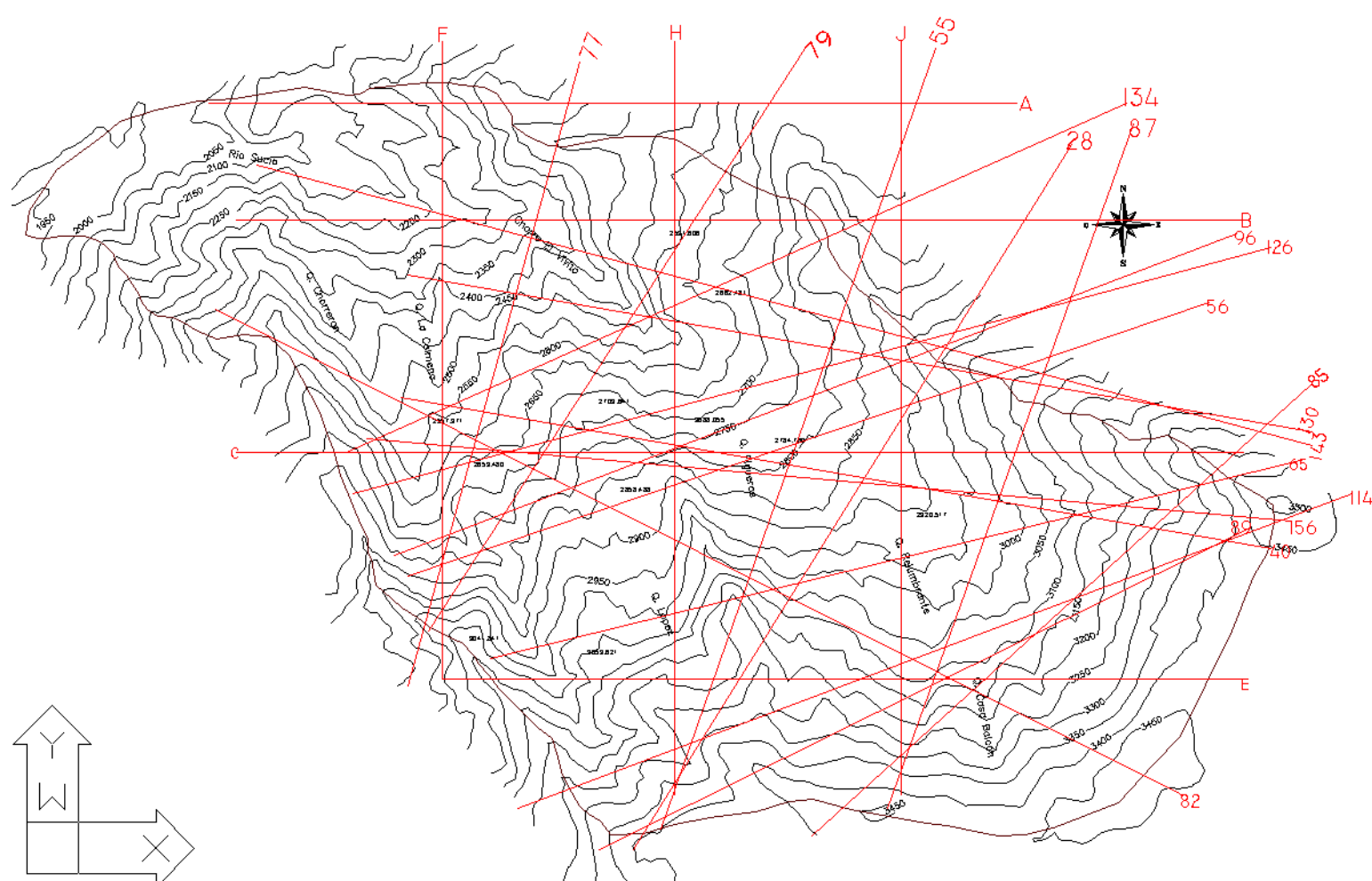
La Quebrada Río Sucio a partir del sector del Espino, se encuentra influenciada por factores antrópicos, debidos a la utilización y vertido de sus aguas al mismo cauce, en usos domiciliarios, de pastoreo y en cultivos.

Luego del Espino, el cauce de Río Sucio continúa por la primera meseta (Rosedal), de forma paralela al cauce de Casa Balcón, hasta el punto de encuentro en una cárcava, producida por la erosión en una zona de depósito, que conduce el flujo a la segunda meseta (el Carbón), compuesta también por material heterogéneo de depósito.

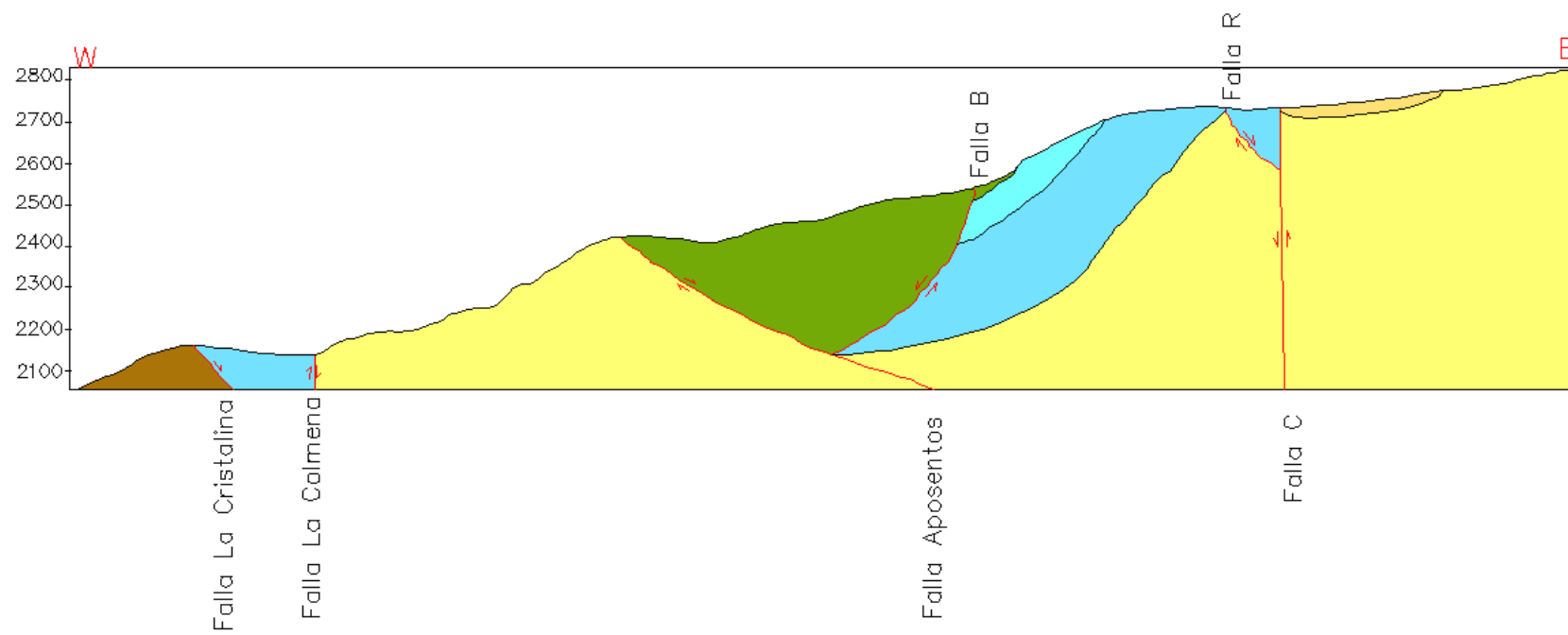
En el sector de la Casita, se considera como un punto neurálgico, en Río Sucio porque muestra alta actividad química reflejada en dos patologías diferentes, el cambio a una coloración oscura y la precipitación de carbonato de calcio.

El cambio de coloración se debe a la solución de material carbonáceo originado de el componente orgánico de la formación paja procedentes de los procesos de inestabilidad de esta zona, que hace que el Chorro el Vivito tome una tonalidad oscura, y a partir de ese sitio sea conocido como Río Sucio

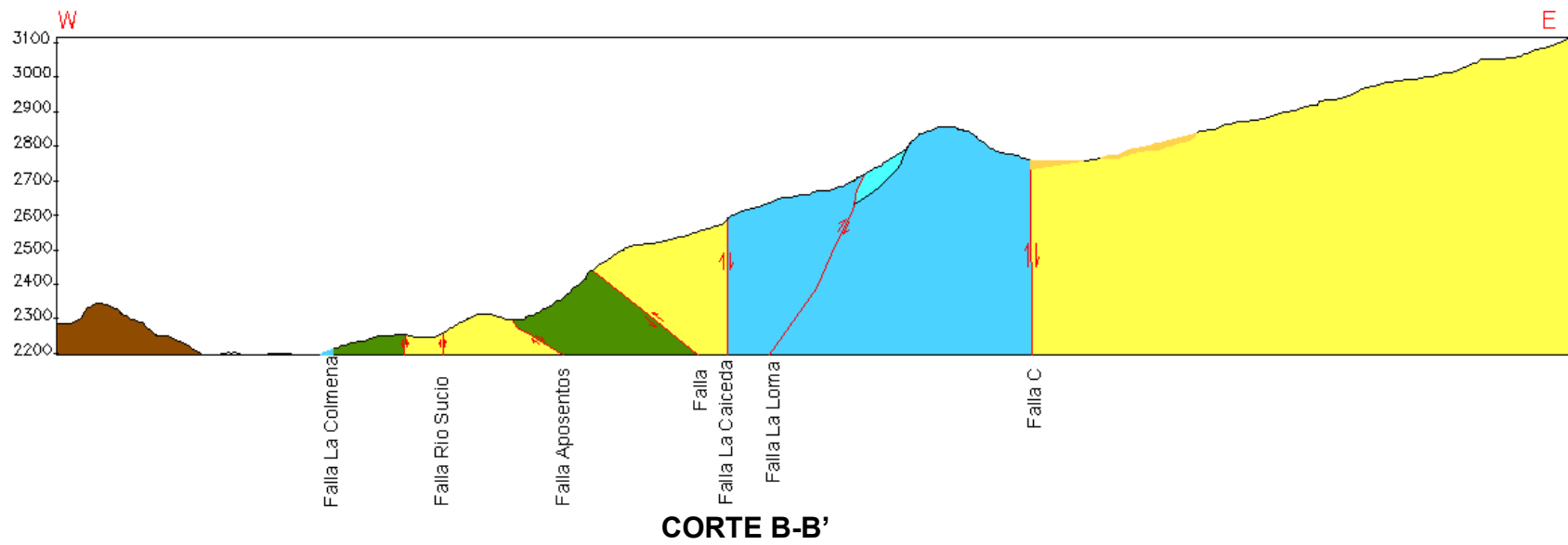
ANEXO III PERFILES GEOLÓGICOS

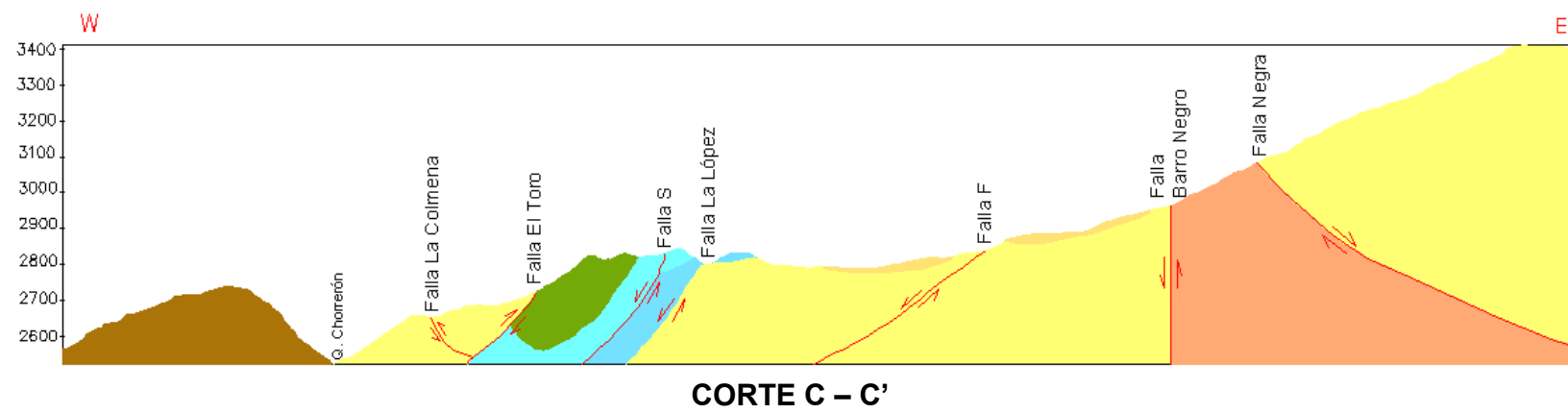


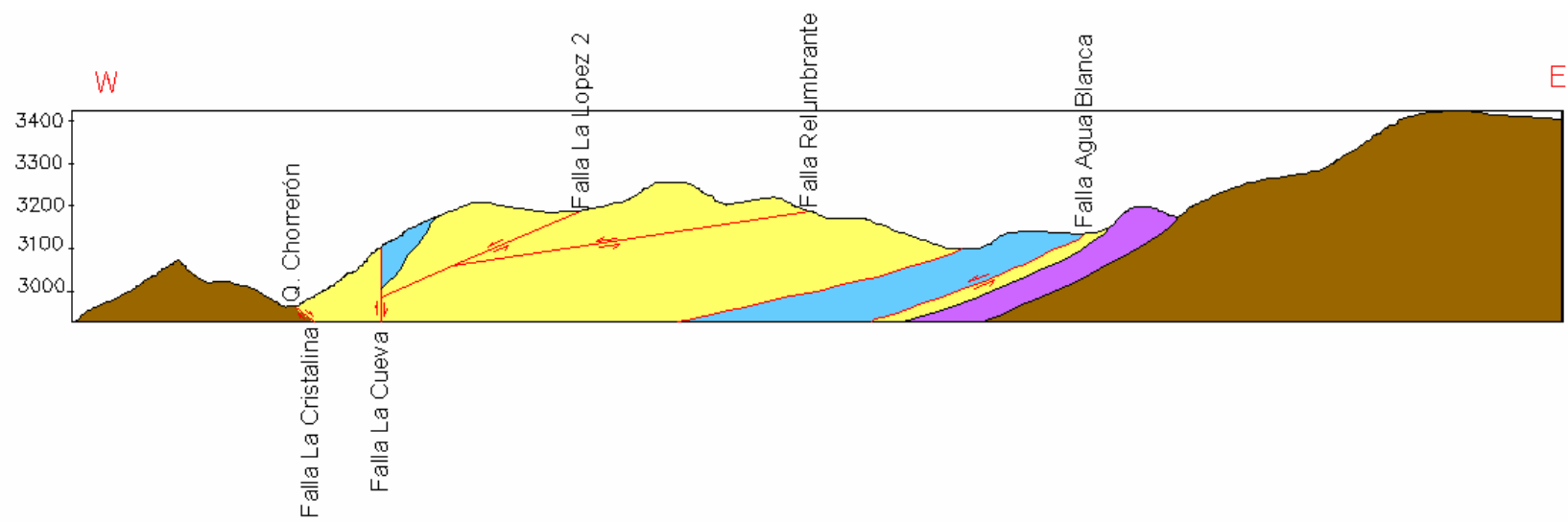
Ubicación Líneas de Corte Geológico



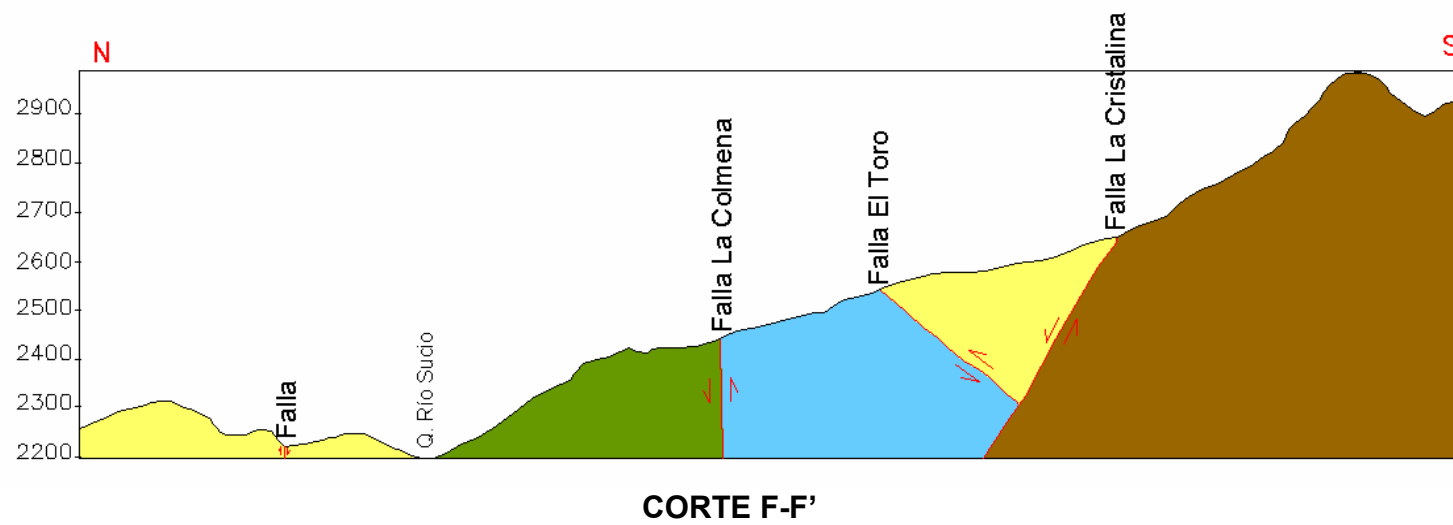
CORTE A-A'

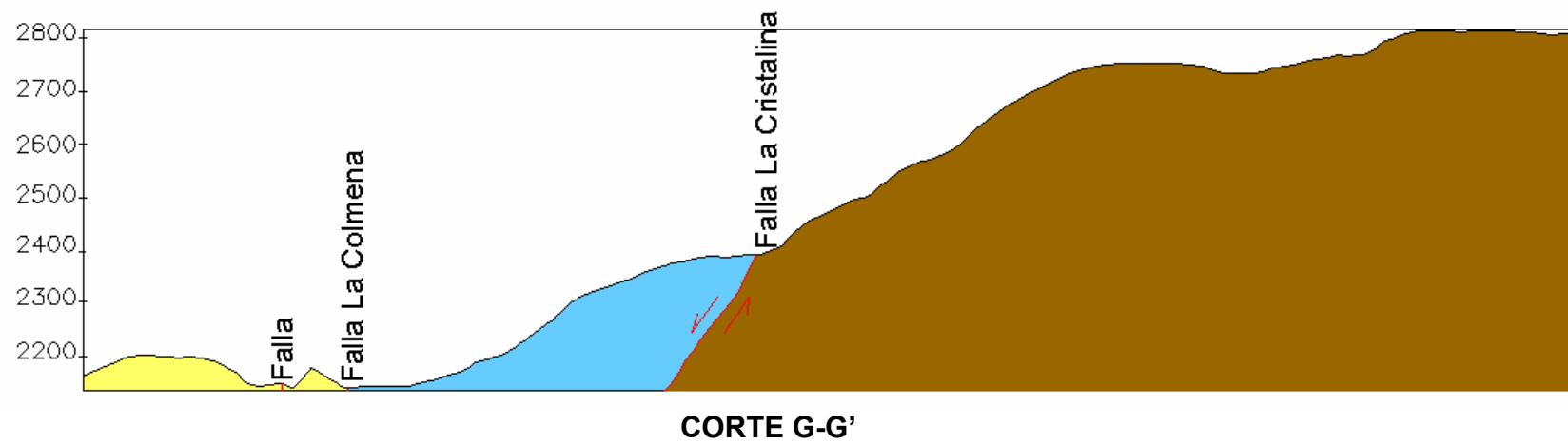


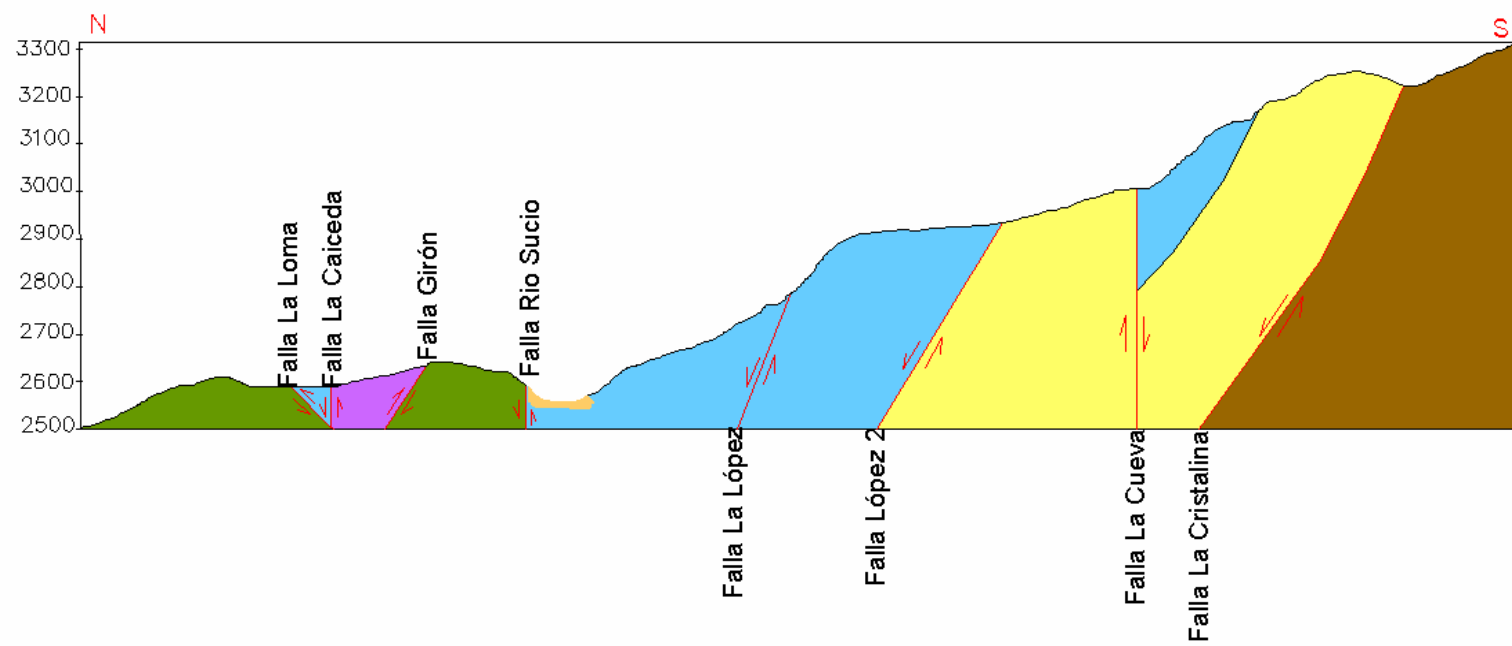




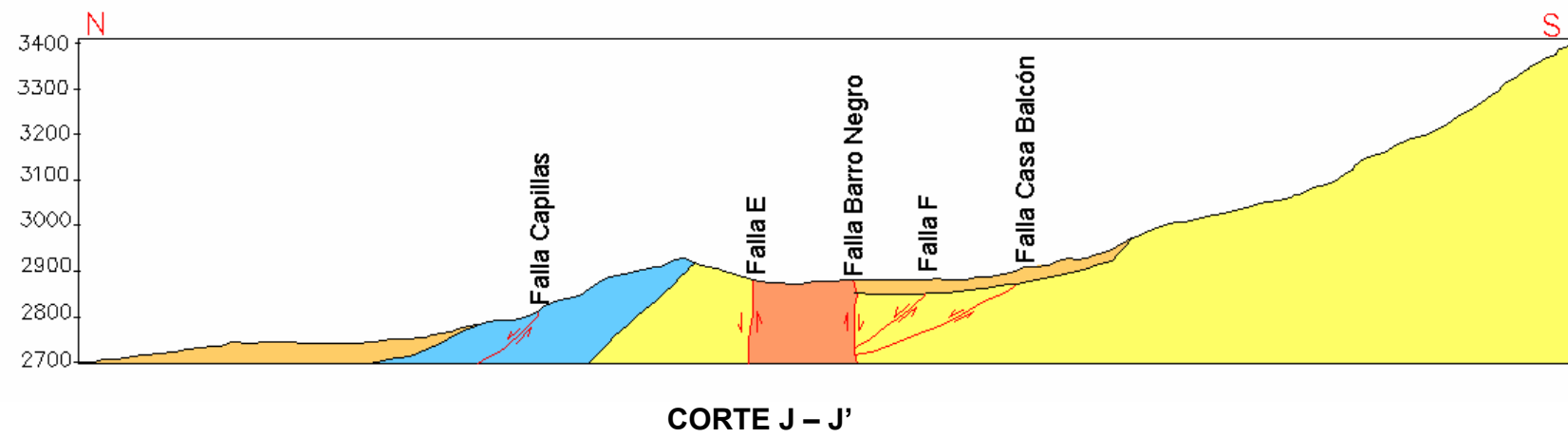
CORTE E-E'

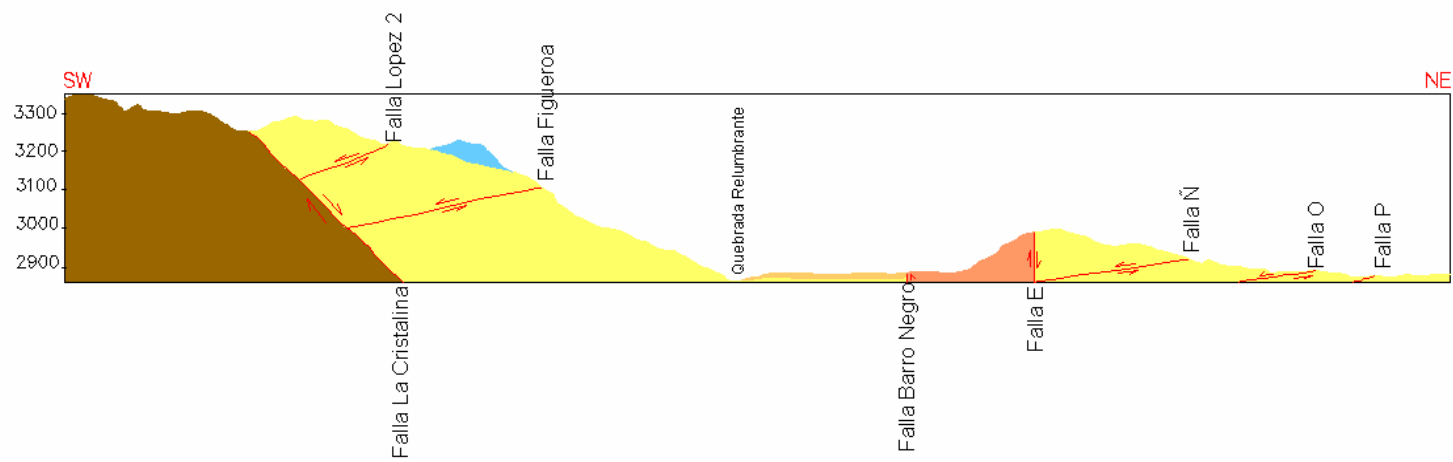




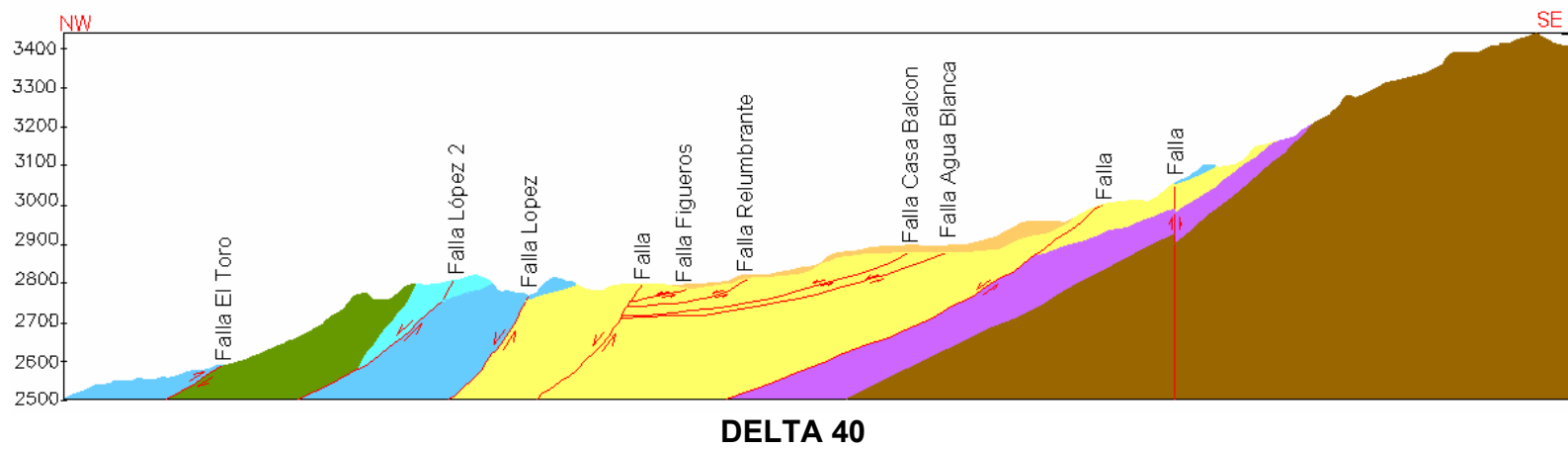


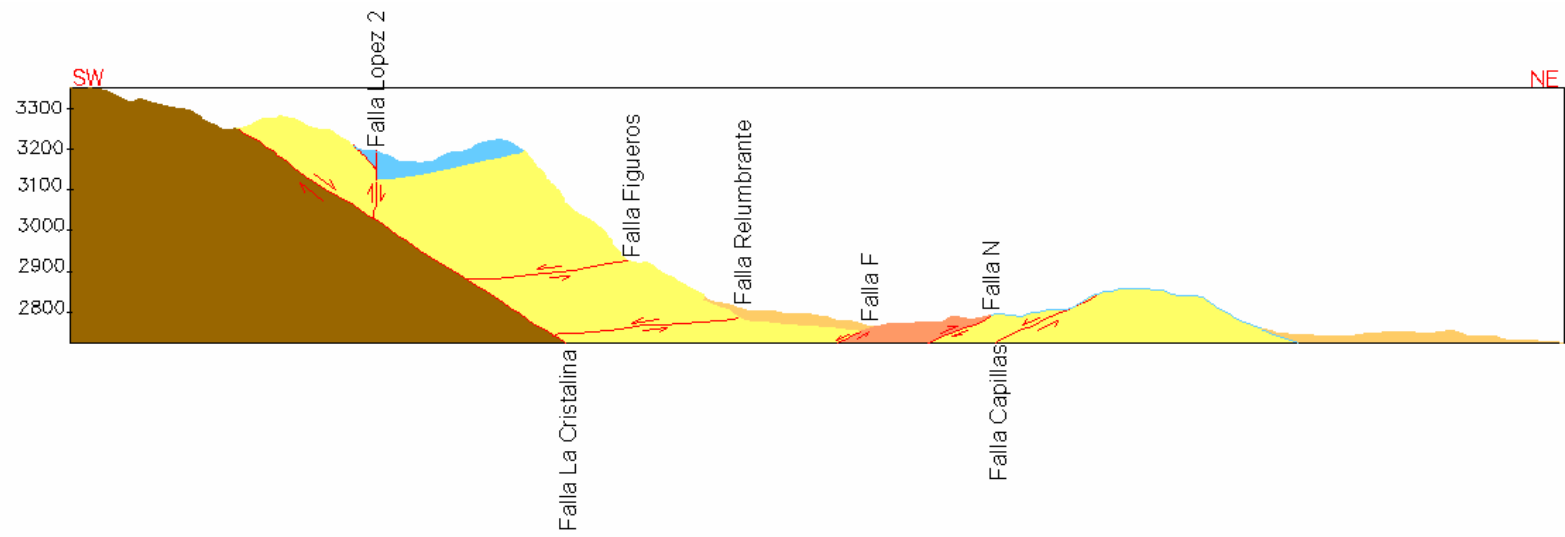
CORTE H-H'



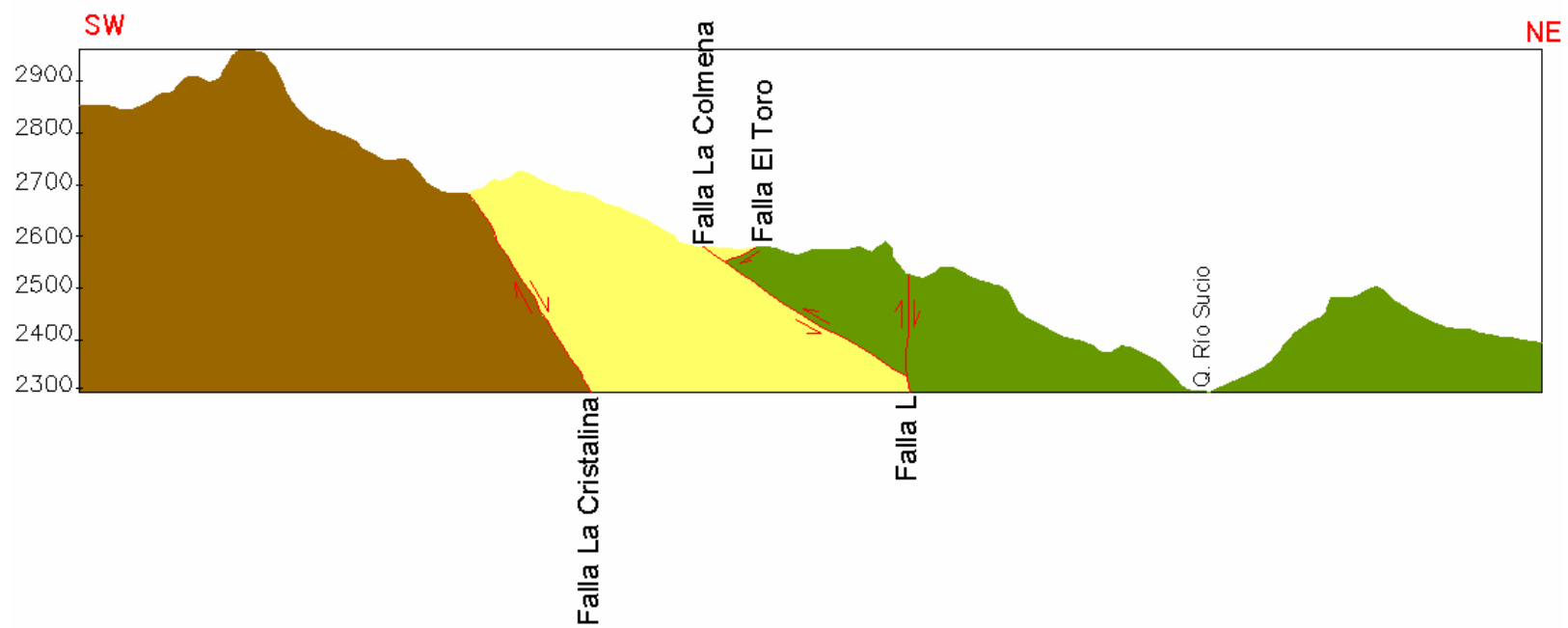


DELTA 28

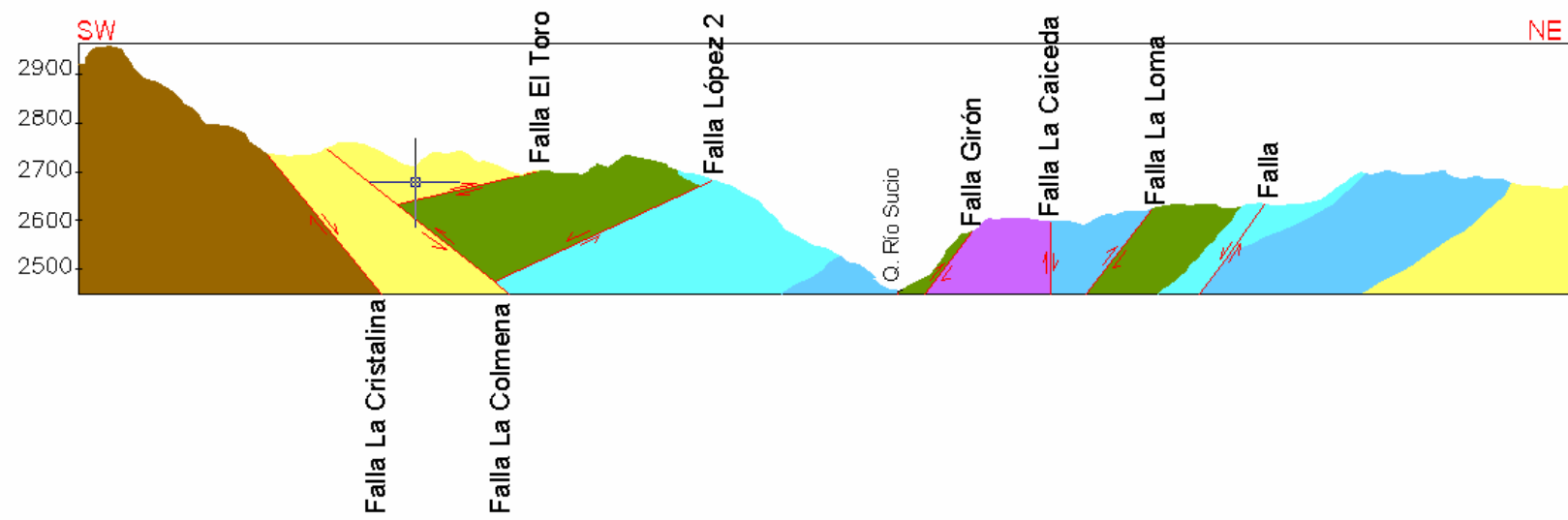




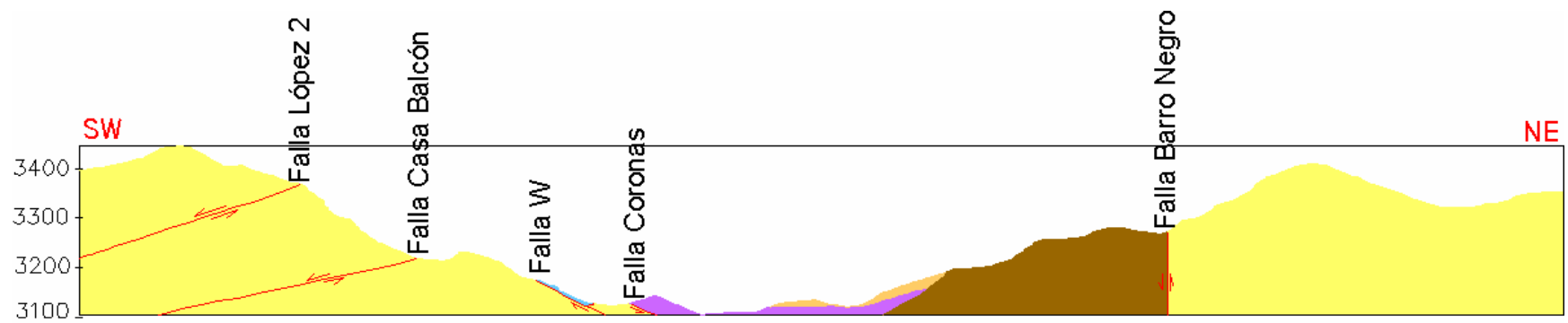
DELTA 55



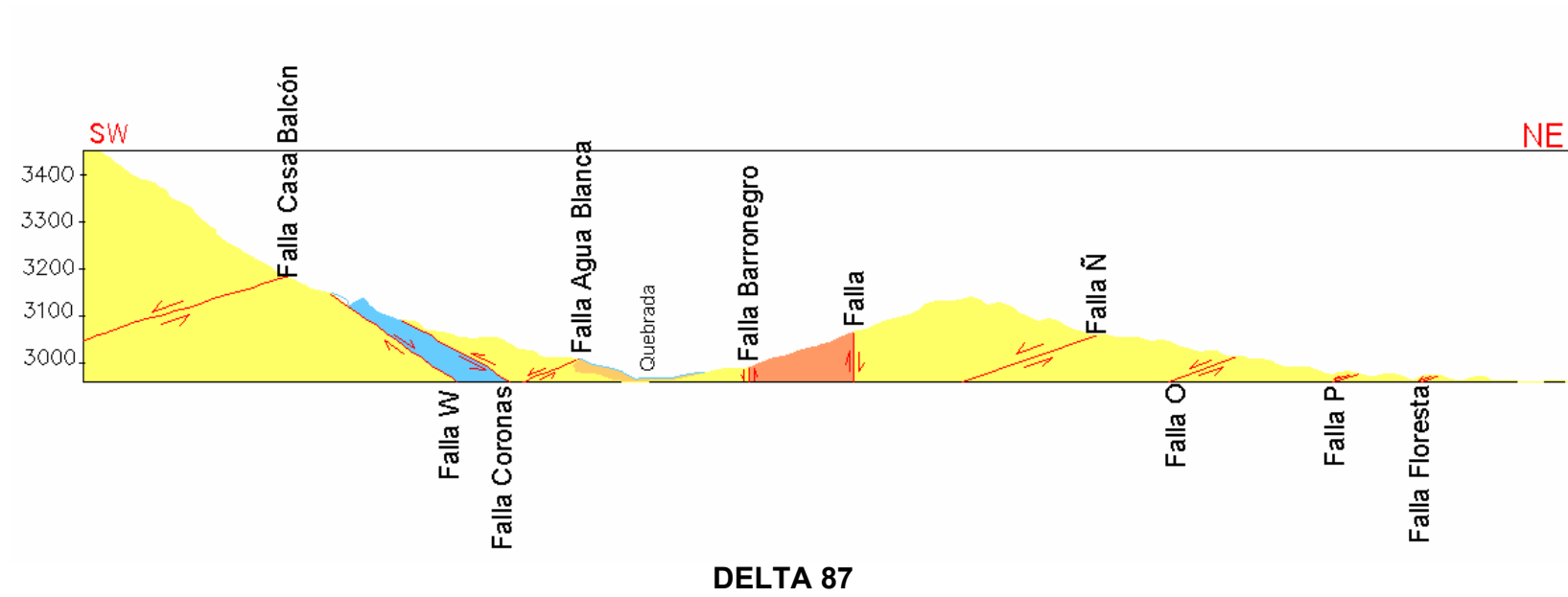
DELTA 77

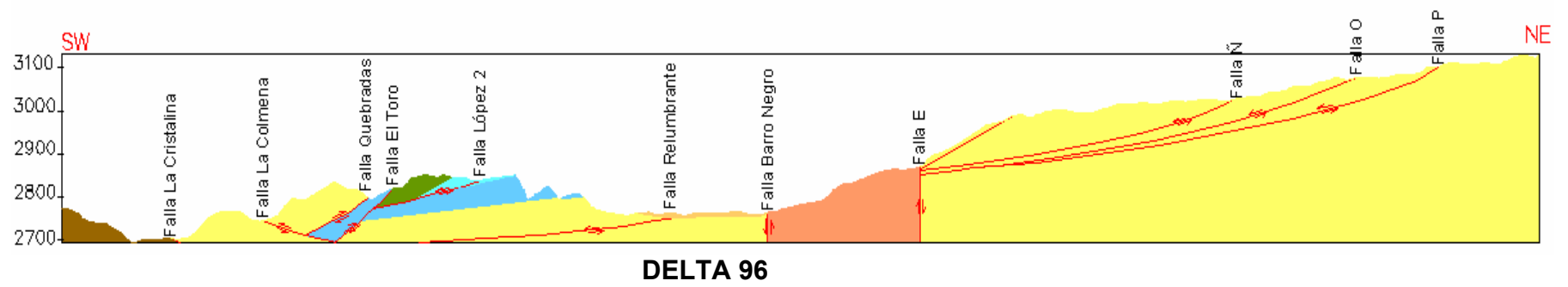


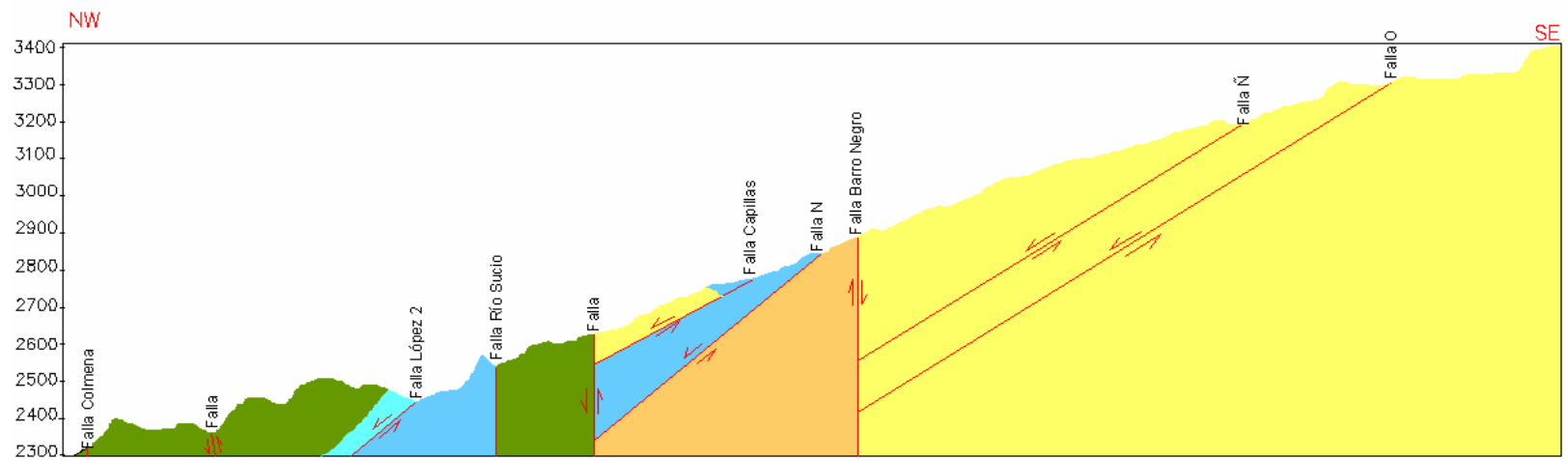
DELTA 79



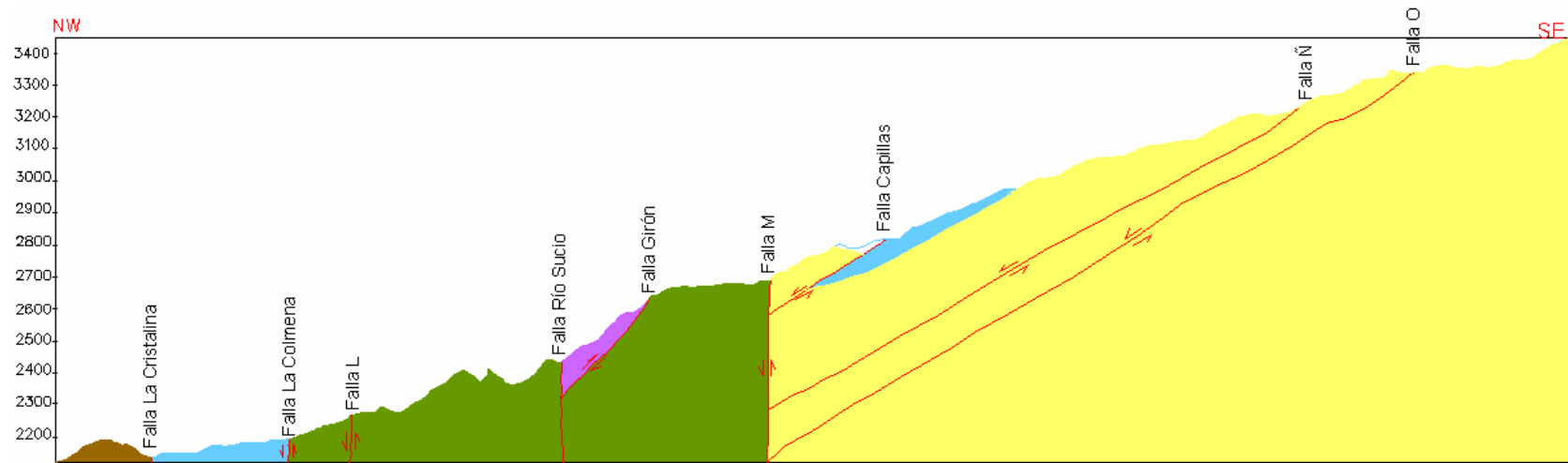
DELTA 85



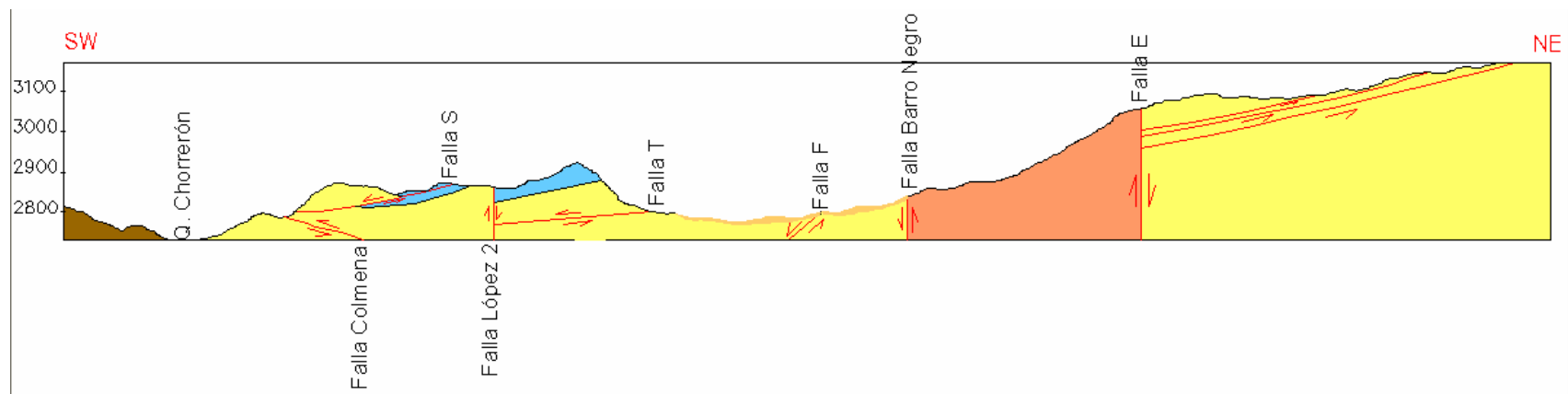




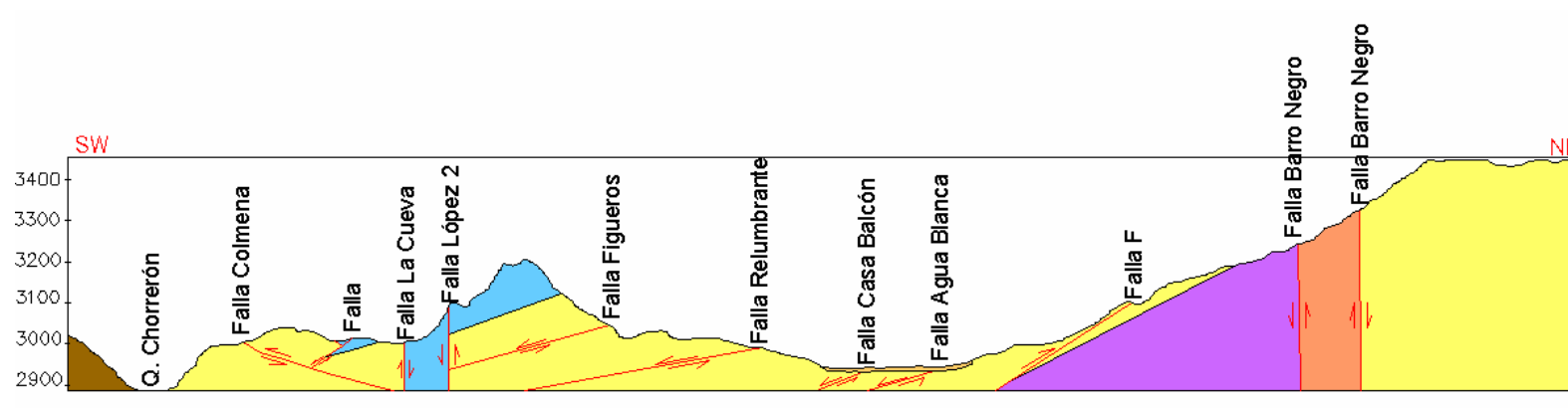
DELTA 130



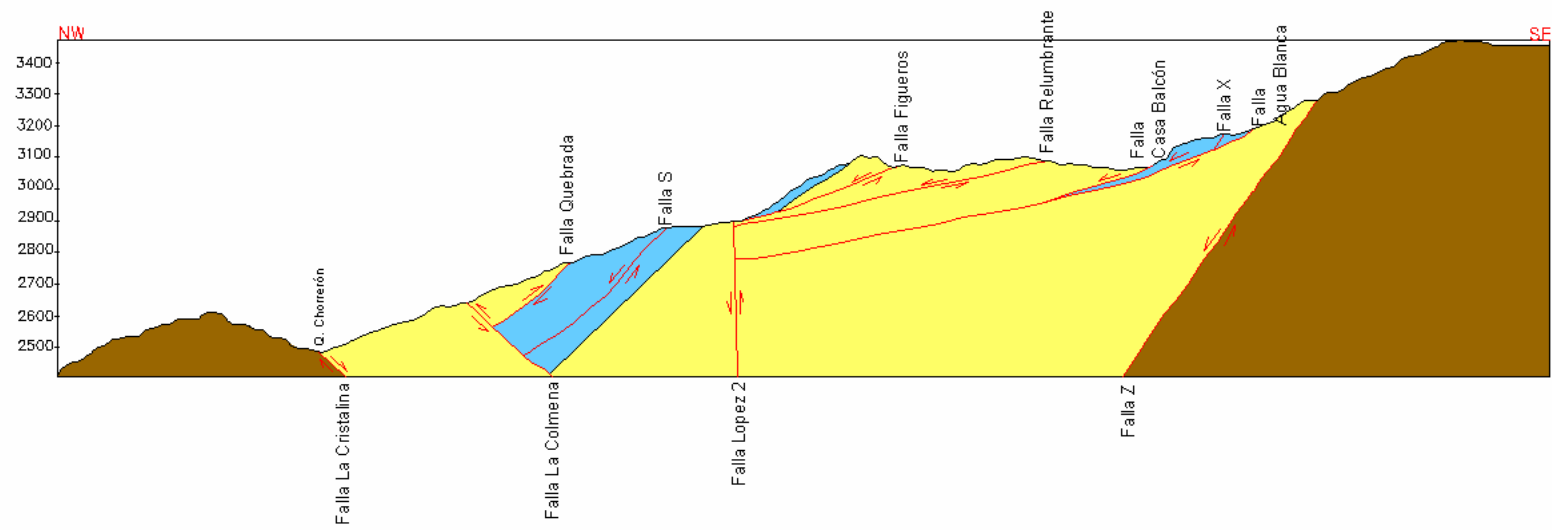
DELTA 143



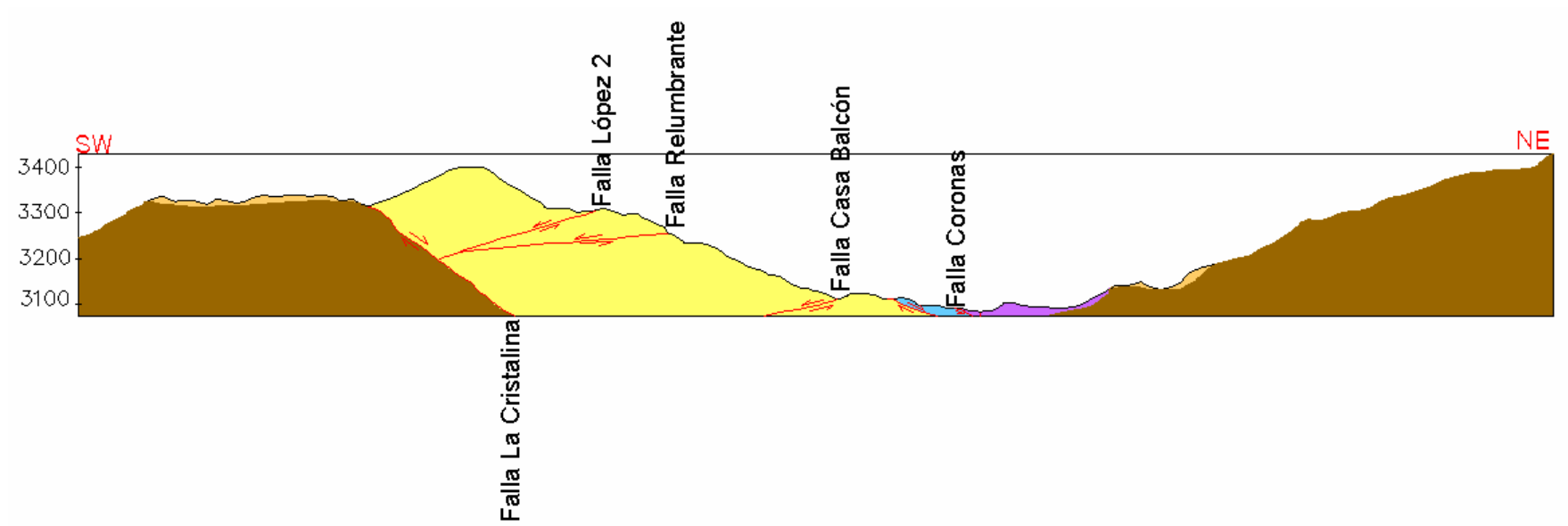
DELTA 56



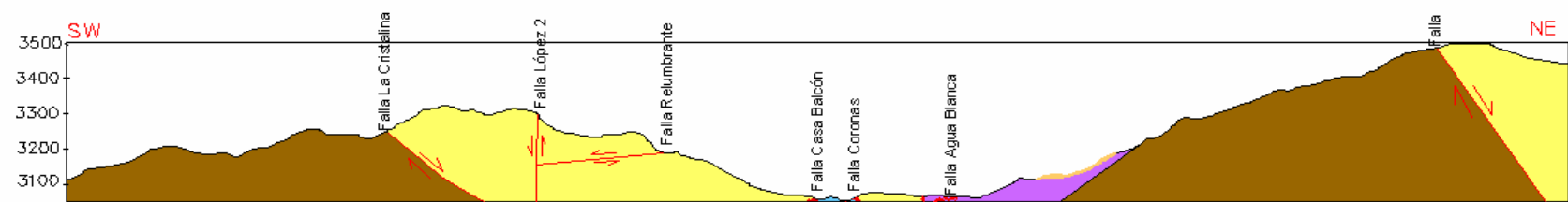
DELTA 65



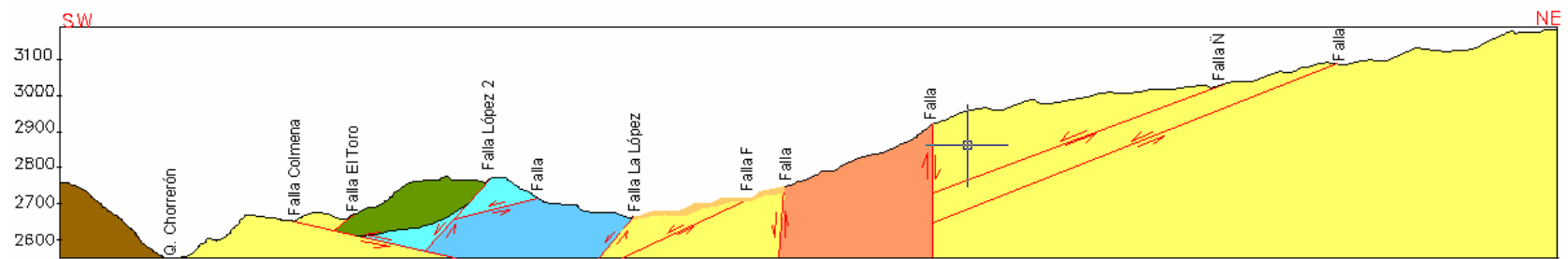
DELTA 82



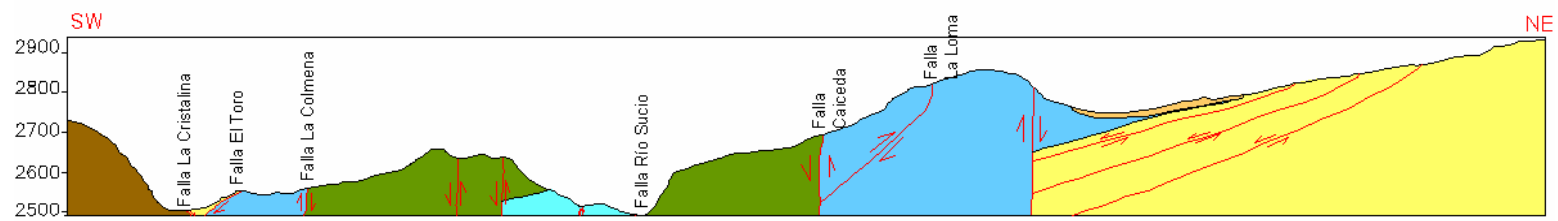
DELTA 89



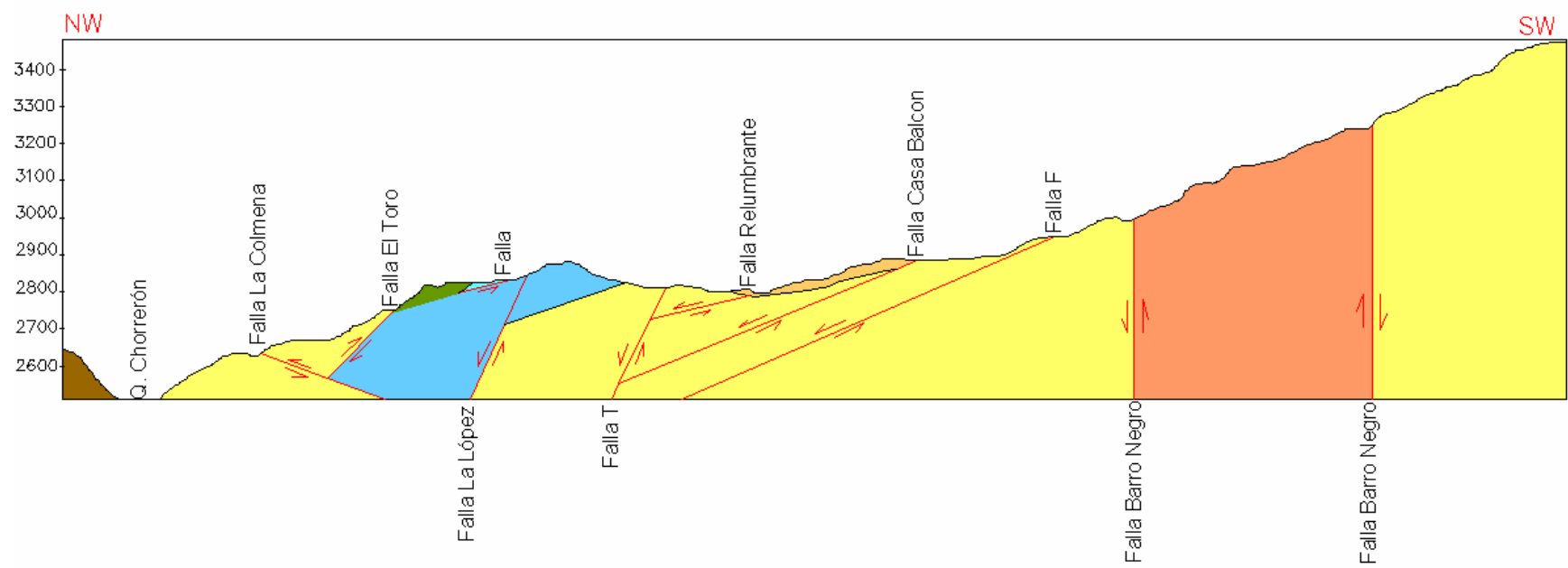
DELTA 114



DELTA 126



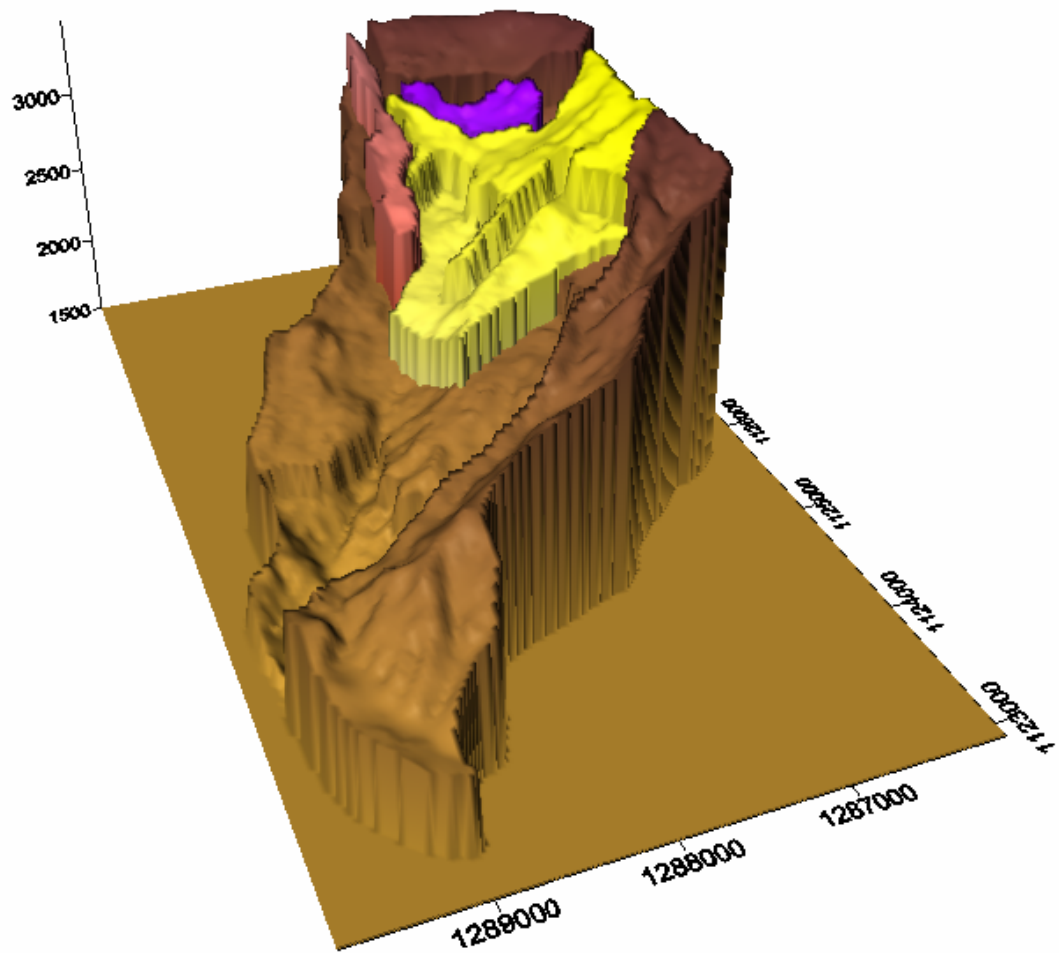
DELTA 134



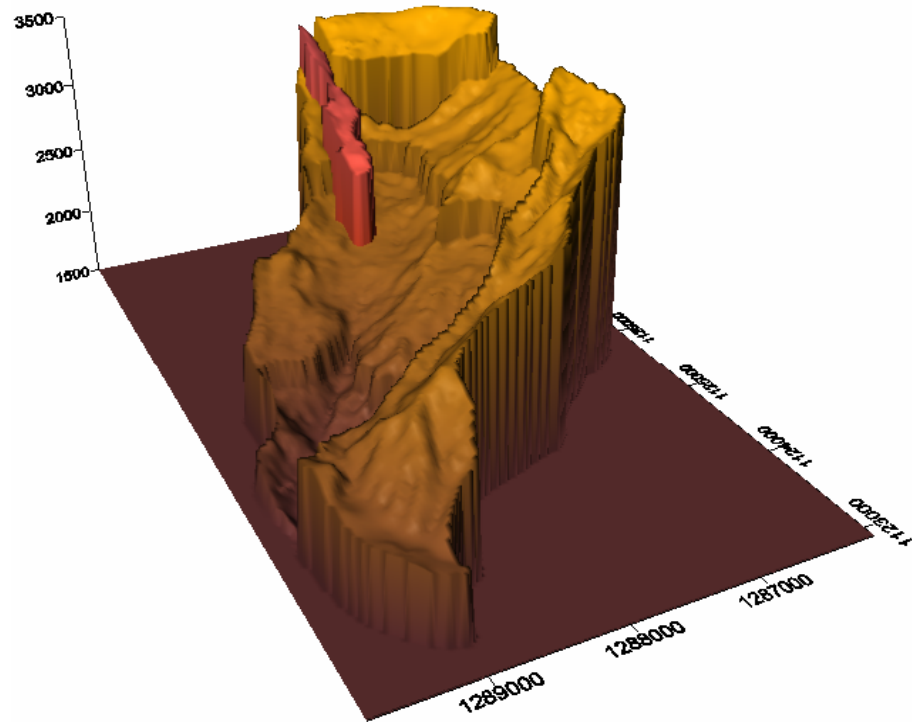
DELTA 156

ANEXO IV

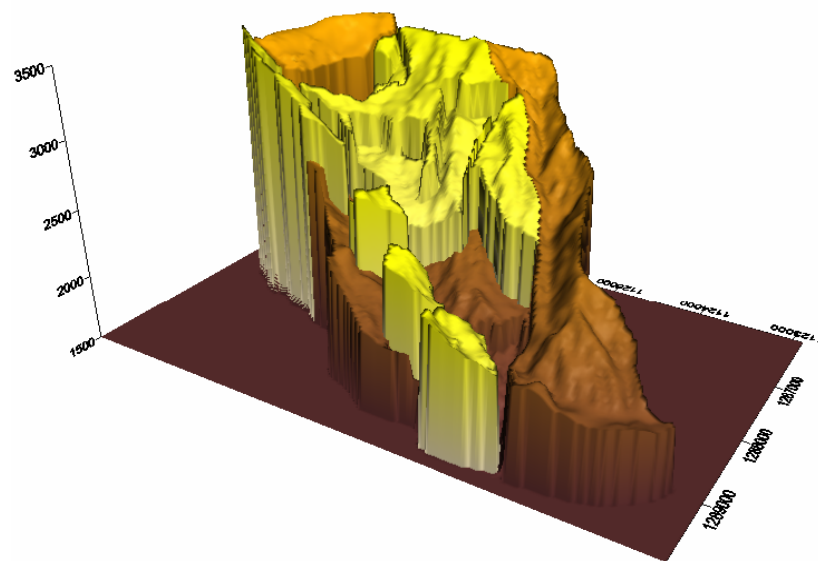
MODELO TRIDIMENSIONAL DE LAS FORMACIONES GIRON, TAMBOR Y CUARZOMONZONITA SOBRE ORTONEIS. (PARTE ALTA DE LA CUENCA)



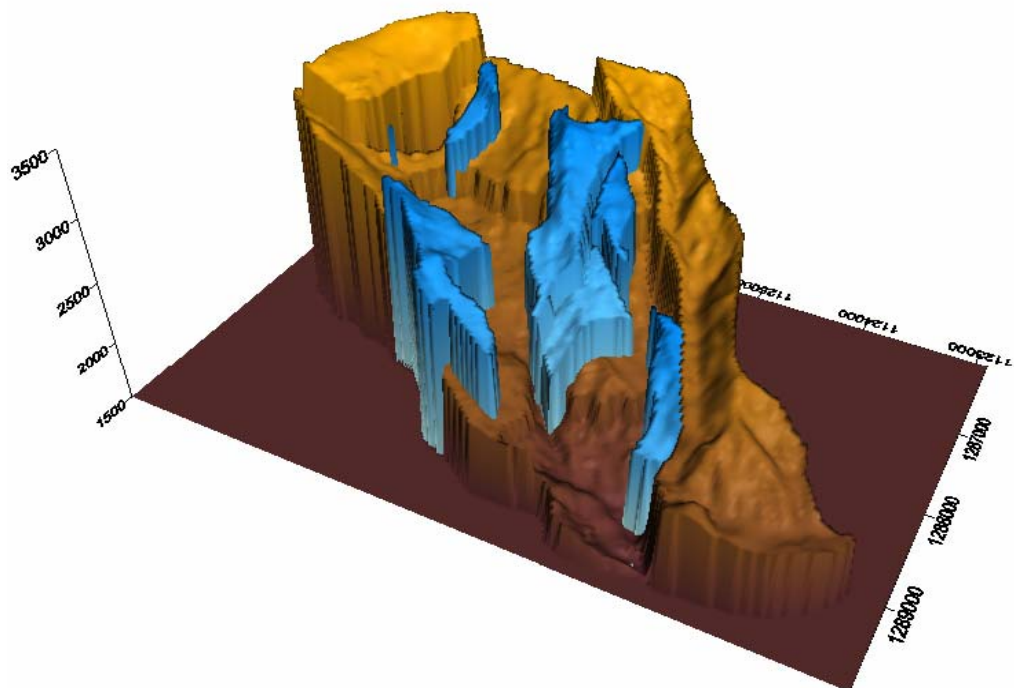
MODELO TRIDIMENSIONAL DEL ORTONEIS Y CUARZOMONZONITA DE SANTA BARBARA



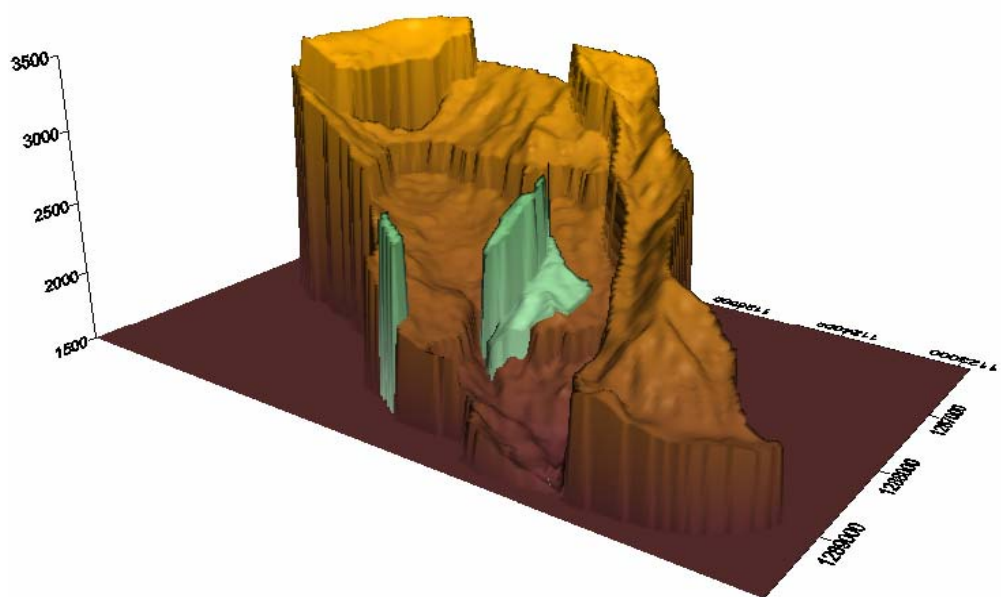
MODELO TRIDIMENSIONAL FORMACIÓN TAMBOR



MODELO TRIDIMENSIONAL FORMACIÓN ROSABLANCA



MODELO TRIDIMENSIONAL FORMACIÓN PAJA



MODELO TRIDIMENSIONAL FORMACIÓN TABLAZO

